

05.3; 07; 12

© 1992

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО  
ПЕРЕХОДА ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛЛ  
И ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР НА КРЕМНИИО.П. Г а ш к о в, М.Н. Л и б е н с о н,  
В.С. М а к и н, В.В. Т р у б а е в

В последнее время появилось значительное число работ, посвященных образованию упорядоченного рельефа поверхности под действием как когерентного, так и некогерентного излучений [1-10]. В ряде случаев причины образования регулярного рельефа связаны с интерференцией поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) или волноводных мод с падающим излучением [11, 12], а также со взаимной интерференцией ПЭВ [13]. Образование упорядоченного рельефа на полупроводниках связывается также с возбуждением поверхностных акустических волн [14], конвекционной неустойчивостью образующейся жидкой фазы [15], с диффузионно-деформационными неустойчивостями [16] и т.д.

Вместе с тем, в хорошо изученной области взаимодействия лазерного излучения с конденсированными средами импульсов свободной генерации с поверхностью монокристаллического кремния было обнаружено образование регулярного микрорельефа с характерным пространственным масштабом  $\sim 3-4$  мкм [17] и изучена динамика поведения его рефлексов [18]. При этом плотность мощности излучения была близка к порогу плавления поверхности. В [18] наблюдалась зависимость ориентации рельефа от кристаллографических осей поверхности. На этой основе, а также неизменности периода рельефа от угла падения излучения ( $\theta$ ) был сделан вывод о неприменимости поляритонной модели [11] для объяснения причин образования рельефа. Авторами [19] была предложена термомеханическая модель, связанная с генерацией дислокаций, их упорядоченным распределением по поверхности. В последующих работах [20, 21] была обнаружена зависимость ориентации рельефа с  $d = 3-4$  мкм от поляризации излучения и утверждалось, что диапазон плотностей мощности формирования этого рельефа ниже, чем плотности мощности, при которой формируется рельеф, связанный с интерференцией ПЭВ и падающего излучения.

Были предложены и другие модели формирования рельефа [22], а сама проблема, получившая название анизотропного плавления полупроводников, продолжает привлекать пристальное внимание как экспериментально, так и теоретически.

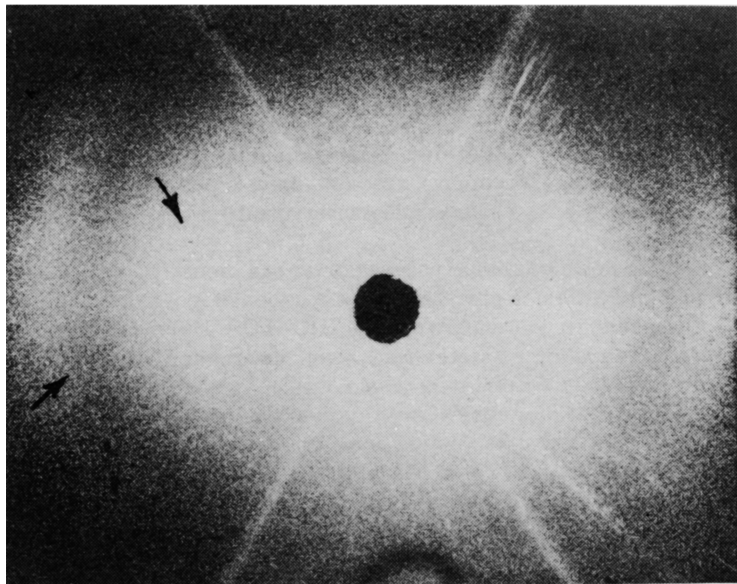


Рис. 1. Рефлексограмма поверхности монокристаллического кремния, подвергнутого однократному импульсному воздействию излучения с  $\lambda = 1.06$  мкм при угле падения  $\theta = 12^\circ$ .

В данном сообщении приводятся результаты экспериментального изучения особенностей лазерного формирования регулярного рельефа на поверхности монокристаллического кремния. Показано, что полученные результаты хорошо объясняются в рамках поляритонной модели.

