

Aver'janova, T.M., L.I. Mirkin, N.F. Pilipeckij (Moskau):

Die Wirkung eines Lichtstrahls auf die  
Dislokationsstruktur von Kristallen

Bei Einwirkung eines Lichtstrahls eines Quantengenerators (Laser) auf Metall bildet sich an der Oberfläche der Metallwerkstücke ein Krater, wobei in vielen Fällen (z.B. bei kohlenstoffarmem Stahl) der Kraterbereich eine Härte (bis zu 1500 kg/mm<sup>2</sup>) aufweist, die um ein Vielfaches größer ist als die Härte, die man in dieser Materie mit irgendeinem der herkömmlichen mechanischen und thermischen Behandlungsverfahren erzielen kann [1].

Bekanntlich ist eine Vergrößerung der Festigkeitswerte - unter anderem der Härte - mit einer erhöhten Anzahl von Dislokationen und einer Veränderung der Dislokationsverteilung verbunden. Gemäß der schon früher dargelegten Hypothese [2] bilden sich Dislokationen bei Phasenübergängen; das Vorhandensein von Phasenumwandlungen bei Hochtemperaturen oder -drücken kann daher zu einer zusätzlichen Vergrößerung der Dislokationsdichte führen.

V e r s u c h s m a t e r i e u n d V e r s u c h s v e r -  
f a h r e n

Zur Untersuchung der Dislokationsstrukturveränderung bei Einwirkung eines Laserstrahls wurden NaCl-Kristalle hoher Reinheit verwendet, an deren Oberfläche man durch chemische Ätzung mit speziellen Ätzmitteln (z.B. Alkohol mit Kadmiumoxydzusatz) das Austreten von Dislokationen sichtbar machen kann. Es wurde ein Ätzverfahren angewandt [3], das es ermöglichte, auf Mikrophotographien große quadratische Ätzmulden (die sich beim Austreten der beim Wachsen des Kristalls entstandenen Dislokationen bilden und sich bei plastischer Umformung nicht verändern) und kleine quadratische Ätzmulden zu unterscheiden, die bei den Austritten der Dislokationen entstehen und deren Bewegung zur plastischen Umformung führt.

Einzelnen Versuche wurden auch mit Einkristallen hoch-

schmelzenden Tantals durchgeführt.

Die bei der Arbeit angewandten monochromatischen Lichtstrahlen hoher Intensität wurden mit Hilfe eines Quantengenerators gewonnen; die Arbeitsweise analoger Geräte ist z.B. in [4] beschrieben. Die benutzte Anlage wies im Gegensatz zu den früher beschriebenen einige Konstruktionsbesonderheiten auf. Sie bestand aus folgenden Hauptbestandteilen: 1) Kraftquelle (Ladekondensatoren), 2) Erregerquelle (Impulslampe), 3) aktive Substanz (Rubin-Einkristall), die auf bestimmte Weise im Hohlraumresonator angeordnet ist. Der Resonator wurde von zwei ebenen Spiegeln gebildet, die mit hoher Genauigkeit parallel angebracht waren.

Der durch den Gleichrichter aufgeladene Kondensator entlud sich über die Lampe. Nur der Teil der elektromagnetischen Energie aus dem gesamten Emissionsspektrum der Impulslampe, der Strahlung mit der Wellenlänge  $\lambda = 3800 - 6100 \text{ \AA}$  aufweist, bringt den Rubin in einen instabilen Zustand, der sich dann in einem sehr kurzen Zeitintervall lawinenartig durch stimulierte Emission löst. Als Erregerquelle wurde ein Zweiröhrenstrahler mit zwei Impulsquellen (Lampen vom Typ IFP-2000) benutzt. Die Erregerenergie, die von jeder Lampe erzeugt wurde, betrug 2000 Joule.

Abbildung 1 zeigt das Schema des in der Arbeit benutzten Quanten-Lichtgenerators (Laser). Bezeichnungen der Schaltelemente: 1 - Gleichrichter, 2 - Ladewiderstand, 3 - Impuls-Kondensatorenbatterie mit einer Gesamtkapazität von  $2100 \mu\text{F}$ , 4 - Zündgenerator, 5 - Zweiröhrenstrahler, der den Rubinstab und die zwei Erregerlampen vom Typ IFP-2000 einschließt, 6 - blinder Spiegel mit einem Reflexionskoeffizienten von 99%, 7 - Ausgangsspiegel mit einem Reflexionskoeffizienten von 30%, 8 - Werkstück.

Wie aus der schematischen Darstellung zu erkennen ist, befinden sich die Erregerlampen in einem Gehäuse mit zwei Austrittsöffnungen für den Lichtstrahl.

