

Die SOI-Scheibe der Mikroelektronik als neue Prozessbasis für nanostrukturierte Silizium Membranmasken

Von der Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Jörg Butschke
geboren in Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. B. Höfflinger
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Sandmaier
Tag der mündlichen Prüfung: 21. Februar 2003

Institut für Mikroelektronik Stuttgart

2003

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01 M 2983 B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Für meinen Vater

Inhaltsverzeichnis

Abstract	1
Kurzfassung	2
1 Einleitung	3
1.1 Historischer Rückblick	3
1.1.1 Lithografie	3
1.1.2 Ionenlithografie	4
1.1.3 Stencilmasken	6
1.1.3.1 Splitmasken	7
1.1.3.2 Stepmasken	7
1.1.3.3 Überstrahlungsgittermasken	7
1.1.4 Andere Maskenkonzepte	8
1.2 Allgemeine und spezielle Anforderungen	9
1.2.1 Lagegenauigkeit	9
1.2.2 Strukturgenauigkeit	10
1.2.3 Mechanische Stabilität	11
1.2.4 Thermische Stabilität	11
1.2.5 Lebensdauer	12
1.2.6 Zusammenfassung	12
1.3 Aufgabenstellung	12
2 Der Waferflow Prozess	14
2.1 Prozesskonzepte	14
2.1.1 Membranflow Prozess	14
2.1.2 Semi-Waferflow Prozess	14
2.1.3 Waferflow Prozess	15
2.2 Bekannte Prozessfolgen	15
2.2.1 Ätzung auf Zeit	15
2.2.2 Die p++ Ätzstop Technik	15
2.2.3 Die elektrochemische Ätzstop Technik	17
2.3 Der SOI Waferflow Prozess	18
2.3.1 Prozessierung	18
2.3.1.1 Einstellung Membranspannung	19

2.3.1.2	Abscheidung Nitrid	19
2.3.1.3	Abscheidung Hartmaske	19
2.3.1.4	Lithografie Maskenstruktur	20
2.3.1.5	Strukturierung Hartmaske	20
2.3.1.6	Entlackung	20
2.3.1.7	Ätzung Maskenstruktur	20
2.3.1.8	Lithografie Rückseitenfenster	21
2.3.1.9	Strukturierung Rückseitenfenster	21
2.3.1.10	Membranätzung	22
2.3.1.11	Entfernung Hartmaske und Ätzschutz	22
2.3.2	SOI Ausgangsmaterial	23
2.3.2.1	Gebondetes SOI Material	23
2.3.2.2	Pace'd SDB Material	24
2.3.2.3	SIMOX Material	24
2.3.2.4	SmartCut Material	27
2.3.2.5	ELTRAN Material	27
2.3.2.6	Epitaxie von SOI Material	28
2.3.2.7	Polykristallines SOI Material	29
2.3.2.8	Auswahlkriterien	29
2.3.2.9	Parameter der verwendeten Materialien	31
2.4	Optimierungen	33
2.4.1	Ausgangsmaterial	33
2.4.2	Prozessierung	34
2.4.2.1	Eliminierung der Hartmaske	34
2.4.2.2	Abscheidung Rückseitenschutz	35
2.4.3	Monolithische Membranmasken durch lokales SOI	36
2.5	Prozess Transfer	37
3	Lagegenauigkeit	39
3.1	Problemstellung	39
3.2	Spannungseinstellung	40
3.2.1	Theorie	40
3.2.1.1	Eindimensionales Modell	40
3.2.1.2	Zwei- und dreidimensionales Modell	42
3.2.1.3	Auswahl der Dotierstoffe	42
3.2.1.4	<i>In situ</i> Dotierung von SOI Schichten	43
3.2.2	Messungen zur Membrancharakterisierung	43
3.2.2.1	Membrandickenmessung	43
3.2.2.2	Waferdickenmessung	45
3.2.2.3	Krümmungsmessung	45
3.2.2.4	Spannungsmessung	46
3.2.3	Experimentelle Ergebnisse	49
3.2.4	Erweiterung der Theorie	53
3.2.5	Grenzen der Theorie	55

3.2.6	Integration in den Waferflow Prozess	56
3.2.7	Auswirkung einer anisotropen Spannungsverteilung . .	57
3.2.8	Homogenität der Spannung in der SOI Schicht	59
3.2.9	Stabilität der BOX Schicht im SOI Wafer	59
3.2.10	Polykristallines SOI Material	62
3.3	Vorverzeichnung	63
3.3.1	Therorie	63
3.3.2	Messprinzip	65
3.3.2.1	Messgenauigkeit	66
3.3.2.2	Reproduzierbarkeit	67
3.3.2.3	Lagemessung	68
3.3.3	Bestimmung der Verzeichnung	69
3.3.3.1	Pace'd SDB	69
3.3.3.2	SmartCut 1,8 μ m	70
3.3.3.3	SmartCut 0,1 μ m	70
3.3.3.4	SmartCut 0,18 μ m	71
3.3.3.5	SIMOX	72
3.3.3.6	Lokales SIMOX	74
3.3.3.7	Eltran	74
3.3.4	Verzeichnungsmuster nach SOR	75
3.3.5	Vergleich mit FE-Berechnungen	76
3.3.5.1	Pace'd SDB	77
3.3.5.2	SmartCut 1,8 μ m	77
3.3.5.3	SmartCut 0,1 μ m	78
3.3.5.4	SmartCut 0,18 μ m	78
3.3.5.5	SIMOX	78
3.3.5.6	Lokales SIMOX	79
3.3.5.7	Eltran	79
3.3.6	Bewertung der Materialien	81
3.4	Provozierte Lagefehler	84
4	Spezifische Lösungsansätze	89
4.1	Stencilmasken	89
4.1.1	Stencilmasken für Hochauflösungstests	89
4.1.2	Stencilmasken mit hohem Öffnungsgrad	91
4.2	Membranmasken	92
4.2.1	Ultradünne Membranmasken	92
4.2.2	Membranmasken aus Sondermaterial	94
4.2.3	Membranmasken mit Absorber	96
4.3	Der Doppelwafering Prozess	98
5	Zusammenfassung	102
A	Spannungsmesswerte	104

B Ergebnisse der Lagemessung	107
C Ergebnisse des FE-Modells	113
Tabellenverzeichnis	119
Abbildungsverzeichnis	122
Abkürzungsverzeichnis	123
Literaturverzeichnis	136
Danksagung	137
Publikationsliste	138
Patente	142

Abstract

A process to fabricate high quality structured silicon membrane masks based on commercially available SOI material will be presented.

By contrast to the current micro-system concept, in which membrane thinning is done before membrane structuring, the new micro-electronic approach enables structuring at the wafer level. This allows standard semiconductor industry equipment to be used for most process steps. Special equipment is needed only for the final membrane wet etch process. As the finished mask does not return to the production line, special contamination control is not necessary.

In addition to the optimization done for the overall process, special attention is paid to the topics of stress control and manipulation of membrane foils. This investigation is completed by a review of the mechanical properties of several different SOI materials.

A key topic is the placement accuracy of silicon membranes, which is closely related to the issue of mechanical stress in the film. Applying the typical correction capabilities of the exposure tool allows an overlay accuracy between two masks in the range of 12nm (3σ) to be achieved within a mask field of 50mm x 50mm.

Finally, an overview of process variations, the currently achievable minimum feature size, and the different products realized with this process flow will be given.

Kurzfassung

Vorgestellt wird ein Prozess zur Herstellung von strukturierten Silizium Membranmasken mit hoher Qualität auf Basis von kommerziell verfügbarem SOI Material.

Im Gegensatz zum bisherigen mikrosystemtechnischen Konzept, wonach die Membranätzung vor der Strukturierung erfolgt, erlaubt es der neue, mikroelektronische Prozessansatz, dass die überwiegende Zahl an Arbeitsschritten unter Verwendung von in der Halbleiterindustrie üblichen Anlagen durchgeführt werden kann. Eine Sonderausrüstung ist einzig für die Nassprozesse der Membranätzung erforderlich. Da die Maske nach der Ätzung nicht wieder in die Fertigungslinie zurückkehrt, sind keine speziellen Maßnahmen zur Vermeidung von Kontaminationen erforderlich.

Neben Möglichkeiten zur Optimierung des Herstellungsprozesses wird insbesondere auf die Thematik der Kontrolle und Manipulation der Eigenspannung der Membran eingegangen. Ergänzt wird dies durch die Untersuchung unterschiedlicher SOI Materialien hinsichtlich deren mechanischen Eigenschaften.

Besonderes Augenmerk wird auf die Lagegenauigkeit, die eng mit dem Themengebiet der mechanischen Spannungen in Verbindung steht, gerichtet. Unter Berücksichtigung der für Masken typischen und durch eine Belichtungsanlage korrigierbaren Größen, konnten Überdeckungsgenauigkeiten zwischen zwei Masken in der Größenordnung von 12nm (3σ) in einem Maskenfeld von 50mm \times 50mm erreicht werden.

Abschließend wird ein Überblick über die Möglichkeiten des Prozesses, der derzeit erreichbaren Minimalstrukturen und der bisher damit hergestellten Produkte gegeben.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Historischer Rückblick

1.1.1 Lithografie

Die Übertragung geometrischer Strukturen durch eine Maske wird als Lithografie bezeichnet. Der Name dieser bereits 1798 erfundenen Technik leitet sich aus ihrer ersten Entwicklungsstufe ab, bei der Bilder oder Strukturen mittels einer Steinplatte (griechisch *lithos*) auf eine Oberfläche übertragen wurden [1]. Neben dieser klassischen Form bekam der Begriff kurz nach der Erfindung der integrierten Schaltung (IC) im Jahre 1958 eine weitere Bedeutung: Es entwickelte sich der Zweig der sogenannten Mikrolithografie, ein Ableger, der sich speziell um die Fertigung mikroelektronischer Bauteile bemühte. Hier setzte Anfang der siebziger Jahre eine rasche Entwicklung ein, die noch immer anhält. Die heute in der Mikroelektronik gebräuchlichen Verfahren wurden zumeist in den letzten 35 Jahren entwickelt. Schon früher wurde dabei das Konzept von wiederverwendbaren Masken zur reproduzierbaren Abbildung von Strukturen genutzt. Waren es zu Anfang Emulsionsmasken, so entwickelte sich die Chrom-Quarz-Maske nach ihrer Einführung zu einem Arbeitspferd für die Halbleitersindustrie. Die grundlegenden Anforderungen an derartige 1:1 Masken bestanden darin, dass die Strukturen auf der Maske in ihrer Größe und Lage zueinander dem des abzubildenden Objekts entsprechen. Neben der Maske entwickelte sich auch die Belichtungsmethode weiter: Waren Anfang der siebziger Jahre Kontakt- und Proximitybelichtung [2] üblich, so folgte die "1x projection all-reflective printing" (1974) und schließlich die "1x step-and-repeat projection printing" (1980) [3]. Die wachsenden Anforderungen an die Maske aufgrund der abnehmenden Größe der Minimalstrukturen (MFS) führte Ende der siebziger Jahre zu einer neuen Gerätegeneration, den verkleinernden Systemen. Diese begann mit der "reduction step-and-repeat projection printing" (1978), gefolgt von der "reduction step-and-scan printing" (1989) [3]. Derartige Abbildungsverfahren mit einem Abbildungsmaßstab X:1 erfordern zusätzlich eine Skalierung der Strukturen in der Maske mit ei-

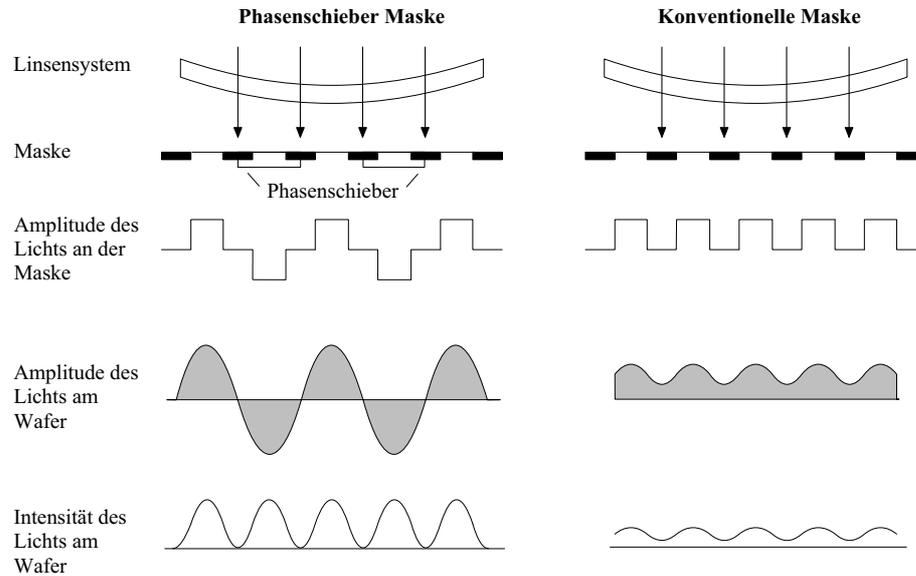


Abbildung 1.1: Wirkungsweise einer Phasen Schieber Maske vom Levenson-Typ

nem entsprechenden Faktor. Heutzutage nimmt die maskenbasierte optische Lithografie bei der Fertigung von integrierten Schaltkreisen eine überragende Position ein, wenngleich ihr Ende mehrfach vorhergesagt wurde. So schrieb die Zeitschrift *Electronics* 1979 über das zu erwartende Ende im Jahre 1985 zugunsten der Elektronenstrahltechnik [4]. Im Jahre 1985 erschien im selben Magazin ein Artikel, in dem erwartet wurde, dass, nachdem die optische Lithografie die Auflösungsgrenze von $0,5 \mu\text{m}$ erreicht hat, sie ab 1994 im großen Stil durch "x-ray step-and-repeat Systeme" ersetzt werden wird [5]. Ungeachtet dieser Prognosen werden heute Bauelemente mit MFS im Bereich von $0,18 \mu\text{m}$ in Serie gefertigt. Möglich wurde dies durch den Übergang zu neuen Beleuchtungsquellen mit kürzeren Wellenlängen, wie beispielsweise dem ArF Excimer Laser mit einer Wellenlänge von 193nm . Gleichzeitig kommen in der Maskentechnik sogenannte *Enhancement Technologien*, wie beispielsweise die in Abbildung 1.1 skizzierte Phasen Schieber Maske (PSM) vom Levenson-Typ, zum Einsatz [6, 7]. Gefertigt werden diese Masken als Mehrschichtsysteme [8]. Das derzeitige Ziel ist, durch eine weitere Reduktion der Wellenlänge auf 157nm (Fluor Ionen Laser) das 70nm Technologieniveau zu erreichen.

1.1.2 Ionenlithografie

Im Zuge der Diskussion um ein bevorstehendes Ende der optischen Lithografie begann weltweit die Suche nach neuen, zukunftssträchtigen Verfahren. Neben der Röntgenlithografie, deren Einsatz für die Mikroelektronik als ers-

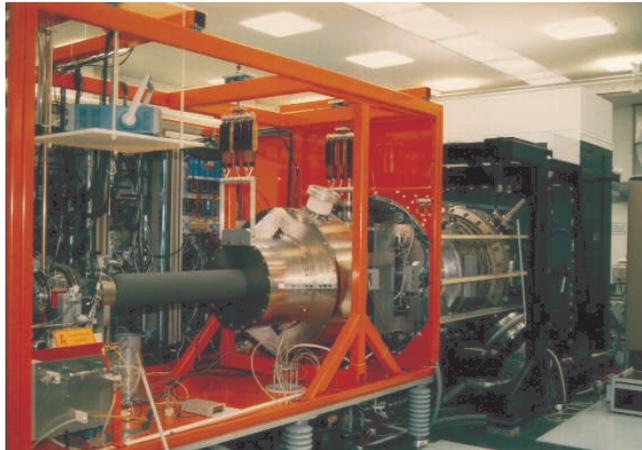


Abbildung 1.2: Der ALPHA-Projektor der GME

tes von H. I. Smith vorgeschlagen [9] und von der IBM stark verfolgt wurde [10], begann 1973 eine Gruppe österreichischer Wissenschaftler der "Rudolf Sacher GmbH" damit, die Möglichkeiten einer projizierenden, verkleinernden Ionenstrahlolithografie zu untersuchen [11, 12, 13, 14]. Die Grundlage hierzu hatte Bernheim [15] bereits Ende der sechziger Jahre mit dem Bau des ersten Ionen-Projektors gelegt. Aus dieser oft umstrittenen Arbeit heraus entstand 1985 die Firma IMS - Ionen Mikrofabrikations Systeme GmbH, Wien [16]. Als erstes Gerät wurde die IPLM-01 gebaut, welche dann 1988 als verbesserte Version und unter dem Namen IPLM-02 an das Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie (ISiT) nach Berlin geliefert wurde. Die heute noch für Lack- und Auflösungsuntersuchungen [17, 18] betriebene Anlage besitzt ein Bildfeld von 2mm x 2mm und arbeitet mit einer etwa neunfachen Verkleinerung. Parallel dazu wurde 1986 mit dem Bau eines Prototypen, dem sogenannten ALPHA-Ionenprojektor, für die Gesellschaft für Mikroelektronik (GME) begonnen, der einerseits universitären Gruppen für ihre Arbeiten zur Verfügung stehen, andererseits aber auch als Referenz und Experimentieranlage für IMS dienen sollte. Nach knapp vierjähriger Bauzeit wurde der Projektor im September 1990 an die GME übergeben, blieb aber weiterhin in den Räumen der Firma IMS und wurde von deren Mitarbeitern betrieben. Der horizontal aufgebaute ALPHA-Projektor (Abbildung 1.2) war für eine zehnfache Verkleinerung der Maskenstrukturen ausgelegt. Es konnten reproduzierbar Strukturen mit minimalen lateralen Abmessungen bis 60 nm realisiert werden [19, 20]. Im weiteren wurde 1992 mit dem Bau eines weiterentwickelten, verkleinernden Ionenprojektors (ALG-1000) für das amerikanische Konsortium "Advanced Lithography Group" [21] begonnen, der jedoch nicht abgeschlossen werden konnte.

Seit 1997 läuft die Entwicklung und der Aufbau eines 4:1 Ionenprojektors PDT (Process Development Tool) mit einem 12,5mm x 12,5mm großen

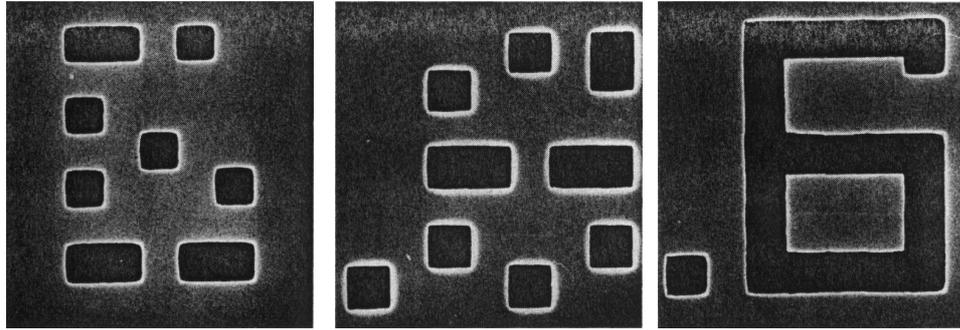


Abbildung 1.3: Belichtung einer in sich geschlossenen Figur mit Hilfe einer Splitmaske: Einzelbelichtung Maske A (links), Einzelbelichtung Maske B (mitte), Doppelbelichtung Maske A und B (rechts) [25]

Bildfeld im europäischen Ionenlithografieprojekt MEDEA T611 [22] unter Leitung von Infineon Technologies AG. Im Jahre 2000 wurden das ionenoptische System (IOS) in Betrieb genommen und erste Belichtungsergebnisse erzielt.

Der Röntgen-, Elektronen- und Ionenlithografie gemeinsam ist, dass der bisher übliche Typ von Masken nicht mehr verwendet werden kann. Anstelle des soliden Quarzträgers tritt nun eine dünne Folie, eine sogenannte Membran. Auch das Material und der Charakter der Absorberschicht muss den neuen Bedürfnissen angepasst werden: Nutzt man beispielsweise im Fall der Röntgenlithografie eine strukturierte Absorberschicht (z.B. Au, Ta, W) auf der Membran, so vereint die Ionenlithografie Träger und Absorber in Form einer strukturierten Membran. Für letztere wird häufig auch der Begriff *Stencil* Maske verwendet, der dem Vokabular des Druckereiwesens [23, 24] entstammt und auch hier im Folgenden verwendet werden soll.

1.1.3 Stencilmasken

Der Aufbau und die Wirkungsweise der Stencilmaske ist analog der klassischen Schablone in der konventionellen Drucktechnik: Informationen werden in Form von Öffnungen in einem Träger hinterlegt. Beim Druckvorgang werden diese Informationen beispielsweise durch Überwalzen mit Farbe auf das zu bedruckende Substrat übertragen. Im Fall der Ionen- oder Elektronenlithografie findet zwar auch ein Materialtransport durch die Maske statt, jedoch kein Materialauftrag. Vielmehr treffen die Teilchen auf ein mit sensitivem Lack beschichtetes Substrat und lösen dort eine chemische Reaktion aus. Durch eine entsprechende Prozessierung lässt sich das latente Bild, wie in der optischen Lithografie, in sichtbare Strukturen umwandeln. Für die praktische Ausführung und Anwendung der Stencilmaske gibt es verschiedene Konzepte [26], die in den folgenden Abschnitten behandelt werden.

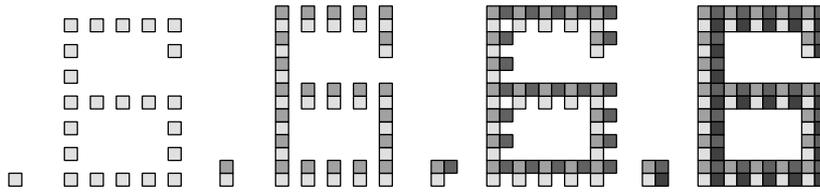


Abbildung 1.4: Belichtung einer in sich geschlossenen Figur mit Hilfe einer Stepmaske: Die Gesamtstruktur entsteht durch eine Vierfachbelichtung derselben Maske

1.1.3.1 Splitmasken

Zu einem der Hauptprobleme der Stencil Technik zählt die Schwierigkeit, in sich geschlossene Strukturen abzubilden, im englischsprachigen Raum als "Doughnut-Problem" bezeichnet. Soll, wie in Abbildung 1.3 dargestellt, die Zahl "6" belichtet werden, so kann dies nicht mit einer einzigen Maske geschehen, sondern muss in zwei Schritten unter Verwendung von Komplementärmasken vor sich gehen. In diesem Beispiel erfolgte die Zerlegung der Struktur nicht allein nach dem Prinzip der minimalen Schnitte, sondern dient darüber hinaus auch der Homogenisierung der Strukturgröße und der Belichtungsdichte in beiden Teilmasken. Mit dieser Methode generell verbunden ist die Gefahr von Anschlussfehlern innerhalb einer Ebene. Im Sinne eines "einfachen Maskenwechsels" wäre es für die Produktion zudem wünschenswert, beide Maskenfelder auf einer entsprechend großen Maske unterzubringen.

1.1.3.2 Stepmasken

Eine spezielle Art der Splitmaske ist die Stepmaske. Hierbei wird die abzubildende Struktur in der Maskenebene in eine regelmäßige Anordnung von Unterstrukturen zerlegt, wobei für deren Abmessung gilt

$$l_{\text{Unterstruktur}} = \frac{l_{\text{Minimalstruktur}}}{2} \quad (1.1)$$

Entsprechend der Darstellung in Abbildung 1.4 wird dann die Gesamtstruktur durch einen 4-fach-Step zusammengesetzt. Die hierzu erforderliche Mehrfachbelichtung einundderselben Maskenöffnung kann dabei sowohl mechanisch durch eine Bewegung von Wafer oder Maske als auch elektronisch durch eine Verschiebung des Bildes realisiert werden. Ein frühes Beispiel der erfolgreichen Anwendung dieses Konzepts findet sich in Jähn et al. [27] und Kirsch et al. [28].

1.1.3.3 Überstrahlungsgittermasken

Alternativ zu den bisherigen Ansätzen kann der Struktur ein feines Stützgitter überlagert werden, dessen Stegbreite bereits unter dem Auflösungs-

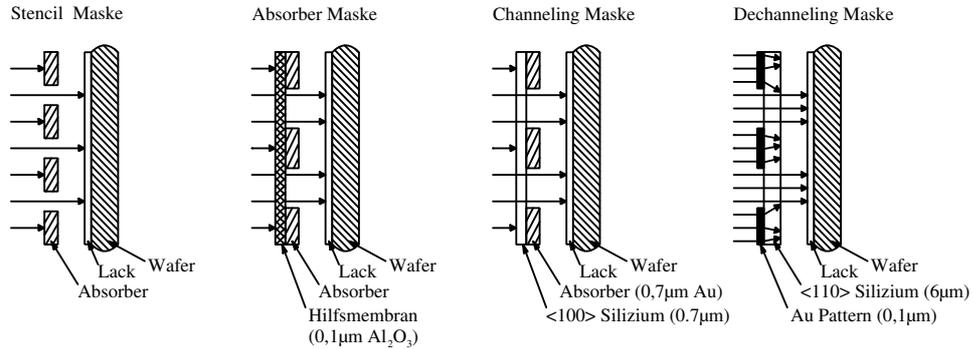


Abbildung 1.5: Verschiedene Maskenkonzepte für die Ionen und Elektronen Projektionslithografie [30]

vermögen der Belichtungsanlage liegt [29]. Für eine angestrebte Auflösung A und einen Reduktionsfaktor X der Optik ergibt sich eine zulässige Maximalstegbreite des Stützgitters zu [26]

$$b_{\text{Gitter}} \approx \frac{A}{8} X. \quad (1.2)$$

Wird in Zukunft mit der 4:1-Projektion eine Auflösung von 25nm angestrebt, so müssten die Stege demnach schmäler als 12,5nm sein - derzeit ein Ausschlusskriterium für dieses Verfahren.

1.1.4 Andere Maskenkonzepte

Neben der offenen Lochmaske wurden, wie in Abbildung 1.5 dargestellt, verschiedene weitere Maskenkonzepte entwickelt. Hierzu gehören die Absorber-Maske, die Channeling-Maske und die Dechanneling-Maske [31]. All diesen Ansätzen gemein ist eine durchgängige Membranfläche, wodurch der Strukturvielfalt keine Grenzen mehr gesetzt sind.

Die Absorber-Maske [32] lebt von der Quasitransparenz sehr dünner Membranen ($0,1\mu\text{m}$) für Ionenstrahlen. Der Kontrast wird durch einen geeigneten Absorber erzeugt, der sich, von der Hilfsmembran getragen, auf der strahlabgewandten Seite der Maske befindet. Ein umgekehrter Aufbau ist ebenfalls denkbar. Zu den kritischen Punkten dieses Konzepts gehören die strukturabhängige Verzeichnung hinsichtlich der Lagegenauigkeit analog derer bei Röntgenmasken [33] sowie die Absorptionsverluste in der Hilfsmembran und der damit verbundenen starken Belastung hinsichtlich der Lebensdauer.

Die Channeling- beziehungsweise Dechanneling-Maske [34] nutzt die Eigenschaften von Einkristallen aus, wonach Ionen unter einem bestimmten Winkel quasi ungebremst durch den Kristall geschossen werden können. Im ersten Fall wird der Kontrast durch Absorption der Ionen nach der Passage

der Membran erzeugt. Umgekehrt sorgt im zweiten Fall eine Streuschicht auf der strahlzugewandten Seite der Membran gezielt für eine Ablenkung der Ionen weg vom idealen Winkel, so dass diese im Silizium stecken bleiben. In beiden Fällen kritisch ist die über die Zeit auftretende Schädigung des Kristalls durch fehlgeleitete Ionen und die damit verbundene Zunahme der Bremswirkung bis hin zur Unpassierbarkeit. Darüber hinaus ist auch hier mit einer strukturabhängigen Verzeichnung zu rechnen.

1.2 Allgemeine und spezielle Anforderungen

1.2.1 Lagegenauigkeit

Wie bei einer konventionellen Maske auf Quarz-Chrom Basis muss auch bei einer Membranmaske die Möglichkeit einer Mehrebenenbelichtung gewährleistet sein. Dies bedeutet, dass alle bei der Herstellung und im Betrieb auftretenden Verzeichnungen bekannt sind und im Rahmen der Spezifikationen beherrscht werden. Dabei spielen im Herstellungsprozess von Membranmasken Effekte eine Rolle, die aus dem konventionellen Maskenprozess nicht bekannt sind: Wurde eine einfache Chrommaske unter optimalen Bedingungen belichtet, so ändert sich aufgrund des massiven Trägers, einen beherrschten Ätzprozess vorausgesetzt, praktisch nichts mehr an der Lage der Strukturen bis hin zum Endprodukt. Für High-End Chrom- und Multilayer EUV-Masken gilt dies nicht mehr unbedingt, hier lassen sich bereits entsprechende Effekte messen. Ebenso gilt dies nicht unbedingt für die Membranmaske. Eine bedeutende Rolle bei der Herstellung spielt beispielsweise der Zeitpunkt der Belichtung bezogen auf den Gesamtprozess. Auf diese Problematik wird in Abschnitt 2.1 detaillierter eingegangen. Ziel eines jeden Membranmasken Prozesses muss es daher sein, Kenntnis über den Zusammenhang zwischen den während der Produktion auf das "Masken Blank" geschriebenen Strukturen und deren letztendlicher Lage auf der fertigen Membranmaske zu erlangen. In der Praxis bedeutet dies, dass die Änderung des Orts jeder einzelnen Struktur entweder vernachlässigbar klein oder hinreichend genau bekannt sein muss, so dass bereits im Vorfeld eine entsprechende Korrektur der Daten möglich ist. Neben diesen unmittelbar durch den Herstellungsprozess verursachten Verzeichnungen stellen Lageänderungen durch Alterung einen weiteren, von den Chrommasken in der optischen Lithografie nicht bekannten Effekt dar: Durch die thermische und physikalische Belastung der Membran im Ionenstrom sowie den Wechsel von Produktion und Lagerung, verbunden mit einer Änderung der Konzentration an rekombinierten Ionen in der Schutzschicht, kann es ebenfalls zu einer Verzeichnung kommen. Schließlich kommt es, analog einem optischen System, noch zu einer Verzeichnung durch die Ionenabbildung. Ist diese im Detail bekannt und von Belichtungssystem zu Belichtungssystem konstant, so ist auch hier im Vorfeld eine entsprechen-

Year	2004	2010
Technology Node	90nm	45 nm
Wafer minimum half pitch (nm, in resist)	90	45
Wafer minimum isolated line (nm, in resist)	53	25
Wafer minimum contact hole (nm, Post Etch)	100	50
Wafer overlay (nm, mean + 3 sigma)	32	18
Lithography technology	Optical	EUVL
Magnification	4	4
Mask minimum image size (nm)	212	100
Image placement (nm, multi point)	19	11
CD uniformity (nm, 3sigma)		
Isolated lines (MPU gates) Binary	4.2	2.5
Dense lines (DRAM half pitch)	7.2	7
Contact/via	5.3	8
Linearity	13.7	7
CD mean to target (nm)	7.2	4
Mask design grid (nm)	4	4

Tabelle 1.1: Ausschnitt aus der International Technology Roadmap for Semiconductors 2001 [36]

de Korrektur der Maskendaten möglich. Ein Teil der Effekte kann auch über das sogenannte Pattern-Lock System [35] *in situ* korrigiert werden. Diese Technik nutzt die aktuelle Lage von 8 Referenzstrahlen, die durch spezielle Öffnungen in der Maske auf eine Detektoranordnung fallen, als Regelgröße zur Ansteuerung eines Multipols. Neben statischen Größen wie Rotation oder Abbildungsmaßstab können hiermit auch dynamische Änderungen am Gesamtsystem, beispielsweise durch Erwärmung oder Vibration, ausgeglichen werden.

Um einen Eindruck über die Größenordnungen zu vermitteln, sind in Tabelle 1.1 die Anforderungen an eine Maske für das 90nm und das 45nm Strukturniveau nach der aktuellen *International Technology Roadmap for Semiconductors* [36] zusammengestellt.

1.2.2 Strukturgenauigkeit

Was im vorherigen Abschnitt über die Lage der Strukturen gesagt wurde, gilt gleichfalls für deren Abmessungen und Toleranzen. Sollten die Abweichungen vom Sollwert nicht vernachlässigbar sein, besteht auch hier die Möglichkeit einer elektronischen Korrektur der Daten des Maskendesigns vor dessen Belichtung. In der Mikroelektronik wird an Stelle von Maßhaltigkeit häufig der Begriff CD-Genauigkeit (engl. critical dimension) verwendet. Die Anforderung

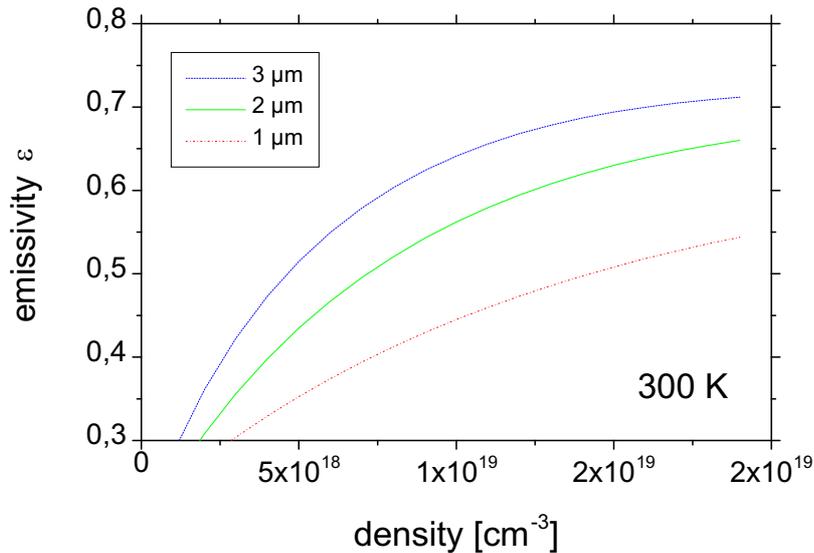


Abbildung 1.6: Emissionsvermögen einer bordotierten Siliziummaske: Einfluss von Materialstärke und Dotierung [37]

derungen an eine Maske für das 90nm und das 45nm Strukturniveau sind ebenfalls in Tabelle 1.1 enthalten.

1.2.3 Mechanische Stabilität

Neben allen bisherigen Anforderungen spielt der Punkt der mechanischen Stabilität einer derartigen Maske eine große Rolle. Dies betrifft sowohl die eigentliche Membran an sich als auch die komplette Maske als Einheit aus Membran und Maskenrahmen. Belastungen treten beispielsweise beim Transport, beim Hantieren, sowie beim Be- oder Entladevorgang oder dem internen Maskenwechsel im entsprechenden Belichter auf. Ein weiterer Punkt ist das Verhalten bei mechanischer Anregung. Hier spielt die Abklingzeit von Eigenschwingungen eine Rolle, welche beispielsweise nach einem Maskenwechsel eine Ruhepause erzwingen und damit den Durchsatz negativ beeinflussen. Davon besonders betroffen sind Anwendungen, die auf eine Vakuumumgebung mit minimaler Dämpfung angewiesen sind. Eine sinnvolle und wirtschaftliche Arbeit ist bei Nichtbeachtung dieser Punkte unmöglich.

1.2.4 Thermische Stabilität

In Folge des Energieeintrags während der Belichtung kommt es zu einer mechanischen Antwort der Maske. Diese darf die spezifizierten Werte für Lage- und CD-Genauigkeit nicht überschreiten. Dies gilt auch für eine Folge von Belichtungen. Das derzeitige Konzept für einen Ionenbelichter geht von einer

kontinuierlichen Bestrahlung der Maske aus, so dass sich diese nach endlicher Zeit in einem thermischen Gleichgewicht befindet. Die Endtemperatur ist dabei eine Funktion des Strahlstroms. Für die Kühlung der Membran spielen Wärmeleitung und Wärmekonvektion keine Rolle. Eine Energieabgabe kann nur über Strahlungskühlung erfolgen. Die Emissivität ist, wie in Abbildung 1.6 dargestellt, abhängig von der Leitfähigkeit und damit der Dotierung in der Maske [37, 38].

1.2.5 Lebensdauer

Neben einer kurzzeitigen Erfüllung der oben beschriebenen Punkte ist auch die Stabilität über einen längeren Zeitraum ein entscheidender Parameter für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Konkret bedeutet dies, dass es bei der Bestrahlung nicht zu irreversiblen Änderungen der Materialeigenschaften kommen darf. Zeigt das Material der Maske diese Eigenschaften nicht, und hiervon wird bei der Ionenlithografie ausgegangen, so bedarf es einer geeigneten Schutzschicht, die selbst gegenüber der Bestrahlung stabil ist und die Maske vor veränderndem Einfluss schützt. Für Heliumionen beispielsweise zeigt eine speziell hergestellte Kohlenstoffschicht die gewünschte Wirkung [39].

1.2.6 Zusammenfassung

Die in den vorangegangenen Unterabschnitten angeführten Punkte zeigen, dass ein breites Spektrum von Anforderungen an eine Membranmaske gestellt werden muss. Einer der wichtigsten und zugleich kritischsten Parameter hierbei ist die in der Membran vorhandene und auch erforderliche Spannung. Sollte diese zur Minimierung von Verzeichnung und Lagefehlern auf einem möglichst geringen Niveau gehalten werden, so erfordern die mechanische Stabilität und die zusätzliche Schutzschicht doch ein Mindestmaß an Spannung. Die Schutzschicht selbst, soweit sie nicht frei von Eigenspannungen ist, beeinflusst ihrerseits wieder das komplette Konzept der Fehlerkorrektur einer solchen Maske und muss daher in den entsprechenden Überlegungen berücksichtigt werden. Schließlich ergibt sich auch aus der Forderung nach einer bestimmten Leitfähigkeit zur Erfüllung der Emissivitätsforderung eine Randbedingung an die Dotierung. Auf diese Thematik wird in Abschnitt 3.2 genauer eingegangen.

1.3 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist, innerhalb der vielfältigen Anforderungen an diesen Themenkomplex auf folgende Punkte einzugehen:

- Herstellung einer Membranmaske unter Nutzung von SOI Material

- Charakterisierung verschiedener SOI Ausgangsmaterialien
- Reproduzierbare Einstellung der Membranspannung sowie
- Optimierung der Lagegenauigkeit der Strukturen einer solchen Maske

In dieser Arbeit nicht oder nur am Rande behandelt werden die speziellen Probleme der Strukturierung sowie der Membranätzung [40], die Thematik der Schutzschicht [39] sowie genauere Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Membranmasken [41, 37]. Ebenfalls nicht behandelt wird der ganze Komplex der ionensensitiven Fotolacke. Untersuchungen hierüber finden sich beispielsweise in Moreau et al. [42] und Hall et al.[43].

Kapitel 2

Der Waferflow Prozess

2.1 Prozesskonzepte

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene Konzepte zur Herstellung von strukturierten Membranmasken entwickelt. Die in Abbildung 2.1 skizzenhaft dargestellten Abläufe werden im Folgenden besprochen.

2.1.1 Membranflow Prozess

Beim Membranflow Prozess wird der Ausgangswafer zuerst lokal auf Membranstärke rückgedünnt und dieses Gebiet dann strukturiert. Damit finden sowohl der strukturgebende Schritt (Lithografie) als auch der strukturübertragende Schritt (Ätzung) auf der Membran statt. Der Einsatz von konventionellen Produktionsanlagen zur Belackung, Belichtung, Entwicklung und Ätzung ist hierbei nur bedingt möglich. Gleichwohl ist diese Prozessvariante dem üblichen Herstellungsverfahren von Chrom-Masken am ähnlichsten: Das Maskenblank, bestehend aus einem Quarzträger und einer Chrom/Chromoxid Doppelschicht, wird belackt, belichtet und der Chrom-Absorber strukturiert. Ein Beispiel hierfür ist in Magdo et al. [44] beschrieben.

2.1.2 Semi-Waferflow Prozess

Einen Schritt weiter als der klassische Membranflow Prozess geht der Semi-Waferflow Prozess. Hier findet der strukturgebende Schritt (Lithografie) auf dem Wafer statt, der strukturübertragende Schritt (Ätzung) jedoch auf der Membran. Für diesen letzten Schritt ist eine entsprechende Spezialanlage (Ätzer) erforderlich. Ein Beispiele hierfür ist in Rangelow et al. [45] beschrieben.

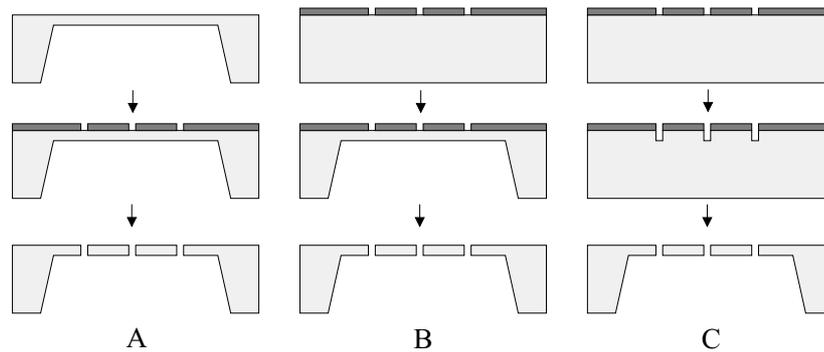


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Membranflow Prozesses (A), des Semi-Waferflow Prozesses (B) und des Waferflow Prozesses (C)

2.1.3 Waferflow Prozess

Eine weitere Alternative stellt der Waferflow Prozess (WFP) dar. Bei ihm finden sowohl der strukturgebende Schritt (Lithografie) wie auch der strukturübertragende Schritt (Ätzung) auf dem Wafer statt. Für die komplette Prozessierung können konventionelle Produktionsanlagen in Produktionsumgebung mikroelektronischer Bauelemente genutzt werden. Als letzter Schritt erfolgt die Dünnung zur Membran, welche außerhalb der Produktionsumgebung stattfinden kann. Ein Beispiel hierfür ist in Bohlen et al. [46] beschrieben.

2.2 Bekannte Prozessfolgen

2.2.1 Ätzung auf Zeit

Eine der einfachsten Methoden zur Herstellung von Membranen ist die Anwendung eines Ätzmediums mit bekannter Ätzrate für eine bestimmte Zeit. Ausgangsmaterial hierfür ist ein Siliziumwafer. Nach Beschichtung mit einer ätzbeständigen Schutzschicht wird diese anschließend an den entsprechenden Stellen geöffnet. Kennt man die Stärke des Wafers, so lässt sich über die Ätzzeit die gewünschte Membrandicke einstellen. Die Konstanz der Waferdicke entscheidet dabei über die Homogenität der Membran. Bei einem konventionellen 150mm Wafer liegen die Toleranzen hierfür heutzutage bei etwa $5\mu\text{m}$, für hoch ebene Wafer werden Werte von weniger als $2,5\mu\text{m}$ erreicht [47]. Diese können durch eine entsprechende Nachbearbeitung noch minimiert werden.

2.2.2 Die p^{++} Ätzstop Technik

Um das Problem der inhomogenen Membrandicke zu lösen, wurde ein Verfahren mit p^{++} Ätzstop entwickelt [46, 48, 44]. Basis hierfür ist der Einfluss

der Borkonzentration im Silizium auf dessen Ätzrate in alkalischen Medien. Diese sinkt bei Dotierungen oberhalb $5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ stark ab. Eine solche Dotierung kann dann beispielsweise per Implantation und/oder Diffusion in den Wafer eingebracht oder in Form einer *in situ* dotierten Epitaxieschicht aufgewachsen werden. Die letzte Variante hat den Vorteil, dass praktisch beliebige Dicken und steilere p^{++} -Übergänge realisiert werden können. Da es für den Herstellungsprozess prinzipiell ausreicht, die hohe Borkonzentration an der Unterseite der künftigen Membran zu erreichen, kann die Dotierstoffkonzentration im oberen Teil der Epitaxieschicht reduziert werden. Dies wirkt sich positiv auf die Qualität der Schicht aus, da die Borkonzentration insgesamt schon in der Nähe der Löslichkeitsgrenze von etwa $1 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-3}$ [49] liegt und es durch die starke Gitterkontraktion [50] zu Gleitlinienbildung kommt. Für jede homogene Borkonzentration gibt es dabei eine kritische Dicke t_c , ab der Gleitlinienbildung einsetzt: [51, 52]

$$t_c = \frac{b(1 - \nu \cos^2 \theta) \left[\ln \left(\frac{t_c}{b} \right) + 1 \right]}{8\pi(1 + \nu) f \cos \lambda}. \quad (2.1)$$

Hierbei ist ν die Querkontraktionszahl, b die Länge des Burgersvektor ($3,83 \text{Å}$ für 60° -Versetzen in Silizium), θ der Winkel zwischen Versetzungslinie und ihrem Burgersvektor und λ der Winkel zwischen Gleitrichtung und der Linie in der Interface Ebene, die senkrecht zur Schnittlinie zwischen Gleitebene und dem Interface verläuft. Für die Fehlpassung f gilt [53]

$$f = \alpha \frac{N'_B}{a_{Si}}, \quad (2.2)$$

wobei $\alpha = -1.49 \text{Å}$ eine experimentelle Konstante und $a_{Si} = 5,4307 \text{Å}$ die Gitterkonstante von Silizium ist. Die Borkonzentration N'_B ist eine dimensionslose Größe

$$N'_B = N_B / N_{Si}, \quad (2.3)$$

die sich aus der Volumenkonzentration an Boratomen N_B und der Zahl der Siliziumatome pro Volumen $N_{Si} = 5 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-3}$ berechnet. Die Gitterkontraktion kann auch durch den Einbau eines zusätzlichen Dotierstoffs mit größerem Atomradius, wie beispielsweise Germanium ($1,22 \text{Å}$), kompensiert werden [53, 54]. Nimmt man eine lineare Überlagerung der durch Bor und Germanium verursachten Dehnungen an, so berechnet sich die Fehlpassung f zu [53]

$$f = 0,0425 N_{Ge} - 0.274 N_B. \quad (2.4)$$

Eine vollständige Kompensation der Dehnungen wird erreicht, wenn für das Verhältnis der Dotierstoffkonzentrationen gilt

$$N_B : N_{Ge} = 6,45. \quad (2.5)$$

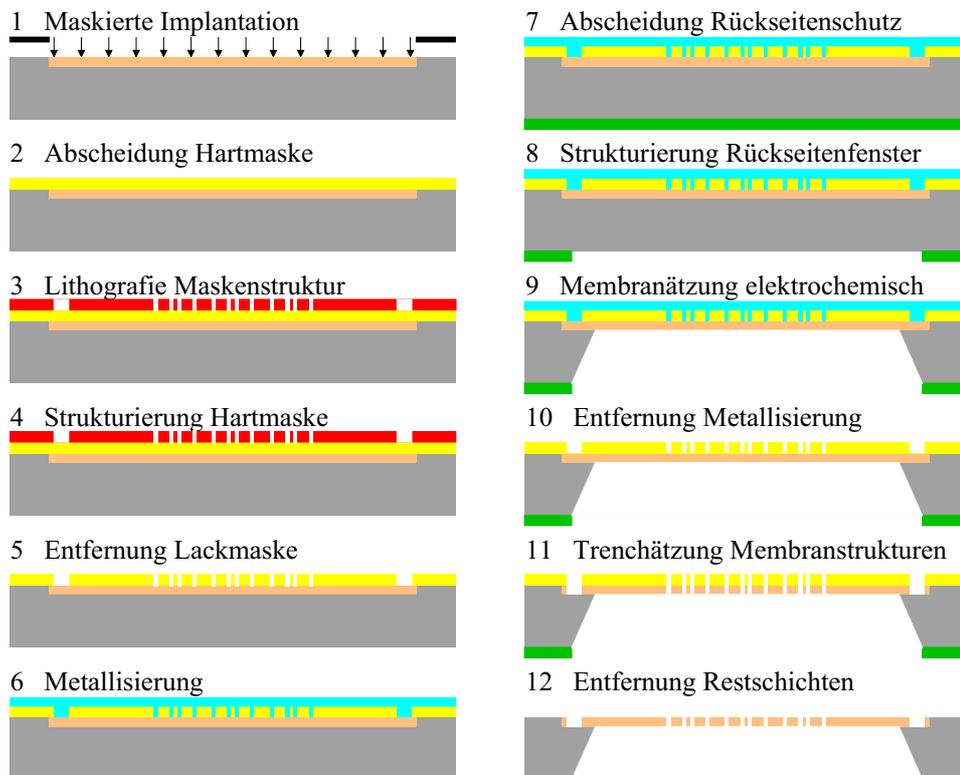


Abbildung 2.2: Schematische Abfolge eines pn Prozesses [56]

Die Schichtdicke der Membran ist bei diesem Verfahren primär unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des Wafers und wird vor allem über Güte und Homogenität der p^{++} Diffusion beziehungsweise Epitaxieschicht definiert. Die Technik ist prinzipiell nicht auf p^{++} Silizium festgelegt, so dass ein analoges Verfahren auch für n^{++} Silizium entwickelt wurde [55].

