

- [1] Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 465 с.
 [2] Лисица М. П., Кулиш Н. Р., Мазниченко А. Ф. // ФТП. 1981. Т. 15. Вып. 8. С. 1479—1485.
 [3] Манухин А. В., Плаксин О. А. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 14. Вып. 16. С. 1467—1470.
 [4] Альтшулер Г. Б., Ермолаев В. С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 13. Вып. 3. С. 152—158.
 [5] Дышяков В. А., Дыжне А. Н. и др. // Изв. АН СССР. Физика. 1988. Т. 52. № 9. С. 1809—1816.
 [6] Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1957. 430 с.

Научно-исследовательский институт
 ядерной физики
 при Томском политехническом
 институте
 им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
 13 июля 1989 г.
 В окончательной редакции
 2 февраля 1990 г.

05

Журнал технической физики, т. 60, в. 12, 1990

© 1990 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО СУРЬМОЙ КРЕМНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО ДЕЙСТВИЮ МОЩНОГО НЕКОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

Введение

Исследование фазовых переходов в условиях импульсного нагрева представляет большой научный и практический интерес, поскольку эти процессы реализуются в неравновесных условиях. Фазовые переходы в полупроводниках под действием лазерных и электронных пучков изучены достаточно полно [1], в то время как процессы, развивающиеся на поверхности в условиях импульсного нагрева мишеней некогерентным излучением, практически не исследованы. В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования неравновесных процессов поверхностного плавления и кристаллизации ионно-имплантированного кремния в условиях импульсного нагрева некогерентным излучением.

Методы исследования

В качестве объектов исследования использовались пластины монокристаллического кремния диаметром 76 мм *p*-типа проводимости ($\rho=10$ Ом·см) ориентации (111), легированные сурьмой методом имплантации ионов с энергией 80 кэВ до концентрации $2 \cdot 10^{16}$ см⁻². Нагрев образцов осуществлялся моноимпульсами излучения ксеноновых ламп ($\lambda=0.2-1.3$ мкм) длительностью ~ 1 с плотностью энергии 90—130 Дж/см².

С целью получения различных стадий процесса плавления на одном образце максимум потока излучения был смещен относительно центра мишени, что позволило наблюдать переходы от исходной матрицы к рекристаллизованным областям, имевшим к моменту окончания действия импульса различную температуру в результате неравномерного нагрева.

Экспериментальные результаты

Начальная стадия плавления кремния, имплантированного ионами сурьмы, характеризуется локальным зарождением жидкой фазы (рис. 1, а). Плотность центров плавления составляет $5 \cdot 10^6$ см⁻², кристаллографическая огранка у рекристаллизованных островков отсутствует. При удалении от границы с исходной матрицей наблюдается слияние локальных областей плавления с образованием развитого рельефа поверхности (рис. 1, б). Следующая характерная область образца представляет собой совокупность ячеек круглой формы размером ~ 100 мкм (рис. 1, в). С приближением к периферии образца (с повышением температуры)

характер ячеистой структуры существенно изменяется. Размер ячеек уменьшается до ~ 15 мкм, наблюдается их трансформация; сформированная структура идентична строению поликристаллических объектов (рис. 1, а).

Последний тип структуры, который формируется в результате кристаллизации периферийной области образца, представляет собой регулярный поверхностный рельеф с периодом ~ 3 мкм (рис. 1, д).

