

Надточий В.А., Уколов А.И., Нечволод Н.К., Баранюкова И.С.

<sup>1</sup> доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики, ГВУЗ «ДГПУ»

<sup>2</sup> кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры высшей математики и физики, Керченский государственный морской технологический университет

<sup>3</sup> доктор физико-математических наук, советник ректора, ГВУЗ «ДГПУ»

<sup>4</sup> студентка 5 курса физико-математического факультета, ГВУЗ «ДГПУ»

e-mail: fiziksgpu@ya.ru

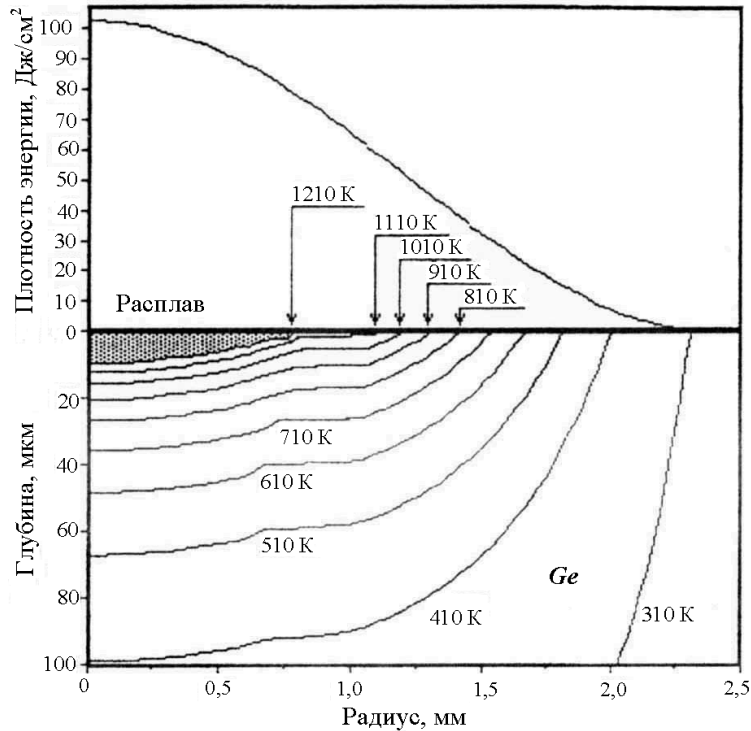
## ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Выполнены структурные исследования на поверхности германия ( $Ge$ ) в области действия импульса лазерного излучения в режиме свободной генерации ( $\lambda = 0,694$  мкм) длительностью  $\tau = 1$  мс и энергией в импульсе  $W = 6$  Дж. Снимки выполнены на расстоянии от центра лазерного пятна, где температура не превышала  $150^\circ\text{C}$ . Обнаружены упорядоченные линейные дефекты типа дислокаций, ориентированных в радиальном направлении от центра облучения. Показано также, что после импульсного облучения  $Ge$  при температуре  $77\text{ K}$  линейные дефекты образуются из коротких петель дислокаций размерами  $3\text{--}4$  мкм.

**Ключевые слова:** лазер, дефекты, импульсное облучение, германий, структура.

### Введение

Возможность получения при лазерном воздействии высоких скоростей нагрева и градиентов температур на поверхности, а также селективность и локальность воздействия позволяют направленно менять (модифицировать) те или иные физико-химические характеристики поверхностного слоя полупроводников и диэлектриков. Хорошо известны такие приложения лазерной модификации поверхности, как лазерный отжиг, лазерное легирование, лазерная аморфизация и перекристаллизация и т.д. [1–3]. С другой стороны, действие мощного лазерного излучения на поверхность может привести к генерации в поверхностном слое значительной концентрации дефектов, что в ряде случаев является нежелательным при проведении вышеуказанных технологических операций. Поэтому диагностика поверхностных изменений и поиск возможности управления процессом дефектообразования при воздействии мощного лазерного излучения на поверхность представляют значительный интерес для прикладных задач лазерной микротехнологии.