2.2.3 Die elektrochemische Ätzstop Technik

Ein drittes Verfahren zur Herstellung von Membranen stellt die Technik des elektrochemischen Ätzstops dar [57, 58, 59, 60]. Diese beruht auf der Tatsache, dass es in alkalischen Ätzmedien bei der Annäherung einer Ätzfront an einen in Sperrrichtung gepolten p-n Übergang zu einer anodischen Oxidation kommt [61]. Diese Oxidschicht besitzt eine Ätzrate, die einige Größenordnungen unter der von Silizium liegt. Während der Strom anliegt, erneuert sich die Schicht ständig, so dass sich schließlich im Silizium der Verlauf des p-n Übergangs abbildet. Das Dotierstoffprofil und die Höhe der angelegte Spannung bestimmen direkt die Dicke der Membran [60]. Ein möglicher Prozessablauf ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

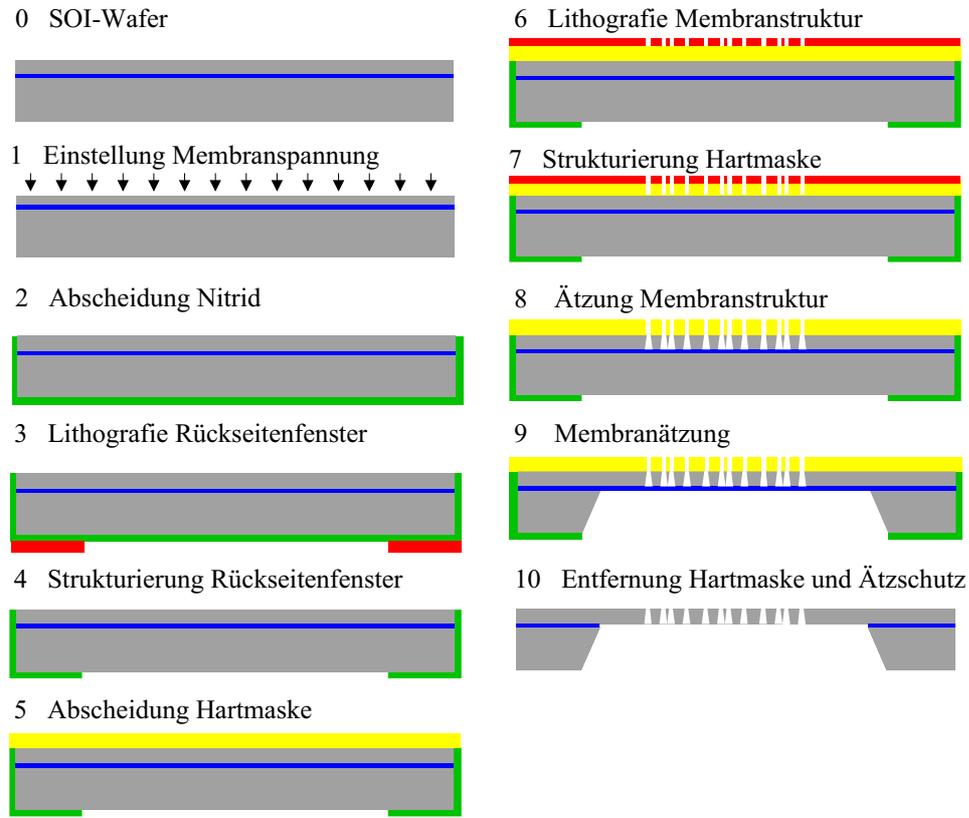


Abbildung 2.3: Schematische Abfolge des SOI Waferflow Prozesses [62]

2.3 Der SOI Waferflow Prozess

2.3.1 Prozessierung

Betrachtet man die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Prozesse, so fällt auf, dass in allen Fällen bestimmte Bedingungen an die Dotierstoffverteilung im Wafer gestellt werden. Dies engt die Möglichkeiten für Optimierungen hinsichtlich Membranspannung und Leitfähigkeit ein. An dieser Stelle setzt der SOI (Silicon on Insulator) Waferflow Prozess [62, 63] als die Weiterentwicklung einer Methode zur Fertigung von Blenden für die Elektronenstrahlolithografie [64] an. Grundgedanke des in Abbildung 2.3 dargestellten Prozesses ist die völlige Separation der Membranerzeugung von jeglicher Dotierstoffverteilung sowie die Verlagerung dieses Schrittes an das Ende des Prozessfolge. Ausgangsmaterial ist dabei ein SOI-Wafer, dessen SOI-Schicht die spätere Membran bildet. Die vergrabene Oxidschicht (buried oxide, BOX) wird zweifach genutzt: Vorderseitig als Ätzstop bei der Strukturierung der SOI-Schicht und rückseitig als Ätzstop bei der Membranerzeugung. Alle weiteren Eigenschaften des Wafers wie beispielsweise die Dicke und Homogenität der SOI-Schicht sowie deren Dotierung gehen direkt als Parameter in die zukünftige Membran ein. Im

Material	Formel	Dicke	Spannung	Funktion
Nitrid	Si_3N_4	200nm	1150 MPa	Ätzschutz
Siliziumoxinitrid	SiO_xN_y	1000 nm	32 MPa	Hartmaske
Sumitomo NTS4	-	800 nm	19 MPa	Fotolack
Ozon-TEOS	SiO_2	700 nm	-368 MPa	Schutzschicht

Tabelle 2.1: Parameter der einzelnen Schritte des SOI WFP

Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte beschrieben. Die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

2.3.1.1 Einstellung Membranspannung

Soll die Spannung der zukünftigen Membran beeinflusst werden, so erfolgt dies als erster Schritt. Im Detail wird dieses Thema in Abschnitt 3.2 behandelt.

2.3.1.2 Abscheidung Nitrid

Zunächst wird eine Schicht von LPCVD-Nitrid auf die Rückseite des Wafers abgeschieden. Diese dient später als Maskierschicht zur Definition des Membranfeldes und wurde aufgrund der sehr geringen Ätzrate in Kalilauge (KOH) [65] ausgewählt. Als optimale Dicke hat sich hierbei eine Stärke von 200nm erwiesen: Bei geringeren Dicken (150nm) erhält man aufgrund von Wachstumsdefekten in der Schicht zu viele Ätzdefekte, bei größeren Dicken (250nm) nimmt die Anzahl an Defekten aufgrund von Spannungsrissen ebenfalls wieder zu. Auf die Verwendung eines Haftoxids zur Spannungskompensation wurde nach ersten Versuchen verzichtet, da es aufgrund der höheren Ätzrate für thermisches Oxid in KOH zu einer Unterätzung der Nitridschicht kommt.

2.3.1.3 Abscheidung Hartmaske

Als nächster Schritt erfolgt die Abscheidung einer Hartmaske aus Siliziumoxinitrid (SiO_xN_y) auf die SOI Schicht. Die Herstellung erfolgt aus den Komponenten SiH_4 , NH_3 , N_2 und N_2O als Plasmaprozess in PECVD-Anlage Delta 201 der Firma Eletrotec. Durch Wahl einer geeigneten Stöchiometrie lässt sich eine nahezu spannungskompensierte Schicht abscheiden [66]. Aufgrund der Selektivitäten des nachfolgenden Ätzprozesses hat sich eine Schichtdicke von 1000nm als ausreichend erwiesen.

2.3.1.4 Lithografie Maskenstruktur

Ausgehend von einem 30 kV Elektronenstrahlschreiber vom Typ HL 700 D des japanischen Herstellers Hitachi werden die Wafer belichtet. Bei der Auswahl des Lackprozesses für die Elektronenstrahlolithografie wurde insbesondere Wert auf eine gute Auflösung und geringe Kantenrauigkeit gelegt. Als Lacke wurden der Einlagen-Lack NTS4 des japanischen Herstellers Sumitomo sowie der Zweilagigen-CARL-Prozess von Infineon Technologies AG gewählt. Hinweise zur Prozessierung und eine vergleichende Untersuchung finden sich in den Arbeiten von Elian et al. [67], Ochsenhirt et al. [68] und Irmscher et al. [69]. Die Aufbereitung der Daten für den Elektronenstrahlschreiber (Proximity-Korrektur) erfolgt mittels der Software PROXECCO von pdf Solutions - aiss Division.

2.3.1.5 Strukturierung Hartmaske

Nach Abschluss des Lithografieprozesses wird die Lackstruktur in die Hartmaske übertragen. Dies geschieht mittels eines Plasmaätzprozesses unter Verwendung von CHF_3 und O_2 . Die Prozessierung erfolgt auf einer Centura und einem AME 8115 Hexodenäzter, beide aus dem Hause Applied Materials. In Abhängigkeit von der Dauer des Prozesses und der Wirksamkeit der Rückseitenkühlung erhitzt sich der Wafer während des Prozesses. Durch eine mehrstufige Ätzung mit Pauseschritten lassen sich Schäden an der Lackmaske vermeiden.

2.3.1.6 Entlackung

Ist die Hartmaske strukturiert, wird der Rest der Lackmaske entfernt. Da diese Silizium enthält, ist dieser Vorgang etwas aufwendiger und erfolgt in 3 Einzelschritten: Mittels einer zweistufigen ECR Plasmabehandlung unter Verwendung von CF_4 , Ar und O_2 beziehungsweise reinem O_2 wird zuerst die silylierte Lackschicht und dann der Restlack entfernt. Dabei ist zu beachten, dass während der ersten Stufe das bereits offen liegende Silizium wie auch die Hartmaske angegriffen werden, so dass dieser Prozess möglichst kurz gehalten werden sollte. In einem zweiten Schritt werden resistente Polymerverbindungen durch den Einsatz des Ablackmediums ACT 935 der Firma Ashland Chemicals entfernt. Schließlich erfolgt die Veraschung von Restprodukten aus dem vorherigen Schritt im ungerichteten Plasma unter Verwendung von reinem O_2 . Als Anlage für das ECR Plasma dient eine Plasmalab 90 von Oxford Instruments, der letzte Schritt erfolgt in einem Branson Reaktor IPC L2101.

2.3.1.7 Ätzung Maskenstruktur

Die Ätzung der Maskenstrukturen erfolgt auf einer STS Clustertool Anlage nach dem sogenannten ASE-Prozess [70]. Mittels einer Gas Chopping

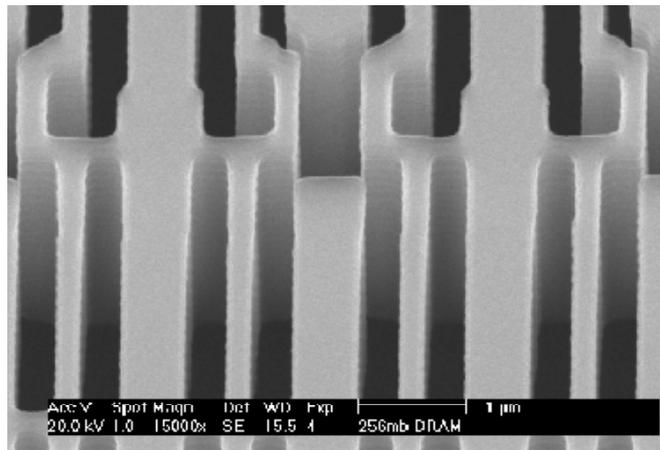


Abbildung 2.4: Strukturätzung in SOI Material: DRAM-Pattern [71]

Technik, bei der sich Ätzung und Passivierschritt abwechseln, lassen sich so Strukturen mit einem hohen Aspektverhältnis (Verhältnis von Strukturtiefe zu -weite) bei einem variablen Flankenwinkel erreichen [71]. Zur Vermeidung von Ionensteuerung und einer damit verbundenen Strahlaufweitung wird ein leicht hinterschnittenes Profil mit einem Flankenwinkel von unter 89° gefordert. Die exakte Strukturweite wird daher durch eine senkrechte Stufe auf den ersten 150nm der Ätzung festgelegt. Eine detaillierte Abhandlung zu dieser Thematik findet sich bei Letzkus [40].

2.3.1.8 Lithografie Rückseitenfenster

Nach Abschluss der Strukturierung auf der Vorderseite werden mittels einer 1:1 Proximitybelichtung die Rückseitenöffnung und damit Lage und Größe der Membran festgelegt. Um eine optimale Passung zu den Maskenstrukturen und auch absolut auf dem Wafer zu erlangen, findet dieser Schritt justiert zur Vorderseite statt. Die hierzu erforderlichen Marken wurden bei der Lithografie der Maskenstruktur mit belichtet. Alle Belichtungen erfolgten mit einem Kontakt- und Proximitybelichter MA/BA 6-ISA der Firma SÜSS MicroTec GmbH unter Verwendung einer entsprechenden 7 Zoll Chrom-Maske im Proximity-Modus.

2.3.1.9 Strukturierung Rückseitenfenster

Die Öffnung des Rückseitenfensters geschieht, wie zuvor auch die Hartmaskenätzung, mittels eines Plasmaätzprozesses unter Verwendung von CHF_3 und O_2 . Die Prozessierung erfolgt ebenfalls auf einer Centura und einem AME 8115 Hexodenäzter, beide von Applied Materials. Anschließend wird der Restlack im Sauerstoffplasma verascht.



Abbildung 2.5: Ätzzellen: Doppelzelle für zwei 150mm Wafer (links), Einzelzelle für einen 200mm Wafer (rechts)

2.3.1.10 Membranätzung

Vor der Membranätzung, die derzeit als Nassprozess erfolgt, wird durch einen ozonaktivierten SACVD-Prozess noch eine dünne Schutzschicht von TEOS auf den SOI Wafer aufgebracht. Diese Prozessierung erfolgt in einer P5000 Mark II von Applied Materials. Damit wird die Grundlage für den neu entwickelten zweistufigen Ätzprozess [72], im folgenden Zweischrittprozess genannt, gelegt. Zum Schutz gegen das im ersten Schritt verwendete Ätzmedium wird der Wafer mechanisch abgedichtet. Dies geschieht mittels der in Abbildung 2.5 dargestellten Ätzzelle. Die Ätzung erfolgt auf Zeit in einer 30%igen Kaliumhydroxid Lösung bei 70°C. Hat der Wafer nach etwa 16 Stunden eine Restdicke von etwa 50 μm erreicht, wird er aus der Zelle ausgebaut, gespült und in einem zweiten Schritt freistehend in einer 2%igen TMAH-Lösung weiter prozessiert. Dieses Ätzmedium zeichnet sich durch eine sehr hohe Selektivität gegenüber Siliziumoxid aus, so dass die Ätzung von der Rückseite des Wafers kommend am SOI Oxid stoppt und gleichzeitig die beschichtete Vorderseite nicht angegriffen wird. Der entscheidende Vorteil des Zweischrittprozess liegt in der Möglichkeit, die Membran frei von äußeren Kräften zu ätzen, ohne dafür eine entsprechend dicke Beschichtung zum Schutz der strukturierten SOI Schicht vorhalten zu müssen. Eine detaillierte Abhandlung zu dieser Thematik findet sich bei Letzkus [40].

2.3.1.11 Entfernung Hartmaske und Ätzschutz

Als letzter Schritt erfolgt eine kurze Überätzung in Flusssäure, wodurch alle restlichen Schichten von der Membran entfernt werden. Aufgrund der starken Welligkeit (Abbildung 2.6) zu Beginn des Schrittes besteht eine erhöhte Bruchgefahr. Verursacht wird dieser Effekt durch die dominante Druckspan-

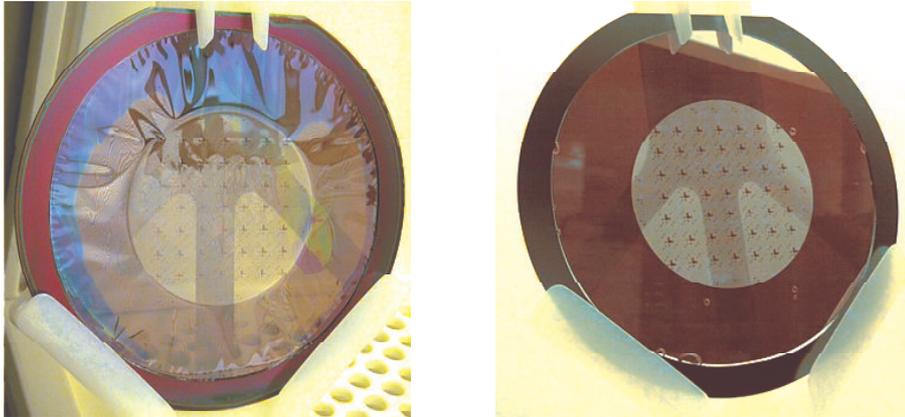


Abbildung 2.6: Entfernung von vergrabendem Oxid, Hartmaske und Ätzschutz: Membran vor und nach dem Ätzschritt

nung in der nun freiliegenden Oxidschicht des SOI Materials (BOX). Nach vollständiger Entfernung dieser Schicht zeigt die Membran ihr endgültiges Aussehen. Eben die Effekte dieses letzten Schritts führten dazu, dass die Durchführbarkeit eines SOI Prozesses selbst in Fachkreisen bis dahin als nicht machbar galt.

2.3.2 SOI Ausgangsmaterial

Hinter dem Begriff SOI Material verbirgt sich zwischenzeitlich eine ganze Gruppe von Materialien, die sich in der Herstellung und teilweise auch in ihren Eigenschaften unterscheiden. Im Folgenden werden daher die derzeit auf dem Weltmarkt verfügbaren Sorten mit monokristalliner SOI Schicht vorgestellt. Im Anschluss wird noch kurz auf die Möglichkeit der Verwendung von polykristallinem SOI Material verwiesen.

2.3.2.1 Gebondetes SOI Material

Zu den traditionellen Verfahren gehört der gebondete und rückgedünnte SOI Wafer, auch als SDB Wafer (Surface direct bonding) bezeichnet. Der Herstellungsprozess ist skizzenhaft in Abbildung 2.7 wiedergegeben. Ausgegangen wird von zwei Silizium Wafern von beliebiger Dotierung. In einem ersten Schritt wird nun einer der Wafer, bei sehr dickem vergrabendem Oxid (BOX) auch beide, oxidiert. Über die Oxidationstemperatur und -dauer wird die Dicke dieser Schicht auf den gewünschten Wert eingestellt. Anschließend werden die beiden Wafer mit den Vorderseiten gegeneinander justiert, in Kontakt gebracht und gebondet. Der Bondvorgang an sich wird beispielsweise in Lasky et al. [74] beschrieben. Nach einer thermischen Behandlung (Temperung) zur Stärkung der Bindungskräfte wird der obere Wafer durch eine Folge von

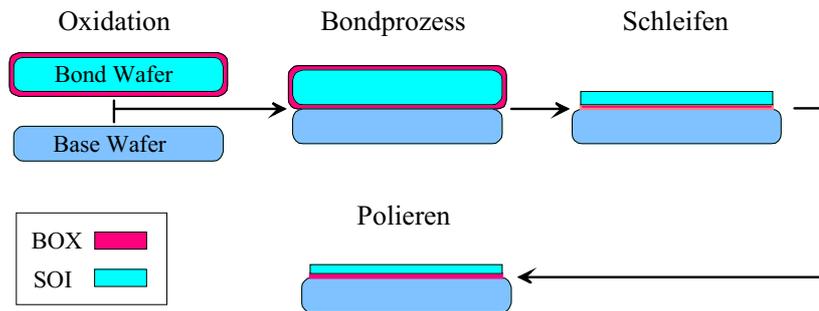


Abbildung 2.7: Schematischer Ablauf des SDB Prozesses (nach [73])

Schleif- und Polierschritten auf die gewünschte SOI Dicke gedünnt. Nach diesem Verfahren werden Schichthomogenitäten im Bereich von bis zu $\pm 0,5\mu\text{m}$ erreicht, entsprechend liegt der Schwerpunkt des hergestellten SDB Materials auch bei SOI Dicken größer $2\mu\text{m}$. Außer diesem Nachteil gibt es jedoch einige weitere Aspekte, die das Material interessant machen. Hierzu gehören:

- Gute SOI und BOX Qualität ohne Störungen oder Löcher ("Pinholes"),
- Keine Einschränkungen hinsichtlich der Materialspezifikation,
- Einkaufspreis.

2.3.2.2 Pace'd SDB Material

Eine Methode zur Verbesserung der Schichtdickenhomogenität von SDB Material besteht in der Nachbearbeitung des Wafers mittels eines lokalen Plasmaprozesses: PACE - Plasma Assisted Chemical Etching [75, 76, 77] - ist ein von der Firma IPEC Precision vertriebenes Verfahren zur Nacharbeitung von SOI Wafern. In einem ersten Schritt wird das SOI Material exakt vermessen und dann in einem zweiten Schritt mittels eines lokales SF_6 -Plasmas auf die Zieldicke rückgedünnt. In der Praxis kommen zwecks der besseren Homogenität zwei unterschiedlich große Plasmaköpfe zum Einsatz, die computergesteuert auf zuvor berechneten Bahnen geführt werden. Abbildung 2.8 zeigt einen SOI Wafer vor und nach der PACE-Bearbeitung. Die erreichbare Homogenität für ein $3\mu\text{m}$ starkes SOI Material liegt bei $\pm 1\%$. Mit dieser Technik besteht damit die Möglichkeit, Wafer einer beliebigen Spezifikation mit einer sehr konstanten SOI Dicke zu erhalten. Bedauerlicherweise wurde das Verfahren zwischenzeitlich auch vom letzten SOI Hersteller für 150mm Wafer abgekündigt.

2.3.2.3 SIMOX Material

Ein weiterer Kandidat aus älteren Tagen ist der SIMOX Wafer. Sein Herstellungsprozess ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Ausgehend von einem Silizium

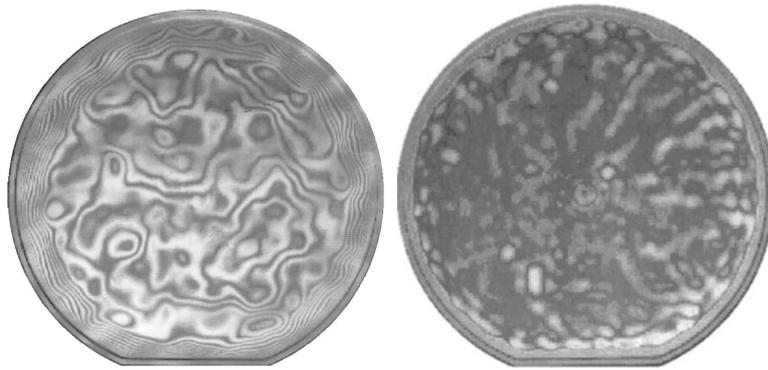


Abbildung 2.8: SOI Wafer vor und nach PACE Bearbeitung

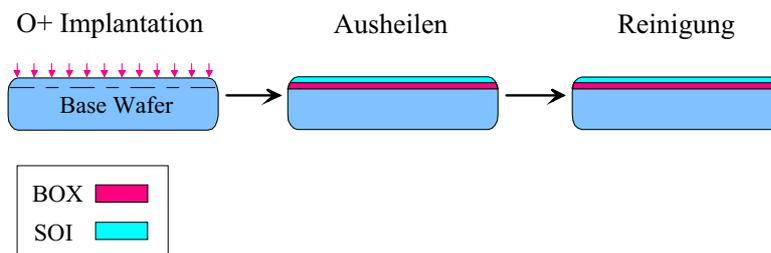


Abbildung 2.9: Schematischer Ablauf des SIMOX Prozesses

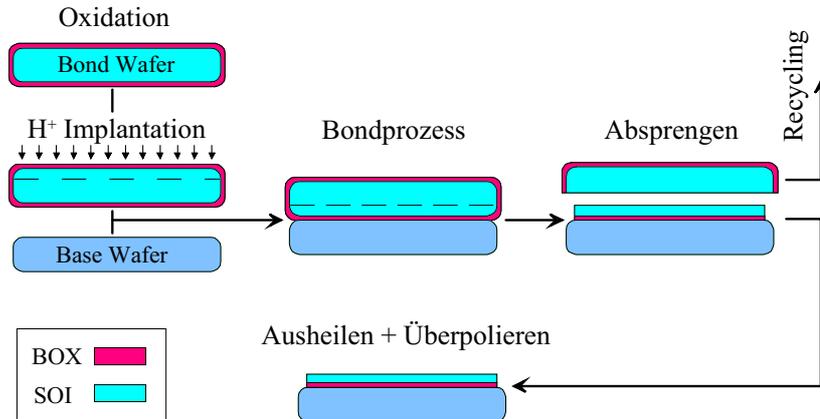


Abbildung 2.10: Schematischer Ablauf des SmartCut Prozesses (nach [82])

Wafer wird eine hohe Dosis ($1,8 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-2}$) an Sauerstoffionen in eine Tiefe von etwa 100nm bis 400nm implantiert. In einem anschließenden Ausheilschritt (6h bei 1320°C) wird das im Bereich der Oberflächen stark geschädigte Silizium wieder rekristallisiert und gleichzeitig mit den im Silizium befindlichen Sauerstoffatomen eine vergrabene Oxidschicht formiert [78]. Die Dicke der SOI Schicht ist durch die maximale Eindringtiefe der Sauerstoffionen limitiert. Bei einer Energie von 190kV kann eine BOX Schicht von 400nm und eine SOI Schicht von 230nm erzeugt werden [79]. Dickere SOI Schichten können durch einen nachträglichen Epitaxieschritt erzielt werden. Neben einer guten Schichtdickenhomogenität gehört die Option, lokale SOI Bereiche auf einem Wafer zu erzeugen, zu den erweiterten Möglichkeiten dieser Technologie. Hierauf wird genauer in Unterabschnitt 2.4.3 eingegangen. Problematisch hingegen sind neben Löchern in der SOI Schicht, den sogenannten "Pinhole" Fehlern, vor allem lokale Siliziuminseln in der BOX Schicht, da es an diesen Stellen während der Membranätzung zu einem Durchbruch des Ätzmediums und damit zur Zerstörung der Membran kommen kann. Die Versetzungsdichte in derartigem Material liegt bei Werten größer $1 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$. Eine deutliche Verbesserung stellt hier das sogenannte "Low dose SIMOX" dar [80]. So kann beispielsweise durch eine Sauerstoff-Implantation mit 120kV und einer Dosis von $7 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$ nach einem sechsstündigen Ausheilschritt bei 1320°C in einer Umgebung aus Sauerstoff und Argon eine BOX Schicht von 80nm und eine SOI Schicht von 215nm erzeugt werden. Die Versetzungsdichte liegt dabei unter 1000cm^{-2} [79]. Eine weitere Verbesserung konnte mit dem Modified Low Dose (MLD) Prozess von IBM erzielt werden [81]. Derartige Wafer sind nun kommerziell erhältlich.

2.3.2.4 SmartCut Material

Zu den jüngeren Verfahren und in gewisser Weise zwischen SDB und SIMOX angesiedelt gehört das SmartCut Prinzip [83]. In Abbildung 2.10 ist der prinzipielle Ablauf des Prozesses dargestellt. Ausgegangen wird auch hier von zwei Silizium Wafern, deren Schichtwiderstände laut Hersteller größer $1\Omega\text{cm}$ sein müssen. In einem ersten Schritt wird nun auf einem der beiden Wafer ein thermisches Oxid gewachsen. Dieses bildet in Folge das vergrabene Oxid unter der SOI Schicht. Anschließend erfolgt eine Implantation von Wasserstoffionen in den oxidierten Wafer hinein. In Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung dringen die Ionen unterschiedlich tief in den Kristall ein. Die Wafer werden anschließend zueinander justiert und mit den Vorderseiten zusammen gebondet. Durch eine thermische Behandlung bilden sich aus dem eingelagerten Wasserstoff blasenartige Cluster, die zu einer Trennung innerhalb des Bond Wafers entlang dieser Ebene führen. Während der Bond Wafer dem Recycling zugeführt wird, erfährt der Base Wafer noch einen Ausheilschritt zur Stärkung der Bondung und abschließend einen kurzen Polierprozess. Hervorzuheben ist die sehr gute SOI Qualität und die Möglichkeit, auch Schichtdicken im Bereich von weniger als 100nm herzustellen. Die maximal erreichbare SOI Dicke für dieses Verfahren liegt bei $1,8\mu\text{m}$, stärkere Schichten können nur per epitaktischer Verstärkung erhalten werden.

Ein dem SmartCut Prinzip verwandter Prozess ist das Genesis-Verfahren [84], bei dem die Trennung der gebondeten Wafer entlang der Implantationsschicht nicht durch eine thermische Behandlung sondern nach einem patentierten Verfahren bei Raumtemperatur geschieht.

2.3.2.5 ELTRAN Material

Zu den jüngsten Verfahren der Herstellung von SOI Material gehört der ELTRAN (Epitaxial Layer TRANSfer) Prozess [85]. Als Bondwafer dient ein bordotierter Siliziumwafer, der elektrochemisch an der Oberfläche porös geätzt wird. Durch eine thermische Behandlung (Temperung) wird die Oberfläche des porösen Gebiets wieder geschlossen, und danach hierauf eine Siliziumschicht epitaktisch aufgewachsen. Diese stellt bereits die künftige SOI Schicht dar. Zur Herstellung des vergrabenen Oxids wird der Basis Wafer oxidiert und anschließend werden beide Scheiben justiert mit der Vorderseite aufeinander gebondet. Mittels einer speziellen Technik [86] erfolgt eine mechanische Trennung der beiden Wafer entlang der porösen Schicht. Reste der porösen Schicht lassen sich nasschemisch mit höchster Selektivität entfernen. Anschließend wird die Scheibe einer Wasserstofftemperung unterzogen und der Bond Wafer dem Recycling zugeführt. Eine weitere Verbesserung der Qualität des Endproduktes wird durch den Einsatz einer porösen Doppelschicht und der Trennung mittels eines Wasserstrahls erreicht [87].

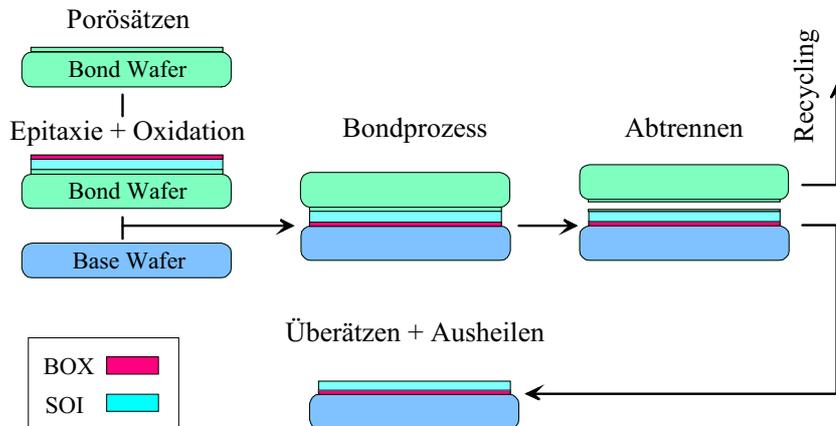


Abbildung 2.11: Schematischer Ablauf des Eltran Prozesses

2.3.2.6 Epitaktische Verstärkung von monokristallinem SOI Material

Kann ein bestimmter Typ von SOI Material bedingt durch den Herstellungsprozess nicht in der gewünschten Dicke geliefert werden, so ist eine Nachbearbeitung in Form eines Epitaxie-Prozesses möglich. Für eine SOI Dicke von $3\mu\text{m}$ lassen sich, eine entsprechende Ausgangshomogenität vorausgesetzt, derartige Schichten mit einer Homogenität von $\pm 1\%$ herstellen. Um die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Membran weitgehend durch die aufgewachsene Schicht zu bestimmen, sollte von sehr dünnem SOI Material ausgegangen werden. Neben der höheren Flexibilität in Bezug auf die absolute Schichtdicke besteht so die Möglichkeit, unmittelbar Einfluss auf die Dotierung zu nehmen. Zu beachten ist, dass trotz der beschriebenen Vorteile die SOI Dicke des Ausgangsmaterials nicht zu gering gewählt wird. Andernfalls kann es, wie beispielsweise bei Unibond Material mit einer BOX Stärke von 200nm und einer SOI Stärke von 100nm durch Reflexion zu einer ungleichmäßigen Erwärmung und damit zur Bildung von Gleitlinien kommen. Bemerkenswert ist auch, dass eine Beschriftung dieser SOI Scheiben mittels eines kommerziellen Laserbeschrifters (Nd: YAG Laser, $\lambda = 1,064/0,532\mu\text{m}$) aufgrund des zu geringen Energieeintrags nicht möglich war. Die Messung der Prozesstemperatur während der Epitaxie sollte, falls in der Anlage machbar, auf jeden Fall auf der Rückseite des Wafers geschehen. Bei einer SOI Dicke von 180nm trat dieses Problem nicht mehr auf. Die Versuche erfolgten zumeist auf einer HT Centura Einzelscheibenanlage, Vorversuche vereinzelt auch in einem 7811 Barrel Reaktor, beide von Applied Materials.

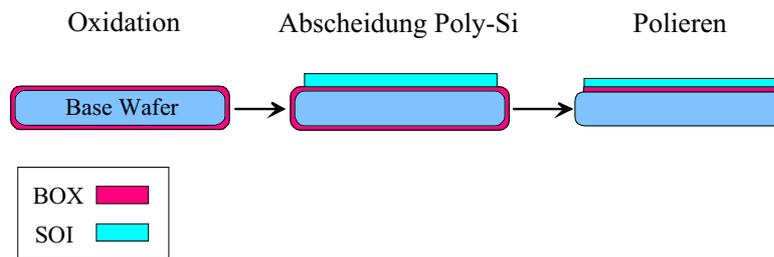


Abbildung 2.12: Schematischer Ablauf des PolySOI Prozesses

2.3.2.7 Polykristallines SOI Material

Neben den oben bereits angeführten Materialien mit monokristalliner SOI Schicht ist es auch denkbar, diese polykristallin auszuführen. Eine mögliche Prozessfolge ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Ausgehend von einem oxidierten Siliziumwafer, wird als Saatschicht eine dünne Schicht von Polysilizium in einem LPCVD-Reaktor abgeschieden. Aus ökonomischen Gründen wird diese dann anschließend in einem CVD-Reaktor geringfügig über die Zieldicke hinaus verstärkt. Ein kurzer Polierschritt liefert eine glatte Oberfläche. Durch die zweistufige Prozessführung wird trotz hoher Wachstumsgeschwindigkeit eine Schicht mit sehr homogener Korngröße erreicht [88, 89]. Über die Prozessführung kann bereits bei der Herstellung Einfluss auf das Spannungsverhalten der Schicht genommen werden [90].

Ein prinzipieller Vorteil bei diesem Material liegt in seiner absoluten Isotropie. Die einheitliche Steifigkeit in alle Raumrichtungen erleichtert insbesondere die für eine Vorverzeichnung von Lage und Größe der Strukturen notwendige Kalkulation (Kapitel 3). Der Gesamtprozess zur Fertigung der Membranmasken ist unabhängig von der Art des SOI Materials, angepasst werden muss jedoch der Prozess zur Spannungseinstellung. Hierauf wird in Unterabschnitt 3.2.10 näher eingegangen.

2.3.2.8 Auswahlkriterien

Angesichts der Vielzahl an Materialparametern sollen im Folgenden die Größen besprochen werden, die als prinzipielles Kriterium für die Auswahl von SOI Material für den SOI WFP angesehen werden können. Zunächst spielt für den generellen Erfolg einer Membranätzung die Defektfreiheit der BOX Schicht eine entscheidende Rolle. Entsprechend kritisch können sich die in Unterabschnitt 2.3.2.3 angesprochenen Siliziuminseln auswirken, wenn sie sich über die volle Dicke der BOX Schicht erstrecken. Eine ähnliche Bedeutung haben natürlich auch Schäden in der SOI Schicht. Auch sie lassen das Ätzmedium passieren und führen so zu Löchern in der Membran. Ein wichtiger Parameter für die erfolgreiche Prozessierung von Membranen nach dem SOI Waferflow Prozess ist die Dicke der BOX Schicht. Aufgrund

der doppelten Nutzung als Ätzstop für Vorder- und Rückseite (Unterabschnitt 2.3.1) wird die minimale Dicke durch den Struktur- und insbesondere den Membranätzprozesses bestimmt. Entscheidend hierfür sind die Selektivitäten zwischen Silizium und Oxid sowie die sogenannte Überätzzeit, also die Zeitspanne, die notwendig ist, um von einer lokal erfolgreichen Ätzung zu einem vollständig geätzten Wafer oder einer vollständig geätzten Maske zu gelangen. Da die hohe Spannung der BOX Schicht, die insbesondere am Ende des Membranätzprozesses sichtbar wird (Unterabschnitt 2.3.1.11), eine für die Ausbeute des Gesamtprozesses relevante Größe darstellt, sollte die Dicke der BOX Schicht nicht wesentlich über die notwendige Stärke hinaus gewählt werden. Als Faustregel für die obere Grenze der BOX Dicke d_{BOX} in Abhängigkeit von der Dicke der SOI Schicht d_{SOI} hat sich die Faustregel

$$d_{BOX} \leq \frac{d_{SOI}}{10} \quad (2.6)$$

bewährt.

Neben den ausbeuterelevanten Faktoren gibt es Größen, die einen direkten Einfluss auf die Qualität des Produkts haben. Hierzu gehört die Homogenität der SOI Schicht, die konkret an drei Stellen im Prozess eine Rolle spielt:

- Inhomogenitäten in der SOI Schicht müssen durch den Prozess zur *Ätzung der Maskenstruktur* ausgeglichen werden. Werden die Strukturen in den dicksten Gebieten gerade erst geöffnet, kommt es an den dünnsten Stellen bereits zu einer Überätzung in das vergrabene Oxid. Aufgrund der hohen Selektivität des Prozesses kommt es zwar nur zu einem mäßigen Oxidabtrag, wohl aber zu einer Änderung des eingestellten Ätzprofils und zum "Notching", einer lateralen Unterätzung entlang der Grenzfläche zwischen SOI und BOX.
- Ebenfalls Einfluss haben Inhomogenitäten auf den Prozess zur *Einstellung der Membranspannung*. Durch die Implantation wird eine konstante Menge an Dotierstoffatomen oberflächennahe in die SOI Schicht eingebracht. Diese werden beim anschließenden Temperprozess in das Kristallgitter eingebaut. Ein Teil der Atome findet den Weg ins vergrabene Oxid, das beispielsweise für Bor eine deutlich bessere Löslichkeit zeigt als Silizium. Schwankt nun die Schichtdicke, so bedeutet dies, dass in dicken Bereichen das Dotierstoffprofil noch nicht flach ist und an dünnen Stellen bereits eine deutliche Ausdiffusion in das Oxid stattfindet. Das Ergebnis sind Schwankungen in der Spannung der SOI und BOX Schicht, welche Einfluss auf die Lagegenauigkeit haben.
- Unmittelbar von der Homogenität der SOI Schicht beeinflusst wird die lokale Steifigkeit der Membran und hierüber ebenfalls die Lagegenauigkeit.

Parameter	SDB	Simox	SmartCut	Eltran	PolySOI
SOI Schicht					
Zieldicke 3 μ m	+	-/+ ¹	-/+ ¹	+	+
Dickenhomogenität	-/+ ²	+	+	+	+
Wahl der Dotierung	+	-/+ ¹	-/+ ¹	o	+
Defektfreiheit	+	o/+ ³	+	+	?
Zugspannung	+	+	o	-	o
BOX Schicht					
Defektfreiheit	+	o/+ ³	+	+	+
Lokale Schicht	-	+	-	-	+

¹ mit epitaktischer Verstärkung

² PACE'd SDB

³ MLD

Tabelle 2.2: Bewertung von SOI Material auf Eignung für den SOI WFP (+ = gut erfüllt / o = bedingt erfüllt / - = nicht erfüllt).

Schließlich gibt es weitere Parameter wie die freie Wahl der Dotierstoffkonzentration in der SOI Schicht, die Verfügbarkeit von SOI Schichten in beliebiger Dicke, die Existenz einer Zugspannung in der SOI Schicht oder auch die Möglichkeit, lokale SOI Schichten herzustellen. Diese Parameter beeinflussen die möglichen Einsatzbedingungen der Maske nach deren Fertigstellung und ermöglichen oder verhindern bestimmte Modifikationen im Herstellungsprozess.

Alle Punkte sind in kompakter Form in Tabelle 2.2 zusammengestellt, zusammen mit einer dreistufigen Bewertung (+ = gut erfüllt / o = bedingt erfüllt / - = nicht erfüllt) der im Unterabschnitt 2.3.2 vorgestellten Materialien. Als Resultat zeigt sich, dass keines der Materialien prinzipiell für den SOI WFP ungeeignet ist. Bei einigen Werkstoffen wird die Eignung erst durch zusätzliche Schritte (PACE, Epitaxie) erreicht, die Parameter "Zugspannung" und "Lokale Schicht" sind optionale Größen. Die größte Flexibilität erhält man bei der Verwendung von SIMOX Material, da hier alle der oben aufgelisteten Parameter erfüllt werden können.

2.3.2.9 Parameter der verwendeten Materialien

Die wichtigsten Parameter der für Untersuchungen der im Rahmen des SOI WFP verwendeten Materialien sind in Tabelle 2.3 bis Tabelle 2.5 zusammengestellt. Um Wafer jeweils mit dem kompletten Satz ihrer Daten zu beschreiben, werden im Folgenden hierfür die unter "ID" stehenden Kürzel verwendet.

ID	S-1	S-2	S-3	S-4
Materialtyp	SDB	SDB	SDB	Pace'd SDB
SOI Schicht				
Basisdicke	3 μ m	3 μ m	2 μ m	3 μ m
Epitaxie	-	-	-	-
Gesamtdicke	3 μ m	3 μ m	2 μ m	3 μ m
Homogenität	$\pm 1\mu$ m	$\pm 1\mu$ m	$\pm 0,5\mu$ m	$\pm 0,01\mu$ m
Widerstand	0,1-1 Ω cm	0,1-1 Ω cm	500-1000 Ω cm	5-10m Ω cm
Type	p	n	p	p
Orientierung	100	100	100	100
Kristall	Cz	Cz	FZ	Cz
BOX Schicht				
Dicke	0,3 μ m	0,3 μ m	0,3 μ m	0,3 μ m
Homogenität	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\text{nm } 3\sigma$	$\pm 5\%$

Tabelle 2.3: Parameter des mit dem SOI WFP getesteten SOI Materials

ID	SC-1	SC-2	SC-3	E-1
Materialtyp	SmartCut	SmartCut	SmartCut	Eltran
SOI Schicht				
Basisdicke	0,1 μ m	0,2 μ m	1,8 μ m	2 μ m
Epitaxie	2,9 μ m	2,8 μ m	-	-
Gesamtdicke	3 μ m	3 μ m	1,8 μ m	2 μ m
Homogenität	$\pm 0,02\mu$ m	$\pm 0,02\mu$ m	$\pm 0,02\mu$ m	$\pm 0,04\mu$ m
Widerstand	13-22 Ω cm	13-22 Ω cm	13-22 Ω cm	>75m Ω cm
Type	p	p	p	p
Orientierung	100	100	100	100
Kristall	FZ	FZ	FZ	Epi
BOX Schicht				
Dicke	0,2 μ m	0,2 μ m	0,2 μ m	0,2 μ m
Homogenität	2nm 6 σ	2nm 6 σ	2nm 6 σ	$\pm 0,5$ nm

Tabelle 2.4: Parameter des mit dem SOI WFP getesteten SOI Materials (Forts.)

ID	E-2	SX-1	SX-2
Materialtyp	Eltran	Simox	Simox (lokal)
SOI Schicht			
Basisdicke	3 μ m	0,38 μ m	0,18 μ m
Epitaxie	-	2,6 μ m	2,8 μ m
Gesamtdicke	3 μ m	3 μ m	3 μ m
Homogenität	$\pm 0,04\mu$ m	$\pm 0,02\mu$ m	$\pm 0,2\mu$ m
Widerstand	>75m Ω cm	10-20 Ω cm	10-20 Ω cm
Type	p	p	p
Orientierung	100	100	100
Kristall	Epi	Cz	Cz
BOX Schicht			
Dicke	0,2 μ m	0,21 μ m	0,15 μ m
Homogenität	$\pm 0,5$ nm	4nm 3 σ	4nm 3 σ

Tabelle 2.5: Parameter des mit dem SOI WFP getesteten SOI Materials (Forts.)

2.4 Optimierungen

Erfahrungen, die im Laufe der Zeit gemacht wurden, sind in entsprechende Änderungen und Verbesserungen eingeflossen. Dies betrifft sowohl das Ausgangsmaterial als auch den Gesamtprozess. Darüber regten die ständig wachsenden Anforderungen auch dazu an, völlig neue Prozessabläufe zu konzipieren.

