

УДК 621.315.592

**МЕХАНИЗМ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ SiO₂/Si
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СКАНИРУЮЩИМ ПУЧКОМ ИМПУЛЬСНОГО
ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА**

А.М. Скворцов, Хуинь Конг Ту, Р.А. Халецкий

Рассматривается механизм микроstructuring системы SiO₂/Si при облучении импульсным волоконным лазером ИЛИ-1-50 с применением режима сканирования лазерного пучка. Приведены результаты микроstructuring при такой мощности излучения, когда происходит локальное плавление – кристаллизация кремния, но не разрушается пленка SiO₂. Показано, что при малых дозах облучения (облучение в сходящихся лучах лазера) плавление кремния локализуется на поверхности кремния на структурных дефектах, в частности, в местах выхода на поверхность дислокаций, генерируемых лазерным облучением. Показано, что с ростом дозы облучения вначале происходит увеличение площади областей расплава, затем – смыкание этих областей и образование протяженных узких «каналов» расплава. При этом пленка SiO₂ приобретает морфологию структурированной поверхности кремния.

Ключевые слова: лазерное облучение, плавление кремния, кристаллизация, структурные дефекты, дислокации, микроstructuring, сканирование.

Введение

На основе кремния изготавливается до 95% всех видов полупроводниковых устройств, в том числе изделий интегральной микроэлектроники. В настоящее время традиционная микроэлектроника вплот-

ную приблизилась к своим физическим пределам, в частности, в отношении размеров активных элементов. Так, например, в микропроцессорах, выпускаемых ведущими компаниями-производителями микросхем по 32 нм-технологии, достигнуты следующие размеры областей затворной композиции МОП-транзисторов: длина затвора 32 нм, длина канала 25 нм, толщина подзатворного слоя диоксида кремния 1,2 нм. В связи с этим, наряду с сохранением тенденции дальнейшего снижения размеров элементов при традиционной технологии ультрабольших интегральных схем (УБИС), проводятся интенсивные исследования по созданию нанокомпозитных материалов и разработке принципиально новых методов конструирования изделий наноэлектроники [1–3]. К таким новым нанокомпозитам можно отнести тонкие пленки диоксида кремния со встроенными в них нанокристаллами кремния [4].

С начала нового тысячелетия расширился круг исследований, направленных на создание устройств оптоэлектроники на основе кремния (кремниевой фотоники). Это обусловлено открытием в 1990 году Л. Кэнхемом интенсивной фотолюминесценции в пористом кремнии [5]. Оказалось, что могут быть получены излучатели фотонов в широком спектральном диапазоне в зависимости от размеров кристаллических наночастиц кремния в слое пористого кремния. Эти слои, по существу, представляют собой структуры из окисленных нанокристаллов и нанокристаллических нитей кремния. Позднее была показана возможность люминесценции в других структурах, содержащих нанокристаллы кремния в пленках диоксида кремния, выращенных на кремниевых подложках, имеющих высокую плотность нанокристаллов кремния [6–8]. Работы по созданию нанокомпозитов с подобной структурой являются актуальными как для создания устройств вычислительной техники, так и для элементов кремниевой фотоники. Авторами уже было показано [9], что для формирования таких нанокомпозитов может быть применено лазерное микроstructuring термически окисленных кремниевых пластин (системы SiO₂/Si).

В настоящей работе приведены результаты исследования процессов микроstructuring системы SiO₂/Si путем сканирования поверхности системы излучением иттербиевого волоконного импульсного лазера при дозах облучения от начала микроплавления кремния (граничная доза) до мощностей, при которых плавление кремния не сопровождается разрушением пленки диоксида кремния.

Методика эксперимента

В качестве экспериментальных образцов использовались пластины монокристаллического кремния КДБ-10, ориентированные в кристаллографической плоскости (111). На пластинах методом термического окисления во влажном кислороде был выращен слой SiO₂ толщиной 150 нм.

Для облучения системы SiO₂/Si использовался импульсный иттербиевый волоконный лазер ИЛИ-1-50 с длиной волны $\lambda = 1062$ нм и случайной поляризацией. Номинальная выходная мощность лазера 50 Вт, длительность импульсов 120 нс, номинальная энергия в импульсе при максимальной выходной энергии 1,0 мДж. Облучение проводилось в сходящихся лучах [10] с частотой следования импульсов 50 кГц, что обеспечивает необходимую зону облучения и равномерное распределение мощности по площади облучения по сравнению со сфокусированным пучком. Диаметр пятна облучения подложки в нашем случае составлял около 120 мкм.

