

УДК 621.378.325

## ГЕНЕРАЦИЯ КРУГОВЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

*Д. К. Грамотнев, А. А. Комарницкий*

Сообщается о формировании нового типа кольцевых поверхностных структур в результате воздействия наносекундных лазерных импульсов на поверхность твердых тел. Рассмотрен наиболее вероятный механизм, ответственный за возникновение данных структур и связанный с генерацией круговых капиллярных волн в расплаве. Обсуждается природа центра возбуждения круговых волн.

Влияние импульсного лазерного облучения (ИЛО) на морфологию поверхности твердых тел активно исследовалось в течение ряда последних лет [1, 2]. Интерес к этому вопросу обусловлен не только важностью прикладного аспекта проблемы, но и тем, что анализ морфологических изменений позволяет получить разностороннюю информацию о физических особенностях процесса взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом.

В ряде работ сообщалось о формировании под действием ИЛО разнообразных кольцевых поверхностных структур (КПС) [3-7], представляющих собой волнообразное возмущение поверхности твердого тела, центр которого, как правило, совпадает с центром области лазерного облучения. Характерные особенности получаемых КПС определяются временными и энергетическими параметрами режимов ИЛО. Например, КПС, возникающие при воздействии на металлы квазинепрерывного лазерного излучения с плотностью энергии, превышающей порог развитого испарения материала мишени, характеризуются плавным увеличением расстояния между соседними кольцами структуры при удалении от ее центра [3-5]. В то же время в результате облучения поверхности короткими лазерными импульсами могут образовываться КПС с расстоянием между соседними кольцами  $\sim \lambda$  (длины волны излучения) [7]. Кроме того, возможно появление кольцевых структур при воздействии на твердое тело других концентрированных потоков энергии, в частности теплового импульса дугового разряда [8]. Физические механизмы, ответственные за возникновение различных КПС, до настоящего времени обсуждаются в литературе [3-10] и окончательно не выяснены.

В данной работе сообщается о формировании нового типа КПС на поверхности твердых тел под действием наносекундного лазерного облучения. Анализируются механизмы их образования, а также возможности использования этих структур для исследования гидродинамических процессов, происходящих в слое расплавленного материала при взаимодействии мощного ИЛО с веществом.

### Эксперимент

В качестве образцов использовались пластины монокристаллического германия ориентации [111]. Для облучения применяли высокостабильный одномодовый АИГ: Nd<sup>3+</sup> лазер с модулированной добротностью, работающий на основной гармонике излучения ( $\lambda=1.06$  мкм,  $\tau_r=70$  нс). ИЛО осуществляли серий лазерных импульсов с частотой повторения 50 Гц при нормальном па-

дении луча на образец. Диаметр сфокусированного на поверхность лазерного пучка на уровне  $1/e$  составлял 160 мкм, а расстояние между центрами соседних пятен 50 мкм. Плотность энергии лазерного излучения во всех экспериментах не превышала величины, соответствующей порогу развитого испарения материала мишени. После ИЛО поверхность образцов исследовалась с помощью оптической микроскопии.

На рис. 1 показана микрофотография КПС, обнаруженных на поверхности германия после лазерного облучения с плотностью энергии  $E=2.3$  Дж/см<sup>2</sup>. Как видно из этого рисунка, основная отличительная особенность данного

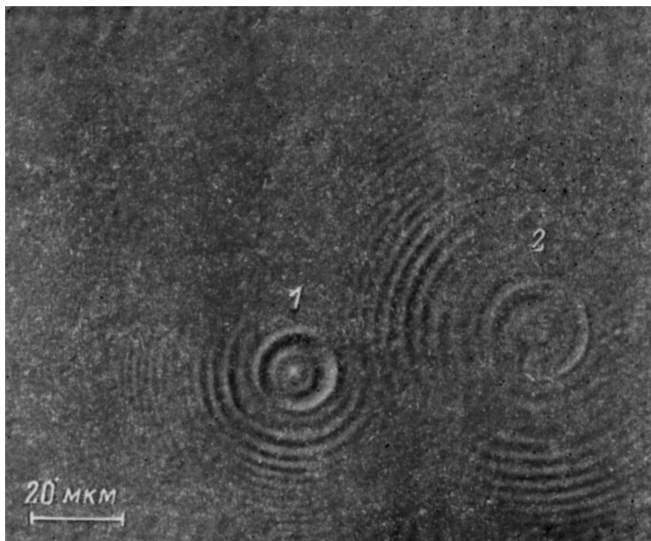


Рис. 1. Кольцевые поверхностные структуры на поверхности германия.