Die von Chromionen im Rubinkristall gespeicherte Energie wird in Form von Licht mit der Wellenlänge  $\lambda = 6943 \text{ \AA}$  ausge-

strahlt (im sichtbaren roten Bereich des Spektrums). Infolge der Kohärenz und Monochromasie der Strahlung wurde eine sehr hohe Spektralstrahlungsdichte erreicht. Vergleichsweise kann darauf hingewiesen werden, daß auf Grund dessen, daß der Laser nur eine Farbe mit einem sehr engen Frequenzintervall ausstrahlt, die Energie des Laserstrahls in dem jeweiligen Frequenzband millionenmal größer als die Energie der Sonnenstrahlung in diesem Intervall ist.

Weiter kann die Strahlung des optischen Quantengenerators mit Hilfe der herkömmlichen optischen Systeme auf einen äußerst kleinen Fleck fokussiert werden. Dies ermöglichte es, eine noch stärkere Konzentration der Strahlungsflußdichte zu erhalten.

Die Bestrahlungsstärke in der Mitte des mit Hilfe des Quanten-Lichtgenerators erhaltenen Beugungsbildes ist

$$E = \frac{\Phi S}{\lambda^2 f^2}$$

wobei  $\Phi$  = der Strahlungsstrom des Quantengenerators ist,  $S$  = Eintrittsfläche des optischen Systems,  $\lambda$  = Strahlungswellenlänge,  $f$  = Brennweite des optischen Systems. Der Wert von  $E$  erreicht - nach dieser Formel - eine riesenhafte Größe, bis zu  $10^{12} - 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>, die die Energiedichte, die man mit anderen Verfahren erzielen kann, um ein Vielfaches übersteigt.

Die Strahlungsenergie des Lichtgenerators wurde durch Kalorimetermessung ermittelt (mit Hilfe eines Thermokalorimeters) und betrug 1,5 - 2 Joule.

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, dringt der aus dem Rubinkristall austretende Strahl durch den Ausgangsspiegel, wird mit Hilfe einer Linse fokussiert und trifft ganz normal auf die Oberfläche des zu untersuchenden Kristalls.

Zur Messung der Intensität des Laserstrahls und der Intensitätsverteilung pro Zeiteinheit wurde ein Oszillographen-Verfahren angewandt. Die Meßschaltung wird in Abbildung 2 dargestellt. Bezeichnung der Schaltelemente: 1 - Laser, 2 - planparallele Glasscheibe, 3 - Werkstück, 4 - Zündgenerator, 5 - Sekundärelektronenvervielfacher FEU-36, 6 - Zweistrahlenszillograph SI-17, 7 - Synchronisierungskanal für die Inbe-

triebsetzung der Abtastung.

Der Strahl, der aus dem Rubinkristall austritt, fällt auf die planparallele Glasscheibe, dann in den Sekundärelektronenvervielfältiger und wird mit Hilfe des Zweistrahlenszillographen aufgezeichnet. Dabei wird an den oberen Szillographenstrahl ein Signal gegeben, während der untere Strahl der mit dem inneren Szillographen-Kalibrator verbundene Bezugsmaßstab ist. Ein charakteristisches Strahlungsoszillogramm der in der Arbeit benutzten Strahlung ist in Arbeit [1] dargestellt.

Es wurde festgestellt, daß man bei der angewandten Laserbetriebsweise (ohne Modulation des Gütefaktors des Resonators) die sog. Vielfachsättigung beobachten konnte. Jeder Beschuß hatte eine Dauer von ungefähr  $500 \times 10^{-6}$  s und bestand aus 60 - 80 Impulsen von je  $2 - 3 \times 10^{-6}$  s, die in Zeitintervallen aufeinanderfolgten. Die Vielfachsättigung der Strahlung im Rubinlaser und das Fehlen einer Amplituden- und Zeitregelmäßigkeit wird durch eine Reihe von Faktoren hervorgerufen, die z.B. in [4] untersucht werden.

#### V e r s u c h s e r g e b n i s s e

Eine mikroskopische Untersuchung von Steinsalzkristallen zeigte, daß nach mehrfacher Wirkung eines Impuls-Laserstrahls an der Kristalloberfläche Risse entstehen, die in Ebenen vom Typ (100), d.h. in den Kubus-Flächen liegen und längs der Ebenen [100], d.h. längs der Kubus-Kanten gerichtet sind. Nach einer Ätzung ließ sich in dem Bereich der Einwirkung des Strahls eine große Anzahl sog. "frischer" Verformungsdislokationen beobachten.