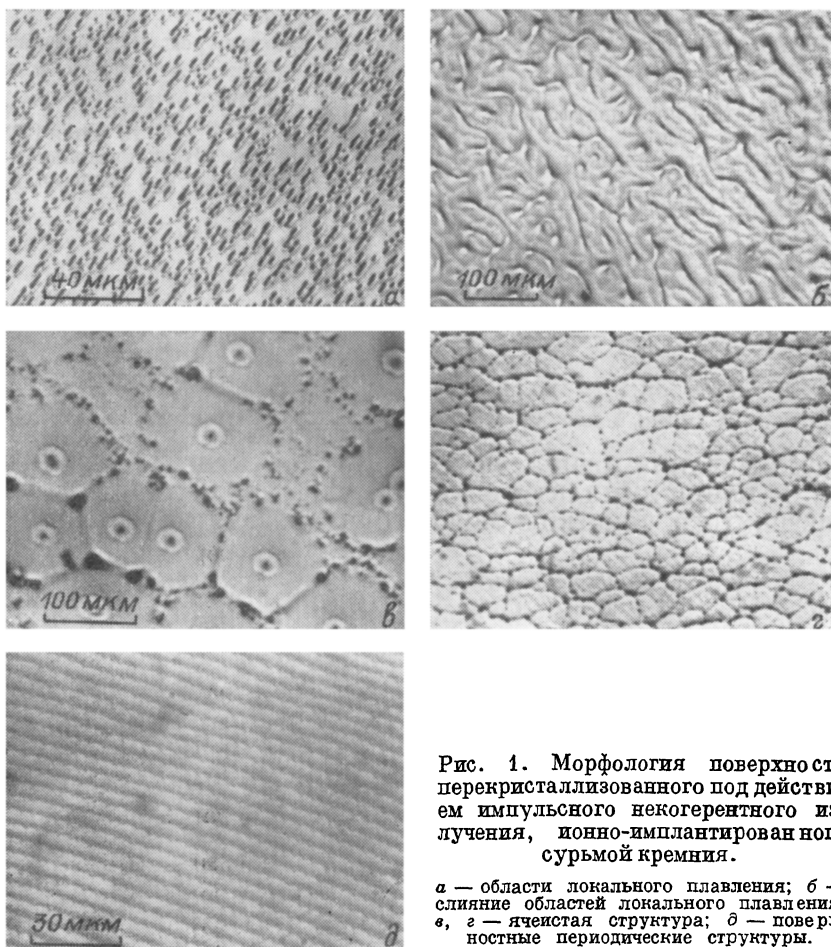


Рис. 1. Морфология поверхности перекристаллизованного под действием импульсного некогерентного излучения, ионно-имплантированного сурьмой кремния.

а — области локального плавления; б — сливание областей локального плавления; в, г — ячеистая структура; д — поверхностные периодические структуры.

Пороговые плотности энергии излучения, отвечающие переходу от одного типа морфологии поверхности к другому в серии рис. 1, составляют соответственно ~ 90 , ~ 110 , ~ 130 Дж/см².

Следует подчеркнуть, что все приведенные выше типы структуры рекристаллизованного кремния наблюдаются непосредственно после окончания действия импульса некогерентного излучения.

Обсуждение результатов

Локальный характер начальной стадии плавления ранее наблюдался на неимплантированных полупроводниках [2, 3]. Однако имеются существенные особенности в процессе локального зарождения жидкой фазы на поверхности ионно-имплантированных образцов под действием некогерентного излучения. В последнем случае значительно (на 2—3 порядка величины) возрастает плотность центров плавления, а также изменяется форма рекристаллизованных областей (на неимплантированных образцах кремния ориентации (111) рекристаллизованные островки имеют треугольную форму). В работах [3—5] показано, что для зарождения жидкой фазы необходим перегрев кристалла выше его температуры плавления. Различия в характере локального плавления монокристаллического кремния и образцов с аморфизованным в процессе ионной имплантации приповерхностным слоем (используемая в наших экспериментах доза легирования превышает дозу аморфизации кремния) можно объяснить увели-

чением степени перегрева, связанного с повышением свободной энергии сильно разупорядоченного кристалла [5]. В этих условиях критический размер зародыша жидкой фазы уменьшается, а число центров зародышеобразования возрастает [8]. Отсутствие определенной кристаллографической ориентации в аморфной структуре приводит к изотропности свойств межфазной границы раздела [5].

Дальнейшее развитие процесса плавления кремния сопровождается слиянием локальных областей расплава и формированием крайне неоднородного рельефа поверхности (рис. 1, б). Вследствие неравновесности процесса кристаллизации, а также увеличения объема кремния при переходе из жидкой фазы в твердую на поверхности образцов формируется достаточно развитый рельеф. По-видимому, на данной стадии плавления существенно также влияние изменения оптических и теплофизических свойств кремния. С увеличением доли жидкой фазы вследствие резкого увеличения коэффициента отражения возможно нарушение условий теплового баланса в граничащих с расплавом областях кристалла [5].

С увеличением плотности потока излучения прослойки твердой фазы исчезают и достигается планарное плавление образцов с образованием ячеистой структуры при последующей кристаллизации (рис. 1, в). Аналогичные структуры образуются на поверхности кристаллизующихся массивных материалов при декантации расплава [7] и при зонной перекристаллизации полупроводников [8]. Формирование ячеек в работе [7] связывается с неустойчивостью фронта кристаллизации в условиях концентрационного переохлаждения расплава. Нарушение границы раздела фаз происходит в масштабе D/V , где D — коэффициент диффузии примеси в жидкой фазе, а V — скорость кристаллизации [1]. Неустойчивость межфазной границы наблюдается тогда, когда дестабилизирующее действие примеси преобладает над стабилизирующим действием термических градиентов в системе. При достаточно больших градиентах температуры переохлаждение не возникает, причем критический градиент можно выразить через коэффициент распределения k и концентрацию примеси в расплаве C_0 [7]

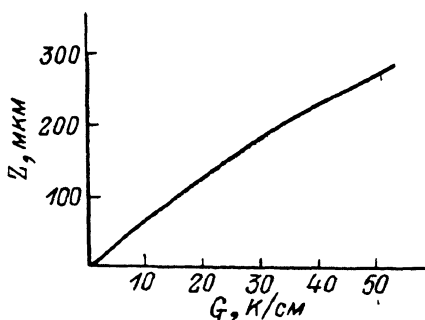


Рис. 2. Зависимость «инкубационного расстояния» от градиента температуры.

$$G_{\text{крит}} \geq -mC_0 \frac{V}{D} \frac{1-k}{k}, \quad (1)$$

где m — наклон линии ликвидуса на фазовой диаграмме.