2.4.1 Ausgangsmaterial

Zu Beginn der Arbeit am SOI WFP lag das Ziel der Entwicklung vor allem im Nachweis der präparativen Machbarkeit eines derartigen Prozesses. Schwerpunktmäßig wurde hierfür gebondetes SOI Material mit defektfreier BOX Schicht und schlechter Homogenität (Material S-1 bis S-3) verwendet. Nachdem mit der Installation eines stabilen Prozesses dieser erste Schritt gelungen war, wurde für die weiteren Versuche zunehmend Wert auf Lagegenauigkeit gelegt. Aufgrund der in Unterunterabschnitt 2.3.2.8 angeführten Punkte und bestätigt durch FE-Rechnungen [91], wonach zur Reduktion des Lagefehlers unter 8 nm bei einer Membranspannung von 5MPa eine Konstanz der Schichtdicken besser 0,1 μ m für eine Membranstärke von 3 μ m notwendig ist [91], wurde nun zusätzlich Wert auf sehr homogene SOI Schichten gelegt. In diesem Zusammenhang wurde das Pace'd SDB (Material S-4) eingeführt. Zunehmende Lieferschwierigkeiten zwangen dann zu einer erneuten Änderung des Materialkonzepts, wobei der Schwerpunkt hin zu den neueren

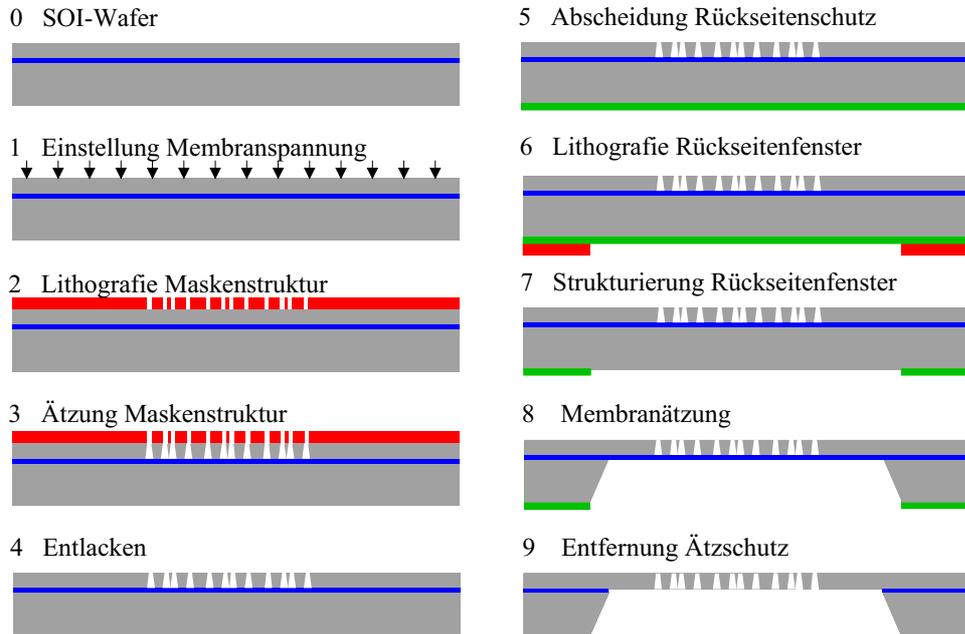


Abbildung 2.13: Verbesserter SOI Waferflow Prozess

Verfahren SmartCut und Eltran verschoben wurde (Material SC-1 bis SC-3, E-1 und E-2). Der Vollständigkeit halber wurde, trotz Bedenken hinsichtlich der BOX-Qualität, auch noch epitaktisch verstärktes Simox (Material SX-1 und SX-2) getestet.

2.4.2 Prozessierung

Erfahrungsgemäß korrelieren die Komplexität eines Prozesses und dessen Ausbeute miteinander. Unter diesem Gesichtspunkt wurde die bereits in Abbildung 2.3 dargestellte und erfolgreich genutzte Abfolge erneut überarbeitet. Ziel war es einerseits, die Prozessfolge auf ein Minimum an Schritten zu reduzieren, gleichzeitig sollte die Abfolge so modifiziert werden, dass mögliche Störgrößen wie Schwankungen der Eigenspannung von Hilfsschichten eliminiert werden und der Forderung nach einer hohen Lagegenauigkeit in höherem Maß Rechnung getragen wird. Dies bedeutet, dass die Lithografie der Maskenstruktur auf dem blanken SOI Wafer ohne irgendwelche Hilfsschichten unmittelbar nach der Spannungseinstellung erfolgt. Bei der in Abbildung 2.13 skizzierten neuen Prozessfolge wurden insgesamt zwei wesentliche Änderungen vorgenommen.

2.4.2.1 Eliminierung der Hartmaske

Betrachtet man die Evolution der Maskenprozesse im Rahmen des europäischen Ionen Lithografie Projektes, so erfolgte die Entwicklung des SOI

Prozesses zunächst nur als Reservelösung für den zu diesem Zeitpunkt benutzten elektrochemischen Membranätzprozess ("pn-Prozess", vgl. Unterabschnitt 2.2.3) [63]. Aus diesem Grunde wurden einige der bereits für den pn-Prozess entwickelten und erfolgreich erprobten Schritte in den SOI Prozess übernommen. Die durch die Hartmaske verursachte mechanische Spannung beeinflusst trotz der in Unterunterabschnitt 2.3.1.3 angesprochenen Spannungsoptimierung unmittelbar die Gestalt des SOI Wafers in Form von Krümmung (Bow) und Welligkeit (Warp). Bemerkbar macht sich dies bei der Belichtung der Maskenstrukturen, denn jede Schwankung der Schichtdicke oder Zusammensetzung wirkt sich unmittelbar auf die Lagegenauigkeit der Membranmaske aus. Ein deutlicher Fortschritt war daher der Übergang weg von der Hartmaske und hin zu einer Lackmaske, was durch Optimierungen am Struktätzprozess möglich wurde [71]. Flankiert wurde diese Arbeit durch Untersuchungen unterschiedlicher Lacksysteme [67, 68, 69, 92]. Dabei stellte sich heraus, dass die Anforderungen einer minimalen Strukturbreite von 200nm (50nm für 4x IPL) bei minimaler Kantenrauigkeit durch einen CARL Lackprozess von Infineon Technologies am besten bewältigt werden.

2.4.2.2 Abscheidung Rückseitenschutz

Im neuen Prozess kommt weiterhin statt des bisher verwendeten LPCVD-Nitrid eine Schicht aus PECVD-Nitrid zur Definition der Membranöffnung zum Einsatz, die erst nach Abschluss der Strukturierungsschritte aufgebracht wird. In Abkehr von dem bisherigen Konzept ermöglicht dies, die Strukturierung der SOI Schicht ohne die Beeinflussung von Form und Spannungszustand des Wafers durch irgendeine Hilfsschicht durchzuführen. *Damit spielen die Homogenität und der Spannungszustand aller am Prozess beteiligten Schichten, vom SOI Wafer und Lackprozess abgesehen, keine Rolle mehr, solange es nicht aufgrund zu starker Schwankungen zum Bruch der Membran kommt.* Möglich wurde die Änderung, nachdem mit dem PECVD-Nitrid ein Prozess gefunden wurde, bei dem es, im Gegensatz zum LPCVD-Prozess, nur zu einer einseitigen Abscheidung auf dem Wafer kommt. Anderenfalls würde es zu einer Nitrid-Deposition in die offenen Strukturen der Maske kommen, was aufgrund der hohen intrinsischen Spannung in diesem Material zu Schwierigkeiten bei der Membranätzung führt. Gleichzeitig entfällt der Prozess zur Entfernung des LPCVD-Nitrids auf der Vorderseite des Wafers unmittelbar nach der Abscheidung. Der für die Qualität und Ausbeute wichtigste Grund der Änderungen liegt darüberhinaus in der höheren Beständigkeit der 900nm dicken Si_3N_4 -Schicht gegenüber den Ätzmedien. Aufgrund des anderen Abscheideverfahrens treten Probleme mit Spannungsrissen oder Einschlüssen in der Schicht hier nicht auf, so dass Anätzungen am Tragrings weitgehend ausgeschlossen werden können. Ein weiterer Vorteil auch hinsichtlich der Prozesszeit ist die im Vergleich zum LPCVD-Nitrid erhöhte Ätzrate der neuen Schicht in Flußsäure, so dass der letzte Prozessschritt, die Entfernung aller

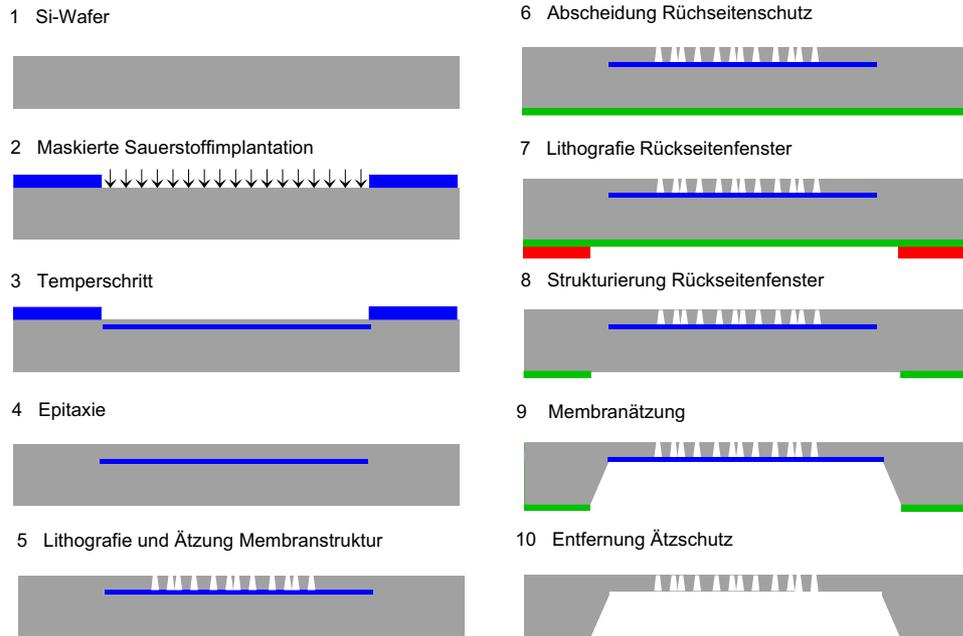


Abbildung 2.14: Schematische Abfolge eines Waferflow Prozesses mit lokaler SOI Schicht

Restschichten, um etwa den Faktor fünf reduziert werden konnte.

2.4.3 Monolithische Membranmasken durch lokales SOI

Ein im Vergleich zu den bisher gezeigten Ansätzen deutlich weitergehendes Konzept ist die Herstellung sogenannter monolithischer Membranmasken. Das Ziel hierbei besteht darin, dass die komplette Membranmaske am Ende des Herstellungsprozesses nur noch aus einem Material besteht. Probleme wie die elektrische Kontaktierung von Membran und Traging (Isolation durch BOX) sowie unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten wären damit behoben. Praktisch bedeutet dies, dass alle während des Prozesses notwendigen Hilfsschichten am Ende wieder vollständig entfernt werden. Hierzu gehört insbesondere auch die im Rahmen des SOI WFP für die Membranätzung notwendige vergrabene Oxidschicht. Diese bleibt bei der standardmäßigen Fertigung im Traging erhalten und trägt, wie in Unterabschnitt 3.2.4 gezeigt, auch zur Spannung des Gesamtsystems bei. Für den SOI Waferflow Prozess ist die Schicht jedoch nur im Bereich der späteren Membran notwendig. Betrachtet man die in Unterabschnitt 2.3.2 aufgeführten SOI Produkte, so bietet nur der SIMOX-Prozess eine einfache Fertigungsverfahren zur Herstellung eines lokal begrenzten SOI Films. Mit einer $1\mu\text{m}$ dicken Schicht aus TEOS-Oxid lassen sich die Sauerstoffionen während der

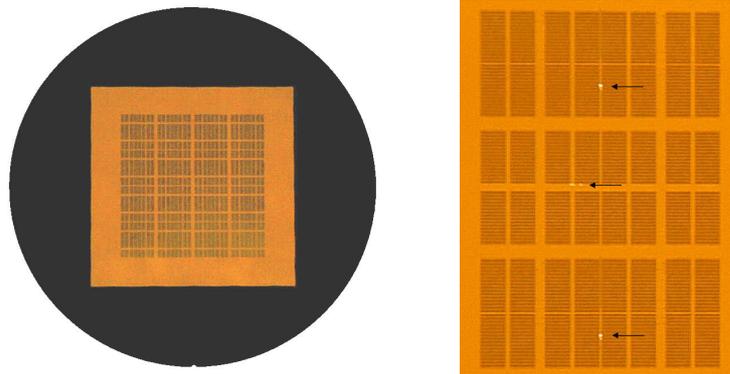


Abbildung 2.15: Die weltweit erste 200mm Stencilmaske: Gesamtansicht (links) und Ausschnitt der Struktur (rechts). Die Pfeile markieren die hellen Stellen in der Membran

SIMOX-Implantation vollständig abfangen und so beliebig geformte SOI Felder erzeugen. Zu diesem Zweck wird, wie in Abbildung 2.14 gezeigt, auf einem niederdotierten Siliziumwafer eine Schicht von TEOS-Oxid abgeschieden und anschließend ein kreisförmiges Feld geöffnet. Da bei Silizium mit (100) Orientierung durch Nassätzung in alkalischen Medien ein Flankenwinkel von $\alpha = 54,7^\circ$ entsteht [61], genügt es, hier dieselbe Maske wie für die spätere Rückseitenbelichtung zu verwenden. Wichtig ist dabei ein geeignetes Maskenkonzept, mit dem eine Justierung zwischen dem SOI Film auf der Vorderseite und dem Rückseitenfenster zur Definition der Membrangröße auf der Rückseite des Wafers möglich ist. Kann dies nicht gewährleistet werden, sollte für das Rückseitenfenster eine kleinere Öffnung gewählt und so ein Durchätzen der Membran neben der lokalen SOI Schicht verhindert werden. Restliches Oxid kann dann, abhängig, von den verfügbaren Anlagen, mittels Nass- oder Trockenätzprozess entfernt werden [93]. Nach Abschluss des SOI Prozesses wird die Oxidmaske in HF-Lösung entfernt und die gewünschte SOI Dicke mittels Epitaxieprozess eingestellt. Die weitere Prozessierung erfolgt analog dem konventionellen SOI WFP, wobei für die Rückseitenbelichtung das oben gesagte gilt. Nach der Membranätzung erfolgt eine Oxidätzung. Zurück bleibt ein monolithisches Membrangebilde, das vollständig aus Silizium besteht.

2.5 Prozess Transfer

Um das Potenzial des SOI Waferflow Prozess besser abschätzen zu können, wurde der Prozess im Frühsommer 1998 in die 200mm Fabrik der Infineon Technologies AG in Dresden überführt. Von einer kleineren Modifikation in der Abfolge und Hartmaske abgesehen, konnte der Prozess in unveränderter Form übernommen werden. Die Produktion der 200mm Membranmasken er-

folgte dann, bis auf die Membranätzung, bei Infineon Technologies AG [94]. Letztere erfolgte in der in Abbildung 2.5 rechts dargestellten und am Institut für Mikroelektronik, Stuttgart, gebauten Ätzzelle in Stuttgart. Als Resultat dieser Kooperation konnten im Herbst 1999 die in Abbildung 2.15 dargestellte erste 200mm Stencilmaske weltweit präsentiert werden [95]. Unter Verwendung von optischer Lithografie wurden Strukturen bis 250nm in die Membran übertragen. Ein interessanter Effekt kann noch in dem vergrößerten Ausschnitt der Struktur im rechten Teil des Bildes beobachtet werden: Obwohl alle Strukturen Öffnungen in der Maske darstellen, erscheinen nur vier Strukturen als helle Stellen, der Rest wirkt dunkel, sogar dunkler als die geschlossene Membran - ein Effekt, der sich nur dadurch erklären lässt, dass die Strukturabmessungen deutlich kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts.

Kapitel 3

Lagegenauigkeit der Struktur einer Membranmaske

3.1 Problemstellung

Einer der wichtigsten und zugleich schwierigsten Punkte bei der Herstellung einer Membranmaske ist das Erreichen der geforderten Lagegenauigkeit (Unterabschnitt 1.2.1). Wurde einmal eine Struktur in der erforderlichen Genauigkeit auf den Wafer geschrieben und in die membranbildende Schicht übertragen, sollte sich im Idealfall an diesem Zustand nichts mehr ändern. Dies bedeutet, dass die Membran absolut spannungsneutral sein sollte. Wie jedoch bereits in Unterabschnitt 1.2.6 angedeutet, ist die Lagegenauigkeit nur ein Teil des Ganzen und eine ausreichende mechanische Stabilität unumgänglich. Diese wiederum erfordert eine Membranspannung über den neutralen Zustand hinaus, was unweigerlich zu einer Verzeichnung der Struktur führt. Akzeptiert werden kann diese nur dann, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Reproduzierbarkeit
- Berechenbarkeit
- Stabilität unter Einsatzbedingungen

Der letzte Punkt ist dabei gemäß der Aufgabenstellung (Abschnitt 1.3) nicht Thema der Arbeit. Werden alle drei Bedingungen erfüllt, kann das Strukturfeld vorverzeichnet werden. Für den Maskenprozess bedeutet das eine extreme Anforderung an die Beherrschung aller Spannungszustände im Herstellungsprozess, vom Ausgangsmaterial über alle spannungsgebenden Prozesse bis hin zum Maskenhandling.

3.2 Spannungseinstellung

3.2.1 Theorie

Die reproduzierbare Einstellung der Membranspannung auf einen festgelegten Wert stellt, wie oben beschrieben, einen sehr wichtigen Parameter im Herstellungsprozess dar. Praktisch erfolgt dies durch die Änderung der Gitterkonstanten des Basismaterials durch den gezielten Einbau von Fremdatomen mittels Implantation und Diffusion [96, 97].

3.2.1.1 Eindimensionales Modell

Ausgangspunkt für die eindimensionale Betrachtung ist das in Abbildung 3.1 dargestellte Modell einer Kette mit einer konstanten Anzahl von N_{Gi}^* Kugeln. Die Beschreibung der Kugeln erfolgt über ihre Radien. Besteht die Kette, wie im linken Bild gezeichnet, nur aus grauen Kugeln gleicher Größe, so hat sie eine Länge L_0

$$L_0 = 2R_{Gi}N_{Gi}^*. \quad (3.1)$$

Werden, wie im rechten Bild gezeichnet, N_{Dot}^* graue Kugeln entfernt und dafür dieselbe Anzahl an schwarzen Kugeln eingefügt, so ergibt sich für die Länge L_1

$$L_1 = 2R_{Gi}(N_{Gi}^* - N_{Dot}^*) + 2R_{Dot}N_{Dot}^*. \quad (3.2)$$

Der Austausch der Kugeln verursacht demnach eine Längenänderung ΔL

$$\Delta L = L_1 - L_0. \quad (3.3)$$

Aus dem geometrischen Aufbau einer Membranmaske folgt eine weitere Randbedingung: Da die dünne Folie von einem massiven Tragring aufgespannt wird, darf sich die Außenabmessung der Membran durch den Einbau von Fremdatomen quasi nicht ändern. Für das Modell bedeutet dies, dass zur Wahrung dieser Randbedingung die Kette wieder auf Ihre ursprüngliche Länge L_0 gedehnt werden muss. Für diese innere Dehnung ϵ_i gilt

$$\epsilon_i = -\frac{\Delta L}{L_0}. \quad (3.4)$$

Über das Hooke'sche Gesetz erhält man den Zusammenhang zur inneren Spannung σ_i , die durch den Einbau der Fremdatome in der Membran aufgebaut wird

$$\sigma_i = \epsilon_i E. \quad (3.5)$$

Aus Gleichung 3.1 bis Gleichung 3.4 und der Randbedingung $N_{Dot}^* \ll N_{Gi}^*$ folgt für die innere Dehnung ϵ_i

$$\epsilon_i = \left[1 - \left(\frac{R_{Dot}}{R_{Gi}} \right) \right] \frac{N_{Dot}^*}{N_{Gi}^*}. \quad (3.6)$$

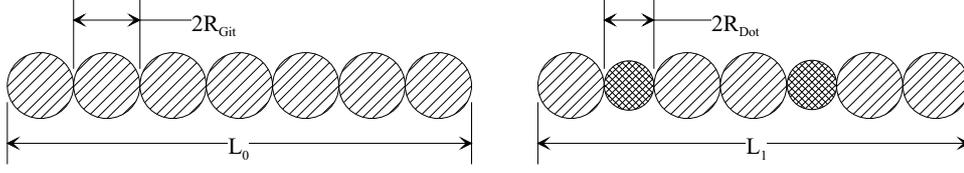


Abbildung 3.1: Kugelmodell zum Einbau von Fremdatomen: Kette ohne Fremdatome (links) und Kette mit Fremdatomen (rechts), wobei R_{Gi} der Radius des Gitteratoms, R_{Dot} der Radius des Dotierstoffatoms, L_0 die Länge einer Kette aus Kugeln gleicher Radien und L_1 die Länge einer Kette aus Kugeln unterschiedlicher Radien sei.

Der dimensionslose Quotient N_{Dot}^*/N_{Gi}^* beschreibt hierbei die Dotierstoffkonzentration. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit kann diese auch durch den Quotienten der Volumenkonzentrationen N_{Dot} und N_{Gi} beschrieben werden:

$$\epsilon_i = \left[1 - \left(\frac{R_{Dot}}{R_{Gi}} \right) \right] \frac{N_{Dot}}{N_{Gi}}. \quad (3.7)$$

Durch die Einführung des Gitterkontraktionskoeffizienten β lässt sich ϵ_i auch derart formulieren [98]:

$$\epsilon_i = \beta N_{Dot}, \quad (3.8)$$

wobei

$$\beta = \left[1 - \left(\frac{R_{Dot}}{R_{Gi}} \right) \right] N_{Gi}^{-1}. \quad (3.9)$$

Üblicherweise setzt man für R_{Gi} und R_{Dot} die Kovalenzradien nach Pauling und Huggins [99, 100] ein und erhält so einen Näherungswert für β . Aus Gleichung 3.5 und Gleichung 3.8 erhält man schließlich für die innere Spannung σ_i folgenden Zusammenhang:

$$\sigma_i = E\beta N_{Dot} \quad (3.10)$$

Die Gleichung entspricht im wesentlichen der Beziehung

$$\sigma = \beta E(D/t), \quad (3.11)$$

wie sie bei Mauger et al. [58] gefunden werden kann. Hierbei ist D die Anzahl der implantierten Atome pro cm^2 und t die Dicke der Membran. Ist die Verteilung der Dotierstoffatome inhomogen über die Dicke der Membran, so lässt sich die lokale Spannung als Funktion der Tiefe z angeben [59]:

$$\sigma(z) = E\beta N_{Dot}(z) \quad (3.12)$$

	B	C	P	Ge	As
Atomgewicht	10,811	12,01115	30,9738	72,59	74,9216
Kovalenzradius [Å]	0,88	0,8	1,1	1,22	1,21
Max. Löslich- keit in Silizium [At/cm ³] (1410°C)	8,0 · 10 ²⁰	3,5 · 10 ¹⁷ (1410°C)	1,3 · 10 ²¹ (1200°C)	-	1,8 · 10 ²¹ (1150°C)
Dotant für Si	p	-	n	-	n

Tabelle 3.1: Eigenschaften einiger typischer Elemente aus der Halbleitertechnik [102, 103]

3.2.1.2 Zwei- und dreidimensionales Modell

Analoge Rechnungen lassen sich auch unter Verwendung mehrdimensionaler Modelle durchführen. Die Ergebnisse unterscheiden sich jeweils nur in der Konstanten β . Für den zweidimensionalen Fall erhält man [101]

$$\beta_{2D} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{R_{Dot}^2}{R_{Gi}^2} \right) \right] N_{Gi}^{-1}. \quad (3.13)$$

Die dreidimensionale Rechnung liefert [101]

$$\beta_{3D} = \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{R_{Dot}^3}{R_{Gi}^3} \right) \right] N_{Gi}^{-1}. \quad (3.14)$$

In Gleichung 3.10 eingesetzt liefert Gleichung 3.13 oder Gleichung 3.14 die theoretische Membranspannung für den zwei- beziehungsweise dreidimensionalen Ansatz.

3.2.1.3 Auswahl der Dotierstoffe

Da im aktuellen Anwendungsfall eine Kompatibilität zu Silizium Halbleiterprozessen gewährleistet werden soll, kommen nur eine handvoll Elemente als Dotierstoffe in Frage: Bor, Kohlenstoff, Phosphor, Germanium und Arsen. Deren charakteristische Eigenschaften sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Um eine Zugspannung einstellen zu können, muss der Kovalenzradius des Dotierstoffs kleiner als der des Gitteratoms sein, was für Silizium mit $R_{Kov} = 1,17\text{Å}$ die Auswahl auf Bor, Phosphor und Kohlenstoff reduziert. Zur Minimierung eines Dotierstoffgradienten senkrecht zur Membran sollte das Element schließlich noch eine ausreichend hohe Diffusionsgeschwindigkeit im Gittermaterial zeigen [104]. Im Fall der Siliziummembran stellt daher Bor den Dotierstoff der Wahl dar. Mit den Kovalenzradien von Bor und Silizium $R_{Dot} = 0,88\text{Å}$ und $R_{Gi} = 1,17\text{Å}$ und der Zahl der Siliziumatome pro

Volumen $N_{Gi} = 5 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-3}$ erhält man aus Gleichung 3.9 für die Gitterkontraktionskonstante

$$\beta_{Si,B} = 4,96 \cdot 10^{-24} \text{cm}^3/\text{Atom}. \quad (3.15)$$

Dieser stimmt weitgehend mit dem in neuerer Zeit anhand von röntgenografischen Untersuchungen ermittelten β -Wert überein [97]

$$\beta_{Si,B} = (5,19 \pm 0,09) \cdot 10^{-24} \text{cm}^3/\text{Atom}. \quad (3.16)$$

Um eine Aussage über die durch Dotierung in einer starr an ihrem Umfang eingespannten Membran verursachte Spannung zu erhalten, setzt man Gleichung 3.16 und das biaxiale Elastizitätsmodul

$$Y = \frac{E}{1 - \nu} \quad (3.17)$$

in Gleichung 3.16 ein, wobei ν die Querkontraktionszahl ist. Für Silizium ist $Y_{Si} = 180 \text{ GPa}$. Damit erhält man

$$\sigma_{Si,B} = 9,3 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Pa cm}^3}{\text{Atom}} \cdot N_{\text{Dot}}. \quad (3.18)$$

3.2.1.4 *In situ* Dotierung von SOI Schichten

Wird die SOI Schicht, wie im Fall des SmartCut-Materials, aus einer Basischicht und einem nachfolgenden Epitaxieprozess aufgebaut, so kann dieser Schritt auch zur Einstellung der Schichtspannung genutzt werden. Da der Dotierstoff in diesem Fall kontinuierlich eingebaut wird, entfällt die Forderung nach einer ausreichend hohen Diffusionsgeschwindigkeit im Gittermaterial, wodurch sich die Auswahl der möglichen Elemente auf die typischen Dotierstoffe der Halbleiterindustrie (Tabelle 3.1) erweitert. Ein klassisches Beispiel hierfür ist auch die in Unterabschnitt 2.2.2 beschriebene Kodotierung von Bor und Germanium zur Herstellung von spannungsarmen p^+ Schichten. In neuerer Zeit nutzt man die Möglichkeit auch zur Herstellung von $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$ Schichten [105].

3.2.2 Messungen zur Membrancharakterisierung

Im den folgenden Abschnitten wird kurz auf den Aufbau der wichtigsten Messgeräte und Maschinen eingegangen.

3.2.2.1 Membrandickenmessung

Zur Bestimmung der Membrandicke wurde ein kommerzielles IR-Messgerät *QS408M* der Firma Bio-Rad Laboratories Inc. verwendet. Das Hauptanwendungsgebiet dieses für die Halbleiterindustrie konzipierten Geräts liegt

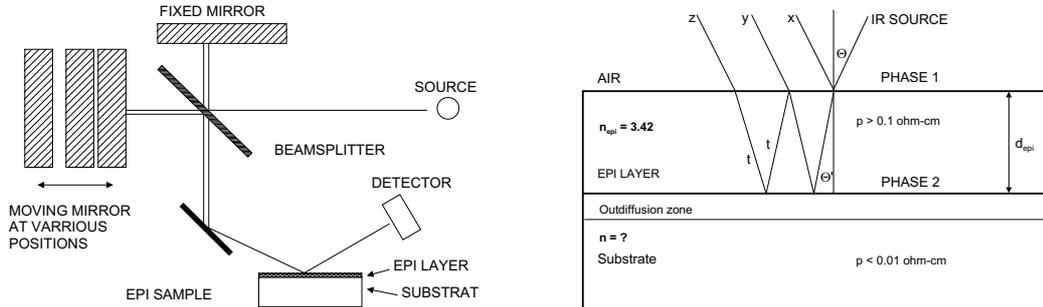


Abbildung 3.2: IR-Messgerät: IR-Strahlengang im Gerät (links) und im epitaktisch verstärkten Wafer (rechts) [106]

im Bereich der Schichtdickenmessung nach Epitaxieprozessen. Darüber hinaus können auch spezielle Messungen beispielsweise zur Bestimmung des Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalts in Silizium, des Bor- und Phosphorgehalts in Gläsern durchgeführt werden. Der optische Pfad des Geräts ist im linken Teil der Abbildung 3.2 dargestellt. Im rechten Teil ist der Verlauf eines unter dem Winkel Θ einfallenden IR-Strahls in einem epitaxierten Wafer mit bestimmten Randbedingungen gezeichnet. Durch die unterschiedliche Reflexion an der Grenzfläche Luft/Silizium und Silizium/Substrat kommt es nach Bragg zu einer Wegdifferenz t

$$t = d \cdot n \cdot \cos\Theta' \quad (3.19)$$

zwischen den Strahlen. Dies führt im Detektor zu Interferenzen und zu einem IR-Spektrum, bei dem die Abstände $\bar{\nu}$ zwischen den Intensitätsmaxima von der Dicke d der Epitaxieschicht abhängig sind [106]

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2nt}. \quad (3.20)$$

Während sich $\bar{\nu}$ für dicke Schichten problemlos messen lässt, ist eine derartige Auswertung, wie im linken Teil der Abbildung 3.3 gezeigt,

für dünne Schichten schwierig. Um trotzdem die gewünschte Information zu erhalten, wird zusätzlich ein He-Ne Referenzlaser in das System integriert. Durch die Auswertung des Lasersignals im Interferometer wird kontinuierlich die Position des beweglichen Spiegels bestimmt. Da die Wellenlänge des Lasers (632,8 nm) einer Wellenzahl von 15800 cm^{-1} entspricht, verursacht so beispielsweise eine Bewegung des Spiegels um 1 cm in Summe 15800 Interferenzsignale. Ein typisches Spektrum ist im rechten Teil der Abbildung 3.3 dargestellt. Der Abstand zwischen Nebensignal (sideburst) und Hauptsignal (centerburst) ist proportional zur Frequenz des IR-Interferenzmusters. Durch die Lasermessung ist der Weg bekannt, so dass über die Gleichung 3.19 und Gleichung 3.20 die Dicke der Epitaxieschicht bestimmt werden kann. Zur

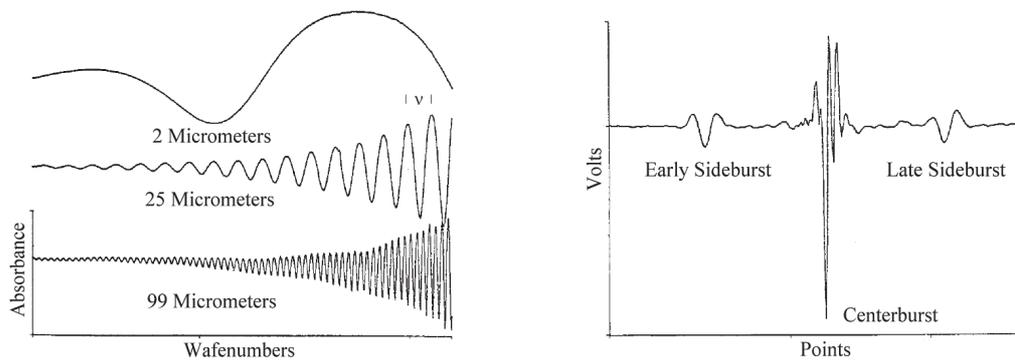


Abbildung 3.3: Interferenzmuster für verschiedene Schichtdicken (links), typisches Interferogramm (rechts) [106]

Verbesserung des Signals kann zusätzlich noch ein Referenzspektrum einer deutlich dickeren Schicht aufgenommen und von der aktuellen Messung abgezogen werden. Sehr dünne Schichten ($< 2\mu\text{m}$) können außerdem in einem speziellen Modus gemessen werden, bei dem sowohl das aktuelle Interferogramm wie auch das Referenzinterferogramm Fourier transformiert werden. Beide Spektren werden digital gefiltert, rücktransformiert und voneinander abgezogen.

Wie die Praxis zeigt, sind Messungen an SOI Wafern aufgrund des harten Übergangs von Silizium ($n=3,41$) zu Siliziumdioxid ($n=1,46$) auch für dünne, hochdotierte Schichten problemlos möglich. Das selbe gilt auch für Messungen an Membranmasken aufgrund des Übergangs Silizium/Luft.

3.2.2.2 Waferdickenmessung

Neben der klassischen Messuhr gibt es noch eine Reihe anderer Verfahren, um die Dicke eines Wafers zu bestimmen. Ein in der Halbleiterindustrie übliches Prinzip ist die kontaktfreie Messung mittels Ultraschall. Mit Hilfe zweier Sensoren in konstanter Entfernung wird der Abstand zur Ober- und Unterseite des Messobjekts gemessen und hieraus die Waferdicke bestimmt. Der Abgleich des Systems erfolgt automatisch an einer Referenz mit bekannter Dicke. Für alle Messungen wurde ein Gerät vom Typ Sonogage 300 der Firma KLA-Tencor Corporation verwendet.

3.2.2.3 Krümmungsmessung

Zur Bestimmung von Form und Verbiegung eines Wafers, wurde ein kommerzielles Profilometer P20 der Firma KLA-Tencor verwendet. Das Prinzip dieser Messung basiert auf einer feine Nadel, mit einer bestimmten Kraft beaufschlagt, über die Probe geführt wird. In regelmäßigen Abständen wird dabei die Auslenkung der Nadel aufgezeichnet, so dass ein Höhenprofil der Probe

über den abgescannten Weg zur Verfügung steht. Die vertikale Auflösung des Verfahrens liegt, in Abhängigkeit vom Gerät, bei einigen Nanometern. Im speziellen Fall des Profilometers P20 wird nicht die Nadel über die Probe bewegt, sondern die Probe mittels eines xy-Tisches unter der Nadel hindurch bewegt. Die Lagerung des Wafers bei der Messung erfolgt über eine Dreipunktauflage. Neben der aktuellen Form des Wafers lässt sich nach diesem Prinzip auch eine Aussage über den Spannungszustand einer Schicht gewinnen. Erforderlich ist dazu jeweils eine Messung vor und nach der Abscheidung der betreffenden Schicht. Zur Bestimmung der Schichtspannung wird aus der Differenz der beiden Messungen der Krümmungsradius R bestimmt. Dieser ist über die Stoney'sche Gleichung [107]

$$\sigma_s = \frac{E}{1 - \nu} \cdot \frac{d_w^2}{6d_s \cdot R} \quad (3.21)$$

mit der Spannung σ_s der Schicht verknüpft. Weiterhin bekannt sein müssen die Dicke des Wafers d_w (Unterunterabschnitt 3.2.2.2) und der zu untersuchenden Schicht d_s . Durch eine einfache geometrische Umformung kann der Krümmungsradius R auch durch die halbe Scanlänge r und den Kugelstich h beschrieben werden:

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h} \quad (3.22)$$

Aus Gleichung 3.21 und Gleichung 3.22 folgt für die Spannung der Schicht σ_s zu

$$\sigma_s = \frac{E}{1 - \nu} \cdot \frac{h \cdot d_w^2}{3d_s \cdot (r^2 + h^2)}. \quad (3.23)$$

Die Scanlänge wurde für alle Messungen konstant gehalten und beträgt 130 mm.

3.2.2.4 Spannungsmessung

Die Spannung einer Membran kann mit einer Reihe von Messverfahren bestimmt werden [108]. Zu den bekanntesten Verfahren gehört die Bulging Methode [109], bei der die Änderung des Krümmungsradius als Reaktion auf eine Zwangskraft (Druck, elektrisches Feld) einer an der Membranbegrenzung eingespannten Probe gemessen wird.

Basis hierfür ist die Differenzialgleichung zweiter Ordnung für den Gleichgewichtszustand:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = -\frac{p}{T} \quad (3.24)$$

Hierbei sind x und y die Koordinaten eines Punktes auf der Oberfläche der Membran unter der Annahme, dass ein Druck p senkrecht zur Oberfläche wirkt und T die Zugspannung pro Einheitslänge einer beliebig geformten Membranbegrenzung darstellt. Die beiden Terme auf der linken Seite von

Gleichung 3.24 können auch durch die Hauptkrümmungsradien R_x und R_y ausgedrückt werden

$$\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} = -\frac{p}{T}, \quad (3.25)$$

die eine messbare Größe darstellen. Für den Fall einer radialsymmetrischen Membran gilt dabei $R_x = R_y$. Zu diesem Zweck wurde an der Slowakischen Akademie der Wissenschaften (SAS) in Bratislava der in Abbildung 3.4 skizzierte elektrostatische Messplatz aufgebaut [110, 111]. Die Membran ist hierbei die eine Elektrode einer Kondensatoreinrichtung. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen Membran und Referenzelektrode kann eine Auslenkung der Membran erzielt werden. Aus der gemessenen Lage der Bildebene in Abhängigkeit von der Auslenkung der Membran kann der Krümmungsradius R bestimmt werden:

$$R = 2 \left[\frac{f_0^2}{\Delta} + f_0 - l \right] \quad (3.26)$$

Hierbei steht f_0 für die Brennweite der verwendeten Linse, l für den Abstand zwischen Membran und Linse und Δ für die Verschiebung der Bildebene durch die Auslenkung der Membran.

Durch die Verwendung einer Schlitzblende ist es möglich, die Krümmungsradien R_x und R_y unabhängig voneinander zu bestimmen. Um zwischen der gesuchten Eigenspannung σ_o und der durch die Bulging Messung verursachten Spannung σ_p zu unterscheiden, wird Gleichung 3.25 für den Fall einer Membran mit axialsymmetrischer Form und unter gleichmäßiger Druckbelastung umgeschrieben:

$$\sigma_o + \sigma_p = -\frac{pR}{2T}, \quad (3.27)$$

mit

$$\sigma_p = \frac{E}{1 - \nu} \frac{a^2}{6R^2}. \quad (3.28)$$

Der elektrostatische Druck zwischen zwei Kondensatorplatten ist gegeben durch

$$p = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 U^2}{d^2}. \quad (3.29)$$

Hier ist U die angelegte Spannung, d der Abstand zwischen Membran und Elektrode, und ϵ_0 und ϵ_r sind die Permeabilitäten für Vakuum und Luft. Gemessen wurde mit einem Abstand d von 1,5mm beziehungsweise 2,18mm und einer Spannung von 0 bis 900V.

Um Gleichung 3.24 und die nachfolgende Herleitung auf die Fläche einer kompletten Membran anwenden zu können, müssen einige Bedingungen erfüllt sein [110]:

1. Die Dicke der Membran ist konstant.

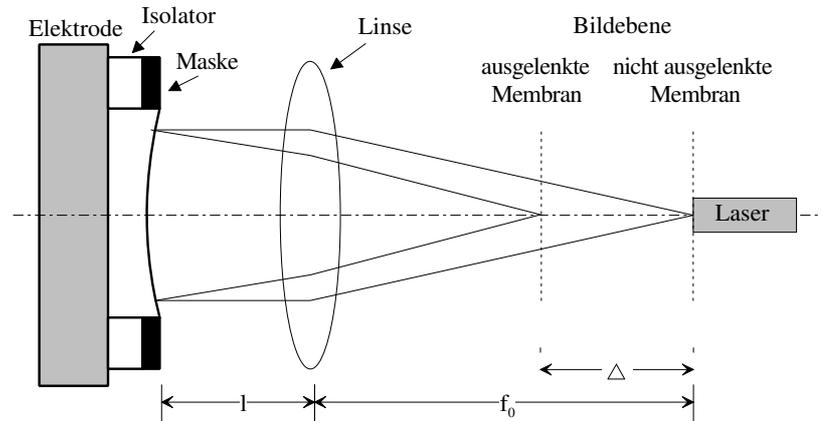


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Messplatzes zur elektrostatischen Spannungsmessung (nach [110])

2. Die elastischen Konstanten sind gleichförmig und isotrop.
3. Die Membran besitzt keine Öffnungen.
4. Die Druckbeaufschlagung erfolgt konstant über die ganze Membran.
5. Die Begrenzung ist kompatibel mit der Verformung der Membran.

In idealer Weise erfüllt sind dabei der Punkt 2 und Punkt 3, letzterer ausschließlich für unstrukturierte Membranen. Alle anderen Punkte liefern einen mehr oder weniger großen Beitrag zum Messfehler. Zur Minimierung von Randeinflüssen erfolgt die Messung deshalb auch insbesondere in Hinblick auf Punkt 5 nur innerhalb eines Gebiets von etwa 70mm Durchmesser zentrisch auf der Membran, deren Durchmesser 127mm beträgt. Neben der bisher beschriebenen Bulge Messmethode wurde in Bratislava zusätzlich ein Messplatz zur Bestimmung der Resonanzfrequenz von Kleinfeldmembranen mit einer Membranfläche von bis zu 10mm x 10mm aufgebaut. Erfolgt die Messung im Vakuum, so gilt für runde Membranen folgender Zusammenhang zwischen Spannung σ_i und Resonanzfrequenz f_{vac} [110]

$$f_{vac} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_m}} \frac{j_{0,1}}{D}. \quad (3.30)$$

Hierbei ist $j_{0,1}$ die Wurzel der Besselfunktion [112] erster Ordnung J_0 , ρ_m die Dichte und D der Durchmesser der Membran. Die Dicke der Membran beeinflusst die Resonanzfrequenz nicht, solange diese konstant und ausreichend dünn ist. Erfolgt die Messung an Luft, so muss die hierdurch verursachte Änderung der Resonanzfrequenz berücksichtigt werden. Die Korrektur be-

rechnet sich nach Yarwood [113] zu

$$f_{vac} = f_{air} \left[1 + 1,34 \frac{d_a R}{d_m t} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

Hierbei sind d_a die Dichte von Luft, d_m , R und t die Dichte, der Radius und die Dicke der Membran.

3.2.3 Experimentelle Ergebnisse

Um die Möglichkeit der gezielten und reproduzierbaren Spannungseinstellung nachzuweisen, wurden Membranen mit unterschiedlicher Dotierung aus unterschiedlichem SOI Grundmaterial nach dem SOI WFP (Unterabschnitt 2.3.1) gefertigt. Zur Bestimmung der Membrandicke wurde das in Unterunterabschnitt 3.2.2.1 beschriebene Infrarot Messverfahren verwendet. Die Spannungsbestimmung erfolgte, wie in Unterunterabschnitt 3.2.2.4 beschrieben, an der Slowakischen Akademie der Wissenschaften (SAS) in Bratislava. Die Probenparameter und Messergebnisse sind in Tabelle A.1 im Anhang zusammengestellt. Die elektrostatische Messung erfolgte an runden Membranen mit 126mm Durchmesser und einem 12mm breiten Tragrings. Für die Resonanzmethode wurden quadratische Membranen mit 10mm und 5mm Seitenlänge gefertigt. Diese liegen jeweils zentrisch in einem quadratischen Rahmen mit 28mm Kantenlänge. Die Probenparameter und Messergebnisse sind in den Tabellen in Tabelle A.2 im Anhang zusammengestellt. Schließlich wurden weitere Messpunkte durch den schichtweisen Abtrag von SOI Wafern gewonnen, wobei deren Krümmung jeweils in drei Richtungen mittels eines Profilometers gemessen wurde. Die Differenz aus zwei Messungen ergibt die durch die jeweilige Schicht verursachte Verbiegung, die entsprechende Spannung kann bei Kenntnis der Schichtdicke mittels Gleichung 3.23 berechnet werden. Die Probenparameter und Messergebnisse sind in Tabelle A.3 im Anhang zusammengestellt. Um einer Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Probenformen zu gewährleisten, muss jeweils der Einfluss des Tragrings beziehungsweise Rahmens berücksichtigt werden. Kann man im Fall der kleinen quadratischen Membranen von ähnlich stabilen Verhältnissen wie am Wafer ausgehen, darf dies für die großen runden Membranen aufgrund des ungünstigeren Verhältnisses zwischen Membranfläche und Tragringsstärke nicht vorausgesetzt werden. Abschätzungen haben ergeben, dass dies aufgrund von Deformation zu einer Spannungsreduktion um 12% führt [114]. Der Effekt ist in der Größe σ_{Norm} berücksichtigt, so dass hierüber eine Auswertung über die Verfahren hinweg möglich ist. Der Vergleich zwischen Tabelle A.1 bis Tabelle A.3 bestätigt, dass die Messwerte für analoge Proben in der überwiegenden Zahl der Fälle im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmen.

