

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ю. А. Манжосов, А. В. Двуреченский,
Г. Д. Ивлев, Динамика перекристаллиза-
ции пленки кремния на слое диэлектри-
ка при наносекундном лазерном воздей-
ствии, *Письма в ЖТФ*, 1991, том 17, вы-
пуск 10, 58–63

Использование Общероссийского математического портала
Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны
с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.175

15 февраля 2025 г., 23:55:00



05.1; 06.2

© 1991

ДИНАМИКА ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНКИ КРЕМНИЯ
НА СЛОЕ ДИЭЛЕКТРИКА ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ
ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИЮ.А. М а н ж о с о в , А.В. Д в у р е ч е н с к и й ,
Г.Д. И в п е в

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-

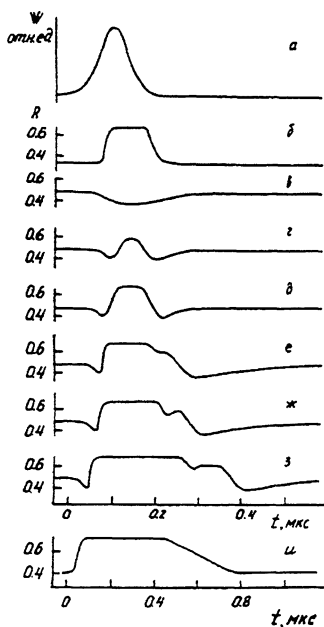


Рис. 1. Осциллограммы импульса лазера (а), сигнала зондирующего излучения, отраженного от монокристаллического Si (б) и от структуры КНД (в-и), $T_p, ^\circ C$: б-з - 23, и - 800; W , Дж/см²: б, ж - 1.4, в - 0.53, г - 0.65, (д, и) - 0.81, е - 1.25, з - 2.0.

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 $600-1000^\circ C$ 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

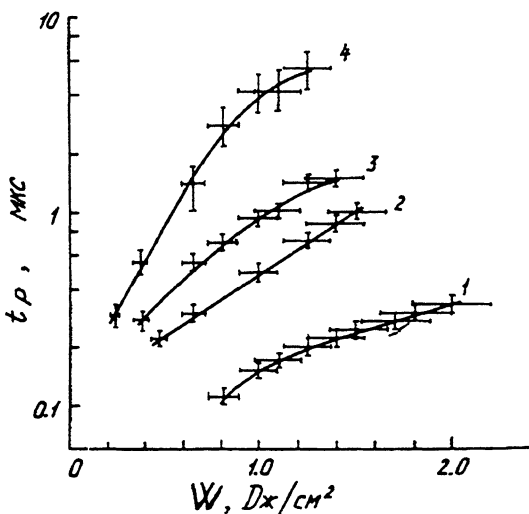


Рис. 2. Зависимость времени существования расплава на поверхности структуры КНД от плотности энергии лазерного воздействия и температуры подогрева подложки, $T_{\text{п}}$, °С: 1-23, 2- 600, 3 - 800, 4 - 1000.

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 $T_{\text{п}}$ 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 ($v_{\text{кр}}$) 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 $J = N \cdot t_{\text{зарод}}^{-1}$, где N - плотность кристаллитов в перекристаллизованной пленке [3], $t_{\text{зарод}}$ - время, в течение которого происходит образование зародышей, определяемое из длительности t_p за вычетом времени плавления и кристаллизации. Полученные значения $v_{\text{кр}}$ и J хорошо согласуются с величинами, получаемыми из уравнения

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

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

Т а б л и ц а

T_{II} , °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_{II} 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°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 $(2-4) \cdot 10^9$ 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 $600-1000^\circ\text{C}$ 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] Cellier 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., Малевиц 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.