

05.1; 06.2

© 1991

ДИНАМИКА ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНКИ КРЕМНИЯ
НА СЛОЕ ДИЭЛЕКТРИКА ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ
ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИЮ.А. Манжосов, А.В. Двуреченский,
Г.Д. Ивлев

Наносекундные лазерные воздействия на слоистые объекты типа кремниевая пленка на диэлектрике (КНД) вызывают как научный, так и практический интерес благодаря возможности получения новых данных о протекании нестационарных явлений и перспективного использования для создания полупроводниковых приборов с трехмерной интеграцией [1]. Однако существенным недостатком этого метода перекристаллизации был малый размер кристаллитов кремния, не превышающий 2 мкм [2]. В последнее время [3, 4] показано, что нагрев образцов вплоть до температуры 1300 °С при одновременном лазерном облучении позволяет в десятки раз увеличивать размер кристаллических блоков в перекристаллизованной пленке.

Представляемое сообщение является продолжением этих исследований и посвящено изучению динамики перекристаллизации пленок КНД при наносекундном лазерном облучении с дополнительным нагревом.

Исходные образцы представляли собой окисленные кремниевые подложки со слоем SiO_2 толщиной 150 нм, на которую осаждалась пленка поликристаллического кремния толщиной 200 нм. На части образцов вместо слоя SiO_2 использовалась пленка Si_3N_4 толщиной 80 нм. Облучение проводилось светом лазера на длине волны $\lambda = 694$ нм с длительностью импульса 70 нс, плотностью энергии $W = 0.3-2.5$ Дж/см² в пятне диаметром 3,5 мм и од-

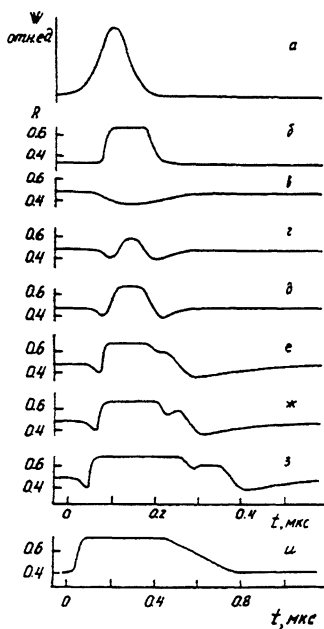


Рис. 1. Осциллограммы импульса лазера (а), сигнала зондирующего излучения, отраженного от монокристаллического Si (б) и от структуры КНД (в-и), $T_p, ^\circ C$: б-з - 23, и - 800; W , Дж/см²: б, ж - 1.4, в - 0.53, г - 0.65, (д, и) - 0.81, е - 1.25, з - 2.0.

нородностью энергии по площади лучше 10% [5]. Для наблюдения за поведением объекта во время лазерного воздействия использовался метод нестационарного отражения света с временным разрешением лучше 5 нс [6]. Зондирующий лазерный луч с длиной волны света $\lambda = 532$ нм диаметром 1 мм направлялся под углом 60° к поверхности образца в центр зоны, облучаемой основным лазером. Система стационарного светового

нагрева позволяла одновременно облучать и зондировать образцы, нагретые вплоть до $1000^\circ C$.

Изменение формы отраженного сигнала при увеличении плотности энергии лазерного воздействия и температуры подогрева подложки (T_p) представлено на рис. 1, в-и. Из осциллограмм видно, что амплитуда и форма сигнала, отраженного от слоистой структуры, существенно отличаются от сигнала, получаемого в аналогичных условиях от монокристаллического кремния с коэффициентом отражения $R = 0.69$ при полном плавлении поверхности [7] (рис. 1, б). Облучение структур КНД без дополнительного нагрева вызывает появление минимумов в отражении перед началом плавления и после окончания кристаллизации пленки кремния (рис. 1, г-з). Облучение с $W = 1.25$ Дж/см² и выше приводит к возникновению на осциллограмме второго плато с R , равным 0.6. При $W = 1.4$ Дж/см² и выше наблюдается спад между первым и вторым плато (рис. 1, ж, з). Дополнительный нагрев структуры КНД до температуры $800-1000^\circ C$ при импульсном лазерном облучении приводит к тому, что на осциллограмме отраженного зондирующего сигнала исчезают минимумы и второе плато (рис. 1, и). При перекристаллизации пленки кремния на Si_3N_4 второе плато не наблюдается.