Abbildung 3.5 zeigt eine Auftragung der eingebrachten Dotierstoffkonzentration \bar{N}_{Dot} gegen die resultierende Spannung σ_{Norm} für die verschiede-

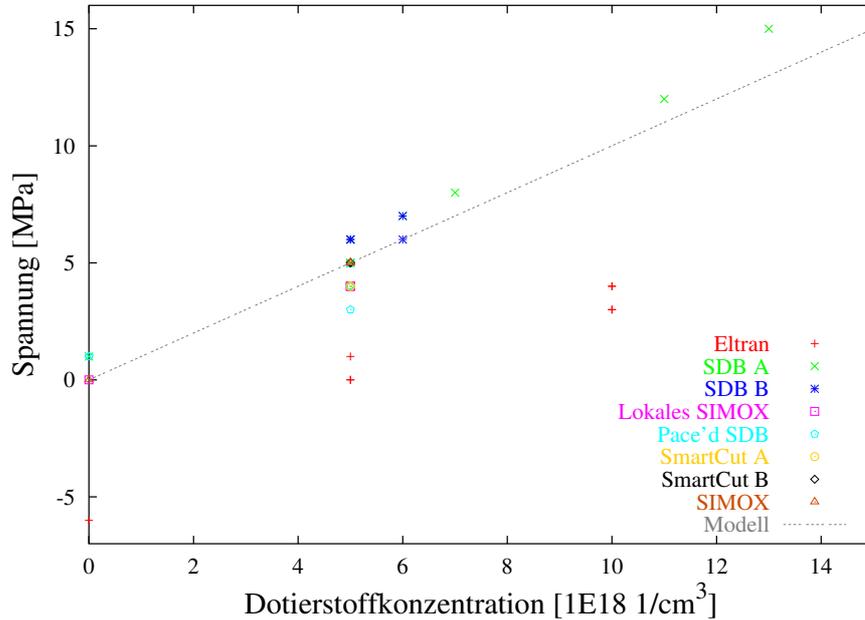


Abbildung 3.5: Auftragung der gemessene Membranspannung gegen die eingebrachte Dotierstoffkonzentration

nen Materialien. Um einen etwaigen Einfluss der SOI Dicke auf das Spannungsverhalten des Materials zu überprüfen, wurde innerhalb der Gruppe der SDB-Wafer noch zwischen dem $3\mu\text{m}$ dicken Material ("SDB A") und dem $2\mu\text{m}$ dicken Material ("SDB B") unterschieden. Das selbe gilt auch für SmartCut, wo aufgrund der vielen Gleitlinien im Material SC1 zwischen dem Typ SC-1 ("SmartCut A") und dem Typ SC-2 ("SmartCut B") separiert wurde. Wie erwartet steigt die Spannung mit zunehmender Dotierung. Separiert man die Messwerte nach den ihnen zugrunde liegenden SOI Materialien, und betrachtet nur solche Materialien, von denen Spannungswerte für zwei oder mehr verschiedene Dotierungen vorliegen, so erhält man fünf Gruppen. Die insgesamt geringe Anzahl an Messpunkten steht einer statistisch gesicherten Interpretation entgegen. Unter Annahme eines linearen Zusammenhangs entsprechend dem theoretischen Ansatz aus Gleichung 3.10, wonach die durch die Dotierung verursachte Spannung einer starr an ihrem Umfang eingespannten Membran linear proportional zur Dotierung ist, lassen sich für die einzelnen Materialgruppen jeweils die Regressionskoeffizienten bestimmen. Für die fünf Materialien SDB (S-1 bis S-3), Pace'd SDB (S-4), Simox (SX-1), lokales Simox (SX-2) und Eltran (E-2) erhält man für eine lineare Trendlinie der Form

$$y = mx + b \quad (3.32)$$

die in Tabelle 3.2 zusammengestellten Werte. Abbildung 3.6 zeigt eine Auftragung der Werte im untersuchten Spannungsbereich. Aufgrund ihrer gu-

Material	m	b	Messwerte
	$[10^{-13} \frac{Pa \cdot cm^3}{Atom}]$	$[10^6 Pa]$	$[-]$
PACE'd SDB	6,9	1,3	14
SIMOX	12,0	-0,1	4
SDB	9,8	1,4	9
Eltran	10,5	-6,4	8
lokales SIMOX	9,0	0,3	4
Theorie nach 3.18	9,2	0	-

Tabelle 3.2: Zusammenhang von Dotierung und Spannung für die untersuchten SOI Materialien: Parameter der Trendlinie

ten Korrelation wurden die Gruppen SDB A und B gemeinsam betrachtet. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem theoretischen Ansatz nach Gleichung 3.18, so stellt man für das lokale Simox-Material mit einer Abweichung von etwa 3% eine recht gute Übereinstimmung hinsichtlich des Steigungsterms fest. Etwas mehr weicht das SDB-Material mit etwa 6% nach oben ab. Eltran-Material zeigt eine Abweichung von etwa 15% nach oben. Betragsmäßig gleich groß aber mit einem umgekehrten Vorzeichen versehen ist der Wert für Membranen aus Pace'd SDB Material, der etwa 25% kleiner ist als gemäß der Theorie zu erwarten. Physikalisch bedeutet dies, dass die durch den Einbau von Fremdatomen verursachte Gitterverspannung geringer ist als in den anderen Materialien. Hierauf wird im Detail in Unterabschnitt 3.2.5 eingegangen. Umgekehrt zeigt Simox einen gegenüber Gleichung 3.18 um etwa 30% größeren Wert. Die eingebauten Dotierstoffatome würden demnach zu einer gegenüber der Theorie deutlich stärkeren Verspannung des Gitters führen. Rein rechnerisch lässt sich das Problem durch die Verwendung einer um etwa 11% größeren Gitterkonstante für das Siliziumgitter der SOI Schicht lösen. Physikalisch lässt sich dies über die herstellungsbedingt hohe Konzentration von Sauerstoff im Kristall erklären. Dieser wird auf Zwischengitterplätzen in das Siliziumgitter eingebaut, die, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, mittig zwischen zwei benachbarten Siliziumatomen entlang den vier kristallografisch gleichwertigen Richtungen $[111]$, $[1\bar{1}\bar{1}]$, $[1\bar{1}1]$ und $[\bar{1}\bar{1}1]$ liegen [115]. Durch die Ausbildung einer nichtlinearen Si-O-Si Brücke mit einem Si-O Abstand von $1,606\text{\AA}$ und einem Winkel von $155,89^\circ$ wird die $\langle 111 \rangle$ Si-Si Bindung unterbrochen [116]. Aufgrund der Gittersymmetrie gibt es für das Sauerstoffatom hiervon sechs äquivalente Positionen. Da der Abstand der Siliziumatome in der Si-O-Si Brücke mit $3,141\text{\AA}$ etwa 30% größer als die Bindungslänge von Silizium ($2,35\text{\AA}$) ist, führt dies zu einer Druckspannung im Gitter. Fallen äußere Zwangskräfte weg, kann sich die Spannung durch eine Vergrößerung der Gitterkonstanten abbauen.

Der Unterschied zum lokalen Simox kann dann über die geänderten Prozessbedingungen zur Herstellung von dünnen BOX Schichten ($0,18\mu\text{m}$ statt

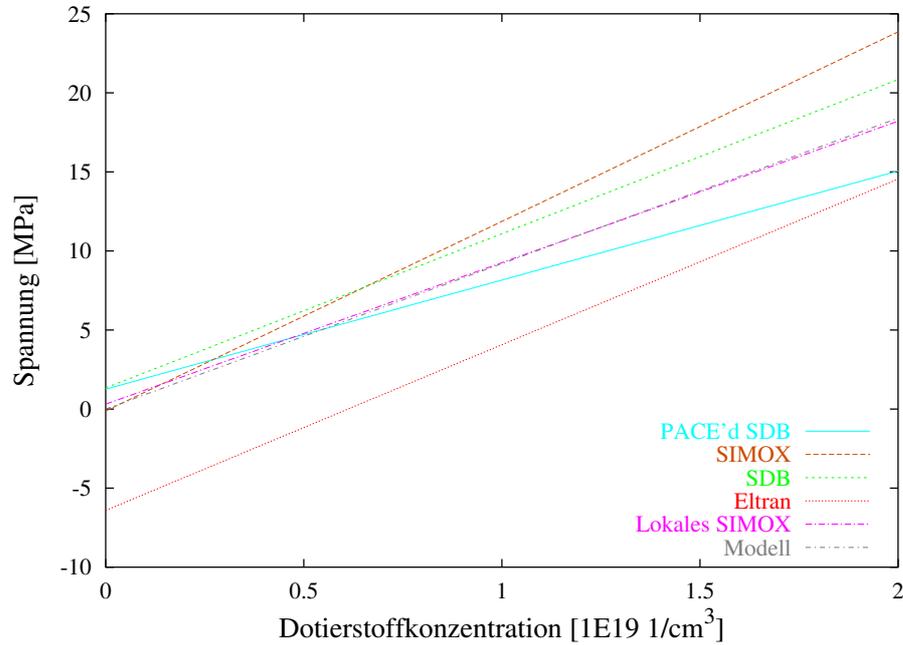


Abbildung 3.6: Auftragung Dotierung gegen Spannung: Trendlinien für die untersuchten SOI Materialien

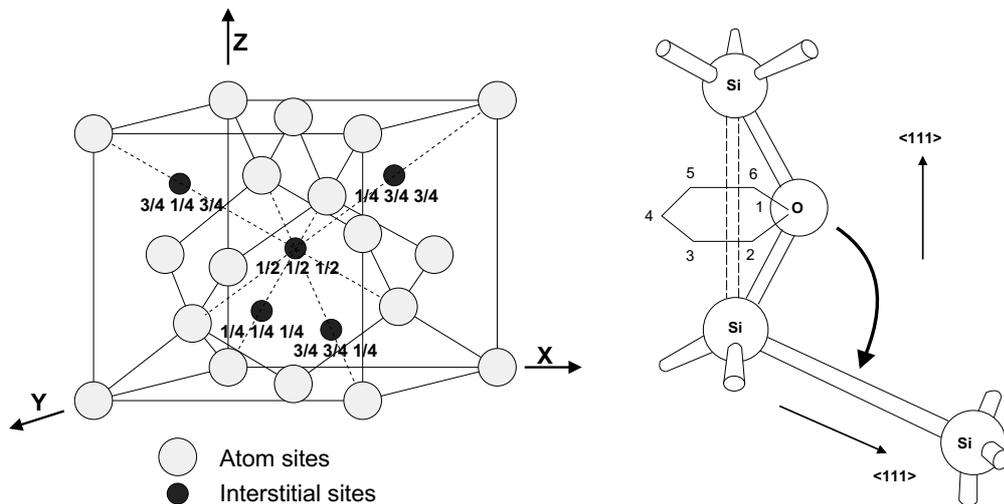


Abbildung 3.7: Bevorzugte Zwischengitterplätze (interstitial sites) im Diamantgitter (links), mögliche Positionen zum Einbau von Sauerstoffatomen auf Zwischengitterplätzen im Siliziumgitter (rechts) [115]

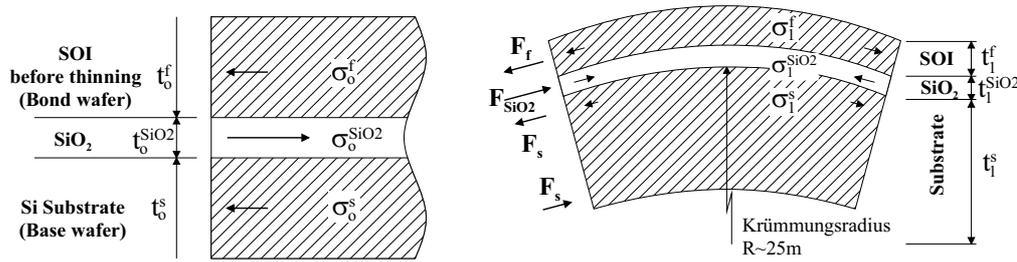


Abbildung 3.8: Spannungszustand im SOI Wafer vor dem Rückdünnen (links) und danach (rechts) [118]

$0,38\mu m$) erklärt werden.

Die ebenfalls auftretenden Werte für den Achsenabschnitt, physikalisch gleichbedeutend mit einer inneren Spannung im undotierten Zustand, werden in der Theorie in der bisherigen Form nicht berücksichtigt. Die Erweiterung auf Material mit Eigenspannung ist im nachfolgenden Abschnitt behandelt.

3.2.4 Erweiterung der Theorie

Um die theoretische Beschreibung der Spannung durch den Dotierstoffeinbau auf eine allgemeinere Basis zu stellen, betrachten wir noch einmal Gleichung 3.10 zur Bestimmung der inneren Spannung in Unterunterabschnitt 3.2.1.1. Als geometrische Randbedingung wurde festgelegt, dass die Membran, von einem massiven Trägung gehalten, ihre Außenabmessung nicht ändert. Im Falle eines SOI Wafers ist die Situation etwas komplizierter, da die vergrabene Oxid-Schicht selbst eine Spannung besitzt und damit einen Einfluss auf die SOI Schicht hat. Die Spannungsverteilung in einem gebondeten Material ist in Abbildung 3.8 dargestellt: Durch Oxidation wird auf dem Substrat ein Oxid mit der gewünschten Dicke aufgewachsen. Dies geschieht üblicherweise bei Temperaturen um $1000^\circ C$ und damit spannungsfrei [117]. Wird der Wafer abgekühlt, kommt es aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Si ($2,631026 \cdot 10^{-6}/K$) und SiO₂ ($0,531026 \cdot 10^{-6}/K$) zu Spannungen und einer Krümmung des Wafers entsprechend der Stoney'schen Gleichung. Der anschließende Bondvorgang erfolgt bei Raumtemperatur, ein Ausheilschritt schließt sich an. Da das Wafersystem hierbei Temperaturen zwischen $1100^\circ C$ und $1200^\circ C$ ausgesetzt ist, stellt sich zwischen der Oxid-schicht und dem Silizium für diese Temperaturen ebenfalls wieder ein spannungsfreier Zustand ein. Bei der Abkühlung auf Raumtemperatur kommt es aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten erneut zu inneren Spannungen. Haben Substrat und Bondwafer dieselbe Stärke, kommt es, wie in Abbildung 3.8 links dargestellt, zu keiner Verbiegung des Wafersystems. Die Situation ändert sich jedoch, wenn der Bondwafer, wie in Abbildung 3.8 rechts dargestellt, auf die Zieldicke rückgedünnt wird. Die hierbei in der SOI

Schicht induzierte Zugspannung bleibt auch nach einer Membranätzung erhalten und sorgt dafür, dass auch eine undotierte Membranmaske eine geringe Zugspannung besitzt. In Abhängigkeit vom Trägheitsmoment des Tragrings kommt es zusätzlich noch zu einer merklichen Verkipfung des Tragrings nach außen. Betrachtet man nun unter diesem Gesichtspunkt die zuvor ermittelten Achsenabschnitte b aus Tabelle 3.2, so lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

SDB und Pace'd SDB zeigen ohne Dotierung zur Spannungseinstellung ($N_{Dot} = 0$) ähnliche Werte. Im Hinblick auf das Herstellungsverfahren ist zu erwarten, dass der Wert nur durch die Dicke der BOX Schicht bestimmt wird. Wie sich analytisch leicht nachrechnen lässt, erhält man unter der Annahme einer stabilen Si-SiO₂ Grenzfläche eine SOI Spannung von $\sigma = 0,57$ MPa. Die gemessenen Werte sind damit nur minimal größer als gemäß der Theorie erwartet. Weitere Untersuchungen zur Stabilität der Grenzflächen im SOI Wafer finden sich in Unterabschnitt 3.2.9.

Die ohne Spannungsdotierung betragsmäßig kleinsten Werte aller untersuchten Materialien zeigen Simox und das lokale Simox. Letzteres liegt insgesamt dem theoretischen Ansatz am nächsten (Gleichung 3.10). Aufgrund des monolithischen Aufbaus entsprechen derartige Masken am ehesten dem in Unterunterabschnitt 3.2.1.1 beschriebenen Modell einer Membran, die von einem massiven Tragrings gehalten wird. Eine Gleitung an oder innerhalb der BOX Schicht kann allenfalls lokal erfolgen, da die Schicht komplett von Silizium eingefasst ist. Das hier untersuchte konventionelle Simox unterscheidet sich vom lokalen Simox insofern, als dass die Sauerstoffimplantation vollflächig und, aufgrund der größeren BOX Dicke, mit anderen Implantationsparametern erfolgte.

Eltran zeigt betragsmäßig den größten Wert für alle untersuchten Materialien. Gleichzeitig ist es das einzige gebondete Material überhaupt, das im undotierten Zustand eine Druckspannung zeigt. Die Ursache hierfür muss im Herstellungsprozess gesucht werden: Durch Epitaxie wird die SOI Schicht auf einer Schicht von porösem Silizium erzeugt (Unterunterabschnitt 2.3.2.5). Die Herstellung solcher poröser Schichten erfolgt elektrochemisch auf hoch Bor dotierten Substraten. Entsprechend der Dotierung verringert sich auch die Gitterkonstante des Substrats. Die anschließend aufgewachsene Epitaxieschicht, deren Dotierstoffkonzentration üblicherweise um 3 bis 5 Größenordnungen geringer als die des Substrats ist, wird an der Grenzfläche zum Substrat unter Aufbau innerer Spannungen nun ebenfalls auf die kleinere Gitterkonstante gezwungen. Dieser Spannungszustand bleibt auch nach der Zusammenfügung von Substrat und Bondwafer erhalten. Eine teilweise Relaxation erfolgt, beeinflusst von der Diffusion des Dotierstoffs aus dem Substrat in die Epitaxieschicht, nach der Abtrennung des Bondwafers entlang der porösen Schicht. Wird die SOI Schicht zur Membran, so stellt sich im Gitter eine neue, größere, mittlere Gitterkonstante, die näher am Wert für das undotierte Silizium liegt, ein. Die freiwerdende Länge führt zu einer Druckspannung, die sich als Welligkeit der Membran beobachten lässt.

SOI Proz.	SDB	Pace'd SDB	SDB
ID	S1	S4	S5
SOI Schicht			
Basisdicke	3 μ m	3 μ m	3 μ m
Epitaxie	-	-	-
Gesamtdicke	3 μ m	3 μ m	3 μ m
Homogenität	$\pm 1\mu$ m	$\pm 0,01\mu$ m	$\pm 0,5\mu$ m
Widerstand	0,1-1 Ω cm	5-10m Ω cm	5-10m Ω cm
Typ	p	p	p
Orientierung	100	100	100
Kristall	Cz	Cz	Cz
BOX Schicht			
Dicke	0,3 μ m	0,3 μ m	0,3 μ m
Homogenität	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$

Tabelle 3.3: Parameter für SDB (S1), SDB* (S5) und PACE'd SDB (S4) SOI Material

Erweitert man die bisher allgemein gültige Gleichung 3.10 auf Material mit einer vom Herstellungsprozess abhängigen inneren Spannung σ_0 , so gilt [119]

$$\sigma = E\beta N_{Dot} + \sigma_0. \quad (3.33)$$

3.2.5 Grenzen der Theorie

Betrachtet man die Parameter in Tabelle 3.2 für SDB und PACE'd SDB Material, die die Materialspannung bei der Dotierung beschreiben, so stellt man eine deutliche Diskrepanz zwischen beiden Varianten fest, obwohl die beiden Materialien S1 (SDB) und S4 (PACE'd SDB) nach demselben Verfahren und beim gleichen Hersteller produziert wurden. Die genauen Spezifikationen wurden bereits in Tabelle 2.3 zusammengestellt und sind der Übersichtlichkeit halber nochmals in Tabelle 3.3 wiedergegeben. Sie unterscheiden sich in der Dotierung und dem Plasmaprozess zur Nachbearbeitung der Schichtdickenhomogenität (PACE-Prozess, Unterunterabschnitt 2.3.2.2). Da sich die beiden Effekte aus den bisherigen Messungen nicht separieren lassen, wurden weitere Versuche gestartet. Als Ausgangsmaterial S5 (SDB*) wurden Wafer mit den Parametern wie S4 verwendet, die jedoch keine Nachprozessierung (PACE-Prozess) erfahren haben. Entsprechend größer ist auch die Variation der Schichtdicke. Die neuen Ergebnisse sind in Tabelle A.4 zusammengefasst und gemeinsam mit den bisherigen Werten für SDB und PACE'd SDB in Abbildung 3.9 aufgetragen. Hierbei fällt auf, dass die als SDB* bezeichneten hochdotierten SDB Membranen bei derselben Dotierung wie die entspre-

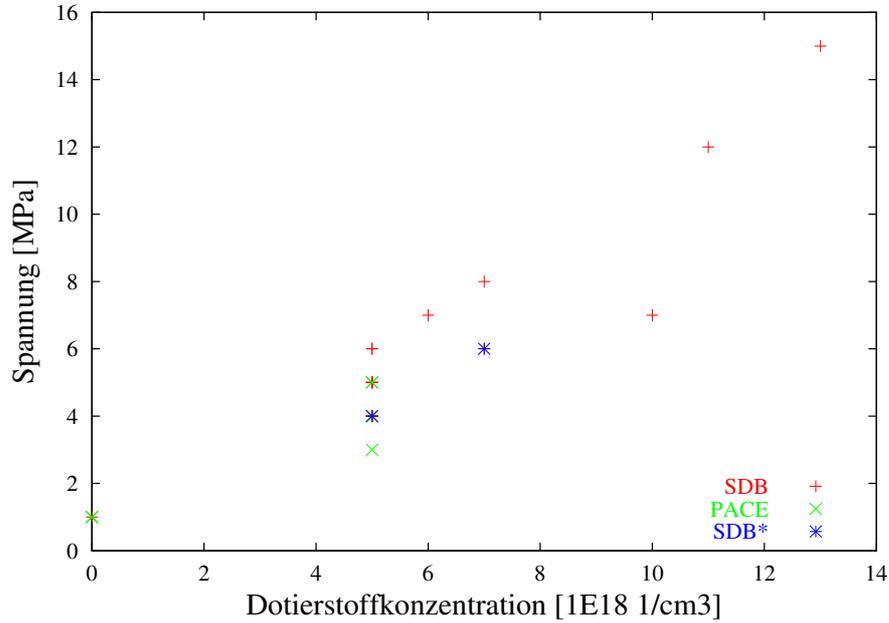


Abbildung 3.9: Auftragung der gemessene Membranspannung gegen die eingebrachten Dotierstoffkonzentration für SDB und PACE'd SDB Membranen

chenden PACE'd SDB Membranen quasi dieselbe Spannung zeigen. Damit ist gezeigt, dass der kleine Steigungsterm für PACE'd SOI nicht durch den PACE-Prozess sondern die hohe Grunddotierung des SOI Materials verursacht wird. Da die Steigung in Tabelle 3.2 nach Gleichung 3.33 proportional zum β -Wert ist, muss dieser von der Gesamtdotierung abhängen. Ruft man sich nochmals Gleichung 3.9

$$\beta = \left[1 - \left(\frac{R_{Dot}}{R_{Gi}} \right) \right] N_{Gi}^{-1} \quad (3.34)$$

in Erinnerung, so ist es die Größe R_{Gi} , die den Radius der Gitteratome beschreibt. Weicht die Gitterkonstante, wie im Fall des stark mit Bor dotierten SDB Materials, bereits deutlich von der des reinen Siliziumgitters ab, so darf nicht mehr bedenkenlos mit dem Kovalenzradius für Silizium gerechnet werden.

3.2.6 Integration in den Waferflow Prozess

Der Prozess einer Implantation zur Einstellung der Membranspannung lässt sich problemlos in den Waferflow Prozess integrieren. Da der anschließende Ausheilprozess bei hohen Temperaturen stattfindet, bietet es sich an, den Schritt zum Schutz der übrigen Schichten vor dieser thermischen Belastung an den Anfang der Prozessfolge zu stellen.

Spannung	Wafer		Maske	
nominelle Spannung	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
4,0/4,0 MPa iso	4,53	4,52	3,9(3,9)	3,8 (3,75)
5,6/2,4 MPa ortho	NA	NA	4,0	3,7
7,2/0,8 MPa ortho	6,3	2,75	4,2(4,34)	3,5 (3,4)

Tabelle 3.4: Orthotrope Spannungsverteilung: Vergleich zwischen den berechneten Spannungen in Wafer und Maske

3.2.7 Auswirkung einer anisotropen Spannungsverteilung in SOI Wafern

Um Informationen über die Auswirkung einer anisotropen Spannungsverteilung im SOI Ausgangsmaterial zu erhalten, wurden drei virtuelle Spannungsverteilungen mittels dem Finite Elemente (FE) Modell analysiert [91]:

1. isotrope nominelle Spannung:
 $\sigma=4,0$ MPa
2. orthotrope nominelle Spannung:
 $\sigma_x = 5,6$ MPa, $\sigma_y = 2,4$ MPa (entspricht $4,0 \pm 1,6$ MPa)
3. orthotrope nominelle Spannung:
 $\sigma_x = 7,2$ MPa, $\sigma_y = 0,8$ MPa (entspricht $4,0 \pm 3,2$ MPa)

Die nominelle Spannung beschreibt dabei die angenommene Ausgangsspannung des SOI Wafers. Die Dicke der SOI Schicht wurde auf $3\mu\text{m}$ festgelegt, für die BOX Schicht eine Spannung von -350MPa in einer $0,3\mu\text{m}$ dicken Schicht angenommen. Die Analyse enthält die Berechnung der spannungsinduzierten Deformation des Ausgangswafers sowie die der fertigen Maske. Die Verzeichnung erhält man durch eine Differenzbildung zwischen den berechneten Lagekoordinaten der Knoten des FE Netzes auf dem Wafer und auf der Maske. Die Ergebnisse der FE Rechnung unter Berücksichtigung des Waferflats sind in Tabelle 3.4 zusammengestellt, Details finden sich bei Kamm et al. [114]. Parallel dazu wurde eine zweite Rechnung auf Basis eines Bulge Experiments (Unterunterabschnitt 3.2.2.4) durchgeführt. Hierfür wurde der Krümmungsradius der Membran aus dem FE Ergebnis extrahiert und unter Verwendung von Gleichung 3.27 als Eingangsgröße für die Spannungsberechnung verwendet. Der für die Rechnung relevante Bereich des Krümmungsradius hat einen Durchmesser von 60mm , vergleichbar mit dem des elektrostatischen Messsystems für Membranspannungen in Bratislava (Unterunterabschnitt 3.2.2.4). Die nach dieser Methode berechneten Werte stimmen gut mit den direkt mittels FE Rechnung bestimmten Werten überein. Dies bestätigt, dass es durch eine unabhängige Messung der Krümmung in x- und y-Richtung mittels der Bulge-Methode möglich ist, die Anisotropie der

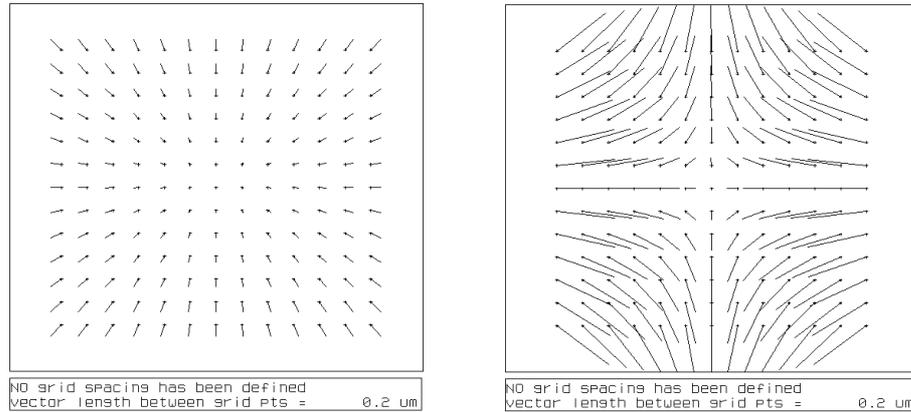


Abbildung 3.10: Lagefehler aufgrund einer orthotropen Spannungsverteilung (7,2/0,8 MPa). Links auf dem Wafer, rechts in der Maske

Mask IPD	max		min		stdv	
σ_x/σ_y [MPa]	u_x [nm]	u_y [nm]	u_x [nm]	u_y [nm]	u_x [nm]	u_y [nm]
4,0/4,0	19	47	-20	-37	8	24
5,6/2,4	207	210	-207	-210	123	123
7,2/0,8	453	404	-453	-416	269	238

Tabelle 3.5: Orthotrope Spannungsverteilung: Mittels Finite Elemente Modell berechnete Lagefehler in der Maske

Spannung einer Maske experimentell zu bestimmen. Weiterhin kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass eine stark anisotrope Spannung im Wafer zu einer gemäßigten anisotropen Spannungsverteilung in der Maske führt. Als Folge dieser anisotropen Relaxation zeigen auch die Verschiebungen innerhalb der Maskenebene (in plane distortion, IPD) eine Anisotropie. Die Werte in Tabelle 3.5 alleine geben diesen Effekt nicht vollständig wieder, da sie keine Informationen über die Richtung der Verzeichnung enthalten. Dies wird durch Tabelle 3.2.7 verdeutlicht.

Eine Spannungsverteilung $\sigma_x > \sigma_y$ im Wafer führt zu einem IPD Verzeichnungsmuster in der Maske, bei dem die Verzeichnung in x-Richtung nach innen und in y-Richtung nach außen gerichtet ist. Die Spannungskomponenten in der Maske haben, wie aus Tabelle 3.4 entnommen werden kann, etwa die selbe Größe. Während die Spannung σ_x auf einen mittleren Wert $\bar{\sigma}$ von

$$\sigma_x > \bar{\sigma} > \sigma_y \quad (3.35)$$

abnimmt, was gleichbedeutend mit einer nach innen gerichteten Verzeichnung ist, steigt die y-Komponente der Spannung σ_y auf diesen Wert $\bar{\sigma}$ an. Der Anstieg macht sich durch eine nach außen gerichtete Verzeichnung be-

merkbar.

Geht man als realistische Abschätzung von einer Spannungsdifferenz im Wafer von $\Delta\sigma_{wafer} = 0,5\text{MPa}$ aus, so resultiert hieraus eine Spannungsdifferenz in der Membran von $\Delta\sigma_{membran} \leq 0,1\text{MPa}$ und ein Lagefehler von bis zu 70nm [91]. Generell bedeutet dies für die Membranmasken, dass eine Anisotropie der Waferspannung im Bereich der Messgenauigkeit zu beachtlichen Verzeichnungen in der Maske führen kann.

3.2.8 Homogenität der Spannung in der SOI Schicht

Neben dem absoluten Wert für die Spannung in der SOI Schicht, spielt die Variation der Spannung in der Membran eine entscheidende Rolle für die Lagegenauigkeit der Maskenstrukturen. So verursacht eine lokale Änderung der Spannung um 0,1 MPa in einer $3\mu\text{m}$ dickem Membran mit 126mm Durchmesser bereits einen Lagefehler von 5nm innerhalb eines zentrisch gelegenen Strukturfelds von $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ [91]. Eine entsprechende Abschätzung hierzu findet sich in Unterabschnitt 3.2.9. Da eine lokale Messung derartiger Spannungen schwierig ist, wurde die globale Verteilung der Spannungen innerhalb der SOI Schicht mit Hilfe eines berührungsfrei arbeitenden Profilometer der Firma ADE Corporation bei Infineon Technologies AG in München bestimmt [119]. Die Vorgehensweise entspricht der Krümmungsmessung (Unterabschnitt 3.2.2.3), allerdings erfolgt die Messung im Raster und liefert damit eine zweidimensionale Verteilung. Untersucht wurde ein Wafer vom Typ E-2, der mit Bor implantiert ($1,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) und anschließend getempert wurde (5h bei 1200°C). Abbildung 3.11 zeigt die durch Abtrag der SOI Schicht erhaltene Spannungsverteilung. Unter der Annahme einer konstanten Schichtdicke, welche für den Rechenalgorithmus des Messgeräts erforderlich ist, erhält man so eine Variation die kleiner als 2% ist. Bei einem Absolutwert von etwa 4,4MPa entspricht dies etwa 0,1 MPa. Bei der Interpretation der Messung ist zu beachten, dass die Konstanz der SOI Schichtdicke unmittelbar Einfluss auf das Ergebnis hat, und diese ebenfalls mit 2% spezifiziert ist. Die Messung ist deshalb eine Abschätzung nach oben. Weiterhin liefert sie eine Aussage darüber, wie die Schwankungen verteilt sind: Nicht lokal sondern eher global.

3.2.9 Stabilität der BOX Schicht im SOI Wafer

Sowohl für den SOI WFP als auch den MFP spielt die Stabilität des vergrabenen Oxids bei hohen Temperaturen eine wichtige Rolle. In beiden Fällen wird der Wafer nach der Implantation einer thermischen Nachbehandlung ausgesetzt. Typische Temperaturen zur Einstellung einer homogenen Verteilung liegen zwischen 1100°C und 1200°C . In der Literatur [118] finden sich Hinweise, wonach es in diesem Temperaturbereich zu viskoelastischer Gleitung in der Schicht kommen kann. Um diese nachzuweisen, wurde ein

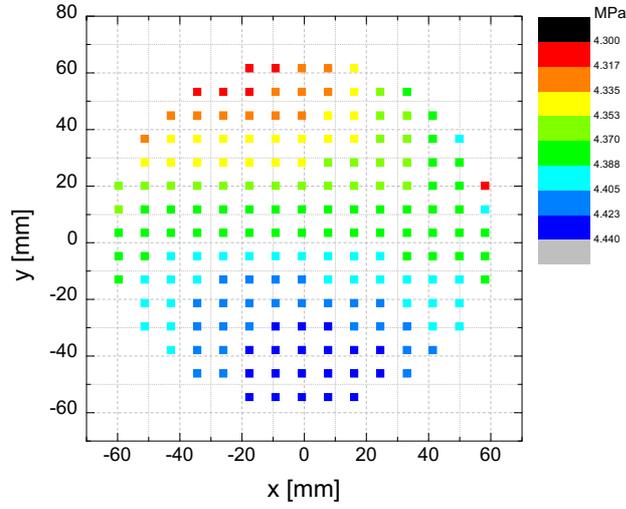


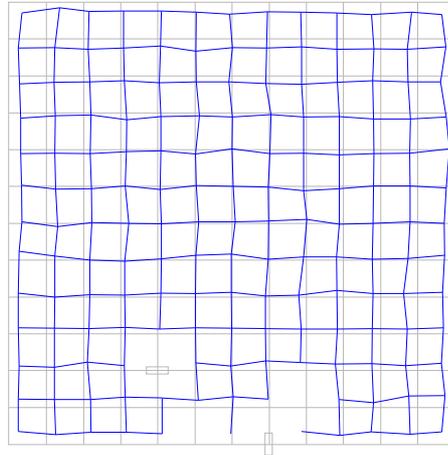
Abbildung 3.11: Gemessene Spannungsvariation in der SOI Schicht [119]

Pace'd SDB Wafer mit speziellen Messmarken versehen und mit Bor implantiert ($1,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$). Jeweils vor der Dotierung und nach dem anschließenden Tempersschritt (5h bei 1200°C) wurde die Lage der Marken mit einer LMS IPRO Lagemessmaschine (vgl. Unterabschnitt 3.3.2) vermessen. Die Differenz der Messungen ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Parallel dazu erfolgte eine analytische Berechnung der in einer $3\mu\text{m}$ dicken Membranschicht zu erwartenden Verschiebungen der Messmarken für eine Spannung von $5,5 \text{ MPa}$ bei vollem Verbund zum Basiswafer [120]. Die Ergebnisse für die auftretenden Verschiebungen innerhalb der Membranebene (in plane distortion, IPD) beziehungsweise senkrecht zu der Membranebene (out plane distortion, OPD) sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst. Mit "INFIELD" wird ein quadratisches Feld von $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ in Zentrum der Membran bezeichnet, "OUTFIELD" steht für die gesamte Membranfläche inklusive der Marken auf dem Tragrings. Berücksichtigt man die in Unterabschnitt 3.3.2.1 bestimmte Messgenauigkeit von 4nm (3σ), dann kann man hier von einer guten Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung sprechen. Eine Gleitung in der BOX Schicht würde auf einen anfänglich höheren Stress σ_{anf} in der Membranschicht schließen lassen, der sich auf einen Endwert σ_{end} reduziert:

$$\sigma_{anf} = \sigma_{end} + \Delta\sigma \quad (3.36)$$

Im vorliegenden Fall ist $\sigma_{end} = 5,5 \text{ MPa}$, was im Einklang mit dem gemessenen Waferkrümmung (Bow) von $3,5\mu\text{m}$ steht. Die gemessenen IPD müssten jedoch um den Wert der frei gewordenen Deformation

$$\Delta IPD = \Delta\sigma \frac{R}{E} \quad (3.37)$$



Summary	X [nm]	Y [nm]
Mean	-0.12	-0.05
Max 3 S.D.	22.31	21.50
Min	-15.15	-13.84
Max	14.81	13.65

Abbildung 3.12: Gemessene Lageänderung durch einen Temperschnitt, wobei das aufgelegte dunkle Gitter die Lage nach der Temperung darstellt.

LMS IPRO Messung	
max. IPD infield	$\approx 15\text{nm}$ in x- und y-Richtung ($\approx 20\text{nm}$ diagonal)
max. IPD outfield	$\approx 27\text{nm}$ in x- und y-Richtung ($\approx 38\text{nm}$ diagonal)
max. OPD outfield	$\approx 3,5\mu\text{m}$ in z-Richtung

Berechnung mit vollem Verbund zum Bulk Wafer	
max. IPD infield	16nm in x- und y-Richtung ($22,5\text{nm}$ diagonal)
max. IPD outfield	27nm in x- und y-Richtung ($\approx 38\text{nm}$ diagonal)
max. OPD outfield	$3,2\mu\text{m}$ in z-Richtung

Tabelle 3.6: Gemessene und berechnete Verschiebungen in einer $3\mu\text{m}$ dicken Membran bei Temperaturbelastung [120].

größer sein als berechnet. Hierbei ist R der Abstand vom Zentrum der Membran und E das E-Modul von Silizium. Setzt man beispielsweise eine Spannungsänderung $\Delta\sigma$ von 0,5 MPa voraus, so ergibt sich mit $E=180\text{GPa}$ und $R=30\text{mm}$ hieraus ein Änderung der Deformation von $\Delta IPD \approx 83\text{nm}$. Für das Infield müssten deshalb in x-Richtung Werte von

$$IPD_{tot,x} = IPD_{calc,x} + \Delta IPD = 16\text{nm} + 83\text{nm} = 99\text{nm} \quad (3.38)$$

messbar sein. Eine Gleitung konnte daher in diesem Experiment nicht nachgewiesen werden.

3.2.10 Polykristallines SOI Material

Auch die Spannung von Membranen aus polykristallinem Silizium, die in der Regel im undotierten Zustand Druckspannung zeigen, kann durch Dotierung verändert werden. Der Wirkmechanismus unterscheidet sich jedoch etwas von der des einkristallinen Siliziums. Auch eine Vorausberechnung der Spannung für eine gegebene Menge an Dotierstoff ist nicht ganz so einfach. Der Grund hierfür liegt in den Korngrenzen, die als bevorzugte Diffusionspfade fungieren. Die für die Spannungseinstellung notwendige Volumendiffusion tritt in größerem Umfang erst dann ein, wenn die Korngrenzen abgesättigt sind. Dies bedeutet, dass bis zu einer bestimmten Menge an Dotierstoff keine wesentliche Änderung der Membranspannung zu erkennen ist. Zur Verifikation der Überlegung wurden jeweils neun unterschiedlich stark mit Bor und Phosphor dotierte Membranen mit einer Größe von 10mm x 10mm gefertigt. Aufgrund der zur Spannungsmessung verwendeten Resonanzmessmethode (Unterunterabschnitt 3.2.2.4) lassen sich nur Spannungen $\sigma > 0\text{MPa}$ messen. Wie aus Abbildung 3.13 zu erkennen ist, zeigen die mit Phosphor dotierten Membranen oberhalb von $N_{Dot} = 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ einen näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dotierstoffkonzentration entsprechend der Gleichung 3.10 für die innere Spannung (Unterunterabschnitt 3.2.1.1). Ein Vergleich zwischen den mit Bor und Phosphor dotierten Membranen ergibt einen weiteren Unterschied zwischen ein- und polykristallinem Silizium: War es beim einkristallinen Silizium von Vorteil, zur Erzeugung einer Zugspannung möglichst kleine Atome in das Gitter einzubauen, so zeigt sich für das polykristalline Material, dass die Anzahl der zur Absättigung der Korngrenzen notwendigen Menge an Atomen ebenfalls von deren Größe abhängt. Im konkreten Fall bedeutet dies, dass, wie in Abbildung 3.13 gezeigt, eine Dotierung mit großen und damit spannungsmäßig eigentlich ineffektiven Phosphoratomen, bei Dotierstoffkonzentrationen oberhalb von $N_{Dot} = 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ eine Änderung im Bereich der Spannung $\sigma > 0\text{MPa}$ zeigt, während dies für die kleineren Boratome nicht zu beobachten ist. Es sei in Erinnerung gerufen, dass dieselbe Dotierung bei einem einkristallinen SDB Wafer nach Tabelle 3.2 zu einer Spannungsänderung von 19,5MPa führen würde. Entsprechende Ergebnisse zur Dotierung mit Phosphor finden sich auch bei

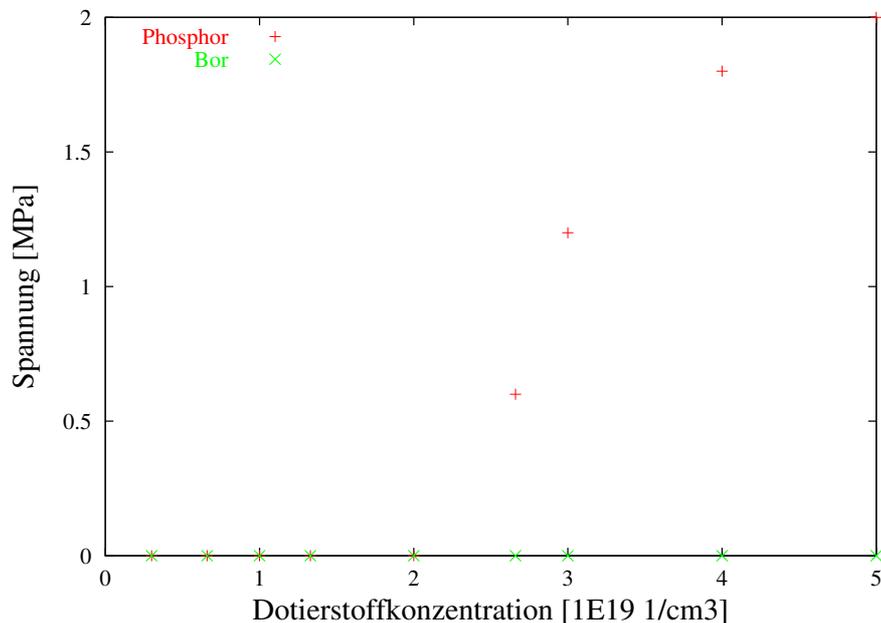


Abbildung 3.13: Auftragung der gemessenen Membranspannung gegen die eingebrachte Dotierstoffkonzentration für Poly-SOI Membranen

Elbrecht et al. [121]. Bei der Verwendung von polykristallinem Silizium ist weiterhin unbedingt zu beachten, dass kein Temperschnitt in Sauerstoff ausgeführt werden darf, da dies aufgrund der Eindiffusion von Sauerstoff zu einer Druckspannung führt.

3.3 Vorverzeichnung

3.3.1 Theorie

Ist einer Struktur A eine regelmäßige Struktur B überlagert, so kann diese durch den Vergleich der Soll-Werte der Struktur A mit den Ist-Werten der Struktur AB extrahiert werden. Weiterhin ist es damit möglich, eine Struktur A' zu schaffen, deren Soll-Werte, ausgehend von der ursprünglichen Struktur A, so verändert sind, dass diese nach der Überlagerung mit Struktur B die Soll-Werte der Struktur A zeigen. Dieser Vorgang wird als Vorverzeichnung bezeichnet. Im Fall der strukturierten Membranmaske gibt es zweierlei Arten von Verzeichnungen, die strukturabhängige und die strukturunabhängige. Die *strukturabhängige Verzeichnung* tritt grundsätzlich bei jeder Stencilmaske auf, unabhängig davon, ob sie nach dem WFP oder dem MFP hergestellt wurde. In Abhängigkeit von der Strukturdicke kommt es lokal oder global zu einer Abnahme der Steifigkeit und damit zu einer Verschiebung der Strukturen. Ein makroskopisches Äquivalent wäre beispielsweise eine aufgespannte

Gummimembran, in die nacheinander Löcher geschnitten werden. Die Lage und Form des ersten Lochs wird dabei unmittelbar durch die nachfolgenden Löcher beeinflusst. Der Effekt ist daher umso ausgeprägter, je höher der Öffnungsgrad der Gummimembran beziehungsweise Maske ist. Für die Korrektur ist ein entsprechendes Modell erforderlich, das die Eigenschaften der Membran beschreibt. Da die Korrektur zusätzlich als Eingabegröße die Daten des Maskendesigns benötigt, ist die Vorverzeichnung der Maskendaten entsprechend aufwendig.

Zur *strukturunabhängigen Verzeichnung* gehören alle Effekte, die nicht unmittelbar durch die Belegung der Maske mit Strukturen verursacht werden. Diese lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen, die zum einen die Materialparameter und zum anderen die Prozessparameter beinhalten. Zur ersten Gruppe gehören Größen wie

- Krümmung (Bow) und Welligkeit (Warp) des Wafers
- Variation der Waferdicke (TTV)
- Variation der SOI Dicke (Membrandicke)
- Wafergeometrie (einschließlich Lage und Größe von Flat oder Notch)
- Zentrizität des Strukturfelds
- lokale Spannungen im SOI

Bis auf den letzten Punkt haben alle Größen Einfluss auf das Produkt, unabhängig davon, ob die Maske nach dem SOI WFP oder dem (SOI)MFP gefertigt wird. Lediglich Verzeichnungen durch lokale Spannungen im SOI sind nur beim WFP möglich und treten aufgrund der Relaxation beim MFP in der Art nicht auf. Die Gruppe der Prozessparameter beinhaltet Prozessschwankungen aller Art, die Einfluss auf das Endprodukt haben:

- Lackdickeninhomogenitäten und -spannungen
- Inhomogenitäten im Entwicklungsprozess
- Spannungsinhomogenitäten (Dotierung)
- Lagerung der Maske oder des Wafers im Elektronenstrahlschreiber

Lackdickeninhomogenitäten und Inhomogenitäten im Entwicklungsprozess betreffen insbesondere Masken, die nach dem MFP hergestellt werden, da hier die bereits gedünnte Membran prozessiert werden muss. Beispielsweise zeigt das derzeit verwendete CARL-Lacksystem typischerweise Schichtdickenschwankungen von 1,6%. Entsprechende Abschätzungen zeigen [122], dass beim WFP der hieraus resultierende Spannungsgradient in der Lack-schicht von 0,2 MPa aufgrund des massiven Wafers kaum einen Einfluss

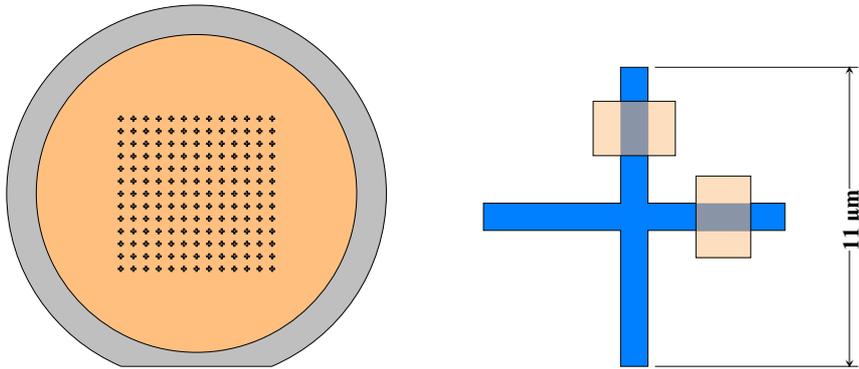


Abbildung 3.14: Position der Messkreuze für die Lagemessung auf der Maske (links) und Position der beiden Messfelder auf der Einzelstruktur (rechts).

hat. Beim WFP befinden sich zum Zeitpunkt der Lithografie keine weiteren Schichten auf dem Wafer. Spannungsinhomogenität, die beispielsweise durch eine inhomogene Dotierung verursacht wird, beeinflusst das Ergebnis für Membranen, die nach dem WFP oder MFP gefertigt werden. Schließlich trägt noch die Aufnahme im Elektronenstrahlschreiber zum Fehlerbudget bei.

Um die grundlegenden Fragen der Eignung verschiedener SOI Materialien zu klären, wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den Bereich der strukturunabhängige Verzeichnung gelegt. Um Einflüsse durch strukturabhängigen Verzeichnungen zu vermeiden, wurde daher die Anzahl der Strukturen bei derartigen Masken so gering wie möglich gehalten. Neben den für den Prozess notwendigen Hilfsstrukturen wurden Messstrukturen in einem Raster von 5mm angeordnet. Diese bestehen, wie in Abbildung 3.14 rechts dargestellt, aus einfachen Kreuzen mit einer Kantenlänge von $11\mu\text{m}$ und einer Balkenstärke von $1\mu\text{m}$. Ein Feld von 60mm x 60mm, "INFIELD" genannt, wurde zur Beobachtung herangezogen. Dies beinhaltet die komplette Nutzstruktur einer 150mm Stencilmaske [62].

