

$$u_t + \sigma u_x + \rho^{-1} p_x = 0, \quad \rho_t + (\rho u)_x + (\gamma - 1) \rho \sigma = 0, \quad (\rho + B) / (\rho_0 + B) = (\rho / \rho_0)^{\gamma} \quad (6)$$

с соответствующими граничными и начальными условиями (B, γ – постоянные, γ – показатель симметрии). Закон расширения поршня $u(R(t), t) = 350 \exp(-0,001 \cdot 10^6 t)$ – кривая 1, $R(t)$ – кривая 2 рис. 2. Анализ кривых рис. 1, 2 показывает, сколь велики могут быть погрешности определения исследуемых функций по наблюдаемому изменению радиуса подвижной границы. Подобные результаты получить другими способами нельзя, метод [6] применить для обратных задач затруднительно.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Крутиков В.С. Тезисы докладов 1У Всес. симпозиума „Методы теории идентификации в задачах измерит. техники и метрологии“, 12. Новосибирск, 1985.
- [2] Крутиков В.С. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 510–514.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: Гостехтеориздат, 1954. 596 с.
- [4] Крутиков В.С. Одномерные задачи механики сплошной среды с подвижными границами. Киев: Наук. думка, 1985. 125 с.
- [5] Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложение к газовой динамике. М.: Наука, 1978. 688 с.
- [6] Гринберг Г.А. // ПММ. 1967. Т. 31. В. 2. С. 193–203.

Поступило в Редакцию
2 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 14

26 июля 1989 г.

11; 12

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРИОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЛЬЕФА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

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

Формирование периодических структур на поверхности конденсированных сред имеет актуальное значение для целей создания устройств на поверхностных акустических волнах. В этой связи перспективным является использование для формирования поверхностных периодических структур (ППС) некогерентного излучения, что позволяет

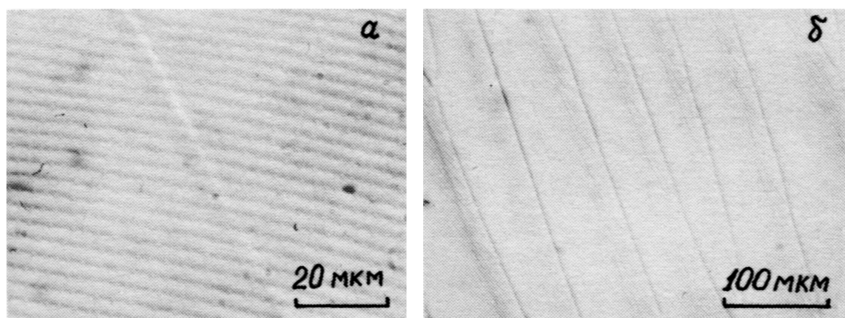


Рис. 1. Периодические структуры на поверхности кремния, легированного сурьмой (а) и фосфором (б).

получать периодический рельеф на большой площади мишени в отличие от лазерной генерации ППС. Наиболее важной задачей в проблеме практического использования явления генерации ППС под действием мощного излучения является управление периодом поверхностного рельефа. При лазерной генерации ППС пределы варьирования периодом ППС крайне ограничены, не разработаны также механизмы управления параметрами ППС. В настоящей работе рассматриваются закономерности формирования ППС под действием некогерентного излучения, позволяющие управлять периодом ППС в широких пределах.

В качестве объектов исследования использовались пластины монокристаллического кремния ориентации (111), легированные в процессе выращивания слитка фосфором до концентрации 10^{15} см^{-3} , и марки КЭФ-0.3, имплантированные ионами сурьмы с энергией 80 кэВ при дозе $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Формирование ППС осуществлялось путем воздействия на мишени моноимпульсов некогерентного излучения ксеноновых ламп ($\lambda = 0.2-1.3 \text{ мкм}$, $\tau \approx 1 \text{ с}$) с плотностью энергии $\sim 100 \text{ Дж/см}^2$.