Betrachten wir als typisches Beispiel die Ergebnisse, die bei der Untersuchung einer Kristalloberfläche, die der Wirkung mehrerer Lichtimpulse ohne Veränderung der relativen Lage des Lasers und des Werkstücks ausgesetzt war, erzielt wurden. Die Dislokationsstruktur des Ausgangskristalls ist in Abbildung 3 dargestellt. Auf der Mikrophotographie - 450fach vergrößert - sind Dislokationen in Pyramiden (Quadrat-)form zu sehen. Die großen Ätzungsmulden auf der Mikroaufnahme entsprechen den Dislokationen, die bei der Kristallisierung entstanden

sind. Die kleinen Ätzmulden, die mit plastischer Verformung zusammenhängen, fehlen - wie der Aufnahme zu entnehmen ist - praktisch ganz.

Abbildung 4 zeigt das Panorama des Kristallbereichs von einer Stelle der Strahlungswechselwirkung aus. Die Unter(Längs-)seite des Panoramas ist parallel zur Richtung  $[100]$ . Das Panorama erhielt man mit Hilfe aufeinanderfolgender Mikrophotographien in 70facher Vergrößerung durch Aneinanderlegen der photographierten Bereiche. Vor der Mikroaufnahme wurde der Kristall einer Ätzung zur Sichtbarmachung der Dislokationen unterzogen. Wie auf den Mikroaufnahmen zu sehen ist, entsteht an der Stelle der wiederholten Einwirkung des Laserstrahls ein aus sehr kleinen Kristallen bestehender polykristalliner Bereich (Zone 1). Es folgt eine Zone, die eine große Anzahl von Rissen und Dislokationen aufweist, die ungleichmäßig um die Strahlwirkungsstelle herum verteilt sind. Die Form der Bereiche mit einer unterschiedlichen Anzahl von Dislokationen erinnert dabei an eine Rosette von Eigenspannungen wie sie in polarisiertem Licht nach punktförmiger Formänderung in einem Kristall beobachtet wird. Die folgende Zone (Zone 2) enthält eine große Zahl von Rissen und verstreuten Dislokationen. Die Struktur dieser Zone ist auf Abbildung 5, die ein Feld der Zone 2 in 450facher Vergrößerung wiedergibt, genauer zu erkennen. Charakteristisch für die folgende Zone (Zone 3) ist, daß in ihr sowohl die Zahl der Risse als auch der Dislokationen merklich abnimmt. Aus der Mikroaufnahme eines Feldes dieser Zone in Abbildung 6 wird ersichtlich, daß der Kristall große Risse aufweist, die mit den charakteristischen zugespitzten Enden im Winkel von  $90^\circ$  auslaufen. Es ist schwer, irgendwelche Beurteilungen hinsichtlich der Verformungsdislokationen abzugeben, da - obwohl kaum sichtbar auf der Aufnahme - sich die rauhen Bereiche in der Zone zwischen den Rissen stark von der glatten Struktur der Bereiche zwischen den Dislokationen in der Ausgangsmaterie unterscheidet, so daß die Möglichkeit besteht, daß eine große Anzahl von Verformungsdislokationen, die einzeln nicht erkennbar sind, zu einer rauhen Oberflächenstruktur führt.

Die folgende Zone (Zone 4) weist keine Risse mehr auf; es ist jedoch eine sehr große Anzahl neuer Dislokationen zu erken-

nen. Wie aus Abbildung 7 hervorgeht gelingt es nicht, die Verformungsdislokationen in irgendeine kristallographische Richtung zu bringen.

Zone 4 geht allmählich in Zone 5 über, in der die Dislokationen längs bestimmter kristallographischer Richtungen angeordnet sind, und zwar längs der Richtungen  $[100]$ , d.h. genau jener Richtungen, in denen die Risse angeordnet waren. Je größer die Entfernung zum Krater wird, umso mehr nimmt die Zahl der Verformungsdislokationen ab; aber - wie Abbildung 8 zeigt - selbst am äußersten Ende der Verformungszone wird die Ausrichtung der Dislokationsreihen beibehalten. Der Gesamtdurchmesser der Zone, über die sich die Laserstrahlwirkung ausdehnt, beträgt - wie das Panorama veranschaulicht - ungefähr 7 mm. Dies übertrifft um ein Vielfaches die Größe der Wirkungszone des Lasers in polykristallinen Metallen, wie z.B. in Eisen und Stahl [1].

Betrachten wir einige Besonderheiten der Laserstrahlwirkung auf die Dislokationsstruktur von Kristallen. Vor allem muß hervorgehoben werden, daß sich bei Quasisprödbbruch von Steinsalzkristallen unter punktförmiger Belastung, z.B. bei Spaltung durch einen langsam sich fortbewegenden Keil, ein Riß bildet, der sprunghaft vor dem kontinuierlich sich bewegenden Keil läuft und Dislokationsreihen nur an den Stellen hinterläßt, an denen der Riß zum Stillstand kommt. An der senkrecht zum Keil oder einem anderen Eindringkörper liegenden Oberfläche lassen sich in diesem Fall fast keine Verformungsdislokationen beobachten. Drückt man den Eindringkörper in die Kristalloberfläche ein, so zeigen sich Dislokationsreihen, die längs der Ebenen  $(110)$ , d.h. im Winkel von  $45^\circ$  und längs der Dislokationsrichtungen verlaufen, die im Wirkungsbereich des Laserstrahls beobachtet werden. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die in den Ebenen  $(110)$  verteilten Dislokationen Randstörungen sind.