3.3.2 Messprinzip

Zur Lagemessung wurde ein LMS IPRO System der Firma Leica Microsystems aus dem Maskenshop von Infineon Technologies AG verwendet. Die zu vermessende Maske wird über ein 50x Objektiv mit großem Arbeitsabstand (LWD-Objektiv) mit sichtbarem Licht im Bereich von $\lambda=430\text{nm}-580\text{nm}$ beleuchtet. Über denselben optischen Pfad wird das an den Maskenstrukturen reflektierte Licht gesammelt und auf eine CCD-Kamera abgebildet. Die LMS IPRO besitzt zwei Autofokus Systeme, einen Laser-Autofokus (LAF) und einen TV-Autofokus (TVAF). Während der LAF die ungefähre Fokusslage vor der eigentlichen Messung bestimmt und zur Messung der Ausgangsgeo-

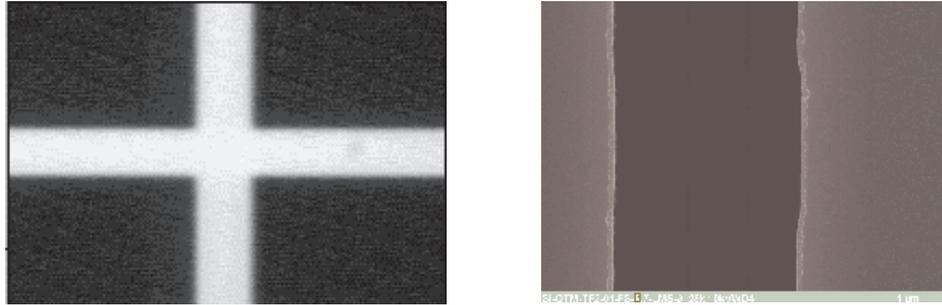


Abbildung 3.15: Messkreuz für die Lagemessung: Mikroskopbild (links) und REM-Aufnahme einer Struktur mit Anschlussfehler (rechts).

metrie von Maskenblanks verwendet wird, erfolgt mit dem TVAF die Messung der exakten Fokusslage innerhalb eines vorgegebenen Bereichs um die Fokusebene herum. Um thermische Einflüsse auszuschließen, befindet sich die gesamte Anlage in einer Klimakammer von Meissner & Wurst. Der Luftstrom innerhalb der Kammer garantiert eine Temperaturstabilität von $22,00^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,02^{\circ}\text{C}$) bei einer konstanten Luftfeuchtigkeit von 35%. Aufgrund ihrer geringen mechanischen Stabilität müssen Membranmasken durch einen speziellen Halter vor dem Luftstrom geschützt werden, da sie sonst zu vibrieren beginnen [123]. Zusätzlich wurde die für Chrom (COG) Masken übliche TVAF Messprozedur von 50 Bildern in einem Fokusbereich von $5\mu\text{m}$ auf 200 Bilder in einem Fokusbereich von $10\mu\text{m}$ erweitert. Während der Messung liegt die Membranmaske auf einer 3-Punkt Auflage auf. Je eine Lagemessung erfolgt nach Ätzung und Entlackung der Maskenstruktur am Wafer und nach der Fertigstellung der Maske an der Membran. Um den Lagefehler des Elektronenstrahlschreibers aus der Maske zu eliminieren, wird das Ergebnis der Lagemessung der Maske nicht mit dem Design, sondern mit dem Ergebnis der Lagemessung des geätzten Wafers verglichen.

3.3.2.1 Messgenauigkeit

Die Genauigkeit des LMS IPRO Systems liegt typischerweise bei 4nm (3σ). Da das Messprinzip jedoch auf der Detektion der Kanten einer Messstruktur basiert, ist zu erwarten, dass die Kantenrauigkeit Einfluss auf das Messergebnis hat. Dies gilt insbesondere für die durch den Elektronenstrahlschreiber verursachten Anschlussfehler. Hier wurden Extremwerte von bis zu 100nm Versatz in den Messmarken über eine Länge von $11\mu\text{m}$ gemessen [124]. Um die oben beschriebene Situation der zweifachen Messung an Wafer und Membran nachzustellen, wurde im Rahmen einer Messserie das Messfenster entlang der Balken des Kreuzes mehrfach verschoben. Ausgehend vom Standardabstand von $3,2\mu\text{m}$ zum Zentrum der Struktur erfolgten Messungen in $0,5\mu\text{m}$ Schritten im Bereich von $2,2\mu\text{m}$ bis $4,7\mu\text{m}$. Das linke Diagramm in

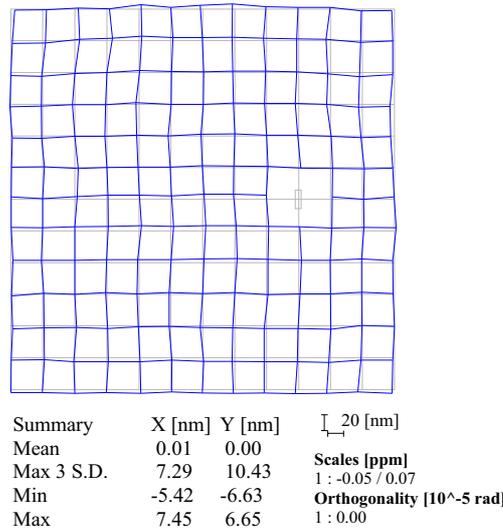


Abbildung 3.17: Differenz zwischen zwei Lagemessungen an derselben Maske im Abstand von 16 Monaten.

im Einsatz gewährleistet sein. Zur Verifikation dieser Eigenschaften wurden an einer Testmaske zwei Messungen im Abstand von 16 Monaten durchgeführt [123]. Die zwischenzeitliche Lagerung der Maske erfolgte an Atmosphäre. Das in Abbildung 3.17 dargestellte Ergebnis zeigt Abweichungen im Bereich der Messgenauigkeit. Die geringfügige Änderung in der Skalierung lässt sich möglicherweise auf Änderungen an der LMS IPRO Messmaschine zurückführen. Stencilmasken auf Basis des SOI WFP können daher als an Atmosphäre stabil eingestuft werden.

3.3.2.3 Lagemessung

Zur Bestimmung der Verzeichnung einer Stencilmaske wird das Ergebnis der soeben beschriebenen Doppelmessung (Unterabschnitt 3.3.2) mit der Lage der Strukturen im Design verglichen. Die Ergebnisse werden dann vor und nach einer Skalierung und dem Abzug von Orthogonalitätsfehlern (SOR: Scaling and Orthogonality Removed) dargestellt. Eine Darstellung mit SOR ist in sofern sinnvoll, da nur auf diese Weise kleinere Unregelmäßigkeiten erkannt werden können, deren Ursache im Bereich der strukturunabhängigen Verzeichnung zu suchen sind. Andererseits können derartige Fehler auch mit Hilfe des Pattern-Lock Systems bei der Belichtung der Maske korrigiert werden [35, 125]. Sie sind damit technisch beherrschbar, was einen großen Vorteil der ionenoptischen Abbildung darstellt.

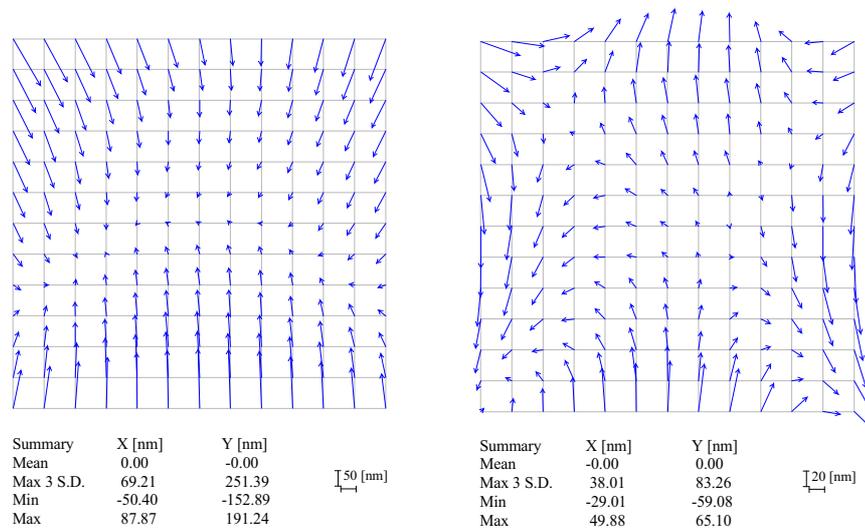


Abbildung 3.18: Typisches Verzeichnungsmuster einer Pace'd SDB Membran, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Die Pfeile geben die Abweichung der gemessenen Punkte von der Sollposition an.

3.3.3 Bestimmung der Verzeichnung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Lagemessungen besprochen. Um eine bessere Übersicht zu gewähren, erfolgt die Aufstellung getrennt nach den verschiedenen untersuchten Materialien. Alle Membranen enthalten nur die zur Messung notwendigen Strukturen. Tabellen mit den detaillierten Messergebnissen finden sich in Anhang B.

3.3.3.1 Pace'd SDB

Wie aus Abbildung 3.18 ersichtlich, sind die Verzeichnungen in y-Richtung deutlich größer als in x-Richtung. Dies kann teilweise mit der aufgrund des Flats reduzierten Steifigkeit des Tragrings erklärt werden [114]. Die Anisotropie in x- und y-Richtung verbleibt auch, nachdem die SOR-Korrektur angewandt wurde. Ein typisches Verzeichnungsmuster ist links in Abbildung 3.18 dargestellt. Erwartungsgemäß zeigen alle Vektoren zur Mitte der Membran, da der Einfluss der Strukturen in der Membran vernachlässigbar ist. Das Resultat nach Anwendung der SOR-Korrektur ist rechts in Abbildung 3.18 dargestellt. Neben lokalen Inhomogenitäten zeigt die verbleibende Verzeichnung eine gewisse Symmetrie, deren Ursache in Unterabschnitt 3.3.4 analysiert wird. Vergleicht man die Masken untereinander, so zeigt sich, dass die Unterschiede im Rahmen der Messgenauigkeit von 0,1MPa liegen.

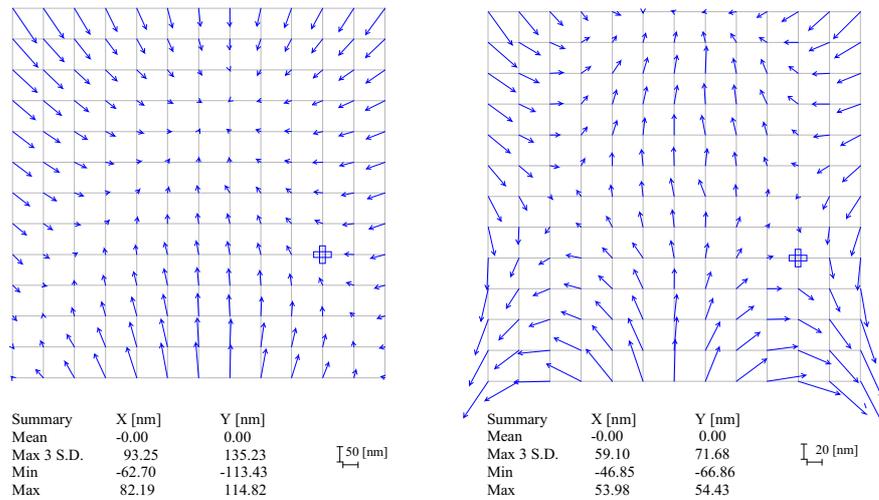


Abbildung 3.19: Typisches Verzeichnungsmuster einer $1,8\mu\text{m}$ dicken Smart-Cut Membran, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Die Pfeile geben die Abweichung der gemessenen Punkte von der Sollposition an.

3.3.3.2 SmartCut $1,8\mu\text{m}$

Die Tatsache, dass eine Membran mit einer Dicke von $1,8\mu\text{m}$ hergestellt werden konnte, zeigt, dass auch Masken in diesem Bereich machbar sind. Dies ist umso bedeutsamer, als der japanische Standard für Masken für die Elektronen Projektionslithografie (EPL) derzeit bei $2\mu\text{m}$ liegt. Tabelle B.3 enthält die Messwerte der einzigen bisher gemessenen Maske, Abbildung 3.19 zeigt das zugehörige Bild. Die Form der Verzeichnung ist ähnlich wie für Pace'd SDB-Masken, wobei der Unterschied zwischen x- und y-Richtung weniger stark ausgeprägt ist. Da nur eine Maske gefertigt wurde, lassen sich keine Aussagen zur Reproduzierbarkeit treffen. Hinsichtlich des Verzeichnungsmusters wird auf Unterabschnitt 3.3.4 verwiesen.

3.3.3.3 SmartCut $0,1\mu\text{m}$

Ausgehend von einer $0,1\mu\text{m}$ dicken SOI Schicht wurde diese durch einen Epitaxieschritt mit SiH_2Cl_2 bei 1100°C auf $3\mu\text{m}$ verstärkt. Wie bereits in Unterunterabschnitt 2.3.2.6 beschrieben, ist hierbei die Bildung von Gleitlinien aufgrund von ungleichmäßiger Erwärmung fast nicht zu umgehen. Ein typisches Verzeichnungsmuster ist in Abbildung 3.20 dargestellt, die Werte aller gemessener Masken sind in Tabelle B.4 zusammengefasst. Im Vergleich zu den meisten anderen Materialien zeigt dieses SmartCut Material eine viel größere Verzeichnung in x-Richtung als in y-Richtung. Auch absolut gesehen übertreffen diese alle sonst gemessenen Werte. Die generelle Form der Verzeichnung links in Abbildung 3.20, verbunden mit einer starken radialen Komponente, ist vergleichbar mit den anderen Materialien mit epitaktisch

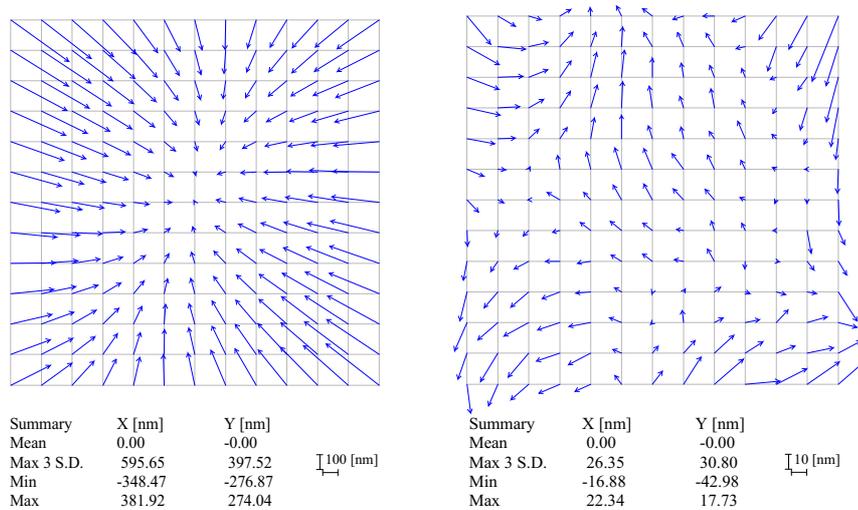


Abbildung 3.20: Typisches Verzeichnungsmuster einer epitaktisch verstärkten SmartCut Membran, basierend auf $0,1\mu\text{m}$ dickem Ausgangsmaterial, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Die Pfeile geben die Abweichung der gemessenen Punkte von der Sollposition an.

verstärkter SOI Schicht wie SIMOX (Abbildung 3.22) und lokalem SIMOX (Abbildung 3.23). Es ist daher denkbar, dass der Epitaxieprozess einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der gesamten Schicht hat. Da das SIMOX-Material keine Gleitlinien zeigt, ist dies kein hinreichendes Kriterium. Auffällig ist auch, dass das nach demselben Prozess epitaktisch verstärkte $0,18\mu\text{m}$ dicke SmartCut Material (Abbildung 3.21) diesen Effekt nicht zeigt. Nach der SOR-Korrektur ist dieses SmartCut Material das Einzige, das nicht das typisch ausgeprägte Verzeichnungsmuster zeigt.

3.3.3.4 SmartCut $0,18\mu\text{m}$

Die Verstärkung der $0,18\mu\text{m}$ dicken SOI auf $3\mu\text{m}$ erfolgt analog wie für das $0,1\mu\text{m}$ dicke SmartCut Material beschrieben (Unterunterabschnitt 3.3.3.3). Die Bildung von Gleitlinien konnte dabei nicht beobachtet werden. Die radiale Komponente ist, wie in Abbildung 3.21 links zu sehen, nicht so stark ausgeprägt wie für die anderen epitaktisch verstärkten Materialien. Aus Tabelle B.5 ist zu entnehmen, dass das Material eine deutlich stärkere Verzeichnung in y-Richtung wie in x-Richtung zeigt. Das unkorrigierte Verzeichnungsmuster ähnelt dem von $1,8\mu\text{m}$ dickem SmartCut (Abbildung 3.19), zeigt jedoch eine stärkere Asymmetrie. Beachtlich ist die Reproduzierbarkeit dieses Materials: Ohne eine Vorverzeichnung der Daten im Vorfeld zu nutzen, liegt der maximale Overlay-Fehler, also die betragsmäßig größte Differenz (M1-M2) zwischen zwei Masken, bei 23nm . Nach Anwendung der SOR-Korrektur, die auch den geringfügigen Unterschied in der globalen Spannung korrigiert, liegt

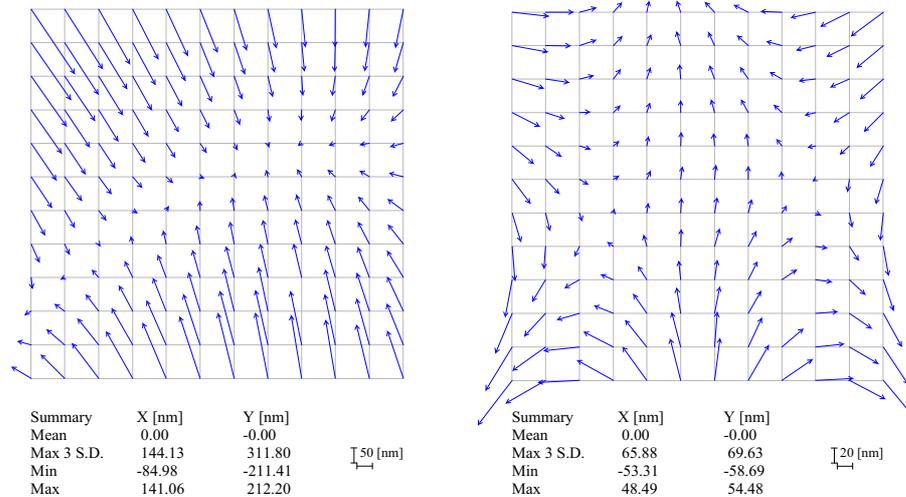


Abbildung 3.21: Typisches Verzeichnungsmuster einer epitaktisch verstärkten SmartCut Membran, basierend auf $0,18\mu\text{m}$ dickem Ausgangsmaterial, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Die Pfeile geben die Abweichung der gemessenen Punkte von der Sollposition an.

der maximale Fehler noch bei 12nm in x- und 9nm in y-Richtung. Hinsichtlich des Verzeichnungsmusters nach der SOR-Korrektur wird auf Unterabschnitt 3.3.4 verwiesen.

3.3.3.5 SIMOX

Analog zu den beiden epitaktisch verstärkten SmartCut Materialien wird auch beim SIMOX Material, ausgehend von einer SOI Dicke von $0,2\mu\text{m}$, die Zieldicke durch einen Epitaxieschritt eingestellt. Hierbei kam es, wie auch zuvor bei dem $0,18\mu\text{m}$ dicken SmartCut Material, nicht zur Bildung von Gleitlinien. Beachtlich ist auch hier die Reproduzierbarkeit dieses Materials, wie sie sich anhand des Vergleichs von Maske 12 und 13 aus Tabelle B.6 ergibt: Ohne eine Vorverzeichnung der Daten im Vorfeld zu nutzen, liegt der maximale Overlay-Fehler bei 30nm . Nach Anwendung der SOR-Korrektur, die auch den geringfügigen Unterschied in der globalen Spannung korrigiert, liegt der maximale Fehler noch bei 10nm in x- und 11nm in y-Richtung. Ein typisches Verzeichnungsmuster ist in Abbildung 3.22 dargestellt, wobei die Ähnlichkeit zum lokalen SIMOX deutlich zu erkennen ist. Hinsichtlich der Ursache des Verzeichnungsmusters nach der SOR-Korrektur wird auf Unterabschnitt 3.3.4 verwiesen.

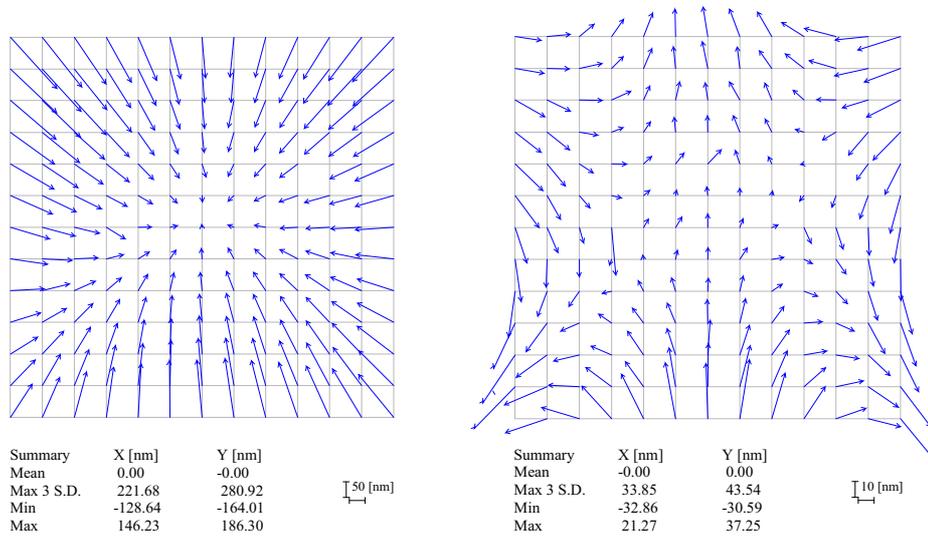


Abbildung 3.22: Typisches Verzeichnungsmuster einer SIMOX Membran, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Die Pfeile geben die Abweichung der gemessenen Punkte von der Sollposition an.

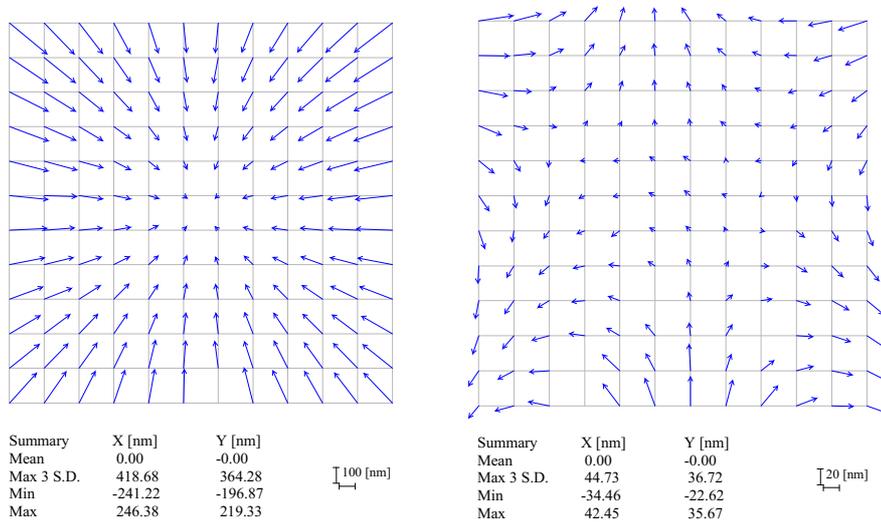


Abbildung 3.23: Typisches Verzeichnungsmuster einer SIMOX Membran mit lokaler SOI Schicht, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Die Pfeile geben die Abweichung der gemessenen Punkte von der Sollposition an.

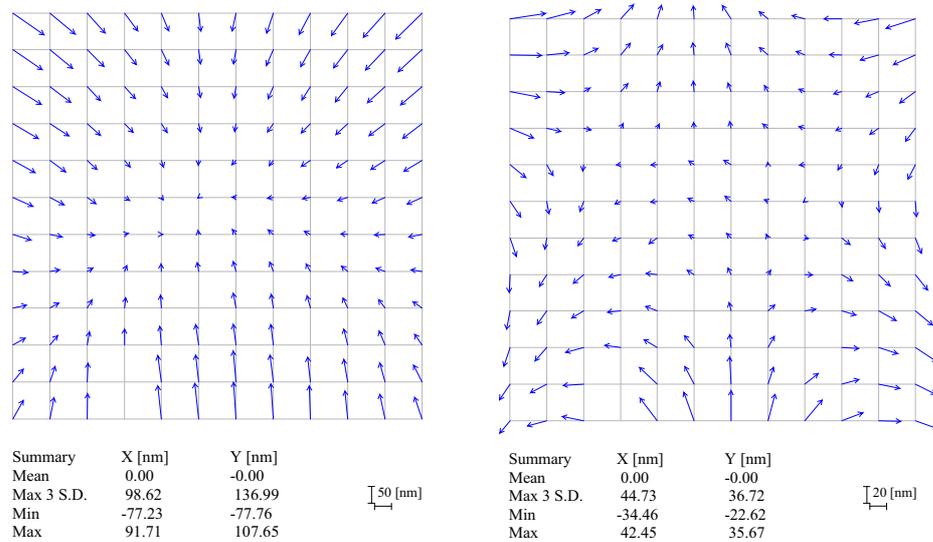


Abbildung 3.24: Typisches Verzeichnungsmuster einer Eltran Membran, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Die Pfeile geben die Abweichung der gemessenen Punkte von der Sollposition an.

3.3.3.6 Lokales SIMOX

Betrachtet man den Herstellungsprozess des Basismaterials (Unterabschnitt 2.4.3), so besteht eine enge Verwandtschaft zwischen SIMOX und lokalem SIMOX. Daher sollten die in Unterabschnitt 3.3.3.5 für SIMOX getroffenen Aussagen auch für diese Material gültig sein. Überraschenderweise zeigen die Wafer nach einem Bake-Schritt bei 1100°C in einer Barrel Epitaxieanlage jedoch Gleitlinien, was möglicherweise auf die Art der Temperaturregelung zurückzuführen ist. Wie bereits für SIMOX erwähnt, ist das Verzeichnungsmuster für die beiden SIMOX-Produkte sehr ähnlich. Anzumerken ist noch, dass die Absolutwerte der Verzeichnung in x-Richtung größer sind als in y-Richtung. Dies ist umgekehrt wie beim SIMOX. Nach der SOR-Korrektur zeigt das Material das typische Muster, das auch bei Smart-Cut 0,18µm und 1,8µm, SIMOX und Eltran zu beobachten ist. Hinsichtlich des Verzeichnungsmusters wird auf Unterabschnitt 3.3.4 verwiesen.

3.3.3.7 Eltran

Entsprechend seines Herstellungsprozesses (Unterabschnitt 2.3.2.5) ist für Eltran Material trotz der epitaktischen Schichtabscheidung eine engere Verwandtschaft zu SDB- als zu SIMOX-Material zu erwarten. Da Eltran Membranen im undotierten Zustand eine Druckspannung zeigen (Unterabschnitt 3.2.3), lassen sich durch eine standardmäßige Dotierung nur schwach gespannte und damit bei der Messung instabile Membranen mit einer Eigen-

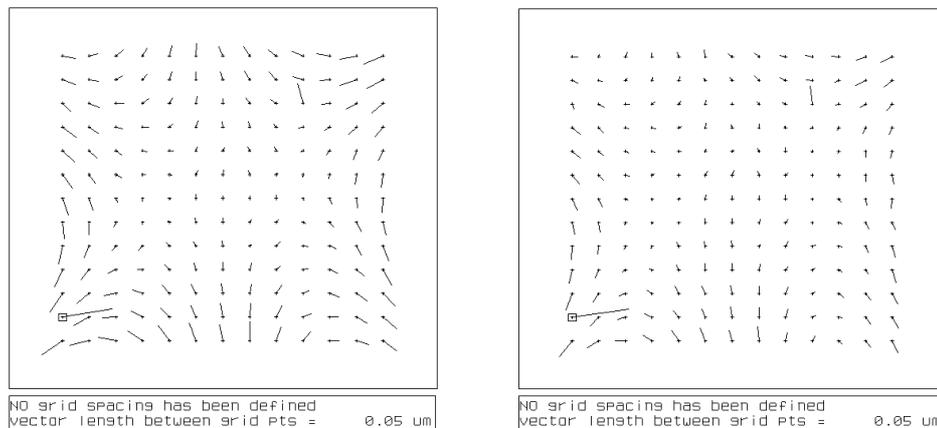


Abbildung 3.25: Verzeichnungsmuster einer SIMOX Membran nach Anwendung der SOR-Korrektur. Links ohne, rechts mit Berücksichtigung von Gravitationseffekten.

spannung nahe 0 MPa herstellen. Nach der negativen Erfahrung mit einer Vorserie, deren Werte nicht in die Zusammenstellung der Messergebnisse in Tabelle B.8 aufgenommen sind, wurde im Vergleich zum Standardprozess die doppelte Menge an Dotierstoff eingebracht. Hierdurch gelang es, stabile Membranen mit einer den übrigen Versuchen entsprechenden Spannung herzustellen. Ein typisches Verzeichnungsmuster ist in Abbildung 3.24 dargestellt. Entsprechend der geringen Strukturdichte zeigen alle Vektoren erwartungsgemäß in Richtung des Zentrums der Membran. Die radiale Komponente ist sichtbar, aber deutlich schwächer ausgeprägt als bei den anderen Materialien. Die Verzeichnung ist, wie auch beim SDB Material, in y-Richtung stärker ausgeprägt als in x-Richtung. Dies steht in Übereinstimmung mit der reduzierten Steifigkeit des Waferings im Bereich des Waferflats. Nach der SOR-Korrektur zeigt das Material das typische Muster, wobei die Werte in derselben Größenordnung wie die des SIMOX-Materials liegen. Zu erwähnen ist noch die gute Reproduzierbarkeit dieses Materials: Ohne eine Vorverzeichnung der Daten im Vorfeld zu nutzen, liegt der maximale Overlay-Fehler zwischen vier Masken bei 29nm. Nach Anwendung der SOR-Korrektur, die auch den geringfügigen Unterschied in der globalen Spannung korrigiert, liegt der maximale Fehler nur noch bei 16nm in x- und 17nm in y-Richtung.

3.3.4 Verzeichnungsmuster nach SOR

Den meisten der eben besprochenen Materialien (Unterabschnitt 3.3.3) gemeinsam ist ein charakteristisches Muster, das sich nach Anwendung der SOR-Korrektur auf die Messdaten ergibt. Aufgrund der Dreizähligkeit dieses Musters liegt es nahe, dass sich hier der Maskenhalter bei der Lagemessung an der Membran abbildet. Als mögliche Ursache muss dabei die Verformung des

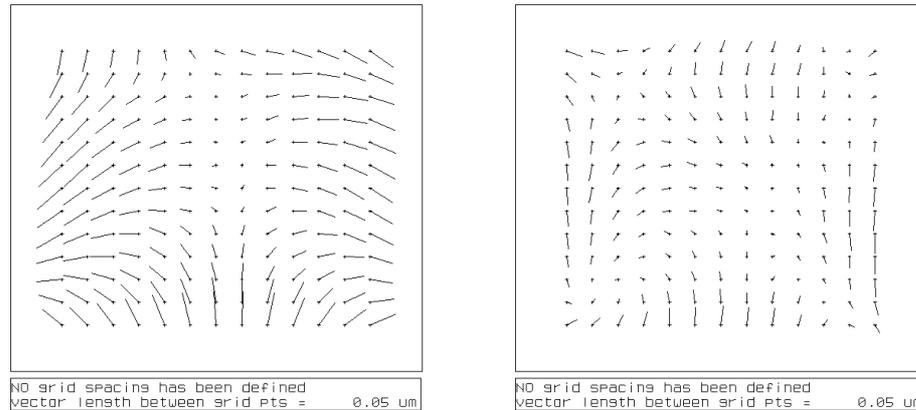


Abbildung 3.26: Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine Pace'd SDB-Membran, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur

im Vergleich zum vollen Wafer weniger steifen Tragrings durch die Gravitation in Betracht gezogen werden. Um dies zu verifizieren, wurde der Einfluss mittels Finite Elemente (FE) Rechnung bestimmt und einer vorhandenen Messung überlagert [126]. Abbildung 3.25 zeigt dies beispielhaft für die SIMOX Membran aus Abbildung 3.22 rechts. Obwohl eine deutliche Reduktion des Musters zu erkennen ist, bleiben die Grundzüge, insbesondere im unteren Bereich, vorhanden. Demnach spielen neben der gravitationsbedingten Verformung weitere Effekte, wie beispielsweise die Schwächung des Waferings durch das Waferflat, eine Rolle. Möglicherweise beschreibt das FE-Modell den Halter auch nicht vollständig oder dieser stellt keine ideale Dreipunktauflage dar. Dass ein derartiges Muster in der Differenz zwischen zwei Masken nicht beobachtet werden kann, spricht für die Systematik des Problems.

3.3.5 Vergleich mit FE-Berechnungen

Um eine Aussage hinsichtlich der Vorhersagbarkeit der Ergebnisse durch ein FE-Modell machen zu können, wurden für die verschiedenen Materialien entsprechende Berechnungen mit dem Simulationsprogramm Nastran von MACRO Industries durchgeführt [114]. Simuliert wurde jeweils die Lageänderung von Messmarken, die in einem 5mm Raster über den Wafer angeordnet sind. Bewertet wurde anschließend ein Bereich von 60mm x 60mm im Zentrum der Maske, der als Strukturbereich für 4x Stencilmasken festgelegt wurde. Soweit nicht anders angegeben, wurde mit einer BOX Spannung von -350MPa gerechnet. Die Tabellen mit den detaillierten Ergebnissen finden sich in Anhang C.

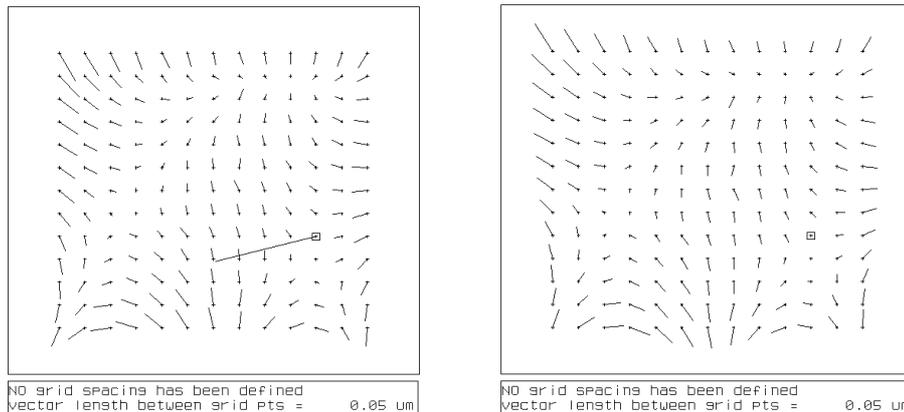


Abbildung 3.27: Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine $1,8\mu\text{m}$ dicke SmartCut Membran, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Fehlmessungen sind mit \square markiert

3.3.5.1 Pace'd SDB

Als Eingangsgröße für die Membranspannung wurde für Pace'd SDB ein Wert von $3,9\text{MPa}$ gewählt, was in etwa einem mittleren Wert der gemessenen und stark streuenden Membranspannung entspricht. Die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Gravitation in Form eines Vergleichs zur Messung ohne und mit Korrektur (SOR) sind in Abbildung 3.26 beziehungsweise Tabelle C.2 dargestellt. Die Rechnung liefert im Vergleich zur Messung eine kleinere y -Komponente, was möglicherweise durch eine anisotrope Spannungsverteilung im SOI Ausgangsmaterial verursacht wird. Eine beispielhafte Rechnung hierzu wurde bereits in Unterabschnitt 3.2.7 vorgestellt.

3.3.5.2 SmartCut $1,8\mu\text{m}$

Da die einzige FE-Maske mit einer Membranstärke von $1,8\mu\text{m}$ vor Abschluss der Spannungsmessung zerbrochen ist, wurde als Eingangsgröße für die FE Rechnung eine Membranspannung von $4,2\text{MPa}$ gewählt. Der Vergleich von Messung und Rechnung ohne Berücksichtigung der Gravitation zeigt, wie in Abbildung 3.27 dargestellt, nach Anwendung der SOR-Korrektur eine restliche Verzeichnung mit den bereits aus Unterabschnitt 3.3.3.2 bekannten Regelmäßigkeiten. Die Ergebnisse der Rechnung unter Berücksichtigung der Gravitation sind in Form eines Vergleichs zur Messung ohne und mit Korrektur (SOR) in Tabelle C.3 dargestellt. Das Material zeigt, wie Pace'd SOI auch, eine im Vergleich zur Messung kleinere y -Komponente. Bemerkenswert ist auch, dass die SOR-Korrektur hinsichtlich der Maximalwerte der Differenzen keine Verbesserung erbringt.

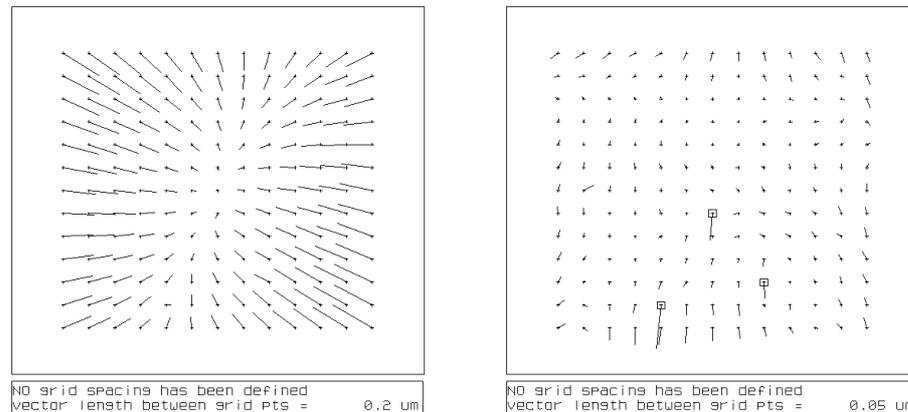


Abbildung 3.28: Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine SmartCut Membran, basierend auf $0,1\mu\text{m}$ dickem Ausgangsmaterial, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur

3.3.5.3 SmartCut $0,1\mu\text{m}$

Als Eingangsgröße für die FE Berechnung wurde für das SmartCut $0,1\mu\text{m}$ Material ein Membranspannung von $3,75\text{MPa}$ gewählt, was der gemessenen Spannung der Maske 5 entspricht. Die Ergebnisse der Rechnung unter Berücksichtigung der Gravitation sind in Form eines Vergleichs zur Messung ohne und mit Korrektur (SOR) in Abbildung 3.28 beziehungsweise Tabelle C.4 dargestellt. Augenscheinlich sind die großen Differenzen der Absolutwerte, welche durch die SOR-Korrektur deutlich zurückgehen. Die Ursache hierfür kann die Entstehung von weiteren unbekanntem Spannungskomponenten durch die Bildung von Gleitlinien während der Epitaxie sein.

3.3.5.4 SmartCut $0,18\mu\text{m}$

Ergänzend zu der Rechnung für das SmartCut $0,1\mu\text{m}$ Material, welches vom prinzipiellen Aufbau dem SmartCut $0,18\mu\text{m}$ Material entspricht, wurde eine weitere Rechnung mit einer Membranspannung von 4MPa durchgeführt. Die Ergebnisse der Rechnung unter Berücksichtigung der Gravitation sind in Form eines Vergleichs zur Messung ohne und mit Korrektur (SOR) in Abbildung 3.29 beziehungsweise Tabelle C.5 dargestellt. Auffällig ist auch hier die weniger gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung, die auch durch eine SOR-Korrektur nur den vorletzten Platz der untersuchten Materialien erreicht.

3.3.5.5 SIMOX

Die beste Übereinstimmung zwischen Modell und Messung erhält man für das SIMOX Material. Die Ergebnisse der Rechnung unter Berücksichtigung

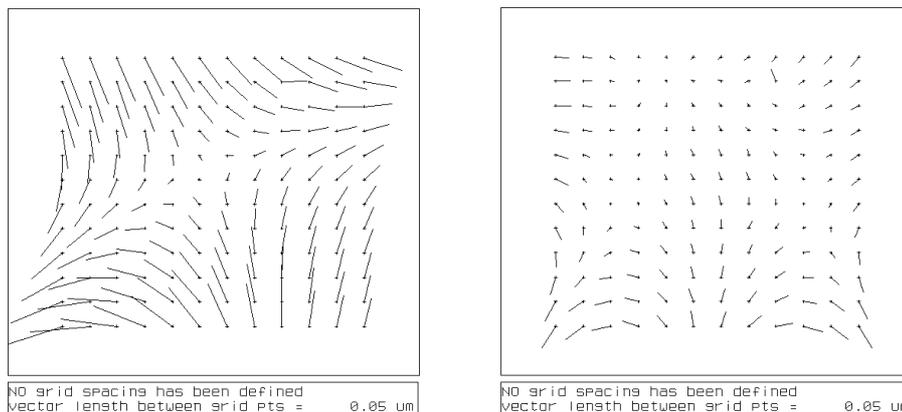


Abbildung 3.29: Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine SmartCut Membran, basierend auf $0,18\mu\text{m}$ dickem Ausgangsmaterial, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur

der Gravitation sind in Form eines Vergleichs zur Messung ohne und mit Korrektur (SOR) in Abbildung 3.30 beziehungsweise Tabelle C.6 dargestellt. Bemerkenswert ist die geringe Abweichung von maximal 30nm ohne Einsatz einer Vorverzeichnung und ohne SOR-Korrektur. Mit SOR-Korrektur liegt die maximale Abweichung sogar unter 20nm , und das für drei Masken, die aus zwei verschiedenen Fertigungsreihen stammen! Abbildung 3.30 veranschaulicht grafisch die Differenz zwischen Messung und Rechnung, links ohne und rechts mit SOR-Korrektur-Korrektur.

3.3.5.6 Lokales SIMOX

Als Eingangsgrößen für das FE-Modell des lokalen SIMOX wurde eine Membranspannung von $4,2\text{MPa}$ verwendet. Schwankungen in der Dicke der Membran wurden ebenfalls modelliert. Die Ergebnisse der Rechnung unter Berücksichtigung der Gravitation sind in Form eines Vergleichs zur Messung ohne und mit Korrektur (SOR) in Abbildung 3.31 beziehungsweise Tabelle C.7 dargestellt. Obwohl die Membranspannung mit der der SIMOX Masken vergleichbar war, wurden eine deutlich stärkere Verzeichnung der Maske gemessen. Entsprechend größer sind nun auch die Differenzen zwischen Messung und FE-Modell, wenngleich berücksichtigt wurde, dass die vergrabene Oxidschicht nach Fertigstellung der Membran komplett entfernt wird. In der Reihenfolge der Materialien gesehen, ist das lokale SIMOX mit Maximalwerten von 29nm nach SOR damit weniger gut als SIMOX und Eltran.

3.3.5.7 Eltran

Als Eingangsgröße für die FE Berechnung wurde für das Eltran Material ein Membranspannung von $3,6\text{MPa}$ gewählt, was dem Mittelwert der gemessenen

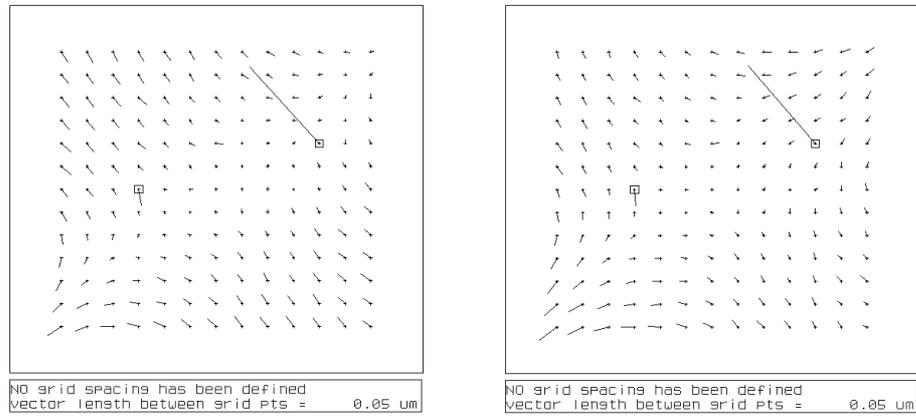


Abbildung 3.30: Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine SIMOX-Membran, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur

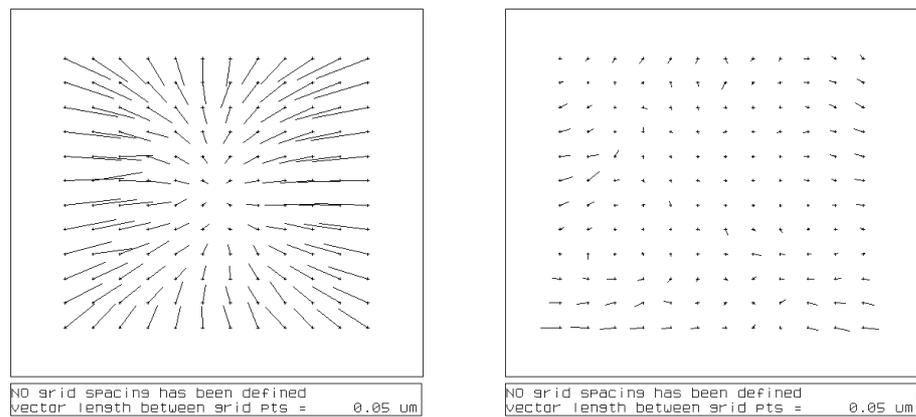


Abbildung 3.31: Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine SIMOX-Membran mit lokaler SOI Schicht, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur

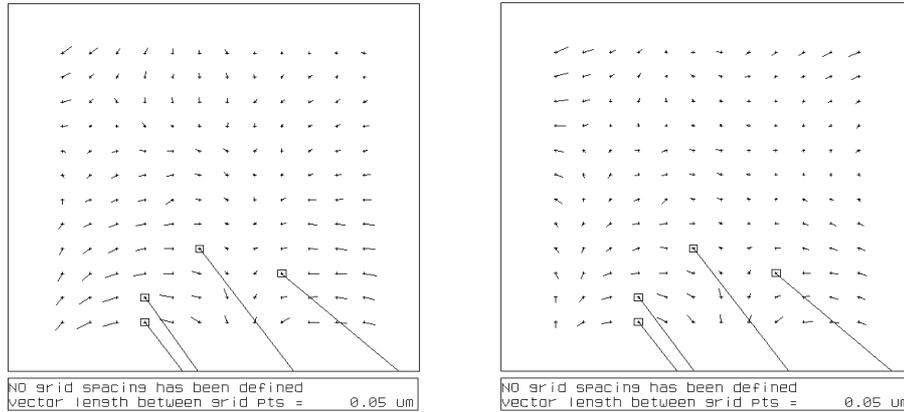


Abbildung 3.32: Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine Eltran-Membran, links ohne, rechts mit SOR-Korrektur. Fehlmessungen sind mit \square markiert

nen Spannungen von vier Masken entspricht. Aufgrund der an einer Referenzprobe mittels mechanischer Krümmungsmessung ermittelten BOX Spannung von -330MPa wurde dieser Wert auch in das FE Modell übernommen. Die Ergebnisse der Rechnung unter Berücksichtigung der Gravitation sind in Form eines Vergleichs zur Messung ohne und mit SOR-Korrektur in Abbildung 3.32 beziehungsweise Tabelle C.8 dargestellt. Ohne Korrektur beschreibt das Modell das Material ähnlich gut wie SIMOX. Mit SOR-Korrektur liegt die maximale Abweichung bei 25nm , und damit in der Reihenfolge der Materialien weniger gut als SIMOX.

