

- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. С. 733.
- [9] Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. С. 704.

Поступило в Редакцию
6 июня 1988 г.
В окончательной редакции
10 февраля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 10 26 мая 1989 г.

02; 11

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕКОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.И. Плотников, С.И. Рембеза,
В.А. Логинов

В последние годы интенсивно разрабатываются вопросы, связанные с формированием периодических структур на поверхности твердых тел под действием лазерного излучения (см., например, [1-8]). Несмотря на большое количество публикаций, посвященных данной проблеме, не существует единого мнения о механизме образования периодического рельефа поверхности материалов. В этой связи представляет интерес исследование действия на твердые тела излучения, отличной от лазерного природы. В настоящей работе впервые обнаружено формирование поверхностных периодических структур (ППС) под действием некогерентного излучения.

В качестве объектов исследования использовались пластины монокристаллического кремния п-типа проводимости ($\rho = 6.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) ориентации (111) толщиной 500 мкм. Образцы подвергались воздействию моноимпульсов излучения ксеноновых ламп (спектр длин волн $\lambda = 0.2-1.3 \text{ мкм}$) в секундном диапазоне длительностей. Пластины кремния располагались относительно импульсных ламп таким образом, что облучению подвергалась лишь одна поверхность образцов.

В результате воздействия импульса некогерентного излучения обнаружено формирование на поверхности кремния периодических структур (см. рисунок, а). Расстояние между гребнями ППС изменяется в пределах 5-25 мкм. Существенным является тот факт, что вектор ППС имеет переменный характер. Наблюдаются участки поверхности образцов, на которых ППС распространяются радиально (см. рисунок, б). Следует подчеркнуть, что генерация ППС наблюдается и на обратной, не подвергнутой облучению, поверхности образцов.



Периодические структуры, сформированные на поверхности кремния под действием импульсного некогерентного излучения.

Наиболее часто для объяснения образования ППС на поверхности конденсированных сред привлекаются механизмы, основанные на интерференции падающей и рассеянной поверхностью волн [2, 3], генерации поверхностных акустических [4, 5] и капиллярных [6, 7] волн, пространственно-неоднородном испарении материала [8]. Данные механизмы формирования ППС базируются на учете специфических свойств лазерного излучения и объясняют генерацию ППС с периодами $l \leq \lambda$ (λ — длина волны лазерного излучения). Приведенные результаты показывают, что имеются существенные особенности в процессе формирования ППС в условиях импульсного нагрева мишеней некогерентным излучением по сравнению с лазерной генерацией ППС. Если под действием лазерного излучения формируются ППС, имеющие субмикронные и микронные периоды, то в наших экспериментах период ППС достигал нескольких десятков микрометров, что более, чем на порядок величины превышает длинноволновую границу спектра излучения ксеноновых импульсных ламп. Данное обстоятельство не позволяет использовать разработанные ранее механизмы [2–8] для объяснения формирования ППС под действием некогерентного излучения.

Наиболее важным для понимания природы ППС, наблюдаемых в условиях нашего эксперимента, является факт генерации ППС на

обратной, не подвергнутой облучению, поверхности образцов. Данный результат свидетельствует о несущественной роли природы излучения, поскольку плавление противоположной поверхности мишени осуществляется за счет теплопроводности. В этой связи естественно связать образование ППС с особенностями процесса кристаллизации кремния после прекращения действия импульса излучения.

Как известно [9], примеси, присутствующие в материале, могут вызвать неустойчивости плоского фронта кристаллизации, которые развиваются вследствие концентрационного переохлаждения. Концентрационное переохлаждение при кристаллизации из расплава обусловлено накоплением примеси перед фронтом кристаллизации. Периодический рельеф поверхности, аналогичный представленному на рисунке, а, наблюдается при декантации расплава [9]. Таким образом, ППС представляют собой фактически квазидвумерный вариант ячеистой структуры, которая характерна для массивных кристаллов, выращенных направленным затвердеванием расплава. Для оценки периода ППС (l) воспользуемся формулой для расстояний между ячейками, приведенной в работе [9]:

$$l = \left(\frac{2 \Delta C_{Lmax} m_L D_L}{G V} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где ΔC_{Lmax} — максимальная разность концентраций в жидкости; m_L — наклон линии ликвидуса на фазовой диаграмме; D_L — коэффициент диффузии растворенного компонента в жидкости; G — температурный градиент в жидкой фазе у поверхности раздела жидкой и твердой фаз; V — скорость роста твердой фазы. Температурный градиент определим из критерия концентрационного переохлаждения [9]:

$$G_{крит} \geq m_L C_0 \frac{V}{D_L} \cdot \frac{1-k}{k}, \quad (2)$$

где C_0 — концентрация растворенного компонента, k — коэффициент распределения.

При градиентах температуры, больших $G_{крит}$, переохлаждения не возникает и ячеистые структуры в этом случае не наблюдаются.

При типичных значениях параметров, входящих в формулы (1) и (2) ($m_L = 5$ К/ат.%, $V = 0.1$ см/с, $C_0 = 10^{-3}$ ат.%, $D_L = 5 \cdot 10^{-5}$ см²/с, $k = 0.1$, $\Delta C_{Lmax} \cdot m_L = 10^{-3}$ К), получим $l = 10$ мкм, что хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемыми значениями периода ППС (5–25 мкм). Направление движения границы расплав–твердая фаза определяется условиями теплоотвода; этим обстоятельством объясняется переменный характер вектора ППС и образование радиально направленных структур (см. рисунок, б).