Wird ein Steinsalzkristall nach Erhitzung im Ofen stark abgekühlt, so entstehen Risse, die an die nach einer Laserstrahlwirkung zu beobachtenden Risse erinnern. Bei Verringerung der Abkühlungsgeschwindigkeit kann anstelle der Riß-

bildung eine große Anzahl unregelmäßig angeordneter Dislokationen beobachtet werden, d.h. ein Bild, das ebenfalls an das nach dem Lichtimpuls entstandene erinnert. Zum Schluß muß noch erwähnt werden, daß die Dislokationsanordnung längs der Kubus-Ebenen (100) in Steinsalz bei Hochtemperatur-Verformung durch einen Eindringkörper beobachtet wurde [5].

Folglich zeigt der Vergleich mit anderen Einwirkungsverfahren auf Kristalle, daß die bei Wechselwirkung eines Laserlichtimpulses und Steinsalz zu beobachtenden Effekte ihre Ursache in einer Wärmeimpulseinwirkung auf Kristall unter Freisetzung von Lichtstrahlenergie haben.

Abschließend danken die Autoren G.I. Barenblatt für die Diskussion der Ergebnisse und R.V. Chochlov dafür, daß er die Durchführung der Versuche mit dem Quantengenerator ermöglichte.

Eingegangen am 10. 9. 1965

- A b b i l d u n g 1. Schema des Quanten-Lichtgenerators (Laser).
- A b b i l d u n g 2. Schema der Anlage zur Messung der Intensität eines Laser-Lichtstrahls und der Intensitätsverteilung pro Zeiteinheit.
- A b b i l d u n g 3. Dislokationsstruktur des Ausgangskristalls, 450fach vergrößert.
- A b b i l d u n g 4. Panorama des Wechselwirkungsbereiches eines Laserstrahls mit einem Steinsalz-Kristall, 70fach vergrößert. Zur Sichtbarmachung des Dislokationsaustritts wurde das Werkstück gestützt. Die Rechtecke entsprechen den Bereichen, für die im folgenden Mikraufnahmen in starker Vergrößerung abgebildet sind.
- A b b i l d u n g 5. Feld von Zone 2 mit intensiver Rissigkeit und einer großen Zahl von Dislokationen. 450fach vergrößert.
- A b b i l d u n g 6. Feld von Zone 3. 450fach vergrößert.
- A b b i l d u n g 7. Feld von Zone 4. 450fach vergrößert.
- A b b i l d u n g 8. Feld von Zone 5. 450fach vergrößert.



L i t e r a t u r

1. A v e r ' j a n o v a , T.M., L.I. Mirkin, N.F. Pilipeckij, A.R. Rustamov: Dejstvie intensivnyh svetovyh pučkov na poverchnost' metalla. PMTF (1965) Nr 6
2. M i r k i n , L.I.: Nasledstvennost' dislokacionnoj struktury pri fazovyh prevrasčeniach. Dokl. AN SSSR (1962) t. 142, Nr 6, str. 1289
3. R o Ź a n s k i j , V.N., E.V. Parvova, V.M. Stepanova, A.A. Predvoditelev: Issledovanie kinetiki izbiratel'nogo travlenija i polirovki kristallov. Kristallografija (1961) t. 6, Nr 5, str. 704
4. L e n d ' e l , B.: Lazery. Izd. "Mir", 1964
5. S t e p a n o v a , V.M., N.A. Tumanova, A.A. Predvoditelev: Osobennosti plastičeskoj deformacii kristallov kamennoj soli pri vysokich temperaturach. Kristallografija (1965) t. 10, str. 219

Stgt., den 17.5.1968

i. A.

M. Wapenmecht

## ДЕЙСТВИЕ СВЕТОВОГО ЛУЧА НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ СТРУКТУРУ КРИСТАЛЛОВ

Т. М. Аверьянова, Л. И. Миркин, Н. Ф. Пилипецкий

(Москва)

При воздействии светового луча квантового генератора (лазера) на металлы на поверхности металлических образцов образуется кратер, причем во многих случаях (например, для малоуглеродистой стали) область вокруг кратера имеет высокую твердость (до  $1500 \text{ кг/мм}^2$ ), в несколько раз превышающую твердость, которую можно получить в этом материале при любом из известных видов механической и термической обработки [1].