Длительность существования расплава на поверхности (t_p) определялась по осциллограммам как промежуток времени между началом плавления и окончанием затвердевания пленки кремния. Из графиков (рис. 2) видно, что t_p изменяется в широком интервале от 0.1 до 5.4 мкс при увеличении T_p от комнатной до $1000^\circ C$. На каждом графике минимальное значение W является порогом

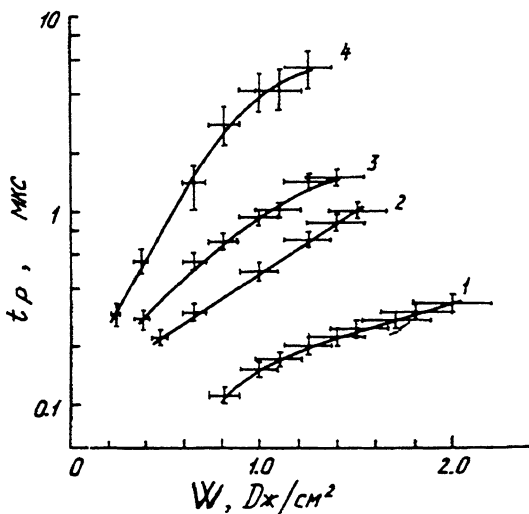


Рис. 2. Зависимость времени существования расплава на поверхности структуры КНД от плотности энергии лазерного воздействия и температуры подогрева подложки, $T_{\text{п}}$, °С: 1-23, 2- 600, 3 - 800, 4 - 1000.

полного плавления поверхности при соответствующей $T_{\text{п}}$, а максимальное - порогом разрушения пленки кремния.

Отличие формы зондирующего сигнала, отраженного слоистой структурой от сигнала, получаемого при лазерном облучении монокристалла, на наш взгляд, обусловлено действием двух основных факторов: интерференцией света в тонкопленочной структуре и с особенностями кристаллизации расплава кремния на SiO_2 .

Коэффициент поглощения света α с $\lambda = 532$ нм в кремнии при комнатной температуре приблизительно равен $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$, из чего следует, что в пленке толщиной 200 нм поглотится 10% проходящего через нее излучения, остальная часть поглотится в подложке и отразится от границы двуокись кремния-подложка, интерферируя со светом, отраженным от поверхности образца. Нагрев пленки кремния вызывает увеличение α по закону $\alpha(T) = 5020 \cdot e^{T/430} \text{ см}^{-1}$, где T - температура в градусах Цельсия [8], и при достижении 1000 °С $\alpha = 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$, при этом в пленке поглотится уже 50% проходящего излучения, условия для интерференции ухудшаются, что приводит к уменьшению R приблизительно до величины, соответствующей величине отражения от монокристалла. Этим объясняется образование минимумов перед началом и после окончания кристаллизации и их исчезновение при облучении с нагретой до 600-1000 °С подложкой. По длительности подъема и спада R нами сделаны оценки скоростей нагрева и охлаждения пленки КНД, которые оказались соответственно $(0.5-1.5) \cdot 10^{10}$

и $(2-4) \cdot 10^9$ К/с в диапазоне температур 20-600 °С.

Возникновение второго плато с $R = 0,6$ связано, на наш взгляд, с появлением в приповерхностной области кристаллизующейся пленки кремния, стационарного состояния сосуществования жидкой и твердой фаз, что происходит, по-видимому, из-за локального изменения температуры кристаллизации расплава кремния при растворении в нем расплава SiO_2 (см. фазовую диаграмму $Si-O$ в [9]). Отсутствие второго плато при перекристаллизации кремния на Si_3N_4 указывает в пользу этого предположения. Кроме того, на возможность плавления SiO_2 указывают результаты численного моделирования [10]. Локальное плавление SiO_2 может происходить из-за неоднородности оптических и теплофизических характеристик структуры КНД, а также вследствие пространственно-временной микронеоднородности лазерного излучения.

Исчезновение второго плато при повышении T_p объясняется, по-видимому, отсутствием смеси жидкой и твердой фаз Si , появление которой связывалось бы с локальным изменением температуры кристаллизации расплава кремния. Вызвано это, возможно, тем, что в данных условиях облучения в 5-25 раз возрастает время существования расплава, что приводит к увеличению длины диффузии тепла и к выравниванию неоднородностей в распределении температуры расплава кремния. В то же время не исключено, что для объяснения процесса затвердевания пленки кремния при облучении ее в широком диапазоне плотностей энергий необходимо учитывать влияние других факторов, например, зародышеобразование на поверхности расплава [11].