По-видимому, предложенный механизм может иметь место и при генерации ППС под действием лазерного излучения. В этом случае температурные градиенты и скорости роста значительно выше по сравнению с условиями импульсного нагрева материалов некогерентным излучением с относительно малой концентрацией энергии, что

приводит к уменьшению периода ППС (см. формулу (1)). Действительно, типичные значения периода ППС, генерируемых лазерным излучением, составляют 1–5 мкм [10]. С повышением энергии и уменьшением длительности лазерного импульса возрастают температурные градиенты, что также должно приводить к уменьшению периода ППС. Такое соотношение между мощностью лазерного излучения и периодом ППС наблюдали авторы работ [10, 11].

Исходя из предложенного механизма формирования ППС следует, что данный тип поверхностного рельефа может формироваться независимо от способа подвода энергии к образцу. Необходимым условием для образования ППС является импульсный характер воздействия, обеспечивающий большие температурные градиенты и скорости роста твердой фазы, а также наличие в материале примесей.

В заключение авторы выражают благодарность Б.М. Даринскому за полезные обсуждения работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Авруцкий И.А., Базакуца П.В., Прохоров А.М., Сычугов В.А. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 10. С. 621–627.
- [2] Баженов В.В., Бонч-Бруевич А.М., Либенсон М.Н., Макин В.С., Пудков С.Д., Трубаев В.В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 15. С. 932–937.
- [3] Fauchet P.M., Siegman A.E. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. N 9. P. 824–826.
- [4] Емельянов В.И., Семигонов В.Н. // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. В. 3. С. 1026–1038.
- [5] Ахманов С.А., Емельянов В.И., Коротеев Н.И., Семигонов В.Н. // Успехи физ. наук. 1985. Т. 147. В. 4. С. 675–745.
- [6] Емельянов В.И., Семигонов В.Н. // Поверхность: Физика, химия, механика. 1985. № 11. С. 145–149.
- [7] Young Jeff F., Sipe J.E., Van Driel H.M. // Phys. Rev. B; Condens. Mater. 1984. V. 30. N 4. P. 2001–2015.
- [8] Конов В.И., Прохоров А.М., Сычугов В.А., Токарев В.Н. // Поверхность: Физика, химия, механика. 1985. № 1. С. 128–137.
- [9] Флемингс М. Процессы затвердевания. М.: Мир, 1977. 423 с.
- [10] Демчук А.В., Пристрем А.М., Данилович Н.И., Лабунов В.А. // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 4. С. 810–813.
- [11] Jost D., Lüthy W., Weber H.P.,

Воронежский политехнический
институт

Поступило в Редакцию
30 января 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 10

26 мая 1989 г.

06; 09

НАБЛЮДЕНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-СПИНОВЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-СПИНОВО-УПРУГИХ ВОЛН В ПЛЕНКАХ ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА (ЖИГ)

П.Е. Зильберман, Б.Т. Семенов,
В.В. Тихонов, А.В. Толкачев

В монокристаллах ЖИГ хорошо распространяются три типа волн: электромагнитные (ЭМВ), спиновые (СВ) и акустические волны (АВ). Все типы волн связаны между собой либо за счет магнитодипольных полей, либо за счет магнитострикции. Однако в безграничном кристалле эффекты преобразования волн и их гибридизации,¹ как правило, проявляются очень слабо из-за большого различия скоростей. Исключение составляют лишь СВ и АВ, фазовые скорости которых сравниваются при очень малых длинах волн $\lambda \lesssim 1$ мкм. При таких λ в ЖИГ возбуждаются гибридные магнитоупругие волны (МУВ), фазовые скорости которых порядка скорости звука [1]. К сожалению, пока не существует хорошо отработанных методов возбуждения и приема столь коротких СВ, хотя такие методы и развиваются [2, 3]. При переходе от массивных образцов к тонким пластинам и эпитаксиальным пленкам ЖИГ был обнаружен другой тип магнитоупругих волн, фазовые скорости которых на 2-3 порядка превышали скорость звука („быстрые“ МУВ) [4]. Возбуждение быстрых МУВ наблюдалось в узких полосах частот, менее 0.5 МГц, где выполнялось условие синхронизма длинноволновых, с $\lambda \sim 10-1000$ мкм, магнитодипольных типов СВ (в литературе их чаще называют магнитостатическими волнами (МСВ) с волноводными модами АВ (модами Лэмба). Здесь использовался тот факт, что в упругом слое волноводные моды АВ вблизи частот отсечки имеют фазовые скорости, значительно превышающие скорость звука в свободном пространстве. Быстрые гибридные волны ввиду узкополосности их возбуждения представляют значительный интерес для создания частотно-селективных устройств обработки радиосигналов.

¹ Под гибридизацией волн понимается эффект их длительного взаимодействия, который возникает при синхронном распространении связанных волн (при равенстве фазовых скоростей) и проявляется в сильном влиянии волн друг на друга.