

05; 07

© 1992

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТОНКИХ АМОРФНЫХ СЛОЯХ КРЕМНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОНОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.П. Ж в а в ы й, О.Л. С а д о в с к а я

К настоящему времени определены основные закономерности наносекундного лазерного отжига ионно-имплантированных слоев кремния. Было показано [1, 2], что при плотностях энергии воздействующего импульса ниже порога эпитаксиального отжига аморфный кремний ($a-Si$) частично трансформируется в крупнозернистый поликристаллический кремний ($LQ\ p-Si$) в приповерхностной области и лежащий под ним мелкозернистый ($FQ\ p-Si$). Формирование слоев $FQ\ p-Si$ и $LQ\ p-Si$ связано с образованием сильно переохлажденного расплава ($sL-Si$) в результате плавления $a-Si$ при температуре T_{ma} на 250 К [3] ниже температуры плавления монокристаллического кремния ($c-Si$) T_{mc} и его последующей кристаллизацией. В [3, 4] было предложено, что первичный расплав, образованный в приповерхностной области под действием лазерного излучения, кристаллизуясь образует слой $LQ\ p-Si$. Так как скрытая теплота кристаллизации больше, чем скрытая теплота плавления $a-Si$ ($L_a = 0.7 L_c$ [3]), то при определенных условиях выделяемая энергия может вызвать плавление глубже лежащего $a-Si$. При кристаллизации вторичного расплава образуется $FQ\ p-Si$, а выделяемая энергия вновь идет на плавление $a-Si$. Таким образом, в результате плавления на ведущей $sL-Si/a-Si$ границе раздела и кристаллизации на задней $FQ\ p-Si/sL-Si$ границе возникает самоподдерживающееся распространение скрытого (заглубленного) слоя расплава. Однако в этой модели формирования слоев $LQ\ p-Si$ и $FQ\ p-Si$ вопрос о начальной стадии кристаллизации остается открытым. Для изучения начальной стадии лазерного отжига и выяснения механизма кристаллизации в работе [5] были использованы тонкие ($h \sim 0.05$ мкм) слои $a-Si$. В этом случае процесс распространения заглубленного слоя расплава удается подавить усилением теплоотвода в подложку.

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования динамики фазовых переходов при наносекундном ($\lambda = 0.53$ мкм и $\tau = 20$ нс) лазерном отжиге тонкого слоя $a-Si$ на монокристаллической подложке и проводится сравнение рассчитанных временных зависимостей коэффициента отражения зондирующего ($\lambda = 0.63$ мкм) излучения с экспериментальными данными [5].

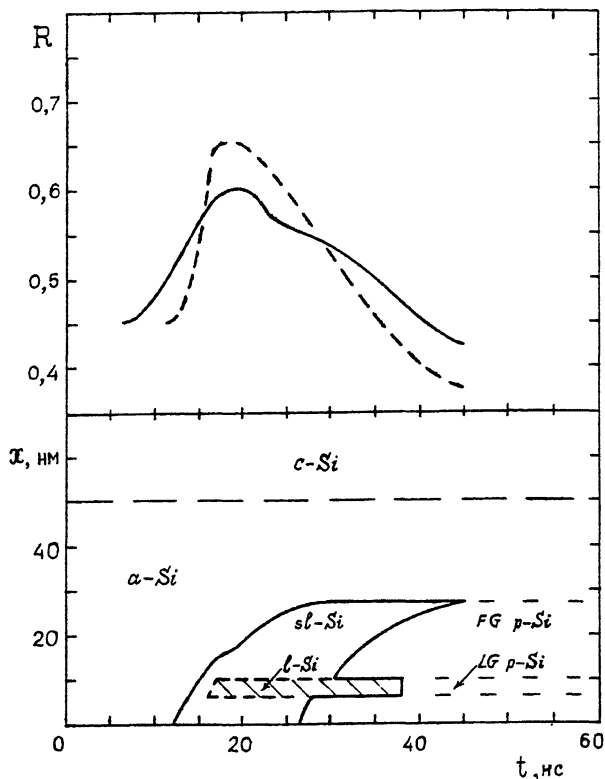


Рис. 1. Временные зависимости коэффициента отражения зондирующего излучения и положения фронта плавления при $E=0.181 \text{ Дж/см}^2$; штриховая линия - рассчитанные значения $R(t)$, сплошная - экспериментальные данные [5].

При решении задачи использовалась математическая модель [6, 7], в основу которой было положено предположение о существовании готовых зародышей кристаллической фазы в образовавшемся при плавлении α -Si сильно переохлажденном расплаве.

На рис. 1 и 2 показаны временные зависимости коэффициента отражения зондирующего излучения и глубины проникновения фронта плавления при плотности энергии воздействующего импульса $E=0.181 \text{ Дж/см}^2$ и 0.26 Дж/см^2 . Как следует из расчетов, плавление начинается через ~ 15 нс (рис. 1) после начала воздействия лазерного излучения, и к этому моменту перегрев приповерхностного слоя α -Si достигает значений $\Delta T = T - T_{m\alpha} \sim 40$ К. По мере продвижения фронта плавления происходит рост коэффициента отражения. Поглощение скрытой теплоты при плавлении α -Si снимает перегрев и сильно уменьшает темп нагрева sl -Si, что создает

