

05;07;11

©1995

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ РЕЛЬЕФ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ НА ПОВЕРХНОСТИ $\langle 111 \rangle$ ГЕРМАНИЯ

М.Н.Либенсон, В.С.Макин, В.В.Трубаев

Десять лет назад были опубликованы интересные экспериментальные результаты [1], до сих пор не нашедшие объяснения. Речь идет об образовании упорядоченного рельефа поверхности монокристаллического германия $\langle 111 \rangle$ под действием серии импульсов лазерного излучения (длина волны $\lambda = 1.06$ мкм, длительность воздействия $\tau \sim 100$ пс). Использование рефлексометрической методики для наблюдения формирующегося после действия серии импульсов поляризованного по кругу излучения микрорельефа позволило обнаружить регулярный рельеф поверхности, рефлексодиаграмма которого имеет симметрию вращения шестого порядка относительно нормали к поверхности. При этом гексагональная симметрия образующихся упорядоченных структур связывалась с симметрией подложки, а образование такого сложного рельефа с нелинейным взаимодействием решеток. В последующей работе авторов [2] ставился вопрос о причинах формирования описанного рельефа, в частности, о том, почему указанные структуры наблюдаются только для нормального падения и поляризованного по кругу излучения.

В настоящей работе предпринята попытка объяснить экспериментальные данные [1] в рамках поляритонной модели (см., например, [3]), основанной на участии в лазерных воздействиях поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ). Поскольку на плоской границе раздела поверхностно-активной среды ПЭВ не возбуждаются, обычно предполагают, что такое возбуждение осуществляется на резонансной пространственной частоте, присутствующей в спектре пространственных частот микронеровной поверхности, либо на межкристаллитных границах, царапинах и иных дефектах поверхности. Возбуждение ПЭВ может происходить и на микротрещинах поверхности. Так, в наших опытах по наблюдению формирования микрорельефа поверхности кремния под действием импульса лазерного излучения миллисекундной длительности это проявлялось в увеличении интенсивности областей рефлекс-

сограммы, соответствующих направлениям формирования лазерно-индуцированных микротрещин поверхности. Существенно, что для полированного монокристаллического кремния с ориентацией поверхности $\langle 111 \rangle$ при низких плотностях мощности излучения ($q \leq 10^5$ Вт/см²) была обнаружена система микротрещин, обладающая гексагональной симметрией вращения шестого порядка относительно нормали к поверхности. Поскольку германий и кремний обладают одинаковой кристаллографической симметрией, неудивительно, что несмотря на различие условий термомодификации, на поверхности $\langle 111 \rangle$ германия под действием серии пикосекундных импульсов излучения также образуется система приповерхностных микротрещин в трех симметричных направлениях.

Если падающее излучение поляризовано по кругу, его эффективное преобразование будет происходить во всех равноправных направлениях, соответствующих гексагональной симметрии поверхности кристалла. В [1] показано, что картина дифракции зондирующего излучения на сформированном микрорельефе (с вектором решетки g) описывается уравнением:

$$g = n \cos(1\pi/3)x + n \sin(1\pi/3)y + G_0, \quad (1)$$

где x и y — единичные вектора в плоскости поверхности, m — целое число, $n \leq 0$; 1 — целое число, изменяющееся от 0 до 5; G_0 — вектор, вращающийся в плоскости (x, y) , см. рис. 1. Здесь использованы обозначения работы [1].

Теоретическая рефлексограмма, полностью соответствующая экспериментальным данным [1], приведена на рис. 1. Для анализа сформированного рельефа воспользуемся круговой векторной диаграммой, иллюстрирующей закон сохранения квазиимпульса (см. рис. 2). В силу вышесказанного, на поверхности образуется система микротрещин, которая приводит к преимущественному возбуждению ПЭВ в шести различных направлениях, характеризуемых индексом l ($l = 0, 1, \dots, 5$). Будем предполагать, что $l = 0$ соответствует направлению оси x . Если падающее излучение поляризовано по кругу, то на микрошероховатостях поверхности возбуждаются и ПЭВ с близкими по углу волновыми векторами $k_s, k_s, k_{sl} = \varphi > 0$, однако с меньшей эффективностью. Интерференция падающего излучения с полным угловым набором ПЭВ приведет к формированию рельефа, представляющего собой набор решеток с периодом $d_1 = \lambda^*$ и

* Ниже пренебрегается отличием действительной части показателя преломления границы раздела для ПЭВ η от 1 в силу малости $(\eta - 1)$.