Известно, что повышение прочностных характеристик тел, в том числе твердости, связано с увеличением количества и изменением распределения дислокаций. При этом, согласно высказанной ранее гипотезе [2], дислокации наследуются при фазовых переходах, поэтому существование фазовых превращений при высоких температурах или давлениях может привести к дополнительному увеличению плотности дислокаций.

**Материалы и методика эксперимента.** Для исследования изменений дислокационной структуры при действии луча лазера использовались кристаллы NaCl высокой чистоты, на поверхности которых при помощи химического травления в специальных реактивах (например спирте с примесью окиси кадмия) можно выявить выходы дислокаций. Для травления использовалась методика [3], дававшая возможность различить на микрофотографиях крупные квадратные ямки травления (образующиеся у выходов дислокаций, возникших при росте кристалла и не перемещающиеся при пластической деформации) и мелкие квадратные ямки, возникающие у выходов дислокаций, движение которых приводит к пластической деформации.

Отдельные опыты были проведены также на монокристаллах тугоплавкого металла тантала.

Монохроматические лучи света высокой интенсивности, использованные в работе, были получены при помощи квантового генератора, принцип действия аналогичных приборов описан, например в [4]. Применявшаяся установка имела некоторые конструктивные отличия от описанных ранее. Установка состояла из следующих основных частей: 1) источника питания (накопительных конденсаторов), 2) источника возбуждения (импульсной лампы), 3) активного вещества (монокристалла рубина), определенным образом размещенного в объемном резонаторе. Резонатор был образован двумя плоскими зеркалами, установленными параллельно с высокой точностью.

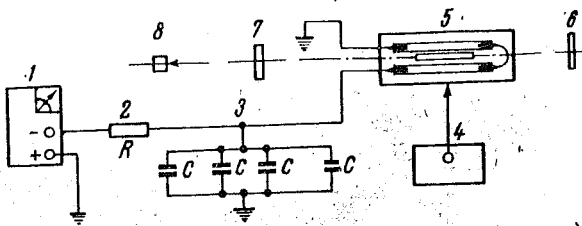
Конденсатор, заряженный от выпрямителя, разряжался через лампу. Из всего спектра излучения импульсной лампы лишь часть электромагнитной энергии, содержащая излучение с длинами волн  $\lambda = 3800 - 6100 \text{ \AA}$ , переводит рубин в неравновесное состояние, которое затем в течение очень короткого промежутка времени лавинообразно разрешается через стимулированное излучение. В качестве источника возбуждения использовался двухламповый излучатель с двумя импульсными источниками (лампами типа ИФП-2000). Энергия возбуждения, которую можно было получить от каждой лампы, составляла 2000 Дж.

На фиг. 1 представлена схема квантового генератора света (лазера), использованного в работе. Обозначения элементов схемы: 1 — выпрямитель, 2 — зарядное сопротивление, 3 — батарея импульсных конденсаторов общей емкостью 2100 мкф, 4 — генератор поджига, 5 — двухламповый излучатель, включающий в себя рубин.

новый стержень и две лампы возбуждения типа ИФП-2000, 6 — глухое зеркало с коэффициентом отражения, равным 99%, 7 — выходное зеркало с коэффициентом отражения, равным 30%, 8 — образец.

Как видно из схемы, лампы возбуждения находятся в кожухе с двумя выходными отверстиями для светового луча.

Энергия, запасенная ионами хрома в кристалле рубина, излучалась в виде света с длиной волны  $\lambda = 6943 \text{ \AA}$  (красная часть видимого спектра). Вследствие того что излучение когерентно и монохроматично, достигалась очень высокая спектральная плотность излучения. Можно указать для сравнения, что из-за того, что лазер дает излучение только одного цвета с очень узким интервалом частот, оказывается, что энергия луча лазера в данной полосе частот в милли-



Фиг. 1. Схема квантового генератора света (лазера)

оны раз больше энергии солнечного излучения в этом интервале.

Далее, излучение оптического квантового генератора может быть сфокусировано при помощи обычных оптических систем на площадки весьма малых размеров. Это позволило получить еще более высокие концентрации поверхностной плотности светового потока.

Облученность в центре пятна дифракционной картины, полученной при помощи квантового генератора света, равна

$$E = \frac{\Phi S}{\lambda^2 f^2}$$

где  $\Phi$  — лучистый поток квантового генератора,  $S$  — входная площадь оптической системы,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $f$  — фокусное расстояние оптической системы. Значение  $E$ , подсчитанное по этой формуле, достигает колоссальных величин — до  $10^{12}$  —  $10^{16} \text{ вт/см}^2$ , на несколько порядков превышающих плотности энергии, которые можно получить другими способами.