вида КПС заключается в том, что расстояние между соседними кольцами структур уменьшается по мере удаления от их центра. Кроме того, возникновение полученных КПС носит вероятностный характер, а частота их образования увеличивается с ростом плотности энергии излучения. Центр симметрии этих структур не совпадает с центром зоны облучения. Существенно, что, несмотря на высокую энергетическую стабильность импульса генерации используемого лазера  $\sim 3\%$ , КПС, полученные в одинаковых режимах ИЛО, не вполне идентичны. Действительно, расстояние от центра структуры 1 до области с некоторым квазипериодом (т. е. характерным расстоянием между соседними кольцами) приблизительно в два раза меньше, чем до такой же области от центра структуры 2 (рис. 1). Аналогичные структуры наблюдались также после ИЛО других полупроводников (Si, GaAs, PbTe), причем частота их появления существенно зависела от материала мишени. Перечисленные особенности позволяют утверждать, что мы имеем дело с новым видом КПС, возникающих при наносекундном ИЛО.

### Обсуждение результатов

С целью теоретической интерпретации полученных результатов будем исходить из предположения о том, что в основе описанных выше кольцевых структур лежит генерация круговых капиллярных волн (ККВ) в слое расплавленного в результате ИЛО вещества. Последующая быстрая рекристаллизация расплава и застывание этих волн приводят к образованию КПС. Природа центра возбуждения ККВ может быть различной. Так, например, это может быть локальное отклонение свободной поверхности расплава от положения равновесия — выступ или впадина, — возникшее вследствие быстрого плав-

ления изначально неровной поверхности твердого тела под действием лазерного импульса. В другом возможном случае впадина может сформироваться в результате разрыва микропузыря, образованного в тонком слое расплава. Иной механизм возбуждения ККВ связан с наличием сильно испаряющегося микрозагрязнения, что обуславливает давление отдачи паров на поверхность жидкости.

Рассмотрим вначале механизм образования КПС, связанный с наличием впадины на поверхности расплава. Пусть в начальный момент времени  $t=0$  в слое жидкости глубиной  $h$  имеется центросимметричная впадина, форму которой можно описать функцией  $z(r)$  (отклонения точек свободной поверхности жидкости от плоскости  $z=0$ );  $r$  — радиус-вектор, лежащий в этой плоскости. Определим спектр ККВ, к генерации которых приводит наличие такой впадины. Разложим функцию  $z(r)$  в двойной интеграл Фурье и, учитывая, что она и ее Фурье-образ  $z(k)$  обладают круговой симметрией, получим

$$z(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int z(k) e^{i\mathbf{kr}} d^2k = \int_0^{+\infty} kz(k) J_0(kr) dk, \quad (1)$$

где  $J_0(kr)$  — функция Бесселя нулевого порядка. Обратное преобразование Фурье имеет аналогичный вид

$$z(k) = \int_0^{+\infty} rz(r) J_1(kr) dr. \quad (2)$$

Для простоты рассмотрим достаточно мелкую впадину с плоским дном

$$z(r) = \begin{cases} -z_0 & \text{при } r \leq r_0, \\ 0 & \text{при } r > r_0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $z_0$  — глубина впадины,  $r_0$  — ее радиус, причем  $z_0 \ll r_0, h$ .