В процессе облучения лазерный луч перемещался с переменной скоростью по прямой линии при помощи двух зеркал гальванометрического сканатора. Начальная и конечная скорости – 100 мм/с, в средней точке луч останавливался на 1 с (рис. 1). Длина полосы облучения составила 10 мм, ширина – около 120 мкм. Такой режим обеспечивал плавное изменение дозы облучения по линии сканирования, что позволило отследить характер микроstructuring системы SiO₂/Si в зависимости от дозы облучения. Контроль морфологии облученных образцов проводился на оптическом микроскопе Axio Imager A1m фирмы Carl Zeiss, укомплектованном цифровой видеокамерой высокого разрешения.

Доза облучения рассчитывалась по формуле

$$D = P_{\text{имп}} \cdot t \cdot f \cdot \tau / S,$$

где $P_{\text{имп}}$ – мощность одиночного импульса, Вт; t – время воздействия, с; f – частота повторения импульсов, Гц; τ – длительность лазерного импульса, с; S – площадь пятна лазерного облучения.

Обсуждение полученных результатов

Предварительный выбор режима облучения и сканирования должен был обеспечить переход из граничной области мощности, где отсутствует плавление кремния, к появлению точечного плавления кремния (отдельных субмикронных областей). Таким начальным режимом облучения был выбран ранее указанный режим облучения: энергия импульсов 1,0 мДж, начальная и конечная скорости сканирования 100 мм/с. На рис. 2 приведены микрофотографии участков линии сканирования на той части, где последовательно происходит рост дозы облучения. Следует заметить, что после перемещения лазерного луча по линии сканирования в результате остывания ранее облученной части подложки происходит рекристаллизация расплава. При этом кристаллизованные области кремния и пленка SiO₂ сохраняют морфологию расплавленных областей.