В опытах использовался лазер на фосфатном стекле с неодимом и полуконфокальным резонатором, обеспечивающий импульсы излучения свободной генерации длительностью  $\approx 1$  мс с энергией до 50 Дж. Для обеспечения однородной плотности мощности по зоне облучения использовалась проекционная схема. Типичный размер зоны воздействия на поверхности составлял 2.5–5 мм. Зондирование облученного участка велось по нормали к поверхности с использованием излучения гелий-неонового лазера ЛГН-302 и пространственного фильтра; экран для наблюдения рефлексограммы устанавливался на расстоянии  $\approx 120$  мм от поверхности образца. Использовались механически полированные образцы монокристаллического кремния марки 2В1/Н/БКЭФ с ориентацией поверхности  $\langle 111 \rangle$ , либо неустановленной ориентации. Использовалась также поверхность, механически полированная абразивом с размером зерна 7–10  $\mu\text{т}$ .

Микрорельеф облученной поверхности изучался с использованием оптического микроскопа МБИ-6, наблюдение и фотографирование осуществлялось преимущественно в темном поле.

В опытах осуществлялось однократное воздействие импульса излучения неодимового лазера с плотностью мощности  $(2-5) \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> при изменении угла падения, поляризации излучения, ориентации кристаллографических осей относительно проекции вектора электрического поля падающего излучения на плоскость поверхности.

На рис. 1 представлена рефлексограмма зоны облучения, полученная при действии импульса р-поляризованного излучения,  $\theta = 12^\circ$ , и плотности мощности  $q \approx 3.5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. При этой плотности мощности, вызывающей лишь частичное оплавление поверхности, виден размытый рефлекс  $\tilde{g}^-$ , отвечающий формированию периодической поверхностной структуры по поляритонному механизму за счет интерференции поля поверхностного поляритона с полем возбуждающего его падающего лазерного излучения. Разброс значений модулей векторов решеток связан с близостью эффективной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon^*$ ) смеси жидкой и твердой фаз к значению  $\epsilon^* = -1$  [17], отвечающему граничному значению диэлектрической проницаемости для существования ПЭВ. Одновременно наблюдается образование более размытого рефлекса  $\tilde{g}$ , отвечающего и заметно большему разбросу набора решеток по направлениям. Именно совокупность решеток  $\tilde{g}$  и наблюдалась в ряде цитируемых экспериментальных работ; о ней говорилось как о решетке с несколько изменяющимся, в пределах 3-4 мкм, периодом. При увеличении плотности мощности излучения рефлекс  $\tilde{g}^-$  постепенно сужается, что отвечает переходу к формированию большей доли расплава на поверхности, и образуется более интенсивный рефлекс  $\tilde{g}$ . Важно отметить, что рефлекс  $\tilde{g}$  в среднем отвечает той же ориентации, что и  $\tilde{g}^-$ , а его период в два раза больше. В целом рефлекс  $\tilde{g}$  не может быть вторым порядком от структур, отвечающих рефлексу  $\tilde{g}^-$ , так как имеет больший набор направлений. При изменении  $\theta$  от 0 до  $30^\circ$  описанная картина сохраняется. При  $\theta > 30^\circ$  формируются лишь структуры, связанные с возбуждением ПЭВ.

Изучение микрорельефа поверхности показало, что при низких плотностях мощности  $q < 2.2 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> формируется лишь „точечный” рельеф, вероятно, связанный с неоднородным очаговым характером плавления поверхности. С ростом  $q$  „точечный” рельеф остается лишь на периферии, а в центральной зоне наблюдается линейный рельеф с  $d = \lambda / (Re\eta - \sin\theta)$ , образующийся по поляритонному механизму. При дальнейшем росте  $q$  в центральной зоне наблюдается формирование рельефа более низкого качества с большим разбросом по направлениям, но с удвоенным периодом, а рельеф с  $\tilde{g}^-$  остается в периферийной зоне пятна, уменьшаясь по занимаемой площади с ростом  $q$ . На рис. 2 приведена микрофотография рельефа поверхности, отвечающая

