

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 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 $\lambda=3800-6100 \text{ Å}$, 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 руби.

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

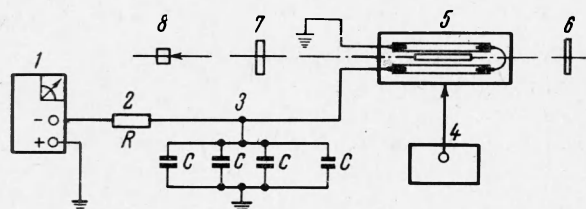
Энергия излучения генератора света измерялась калориметрическим способом (при помощи терморного калориметра) и составляла 1.5 — 2 дж.

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

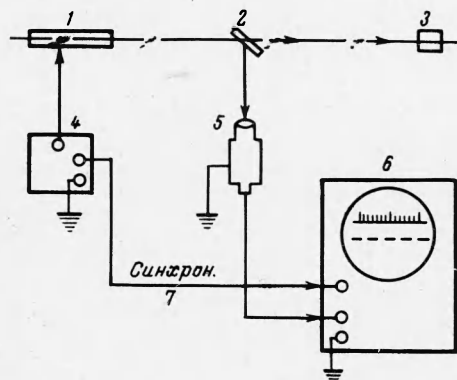
Для измерения интенсивности луча лазера и распределения интенсивности во времени применялся осциллографический метод. Схема измерения приведена на фиг. 2. Обозначения элементов схемы: 1 — лазер, 2 — плоскопараллельная стеклянная пластинка, 3 — образец, 4 — генератор поджига, 5 — фотоумножитель ФЭУ-36, 6 — двухлучевой осциллограф СИ-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 масштабным временем, связанным с внутренним калибратором осциллографа. Характерная осциллограмма излучения, использованного в работе, приведена в работе [1].

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



Фиг. 1. Схема квантового генератора света (лазера)



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

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° . 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° 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].

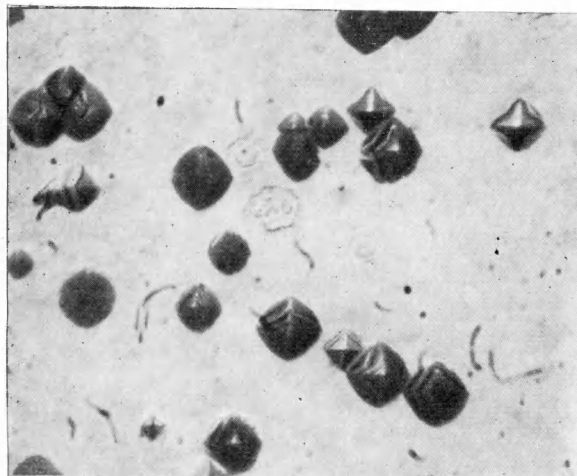
Таким образом, сравнение с другими способами воздействия на кристаллы показывает, что эффекты, наблюдаемые при взаимодействии светового импульса лазера с каменной солью, могут быть объяснены импульсным тепловым воздействием на кристалл при выделении энергии светового луча.

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

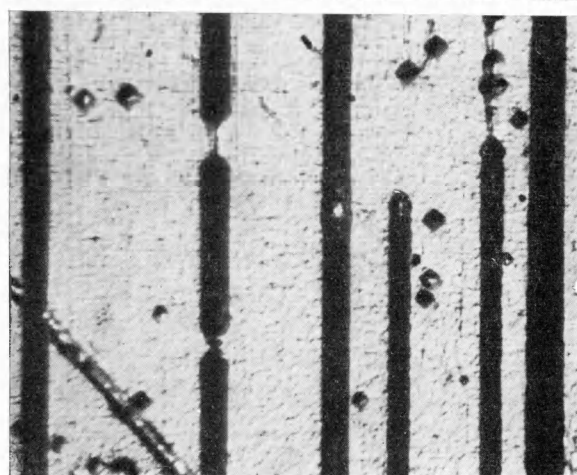
1. Аверьянова Т. М., Миркин Л. И., Пилипецкий Н. Ф., Рустамоу А. Р. Действие интенсивных световых пучков на поверхность металла. ПМТФ, 1965, № 6.
2. Миркин Л. И. Наследственность дислокационной структуры при фазовых превращениях. Докл. АН СССР, 1962, т. 142, № 6, стр. 1289.
3. Рожанский В. Н., Парвова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