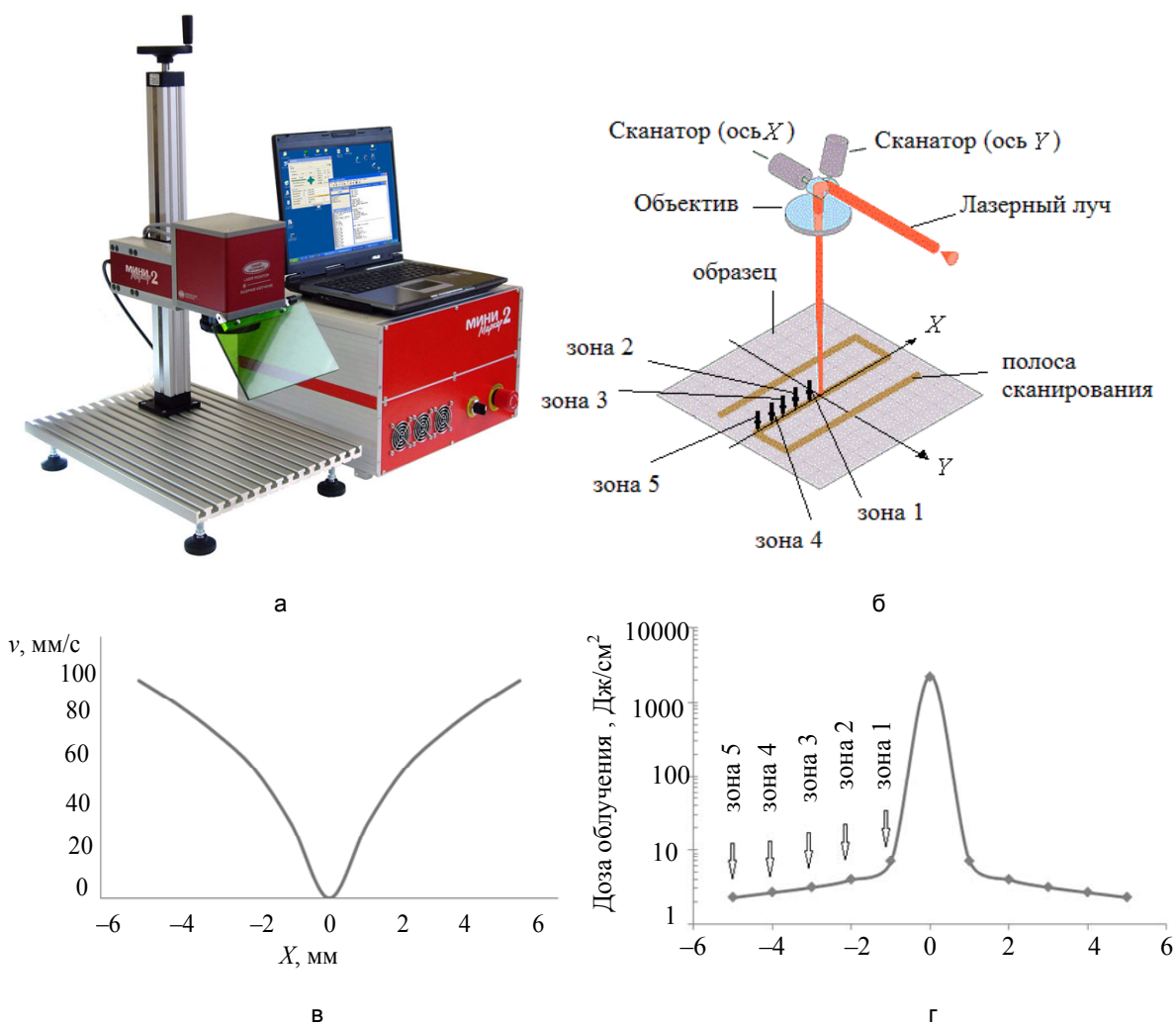


Рис. 1. Экспериментальная установка (а), схема процесса сканирования (б), график изменения скорости лазерного луча по линии сканирования (в), доза облучения в пересчете на скорость движения луча (г)

Как следует из рис. 2, а, при дозе облучения $D = 2,3 \text{ Дж/см}^2$ на поверхности кремния появляются области плавления кремния субмикронных размеров, и только отдельные, наиболее крупные области достигают размеров в несколько десятых долей микрометра в диаметре. Причиной их появления могут являться структурные дефекты исходного материала подложки, а также дефекты, появляющиеся в результате воздействия лазерного излучения на поверхность кремния [11, 12].

Повышение дозы облучения приводит к увеличению размеров площадей расплавленных областей без появления новых центров микроплавления (рис. 2, б). Размеры расплавленных областей здесь вырастают до $0,2\text{--}1,0 \text{ мкм}$. Отдельные области имеют диаметр $2\text{--}2,4 \text{ мкм}$. Начиная с дозы, близкой к $3,14 \text{ Дж/см}^2$, наряду с ростом площадей расплавленного кремния появляются новые центры плавления (рис. 2, в). Общая площадь расплавленных областей на этом участке полосы сканирования составляет порядка 10%. Контуры границ рекристаллизованных областей начинают терять форму кругов. Дальнейший рост дозы облучения приводит к изменению формы кристаллизованных областей кремния, которая приближается к форме равносторонних треугольников (рис. 2, г), характерных для выхода плоскостей скольжения на поверхность кремниевой пластины, ориентированной в главной кристаллографической плоскости (111). Как известно [13], форму равносторонних треугольников на поверхности кремния приобретают ямки анизотропного химического травления в местах выхода дислокаций на поверхность, имеющую ориентацию (111). В нашем случае плавление кремния, подобно химическому травлению, возникало в локальных областях поверхности кремния, имеющих более низкую энергию, чем соседние области, т.е. в местах выхода на поверхность кремниевой подложки генерируемых лазером дислокаций.

С ростом дозы облучения возрастает температура области облучения, увеличивается число дислокаций, которые выходят на поверхность, увеличиваются площади расплавленных областей. Наконец, в результате дальнейшего роста дозы облучения ($D = 7,02 \text{ Дж/см}^2$) происходит слияние локальных областей расплава, и в средней части полосы сканирования образуются узкие «каналы», т.е. области расплавленного кремния длиной до 20 мкм и шириной $5\text{--}7 \text{ мкм}$ (рис. 3). Видно также, что параллельно этим цен-

тральным «каналам», ближе к периферии полосы сканирования, формируются более короткие «каналы» длиной до 5–8 мкм. Как видно из микрофотографии, все эти «каналы» вытянуты в направлении движения сканирующего луча. К области с полосами расплава с обеих сторон примыкают участки с высокой плотностью локальных областей «анизотропного плавления» (областей треугольной формы), обусловленных действием механизма генерации дислокаций и их выходом на поверхность подложки. Ширина этих участков составляет 10–15 мкм, и к ним, в свою очередь, примыкают участки, в которых, вследствие малых плотностей мощности, только зарождаются области локального плавления.