На рис. 1 представлены ППС, сформированные на поверхности исследуемых образцов. Период полученных ППС составляет $\sim 3 \text{ мкм}$ на мишенях, имплантированных ионами сурьмы, и $\sim 80 \text{ мкм}$ на образцах, легированных фосфором. Таким образом, экспериментально показана возможность варьирования периодом ППС в широких пределах.

В работе [1] предложен механизм формирования ППС под действием некогерентного излучения, основанный на неустойчивости плоского фронта кристаллизации расплава в условиях концентрационного переохлаждения. Присутствующие в расплаве примеси имеют различную растворимость в жидкой и твердой фазах кремния, вследствие чего в процессе кристаллизации примесь отгесняется движущейся межфазной границей. Температура расплава вблизи поверхности раздела фаз ниже температуры ликвидуса основной массы жидкой фазы, что приводит к возникновению переохлаждения и неустойчивости

фронта кристаллизации [2]. Критерий устойчивости плоского фронта кристаллизации задается выражением [2]

$$G_{\text{крит.}} \geq \frac{mVc_0}{D} \cdot \frac{1-k}{k}, \quad (1)$$

где G – градиент температуры в расплаве, V – скорость роста твердой фазы, m – наклон линии ликвидуса на фазовой диаграмме, c_0 – концентрация примеси в расплаве, D – коэффициент диффузии примеси в расплаве, k – коэффициент распределения.

Критерий (1) определяет критическую величину градиента температуры, выше которой переохлаждения не возникает. Поскольку при импульсных воздействиях градиенты температуры велики, они могут превысить $G_{\text{крит.}}$ в этом случае ППС будут отсутствовать. Следовательно, для реализации условий, вызывающих формирование ППС, необходимо увеличить критическое значение градиента температуры. Этого можно достигнуть, варьируя параметрами, входящими в выражение (1). Значения наклона линии ликвидуса и коэффициентов диффузии в жидкой фазе незначительно отличаются для различных примесей в кремнии, слабо изменяется также скорость роста твердой фазы при фиксированных режимах облучения. Таким образом, параметрами, существенно влияющими на $G_{\text{крит.}}$ являются концентрация и коэффициент распределения примеси. Этим обстоятельством объясняется выбор объектов исследования, поскольку коэффициенты распределения фосфора и сурьмы в кремнии отличаются на порядок величины.

Из приведенного выше обсуждения следует, что для реализации условий, в которых происходит формирование ППС, необходимо легировать кремний, причем чем выше концентрация примеси, тем с большей гарантией процесс кристаллизации расплава будет сопровождаться образованием ППС.

Рассмотрим вопрос, связанный с проблемой управления периодом ППС. В работе [3] приводится соотношение, связывающее размер ячеек (период ППС) x_0 и градиент температуры в расплаве:

$$G = m c_0 \frac{1-k}{x_0 k} \left[1 - \exp\left(-\frac{V x_0}{D}\right) \right]. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что с увеличением G период ППС уменьшается. Данное обстоятельство позволяет управлять периодом ППС не только варьированием типом и концентрацией примеси, но и изменяя условия импульсного воздействия (такие, например, как энергия и длительность импульса излучения).

Расчеты показывают, что изменяя тип примеси, ее концентрацию, а также условия кристаллизации (градиент температуры и скорость роста твердой фазы), можно в широких пределах варьировать период ППС, формирующихся под действием некогерентного излучения. При расчете использовались следующие значения входящих в формулы (1) и (2) параметров: $m = 3.4 \text{ K/\%}$, $k = 0.04$, $D = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$

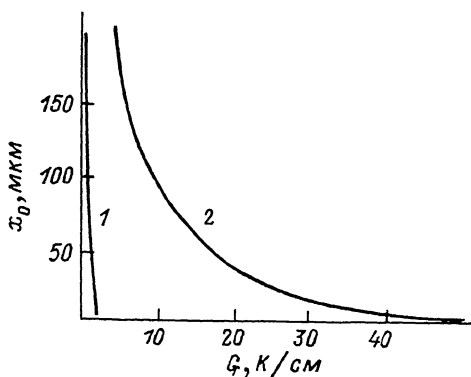


Рис. 2. Зависимость периода рельефа на поверхности кремния, легированного фосфором (1) и сурьмой (2), от градиента температуры.