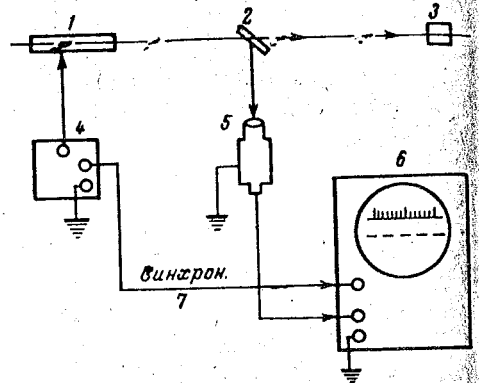
Энергия излучения генератора света измерялась калориметрическим способом (при помощи термометрического калориметра) и составляла 1.5 — 2 дж.

Как видно из фиг. 1, луч, выходящий из кристалла рубина, проходит через выходное зеркало, фокусируется при помощи линзы и падает нормально к поверхности исследуемого кристалла.

Для измерения интенсивности луча лазера и распределения интенсивности во времени применялся осциллографический метод. Схема измерения приведена на фиг. 2. Обозначения элементов схемы: 1 — лазер, 2 — плоскопараллельная стеклянная пластинка, 3 — образец, 4 — генератор поджига, 5 — фотоумножитель ФЭУ-36, 6 — двухлучевой осциллограф С1-17, 7 — канал синхронизации запуска развертки.

Луч, выходящий из кристалла рубина, падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку, затем попадает в фотоумножитель и записывается при помощи двухлучевого осциллографа. При этом сигнал подается на верхний луч осциллографа, а нижний луч является опорным масштабом времени, связанным с внутренним калибратором осциллографа. Характерная осциллограмма излучения, использованного в работе, приведена в работе [1].

Получено, что для использованного режима работы лазера (без модулляции добротности резонатора) наблюдалась так называемая многопучковая генерация. Каждый выстрел имел длительность около  $500 \times 10^{-6} \text{ с}$



Фиг. 2. Схема установки для измерения интенсивности светового луча лазера и распределения интенсивности во времени

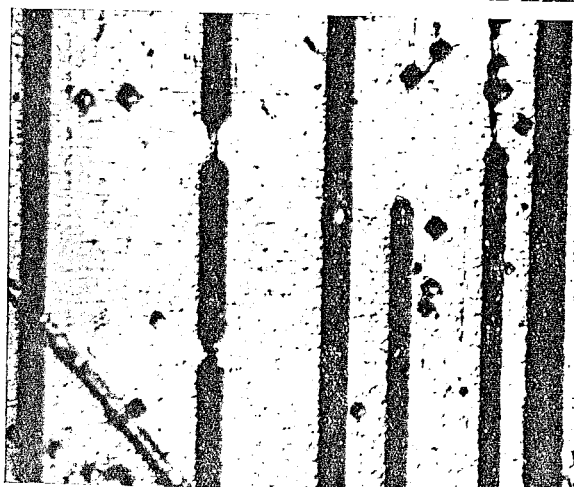
на поверхности исследуемого кристалла.