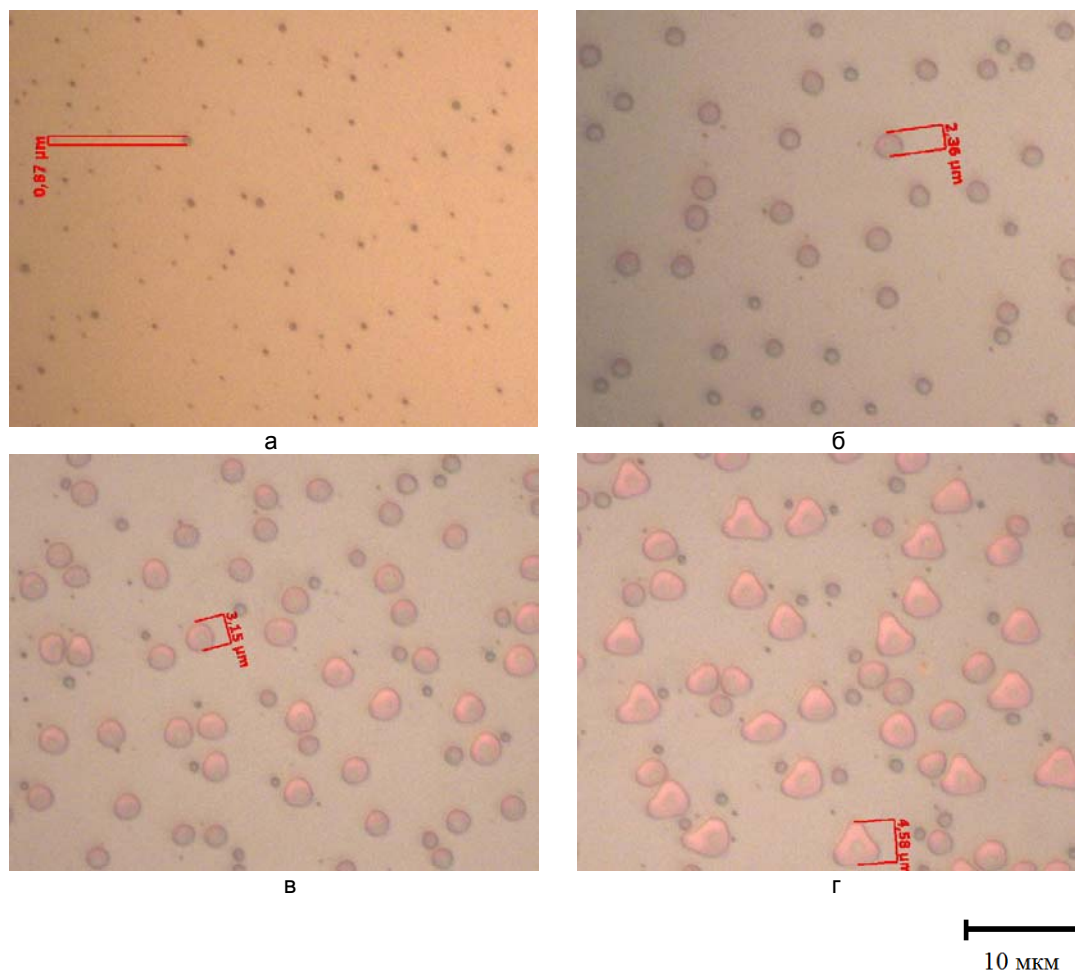


Рис. 2. Микрофотографии участков линии сканирования, полученных при различных дозах облучения: $D = 2,3 \text{ Дж/см}^2$ соответственно зоне 5 ($X = -5 \text{ мм}$) на рис. 1, б, г (а); $D = 2,68 \text{ Дж/см}^2$ соответственно зоне 4 ($X = -4 \text{ мм}$) на рис. 1, б, г (б); $D = 3,14 \text{ Дж/см}^2$ соответственно зоне 3 ($X = -3 \text{ мм}$) на рис. 1, б, г (в); $D = 3,98 \text{ Дж/см}^2$ соответственно зоне 2 ($X = -2 \text{ мм}$) на рис. 1, б, г (г)

Во время остановки луча на одну секунду ($X = 0$) доза в области облучения составила $2,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^2$ (рис. 1, г). При этом в облученной области произошло разрушение пленки SiO_2 и испарение поверхностного слоя кремния. После того, как луч лазера вновь начал движение с нарастающей скоростью, по ходу движения сформировалась такая же топология областей, что и в начале сканирования, но в обратной последовательности. Вначале формируется область с «каналами» (аналогичная рис. 3), затем последовательно области, аналогичные областям рис. 2, г, в, б, а.