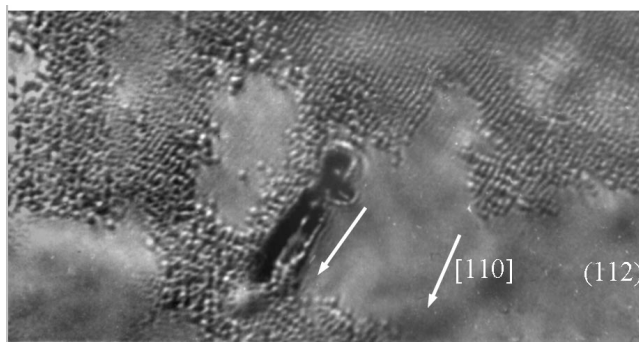


**Рис. 1:** Распределение плотности оптической энергии на поверхности кристалла германия и изотермы в кристалле через 0,33 мс после начала действия импульса свободной генерации ( $\lambda = 0,694$  мкм, энергия в импульсе  $W = 6$  Дж, длительность импульса  $\tau_p = 1$  мс)

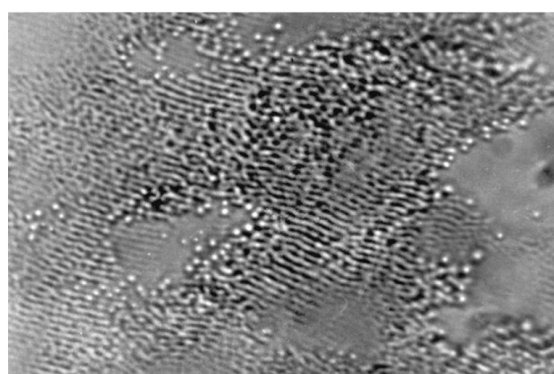
## Основная часть

При воздействии на поверхность (112) *Ge* лазерного импульса с энергией  $W = 6$  Дж, что соответствует распределению плотности оптической энергии, показанной на рис. 1, в непосредственной близости к расплаву возникают трещины и происходит слабое оплавление на дислокациях. По мере удаления от центра наблюдаются дислокационные структуры без оплавления (рис. 2; 3). Структура на рис. 2 снята на расстоянии 1,6 мм от центра лазерного пятна. Наблюдается ориентация линий травления в радиальном направлении от его центра, видна также капля расплава, выброшенная из зоны оплавления. Снимки на рис. 3, *a*, *b* сделаны на расстоянии 2 мм от центра пятна, где согласно расчетам температура не превышала  $150^\circ\text{C}$ . Дислокационная природа фигур травления подтверждается тем, что в местах выхода на свободную поверхность вытравливаются ямки. Характерным для дислокационных конфигураций является увеличение их периодичности по мере удаления от центра пятна, а ориентация не всегда связана с кристаллографией.

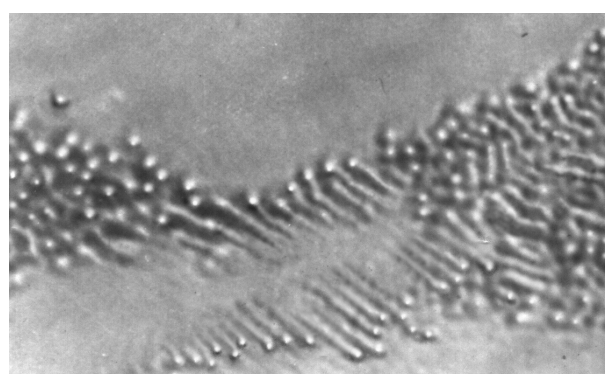
В зоне трещинообразования преобладают дислокационные сплетения, а в периферийных областях на протяженных участках поверхности выявляются



**Рис. 2:** Образование упорядоченных линейных дефектов (дислокаций), ориентированных в радиальном направлении от центра лазерного пятна. Указано направление выброса капли из лунки расплава *Ge*,  $\times 1000$

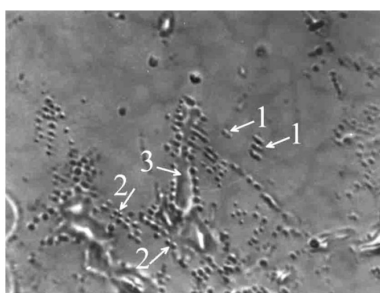


а)



б)

**Рис. 3:** Дислокационная структура *Ge* после лазерного облучения при температуре 300 К. Расстояние от центра пятна 2 мм; снимок (а) соответствует увеличению  $\times 1000$ , (б) —  $\times 2000$