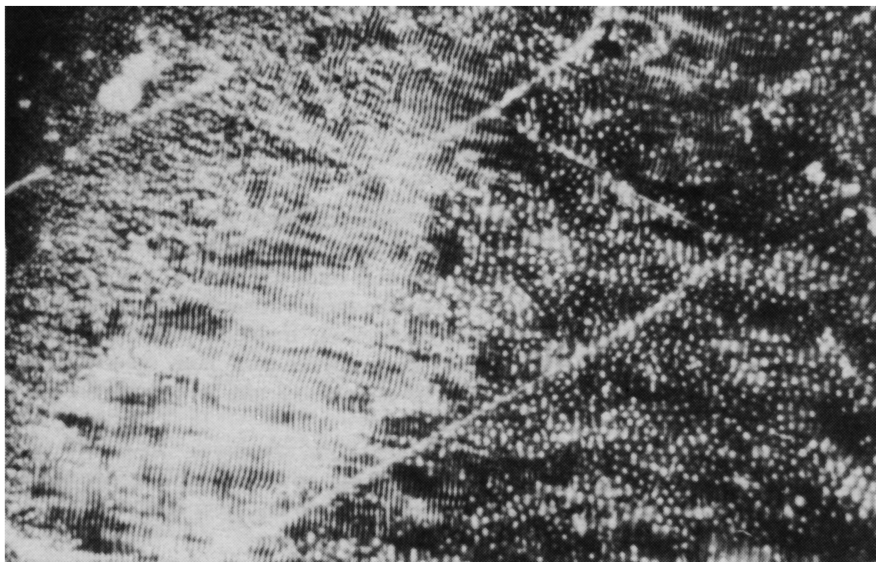


Рис. 2. Микрофотография поверхностных периодических структур, образовавшихся на поверхности кремния в условиях, соответствующих рис. 1.

рефлексограмме рис. 1. Сравнительный анализ микрорельефа, полученного при различных  $q$ , показывает, что с ростом  $q$  относительная доля поверхности, занимаемая рельефом с удвоенным периодом, увеличивается. Плохое качество рельефа  $\tilde{g}$  и большой разброс его направлений на малых расстояниях вдоль поверхности связаны с большой длительностью остывания большей массы расплава.

При дальнейшем росте  $q$  наблюдалось очень малое по площади формирование рельефа с утроенным периодом, а также „за-мывание” структур, т.е. образование кольца, занимаемого структурами, а в центральной части зоны воздействия — гладкой слабо вогнутой поверхности. В ряде областей поверхности рельеф с удвоенным периодом соседствовал с рельефом в виде ячеек Бенара, что свидетельствует о формировании слоя жидкой фазы.

При воздействии на поверхность кремния с большим количеством линейных дефектов (царапин, трещин) качество рельефа  $\tilde{g}$  и  $\tilde{g}$  существенно ухудшалось. Упорядоченный рельеф практически не наблюдался на поверхности, полированной по 9–10 классу.

Аналогичные результаты получены при воздействии  $s$ -поляризованного излучения и линейно поляризованного излучения с произвольной ориентацией плоскости поляризации.

То, что структуры  $\tilde{g}$  наблюдаются лишь до  $\theta < 30^\circ$ , вероятно, объясняется тем, что здесь сказываются чисто геометрические соображения: при больших  $\theta$  зоны поглощения частей пучка, проходящих через твердофазный кремний вглубь материала, будут перекрываться с зонами поглощения в жидкой фазе. Действительно, такое перекрытие будет наблюдаться при длине пути света в твердой фазе  $x_0 = \frac{dn}{2 \sin \theta} \approx 10$  мкм при  $\theta = 30^\circ$ . Такое значение глубины проникновения света в твердофазный кремний при температуре плавления хорошо совпадает с известной из экспериментов в этих условиях его поглощательной способностью  $\alpha \approx 10 \text{ см}^{-1}$ .

В экспериментах наблюдалось образование локальных областей разрушения поверхности треугольной формы, представляющих собой зоны глубоких локальных выколов, формирующихся под действием механических напряжений, нередко в областях, где отсутствует видимое локальное плавление поверхности.

Описанные результаты получены лишь на кремнии. По-видимому, это связано с аномально большой скрытой теплотой плавления кремния,  $L \approx 46.5$  кДж/моль, по сравнению с другими элементами, что приводит к созданию заметной „полки“ на графике зависимости прироста температуры поверхности от плотности мощности излучения.

