

05.3; 07

ДИНАМИКА ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
ТОНКИХ АМОРФНЫХ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВС.Ю. Карпов, Ю.В. Ковальчук,
В.Е. Мясин, Ю.В. Погорельский,
М.Ю. Сипова, И.А. Соколов,
М.И. Этинберг

На сегодняшний день накоплен достаточный объем информации о динамике фазовых превращений кристаллических полупроводников под действием наносекундных лазерных импульсов. Экспериментально зарегистрированы основные этапы фазовых превращений: перегрев кристалла выше температуры плавления на 100–300 К, образование зародышей жидкой фазы, их развитие на фоне поступления световой энергии в полупроводник, формирование однородно расплавленного приповерхностного слоя и последующая эпитаксиальная кристаллизация материала из охлаждающегося расплава [1].

Картина фазовых превращений аморфных материалов оказывается существенно более сложной. Например, при оптическом зондировании поверхности ионно-имплантированного Si в ряде случаев наблюдается провал коэффициента отражения зондирующего света, расположенный во времени на переднем фронте интенсивности воздействующего импульса [2], а также осцилляции отражения на заднем фронте и после окончания действия импульса [3, 4]. Эти особенности не могут быть интерпретированы в рамках представлений, выработанных для кристаллических полупроводников.

Более сложное поведение аморфных полупроводников принято связывать с различием температур плавления аморфного и кристаллического материалов ($T_{c1} - T_{a1} \approx 250$ К [5]). В этих условиях жидкая фаза, появляющаяся при плавлении аморфного полупроводника, оказывается переохлажденной относительно температуры плавления кристалла T_{c1} . Считается, что в результате становится возможным образование из нее кристаллического материала. Такая „промежуточная” кристаллизация может объяснить наблюдаемый в [2] провал на временной зависимости коэффициента отражения.

Дополнительной особенностью аморфного материала является то, что скрытая теплота кристаллизации превышает его теплоту плавления. Если в процессе лазерного воздействия избыток тепла, выделившийся из-за „промежуточной” кристаллизации, не компенсируется теплопроводом в подложку, то плавление и кристаллизация аморфного слоя становится самоподдерживающимся. Это проявляется в образовании так называемого заглубленного расплава, дающего при оптическом зондировании поверхности осцилляции коэффициента отражения [3, 4].

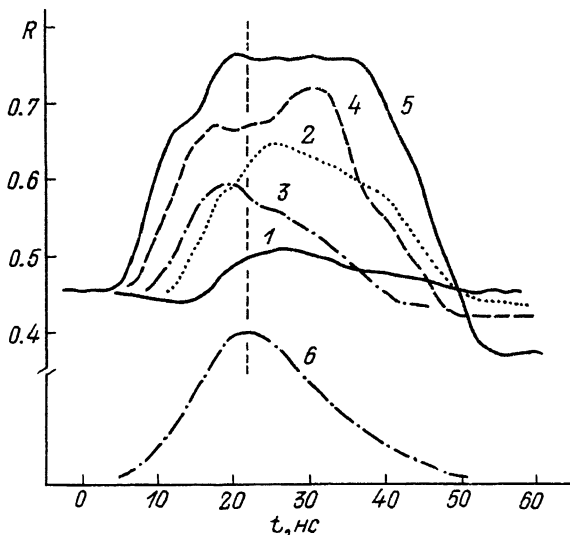


Рис. 1. Временные зависимости коэффициента отражения зондирующего света ($\lambda = 0.63$ мкм) при различных плотностях энергии воздействия: 1 - 112 мДж/см², 2 - 146 мДж/см², 3 - 181 мДж/см², 4 - 260 мДж/см², 5 - 380 мДж/см²; 6 - интенсивность воздействующего импульса.

Следует отметить, что выявленные особенности аморфных полупроводников не дают замкнутой картины фазовых превращений, протекающих при наносекундном воздействии. Наименее ясным остается вопрос о начальном этапе „промежуточной“ кристаллизации. Действительно, согласно оценкам (см., например, [2, 6]) скорость гомогенного образования зародышей кристаллической фазы из расплава слишком мала, чтобы заметно проявиться в эксперименте. С другой стороны, для гетерогенного зародышеобразования требуется присутствие в расплаве центров нуклеации с достаточно высокой концентрацией ($> 10^{18}$ см⁻³). Вопрос о возможной природе этих центров в настоящее время является открытым. В то же время, прямые экспериментальные данные, позволяющие уверенно судить о механизме „промежуточной“ кристаллизации, до сих пор отсутствуют.