Подставляя (3) в обратное преобразование Фурье (2) и учитывая, что величина  $A(k) = |kz(k)|$  есть амплитуда гармоники  $J_0(kr)$  (см. (1)), имеем

$$A(k) = z_0 r_0 |J_1(kr_0)|, \quad (4)$$

здесь  $J_1(kr_0)$  — функция Бесселя первого порядка. Последнее выражение определяет спектр получаемых круговых капиллярных волн. Зависимость  $A(k)$  представлена на рис. 2. Величины максимумов функции  $A(k)$  убывают с ростом  $k$  сравнительно медленно (как  $1/\sqrt{k}$  при  $k \rightarrow \infty$ ). Такой характер изменения амплитуд генерируемых ККВ находится в соответствии со значительным изменением квазипериода полученных КПС (рис. 1).

Рассмотрим далее динамику временного развития начального возмущения поверхности. При  $t > 0$  капиллярные волны, амплитуды которых определяются выражением (4), начинают разбегаться из области их зарождения. Из дисперсионного соотношения [11]

$$\omega^2 = \frac{\sigma k^3}{\rho} \operatorname{th}(kh) \quad (5)$$

( $\omega$  — частота ККВ,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  — плотность расплава) нетрудно видеть, что групповая скорость распространения капиллярных волн  $V_g = \partial\omega/\partial k$  возрастает с увеличением волнового числа при любом соотношении между  $h$  и  $k$ . Это хорошо согласуется с уменьшением квазипериода КПС при увеличении расстояния от ее центра (рис. 1).

Из выражения (4) следует, что две различные впадины на поверхности жидкости должны привести в итоге к образованию, вообще говоря, двух различных КПС. Вместе с тем если моменты зарождения ККВ относительно начала действия лазерного импульса в обоих случаях совпадают, то расстояния от центра каждой структуры до области с некоторым заданным квазипериодом должны быть одинаковыми. Однако последнее не выполняется для структур,

представленных на рис. 1. Отсюда можно заключить, что возникновение соответствующих им ККВ произошло в разные моменты времени. Разность между этими моментами  $\Delta\tau = (r'_k - r''_k)/V_n(k) \sim 400$  нс ( $r'_k, r''_k$  — расстояния от центров первой и второй КПС соответственно до области с квазипериодом  $\Lambda = 2\pi/k \sim \sim 3$  мкм) значительно превышает длительность лазерного импульса  $\tau_n = 70$  нс. Следовательно, полученные КПС не являются результатом быстрого плавления изначально неровной поверхности твердого тела.

Допустим, что впадины на поверхности расплава образуются в результате разрывов микропузырей, происходящих не только на стадии действия лазерного импульса, но и на протяжении всего времени существования жидкой фазы. Данная гипотеза позволяет объяснить большую разницу в моментах зарождения ККВ. Если размеры пузырей малы (порядка нескольких микрон), то их положение равновесия на поверхности жидкости определяется лишь действием капиллярных сил. Тогда большая часть объема микропузыря должна находиться ниже уровня невозмущенной поверхности расплава, а диаметр образующейся впадины  $d_0 = 2r_0$  должен быть  $\sim \lambda$ . Из характера зависимости  $A(k)$  (рис. 2) следует, что амплитуды ККВ с волновыми числами  $k \ll k_1 = 1.85/r_0$  близки к нулю. Поэтому наибольшему квазипериоду КПС —  $\Lambda_1$  отвечает первый максимум функции  $A(k_1)$ . Полагая  $\Lambda_1 \sim 5$  мкм (рис. 1), получим характерный размер впадины  $d_0 \sim 3$  мкм.

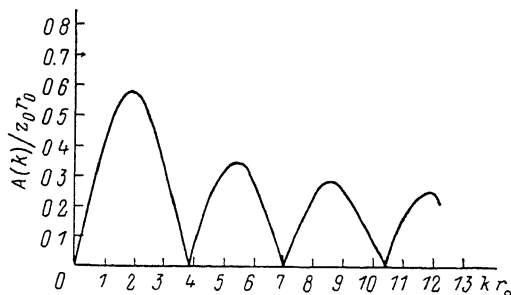


Рис. 2. Зависимость амплитуд ККВ от волнового числа.