3.3.6 Bewertung der Materialien

Für die abschließende Bewertung der verschiedenen SOI Materialien anhand der gemessenen und berechneten Ergebnisse werden jeweils fünf neue Variablen zur Beschreibung der gemessenen Maskendeformationen sowie vier zur Beschreibung der Abweichungen zu den mittels FE-Rechnung berechneten Werten eingeführt:

Die Summe der Mittelwerte der Maskendeformationen D_i für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$D_i = |\bar{x}_{max,i}| + |\bar{x}_{min,i}| + |\bar{y}_{max,i}| + |\bar{y}_{min,i}| \quad (3.39)$$

wobei die Größen \bar{x}_i und \bar{y}_i jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen gemessenen Differenz aller Masken vom Typ i im Vergleich zur Messung am jeweiligen Wafer in x- und y-Richtung angeben.

Die Summe der Mittelwerte der Deformationsdifferenzen E_i für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$E_i = |\bar{x}_{max,i}| + |\bar{x}_{min,i}| + |\bar{y}_{max,i}| + |\bar{y}_{min,i}| \quad (3.40)$$

wobei die Größen \bar{x}_i und \bar{y}_i jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen gemessenen Differenz zwischen allen Masken vom Typ i in x- und y-Richtung angeben.

Die Summe der SOR-korrigierten Mittelwerte der Deformationsdifferenzen F_i für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$F_i = |\bar{x}_{max,i}^{sor}| + |\bar{x}_{min,i}^{sor}| + |\bar{y}_{max,i}^{sor}| + |\bar{y}_{min,i}^{sor}| \quad (3.41)$$

wobei die Größen \bar{x}_i^{sor} und \bar{y}_i^{sor} jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen gemessenen Differenz zwischen allen Masken vom Typ i nach SOR-Korrektur in x- und y-Richtung angeben.

Der Maximalwert der Deformationsdifferenzen G_i für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$G_i = Max(|\bar{x}_{max,i}|, |\bar{x}_{min,i}|, |\bar{y}_{max,i}|, |\bar{y}_{min,i}|) \quad (3.42)$$

wobei die Größen \bar{x}_i und \bar{y}_i jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen gemessenen Differenz zwischen allen Masken vom Typ i in x- und y-Richtung angeben.

Der Maximalwert der SOR-korrigierten Mittelwerte der Deformationsdifferenzen H_i für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$H_i = Max(|\bar{x}_{max,i}^{sor}|, |\bar{x}_{min,i}^{sor}|, |\bar{y}_{max,i}^{sor}|, |\bar{y}_{min,i}^{sor}|) \quad (3.43)$$

wobei die Größen \bar{x}_i^{sor} und \bar{y}_i^{sor} jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen gemessenen Differenz zwischen allen Masken vom Typ i nach SOR-Korrektur in x- und y-Richtung angeben.

Die Summe der Mittelwerte der Deformationsdifferenzen E_i^{fe} zwischen Messung und Rechnung für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$E_i^{fe} = |\bar{x}_{max,i}| + |\bar{x}_{min,i}| + |\bar{y}_{max,i}| + |\bar{y}_{min,i}| \quad (3.44)$$

wobei die Größen \bar{x}_i und \bar{y}_i jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Lagefehlern für alle Masken vom Typ i in x- und y-Richtung angeben.

Die Summe der SOR-korrigierten Mittelwerte der Deformationsdifferenzen F_i^{fe} für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$F_i^{fe} = |\bar{x}_{max,i}^{sor}| + |\bar{x}_{min,i}^{sor}| + |\bar{y}_{max,i}^{sor}| + |\bar{y}_{min,i}^{sor}| \quad (3.45)$$

wobei die Größen \bar{x}_i^{sor} und \bar{y}_i^{sor} jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Lagefehlern für alle Masken vom Typ i nach SOR-Korrektur in x- und y-Richtung angeben.

Der Maximalwert der Deformationsdifferenzen G_i^{fe} für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$G_i^{fe} = Max(|\bar{x}_{max,i}|, |\bar{x}_{min,i}|, |\bar{y}_{max,i}|, |\bar{y}_{min,i}|) \quad (3.46)$$

wobei die Größen \bar{x}_i und \bar{y}_i jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Lagefehlern für alle Masken vom Typ i in x- und y-Richtung angeben.

Der Maximalwert der SOR-korrigierten Mittelwerte der Deformationsdifferenzen H_i^{fe} für den Maskentyp i wird beschrieben durch

$$H_i^{fe} = \text{Max}(|\bar{x}_{max,i}^{sor}|, |\bar{x}_{min,i}^{sor}|, |\bar{y}_{max,i}^{sor}|, |\bar{y}_{min,i}^{sor}|) \quad (3.47)$$

wobei die Größen \bar{x}_i^{sor} und \bar{y}_i^{sor} jeweils den Mittelwert der maximalen und der minimalen Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Lagefehlern für alle Masken vom Typ i nach SOR-Korrektur in x- und y-Richtung angeben.

Physikalisch gesehen wird durch die Variable D_i die mittlere Größe der gemessenen Lagefehler aller Masken eines Typs i ohne weitere Korrekturen beschrieben, was eine Aussage über den absoluten Lagefehler bei der Verwendung des Materials i ermöglicht. Die Größen E_i und F_i beschreiben die Differenzen, die sich beim Vergleich von Masken des Typs i mit und ohne SOR Korrektur ergibt und ermöglichen damit eine Aussage über die Reproduzierbarkeit des Prozesses. Zeigt die Maske eines Typs i eine starke Anisotropie für die Lagefehler in x- und y-Richtung, so wird dies durch die Variablen G_i und H_i jeweils mit und ohne SOR-Korrektur beschrieben. Die Variablen E_i^{fe} und F_i^{fe} wiederum beschreiben die Differenzen, die sich beim Vergleich von Masken des Typs i mit den FE-Modell jeweils mit und ohne SOR-Korrektur ergeben und ermöglichen damit eine Aussage über die Vorhersagbarkeit des Prozesses. Zeigt eine Maske aus einem bestimmten Materialtyp im Vergleich zum FE-Modell ein stark anisotropes Verhalten, so wird dies durch die Variablen G_i^{fe} und H_i^{fe} jeweils mit und ohne SOR-Korrektur beschrieben.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen n Materialien zu schaffen, ist es erforderlich, die Größen zu normieren:

$$x_i = X_i \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^{-1} \quad (3.48)$$

Gewichtet man nun alle Faktoren gleich, so erhält man bei summarischer Betrachtung den Anteil p_i der gemessenen Einflüsse zu

$$p_i = d_i + e_i + f_i + g_i + h_i \quad (3.49)$$

und den Anteil p_i^{fe} der sich aus dem Vergleich zum Modell ergebenden Einflüsse zu

$$p_i^{fe} = e_i^{fe} + f_i^{fe} + g_i^{fe} + h_i^{fe}. \quad (3.50)$$

Als Gesamtkriterium zur Bewertung eines Maskentyps i erhält man damit

$$p_{i,tot} = p_i + p_i^{fe}. \quad (3.51)$$

	PACE	SmartCut 0,1 μ m	SmartCut 0,2 μ m	Simox (lokal)	Eltran	Simox
d_i	0,11	0,3	0,14	0,16	0,09	0,15
e_i	0,15	0,23	0,12	0,18	0,15	0,16
f_i	0,20	0,26	0,10	0,16	0,17	0,11
g_i	0,15	0,24	0,11	0,22	0,14	0,14
h_i	0,25	0,24	0,11	0,15	0,15	0,10
e_i^{fe}	0,11	0,46	0,19	0,14	0,05	0,05
f_i^{fe}	0,23	0,17	0,24	0,13	0,13	0,10
g_i^{fe}	0,11	0,47	0,18	0,15	0,05	0,05
h_i^{fe}	0,22	0,20	0,23	0,14	0,12	0,09
p_i	0,87	1,27	0,58	0,87	0,7	0,66
p_i^{fe}	0,65	1,30	0,84	0,56	0,35	0,29
$p_{i,tot}$	1,52	2,57	1,42	1,43	1,05	0,95

Tabelle 3.7: Ergebnis der Materialevaluierung unter Einbeziehung der FE-Resultate. Je kleiner der Zahlenwert, umso besser ist die entsprechende Eigenschaft

Die zur Beurteilung erforderlichen Werte für die verschiedenen Materialien sind, basierend auf den Daten aus Tabelle B.2 bis Tabelle C.8, in Tabelle 3.7 zusammengestellt. Nach dieser Bewertung gibt es zwei klar zu bevorzugende Materialien, SIMOX und Eltran. Vergleicht man die Einzelergebnisse hinsichtlich Vorhersagbarkeit p_i^{fe} , so heben sich diese beiden Typen deutlich von den anderen vier Materialien ab. Dasselbe gilt für die Einzelergebnisse in Bezug auf die Reproduzierbarkeit p_i , bei denen die beiden Materialien zu den drei am besten bewerteten Typen gehören. Die beste Reproduzierbarkeit erhält man bei epitaktisch verstärkten SmartCut 0,18 μ m (UB02+Epi), das in Summe aufgrund der schlechten Vorhersagbarkeit der Ergebnisse jedoch zusammen mit dem lokalen SIMOX (LSIMOX) und PACE nur ein mäßiges Gesamtergebnis erreicht. Die schlechteste Bewertung sowohl hinsichtlich Reproduzierbarkeit als auch hinsichtlich Vorhersagbarkeit erhält das epitaktisch verstärkte Unibond 0,1 μ m (UB01+Epi).

3.4 Provozierte Lagefehler

Die Spannung einer Membran kann, neben den in Unterunterabschnitt 3.2.2.4 vorgestellten Methoden, auch über eine Dehnungsmessung bestimmt werden. Soll die Komplexität der Auswertung minimiert werden, eignen sich hierzu besonders gut lange, schmale Streifen, die mit den entsprechenden Messmarken versehen sind. Durch eine lokale Dotierung sollen bewusst La-

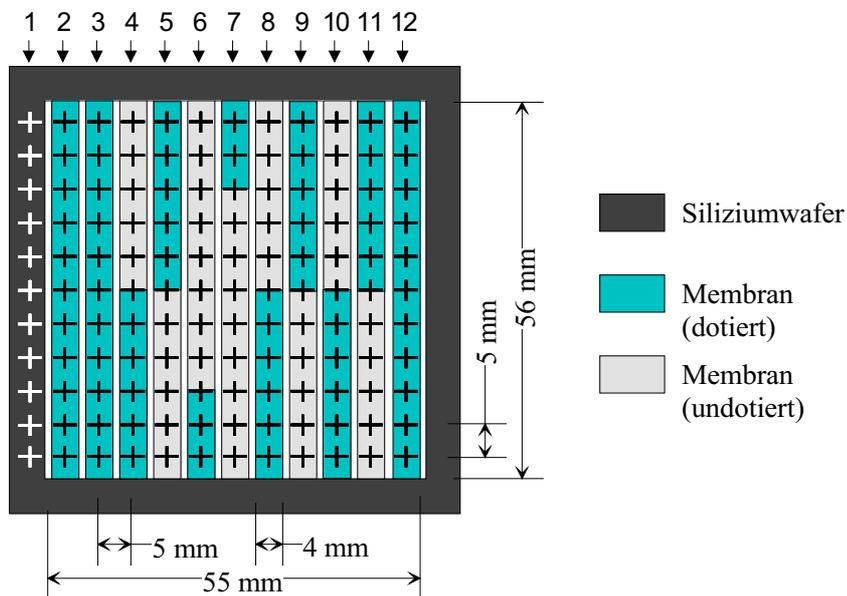


Abbildung 3.33: Layout und Dotierstoffverteilung einer Maske mit elf strukturierten, streifenförmigen Membranen und einer Referenzprobe auf dem Wafer

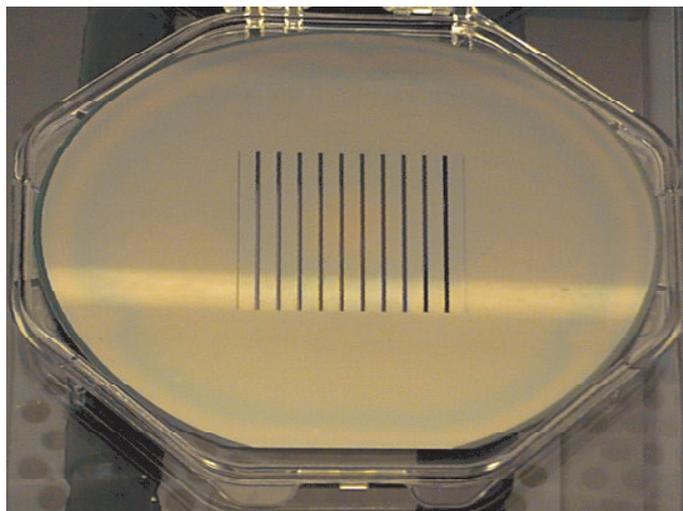
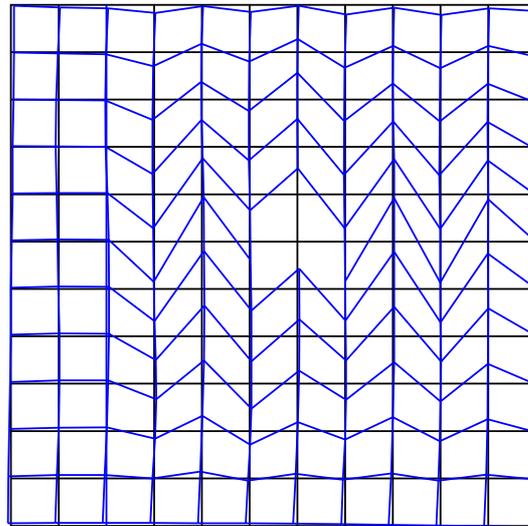


Abbildung 3.34: Fertige Maske mit elf strukturierten, streifenförmigen Membranen.



Summary	X [nm]	Y [nm]	
Mean	-0.00	0.00	
Max 3 S.D.	47.48	503.64	┌ 200 [nm] └──┘
Min	-38.86	-381.08	
Max	31.32	408.91	

Abbildung 3.35: Verzeichnungsmuster der Maske mit streifenförmigen Membranen

gefehler in die Streifen induziert werden. Als Dotierstoff wurde Bor mit einer Energie von 150keV und einer Dosis von $1,5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$ implantiert. Basierend auf dem SOI Waferflow Prozess wurden entsprechend Abbildung 3.33 unterschiedlich große Gebiete mittels einer Lackmaske implantiert. Nach einer Temperung erfolgte die Belichtung der Messmarken im Abstand von 5mm in x- und y-Richtung und der 1mm breiten Gräben zur Definition der 55mm x 4mm großen Streifen mittels eines Wafersteppers. Die Übertragung in die $3\mu\text{m}$ dicke SOI Schicht erfolgte über eine Trockenätzung. Der gesamte Strukturbereich umfasst damit 55mm x 56mm. Die Lage der Marken zu diesem Zeitpunkt wurde entsprechend der üblichen Vorgehensweise (Unterabschnitt 3.3.2) als Referenzgröße auf einer Leica LMS IPRO Lagemessmaschine gemessen. Eine zweite Messung erfolgte nach Fertigstellung der Maske (Abbildung 3.34) und gibt so die Lage der Messmarken im Zustand der Membran an. Die Membranstreifen sind senkrecht zum Waferflat in y-Richtung orientiert. Die Dehnung in y-Richtung zwischen zwei Messpunkten i und $i+1$ im Abstand d lässt sich damit berechnen zu

$$\epsilon_y(i) = \frac{\Delta y_{i+1} - \Delta y_i}{d}. \quad (3.52)$$

In Abbildung 3.36 sind die Dehnungen für die Referenzmessung auf dem Wafer ('1') und die 11 Streifen ('2' bis '12') aufgetragen. Sehr schön zu sehen

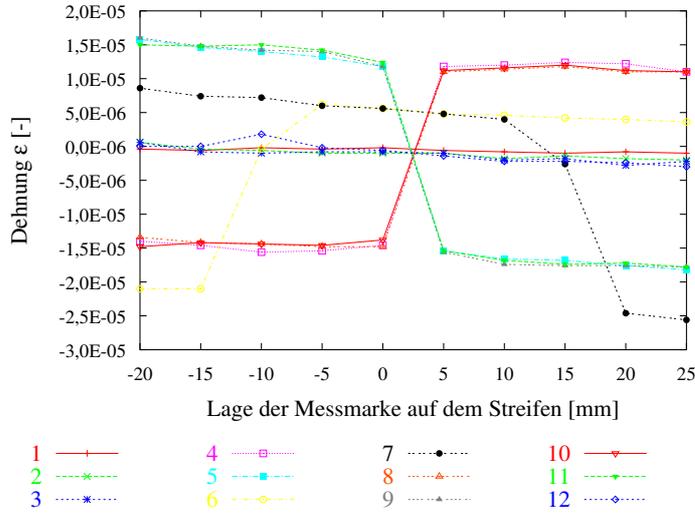


Abbildung 3.36: Darstellung der Dehnung in den einzelnen Membranen, bestimmt aus der Differenz der Messung am Wafer und der Maske.

ist dabei die Reproduzierbarkeit für die drei Gruppen von gleichartig implantierten Streifen 2-3-12, 4-8-10 sowie 5-9-11. Ebenso zeigen die Streifen 6 und 7 eine gute Übereinstimmung im Bereich gleichartiger Dotierung. Die nur teilweise dotierten Streifen, wie beispielsweise Streifen 6 mit 25% dotierter Fläche und 8 mit 50% dotierter Fläche, liegen absolut gesehen von ihren Dehnungen im undotierten Bereich ebenfalls ziemlich genau um einen Faktor 2 auseinander. Die vollständig dotierten Streifen 2-3-12 zeigen entsprechend den Randbedingungen erwartungsgemäß keine Dehnung.

In nur lokal dotierten Streifen lässt sich die Spannung σ_{dot} aus dem Sprung in der Dehnung bestimmen. Dies sei am Beispiel des halbseitig dotierten Streifen 12 ausgeführt: ϵ_{dot} ist die zunächst unbekannte Dehnung der Membran durch die Volumenänderung zufolge der Dotierung. Wäre der Streifen der Länge L nicht eingespannt, so würde es sich um die Länge ΔL

$$\Delta L = \epsilon_{dot} \frac{L}{2} \quad (3.53)$$

verkürzen. Um ihn wieder auf die ursprüngliche Länge zu dehnen, wäre die Spannung σ

$$\sigma = \frac{\Delta L}{L} E = \frac{\epsilon_{dot}}{2} E \quad (3.54)$$

notwendig. Die gemessene Dehnung ϵ_1 der Hälfte ohne Dotierung beträgt

$$\epsilon_1 = -\frac{\epsilon_{dot}}{2}, \quad (3.55)$$

die der Hälfte mit Dotierung beträgt

$$\epsilon_2 = \epsilon_{dot} - \frac{\epsilon_{dot}}{2}. \quad (3.56)$$

Aus Gleichung 3.55 und Gleichung 3.56 folgt

$$\epsilon_{dot} = \epsilon_1 - \epsilon_2. \quad (3.57)$$

Die mit der Spannungsmessung am Wafer vergleichbare Dotierspannung σ_{dot} berechnet sich dann aus (Gleichung 3.57) und dem Hooke'schen Gesetz zu

$$\sigma_{dot} = \epsilon_{dot} E \quad (3.58)$$

Mit $\epsilon_{dot} = 3 \cdot 10^{-5}$ (aus Abbildung 3.36) und $E = 170 GPa$ für Silizium unter 45° zur (100)-Orientierung erhält man eine Dotierspannung σ_{dot} von

$$\sigma_{dot} = 5,1 MPa \quad (3.59)$$

Berücksichtigt man, dass es sich bei dem SOI Wafer um Material vom Typ SC-2 handelt, so kann man im Vergleich mit Tabelle A.1 von einer guten Übereinstimmung zwischen den Messverfahren sprechen.

Auffällig ist noch die Abnahme der Dehnung um etwa $5 \cdot 10^{-6}$ von links nach rechts, entsprechend vom Waferflat zum gegenüberliegenden Antiflat. Aufgrund der sehr hohen Homogenität ist es unwahrscheinlich, dass es sich hierbei um einen direkten Effekt der Implantation handelt. Umgekehrt scheidet ein reiner Materialeffekt ebenfalls als Ursache aus, da im Fall der vollständig dotierten Streifen der Effekt sichtbar, aber betragsmäßig mit weniger als $2 \cdot 10^{-6}$ deutlich kleiner ist. Eine denkbare Ursache könnte ein Temperaturgradient bei der Temperung im Horizontalofen sein. Horizontalöfen zeigen zumeist einen Temperaturgradienten von unten nach oben, der, abhängig von System und Prozess, bis zu einigen $10^\circ C$ betragen kann. Im aktuellen Fall würde dann die Diffusion am Flat schneller ablaufen als gegenüber. Entsprechend würde es aufgrund der besseren Löslichkeit von Bor im Oxid im Vergleich zu Silizium zu einer Abreicherung des Dotierstoffs aus der SOI Schicht und einer Anreicherung in der BOX Schicht kommen. Das so verlorengegangene Bor führt zu einer geringeren Membranspannung im Bereich des Waferflats. Beobachtet wird jedoch der umgekehrte Effekt. Denkbar ist daher, dass die Schwankungen mit dem Epitaxieprozess in Verbindung stehen, da die SOI Schicht des Wafers per Epitaxie von $0,18 \mu m$ auf eine Enddicke von $3 \mu m$ verstärkt wurde.

Kapitel 4

Spezifische Lösungsansätze

Im Folgenden wird anhand einiger Beispiele die vielseitige Einsetzbarkeit und Robustheit des SOI Waferflow Prozesses gezeigt. Gleichzeitig werden auch neue Konzepte und Prozessfolgen vorgestellt. Ziel ist es, hiermit die Möglichkeiten des Prozesses auszuloten. Die Beispiele sind in die beiden Hauptgruppen Stencilmasken und Membranmasken mit durchgängiger Membran aufgeteilt.

4.1 Stencilmasken

4.1.1 Stencilmasken für Hochauflösungstests

Neben der Lagegenauigkeit einer Maske spielt auch die maximal erreichbare Auflösung eine wichtige Rolle. Für diesen Zweck wurden im Rahmen des IPL Projekts Testmasken entsprechend dem linken Bild in Abbildung 4.1 mit Auflösungsstrukturen bis hinab zu 175nm gefertigt. Berücksichtigt man den Abbildungsmaßstab von 4:1, so entspricht dies einer Strukturgröße von etwa 40nm auf Waferniveau. Die rechts in Abbildung 4.1 dargestellte Teststruktur mit einer Linienbreite von 175nm ist ein Beispiel für die hohe Qualität, mit der feinste Strukturen unter Verwendung eines Elektronenstrahlschreibers SB 350 von Leica Microsystems, Jena, in die 3 μ m dicke Membran strukturiert werden können. Die Charakterisierung der Maske vor dem Einsatz und alle Belichtungsexperimente fanden bei IMS - Ionen Mikrofabrikations Systeme GmbH, Wien, statt. Abbildung 4.2 zeigt links einen Strukturausschnitt auf einer Testmaske, der aus isolierten Linien, isolierten Gräben und einer Abfolge von Linien und Gräben in unterschiedlicher Größe besteht. Der Zahlenwert gibt immer die Breite der jeweiligen Einzelstruktur in der Maske an. Auf der rechten Seite ist die in eine 150nm dicke Schicht Shipley DUV Fotolack belichtete Struktur in vierfacher Verkleinerung abgebildet. Die Belichtung erfolgte mit He⁺ Ionen mit einer Beschleunigungsspannung von 45keV und einer Dosis von 1,6 μ C/cm². Wie gut zu erkennen ist, wurden

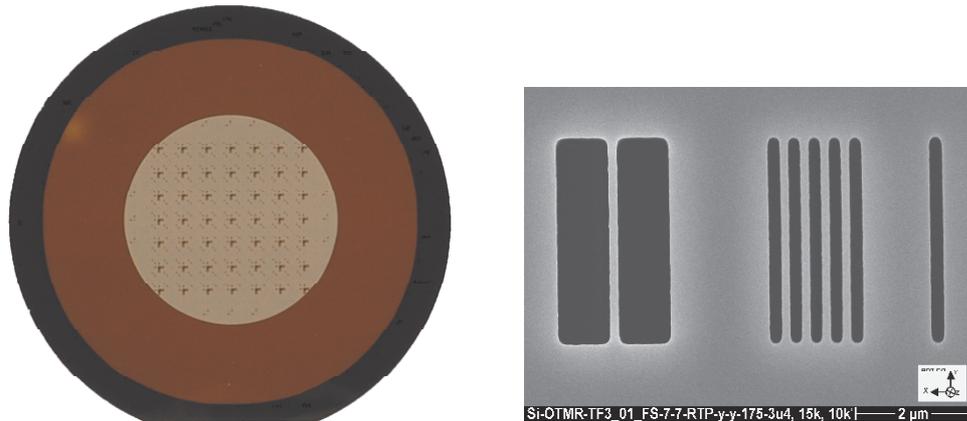


Abbildung 4.1: Stencilmaske, $3\mu\text{m}$ dick, etwa 25% offene Fläche (links), Detailansicht einer 175nm Teststruktur (rechts)

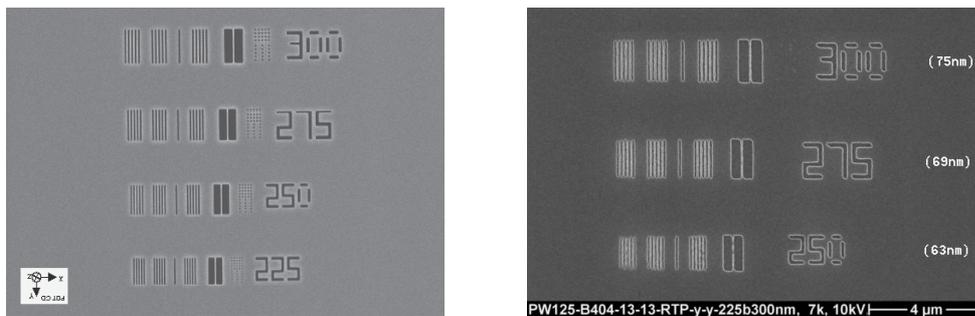


Abbildung 4.2: Ausschnitt aus der IPL Testmaske mit Auflösungsstrukturen (links), Abbildung mit vierfacher Verkleinerung mittels He^+ Ionen in einer Lackschicht (rechts)

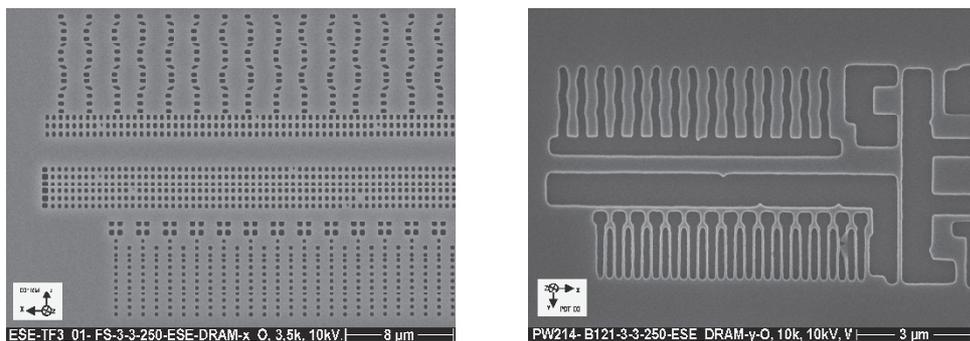


Abbildung 4.3: Strukturzerlegung nach dem Prinzip der Stepmaske: Ausschnitt aus der IPL Testmaske (links), Abbildung durch Vierfachbelichtung mit vierfacher Verkleinerung mittels He^+ Ionen in einer Lackschicht (rechts) [127]

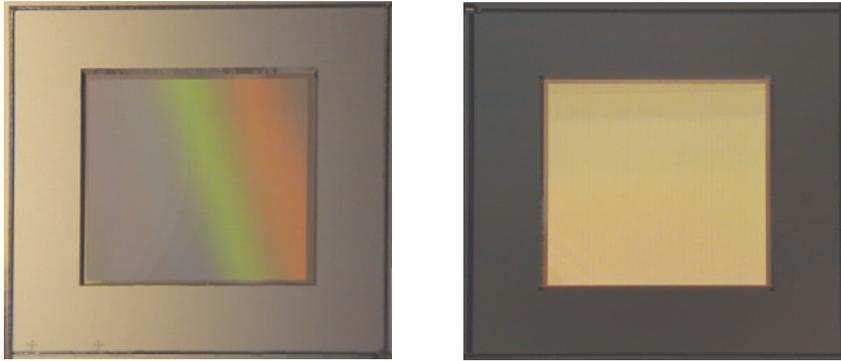


Abbildung 4.4: Stencilmaske $1,8\mu\text{m}$ dick, etwa 50% offene Fläche in Reflexion (links) und Transmission (rechts)

Strukturen bis etwa 60nm klar aufgelöst. Damit ist die Maske hinsichtlich der Auflösung derzeit kein begrenzender Faktor.

Ergänzend zu den oben beschriebenen Strukturen wurden in die Maske auch kleine Bereiche integriert, bei denen die Strukturzerlegung nach dem Prinzip der Stepmaske (Unterunterabschnitt 1.1.3.2) angewandt wurde. Das linke Bild in Abbildung 4.3 zeigt eine derartige Maske [127]. Bei der Belichtung in den 230nm dicken CARL Lack von Infineon Technologies AG wurde das belichtete Bild insgesamt viermal verschoben. Als Resultat der Vierfachbelichtung erhält man die in Abbildung 4.3 rechts dargestellte Struktur. Die Belichtung selbst erfolgte mit He^+ Ionen, einer Beschleunigungsspannung von 45keV und einer Dosis von $2,2\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Mit dem auch als "Electrostatic Step Exposure" (ESE) bezeichneten Verfahren wird derzeit eine minimale Strukturgröße von 60nm erreicht.

Nach der erfolgreichen Demonstration der Strukturübertragung muss der nächste Schritt nun in der Verifikation der Struktur bestehen. Die Messaufgabe verlagert sich demnach aus der Maskenebene in die um den Faktor vier kleinere Waferebene. Erst ein detaillierter Vergleich zwischen Maske und Bild ermöglicht es, Parameter zu extrahieren und Schlüsse zu ziehen, die es erlauben, die Belichtungsergebnisse durch Modifikationen am Layout der Maske in das ursprünglich entworfene Design zu überführen.

4.1.2 Stencilmasken mit hohem Öffnungsgrad

Ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung einer Stencilmaske ist neben der Membrandicke und der minimalen Strukturgröße (MFS) auch der Öffnungsgrad. Definitionsgemäß versteht man hierunter das Verhältnis von strukturierter und damit offener Membranfläche zur Gesamtfläche der Membran. Typische Werte für die im Rahmen des IPL Projekts verwendeten Masken liegen etwa zwischen 1% und 25%. Kleine Werte treten beispielsweise bei

produktionsnahen Masken für Lochebenen zur Herstellung von Kontakten zwischen technologischen Ebenen auf, ebenso wie bei den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Masken zur Lagemessung. Die obere Grenze wird durch mehrere Faktoren beeinflusst: neben der zunehmenden Fragilität und weiteren membranspezifischer Gründe spielt hier die Qualität der Abbildung eine entscheidende Rolle. Diese ist unter anderem abhängig von der Anzahl der Ionen, die pro Zeiteinheit durch die Maske treten. Um produktiv arbeiten zu können, muß dieser Wert möglich hoch sein. Umgekehrt aber spielen ionenoptische Fehler und Effekte wie "Blur" [128] mit zunehmender Stromdichte eine immer größere Rolle. Der obere Grenzwert des Öffnungsgrads für IPL Masken ist vom jeweils verwendeten Maskenkonzept abhängig. Eine generelle Grenze liegt bei 50% Öffnung, da es dann sinnvoller ist, einen Lack mit umgekehrten Tonwert zu verwenden. Kommt das Konzept der komplementären Maske (Unterunterabschnitt 1.1.3.1) zum Einsatz, liegt der maximale Öffnungsgrad je Maske bei 25%. Nutzt man die Step-Technik (Unterunterabschnitt 1.1.3.2), beträgt die maximale Öffnung aufgrund der vierfachen Belichtung nur 12,5%.

Eine hinsichtlich des Anteils an geöffneter Fläche herausfordernde Aufgabe wird im folgenden beschrieben: Realisiert werden soll ein optisches Gitters mit einer Periode von $1,8\mu\text{m}$, strukturiert in einer $1,8\mu\text{m}$ dicken Membran. Die in Abbildung 4.4 dargestellte Membran ist $26\text{mm} \times 26\text{mm}$ groß und erreicht in einem Gebiet von $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ einen Öffnungsgrad von knapp unter 50%. Die Nutzstruktur ist extrem anisotrop und besteht aus 25mm langen Linien, die in regelmäßigen Abständen mit Querstegen verbunden sind. Diese verhindern ein Verkleben der Gitterlinien während des Herstellungsprozesses. Der maximale Abstand der Stützstege kann mit der Membranspannung variiert werden. Mit dem SOI WFP wurde diese Aufgabe optimal bewältigt. Aufgrund der recht geringen Membrandicke und des hohen Öffnungsgrads wurde in Hinblick auf die Ausbeute mit einer Eigenspannung von etwa 4 MPa vor Strukturierung der Membran und einem Stegabstand von $50\mu\text{m}$ gearbeitet. Alle Strukturen wurden mit dem Elektronenstrahlschreiber Hitachi HL700D geschrieben, die Minimalstruktur war $0,9\mu\text{m}$. Für die Produktion nach dem SOI Waferflow Prozess wurde 150mm SmartCut Material mit einer BOX Dicke von 200nm verwendet. Die Ausbeute an Membranen betrug 100%.

4.2 Membranmasken

4.2.1 Ultradünne Membranmasken

Mit einer Membrandicke von 180nm und einer Membrangröße von $25\text{mm} \times 5\text{mm}$ konnten die bisher dünnsten Membranen nach dem SOI Waferflow Prozess hergestellt werden. Für die Produktion verwendet wurde 150mm SmartCut Material mit einer BOX Dicke von 200nm . Die in Abbildung 4.5

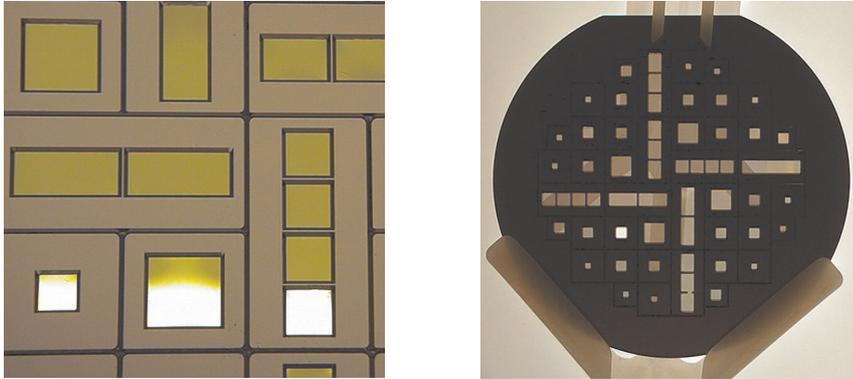


Abbildung 4.5: Membranmaske, 180 nm dick, gefertigt nach dem SOI WFP

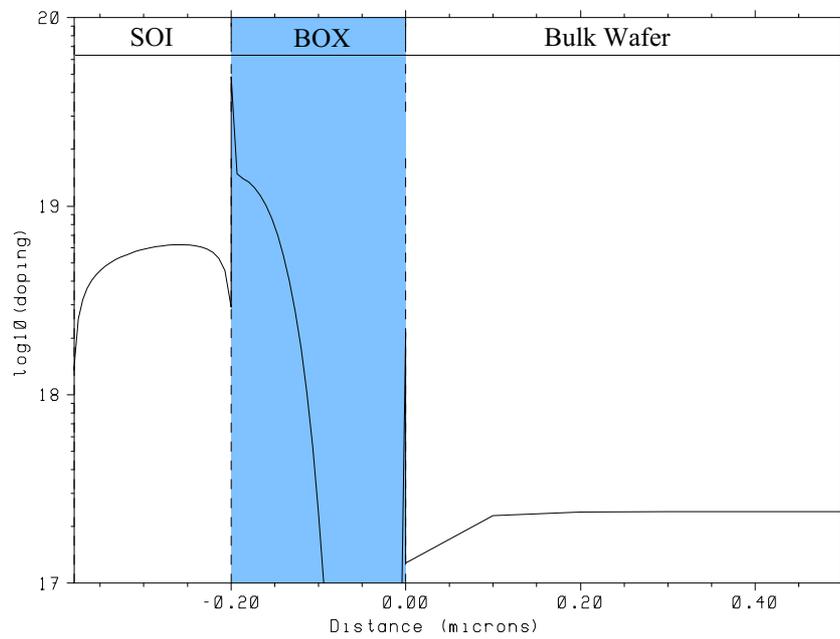


Abbildung 4.6: Dotierstoffprofil von Bor in der 180nm SOI Schicht

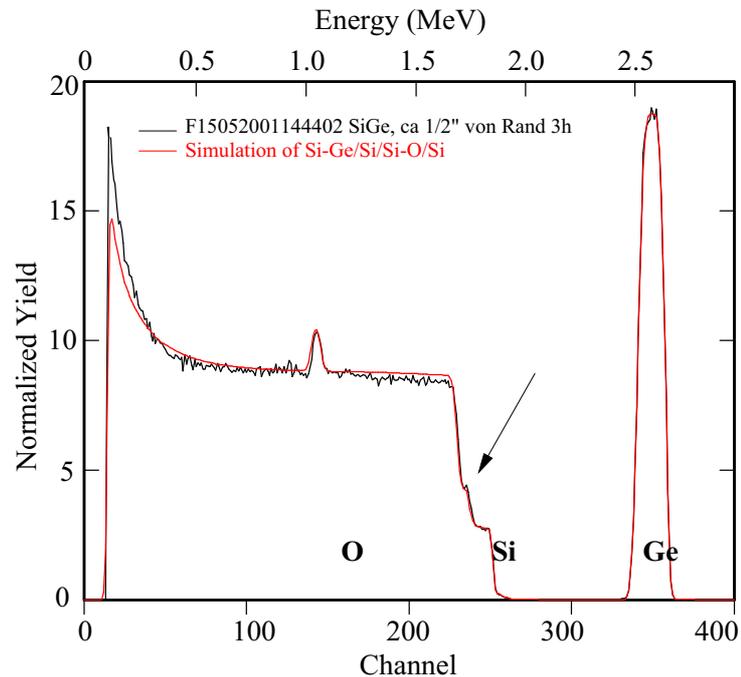


Abbildung 4.7: Bestimmung der Zusammensetzung der SiGe-Schicht mittels RBS-Analyse: Der Pfeil markiert das Signal der Silizium Startschicht

dargestellte Maske wurde zur Einstellung der Eigenspannung dotiert, wobei die Dosis durch eine Skalierung der bereits für "dicke" $3\mu\text{m}$ Membranen bekannten Volumenkonzentration aus Unterabschnitt 3.2.3 bestimmt wurde. Abbildung 4.6 zeigt das per Implantation eingestellte Dotierstoffprofil von Bor in der SOI Schicht. Weitergehende Änderungen am Prozess waren nicht erforderlich. Wie aus Abbildung 4.5 rechts zu ersehen, liegt die Ausbeute an Membranen bei fast 100%.

4.2.2 Membranmasken aus Sondermaterial

Neben dem üblichen SOI wurden auch SiGe-on-Insulator Wafer als Basismaterial für die Fertigung von Membranmasken verwendet. Der Aufbau des Wafers entspricht dem des polykristallinen SOI (Unterabschnitt 2.3.2.7). Das Material wurde polykristallin unter Verwendung einer etwa 15 nm starken Startschicht aus Silizium auf einen oxidierten Siliziumwafer aufgewachsen. Genauer Aufschluss über die Dicke und die Zusammensetzung der von der Firma ATMI Inc., Arizona, gelieferten Schicht konnte durch die in Abbildung 4.7 dargestellten RBS-Analyse erhalten werden. Hieraus wurde die Zusammensetzung zu $\text{Si}_{1,00}\text{Ge}_{1,32}$ bestimmt. Die Belegung beträgt $549\text{E}15(\text{Si}_{1,00}\text{Ge}_{1,32})\text{-Einheiten}/\text{cm}^2$, was Reinelementschichtdicken von 110nm (Si) beziehungsweise 168nm (Ge) entspräche. Aufgrund des hohen

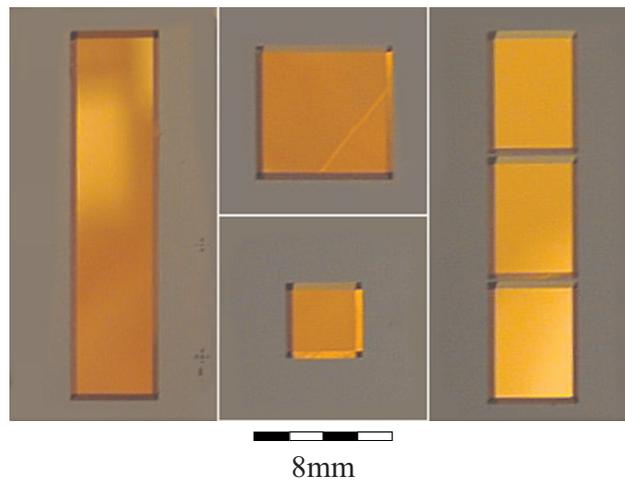


Abbildung 4.8: Membranen aus SiGe Material

Germaniumgehalts und dessen geringer Stabilität gegenüber den in der Siliziumtechnologie üblichen Medien, musste der Fertigungsprozess insbesondere hinsichtlich der Reinigungsschritte modifiziert werden. Wie in Abbildung 4.8 gezeigt, konnten Membranen bis zu einer Größe von 25mm x 5mm gefertigt werden. Eine Dotierung zur Spannungseinstellung war dabei nicht erforderlich. Charakteristisch für die SiGe-Membranen ist ihre rötliche Farbe und eine Farbtiefe, die bei Siliziummembranen nur bei Dicken im Bereich deutlich größer als $3\mu\text{m}$ auftritt. Neben der akademischen Erkenntnis über die Möglichkeiten eines modifizierten "SOI"-Waferflow Prozesses gibt es auch konkrete Gründe für dieses Experiment: Germanium stellt für weiche Röntgenstrahlung im Bereich von $\lambda = 11$ bis 13nm einen guten Absorber dar. Derartige Strahlung findet in der projizierenden Röntgenlithografie, der sogenannten EUV-Lithografie [129], Anwendung. Diese wird derzeit weltweit als Kandidat Nr.1 für die zukünftige Lithografie (NGL) gehandelt. Als Masken kommen momentan Reflektionsmasken mit einer aufwendigen Multilayer-Beschichtung und Absorber zum Einsatz [130, 131]. Grundsätzlich wäre es jedoch auch denkbar, Transmissionsmasken nach dem Konzept der Stencilmasken zu verwenden. An dieser Stelle greift der oben beschriebene Versuch: Membranen, die bereits zu einem hohen Anteil aus Absorbermaterial gefertigt sind, und damit Punkte wie schlechten Kontrast und Effekte, die durch die mechanischen Unterschiede von Absorber und Träger entstehen, vom Prinzip her auszuräumen. Der zur Erzeugung von Maskenstrukturen notwendige Schritt kann dabei, wie in Abbildung 4.9 dargestellt, in unterschiedlicher Weise durchgeführt werden: Neben der Durchstrukturierung (A) analog einer IPL Stencilmaske ist es ebenfalls denkbar, die Strukturen nur bis zu einer definierten Tiefe in die Membran zu ätzen (B-D). Die durchgängige Membran führt in Abhängigkeit von ihrer Dicke zu einer gleichförmigen Re-

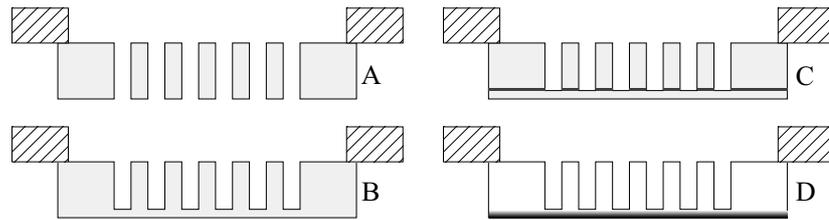


Abbildung 4.9: Verschiedene Varianten zur Herstellung einer selbstabsorbierenden Membranmaske

duktion der Helligkeit und damit zu einer leichten Reduktion des Kontrasts der Abbildung. Damit verbunden ist auch eine erhöhte Absorptionsbelastung der Maske. Der Schritt kann in Abhängigkeit vom Ätzprozess und den Anforderungen hinsichtlich der oben angesprochenen Kontrastverteilung ohne (B) oder mit Stopschicht (C) durchgeführt werden. Einen höheren Kontrast erhält man durch einen Sandwich Aufbau aus transparentem und absorbierendem Material (D). Der Übergang zwischen den beiden Materialien kann dabei abrupt oder kontinuierlich erfolgen, beispielsweise von Silizium zu Si_xGe_y . Unabhängig davon ist bei den Varianten C und D jedoch zu beachten, dass die entsprechenden Vorteile eine Abschwächung des Konzepts einer monolithisch aus Absorbermaterial gefertigten Membranmaske mit einheitlichen mechanischen Eigenschaften darstellen. Vor- und Nachteile müssen daher im Einzelfall abgewogen werden. Die in C vorgestellte Version stellt eine mögliche Abart des Doppel-SOI Prozesses [40] unter Verwendung zweier unterschiedlicher Trägermaterialien dar.