Следует отметить, что пленка SiO_2 полностью повторяет конфигурацию поверхности рекристаллизованных областей кремниевой подложки. Это объясняется тем, что при температуре плавления кремния (1423°C) пленка SiO_2 становится пластичной (температура плавления пленки SiO_2 равна 1700°C).

Чтобы отследить развитие механизма микроstructuring системы SiO_2/Si при дальнейшем увеличении дозы облучения, лазерный луч был сфокусирован до диаметра 80 мкм, мощность импульса была увеличена до максимальной (50 Вт). На рис. 4 представлены микрофотографии, полученные при сканировании сфокусированного лазерного луча при разной мощности лазерного излучения. Использовался следующий режим облучения подложки: энергия импульсов 1,0 мДж, перемещение лазерного луча – равномерное со скоростью 70 мм/с, шаг сканирования 250 мкм, диаметр сфокусированного пучка 80 мкм. Площадь сканирования составила $5 \times 5 \text{ мм}^2$.

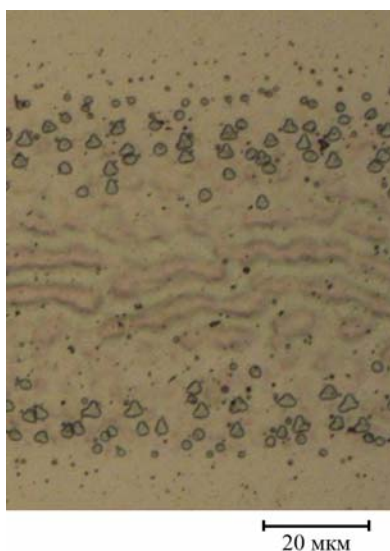


Рис. 3. Микрофотография участка линии сканирования при дозе облучения $D = 7,02 \text{ Дж/см}^2$

На микрофотографиях (рис. 4) показаны типичные участки двух областей сканирования, полученных на одной кремниевой подложке при различных плотностях мощности. Верхние и нижние полосы получены движением лазерного луча слева направо, а средние – справа налево. Следует обратить внимание на то, что вид полос, полученных при противоположных направлениях сканирования луча, различается. Однако с ростом плотности мощности эта разница становится менее выраженной. По-видимому, отмеченная разница связана с некоторыми погрешностями настройки системы сканирования.

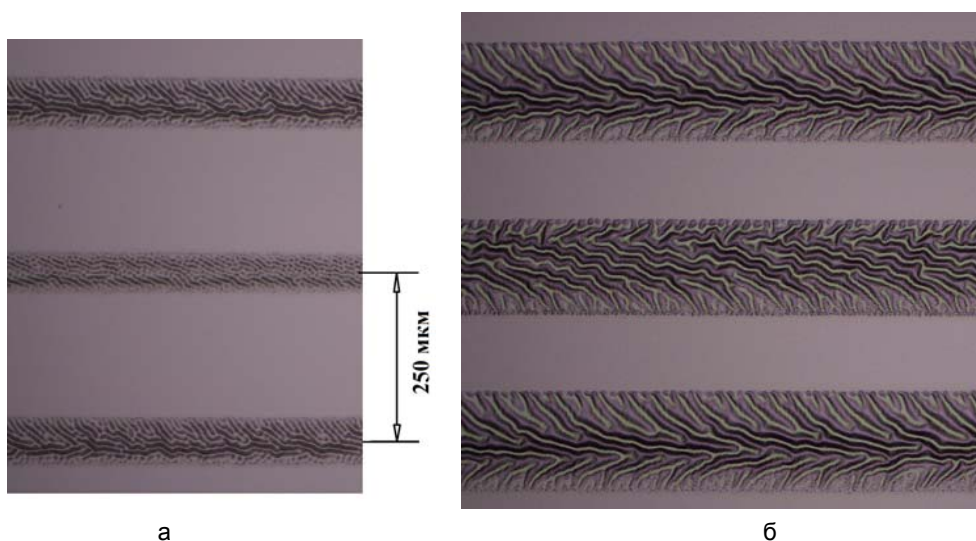


Рис. 4. Микрофотографии участков областей сканирования лазерным пучком при дозах облучения $D = 7,69 \text{ Дж/см}^2$ (а) и $D = 8,35 \text{ Дж/см}^2$ (б)