(кремний, легированный сурьмой); $\mu = 5.5 \text{ K/\%}$, $k = 0.35$, $D = 5.1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ (кремний, легированный фосфором); $V = 0.1 \text{ см/с}$, $C_0 = 10^{-3} \%$.

Следует отметить, что имеются затруднения в определении концентрации примеси в жидкой фазе. Процесс кристаллизации расплава кремния связан с оттеснением движущейся межфазной границей растворенных примесей к поверхности образца. Формирование ППС наблюдается при наличии тангенциальных градиентов температуры. Таким образом, состав расплава к моменту начала образования ППС отличается от состава исходного образца. В этом направлении требуются дополнительные исследования и расчеты, однако можно с уверенностью сказать, что концентрация примеси при образовании ППС будет значительно выше, чем в исходной твердой фазе.

На рис. 2 представлены рассчитанные по формуле (2) зависимости периода ППС, сформированных в результате воздействия на мишени импульсов некогерентного излучения, от величины градиента температуры в расплаве кремния. При выбранных значениях параметров, входящих в формулу (1), критические значения градиента температуры при легировании кремния сурьмой и фосфором составляют соответственно 54 и 2 К/см; большая разница $G_{\text{крит}}$ обусловлена различием коэффициентов распределения S_B и ρ в Si .

Как следует из рис. 2, период ППС изменяется в широких пределах (от единиц до сотен микрометров), что подтверждается экспериментально (см. рис. 1).

Следует отметить, что при использовании импульсов некогерентного излучения имеются более широкие возможности в управлении периодом ППС по сравнению с лазерным воздействием. Большие длительности импульса позволяют искусственно создавать необходимые градиенты температуры и скорости роста твердой фазы в процессе облучения или кристаллизации расплава.

- [1] П л о т н и к о в А.И., Р е м б е з а С.И., Л о г и - н о в В.А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 10. С. 55.
 [2] Ч а л м е р с Б. Теория затвердевания. М.: Металлургия, 1968. 288 с.
 [3] Г и в а р г и з о в Е.И. Искусственная эпитаксия. М.: Наука, 1988. 176 с.

Воронежский
 политехнический
 институт

Поступило в Редакцию
 22 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 14

26 июля 1989 г.

06.2

РЕЛАКСАЦИЯ ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ КОНТАКТЕ
 РАСТВОРА-РАСПЛАВА $Sn - Al - Ga - As$
 С ПОДЛОЖКОЙ $GaAs$

С.Г. Ж и л е н и с, В.Ч. С т а н к е в и ч

Известно, что в многокомпонентных системах процесс релаксации неравновесной границы раздела „расплав-кристалл“ проходит путем растворения „старой“ или роста „новой“ твердой фазы с одновременным образованием диффузионного слоя, являющегося твердым раствором, содержащим все элементы жидкой и твердой фаз [1, 2]. Согласно работам [1, 3] в системе $Al - Ga - As / GaAs$ в процессе релаксации фазовой границы происходит лишь незначительное растворение подложки $GaAs$ с образованием на ее поверхности слоя твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ толщиной порядка 10 нм. Однако недавно нами обнаружено [4], что добавление олова в раствор-расплав $Al - Ga - As$ приводит к сильному растворению подложки $GaAs$ со скоростью порядка 10^{-3} см/с и образованию структуры типа полупроводник - металл- полупроводник, представляющей собой слой твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$, пространственно отделенный от подложки прослойкой металла. В данной работе приведены результаты исследования процесса формирования такой структуры при изотермическом контакте раствора-расплава $Sn - Al - Ga - As$ с подложкой $GaAs$.

Эксперименты проводились в кварцевом реакторе при 1000-1200 К в потоке H_2 с использованием графитовых контейнеров пенального типа. Компоненты для приготовления раствора-расплава закладывали в камеру на вспомогательную подложку $GaAs$ и выдерживали при заданной температуре в течение 90 мин. После отжига раствор-расплав при той же температуре на определенное время