4.2.3 Membranmasken mit Absorber

Neben der Herstellung von einschichtigen Membransystemen oder Stencilmasken, kann der SOI Waferflow Prozess auch zur Herstellung von Membranmasken mit Absorber verwendet werden. Bei der Auswahl der als Absorber verwendbaren Materialien wurde hier, wie auch bei der Auswahl der Dotierstoffe (Unterunterabschnitt 3.2.1.3), nach dem Kriterium der Kompatibilität mit einer modernen Produktionslinie vorgegangen. In Frage kommen daher nur eine handvoll Metalle: Aluminium und Titan sowie Wolfram, Chrom, Kupfer, Tantal und Molybdän. Verfügbar und strukturierbar waren zum Zeitpunkt der Versuche hiervon nur die beiden ersten Elemente. Anhand von Vorversuchen zeigte sich, dass gesputterte Titanschichten Druckspannungen verursachen, während dünne gesputterte Aluminiumschichten auch mit einer leichten Zugspannung (10-25 MPa) hergestellt werden konnten. Da diese ebenfalls die gewünschten Absorptionseigenschaft für weiche Röntgenstrahlung ($\lambda = 11$ bis 13nm) zeigen, fiel die Wahl auf Aluminium. Abbildung 4.10 zeigt den skizzierten Prozessablauf. Nach der Strukturierung der Rückseiten-

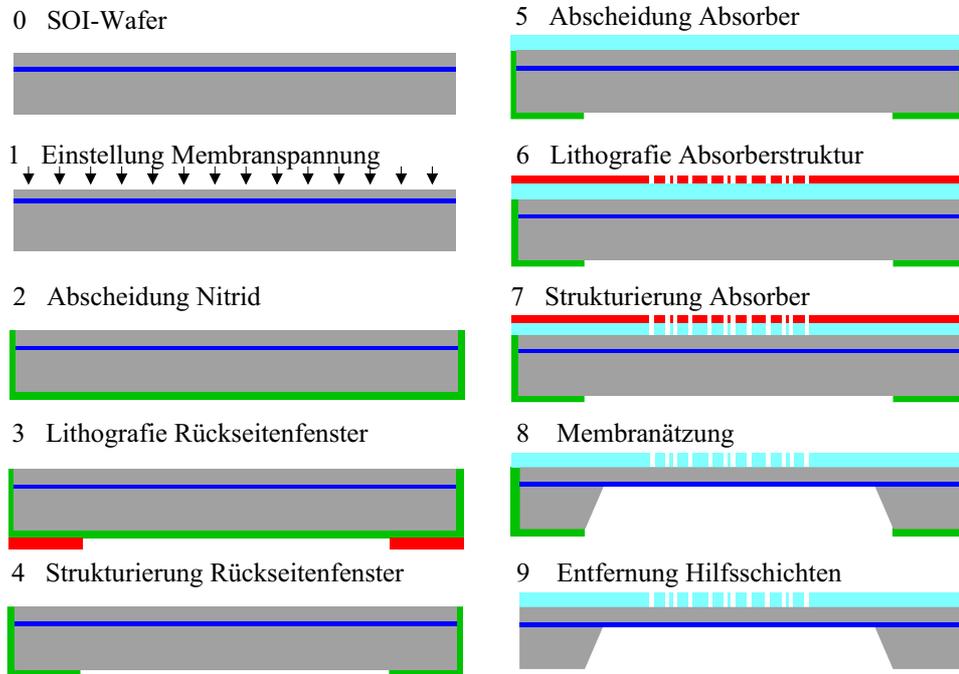


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung des SOI Waferflow Prozesses zur Herstellung von Membranmasken mit strukturiertem Absorber

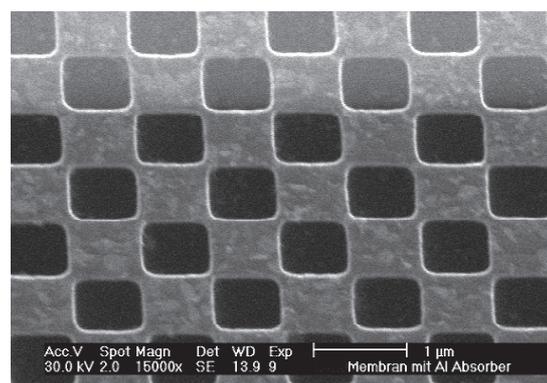


Abbildung 4.11: Membranmaske, 180nm dick, mit strukturiertem Absorber aus Aluminium, 150nm dick, gefertigt nach dem SOI WFP

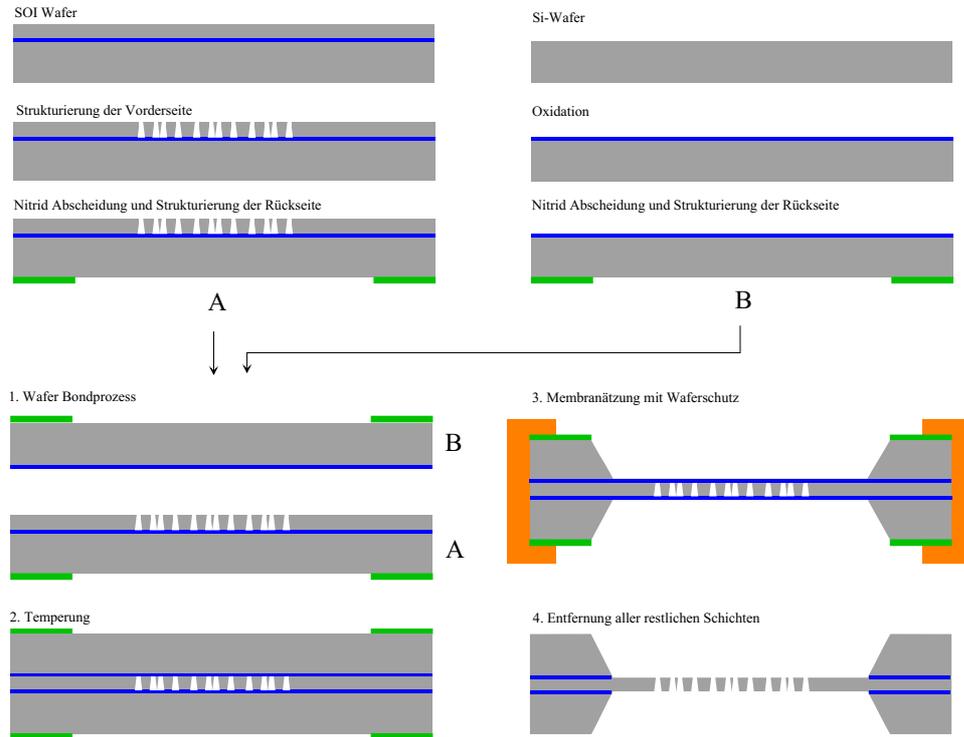


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung des Doppelwafering Prozesses [133]

maske wird eine 150nm dicke Aluminiumschicht auf den SOI Wafer aufgebracht. Die Strukturierung des Absorbers unter Verwendung einer Lackmaske erfolgt über einen Trockenätzschritt [132]. Die Membranätzung verläuft als Zweischrittprozess und kann mit oder ohne Schutzschicht erfolgen [40]. Das Ergebnis sind die in Abbildung 4.11 gezeigten Membranen. Eine 150nm Absorberschicht mit einem Öffnungsgrad bis zu 25% wird von einer 180nm dicken Siliziummembran getragen. Die minimale Strukturgröße beträgt dabei 250nm. Nach diesem Prozess konnten Membranen mit einer offenen Fläche von bis zu 25mm x 5mm gefertigt werden. Eine geeignete Zugspannung wurde durch Dotierung der SOI Schicht mit Bor eingestellt.

4.3 Der Doppelwafering Prozess

Besteht eine Membranmaske aus einer großen Membranfläche und einem schmalen Tragrings, so führen die Spannungen in der Membran und dem Ring zu einer Verkippung des Tragrings. Eine Verformung des Tragrings aus dieser Position heraus in die eine oder andere Richtung hat Einfluss auf das Muster der Verzeichungen in der Maske. Aus diesem Grund erfolgt die Halterung der Masken insbesondere in Hinblick auf die Lagetreue der Maske,

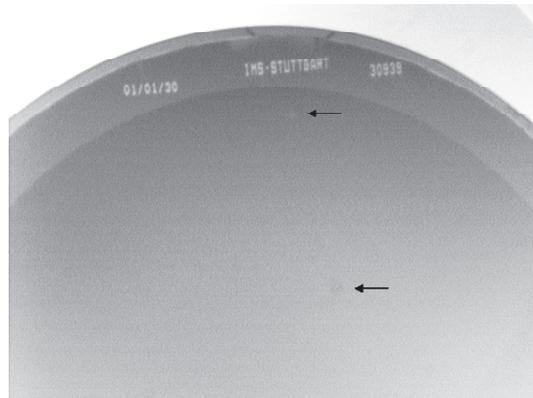


Abbildung 4.13: IR-Bild eines Wafer nach der Bondung: Gut sichtbar sind die in das SOI strukturierte Beschriftung und die Maskierung für die Membranätzung sowie zwei kleine Luft einschließungen (Pfeil)

beispielsweise für den Ionenbelichter, kräftefrei in einem speziellen Rahmen, dem Maskenrahmen. Mit weitaus weniger Aufwand könnte eine Fixierung gegen eine ebene Fläche realisiert werden. Dies setzt jedoch voraus, dass der die Membran aufspannende Tragrings eben ist. Ein entsprechender Ansatz zur Einstellung symmetrischer Spannungsverhältnisse an der Maske und einem ebenen Tragrings stellt das in Abbildung 4.12 skizzierte Konzept des Doppelwaferings [133] dar. Mechanisch betrachtet ist die Membran hierbei die neutrale Faser des Systems.

Ausgehend von einem ebenen SOI Wafer mit homogener Dicke erfolgt die Prozessierung analog dem SOI WFP bis zur Strukturierung der Rückseitenöffnung für die Membranätzung. Die Halterung des Wafer während der Belichtung im Elektronenstrahlschreiber erfolgt vorteilhafterweise eben auf einer Auflage, beispielsweise einer elektrostatischen Waferaufnahme (Chuck). Parallel zu diesem Wafer A wird ein zweiter Wafer B gefertigt, der, ebenfalls eben und aus Silizium, vorderseitig oxidiert wird und auf der Rückseite lediglich die Maske für die Membranätzung besitzt. Über ein geeignetes Markonzept werden die beiden Wafer A und B anschließend justiert aufeinander gebondet. Hierbei ist es wichtig, dass die beiden Öffnungen für die Membranätzung genau gegenüber zu liegen kommen. Ein Temperschnitt stärkt die Bindung zwischen den Wafern. Bei der anschließenden Membranätzung werden die Wafer am Umfang gedichtet. Die Ätzung erfolgt zweistufig analog dem SOI WFP und stoppt von der einen Seite auf dem vergrabene Oxid des SOI Wafer A und von der anderen auf der Oxidschicht des Wafer B. Die verbleibenden Hilfsschichten lassen sich dann beispielsweise durch einen Nassätzschritt mit Flusssäure entfernen.

Um die generelle Machbarkeit des oben beschriebenen Konzepts zu zeigen, wurde ein Testwafer gefertigt. Wafer A bestand dabei aus einem konventio-

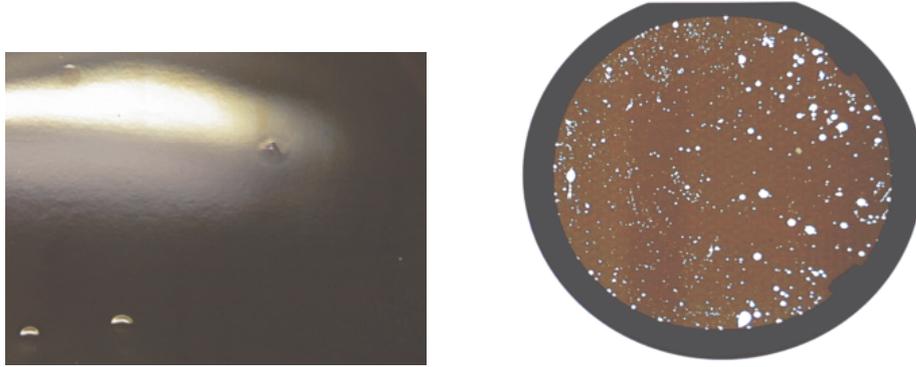


Abbildung 4.14: Testwafer nach dem Prinzip des Doppelwafering Prozesses: Kleine Bereiche mit eingeschlossener Luft (links) verursachen Blasen, die in der fertigen Membran (rechts) zu Löchern führen.

nellen $3\mu\text{m}$ SOI Wafer mit einer $0,3\mu\text{m}$ starken vergrabenen Oxidschicht. In die SOI Schicht wurden, unter Verwendung von optischer Lithografie, einige Messstrukturen und Justiermarken belichtet. Als Ätzschutz wurde auf der Rückseite eine Schicht aus Plasmanitrid abgeschieden, die Lithografie zur Strukturierung der Schicht erfolgte justiert zur Vorderseite. Für Wafer B wurde ein gewöhnlicher Si-Wafer verwendet, auf den eine $0,3\mu\text{m}$ starke Oxidschicht gewachsen wurde. Das Oxid wurde rückseitig entfernt und durch ein Plasmanitrid ersetzt. Die Lithografie zur Strukturierung der Schicht erfolgte ebenfalls justiert auf zuvor auf der Vorderseite positionierte Marken. Nach einer geeigneten Reinigung erfolgte die justierte Bondung der beiden Wafer unter Verwendung eines Waferbonders MA/BA 6-ISA der Firma SÜSS MicroTec GmbH. Abbildung 4.13 zeigt die Inspektion der Wafer nach der Bondung im

Infrarot-Mikroskop. Dabei wurde sichtbar, dass kleine Lufteinschlüsse im Bereich der künftigen Membran nicht vermieden werden konnten. Die anschließende Temperung erfolgte für 12h bei 400°C in Stickstoff. Die Membranätzung wurde als Zweischnittprozess in KOH und TMAH durchgeführt. Um eine laterale Unterätzung im Bereich des Tragrings zu verhindern, wurde der Wafer für den ersten Ätzschritt in eine speziell dafür angefertigte Ätzzelle aus Edelstahl eingebaut. Bei einer Restdicke von etwa $40\mu\text{m}$ wurde der Wafer aus der Zelle entfernt und frei stehend weiter geätzt. Dabei wurden die in Abbildung 4.14 links dargestellten Blasen beobachtet, die mit abnehmender Materialstärke immer stärker hervortraten. Kurz vor Abschluss der Ätzung platzten einige der Blasen, so dass das Ätzmedium die Membran angreifen konnte und die in Abbildung 4.14 rechts in der Membran sichtbaren Löcher verursachte. Die Ursache für diesen Effekt liegt in kleinen Lufteinschlüssen beim Bondprozess, beispielsweise um kleinste Partikel. Der Druck innerhalb dieser Inseln reicht aus, um die nur wenige Mikrometer starke Siliziummem-

bran während der Membranätzung platzen zu lassen. Die beiden dunklen Stellen am rechten Rand der Membran sind Ätzreste, die sich durch eine längere Überätzung entfernen lassen. Angesichts der starken Perforation der Membran wurde hierauf jedoch verzichtet.

Aufgrund dieser Erfahrungen muss der Bondvorgang als Schlüsselprozess für die erfolgreiche Umsetzung dieser Herstellungsvarianten gesehen werden. Gelingt es, ihn unter optimierten Bedingungen defektfrei durchzuführen, so sollte es auch möglich sein, die übrigen technologischen Herausforderungen zu meistern.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Die Geschichte der Mikrolithografie ist etwa 50 Jahre alt. In dieser Zeit wurden, ausgehend von der Belichtung mit sichtbarem Licht, die unterschiedlichsten Verfahren entwickelt und erprobt. Diese lassen sich in die beiden Hauptgruppen Lithografie mit Photonen (sichtbares Licht bis EUV-Bereich) und Lithografie mit geladenen Partikeln (Elektronen, Ionen) einteilen. Zusammen mit den Belichtungskonzepten mussten auch die jeweils passenden Maskenkonzepte entwickelt werden. Die Spanne der Maskentypen reicht hier von Masken mit massivem transparenten oder reflektierenden Trägermaterial mit Absorberstrukturen über die Membranmaske mit Absorber bis hin zur Stencilmaske. Speziell die Letztere galt lange Zeit aufgrund der Einschränkungen bezüglich der Strukturvielfalt als wenig konkurrenzfähig. Weitergehende Entwicklungen erlauben es jedoch, auch in der Stencilmaskentechnik mit einer beliebigen Strukturvielfalt zu arbeiten. Kapitel 1 gibt einen knappen Überblick über diese Entwicklung und ihre Anwendung.

Im Bereich der Lithografie mit geladenen Partikeln stellt der SOI Waferflow Prozess mit seiner einfachen Prozessfolge eine sehr innovative Methode zur Herstellung von kleinen und großflächigen Membran- und Lochmasken dar. Die zweifache Nutzung der vergrabenen Oxidschicht als Ätzstop für die Struktur- *und* Membranätzung erlaubt die Fertigung von qualitativ hochwertigen Masken, ohne dass hierbei, wie bei den bisherigen Herstellungsverfahren nach der p/p⁺-Technologie oder dem elektrochemischen Ätzstop, bestimmte Membranparameter durch den Membranätzprozess gefordert werden. Der entscheidende Unterschied dieses mehr mikroelektronischen Konzepts im Vergleich zum klassischen mikrosystemtechnischen Herstellungsverfahren, bei dem die Membranätzung vor der Strukturierung erfolgt, liegt in der durchgängigen Kompatibilität zu den typischen Prozessen der Halbleiterindustrie und einer strikten Trennung von Waferprozessen und der Membranätzung, wie sie in Kapitel 2 beschrieben ist. Dies eröffnet dem Verfahren weitreichende Möglichkeiten und die Chance, die Membranmaskentechnik vielfältig einzusetzen.

Eine wesentliche Größe zur Charakterisierung einer Membranmaske ist

deren Eigenspannung. Sie bestimmt nicht nur das mechanische Verhalten sondern auch die Verzeichnung der Strukturen in der Maske und die Verschiebung von deren Solllagen. Dieser Effekt wird als strukturunabhängige Verzeichnung bezeichnet, da sie unabhängig vom Belegungsgrad der Maske auftritt. In Abhängigkeit von der Strukturdicke und -verteilung überlagert sich noch eine strukturabhängige Verzeichnung, die spezifisch für ein spezielles Maskendesign ist. Beiden Effekten kann mit einer entsprechenden Vorverzeichnung der Maskendaten vor der Strukturierung begegnet werden. Dazu ist jedoch die exakte, homogene und reproduzierbare Einstellung der Membranspannung erforderlich. Weiterhin müssen die spezifischen Eigenschaften des verwendeten SOI Materials bekannt sein. In Abhängigkeit vom SOI Material konnte, wie in Kapitel 3 beschrieben, durch den Einbau von Dotierstoffatomen eine Reproduzierbarkeit der Membranspannung σ von besser als 0,1MPa bei einer lokalen Spannungsvariation von $\sigma < 0,15\text{MPa}$ einschließlich des Einflusses durch das SOI Material erreicht werden.

Zuden wichtigsten Parametern einer Maske generell, und im Fall der Membranmaske eng mit der Spannungsfrage verknüpft, gehört die Lagegenauigkeit. Untersuchungen haben gezeigt, dass Lagemessungen an Membranmasken auf einer Leica LMS IPRO Messmaschine mit einer Wiederholbarkeit im Bereich der für die Anlage spezifizierten Messgenauigkeit (4nm (3σ)) möglich sind. Die Lagegenauigkeit selbst ist, wie ebenfalls in Kapitel 3 dargestellt, stark von der Art des verwendeten SOI Materials abhängig. Wie sich anhand von Untersuchungen an großflächigen Stencilmasken mit einem Membrandurchmesser von 127mm gezeigt hat, sind die im klassischen Bondverfahren hergestellten Produkte den modernen Materialien unterlegen. Durch die Auswahl eines geeigneten nichtgebondeten Materials konnte eine Übereinstimmung mit dem Finite Elemente Modell von 36nm (3σ) unskaliert beziehungsweise 12nm (3σ) mit Skalierung erreicht werden. Als Überdeckungsgenauigkeit zwischen zwei Masken wurde ein Wert von 12nm (3σ) erreicht. Dies stellt gleichzeitig das beste Ergebnis dar, welches bisher auf einer großflächigen Stencilmaske erzielt werden konnte. Aufgrund der geringen Anzahl an Messungen können die Ergebnisse nicht als statistisch gesichert betrachtet werden. Noch wichtiger als die absoluten Zahlenwerte ist die durch Verbesserungen an Prozess, Material und Messverfahren klar herausgearbeitete Systematik, die ein Potential für die Zukunft birgt. Die große Unbekannte ist derzeit der exakte Herstellungsprozess der SOI Wafer.

Um die Vielfältigkeit der Möglichkeiten des SOI Waferflow Prozesses aufzuzeigen, sind in Kapitel 4 verschiedene Anwendungsbeispiele vorgestellt. Neben einfachen Variationen der Membrandicke oder Größe kommen auch verschiedene Materialien zum Einsatz. Die minimale Strukturgröße in einer Maske beträgt dabei 175nm. Weiterhin wird mit dem Doppelwafering Prozess eine Variante aufgezeigt, um die Leistungsfähigkeit des Basisprozesses noch zu steigern. Ebenso wird eine Modifikationen zur Herstellung von Membranmasken mit strukturiertem Absorber vorgestellt.

Anhang A

Spannungsmesswerte

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Probenformen zu gewährleisten, muss jeweils der Einfluss des Tragrings beziehungsweise des Rahmens berücksichtigt werden. Kann man im Fall der kleinen quadratischen Membranen von ähnlich stabilen Verhältnissen wie am Wafer ausgehen, darf dies für die großen runden Membranen aufgrund des ungünstigeren Verhältnisses zwischen Membranfläche und Tragringstärke nicht vorausgesetzt werden. Abschätzungen haben ergeben, dass dies aufgrund von Deformation zu einer Spannungsreduktion um 12% führt [114]. Der Effekt ist in der Größe σ_{Norm} berücksichtigt, so dass hierüber ein Vergleich zwischen den Verfahren möglich ist.

Probe Nr. [-]	Material ID [-]	\bar{N}_{Dot} [cm^{-3}]	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	σ_{Norm} [MPa]
03275	S-4	0	0,95	0,04	1,08
30855	E-2	$5 \cdot 10^{18}$	1,21	0,03	1,38
30856	E-2	$5 \cdot 10^{18}$	0,66	0,03	0,75
30857	E-2	$5 \cdot 10^{18}$	0,77	0,03	0,80
03147	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	4,66	0,09	5,3
03225	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	3,5	0,07	3,97
03235	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	3,72	0,07	4,23
03164	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	3,72	0,07	4,23
44162	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	4,24	0,08	4,82
44119	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	4,31	0,08	4,9
44078	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	4,33	0,08	4,92
29904	SX-1	$5 \cdot 10^{18}$	5,2	0,15	5,91
31261	SX-1	$5 \cdot 10^{18}$	5,13	0,1	5,83
31262	SX-1	$5 \cdot 10^{18}$	5,11	0,1	5,81
30160	SX-2	$5 \cdot 10^{18}$	4,21	0,11	4,78
000S1	SX-2	$5 \cdot 10^{18}$	4,17	0,1	4,74
000S3	SX-2	$5 \cdot 10^{18}$	4,25	0,1	4,83
30302	SC-1	$5 \cdot 10^{18}$	4	0,08	4,55
30303	SC-1	$5 \cdot 10^{18}$	4,01	0,08	4,56
30304	SC-1	$5 \cdot 10^{18}$	4,01	0,08	4,56
29533	SC-1	$5 \cdot 10^{18}$	3,75	0,07	4,26
11991	SC-2	$5 \cdot 10^{18}$	4,86	0,09	5,52
11992	SC-2	$5 \cdot 10^{18}$	4,74	0,08	5,39
62703	S-1	$5 \cdot 10^{18}$	5,24	0,2	5,95
62652	S-1	$5,45 \cdot 10^{18}$	6,13	0,19	6,97
98588	S-3	$5,61 \cdot 10^{18}$	5,85	0,2	7,67
01181	S-1	$6,33 \cdot 10^{18}$	6,33	0,19	7,19
01113	S-1	$7 \cdot 10^{18}$	7,34	0,24	8,34
xxxS2	E-2	$10 \cdot 10^{18}$	3,67	0,07	4,17
xxxS3	E-2	$10 \cdot 10^{18}$	3,46	0,07	3,93
xxxS4	E-2	$10 \cdot 10^{18}$	3,42	0,07	3,89
xxxS5	E-2	$10 \cdot 10^{18}$	3,77	0,07	4,28
01297	S-1	$11,33 \cdot 10^{18}$	10,78	0,41	12,25
62702	S-1	$13,85 \cdot 10^{18}$	13,24	0,45	10,05

Tabelle A.1: Ergebnis der mittels elektrostatischer Spannungsmessung in Bratislava untersuchten Membranen

Probe Nr. [-]	Material ID [-]	\bar{N}_{Dot} [cm^{-3}]	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	σ_{Norm} [MPa]
44092	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	4,7	0,2	4,7
03252	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	5,2	0,2	5,2
03273	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	5,2	0,2	5,2
03194	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	5,3	0,2	5,3
56336	S-3	$5,55 \cdot 10^{18}$	6,9	0,25	6,9

Tabelle A.2: Ergebnis der mittels der Resonanzmethode in Bratislava untersuchten Membranen

Probe Nr. [-]	Material ID [-]	\bar{N}_{Dot} [cm^{-3}]	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	σ_{Norm} [MPa]
B00001	E-2	0	-6,41	-	-6,41
B00002	S-1	0	1,52	-	1,52
B00003	S-4	0	1,6	0,8	1,6
B00004	SX-1	0	-0,12	-	-0,12
B00005	SX-2	0	0,31	-	0,31
B00006	S-2	$5 \cdot 10^{18}$	5,96	-	5,96
B00007	S-4	$5 \cdot 10^{18}$	4,08	-	4,08
B00008	SC-1	$5 \cdot 10^{18}$	6,6	-	6,6
B00009	SX-1	$5 \cdot 10^{18}$	5,94	-	5,94

Tabelle A.3: Ergebnis des mittels mechanischer Krümmungsmessung untersuchten SOI Materials

Probe Nr. [-]	Material ID [-]	\bar{N}_{Dot} [cm^{-3}]	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	σ_{Norm} [MPa]
03244a	S4	$5 \cdot 10^{18}$	6,0	0,2	6,0
03244b	S4	$10 \cdot 10^{18}$	7,9	0,2	7,9
13034a	S5	$5 \cdot 10^{18}$	4,3	0,2	4,3
13034b	S5	$7,5 \cdot 10^{18}$	6,2	0,2	6,2

Tabelle A.4: Parameter der zusätzlich mittels der Resonanzmethode untersuchten Membranen

Anhang B

Ergebnisse der Lagemessung

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt einheitlich jeweils entsprechend Tabelle B.1. Diese gliedert sich in zwei Blöcke, wobei im oberen Teil die gemessenen Parameter einer einzelnen Maske M_i aufgeführt werden und im unteren Teil, falls möglich, ein Vergleich zwischen jeweils zwei Masken M_1 und M_2 durchgeführt wird. Zunächst sei auf den oberen Block eingegangen: Die Tabelle enthält, wie der Spalte M_i zu entnehmen, die Messungen von zwei verschiedenen Masken A und B . Die vier Werte x_{max} , x_{min} , y_{max} und y_{min} errechnen sich aus der Differenz der 169 Punkte der "INFIELD"-Messungen am Wafer und der Membran (vgl. Abschnitt 3.3) und geben den minimalen und maximalen Lagefehler in x- und y-Richtung an. Um eine Aussage über die Überdeckungsgenauigkeit (Overlayfehler) zwischen verschiedenen Masken machen zu können, sind neben den Absolutwerten auch die dreifachen Standardabweichungen 3σ und $3\sigma^{sor}$ der unkorrigierten Messwerte und der Werte nach der SOR-Korrektur jeweils in x- und y-Richtung angegeben. Handelt es sich bei der untersuchten Größe um diskrete Zufallsgrößen in einer Normalverteilung, so liegen 99,73% aller Messwerte innerhalb eines Bereichs von $\pm 3\sigma$ um

M_i	Absolute Lagefehler M_i				Standardabweichung M_i				Spannung
	x_{min} [nm]	x_{max} [nm]	y_{min} [nm]	y_{max} [nm]	$3\sigma_x$ [nm]	$3\sigma_y$ [nm]	$3\sigma_x^{sor}$ [nm]	$3\sigma_y^{sor}$ [nm]	σ [MPa]
A
B

M_1	Differenz (M_1-M_2)				M_2	Differenz (M_1-M_2) SOR			
	x_{min} [nm]	x_{max} [nm]	y_{min} [nm]	y_{max} [nm]		x_{min} [nm]	x_{max} [nm]	y_{min} [nm]	y_{max} [nm]
A	B

Tabelle B.1: Erläuterung zur Darstellung der Ergebnisse der Lagemessung

den Mittelwert der Verteilung [134]. Setzt sich der Fehler jedoch aus einem statistischen und, wie in Unterabschnitt 3.3.4 beschrieben, systematischen Anteil zusammen, gilt dies aufgrund der fehlenden statistischen Voraussetzungen nicht unbedingt. Aus diesem Grund wird der 3σ -Wert in der in Unterabschnitt 3.3.6 durchgeführten Bewertung der verschiedenen Materialien letztendlich auch nicht berücksichtigt. Ebenfalls in den Tabellen enthalten ist, sofern bekannt, die Spannung σ der Maske. Diese entspricht aufgrund des geringen Öffnungsgrads im Wesentlichen der Spannung der Ausgangsmembran.

Wurden mehrere Masken M_i eines Typs gemessen, so folgt ein zweiter Block in der Tabelle. Im obigen Beispiel enthält dieser nur eine Zeile, in der die Maske A aus Spalte $M1$ mit der Maske B aus Spalte $M2$ verglichen wird. In ihr werden die minimalen und maximalen Lagefehler in x- und y-Richtung aus der Differenz zwischen den beiden Masken aus den Spalten $M1$ und $M2$ unkorrigiert $(M1 - M2)$ und mit SOR-Korrektur $(M1 - M2)^{SOR}$ angegeben.

M_i	Absolute Lagefehler M_i				Standardabweichung M_i				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_x^{sor}$	$3\sigma_y^{sor}$	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
1	-51	88	-153	191	96	251	38	83	4,33
2	-47	84	-144	181	86	217	45	84	4,24
3	-76	97	-166	156	58	222	42	93	4,31

M_1	Differenz (M_1-M_2)				M_2	Differenz (M_1-M_2) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
1	-12	25	-34	39	3	-10	12	-24	37
2	-13	13	-29	31	1	-7	7	-22	24
3	-17	17	-30	26	2	-14	12	-28	24

Tabelle B.2: Ergebnisse der Lagemessungen an Pace'd SDB Membranen

M_i	Absolute Lagefehler M_i				Standardabweichung M_i				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_x^{sor}$	$3\sigma_y^{sor}$	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
4	-63	82	-114	115	93	134	59	72	?

Tabelle B.3: Ergebnisse der Lagemessungen an einer $1,8\mu\text{m}$ dicken SmartCut Membran

M_i	Absolute Lagefehler M_i				Standardabweichung M_i				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_x^{sor}$	$3\sigma_y^{sor}$	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
5	-359	375	-291	291	615	440	19	22	3,75
6	-348	382	-277	274	596	398	26	31	4,00
7	-342	396	-284	302	582	470	42	46	4,01
8	-349	377	-251	288	590	371	42	39	4,01

M_1	Differenz (M_1-M_2)				M_2	Differenz (M_1-M_2) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
5	-19	24	-30	55	6	-12	16	-28	21
5	-36	45	-49	42	7	-27	25	-37	40
5	-29	48	-52	73	8	-27	23	-33	26
6	-25	31	-47	49	7	-18	21	-17	23
7	-24	20	-69	65	8	-19	22	-27	16
8	-33	20	-24	27	6	-25	23	-16	26

Tabelle B.4: Ergebnisse der Lagemessungen an einer epitaktisch verstärkten SmartCut Membran, basierend auf 0,1 μ m dickem Ausgangsmaterial

M_i	Absolute Lagefehler M_i				Standardabweichung M_i				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_x^{sor}$	$3\sigma_y^{sor}$	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
9	-85	141	-212	211	144	312	66	70	4,00
10	-71	119	-192	194	119	286	58	64	4,00

M_1	Differenz (M_1-M_2)				M_2	Differenz (M_1-M_2) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
9	-16	23	-20	22	10	-12	10	-9	6

Tabelle B.5: Ergebnisse der Lagemessungen an einer epitaktisch verstärkten SmartCut Membran, basierend auf 0,18 μ m dickem Ausgangsmaterial

M_i	Absolute Lagefehler M_i				Standardabweichung M_i				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_x^{sor}$	$3\sigma_y^{sor}$	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
11	-107	156	-126	202	37	53	42	43	5,2
12	-156	140	-170	189	22	30	22	22	5,13
13	-128	146	-164	186	31	36	30	30	5,11

M_1	Differenz (M_1-M_2)				M_2	Differenz (M_1-M_2) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
12	-30	25	-30	21	13	-11	11	-10	10

Tabelle B.6: Ergebnisse der Lagemessungen an SIMOX Membranen

M_i	Absolute Lagefehler M_i				Standardabweichung M_i				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_x^{sor}$	$3\sigma_y^{sor}$	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
14	-215	252	-235	251	386	409	41	35	4,21
15	-220	234	-201	206	389	346	35	24	4,17
16	-241	247	-199	218	419	364	46	20	4,25

M_1	Differenz (M_1-M_2)				M_2	Differenz (M_1-M_2) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
15	-26	46	-28	20	16	-15	17	-17	11

Tabelle B.7: Ergebnisse der Lagemessungen an lokalen SIMOX Membranen

M_i	Absolute Lagefehler M_i				Standardabweichung M_i				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_x^{sor}$	$3\sigma_y^{sor}$	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
17	-78	91	-78	108	99	137	45	37	3,67
18	-73	51	-100	122	60	168	42	38	3,46
19	-85	70	-102	125	87	167	47	43	3,42
20	-90	63	-113	125	91	184	43	48	3,77

M_1	Differenz (M_1-M_2)				M_2	Differenz (M_1-M_2) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
17	-23	40	-20	23	18	-13	20	-10	9
17	-19	23	-21	28	19	-11	13	-10	10
17	-18	28	-23	44	20	-18	22	-22	28
18	-31	20	-25	12	19	-17	11	-16	11
19	-18	24	-16	46	20	-13	17	-17	30
20	-27	24	-23	20	18	-10	11	-28	16

Tabelle B.8: Ergebnisse der Lagemessungen an Eltran Membranen

Anhang C

Ergebnisse des FE-Modells

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt einheitlich jeweils entsprechend Tabelle C.1. Diese gliedert sich in zwei Blöcke, wobei im oberen Teil die berechneten Parameter des Modells FE aufgeführt werden und im unteren Teil, ein Vergleich zwischen Modell FE und Maske M_i durchgeführt wird. Zunächst sei auf den oberen Block eingegangen: Die vier Werte x_{max} , x_{min} , y_{max} und y_{min} geben den minimalen und maximalen berechneten Lagefehler in x- und y-Richtung im Bereich des "INFIELDS" auf der Membran (vgl. Abschnitt 3.3) an. Ebenfalls in den Tabellen enthalten ist die für das Modell verwendete Spannung σ der Maske.

Ein Vergleich zwischen dem Modell und realen Masken folgt im zweiten Block der Tabelle. Im obigen Beispiel enthält dieser nur eine Zeile, in der das Modell A^* aus Spalte FE mit der Maske B aus Spalte M_i verglichen wird. In ihr werden die minimalen und maximalen Lagefehler in x- und y-Richtung aus der Differenz zwischen dem Modell A^* (Spalte FE) und Maske B (Spalte M_i) in unkorrigiert Form $(FE - M_i)$ und mit SOR-Korrektur $(FE - M_i)^{SOR}$ angegeben.

FE	Absolute Lagefehler FE				Spannung	
	x_{min} [nm]	x_{max} [nm]	y_{min} [nm]	y_{max} [nm]	σ [MPa]	
A*	

FE	Differenz (FE- M_i)				M_i	Differenz (FE- M_i) SOR			
	x_{min} [nm]	x_{max} [nm]	y_{min} [nm]	y_{max} [nm]		x_{min} [nm]	x_{max} [nm]	y_{min} [nm]	y_{max} [nm]
A*	B

Tabelle C.1: Erläuterung zur Darstellung der Ergebnisse des FE-Vergleichs

FE	Absolute Lagefehler FE				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
1*	-97	97	-101	117	4,00

FE	Differenz (FE- M_i)				M_i	Differenz (FE- M_i) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
1*	-48	50	-52	75	1	-15	31	-43	43
1*	-59	62	-46	64	2	-20	37	-47	52
1*	-46	39	-66	40	3	-22	35	-50	41

Tabelle C.2: Ergebnis der FE-Rechnung für Pace'd SDB Membranen und Vergleich mit der Lagemessung

FE	Absolute Lagefehler FE				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
4*	-46	46	-54	71	4,2

FE	Differenz (FE- M_i)				M_i	Differenz (FE- M_i) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
4*	-40	39	-60	44	4	-42	35	-34	59

Tabelle C.3: Ergebnis der FE-Rechnung für eine 1,8 μ m dicken SmartCut Membran und Vergleich mit der Lagemessung

FE	Absolute Lagefehler FE				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
5*	-94	93	-97	115	3,75

FE	Differenz (FE-M _i)				M _i	Differenz (FE-M _i) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
5*	-302	281	-194	209	5	-15	20	-35	23
5*	-291	288	-180	192	6	-9	18	-37	24
5*	-285	302	-22	234	7	-18	17	-49	24
5*	-291	287	-154	206	8	-26	28	-44	51

Tabelle C.4: Ergebnis der FE-Rechnung für eine epitaktisch verstärkte Smart-Cut Membran, basierend auf 0,1 μ m dickem Ausgangsmaterial, und Vergleich mit der Lagemessung

FE	Absolute Lagefehler FE				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
9*	-83	83	-90	107	4,00

FE	Differenz (FE-M _i)				M _i	Differenz (FE-M _i) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
9*	-118	59	-121	107	9	-44	38	-51	33
9*	-108	69	-102	87	10	-33	35	-44	30

Tabelle C.5: Ergebnis der FE-Rechnung für eine epitaktisch verstärkte Smart-Cut Membran, basierend auf 0,18 μ m dickem Ausgangsmaterial, und Vergleich mit der Lagemessung

FE	Absolute Lagefehler FE				Spannung				
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	σ				
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]				
11*	-134	134	-143	164	5,1				

FE	Differenz (FE-M _i)				M _i	Differenz (FE-M _i) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
11*	-29	24	-34	40	11	-20	11	-20	20
11*	-22	20	-27	27	12	-20	16	-20	15
11*	-26	19	-22	23	13	-16	12	-15	10

Tabelle C.6: Ergebnis der FE-Rechnung für eine SIMOX Membran und Vergleich mit der Lagemessung

FE	Absolute Lagefehler FE				Spannung				
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	σ				
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]				
14*	-162	165	-165	177	4,2				
15*	-146	154	-156	168	4,2				

FE	Differenz (FE-M _i)				M _i	Differenz (FE-M _i) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
14*	-67	87	-73	75	14	-15	29	-26	15
15*	-88	86	-53	38	15	-20	28	-10	10
15*	-102	106	-56	52	16	-34	29	-14	19

Tabelle C.7: Ergebnis der FE-Rechnung für eine lokale Simox Membran und Vergleich mit der Lagemessung

FE	Absolute Lagefehler FE				Spannung
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}	σ
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[MPa]
17*	-74	74	-79	95	3,6

FE	Differenz (FE- M_i)				M_i	Differenz (FE- M_i) SOR			
	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}		x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
17*	-25	23	-15	17	17	-17	24	-11	19
17*	-41	40	-21	28	18	-32	12	-13	17
17*	-28	37	-31	21	19	-23	21	-20	21
17*	-31	21	-34	31	20	-29	14	-38	18

Tabelle C.8: Ergebnis der FE-Rechnung für eine Eltran Membran und Vergleich mit der Lagemessung

Tabellenverzeichnis

1.1	ITRS Roadmap	10
2.1	Parameter des SOI WFP	19
2.2	Bewertung von SOI Material auf Eignung für den SOI WFP .	31
2.3	Parameter des mit dem SOI WFP getesteten SOI Materials .	32
2.4	Parameter des mit dem SOI WFP getesteten SOI Materials (Forts.)	32
2.5	Parameter des mit dem SOI WFP getesteten SOI Materials (Forts.)	33
3.1	Eigenschaften typischer Elemente der Halbleitertechnik	42
3.2	Zusammenhang von Dotierung und Spannung für die unter- suchten SOI Materialien: Parameter der Trendlinie	51
3.3	Parameter für SDB, SDB* und PACE'd SDB SOI Material . .	55
3.4	Orthotrope Spannungsverteilung: Vergleich zwischen den be- rechneten Spannungen in Wafer und Maske	57
3.5	Orthotrope Spannungsverteilung: Mittels Finite Elemente Mo- dell berechnete Lagefehler in der Maske	58
3.6	Gemessene und berechnete Verschiebungen in einer $3\mu\text{m}$ di- cken Membran bei Temperaturbelastung	61
3.7	Ergebnis der Materialevaluierung unter Einbeziehung der FE- Resultate	84
A.1	Membranspannung via elektrostatischer Spannungsmessung .	105
A.2	Membranspannung via Resonanzmethode	106
A.3	SOI-Spannung via Krümmungsmessung	106
A.4	Parameter der zusätzlich mittels der Resonanzmethode unter- suchten Membranen	106
B.1	Erläuterung zur Darstellung der Ergebnisse der Lagemessung	107
B.2	Ergebnisse der Lagemessungen an Pace'd SDB Membranen . .	109
B.3	Ergebnisse der Lagemessungen an einer $1,8\mu\text{m}$ dicken Smart- Cut Membran	109

B.4	Ergebnisse der Lagemessungen an einer epitaktisch verstärkten SmartCut Membran, basierend auf $0,1\mu\text{m}$ dickem Ausgangsmaterial	110
B.5	Ergebnisse der Lagemessungen an einer epitaktisch verstärkten SmartCut Membran, basierend auf $0,18\mu\text{m}$ dickem Ausgangsmaterial	110
B.6	Ergebnisse der Lagemessungen an SIMOX Membranen	111
B.7	Ergebnisse der Lagemessungen an lokalen SIMOX Membranen	111
B.8	Ergebnisse der Lagemessungen an Eltran Membranen	112
C.1	Erläuterung zur Darstellung der Ergebnisse des FE-Vergleichs	113
C.2	Ergebnis der FE-Rechnung für Pace'd SDB Membranen	114
C.3	Ergebnis der FE-Rechnung für eine $1,8\mu\text{m}$ dicken SmartCut Membran	114
C.4	Ergebnis der FE-Rechnung für eine epitaktisch verstärkten SmartCut Membran, basierend auf $0,1\mu\text{m}$ dickem Ausgangsmaterial	115
C.5	Ergebnis der FE-Rechnung für eine epitaktisch verstärkten SmartCut Membran, basierend auf $0,18\mu\text{m}$ dickem Ausgangsmaterial	115
C.6	Ergebnis der FE-Rechnung für eine SIMOX Membran	116
C.7	Ergebnis der FE Rechnung für eine lokale Simox Membran	116
C.8	Ergebnis der FE Rechnung für eine Eltran Membran	117

Abbildungsverzeichnis

1.1	Phasen Schieber Maske vom Levenson-Typ	4
1.2	Der ALPHA-Projektor der GME	5
1.3	Mehrfachbelichtung mit Hilfe einer Splitmaske	6
1.4	Mehrfachbelichtung mit Hilfe einer Stepmaske	7
1.5	Maskenkonzepte für Ionen und Elektronen Projektionslithografie	8
1.6	Emissionsvermögen einer bordotierten Siliziummaske	11
2.1	Membranflow, Semi-Waferflow und Waferflow Prozesses	15
2.2	Schematische Abfolge eines pn Prozesses	17
2.3	Schematische Abfolge des SOI Waferflow -prozesses	18
2.4	Strukturätzung in SOI Material	21
2.5	Ätzzellen für 150mm und 200mm Wafer	22
2.6	Membran mit und ohne Hartmaske und Ätzschutz	23
2.7	Schematischer Ablauf des SDB Prozesses	24
2.8	SOI Wafer vor und nach PACE Bearbeitung	25
2.9	Schematischer Ablauf des SIMOX Prozesses	25
2.10	Schematischer Ablauf des SmartCut Prozesses	26
2.11	Schematischer Ablauf des Eltran Prozesses	28
2.12	Schematischer Ablauf des PolySOI Prozesses	29
2.13	Verbesserter SOI Waferflow Prozess	34
2.14	Waferflow Prozesses mit lokaler SOI Schicht	36
2.15	Die weltweit erste 200mm Stencilmaske	37
3.1	Kugelmodell zum Einbau von Fremdatomen	41
3.2	Strahlengang im IR-Messgerät	44
3.3	Interferenzmuster und Interferogramm	45
3.4	Schematische Darstellung des Messplatzes zur elektrostatischen Spannungsmessung	48
3.5	Auftragung der gemessene Membranspannung gegen die eingebrachte Dotierstoffkonzentration	50
3.6	Auftragung Dotierung gegen Spannung: Trendlinien für die untersuchten SOI Materialien	52

3.7	Bevorzugte Zwischengitterplätze im Diamantgitter und mögliche Positionen zum Einbau von Sauerstoffatomen in das Siliziumgitter	52
3.8	Spannungszustand im SOI Wafer vor und nach dem Rückdünnen	53
3.9	Auftragung der gemessene Membranspannung gegen die eingebrachten Dotierstoffkonzentration für SDB und PACE'd SDB Membranen	56
3.10	Auswirkung einer orthotropen Spannungsverteilung in Wafer auf die Lagegenauigkeit der Membran	58
3.11	Gemessene Spannungsvariation in der SOI Schicht	60
3.12	Gemessene Lageänderung durch einen Temperschnitt	61
3.13	Auftragung der gemessenen Membranspannung gegen die eingebrachte Dotierstoffkonzentration für Poly-SOI Membranen	63
3.14	Position der Messkreuze für die Lagemessung auf der Maske und Position der beiden Messfeldern auf der Einzelstruktur . .	65
3.15	Mikroskopbild und REM-Aufnahme eines Messkreuzes mit Anschlussfehler	66
3.16	Einfluss der Kantenform auf das Ergebnis der Lagemessung: Belichtung mit Elektronenstrahlschreiber und Waferstepper . .	67
3.17	Differenz zwischen zwei Lagemessungen an derselben Maske im Abstand von 16 Monaten.	68
3.18	Typisches Verzeichnungsmuster einer Pace'd SDB Membran .	69
3.19	Typisches Verzeichnungsmuster einer 1,8 μ m dicken SmartCut Membran	70
3.20	Typisches Verzeichnungsmuster einer epitaktisch verstärkten SmartCut Membran (0,1 μ m dickes Ausgangsmaterial)	71
3.21	Typisches Verzeichnungsmuster einer epitaktisch verstärkten SmartCut Membran (0,18 μ m dickes Ausgangsmaterial)	72
3.22	Typisches Verzeichnungsmuster einer SIMOX Membran	73
3.23	Typisches Verzeichnungsmuster einer SIMOX Membran mit lokaler SOI Schicht	73
3.24	Typisches Verzeichnungsmuster einer Eltran Membran	74
3.25	Einfluss der Gravitation auf das Verzeichnungsmuster	75
3.26	Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine Pace'd SDB-Membran	76
3.27	Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine 1,8 μ m dicke SmartCut Membran	77
3.28	Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine SmartCut Membran, basierend auf 0,1 μ m dickem Ausgangsmaterial	78
3.29	Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine SmartCut Membran, basierend auf 0,18 μ m dickem Ausgangsmaterial	79

3.30	Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine SIMOX-Membran	80
3.31	Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine SIMOX-Membran mit lokaler SOI Schicht	80
3.32	Darstellung der Abweichungen zwischen FE-Modell und Messergebnis für eine Eltran-Membran	81
3.33	Layout und Dotierstoffverteilung einer Maske mit elf strukturierten, streifenförmigen Membranen und einer Referenzprobe auf dem Wafer	85
3.34	Fertige Maske mit elf strukturierten, streifenförmigen Membranen.	85
3.35	Verzeichnungsmuster der Maske mit streifenförmigen Membranen	86
3.36	Darstellung der Dehnung in den einzelnen Membranen	87
4.1	Stencilmaske mit etwa 25% offener Fläche und Detailansicht einer 175nm Teststruktur	90
4.2	Ausschnitt aus der IPL Testmaske mit Auflösungsstrukturen und Abbildung mit vierfacher Verkleinerung mittels He ⁺ Ionen in einer Lackschicht	90
4.3	Strukturzerlegung nach dem Prinzip der Stepmaske: Ausschnitt aus der IPL Testmaske und Abbildung durch Vierfachbelichtung mit vierfacher Verkleinerung mittels He ⁺ Ionen in einer Lackschicht	90
4.4	Stencilmaske 1,8 μ m dick, etwa 50% offene Fläche	91
4.5	Membranmaske, 180 nm dick, gefertigt nach dem SOI WFP	93
4.6	Dotierstoffprofil von Bor in der 180nm SOI Schicht	93
4.7	Bestimmung der Zusammensetzung der SiGe-Schicht mittels RBS-Analyse	94
4.8	Membranen aus SiGe Material	95
4.9	Verschiedene Varianten zur Herstellung einer selbstabsorbierenden Membranmaske	96
4.10	SOI Waferflow Prozesses zur Herstellung von Membranen mit strukturiertem Absorbern	97
4.11	Membranmaske, 180nm dick, mit strukturiertem Absorber	97
4.12	Schematische Darstellung des Doppelwaferring Prozesses	98
4.13	IR-Bild eines Wafers nach der Bondung	99
4.14	Testwafer nach dem Prinzip des Doppelwaferring Prozesses	100

Abkürzungsverzeichnis

ASE	Advanced Silicon Etching
BOX	Burried Oxide
CARL	Chemical Amplification of Resist Lines
CCD	Charge Coupled Devices
CD	Critical Dimension
COG	Chrome On Glass
CVD	Chemical Vaporize Deposition
Cz	Czochralsky
DRAM	Dynamic Random Access Memory
ECR	Electron Cyclotron Resonance
EPL	Elektron Projection Lithography →SCALPEL, →PREVAIL
ELTRAN	Epitaxial Layer Transfer
EUV	Extreme Ultraviolet
FZ	Flow Zone
ICP	ICP Inductive Coupled Plasma
IPD	In-Plane Deformation
IPL	Ionen Projektionslithografie
LPCVD	Low Pressure Chemical Vaporize Deposition
LWD	Long Working Distance
MFP	Membran Flow Prozess
MFS	Minimum Feature Size
MPU	Micro Processor Unit
NGL	Next Generation Lithography
OPD	Out-Plane Deformation
PACE	Plasma Assisted Chemical Etching
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PREVAIL	Projection Reduction Exposure with Variable Axis Immersion Lenses
PSM	Phase Shift Mask
RBS	Rutherford Backscattering Spectroscopy

SCALPEL	Scattering with angular limitation for projection electron lithography
SACVD	Sub-Atmospheric Chemical Vapor Deposition
SAS	Slowakische Akademie der Wissenschaften
SDB	Surface Direct Bonding
SIMOX	Separation by Implanted Oxygen
SOI	Silicon On Insulator
SOR	Scaling and Orthogonality Removed
STS	Surface Technology Systems
SWFP	Semi Waferflow Prozess
TEOS	Tetraethylorthosilicat
TLI	Thin Layer Imaging
TMAH	Tetra Methyl Ammonium Hydroxid
LPCVD	Low Pressure Chemical Vaporize Deposition
TLI	Thin Layer Imaging
TSI	Top Surface Imaging
WFP	Waferflow Prozess

Literaturverzeichnis

- [1] MCGILLIS, D. A.: *VLSI Technology*, Kapitel Lithography. McGraw-Hill, 1983.
- [2] LIN, B.J. und P. RAI-CHOUDHURY: *Handbook of microlithography, micromachining & microfabrication*, Band 1. SPIE, 1997.
- [3] LIN, B.J. und P. RAI-CHOUDHURY: *Handbook of microlithography, micromachining & microfabrication*, Band 1, Kapitel Introduction, Seiten 3–10. SPIE, 1997.
- [4] TOBEY, A. C.: *Wafer stepper steps up yield and resolution in IC lithography*. Electronics, Seiten 109–112, Aug. 1979.
- [5] LYMAN, J.: *Optical lithography refuses to die*. Electronics, Seiten 36–42, Oct. 1985.
- [6] LEVENSON, M.D., N.S. VISWANATHAN und R.A. SIMPSON. *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-59:1828, 1982.
- [7] FUKUDA, H., A. IMAI und S. OKAZAKI. In: *Proc. SPIE Vol. 1564*, Seite 14, 1990.
- [8] PIERRAT, C., T. SIEGRIST, J. DE MARCO, L. HARRIOTT und S. VAIDYA: *Multiple-layer blank structure for phase-shifting mask fabrication*. J. Vac. Sci. Technol., B14(1):63–68, 1996.
- [9] SPEARS, D. und H.I. SMITH: *High resolution pattern replication using soft x-rays*. Electr. Letters, 8:102, 1972.
- [10] SPILLER, E.: *Early history of x-ray lithography at IBM*. IBM Journ. Res. Devel, 37:287, 1993.
- [11] STENGL, G., R. KAITNA, H. LÖSCHNER, P. WOLF und R. SACHER: *Ion projection system for IC production*. J. Vac. Sci. Technol., 16(6):1883–1885, Nov/Dez 1979.
- [12] SACHER, R., G. STENGL, P. WOLF und R. KAITNA: *Novel Microfabrication Process Without Lithography Using an Ion-Projection System*.