В данной работе представлены результаты исследования динамики плавления и кристаллизации тонких ионно-имплантированных аморфных слоев кремния.

В качестве образцов использовались химически полированные пластины Si (111). Имплантация ионов Sb⁺ с дозой $1.6 \cdot 10^{15}$ см⁻² и энергией 60 кэВ приводила к аморфизации приповерхностного слоя толщиной ~ 500 Å. Малая глубина аморфизации была выбрана для того, чтобы исключить образование в процессе лазерного воздействия заглубленного расплава (одним из возможных способов подавления процесса формирования заглубленного расплава является уси-

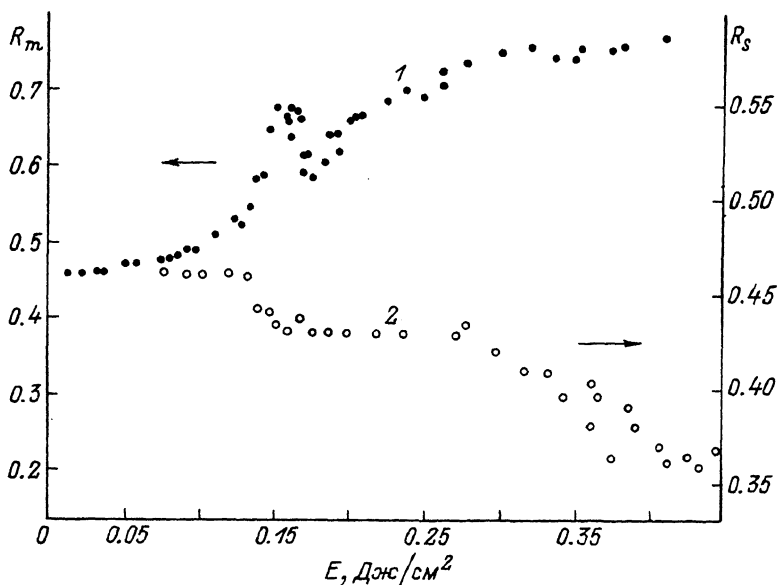


Рис. 2. Зависимость максимального значения коэффициента отражения R_m (1) и коэффициента отражения закристаллизовавшегося полупроводника R_s (2) от плотности энергии лазерного воздействия.

ление теплоотвода в подложку; отметим, что теплопроводность аморфного Si примерно на порядок меньше теплопроводности кристалла).

Облучение образцов проводилось импульсами $YAG : Nd^{3+}$ лазера, работающего на основной TEM_{00} -режиме в режиме модуляции добротности (длина волны излучения $\lambda_{\text{л}} = 0.53$ мкм, длительность импульса на полувысоте $\tau_{\text{л}} = 20$ нс). Зондирование поверхности образцов в процессе лазерного воздействия осуществлялось на двух длинах волн излучения $He-Ne$ лазера ($\lambda = 0.63, 1.15$ мкм; угол падения луча на образец $\theta \approx 24.5^\circ$; s - поляризация). Соотношение диаметров зондирующего и воздействующего пучков ($\sim 1:15$) обеспечивало точность определения плотности энергии в точке зондирования на уровне $\sim 3\%$. Временное разрешение системы, регистрирующей отражение зондирующего света, составляло ~ 2 нс.

На рис. 1 показаны временные зависимости $R(t)$ коэффициента отражения зондирующего света ($\lambda = 0.63$ мкм) при разных плотностях энергии E воздействующего импульса. При малых E (кривая 1) наблюдается небольшое повышение коэффициента отражения, соответствующее частичному плавлению приповерхностного слоя (расплавленный Si проявляет металлические свойства, поэтому измерение динамики коэффициента отражения является традиционным способом регистрации плавления полупроводника). С увеличением E (кривая 2) растет доля расплавленного материала, соответственно увеличиваются амплитуда пика отражения и время существования жидкой фазы. В целом поведение зависимостей $R(t)$ при $E <$

< 0.17 Дж/см² соответствует поведению, наблюдаемому на кристаллических полупроводниках [1]. Однако дальнейшее повышение плотности энергии приводит к уменьшению максимально достигаемого значения R , а также времени существования расплава на поверхности полупроводника (кривая 3). Эта особенность выявляется на зависимости максимального значения коэффициента отражения R_m от E (рис. 2, кривая 1). Видно, что после плавного нарастания величина R_m скачком уменьшается от 0.66 до 0.58 при плотности энергии облучения $E \approx 0.17$ Дж/см². Дальнейшее увеличение E снова приводит к росту коэффициента отражения, и при $E > 0.4$ Дж/см² величина R_m выходит на уровень ~ 0.77 , соответствующий отражению от однородно расплавленного материала (временные зависимости $R(t)$, соответствующие большим плотностям энергии, представлены на рис. 1 кривыми 4 и 5).