При подстановке в формуле (1) типичных значений параметров ($m = -3.4$ К/%, $C_0 = 10^{-3}$ %, $V = 0.1$ см/с, $D = 1.5 \cdot 10^{-4}$ см²/с, $k = 0.04$) получаем для кремния, легированного сурьмой, $G_{\text{крит}} = 54$ К/см.

В работе [7] показано, что ячейки могут образовываться после окончания переходного процесса накопления примеси у межфазной границы, который характеризуется инкубационным расстоянием z [7]

$$z = \frac{D}{kV} \ln \left[1 - \frac{GD}{C_0 m V \left(\frac{1-k}{k} \right)} \right]. \quad (2)$$

На рис. 2 представлена зависимость инкубационного расстояния от градиента температуры, рассчитанная по формуле (2). Широкий спектр z (от единиц до сотен мкм) позволяет изменять структуру кремния путем варьирования глубиной расплавленного слоя и условиями кристаллизации. С уменьшением глубины расплава и увеличением градиента температуры условия ячеистой кристаллизации не реализовываются, поскольку инкубационное расстояние может существенно превышать толщину модифицированного слоя кремния.

Повышение температуры поверхности образцов в процессе импульсного нагрева излучением приводит к уменьшению размеров ячеек (рис. 1, в, з). В работе [8] приводится соотношение, связывающее размер ячеек x_0 и градиент температуры в расплаве,

$$G = -mC_0 \frac{1-k}{kx_0} \left[1 - \exp \left(-\frac{Vx_0}{D} \right) \right]. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует уменьшение размера ячеек с увеличением градиента температуры, что соответствует данным эксперимента. Оценки показывают, что размерам ячеек, равным 15 и 100 мкм, соответствуют градиенты температуры 34 и 8 К/см.

Формирование поверхностных периодических структур (ППС), представленных на рис. 1, δ , также естественно связать с кристаллизационными эффектами, если учесть условия их образования. ППС наблюдаются в периферийной зоне образца, следовательно, на их формирование оказывают влияние краевые эффекты, связанные с изменением условий теплоотвода. Вследствие интенсивного охлаждения края образца основную роль в процессе кристаллизации расплава кремния будут играть тангенциальные градиенты температуры. Из расчетов, приведенных выше, следует, что ППС представляют собой квазидвумерный случай ячеистой структуры.

Аналогичный результат достигается при изменении скорости сканирования источника излучения относительно образца [8]. При увеличении скорости перемещения нагревателя наблюдается переход от равноосных ячеек к вытянутым, что объясняется изменением условий теплоотвода в процессе кристаллизации.

С целью проверки предложенного механизма формирования поверхностных структур, основанного на неустойчивости фронта кристаллизации в условиях концентрационного переохлаждения расплава, действию излучения подвергали пластины неимплантированного кремния. В отличие от имплантированного кремния на данных образцах наблюдается лишь формирование ППС, в то время как ячеистые структуры не обнаружены. Этот результат хорошо объясняется в рамках рассмотренного выше механизма неустойчивости.

В кремнии всегда присутствуют хотя бы в незначительных количествах примеси. Поскольку их концентрация мала, то инкубационное расстояние, необходимое для установления критического состояния у межфазной границы, возрастает (см. формулу (2)) и может превысить толщину расплавленного слоя кремния. В этом случае условия ячеистого роста не реализуются. При изменении направления движения межфазной границы, связанного с проявлением краевых эффектов, не существует жестких ограничений для величины z вследствие большой площади образцов. Таким образом, на поверхности неимплантированного кремния возможно формирование ППС, что подтверждается экспериментально.

Список литературы

- [1] Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными лучами / Под ред. Дж. М. Поута, Г. Фоти, Д. К. Джекобсона. М.: Машиностроение, 1987, 424 с.
- [2] *Верходанов С. П., Герасименко Н. Н., Мясников А. М.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 5. С. 69—73.
- [3] *Фаттахов Я. В., Хайбуллин И. Б., Баязитов Р. М., Мисюрев Е. М.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 16. С. 1474—1478.
- [4] *Celler G. K., Jackson K. A., Trimble L. E. et al.* // Energy Beam Solid. Interact. and Transient Therm. Processing. Symp. New York, 1984. P. 409—415.
- [5] *Демчук А. В., Пристрем А. М., Данилович Н. И., Лабунов В. А.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 12. С. 89—97.
- [6] *Найдич Ю. В., Перевертайло В. М., Григоренко Н. Ф.* Капиллярные явления в процессах роста и плавления кристаллов. Киев: Наукова думка, 1983. 98 с.
- [7] *Чалмерс Б.* Теория затвердевания. М.: Металлургия, 1968. 288 с.
- [8] *Гиваргизов Е. И.* Искусственная эпитаксия. М.: Наука, 1988. 176 с.

Воронежский политехнический
институт

Поступило в Редакцию
30 июня 1989 г.
В окончательной редакции
3 января 1990 г.