**Рис. 4:** Начальный процесс формирования линейных дефектов из отдельных полупетель. Температура облучения *Ge* 77 К.  $\times 1000$

периодические структуры с периодом 0,9 мкм. Кратковременное химическое травление показало, что все наблюдаемые дислокационные структуры находятся в тонком приповерхностном слое. Глубина залегания дислокаций составляет 10 мкм в зоне трещинообразования и уменьшается до долей микрона на периферийных участках облучения. Вследствие близости поверхности, действия сил зеркального изображения и наличия большой концентрации

вакансий, способствующих переползанию, отдельные участки дислокаций со временем выходят из кристалла, что обнаруживается по появлению дополнительных ямок травления вдоль дислокаций через несколько суток хранения образцов.

Важным является установление последовательности структурных изменений от начала воздействия лазерного луча. Оплавление поверхности раньше всего начинается на дислокациях, что совпадает с выводами работы [4] при лазерном облучении кристаллов  $Si$ . Это означает, что дислокации зарождаются, в основном, во время действия импульса, а не в процессе релаксации остаточных напряжений после его окончания. Кроме того, дислокационные линии всегда имеют продолжение на поверхности при пересечении трещин, что вполне объяснимо, если считать, что зарождение дислокаций предшествует трещинообразованию. Таким образом, зарождение дислокаций при одновременном действии светового излучения и термоупругих напряжений происходит, по-видимому, в начальный период действия импульса.

Облучение кристаллов при 77 К также способствует зарождению дислокаций (рис. 4). На снимке видны отдельные полупетли (1) и дислокации (2), расположенные в периодических структурах. Диффузионно-контролируемое расширение таких петель вдоль ориентированных направлений вызывает их объединение за счет аннигиляции краевых компонент противоположного знака и при повышенной температуре облучаемой поверхности приводит к формированию протяженных дислокаций периодической структуры (рис. 2; 3). На рис. 4 отмечен оплавленный участок 3, вдоль берегов которого видны ямки травления в местах выхода дислокаций на поверхность. Снимок подтверждает тот факт, что коэффициент поглощения лазерного излучения в области дислокаций выше [5].

## **Выводы**

Впервые показано, что при лазерном облучении поверхности кристалла линии дислокаций упорядоченной структуры образуются из коротких призматических петель межузельного типа, выходящих на поверхность. Увеличение дислокационной петли со временем осуществляется за счет достраивания ее атомной плотности новыми атомами при создании их локального пересыщения.

## **Литература**

1. Качурин Г.А., Нудаев Е.В., Данюшжина Н.В. Отжиг дефектов наносекундными лазерными импульсами после внедрения малых доз ионов // ФТП. — 1980. — Т. 14, № 4. — С. 656–660.

2. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нудаев Е.В., Смирнов Л.С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. — М.: Наука. — 1982. — 280 с.
3. Eds Poate J.M., Mayet J.W. Laser annealing of semiconductors // N.Y.: Acad. Press. — 1982. — 564 p.
4. Баннишев А.Ф., Новикова Л.В. Образование обратимых и необратимых структурных дефектов на поверхности кремния под действием лазерного импульса // Физ. и хим. обраб. материалов. — 1992. — № 4. — С. 55–59.
5. Lipson H.G., Burstein E., Smith P.L. Optical effects in plastically deformed germanium // Phys. Rev. — 1955. — V.98, №5. — P. 1535–1538.

---

**Nadtochiy Viktor A., Ukolov Aleksey I., Nechvolod Nikolay K., Baranyukova Irina S.**

Donbas State Teachers' Training University, Slovijans'k, Ukraine.

**Defect formation in germanium single crystals under pulsed laser action**

Structural studies on the surface of germanium (*Ge*) in the field of the action of a laser radiation in the mode of free generation ( $\lambda = 0,694 \mu m$ ) with a duration of  $\tau = 1$  ms and an energy in the pulse  $W = 6$  J were performed. Pictures at a distance from the center of the laser spot where the temperature did not exceed  $150^\circ C$  were taken. Linear defects of the dislocation type oriented in the radial direction from the center of irradiation were identified. It was revealed that after pulse radiation of *Ge* at 77 K, linear defects were formed from short dislocation loops of 3–4  $\mu m$  in size.

**Keywords:** *laser, defects, pulse, radiation, germanium, structure.*

---