Измерение динамики отраженного сигнала с привлечением данных работы [3] позволило сделать оценки усредненных скоростей зародышеобразования (J) и кристаллизации ($v_{кр}$) в расплаве кремния на SiO_2 (таблица). В основу расчетов положено гетерогенное зародышеобразование на границе расплав $Si-SiO_2$ с дальнейшим разрастанием кристаллитов в вертикальном и горизонтальном направлениях. Скорость кристаллизации определялась по времени существования расплава и усредненному размеру кристаллитов, а также по длительности спада R от 0,69 до 0,4 и толщине зондируемого слоя расплава (50 нм) с учетом неоднородности выхода кристаллитов на поверхность [6]. J определялась по формуле $J = N \cdot t_{зарод}^{-1}$, где N - плотность кристаллитов в перекристаллизованной пленке [3], $t_{зарод}$ - время, в течение которого происходит образование зародышей, определяемое из длительности t_p за вычетом времени плавления и кристаллизации. Полученные значения $v_{кр}$ и J хорошо согласуются с величинами, получаемыми из уравнения

$$V = \sqrt[4]{\frac{4\pi}{3} \left(\frac{v_{кр}}{J}\right)^3},$$

(где V - объем, в котором в среднем вырастает один зародыш), предложенного Фольмером [12] для описания структуры закристаллизованной фазы. Значительное уменьшение $v_{кр}$ и J при повы-

Т а б л и ц а

$T_{\text{п}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	23	600	800	1000
$J, \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	10^{18}	$3 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{15}$	10^{15}
$\sigma_{\text{кр}}, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	3	1	0,5	0,2

шении $T_{\text{п}}$ указывает на существенное снижение переохлаждения расплава, которое происходит из-за уменьшения потока тепла в подложку.

Таким образом, проведенное исследование динамики перекристаллизации пленки кремния на диэлектрике позволило установить, что нагрев подложки от комнатной температуры до $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при одновременном лазерном облучении приводит к увеличению времени существования расплава на поверхности пленки кремния в несколько десятков раз, уменьшению скорости зародышеобразования на три порядка, и скорости кристаллизации – в пятнадцать раз. Определены скорости нагрева и охлаждения пленки кремния при лазерном облучении, которые оказались равны $(0,5-1,5) \cdot 10^{10}$ и $(2-4) \cdot 10^9 \text{ К/с}$ соответственно. Сделано предположение, что во время наносекундного лазерного нагрева структуры КНД возможно локальное плавление SiO_2 и его растворение в расплаве кремния, приводящее к изменению температуры кристаллизации и возникновению в приповерхностной области стационарного состояния сосуществования жидкой и твердой фаз кремния длительностью порядка 10^{-7} с . При облучении с нагревом образцов до $600-1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ такое состояние, по-видимому, отсутствует, что можно объяснить выравниванием неоднородностей в распределении температуры расплава.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Seller G.K. // J. Cryst. Growth. 1983. V. 63. N. 3. P. 429-440.
- [2] Tamura M., Okhura M., Tokuyama T. // Jap. J. Appl. Phys. 1982. V. 21-1. Suppl. 21-1. P. 193-198.
- [3] Манжосов Ю.А., Качурин Г.А., Плотников А.Е. // Поверхность. 1989. № 2. С. 138-140.
- [4] Manzhosov Yu.A., Kachurin G.A. Phys. Stat. Sol. (a). 1990. V. 117. P. K29-K32.
- [5] Ивлев Г.Д., Малевич В.Л. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 12. С. 2584-2586.
- [6] Ивлев Г.Д. // ФТП. 1985. Т. 19. № 12. С. 2188-2190.
- [7] Шварев К.М., Баум Б.А., Гельд П.В. // ФТТ. 1974. Т. 16. № 11. С. 3246-3248.

- [8] K w o n g D.L., K i m D.M. In: Laser-Solid Inter. and Trans. Thermal Proc. of Mater. / Ed. by Narayan J., Brown W.L., Lemons R.A. North-Holland, 1983. P. 111-116.
- [9] Ч и с т я к о в Ю.Д., Р а й н о в а Ю.П., М а л и - н и н А.Ю. Сб. науч. тр. по проблемам микроэлектроники. М.: МИЭТ, 1972. С. 174-183.
- [10] A l e k s a n d r o v L.N., B a l a n d i n V.Yu., D v u r e c h e n s k i i A.V., and K u l y - a s o v a O.A. // Phys. Stat. Sol. (a). 1988. V. 109, P. K27-K29.
- [11] B a t i s c h c h e S.A., D e m c h u k A.V., K u z m u k A.A., L a b u n o v V.A., M o s - t o v n i k o v V.A., and T a t u r G.A. // Appl. Phys. 1990. V. 50A. N 3. P. 321-324.
- [12] Ф о л ь м е р М. Кинетика образования новой фазы. М.: Наука, 1986. 208 с.

Поступило в Редакцию
9 марта 1991 г.