Как видно из рис. 4, а, при дозе облучения $D = 7,69 \text{ Дж/см}^2$ наблюдаются полосы плавления кремния шириной порядка 80 мкм по всей длине линии сканирования пучка, т.е. ширина полос фактически совпадает с диаметром пятна облучения на подложке. При дозе $D = 8,35 \text{ Дж/см}^2$ (рис. 4, б) ширина полосы расплавленного кремния уже достигает 130 мкм и несколько превышает половину шага сканирования. Дальнейшее увеличение плотности мощности приводит к увеличению ширины полосы плавления кремния и высоты рельефа микроструктурированной поверхности полосы. Это связано с тем, что плавление кремния начинается в центре полосы, куда попадает максимальное число фотонов лазерного облучения, причем здесь наблюдается наибольшая глубина области плавления. Дальше от центра образуются «каналы» плавления, которые доходят до края облучения, смыкаются, приобретают направление к центру полосы и образуют сплошную полосу плавления кремния. Зарождение областей плавления здесь, по-видимому, происходит по тому же механизму, что и при облучении сходящимся пучком. Плавление кремния начинается на поверхности кремния в местах выхода дислокаций; с ростом дозы облучения увеличиваются скорость генерации дислокаций и локальные площади расплавленного кремния, которые, соединяясь, образуют «каналы расплава», а те, в свою очередь, сливаясь, образуют сплошную полосу

расплавленного кремния. Далее, вследствие высокой теплопроводности кремния и большой энергии фононов, получаемой от фотонов лазерного излучения, происходит передача энергии «фононным ветром» на смежные, необлученные области подложки. В результате происходит плавление кремния и в прилегающих к полосе областях, не подвергшихся прямому лазерному облучению. Отсюда – полученные экспериментальные факты: во-первых, ширина полосы расплавленного кремния больше диаметра сканирующего лазерного пятна; во-вторых, с увеличением дозы облучения растет разница между диаметром пятна облучения и шириной полосы расплавленного кремния.

Морфология поверхности системы SiO₂/Si в полосах плавления–кристаллизации кремния может быть объяснена следующим образом. Пленка SiO₂ в области плавления кремния (температура плавления кремния равна 1423°С) становится пластичной. Температура плавления SiO₂, как уже указывалось, равна 1700°С. Наибольшей пластичностью по сравнению с областями, прилегающими к твердой подложке, пленка обладает в центральной части полосы. Под действием давления потока фотонов лазерного излучения на поверхность системы SiO₂/Si пленка SiO₂ прогибается на разную величину, которая связана как с разной пластичностью, так и с неравномерным распределением плотности фотонов в пучке. В результате под давлением пленки расплав кремния отсоединяется от середины, а движение прогиба вместе с движением лазерного луча перемещает расплав по направлению сканирования луча. После смещения луча и кристаллизации охлаждаемой области системы твердеющая пленка SiO₂ приобретает форму кристаллизованного кремния. После травливания пленки SiO₂ в растворе плавиковой кислоты видно, что микротопология поверхности кристаллизованного кремния имеет ту же форму, что и с пленкой.

Вышеизложенный механизм действует до тех пор, пока не произойдет смыкание и частичное перекрытие полос сканирования. Дальнейшее увеличение плотности мощности облучения приводит к началу разрушения пленки SiO₂. Как правило, разрушение пленки совпадает с началом абляции кремния. Следует заметить, что еще до смыкания полос сканирования в облученных областях системы SiO₂/Si появляются линии скольжения, пересекающиеся под углом 60°, что свидетельствует о появлении пластической деформации во всей облученной области.

Заключение

Основным механизмом, приводящим к возникновению локальных микрообластей расплавленного кремния под воздействием лазерного облучения с большой частотой следования импульсов, является дислокационный механизм. Именно подпитка кристаллической решетки кремния энергией фотонов с частотой 50 кГц приводит к интенсивной генерации собственных точечных дефектов (вакансий и междоузельных атомов кремния). В результате происходит зарождение и рост дислокаций в кремнии вблизи границы SiO₂/Si [10]. В областях выхода дислокаций на поверхность и начинается локальное плавление кремния.