Фиг. 3



Фиг. 5

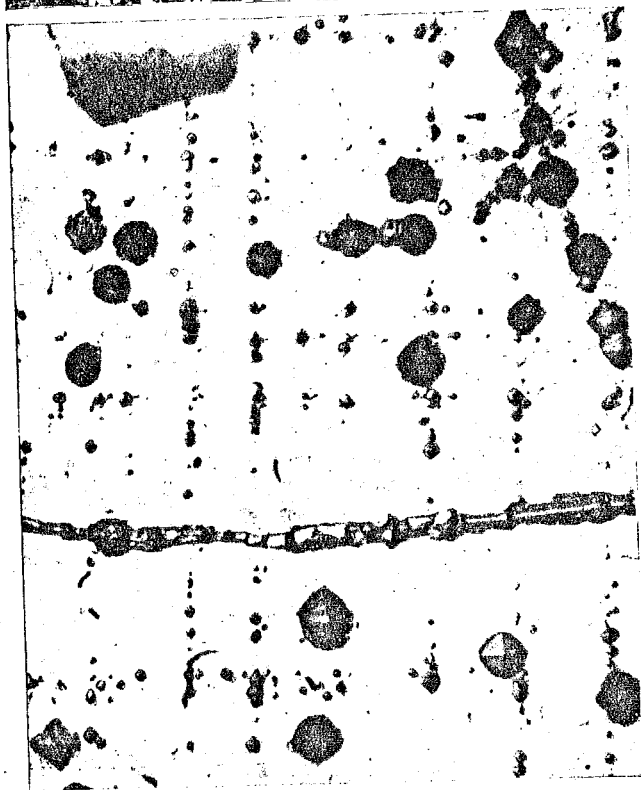
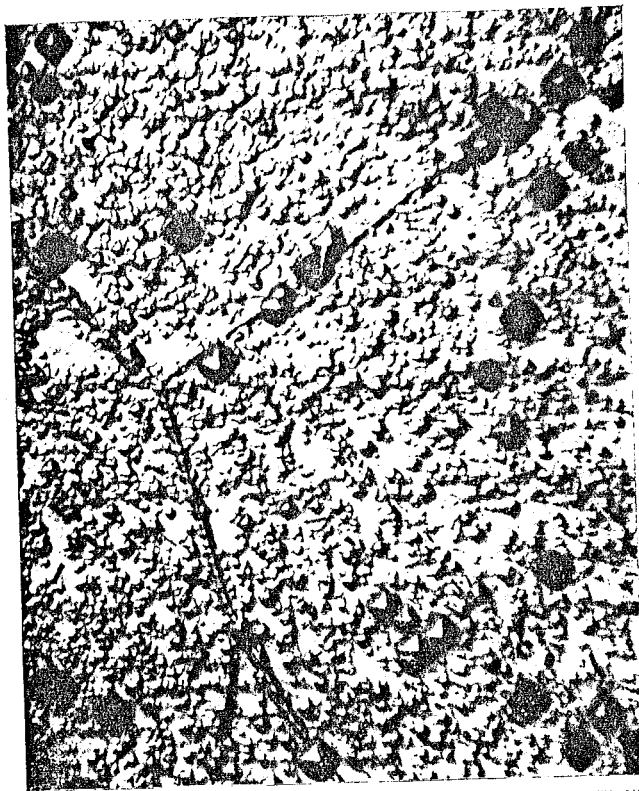


Фиг. 6

Фиг. 3. Дислокационная структура исходного кристалла. Увеличение 450

Фиг. 5. Участок зоны 2 с интенсивной трещиноватостью и большим числом дислокаций. Увеличение 450 X

Фиг. 6. Участок зоны 3. Увеличение 450 X



Фиг. 7. Участок зоны 4. Увеличение 450 ×  
 Фиг. 8. Участок зоны 5. Увеличение 450 ×

в сос  
 деши  
 ном  
 многи  
 Ре  
 сти к  
 вия к  
 щины  
 правл  
 распо  
 так в  
 Ра  
 при  
 сколь  
 вера  
 дена  
 ны ди  
 ямки  
 шикш  
 стичес  
 сутств  
 На  
 места  
 паралл  
 довате  
 тогра  
 поргал  
 графит  
 сталли  
 (вона  
 дисло  
 При э  
 номин  
 ном св  
 (вона  
 дисло  
 торой  
 следу  
 число  
 зоны,  
 щины,  
 но деф  
 так ка  
 област  
 област  
 что бо  
 дельно  
 В с  
 число  
 фиг. 7,  
 стилло  
 Зон  
 жены в  
 вдоль  
 ны. П  
 6 пмт

и состоял из 60—80 импульсов длительностью в  $2-3 \times 10^{-6}$  сек, разделенных промежутками. Многопиковость генерации излучения в рубиновом лазере и отсутствие амплитудно-временной регулярности вызвано многими факторами, рассмотренными, например, в [4].

**Результаты эксперимента.** Микроскопическое исследование поверхности кристаллов каменной соли показало, что после многократного действия импульсного луча лазера на поверхности кристалла возникают трещины, расположенные в плоскостях типа (100), т. е. на гранях куба, и направленные вдоль [100], т. е. вдоль ребер куба. После травления в области, расположенной у места действия луча, наблюдается большое количество так называемых «свежих» дислокаций деформационного происхождения.

Рассмотрим в качестве типичного примера результаты, полученные при исследовании поверхности кристалла, подвергнутой действию нескольких импульсов света без изменения относительного положения лазера и образца. Дислокационная структура исходного кристалла приведена на фиг. 3. На микрофотографии, снятой с увеличением 450 раз, видны дислокации, имеющие пирамидальную (квадратную) форму. Крупные ямки травления на микрофотографии соответствуют дислокациям, возникшим при кристаллизации. Мелкие ямки травления, связанные с пластической деформацией, как видно из микрофотографии, практически отсутствуют.