Фиг. 3

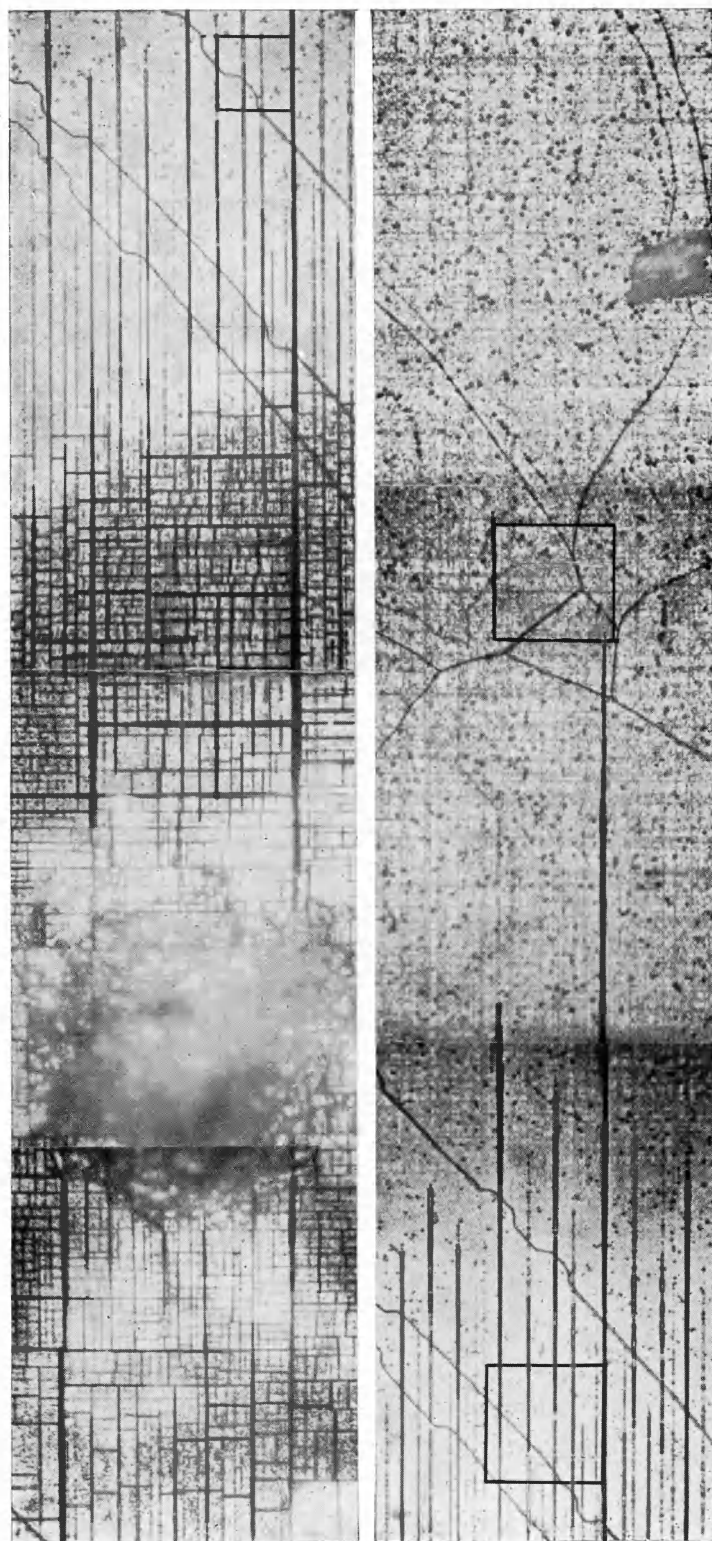


Фиг. 5

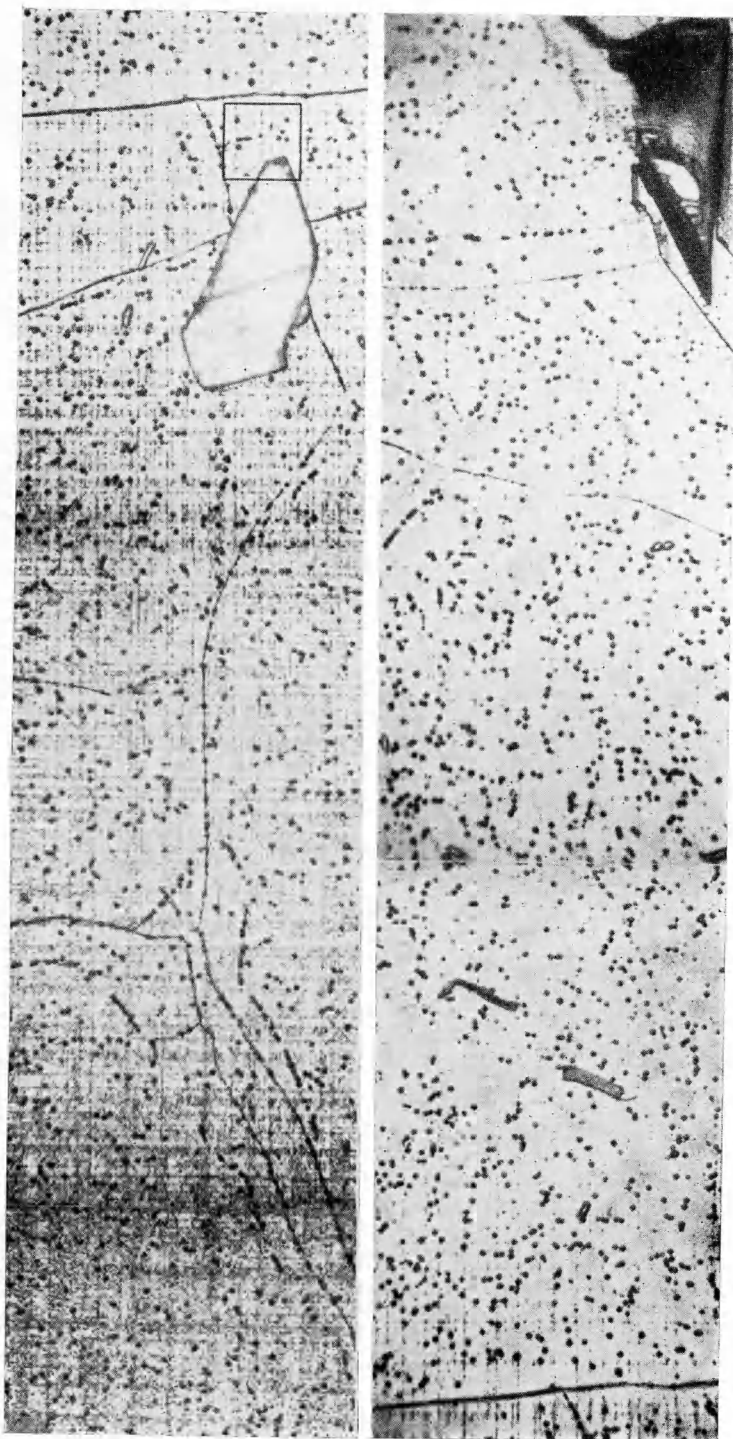


Фиг. 6

Фиг. 3. Дислокационная структура исходного кристалла. Увеличение 450
 Фиг. 5. Участок зоны 2 с интенсивной трещиноватостью и большим числом дислокаций,
 Увеличение 450 ×
 Фиг. 6. Участок зоны 3. Увеличение 450 ×

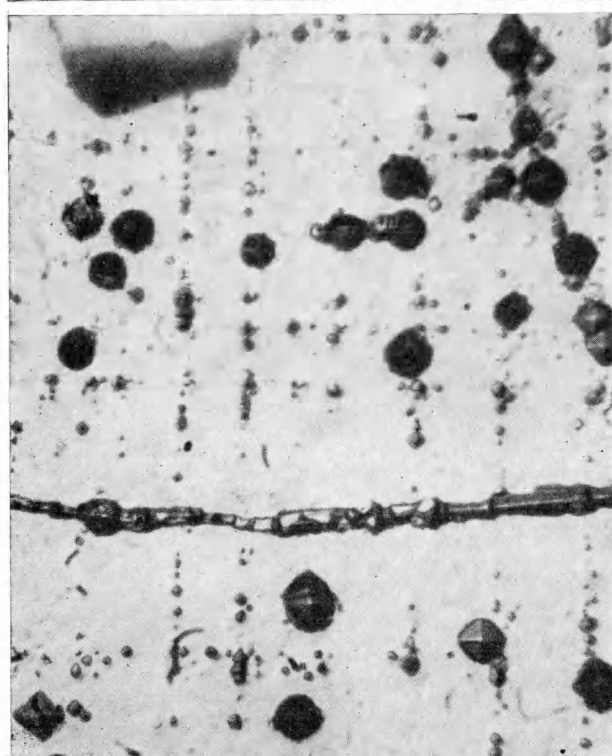