Увеличение дозы облучения приводит к вовлечению в процесс дефектообразования все большего количества атомов кристаллической решетки, росту числа дислокаций и числа центров плавления, увеличению площадей расплавленных областей. Начиная с дозы облучения 7,02 Дж/см², происходит соединение отдельных расплавленных областей в протяженные (образование «каналов»), и далее, с увеличением дозы облучения, формируется сплошная расплавленная полоса. Морфология поверхности микроструктурированной поверхности системы SiO₂/Si связана с особенностью взаимодействия расплава кремния, пластичной пленки SiO₂, границей твердой и жидкой фазы кремниевой подложки и упругим воздействием пучка фотонов на систему SiO₂/Si.

Авторы признательны сотрудникам кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения (зав. кафедрой профессор В.П. Вейко) за обсуждение материалов работы и профессору Е.Б. Яковлеву за предоставление фотографии экспериментальной установки. Мы благодарим доцента Н.С. Кармановского за ценные советы по оформлению статьи

Литература

1. Tiwari S., Rana F., Chan K., Hanafi H., Wei C., Buchanan D. Volatile and nonvolatile memories in silicon with nano-crystal storage // IEEE Int. Electron Devices Meeting Tech. Dig. – 1995. – P. 521–524.
2. Dimitrakis P. et al. Silicon nanocrystal memory devices obtained by ultra-low-energy ion-beam synthesis // Solid-State Electronics. – 2004. – V. 48. – P.1511–1517.
3. Gonzalez-Varona O., Garrido B., Cheylan S., Perez-Rodriguez A., Cuadras A., Morante J.R. Control of tunnel oxide thickness in Si-nanocrystal array memories obtained by ion implantation and its impact in writing speed and volatility // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 82. – № 13. – P. 2151–2153.
4. Скворцов А.М., Фам Куанг Тунг. Структура нанокластеров кремния в системе кремний – диоксид кремния // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 3. – С. 69–73.
5. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. – 1990. – V. 57. – № 10. – P. 1046–1048.
6. Rinnert H., Vergnat M., Burneau A. Evidence of light-emitting amorphous silicon clusters confined in a silicon oxide matrix // J. Appl. Phys. – 2001. – V. 89. – № 1. – P. 237–243.

7. Yang Yang, Ling Xu, Fei Yang, Wenqiang Liu, Jun Xu, Zhongyuan Ma, Kunji Chen. Enhanced visible photoluminescence from nc-Si/SiO_x films deposited by electron beam evaporation // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2010. – V. 356. – № 50–51. – P. 2790–2793.
8. Костюк А.Б., Белов А.И., Жаворонков И.Ю. и др. Светоизлучающие ионно-синтезированные структуры на основе нанокристаллов кремния в оксидных матрицах // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 5 (2). – С. 264–270.
9. Skvortsov A.M., Veiko V.P., Sokolov V.I., Pham Qung Tung, Khaletsky R.A. Laser modification of thermal oxide films on silicon // International conference «Fundamentals of laser assisted micro- and nanotechnologies» (FLAMN-10): Abstracts. – St. Petersburg: Russia, 2010. – P. 103.
10. Скворцов А.М., Вейко В.П., Хуинь Конг Ту. Применение импульсного волоконного лазера для микроstructuring системы SiO₂/Si // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 5 (81). – С. 128–133.
11. Banishev A.F., Golubev V.S., Kolmnev Y.U. Generation and accumulation of dislocations on the silicon surface under the action of pulse-periodic emission from a YAG:Nd laser // Technical Physics. – 2001. – V. 46. – № 8. – P. 962–967.
12. Банишев А.Ф., Новикова Л.В. Образование обратимых и необратимых структурных дефектов на поверхности кремния под действием лазерного импульса // Физика и химия обработки материалов. – 1992. – № 4. – С. 55–59.
13. Скворцов А.М., Жарова Ю.А., Ткалич В.Л. Микроstructuring поверхности монокристаллов кремния в электронике // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 1. – С. 60–65.

Скворцов Альберт Матвеевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, a-skvortsov@yandex.ru

Хуинь Конг Ту

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Picochip912@yahoo.com

Халецкий Роман Александрович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, halecky@yandex.ru