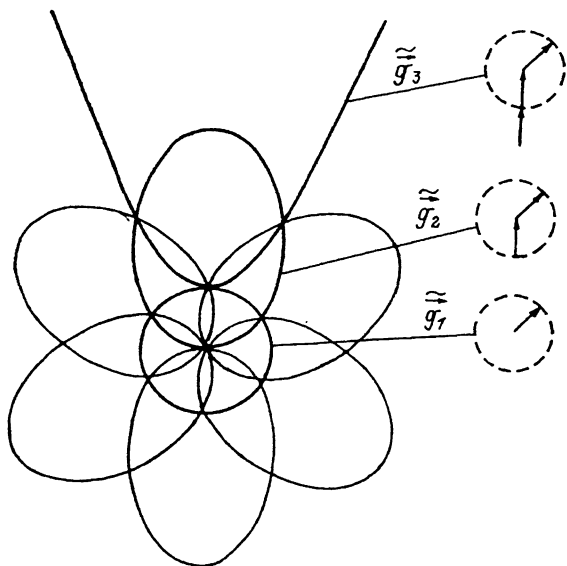


Рис. 1. Рефлексограмма поверхностного рельефа, описываемая уравнением (1) и полностью совпадающая с полученными в [1] экспериментальными данными. Приведен полный набор рефлексов гексагональной симметрии для $n = 0$ и $n = 1$. Для $n = 2$ приведены только рефлексы для $l = 1$.

всевозможными ориентациями. На рефлексограмме ему отвечает окружность с радиусом $g_1 = k_s$ (кривая 1 на рис. 1). Образующая решетка является дважды вырожденной, так как в ее формировании принимали участие две ПЭВ с противоположными направлениями k_s . Заметим, что интенсивность рефлексов на окружности в направлениях $l = 0, \dots, 5$ должны иметь большую величину. На рис. 1 кривой 1 (\vec{g}_1)* условно соответствует вращающийся по окружности конец вектора $k_s(\varphi)$.

Выше речь шла об образовании рельефа, связанного с интерференцией ПЭВ и падающего излучения. Как известно, на более поздних стадиях процесса существенную роль играет взаимная интерференция ПЭВ [4]. Для анализа возникающего при этом рельефа будем предполагать, что происходит интерференция наиболее интенсивных ПЭВ, возбуждающихся на более глубоких решетках в направлениях $l = 0, \dots, 5$, с квазинепрерывным набором ПЭВ, отличающихся направлениями распространения (углами φ). Для

* Здесь знак тильда означает набор векторов сформировавшихся решеток, образующих замкнутые кривые рис. 1.

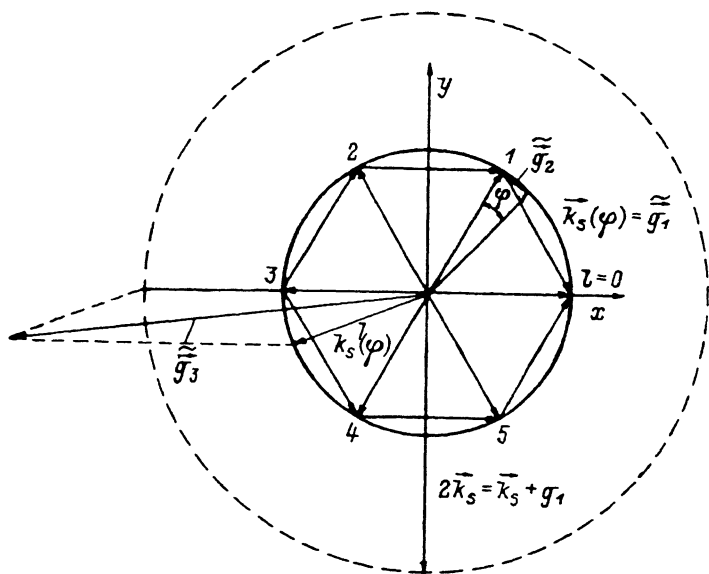


Рис. 2. Круговая векторная диаграмма, отражающая закон сохранения квазиимпульса на периодической решетке и иллюстрирующая образование упорядоченного рельефа гексагональной симметрии.

данного направления l это приведет к формированию рельефа с набором волновых чисел от $g_{\max} = 0$ до $g_{\min} = 2g_1$ ($d \in [\lambda/2, \infty)$), причем соответствующая кривая на рефлексограмме симметрична относительно l . На рис. 1 такому рельефу для всех l отвечает совокупность кривых 2, имеющих симметрию шестого порядка. На рис. 1 кривой 2 условно соответствует сумма двух векторов $k_s(l) + k_s(\varphi) = \tilde{g}_2$, один из которых, $k_s(\varphi)$, причем соответствующая кривая на рефлексограмме симметрична относительно l . На рис. 1 такому рельефу для всех l отвечает совокупность кривых 2, имеющих симметрию шестого порядка. На рис. 1 кривой 2 условно соответствует сумма двух векторов $k_s(l) + k_s(\varphi) = \tilde{g}_2$, один из которых, $k_s(\varphi)$, вращается по окружности.

Из всей совокупности рефлексов особое внимание представляют рефлексы типа \tilde{g}_2 и \tilde{g}_3 . Для их интерпретации ниже предлагаются две альтернативные модели.