Вместе с тем, при облучении полированных образцов под скользящими углами ( $\theta > 55^\circ$ ) неполяризованным излучением, на поверхности наблюдалось формирование линейных структур с периодом  $d = 3.2$  мкм хорошего качества. Период этих структур не зависел от угла падения, а их ориентация — от ориентации плоскости поверхности образца, причем  $g \parallel$  плоскости падения. Причины образования такого рельефа непонятны и нуждаются в дополнительном исследовании.

Таким образом, в настоящем сообщении экспериментально установлено, что при воздействии импульсов миллисекундной длительности на поверхности кремния формируется рельеф с кратными по отношению к рельефу ПЭВ периодами. Это может быть связано с нелинейным изменением поглощательной способности поверхности полупроводника при фазовом переходе полупроводник–металл и пространственно неоднородным характером такого перехода.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К и я к С.Г., Б о н ч и к А.Ю. и др. // ДАН УССР. Сер.А. 1987. В. 5. С. 61-64.
- [2] Д е м ч у к А.В., П р и с т р е м А.М., Д а н и л о - в и ч Н.И., Л а б у н о в В.А. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. В. 12. С. 89-93; Д е м ч у к А.В. Л а б у н о в В.А. // Физ. хим. обработки материалов. 1990. В. 2. С. 31-34.

- [3] Фатгахов Я.В., Хайбуллин И.Б. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 16. С. 1474-1477.
- [4] Кашкаров П.К., Петров В.И., Птицинд.В., Тимошенко В.Ю. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 11. С. 2080-2082.
- [5] Плотников А.И., Рембеза С.И., Логинов В.А. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. В. 9. С. 47-52.
- [6] Демчук А.В., Лабунцов В.А. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1991. В. 2. С. 103-109.
- [7] Бончик А.Ю., Гафийчук В.В., Кияк С.Г., Савицкий Г.В. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. В. 5. С. 142-144.
- [8] Баженов В.В., Макин В.С. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 8. С. 20-26.
- [9] Marcus G.N., Harris G.L., Lee S.A., McFarlane // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 5. P. 453-455.
- [10] Бонч-Бруевич А.М., Смирнов В.Н. // Изв. АН СССР. сер. физич. 1985. Т. 49. В. 6. С. 1203-1207.
- [11] Бонч-Бруевич А.М., Либенсон М.Н., Макин В.С., Румянцев А.Г. // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1989. Т. 53. В. 4. С. 769-776.
- [12] Баженов В.В., Макин В.С. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 8. С. 20-26.
- [13] Баженов В.В., Бонч-Бруевич А.М., Либенсон М.Н., Макин В.С. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 24. С. 1520-1526.
- [14] Jost D., Luthy W. // Appl. Phys. Lett. 1986. В. 49. С. 625-627.
- [15] Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Иванов М.Г., Меркулов И.А. // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 5. С. 1484-1488.
- [16] Володин Б.Л., Емельянов В.И. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. В. 5. С. 648-650.
- [17] Von Almen M. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 9. P. 875-879.
- [18] Вейко В.П., Дорофеев И.А., Имас Я.А., Калугина Т.И., Либенсон М.Н. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 1. С. 15-20.
- [19] Вейко В.П., Имас Я.А., Либенсон М.Н., Шандыбина Г.Д., Яковлев Е.Б. // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1985. Т. 49. В. 6. С. 1236-1239.
- [20] Коккин А.Н. Тез. докл. У Всесоюз. семинара „Фотофизика поверхности“. Ленинград, 1988. С. 61-62.
- [21] Коккин А.Н. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 6. С. 174-176.

- 22] Апполлонов В.В., Прохоров А.М., Шмаков А.В., Шмаков В.А. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 2. С. 52-56.
- 23] Баженов В.В., Макин В.С., Фишова Г.Н. Тез. докл. УП Всесоюз. конф. по взаимодействию оптич. излучения с веществом. Ленинград, 1988. С. 416.

Поступило в Редакцию  
5 мая 1992 г.