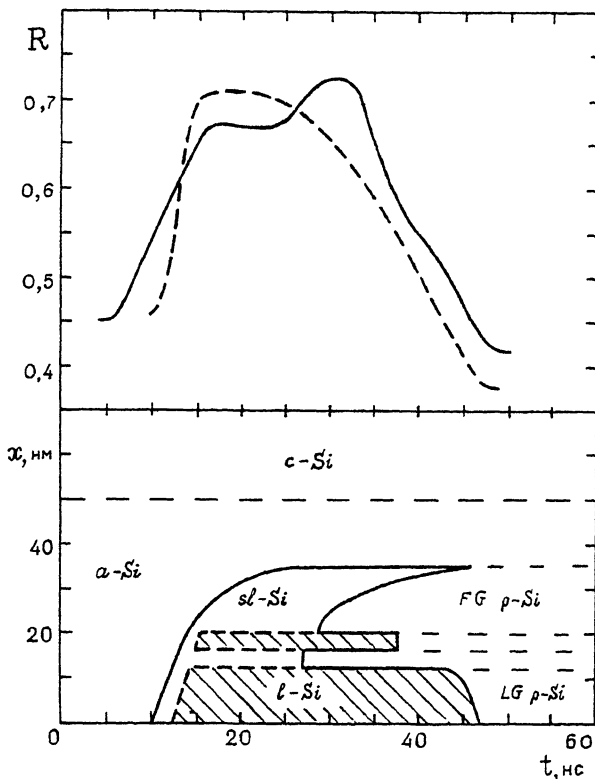


Рис. 2. Временные зависимости коэффициента отражения зондирующего излучения и положения фронта плавления при $E=0.26$ Дж/см²; штриховая линия - рассчитанные значения $R(t)$, сплошная - экспериментальные данные [5].

благоприятные условия для роста кристаллитов $FG p-Si$ на готовых зародышах. Выделение в приповерхностной области скрытой теплоты кристаллизации приводит к тому, что в соседней глубже лежащей области темп нагрева $sl-Si$ увеличивается и достигает значений, превышающих критическую скорость, при которой еще возможен рост кристаллитов $FG p-Si$. В результате под тонким приповерхностным слоем $FG p-Si$ образуется слой однородного расплава кремния ($l-Si$), где зародыши кристаллической фазы растворяются и условия для формирования $FG p-Si$ исчезают. Таким образом, за фронтом плавления $a-Si$ по смешанному слою, состоящему из $sl-Si$ и растущих кристаллитов $FG p-Si$, перемещается граница раздела $l-Si/sl-Si$. Однако усиление теплоотвода в подложку и поглощение теплоты при плавлении $a-Si$

и кристаллитов $FG \rho - Si$ приводят вновь к уменьшению скорости нагрева и движение границы раздела $l - Si / sZ - Si$ прекращается. В дальнейшем фронт плавления $a - Si$ продолжает распространяться, поддерживаемый лазерным излучением и выделяемым теплом при кристаллизации $sZ - Si$, а $l - Si$ не образуется, так как подводимой энергии уже недостаточно для создания высокого темпа нагрева. Как видно из рис. 1 по окончанию процесса отжига в приповерхностной области будет сформирован слой $FG \rho - Si$ толщиной ~ 0.03 мкм.

При больших значениях плотности энергии воздействующего импульса (рис. 2) на начальном этапе процессы полицентровой кристаллизации $sZ - Si$ практически не сказываются на динамике отжига. В этом случае темп нагрева $sZ - Si$ достаточно высок, что обеспечивает формирование на поверхности слоя однородного расплава толщиной ~ 0.01 мкм, который при остывании образца трансформируется в $LG \rho - Si$ благодаря гомогенному механизму зародышеобразования. Однако рост коэффициента отражения и поглощение скрытой теплоты при плавлении $a - Si$ и кристаллитов $FG \rho - Si$ уменьшают темп нагрева $sZ - Si$ и в дальнейшем процесс лазерного отжига происходит аналогично рассмотренному выше (рис. 1). В результате отжига в приповерхностной области будет сформирован слой $LG \rho - Si$ толщиной ~ 0.01 мкм и лежащий под ним $FG \rho - Si$ слой. Как следует из расчетов, с увеличением плотности энергии воздействующего импульса увеличивается и толщина $LG \rho - Si$ слоя.

Как видно из рис. 1 и 2, рассчитанные временные зависимости коэффициента отражения зондирующего излучения удовлетворительно согласуются с экспериментальными [5]. Таким образом, предположение о существовании готовых зародышей кристаллической фазы в образующемся сильно переохлажденном расплаве при наносекундном лазерном отжиге ионно-имплантированного кремния позволяет объяснить экспериментально наблюдаемые закономерности.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] N a r a y a n J., W h i t e C.W. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44. N 1. P. 35-37.
- [2] N a r a y a n J., W h i t e C.W., H o l l a n d O.W., A z i z M.J. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. N 6. P. 1861-1824.
- [3] T h o m p s o n M.O., G a l v i n G.J., M a y e r J.W. et al. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52. N 26. P. 2360-2363.
- [4] S i n k e W., S a v i s F.W. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 53. N 22. P. 2121-2124.

- [5] Карпов С.Ю., Ковальчук Ю.В., Мячин В.Е.
и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17.
С. 13-17.
- [6] Жвавый С.П. // ЖПС. 1989. Т. 50. В. 4.
С. 589-595.
- [7] Жвавый С.П., Садовская О.Л. // Поверх-
ность. Физика, химия, механика. 1990. Т. 11. С. 101-
106.

Институт электроники
АН БССР,
Минск

Поступило в Редакцию
25 декабря 1991 г.