Как известно из [5], волна в периодической структуре с $d_1 = 2\pi/k_s$ представляет собой бесконечный набор пространственных гармоник, $k = nk_s$, фазовые скорости которых изменяются от нуля до бесконечности. Сильное взаимодействие между гармониками в областях пересечения (на границах зон Бриллюэна) приводит к образованию минизон, в частности, для ПЭВ [6]. Здесь n -целое число. Если такая волна с волновым числом $k_s + g_1 = 2k_s$, распространяющаяся в направлении l , будет интерферировать с угловым набором ПЭВ меньшей интенсивности, это приведет к образованию рельефа с предельными волновыми числами решеток $g_{\max} = g_1$ и $g_{\min} = 3g - 1$ ($d \in [\lambda/3, \lambda)$), рефлексограмма которого (кривая 3 на рис. 1) симметрична относительно оси l . Кроме того, такие ПЭВ ($k_s + g_1$) должны интерферировать и с падающим излучением, что также будет приводить к образованию решеток с $g = 2g_1$ (для каждого l), т. е. к дополнительному вырождению этих решеток (точек на кривых 2). На рис. 1 кривой 3 условно соответствует сумма векторов $(k_s + g_1) + k_s(\varphi)$, причем конец последнего вращается по окружности.

Учет интерференции выделенных ($l = 0, \dots$) ПЭВ в $m = -1$ порядке с падающей волной дает $g = 0$, а с остальным набором ПЭВ $k_s(\varphi)$ — набор решеток \tilde{g}_1 , т. е. дополнительное вырождение основного рельефа.

Возникновение рефлексов \tilde{g}_3 может быть объяснено и иначе — как появление перекрестных порядков дифракции зондирующего излучения на пространственно наложенных решетках \tilde{g}_2 и $g(l)$. Поиск реального рельефа с $d \leq \lambda/2$ на облученной поверхности с помощью микроскопа может дать однозначный ответ.

Таким образом, основываясь на поляритонной модели, можно объяснить необходимость как круговой поляризации излучения, так и нормального падения света, для получения рельефа гексагональной симметрии. При этом необходимо учитывать интерференцию ПЭВ и падающего излучения и взаимную интерференцию ПЭВ, отличающихся направлениями распространения и эффективностью возбуждения.

Остановимся кратко на вопросе о механизмах превращения полупроводника в поверхностно-активную среду, необходимого для существования ПЭВ. Во-первых, поглощенное лазерное излучение может оплавливать тонкий поверхностный слой, приобретающий металлические свойства. При этом излучение будет эффективно преобразовываться в ПЭВ на системе микротрещин поверхности, сформировавшихся в процессе термодформаций на начальной стадии. Однако возможны и иные причины, усиливающие направленное возбуждение ПЭВ, например, анизотропия концентрации неравновесных носителей или анизотропия поверхностного натяжения.* Последний вопрос нуждается в подробном исследовании.

Приобретение поверхностно-активных свойств (металлизация) поверхностного слоя может быть связано не только с плавлением поверхности $\langle 111 \rangle$ германия, но и с его переходом в фазу высокого давления за счет развивающихся напряжений сжатия [7] приповерхностного слоя материала, либо с высокотемпературным фазовым переходом при $T_c = 1050$ К ($T_{\text{плавл}} = 1210$ К) [8] в процессе короткоимпульсного разогрева.

В заключение отметим, что приведенный пример формирования упорядоченного рельефа на полупроводниках с участием ПЭВ является, насколько нам известно, единственным, где проявляются кристаллографические свойства полупроводниковой подложки при металлизации поверхностного слоя.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Международного научного фонда (грант RNS000) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 94-02-05802).

* Заметим, что гексагональная симметрия поверхности $\langle 111 \rangle$ германия проявляется в поверхностном натяжении [2].

Список литературы

- [1] *Faughet P.M., Siegman A.E.* // Appl. Phys. A. 1983. A32. N 3. P. 135-140.
- [2] *Faughet P.M., Siegman A.E.* // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1985. V. 35. P. 199-204.
- [3] *Bonch-Bruевич, Libenson M.N., Makin V.S., Trubaeu V.V.* Optical engineering. 1992. V. 31. N 4. P. 718-730.
- [4] *Баженов В.В., Бонч-Бруевич А.М., Либенсон М.Н., Макин В.С.* // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 24. С. 1520-1527.
- [5] *Элаши Ш.* Тр. ТИИЭР. 1976. 64. В. 12. С. 1666-1698.
- [6] *Chen Y.J., Koteles E.S., Seymour R.J., Sonek G.L., Ballantyne J.M.*
- [7] *Miller T.* // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. N 6. P. 4421-4423.
- [8] *Takeuchi N., Selloni A., Tosatti E.* // Phys. Rev. 1994. V. 72. N 14. P. 2227-2230.

Государственный институт
точной механики и оптики
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
20 июля 1994 г.