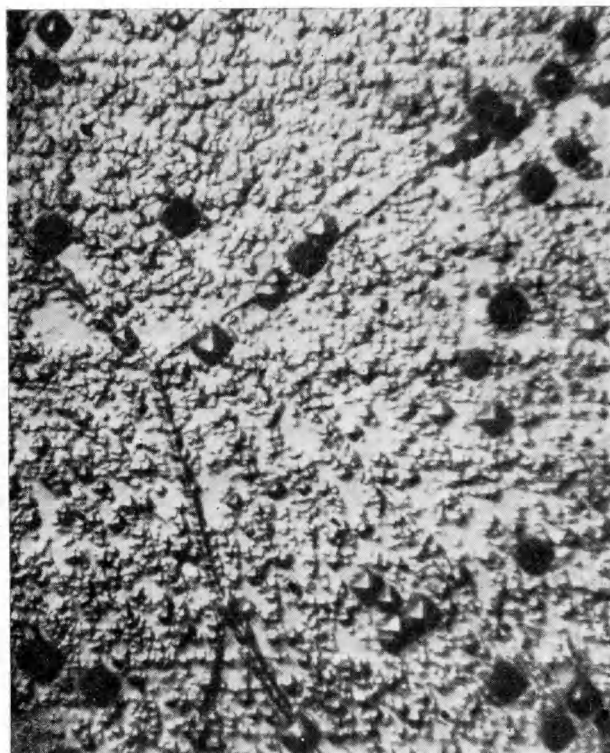


Фиг. 4. Панорама области у места взаимодействия светового луча лазера с кристаллом ций. Прямоугольники соответствуют областям, для которых ниже приведены микро-
ПМТФ, № 1



Фиг. 4

каменной соли, увеличение 70. Образец протравлен для выявления выходов дислока-
фотографии с большим увеличением



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