Давление отдачи паров материала мишени на расплав также может приводить к генерации ККВ. Такой механизм привлекался в работах [3-6] для объяснения причин формирования КПС при квазинепрерывном лазерном облучении. В нашем случае на основании экспериментов [12, 13] можно считать, что при рассматриваемых режимах ИЛО испарение германия полностью отсутствует. Тем не менее возможно испарение локальных микрозагрязнений поверхности образца. При этом генерация ККВ должна начинаться на стадии действия лазерного импульса, что противоречит разнице в моментах зарождения ККВ  $\Delta\tau \gg \tau_n$ . Уже по этой причине механизм, связанный с испарением локального загрязнения поверхности, неприменим для объяснения природы полученных КПС (рис. 1).

### Заключение

Таким образом, анализ экспериментальных результатов показывает, что наиболее вероятный механизм формирования полученных КПС обусловлен генерацией ККВ вследствие разрыва микропузырей. Данная гипотеза позволяет объяснить большинство наблюдаемых особенностей, характерных для рассматриваемого типа КПС. Причины появления микропузырей окончательно не выяснены. По-видимому, их образование связано с дефектностью материала. Это предположение основывается на том, что образцы РbТе, характеризующиеся высокой плотностью дефектов, обеспечивают значительно большую по сравнению с Ge и Si частоту возникновения описанных КПС. Как показывают простые оценки, образование пузыря с  $d_0 \sim 3$  мкм может происходить при испарении микровключения с размерами  $\sim 1000$  Å.

Следует отметить, что механизмы, связанные с давлением отдачи паров и быстрым плавлением изначально неровной поверхности твердого тела, также могут приводить к образованию КПС.

Кольцевые поверхностные структуры, в основе которых лежит генерация круговых капиллярных волн, могут быть использованы для визуализации и изучения гидродинамических эффектов, возникающих при импульсном лазерном облучении. Существенно отличающиеся периоды, скорости, декременты

затухания и моменты зарождения круговых волн позволяют проводить исследование таких эффектов с временным и пространственным разрешением. Например, на рис. 1 ясно видны зоны разрыва кругов (их сильного «затухания»). Кроме того, ККВ практически не проходят через центр области облучения. Все это свидетельствует о неоднородности и неизотропности слоя расплава в течение всего времени его существования на поверхности твердого тела. Природа данной неоднородности выясняется.

Генерация ККВ может быть использована также для определения физических параметров расплавленного вещества: поверхностного натяжения, вязкости, плотности. Для реализации указанных возможностей желательна постановка экспериментальной методики, обеспечивающей управление процессом формирования КПС под действием ИЛО.

Авторы выражают благодарность А. А. Калинину за полезные обсуждения.

### Литература

- [1] *Young J. F., Sipe J. E., van Driel H. M.* Phys. Rev. B., 1984, v. 30, N 4, p. 2001—2015.
- [2] *Азманов С. А., Емельянов В. И., Коротеев Н. И., Семиногов В. В.*, УФН, 1985, т. 147, № 4, с. 675—745.
- [3] *Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н.* Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.
- [4] *Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н.* Физ. и хим. обработки материалов, 1972, № 6, с. 14—21.
- [5] *Жиряков Б. М., Фаннибо А. К., Юрышев Н. Н.* Физ. и хим. обработки материалов, 1970, № 3, с. 14—24.
- [6] *Большов Л. А., Глова А. Ф., Качурин О. Р., Лебедев Ф. В.* ЖТФ, 1987, т. 57, № 3, с. 581—583.
- [7] *Walters C. T.* Appl. Phys. Lett., 1974, v. 25, N 12, p. 696.
- [8] *Коротченко А. И., Пчелинцев А. И., Самохин А. А., Сидорин А. В.* ЖТФ, 1987, т. 57, № 1, с. 166—168.
- [9] *Анисимов С. И., Гольберг С. М., Куликов О. Л.* и др. Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, № 4, с. 226—229.
- [10] *Трибельский М. И.* Квант. электр., 1978, т. 5, с. 804—812.
- [11] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
- [12] *Гусаков Г. М., Комарницкий А. А.* Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 3, с. 166—170.
- [13] *Гусаков Г. М., Комарницкий А. А.* Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 3, с. 170—174.

Всесоюзный научно-исследовательский  
институт физико-технических  
и радиотехнических измерений  
Московская обл.

Поступило в Редакцию  
5 октября 1987 г.