- In: CHERNOW, F., J.A. BORDERS und D.K. BRIDE (Herausgeber): *Ion Implantation in Semiconductors*. Plenum Press, 1976.
- [13] STENGL, G. und [ET AL.]: *Ion Projection Microlithography*. Solid State Technology, Aug. 1982.
- [14] STENGL, G. und [ET AL.]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 16(6):1883, 1979.
- [15] BERNHEIM, M. In: *4th Int. conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology*, Los Angeles, 1970.
- [16] LÖSCHNER, H.: *Persönliche Mitteilung*. 2001.
- [17] BRÜNGER, W.H., M. TORKLER, K.N. LEUNG, Y. LEE, M.D. WILLIAMS, H. LÖSCHNER, G. STENGL und W. FALLMANN: *Resolution Improvement of Ion Projector with a Low Energy Spread*. Microelectronic Engineering, 46:477–480, 1999.
- [18] LEE, Y., M.D. WILLIAMS, W.H. BRUENGER, W. FALLMANN, H. LOESCHNER und G. STENGL: *Multicusp Ion Source for Ion Projection Lithography*. In: *Proc. PArticle Acceleratir Conference*, Seiten 2575–2577, New York, 1999. IEEE.
- [19] CHALUPKA, A., J. FEGERL, R. FISCHERAND G. LAMMERAND H. LÖSCHNER, L. MALEK, R. NOWAK, G. STENGL, C. TRAHER und P. WOLF. In: TAKAGI, T. (Herausgeber): *Proceeding of the 14th Symposium on Ion Sources & Ion Assisted Technology: ISAT'91*, Tokyo, 1991. The Ion Engineering Society Japan.
- [20] CEKAN, E., W. FALLMANN, W. FRIZA, F. PASCHKE, G. STANGL, P. HUDEK, E. BAYER und H. KRAUS. *Microelectronic Engineering*, 1992.
- [21] MOHONDRO, R.: *Ion Projection Lithography: Life After Optical*. In: *Semiconductor Fabtec Edition 3*, Kapitel 6. ICG Publishing, October 1995.
- [22] MEDEA project T611 *Future lithography - Ion Projection Lithography (IPL)*. http://www.medea.org/medeanews/profiles/pp_t611.pdf, 2001.
- [23] STENCIL: *Microsoft® Encarta® Online Encyclopedia 2001*. <http://encarta.msn.com> ©1997-2001 Microsoft Corporation. All rights reserved, 2001.
- [24] PROCESSES, STENCIL: *Encyclopaedia Britannica*. <http://www.britannica.com>, 2001.

- [25] BOHLEN, H., U. BEHRINGER, J. KEYSER, P. NEHMIZ, W. ZAPKA und W. KULCKE: *High throughput submicron lithography with electron beam proximity printing*. Solid State Technology, Seiten 210–217, Sept. 1984.
- [26] KIRSCH, A.: *Herstellung verzerrungsarmer Masken für die X:1-Ionenprojektionslithografie (IPL)*. Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 1988.
- [27] R.JÄHN, W. BERNDT, M. LISEC, F. SCHMIDT und H. TYRROFF: *Ionenprojektionsverfahren - Lithografische Kennwerte und Anwendung*. Nachrichtentechnik, Elektronik Berlin, 34:9, 1984.
- [28] KIRSCH, A., C. KUNATH und B. NOACK: *Ionenprojektionsverfahren - Anwendung*. Mitteilung aus dem VEB ZFTM (Nachfolgebericht zu [27]), Unveröffentlicht.
- [29] POLITYCKI und [ET AL.]: *Maske zur Strukturierung dünner Schichten*. Patent OS 24 16186 H01L-49/2, April 1974.
- [30] JENSEN, J. und C. SLAYMAN: *X-Ray and Ion Beam Techniques for Submicron Lithography III*. SPIE Electron, 471:53, 1984.
- [31] RENSCH, D.B., R.L. SELINGER, G. CSANKY, R.D. OLNEY und H.L. STOVER: *Ion-beam Lithography for IC fabrication with submicrometer features*. J. Vac. Sci. Technol., 16(6):1897–1900, Nov./Dez. 1979.
- [32] SELINGER, R.L.: *Process for making patterns in resist and for making ion absorption masks*. U.S. Patent Nr. 4,101,782.
- [33] ODA, M., S. UCHIYAMA, T. KOMATS und T. MATSUDA: *X-ray mask fabrication technology for 0.1 μ m very large scale integrated circuits*. J. Vac. Sci. Technol. B, 14(6):4366–4370, 1996.
- [34] DEARNALEY, G., J.H. FREEMAN, R.S. NELSON und J. STEPHEN: *Ion Implantation*, Band 8, Kapitel The production and manipulation of ion beams for implantation, Seite 447. North-Holland Publishing Company, 1973.
- [35] KÄSMAIER, R. und H. LÖSCHENER: *Overview of the Ion Projection Lithography European MEDEA and international Program*. In: DOBISZ, ELIZABETH A. (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3997, Emerging Lithographic Technologies IV*, Santa Clara, California, USA, Juli 2000.
- [36] *International Technology Roadmap for Semiconductors 2001 Edition - Lithography*. <http://public.itrs.net/Files/2001ITRS/Litho.pdf>, 2002.

- [37] BRAUN, D., F. KUCHAR, R. KORNTNER, J. BUTSCHKE und F.-M. KAMM: *Spektroskopische Untersuchungen zu den thermischen Eigenschaften von Siliziummasken*. Selbstverlag der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Seite 49, 2001.
- [38] BRAUN, D., R. GAJIC, F. KUCHAR, R. KORNTNER, H. LÖSCHNER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS und R. SPRINGER: *Infrared Absorption of p-Doped Stencil Si Masks for the Ion Projection Lithography*. To be published on 46th EIPBEN, 28-31.5. 2002.
- [39] HUDEK, P., P. HRKUT, M. DRZIK, I. KOSTIC, M. BELOV, J. TORRES, J. WASSON, J.C. WOLFE, A. DEGEN, I.W. RANGELOW, J. VOIGT, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, R. SPRINGER, A. EHRMANN, R.KÄSMAIER, K. KRAGLER, J. MATHUNI, E. HAUGENEDER und H. LÖSCHNER: *Directly Sputtered Stress-Compensated Carbon Protective Layer for Silicon Stencil Masks*. J. Vac. Sci. Technol. B, 17(6):3127–3131, Nov/Dez 1999.
- [40] LETZKUS, F.: *Membran- und Strukturätzprozesse für großflächige Projektionsmasken in der Nanolithografie*. To be published, Universität Stuttgart, 2002.
- [41] LUTZ, J., D. BRAUN und F. KUCHAR: *Spektroskopische Untersuchungen zu den thermischen Eigenschaften von Siliziummasken*. Interner Projektbericht, IMS-Ionen Mikrofarbikationssysteme Wien GmbH, 2000.
- [42] MOREAU, W.M.: *Semiconductor Lithography*. Plenum Press, New York, 1988.
- [43] HALL, T.M., A. WAGNER und L.F. THOMPSON: *Ion beam exposure characteristics of resists*. J. Vac. Sci. Technol., 16(6):1889–1892, NOV./Dez. 1979.
- [44] MAGDO und [ET AL.]: *Methode for making a silicon mask*. U.S. Pat. Nr. 4,256,532, Dez. 1978.
- [45] RANGELOW, I. W., F. SHI, B. VOLLAND, E. SOSSNA, A. PETRASHENKO, P. HUDEK, R. SUNYK, I. KOSTIC, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, R. SPRINGER, A. EHRMANN, G. GROSS, R. KAESMAIER, A. OELMANN, T. STRUCK, G. UNGER, A. CHALUPKA, E. HAUGENEDER, G. LAMMER und H. LÖSCHNER: *PN-junction based Wafer flow Process for Stencil Mask Fabrication*. J. Vac. Sci. Technol. B, 16-6:3592–3598, 1998.
- [46] BOHLEN und [ET AL.]: *Shadow projection mask for ion implantation and ion beam lithography*. U.S. Patent Nr. 4,448,865, Mai 1984.

- [47] Wacker Siltronic. <http://www.wacker-siltronic.com>, Okt. 2001.
- [48] BEHRINGER und [ET AL.]: *Method of making trenches with substantially vertical sidewalls in silicon through reactive ion etching*. U.S. Pat. Nr. 4,589,952, Mai 1986.
- [49] RYSSEL, H., K. MULLER, K. HABERBERG, R. HENKELMANN und F. JAHAEEL: *High Concentration Effects of Ion Implanted Boron in Silicon*. Appl. Phys., 22:35, 1980.
- [50] COHEN, B.G.: *X-ray measurement of elastic strain and lattice constant of diffused silicon*. Solid-State Electronic, 10:33–37.
- [51] MERWE, J.H. VAN DER und C.A.BALL. In: MATTHEWS, J. (Herausgeber): *Epitaxial Grows*, Band B, New York, 1975. Academic.
- [52] METTHEWS, J. und A. BLAKESLEE. *J. Cryst. Growth*, 27:118, 1974.
- [53] MASZARA, W.P. und T. THOMPSON. *J. Appl. Phy.*, 72:4477, 1992.
- [54] HEUBERGER, A., L.-M. BUCHMANN, L. CSEPREGI und K.P. MÜLLER: *Open silicon stencil masks for demagnification ion projection*. Microelectronic Engineering, 6:333–342, 1987.
- [55] LEPSALTER und [ET AL.]. U.S. Pat. 3,713,922.
- [56] BUTSCHKE, J. und [ET AL.]: *Verbesserung des pn-Flow Prozesses*. Unveröffentlicht, 1998.
- [57] WAGGENER, H.A.: *Electrochemically Controlled Thinning of Silicon*. The Bell System Technical Journal, Seiten 473–475, März 1970.
- [58] MAUGER und [ET AL.]: *Method for forming a silicon membrane with controlled stress*. U.S. Patent Nr. 4,966,663, Okt. 1990.
- [59] MAUGER und [ET AL.]: *Silicon membranes with controlled stress*. U.S. Patent Nr. 5,110,373, Mai 1992.
- [60] F.SHI: *Naßchemische Ätzprozesse zur Mikrostrukturierung des Siliziums für die Mikromechanik*. Doktorarbeit, Gesamthochschule Kassel, 1994.
- [61] COLLINS, S.D.: *Etch Stops*. In: S.A.CAMPBELL und H.J.LEWRENZ (Herausgeber): *Semiconductor Micromachining Vol. 2*. John Willey & Sons, 1998.

- [62] BUTSCHKE, J., A. EHRMANN, B. HÖFFLINGER, M. IRMSCHER, R. KÄSMAIER, F. LETZKUS, H. LÖSCHNER, J. MATHUNI, C. REUTER, C. SCHOMBURG und R. SPRINGER: *SOI Wafer Flow Process for Stencil Mask Fabrication*. Micro and Nano Engineering, 46:473–476, 1999.
- [63] LETZKUS, F., J. BUTSCHKE, A. EHRMANN, E. HAUGENEDER, M. IRMSCHER, R. KÄSMAIER, K. KRAGLER, H. LÖSCHNER, J. MATHUNI, I.W. RANGELOW, C. REUTER, F. SHI und R. SPRINGER: *PN and SOI Wafer Flow Process for Stencil Mask Fabrication*. In: BEHRINGER, U. (Herausgeber): *Proc. SPIE Volume 3665*, Band 3665, Seiten 29–29. 15th European Conference on Mask Technology for Integrated Circuits and Microcomponents '98, April 1999.
- [64] NAKAYAMA, Y., Y. SOHDA, N. SAITOU und H. ITOH: *Highly accurate calibration method of electron-beam cell projection lithography*. In: *Proc. SPIE Volume 1924*, Seiten 183–192, 1993.
- [65] COLLINS, S.D.: *Etch Stops*. In: S.A.CHAMPBELL und H.J.LEWERENZ (Herausgeber): *Semiconductor Micromachining Vol. 2*. Wiley, 1998.
- [66] BUTSCHKE, J. und P. KOROKNAY: *Untersuchung zur Eigenspannung von Oxynitrid*. Interner Projektbericht, Juni 1997.
- [67] ELIAN, K., M. IRMSCHER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, C. REUTER und R. SPRINGER: *Comparative Evaluation of E-Beam Sensitive Singlelayer TSI and Bilayer Carl Process for Stencil Mask making*. J. Vac. Sci. Technol. B, 17(6):3122–3126, Nov/Dez 1999.
- [68] OCHSENHIRT, J., J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, B. HÖFFLINGER, M. IRMSCHER, C. REUTER, R. SPRINGER und K. ELIAN: *Optimization of the e-beam sensitive bilayer CARL process for stencil mask making*. In: *Proc. SPIE Vol. 3996*, Band 30, Seiten 80–89, München, Februar 2000. 16th European Conference on Mask Technology for Integrated Circuits and Microcomponents, U. Behringer.
- [69] IRMSCHER, M., J. BUTSCHKE, B. HOEFFLINGER, F. LETZKUS, J. OCHSENHIRT, C. REUTER, R. SPRINGER, K. ELIAN und K. KRAGLER: *Resist technologies for ion projection lithography (IPL)*. In: DOBISZ, ELIZABETH A. (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3997, Emerging Lithographic Technologies IV*, Seiten 362–372, Santa Clara, California, USA, Juli 2000.
- [70] LÄRMER, F. und A. SCHIPL. German Patent DE4241045.
- [71] LETZKUS, F., J. BUTSCHKE, B. HÖFFLINGER, M. IRMSCHER, C. REUTER, A. EHRMANN und J. MATHUNI: *Dry Etch Improvements*

- in the SOI Wafer Flow Process for IPL Stencil Mask Fabrication*. Microelectronic Engineering, 53:609–612, 2000.
- [72] BUTSCHKE, J., B. HÖFFLINGER, F. LETZKUS, H. LÖSCHNER, E. PENTEKER und R. SPRINGER: *Verfahren zur Herstellung großflächiger Membranmasken*. Patentanmeldung DE 199 13 683 A1, 1999.
- [73] *Exhibition Report SOI Wafers / SDB*. <http://www.shinetsu.co.jp/e/soi/bond/bond.html>, April 2001.
- [74] LASKY, J. B.: *Wafer bonding for silicon-on-insulator technologies*. Appl. Phys. Lett. 48, 48:78, 1986.
- [75] MUMOLA, P. und [ET AL.]. In: *IEEE International SOI Conference Proceedings*, Seiten 152–, 1992.
- [76] MUMOLA, P.B., G.J. GARDOPEE, T. FENG, A.M. LEDGER, P.J. CLAPIS und P.E. MILLER. In: *Proceeding of the 2nd International Symposium on Semiconductor Wafer Bonding*, Band 93-29, Seite 401, Hawaii, 1993. The Electrochemical Society.
- [77] NEUNER, J.W., M.D. ROBBINS, D.P. MATHUR und S.K. POULTNEY: *Recent Bonded Wafer thinning Results with a new shaped PACE Electrode*. In: *Proceeding of the 4th International Symposium on Semiconductor Wafer Bonding*, Band 97-36, Seiten 334–338. The Electrochemical Society, 1997.
- [78] AUBERTON-HERVÉ, A.J., B. ASPAR und J.L. PELLOIE: *Low Dose SIMOX for ULSI Applications*. In: *Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices*, Seiten 3–14. NATO Advanced Research Workshop, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [79] GÖSELE, U. und Q.-Y. TONG: *Science and Technology of Semiconductor Wafer Bonding*. Wiley, 1999.
- [80] AUBERTON-HERVE, A.J. und T. BARGE: *SIMOX Tchnology and Application to Wafer Bonding*. In: *Proceeding of the 3rd International Symposium on Semiconductor Wafer Bonding*, Band 95-7, Seiten 12–18. The Electrochemical Society, 1995.
- [81] *It's not your father's Simox any more*. Semiconductor International, Seite 63, Juli 2001.
- [82] *Exhibition Report SOI Wafers / Unibond*. <http://www.shinetsu.co.jp/e/soi/uni/uni.html>, April 2001.
- [83] BRUEL, M. *Electronic Letters*, 31 (14):1201, 1995.

- [84] HENLEY, F.J. und M.I. CURRENT: *A New SOI Manufacturing Technology Using Atomic Layer Cleaving*. Smiconductor Fabtech, 12th Edition:201–206.
- [85] YONEHARA, T., K. SAKAGUCHI und N. SATO: *Epitaxial layer transfer by bond and etch back of porous Si*. Appl.Phys.Lett, 64(16):2108–2110, April 1994.
- [86] SAKAGUCHI, K., K. YANAGITA, H. KURISU, H. SUZUKI, K. OHMI und T. YONEHARA: *Comparison in Bonded SOI Splitting by Solid and Fluid Wedges (Water and Air)*. Jap. Soc. Appl. Phys., SSDM 2000 Extended Abstracts:484–485, 2000.
- [87] SAKAGUCHI, K., K. YANAGITA, H. KURISU, H. SUZUKI, K. OHMI und T. YONEHARA: *ELTRANTM by Splitting Porous Si Layers*. In: *Proc. 195th Int. SOI Symposium*, Seiten 117–121, Seattle, May 1999. Electrochemical Society.
- [88] LANGE, P., M. KIRSTEN, W. RIETHMÜLLER, B. WENK, G. ZWICKER, J.R. MORANTE, F. ERICSON und J.A. SCHWEITZ: *Thick Polycrystalline Silicon for Surface Micromechanical Applications: Deposition, Structuring and Mechanical Characterization*. Technical Digest Transducer, 1995.
- [89] GENNISSEN, P.T.J., P.J. FRENCH, M. BATEK, P.M. SARRO, A.VD BOOGAARD und C. VISSER: *Bipolar compatible epitaxial poly for surface micromachined smart sensors*. In: S.W.PANG und S.-C.CHANG (Herausgeber): *Proc. SPIE: Micromachining and Microfabrication Process Technology II*, Band 2879, Seiten 135–142, October 1996.
- [90] FÜRTSCH, M., M. OFFENBERG, H. MUENZEL und J.R. MORANTE: *Comprehensive study of processing parameters influencing the stress and stress gradient of thick polysilicon layers*. To be published.
- [91] HAUGENEDER, E., A. CHALUPKA, T. LAMMER, H. LÖSCHNER, F.-M. KAMM, T. STRUCK, A. EHRMANN, R. KÄSMAIER, A. WOLTER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS und R. SPRINGER: *IPL-Lithography: Measures to Achieve 20nm Stencil Mask Distortion*. Published on the 18th European Mask Convergence EMC, Januar 2002.
- [92] OCHSENHIRT, J.: *Optimierung der Trockenentwicklung von elektronenstrahlempfindlichen Thin Layer Imaging Prozessen*. Diplomarbeit, Fachhochschule Insy, Oktober 1999.
- [93] WITVROUW, A., B. DU BOIS, P. DE MOOR, A. VERBIST, C.A. VAN HOOF, H. BENDER und C. BAERT: *Comparison between wet HF*

- etching and vapor HF etching for sacrificial oxide removal.* In: J.-M.KARAM und J.YASAITIS (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 4174, Micromachining and Microfabrication Process Technology VI*, Seiten 130–141, Santa Clara, California, USA, August 2000.
- [94] KÄSMAIER, R.: *Ionen-Projektions-Lithographie für die industrielle Herstellung von integrierten Schaltungen mit Strukturgrößen kleiner 100nm.* Doktorarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, Mai 2000.
- [95] KÄSMAIER, R. und H. LÖSCHNER: *Ion Projection Lithography: Progress of European Medea & International Program.* *Microelectronic Engineering*, 53:37–45, 2000.
- [96] PEARSON, G.L. und J. BARDER. *Phys. Rev.*, 75:865, 1949.
- [97] HOLLOWAY, H. und S.L. MCCARTHY: *Determination of the lattice contraction of boron-doped silicon.* *J.Appl. Phys.*, 73(1):103–111, Jan. 1993.
- [98] HERZOG, H.-J., L. CSEPREGI und H. SEIDEL. *J. Electrochem. Soc.*, 113:2969–2974, 1984.
- [99] PAULING, L. und M.L. HUGGINS. *Z. Krist.*, 87:205, 1934.
- [100] PAULING, L.: *The Nature of the chemical Bond.* Cornell University, Ithaca, 1960.
- [101] DEGEN, A., J. VOIGT, E. SOSSNA, F. SHI, I. W. RANGELOW, J. BUTSCHKE, E. HAUGENEDER und H. LÖSCHNER: *Stress engineering of SOI silicon open stencil masks by boron doping concentration.* In: DOBISZ, ELIZABETH A. (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3997, Emerging Lithographic Technologies IV*, Seiten 395–404, Santa Clara, California, USA, Juli 2000.
- [102] WACKER-CHEMITRONIC GMBH, Deutschland: *Silicon Calculator*, 1985.
- [103] *Rutherford - Lexikon der Element.*
http://www.uniterra.de/rutherford/tab_kor.htm, 2001.
- [104] SCHUMICKI, G. und R. SEEGBRECHT: *Prozeßtechnologie.* Springer Verlag, 1991.
- [105] IHT, MIKROELEKTRONIK FRANKFURT/ODER:
SiGeC: Mechanical and structural Properties.
http://www.ihp-ffo.de/SiGeC/02_Mecha.htm, 2001.
- [106] BIORAD: *QS WIN EPI Software Manual*, 1999.

- [107] STONEY, G.G. *Proc. R. Soc. London*, Ser. A 82:172, 1909.
- [108] BÜTTGENBACH, S., W. ENGELHARDT und W. KULKE: *Measurement of Internal Stress in Thin Silicon Membranes*. In: REICHL, H. (Herausgeber): *Micro System Technologies 90*, Seiten 177–182, Berlin, 1990.
- [109] DEGEN, A., M. VOIGT, M. KRATZENBERG, F. SHI, J. BUTSCHKE, H. LÖSCHNER, R. KÄSMAIER, A. EHRMANN und I. W. RANGELOW. In: DOBISZ, ELIZABETH A. (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3997, Emerging Lithographic Technologies IV*, Seite 395, Santa Clara, California, USA, Juli 2000.
- [110] DRZIK, M., J. BUTSCHKE, W. FALLMANN, E. HAUGENEDER und H. LÖSCHNER: *Optical Measurement of Stress in Thin Membranes*. In: *Proceedings of the XVIth IMEKO World Congress*, Vienna, Austria, September 2000.
- [111] DRZIK, M., P. HUDEK, W. FALLMANN, E. HAUGENEDER, J. BUTSCHKE und H. LÖSCHNER: *Development of Optical Techniques for Thin Membrane Stress Measurement*. In: *Proceeding of the 12th Micromechanics Europe Workshop*, September 2001.
- [112] BRONSTEIN, I.N. und K.A. SEMENDJAJEW: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, 23 Auflage, 1987.
- [113] YARWOOD, T. M.: *Accoustics*. McMillan, London, 1953.
- [114] KAMM, F.-M., J. BUTSCHKE und E. HAUGENEDER: *Results of Stress Engineering Experiments with various SOI materials*. Interner Projektbericht, Sept. 2001.
- [115] SHIMURA, F.: *Semiconductor Silicon Crystal Technology*. Academic Press, Inc., 1988.
- [116] GALI, A., J. MIRO, P. DEÁK, C. EWELS und R. JONES: *Theoretical studies on nitrogen-oxygen complexes in silicon*. *J. Phys.: Condens. Matter*, 8:7711–7722, 1996.
- [117] RAZOUK, R.R., L.N. LIE und B.E. DEAL. *J. Electrochem. Soc.*, 128:2214, 1981.
- [118] IIDA, T., T. ITHO, D. NOGUCHI und Y. TAKANO: *Residual lattice stress in thin silicon-on-insulator bonded wafers: Thermal behaviour and formation mechanisms*. *J. Appl. Phys.*, 87(2):675–681, January 2000.

- [119] KAMM, F.-M., A. EHRMANN, H. SCHÄFER, W. PALMER, R. KÄSMAIER, J. BUTSCHKE, R. SPRINGER und E. HAUGENEDER: *Influence of SOI Wafer Stress Properties on Placement Accuracy of Stencil Masks*. Jap. Journal of Applied Physics, 41 No. 6B, 2002.
- [120] HAUGENEDER, E.: *FE-Rechnung zur Stabilität von SOI*. Interner Projektbericht, Juli 2000.
- [121] ELBRECHT, L., R. CATANESCU, J. ZACHEJA und J. BINDER: *Highly phosphorus-doped polysilicon films with low tensile stress for surface micromachining using POCL₃ diffusion doping*. Sensors and Actuators A, 61:374–378, 1997.
- [122] HAUGENEDER, E.: *Abschätzung zur Spannung im CARL-Lacksystem*. Interner Projektbericht, Februar 2000.
- [123] STRUCK, T., A. EHRMANN, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, M. IRMSCHER, R. SPRINGER und E. HAUGENEDER und H. LÖSCHNER: *IPL stencil mask distortion: experimental and theoretical analysis*. In: DOBISZ, ELIZABETH A. (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3997, Emerging Lithographic Technologies IV*, Seite fehlt, Santa Clara, California, USA, 2000 Juli.
- [124] HAUGENEDER, E. und R. KORNTNER: *Stichingfehler an LMS Messmarken*. Interner Projektbericht, 2000.
- [125] LÖSCHNER, H., G. STENGL, A. WOLTER und R. KÄSMAIER: *Performance of Ion Projection Lithography (IPL)*. In: *Proc. SEMI Technology Symposium*, Seiten 8/52–8/59, Dezember 2001.
- [126] HAUGENEDER, E. Persönliche Mitteilung, 2001.
- [127] LÖSCHNER, H., G. STENGL, H. BUSCHBECK, E. PLATZGUMMER, H. VONACH, P. DE JAGER, R. KÄSMAIER, A. EHRMANN, S. HIRSCHER, A. WOLTER, A. DIETZEL, R. BERGER, H. GRIMM, B. TERRISE, W. BRÜNGER, D. ADAM, M. BOEHM, H. EICHHORN, R. SPRINGER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, P. RUCHHOEFT und J. WOLFE: *Large-Field Ion-Optics for Projection and Proximity Printing and for Mask-Less Lithography (ML²)*. In: *Proc. SPIE Vol. 4688, Emerging Lithographic Technologies IV*, Santa Clara, California USA, March 2002.
- [128] JAGER, P.W.H. DE, G. DERKSEN, B. MERTENS, E. CEKAN, G. LAMMER, H. VONACH, H. BUSCHBECK, M. ZEININGER, C. HORNBERGER, H. LÖSCHNER, G. STENGL, A.J. BLEEKER, J. BENSCHOP, F. SHI, B. VOLLAND, P. HUDEK, H. HEERLEIN, I.W. RANGELOW

- und R.KAESMAIER: *Experimental results of the stochastic coulomb interaction in Ion Projection Lithography*. J. Vac. Sci. Technol., B17 (6):3098, 1999.
- [129] WHITE, D.L., J.E. BJOKHOLM, J. BOKOR, R.R. FREEMAN, T.E. JEWELL, W.M. MANSFIELD, A.A. MACDOWELL, L.H. SZETO, D.W. TAYLOR, D.M. TENNANT, W.K. WASKIWICZ, D.L. WINDT und O.R. WOOD: *Soft X-ray Projection Lithography*. Solid State Technology, Seiten 37–42, Juli 1991.
- [130] H. LEVINSON, K.B. NGUYEN: *Extreme Ultraviolet Lithography Reflective Mask*. US Patent 6,159,643, Dez. 2000.
- [131] SOUFLI, R., E.SPILLER, M.A. SCHMIDT, J.C. DAVIDSON, R.F. GRABNER, E.M. GULLIKSON, B.B. KAUFMANN, S. L.BAKER, H. N. CHAPMAN, R.M. HUDYMA, C.C. WALTON, C. MONTCALM und J.A. FOLTA: *Multilayer optics for an extreme ultraviolet lithography tool with 70nm resolution*. In: *Proc. SPIE Vol. 4343, Emerging Lithographic Technologies*, 2001.
- [132] REUTER, C.: *Prozessentwicklung für die Abscheidung und Ätzung der Aluminium-Absorberschicht für die Membranmasken*. Interner Bericht, Stuttgart, Juli 2001.
- [133] BUTSCHKE, J., A. EHRMANN, E. HAUGENEDER, F.-M.KAMM, F. LETZKUS und R. SPRINGER: *Großflächige Membranmasken und Verfahren zu ihrer Herstellung*. Patentanmeldung 101 38 882.9, 2001.
- [134] HEINHOLD und GAEDE: *Ingenieurs-Statistik*. Oldenburg, 1979.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. B. Höfflinger und Herrn Prof. Dr. H. Sandmaier, IMIT, Villingen-Schwenningen, danke ich für die Bereitstellung des Themas und die Bereitschaft, die Betreuung und Bewertung der Arbeit zu übernehmen.

Herrn Dr. R. Springer und Herrn Dr. W. Appel danke ich für die vielen wertvollen Diskussionen und Anregungen, die einen großen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Herrn F. Letzkus danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Entwicklung der Stencilmaskentechnologie.

Herrn Dr. E. Haugeneder, IMS - Nanofabrication GmbH, Wien, danke ich für die Vielzahl an Finite Elemente Rechnungen zur Charakterisierung der SOI Materialien, die unzähligen Telefonate und die wertvollen Diskussionen.

Herrn Dr. H. Löschner, IMS - Nanofabrication GmbH, Wien, danke ich für die wertvollen Informationen zur Geschichte der Ionenlithografie und das Bildmaterial zu den Belichtungsergebnissen.

Herrn Dr. F.-M. Kamm und A. Ehrmann, Infineon Technologies AG, danke ich für die wertvollen Diskussionen und kritischen Anregungen.

Herrn T. Struck und Herrn J. Stöhr, Infineon Technologies AG, danke ich für die zeitaufwendigen Lagemessungen an SOI Wafern und Membranmasken.

Herrn Dr. M. Drzik, Slowakische Akademie der Wissenschaften, danke ich für die Durchführung der Spannungsmessung an den Membranmasken.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Mikroelektronik, Stuttgart danke ich für ihre freundliche Unterstützung

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Katja für ihre Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Publikationsliste

1. RANGELOW, I. W., F. SHI, B. VOLLAND, E. SOSSNA, A. PETRASHEENKO, P. HUDEK, R. SUNYK, I. KOSTIC, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, R. SPRINGER, A. EHRMANN, G. GROSS, R. KAESMAIER, A. OELMANN, T. STRUCK, G. UNGER, A. CHALUPKA, E. HAUGENEDER, G. LAMMER und H. LÖSCHNER: *PN-junction based Wafer flow Process for Stencil Mask Fabrication*. J. Vac. Sci. Technol. B, 16-6:3592–3598, 1998.
2. BUTSCHKE, J., A. EHRMANN, B. HÖFFLINGER, M. IRMSCHER, R. KÄSMAIER, F. LETZKUS, H. LÖSCHNER, J. MATHUNI, C. REUTER, C. SCHOMBURG und R. SPRINGER: *SOI Wafer Flow Process for Stencil Mask Fabrication*. Micro and Nano Engineering, 46:473–476, 1999.
3. LETZKUS, F., J. BUTSCHKE, A. EHRMANN, E. HAUGENEDER, M. IRMSCHER, R. KÄSMAIER, K. KRAGLER, H. LÖSCHNER, J. MATHUNI, I.W. RANGELOW, C. REUTER, F. SHI und R. SPRINGER: *PN and SOI Wafer Flow Process for Stencil Mask Fabrication*. In: BEHRINGER, U. (Herausgeber): *Proc. SPIE Volume 3665*, Band 3665, Seiten 29–29. 15th European Conference on Mask Technology for Integrated Circuits and Microcomponents '98, April 1999.
4. HUDEK, P., P. HRKUT, M. DRZIK, I. KOSTIC, M. BELOV, J. TORRES, J. WASSON, J.C. WOLFE, A. DEGEN, I.W. RANGELOW, J. VOIGT, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, R. SPRINGER, A. EHRMANN, R.KÄSMAIER, K. KRAGLER, J. MATHUNI, E. HAUGENEDER und H. LÖSCHNER: *Directly Sputtered Stress-Compensated Carbon Protective Layer for Silicon Stencil Masks*. J. Vac. Sci. Technolo. B, 17(6):3127–3131, Nov/Dez 1999.
5. ELIAN, K., M. IRMSCHER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, C. REUTER und R. SPRINGER: *Comparative Evaluation of E-Beam Sensitive Singlelayer TSI and Bilayer Carl Process for Stencil Mask making*. J. Vac. Sci. Technolo. B, 17(6):3122–3126, Nov/Dez 1999.
6. EHRMANN, A., T. STRUCK, R. KAESMAIER, E. HAUGENEDER, H. LOESCHNER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, M. IRMSCHER,

- R. SPRINGER und R. ENGELSTAD: *Placement measurement and FE modeling results for distortion control of stencil masks*. In: ABBOUD, F.E. und B.J. GRENON (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3873, 19th Annual Symposium on Photomask Technology*, Seiten 822–830, Dez. 1999.
7. EHRMANN, A., S. HUBER, R. KAESMAIER, A. OELMANN, T. STRUCK, R. SPRINGER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, K. KRAGLER, H. LOESCHNER und I. RANGELOW: *Stencil mask technology for ion beam lithography*. In: GRENON, B.J. und F. E. ABBOUD (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3546, 18th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management*, Seiten 194–205, Dez. 1998.
 8. EHRMANN, A., T. STRUCK, R. KAESMAIER, E. HAUGENEDER, H. LOESCHNER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, M. IRMSCHER, R. SPRINGER und R. ENGELSTAD: *Placement measurement and FE modeling results for distortion control of stencil masks*. In: ABBOUD, F.E. und B.J. GRENON (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3873, 19th Annual Symposium on Photomask Technology*, Seiten 822–830, Dez. 1999.
 9. OCHSENHIRT, J., J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, B. HÖFFLINGER, M. IRMSCHER, C. REUTER, R. SPRINGER und K. ELIAN: *Optimization of the e-beam sensitive bilayer CARL process for stencil mask making*. In: *Proc. SPIE Vol. 3996*, Band 30, Seiten 80–89, München, Februar 2000. 16th European Conference on Mask Technology for Integrated Circuits and Microcomponents, U. Behringer.
 10. ADAM, D., R. BERGER, M. BÖHM, J. BUTSCHKE, W. BRÜNGER, A. DIETZEL, H. GRIMM, F. LETZKUS und R. SPRINGER: *Ion-Projection-Technique for Manufacturing of Patterned, Planar Magnetic Recording Media*. In: *Tagungsband Magnetoelektronik*, Dresden, Juni 2000. VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien.
 11. IRMSCHER, M., J. BUTSCHKE, B. HOEFFLINGER, F. LETZKUS, J. OCHSENHIRT, C. REUTER, R. SPRINGER, K. ELIAN und K. KRAGLER: *Resist technologies for ion projection lithography (IPL)*. In: DOBISZ, ELIZABETH A. (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3997, Emerging Lithographic Technologies IV*, Seiten 362–372, Santa Clara, California, USA, Juli 2000.
 12. DEGEN, A., M. VOIGT, M. KRATZENBERG, F. SHI, J. BUTSCHKE, H. LÖSCHNER, R. KÄSMAIER, A. EHRMANN und I. W. RANGELOW. In: DOBISZ, ELIZABETH A. (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3997, Emerging Lithographic Technologies IV*, Seite 395, Santa Clara, California, USA, Juli 2000.

13. STRUCK, T., A. EHRMANN, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, M. IRMSCHER, R. SPRINGER und E. HAUGENEDER H. LÖSCHNER: *IPL stencil mask distortion: experimental and theoretical analysis*. In: DOBISZ, ELIZABETH A. (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 3997, Emerging Lithographic Technologies IV*, Santa Clara, California, USA, 2000 Juli.
14. DRZIK, M., J. BUTSCHKE, W. FALLMANN, E. HAUGENEDER und H. LÖSCHNER: *Optical Measurement of Stress in Thin Membranes*. In: *Proceedings of the XVth IMEKO World Congress*, Vienna, Austria, September 2000.
15. LETZKUS, F., J. BUTSCHKE, B. HÖFFLINGER, M. IRMSCHER, C. REUTER, A. EHRMANN und J. MATHUNI: *Dry Etch Improvements in the SOI Wafer Flow Process for IPL Stencil Mask Fabrication*. *Microelectronic Engineering*, 53:609–612, 2000.
16. KAMM, F.-M., A. EHRMANN, T. STRUCK, K. KRAGLER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, R. SPRINGER und E. HAUGENEDER: *Progress in placement control for ion beam stencil mask technology*. In: DOBISZ, E.A (Herausgeber): *Proc. SPIE Vol. 4343: Emerging Lithographic Technologies V*, Seiten 460–465, Aug. 2001.
17. BRAUN, D., F. KUCHAR, R. KORNTNER, J. BUTSCHKE und F.-M. KAMM: *Spektroskopische Untersuchungen zu den thermischen Eigenschaften von Siliziummasken*. Selbstverlag der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Seite 49, 2001.
18. DRZIK, M., P. HUDEK, W. FALLMANN, E. HAUGENEDER, J. BUTSCHKE und H. LÖSCHNER: *Development of Optical Techniques for Thin Membrane Stress Measurement*. In: *Proceeding of the 12th Micromechanics Europe Workshop*, September 2001.
19. HAUGENEDER, E., A. CHALUPKA, T. LAMMER, H. LÖSCHNER, F.-M. KAMM, T. STRUCK, A. EHRMANN, R. KÄSMAIER, A. WOLTER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS und R. SPRINGER: *IPL-Lithography: Measures to Achieve 20nm Stencil Mask Distortion*. Published on the 18th European Mask Conference EMC, Januar 2002.
20. CHEKAN, E., G. STENGL, H. LÖSCHNER, R. KAESMAIER, A. WOLTERS, A. EHRMANN, W.-D. DOMKE, S. HIRSCHER, O. KRICH, K. KRAGLER, R. SPRINGER, J. BUTSCHKE und F. LETZKUS: *Performance of Ion Projection Lithography*. Graduierten Kolleg, Universität Bochum, 31. Jan. 2002.
21. LÖSCHNER, H., G. STENGL, H. BUSCHBECK, E. PLATZGUMMER, H. VONACH, P. DE JAGER, R. KÄSMAIER, A. EHRMANN,

- S. HIRSCHER, A. WOLTER, A. DIETZEL, R. BERGER, H. GRIMM, B. TERRISE, W. BRÜNGER, D. ADAM, M. BOEHM, H. EICHHORN, R. SPRINGER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS, P. RUCHHOEFT und J. WOLFE: *Large-Field Ion-Optics for Projection and Proximity Printing and for Mask-Less Lithography (ML2)*. In: *Proc. SPIE Vol. 4688, Emerging Lithographic Technologies IV*, Santa Clara, California USA, March 2002.
22. BRAUN, D., R. GAJIC, F. KUCHAR, R. KORNTNER, H. LÖSCHNER, J. BUTSCHKE, F. LETZKUS und R. SPRINGER: *Infrared Absorption of p-Doped Stencil Si Masks for the Ion Projection Lithography*. To be published on EIPBEN 28-31.5.02, 2002.
23. KAMM, F.-M., A. EHRMANN, H. SCHÄFER, W. PALMER, R. KÄSMAIER, J. BUTSCHKE, R. SPRINGER und E. HAUGENEDER: *Influence of SOI Wafer Stress Properties on Placement Accuracy of Stencil Masks*. Published on MNC 2001, to be printed in Jap. Journal of Applied Physics, 2002.
24. IRMSCHER, M., D. BEYER, J. BUTSCHKE, C. CONSTANTINE, T. HOFFMANN, C. KOEPERNIK, C. KRAUSS, B. LEIBOLD, F. LETZKUS, D. MUELLER, R. SPRINGER und P. VOEHRINGER: *Comparative Evaluation of E-Beam Sensitive Chemically Amplified Resists for Mask Making*. To be published on Photomask Japan, 2002.

Patente

1. BUTSCHKE, J., B. HÖFFLINGER, F. LETZKUS, H. LÖSCHNER, E. PENTEKER und R. SPRINGER: *Verfahren zur Herstellung großflächiger Membranmasken*. Patentanmeldung DE 199 13 683 A1, 1999.
2. BUTSCHKE, J., A. EHRMANN, E. HAUGENEDER, F.-M.KAMM, F. LETZKUS und R. SPRINGER: *Großflächige Membranmasken und Verfahren zu ihrer Herstellung*. Patentanmeldung 101 38 882.9, 2001.
3. BUTSCHKE, J., A. EHRMANN, K. KRAGLER, F. LETZKUS, C. REUTER und R. SPRINGER: *Verfahren zur Herstellung großflächiger Membranmasken mittels Trockenätzen*. Patentanmeldung 101 31 139.7, Juni 2001.
4. BUTSCHKE, J., A. EHRMANN, E. HAUGENEDER, F. LETZKUS und R. SPRINGER: *Verfahren zur Herstellung lagegenauer großflächiger Membranmasken*. Patentanmeldung 101 27 217.0, Juli 2001.