Отметим, что аналогичное поведение отражения регистрируется на длине волны зондирования $\lambda = 1.15$ мкм. Это означает, что наблюдаемые особенности не связаны с интерференционными эффектами, а имеют причину, лежащую в самом процессе фазовых превращений.

Сравним теперь данные, полученные в динамике с конечным результатом лазерного воздействия. С этой целью был измерен коэффициент отражения R_S от поверхности полупроводника после ее затвердевания. Измерения проводились в той же точке, в которой перед этим осуществлялась регистрация динамики отражения в процессе воздействия. Результаты для $\lambda = 0.63$ мкм представлены на рис. 2 (кривая 2). Видно, что при $E \geq 0.4$ Дж/см² величина R_S выходит на уровень отражения кристаллического материала. В этом случае аморфный слой проплавляется вплоть до кристаллической подложки, в результате чего создаются условия для эпитаксиальной кристаллизации твердой фазы из расплава. При $E < 0.3$ Дж/см² аморфный слой плавится лишь частично. Следует обратить внимание на то, что в интервале $0.16-0.18$ Дж/см², где в динамике наблюдается скачок максимального значения R , отражение облученного материала сохраняется на постоянном уровне, лежащем между уровнями отражения кристалла и аморфного слоя. Аналогичное поведение R_S наблюдается на длине волны $\lambda = 1.15$ мкм.

Промежуточное значение R_S может быть связано с образованием поликристалла на поверхности [3] или же с вкраплением кристаллитов в аморфную матрицу [7]. Важно, что данные, полученные на разных длинах волн, свидетельствуют о постоянстве общего количества закристаллизовавшегося материала в интервале плотности энергии $0.16-0.18$ Дж/см².

Обсудим полученные результаты. Согласно экспериментальным данным количество расплавленного материала (характеризующееся амплитудой пика отражения зависимости $R(t)$) и длительность существования жидкой фазы уменьшаются скачком в интервале плотностей энергии $0.16-0.18$ Дж/см². В то же время количество закристаллизовавшегося материала (характеризующееся величиной R_S) в этом интервале сохраняет постоянное значение. Следует отметить,

что образование твердой фазы при наносекундном воздействии должно происходить только из расплава, т.к. процесс твердофазной кристаллизации является слишком медленным (чтобы он заметно проявился в эксперименте, требуются времена нагрева $\sim 10^{-6}$ с [8]). Поэтому результат, полученный в данной работе, на сегодняшний день представляется непонятным и требует дальнейшего изучения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Карпов С.Ю., Ковальчук Ю.В., Погорельский Ю.В. В сб.: Физические основы лазерной и пучковой технологии. Сер.: Итоги науки и техники ВИНТИ. М.: 1988. Т. 1. С. 5-48.
- [2] Ivlev G.D., Malevich V.L. // Phys. Stat. Sol(a). 1984. V. 103. P. K87-K91.
- [3] Lowndes D.H., Jellison G.E.(Jr.), Pennycook S.J., Withrow S.P., Mashburn D.H. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. P. 1389-1391.
- [4] Bruines J.J.P., Van Hal R.P.M., Boots H.M.J., Polman A., Saris F.W. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. P. 1160-1162.
- [5] Donovan E.P., Spaepen F., Turnbull D., Poate J.M., Jacobson D.C. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 5. P. 1795-1802.
- [6] Tsao J.Y., Peercy P.S. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 2782-2785.
- [7] Bruines J.J.P., Van Hal R.P.M., Koek B.H., Vieggers M.P.A., Boots H.M.J. In: Beam-Solid Interactions and Transient Processes. Ed. M.O.Thompson, S.T. Picraux, J.S. Williams, Pittsburgh, 1987. P. 91-102.
- [8] Olson G.L., Roth J.A., Nygren E., Pogany A.P., Williams J.S. In: Beam-Solid Interactions and Transient Processes Ed.: M.O. Thompson, S.T. Picraux, J.S. Williams, Pittsburgh, 1987. P. 109-115.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
7 июня 1989 г.