На фиг. 4 приведена панорама области кристалла с одной из сторон от места взаимодействия с лучом. Нижняя (длинная) сторона панорамы параллельна направлению [100]. Панорама получена путем съемки последовательных микрофотографий при увеличении в 70 раз с наложением фотографируемых областей. Перед микрофотографированием кристалл подвергался травлению для выявления дислокаций. Как видно из микрофотографий, в месте многократного действия луча лазера возникает поликристаллическая область, состоящая из кристаллов очень малых размеров (зона 1). Следующей является зона, содержащая большое число трещин и дислокаций, неравномерно распределенных вокруг места действия луча. При этом форма областей, содержащих различное число дислокаций, напоминает розетку внутренних напряжений, наблюдаемую в поляризованном свете после сосредоточенной деформации в кристалле. Следующая зона (зона 2) содержит большое число трещин и большое число распределенных дислокаций. Более детально структура этой зоны видна из фиг. 5, на которой изображен участок зоны 2 с увеличением 450 раз. Характерным для следующей зоны (зоны 3) является то, что в ней заметно уменьшается как число трещин, так и число дислокаций. Из микрофотографии участка этой зоны, приведенного на фиг. 6, видно, что кристалл содержит крупные трещины, заканчивающиеся характерными остриями с углом  $90^\circ$ . Относительно деформационных дислокаций трудно высказать какие-либо суждения, так как хотя их почти и не видно на снимке, но шероховатая структура областей в зоне между трещинами сильно отличается от гладкой структуры областей между дислокациями в исходном материале, так что возможно, что большое число деформационных дислокаций, не разрешаемых в отдельности, приводит к шероховатой структуре поверхности.

В следующей зоне (зона 4) трещин уже нет, но имеется очень большое число беспорядочно распределенных свежих дислокаций. Как видно из фиг. 7, деформационные дислокации не удается связать с какими-либо кристаллографическими направлениями.

Зона 4 постепенно переходит в зону 5, в которой дислокации расположены вдоль определенных кристаллографических направлений, а именно, вдоль [100], т. е. в тех же направлениях, в которых располагались трещины. По мере удаления от кратера число деформационных дислокаций

уменьшается, но, как видно, из фиг. 8, даже у самого конца деформированной зоны сохраняется ориентация дислокационных рядов. Общий диаметр зоны, на которую распространяется действие луча лазера, составляет, как видно из панорамы, около 7 мм, что в несколько раз больше, чем зона действия луча лазера в поликристаллических металлах, например железе и стали [1].

Рассмотрим некоторые особенности действия луча лазера на дислокационную структуру кристаллов. Прежде всего необходимо отметить, что при квазихрупком разрушении кристаллов каменной соли под действием сосредоточенной нагрузки, например при расколе медленно движущимся клином, образуется одна трещина, движущаяся скачками перед непрерывно перемещающимся клином и оставляющая за собой ряды дислокаций только в местах остановки трещины. На поверхности, перпендикулярной к клину, или другому индентору, в этом случае почти не наблюдается деформационных дислокаций. Если нанести отпечаток индентором на поверхность кристалла, то появляются ряды дислокаций, идущие вдоль плоскостей (110), т. е. под углом  $45^\circ$  и направлениям дислокаций, наблюдаемым в области действия луча лазера. Следует отметить, что дислокации, расположенные в плоскостях (110), являются краевыми дислокациями.

Если подвергнуть кристалл каменной соли резкому охлаждению после нагрева в печи, то возникают трещины, напоминающие трещины, наблюдаемые после действия луча лазера. При уменьшении скорости охлаждения вместо образования трещин можно наблюдать большое количество беспорядочно расположенных дислокаций, т. е. картину, также напоминающую наблюдаемую после светового импульса. Наконец, следует отметить, что расположение дислокаций вдоль плоскостей куба (100) в каменной соли наблюдалось при высокотемпературной деформации индентором [5].

Таким образом, сравнение с другими способами воздействия на кристаллы показывает, что эффекты, наблюдаемые при взаимодействии светового импульса лазера с каменной солью, могут быть объяснены импульсным тепловым воздействием на кристалл при выделении энергии светового луча.

В заключение авторы благодарят Г. И. Баренблатта за обсуждение результатов и Р. В. Хохлова — за предоставление возможности проведения экспериментов на квантовом генераторе.

Поступила 10 IX 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянова Т. М., Миркин Л. И., Пилипецкий Н. Ф., Рутамов А. Р. Действие интенсивных световых пучков на поверхность металлов. ПМТФ, 1965, № 6.
2. Миркин Л. И. Наследственность дислокационной структуры при фазовых превращениях. Докл. АН СССР, 1962, т. 142, № 6, стр. 1289.
3. Рожанский В. Н., Парвова Е. В., Степанова В. М., Предводителев А. А. Исследование кинетики избирательного травления и полировки кристаллов. Кристаллография, 1961, т. 6, № 5, стр. 704.
4. Лендзел Б. Лазеры. Изд. «Мир», 1964.
5. Степанова В. М., Гуманова Н. А., Предводителев А. А. Особенности пластической деформации кристаллов каменной соли при высоких температурах. Кристаллография, 1965, т. 10, стр. 219.