

УДК 621.315.592; 621.382002

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ $\text{SiO}_2/\text{Si}$

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

Исследованы электрофизические параметры системы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после облучения импульсным иттербиевым волоконным лазером типа ИЛИ-1-50. Показано, что при воздействии лазерного излучения в системе кремний–окисел происходит образование дефектов, ответственных за появление различного рода зарядов. Обнаружено, что лазерно-индуцированные дефекты появляются и на участках, удаленных от зоны облучения. Установлено, что скорость генерации дефектов на границе раздела кремний–окисел зависит от их энергетического расположения в запрещенной зоне кремния и достигает максимального значения вблизи уровня Ферми.

**Ключевые слова:** лазерное облучение, дислокации, линии скольжения, микроструктурирование, вольт-фарадные характеристики.

### Введение

В настоящее время лазерное излучение широко используется при исследовании различных свойств материалов в качестве инструмента, позволяющего гибко и точно варьировать режимы облучения [1–3]. Особое место при этом занимают исследования по влиянию лазерного излучения на свойства материалов, используемых в микроэлектронной технологии. Одним из основных материалов, играющих важную роль в микроэлектронике, является тонкая пленка двуокиси кремния, выращенная методом термического окисления кремниевой подложки.

При исследовании влияния лазерного излучения на систему кремний–двуокись кремния ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) обнаруживаются новые явления, стимулирующие повышенный интерес к этой системе. Авторами работы [4], например, отмечается, что при лазерном воздействии происходит изменение цвета и диэлектрической проницаемости пленки окисла. В наших работах [5, 6] сообщалось о том, что при облучении системы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  в окисле индуцируются новые заряды. Обнаружен эффект дальнего действия, при котором изменения электрофизических свойств системы кремний–окисел появляются в областях подложки, удаленных от зоны непосредственного воздействия лазерного луча. Однако до сих пор процессы, протекающие в структуре системы кремний–окисел при воздействии лазерного излучения, остаются плохо изученными. Это тем более актуально в связи с тем, что разработаны и выпускаются лазеры с новыми эксплуатационными характеристиками (большими энергиями и частотой следования импульсов). Целью настоящей работы является изучение влияния на электрофизические параметры системы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  облучения импульсным иттербиевым волоконным лазером типа ИЛИ-1-50, приводящего к образованию сеток линий скольжения.

### Методика эксперимента

Экспериментальная структура  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  изготавливалась высокотемпературным окислением кремниевой пластины электронной проводимости с удельным сопротивлением  $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  ( $KЭФ=4,5$ ,  $N_d = 9,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) и кристаллографической ориентацией (100). Окисел толщиной 150 нм выращивался при температуре  $1000^\circ\text{C}$  в среде влажного кислорода. Размер исследуемых чипов составлял  $15 \times 15 \text{ мм}$ . Отсутствие повреждений и загрязнений поверхности исходных образцов проверялось при помощи оптического микроскопа. Образцы подвергались воздействию импульсного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны излучения 1062 нм с частотой следования импульсов 50 кГц, длительностью импульсов 120 нс и энергией 1 мДж. Применена схема облучения пластины в сходящихся лучах (рис. 1). При этом образец располагался выше плоскости фокуса на  $d = 44 \text{ мм}$  с целью уменьшения плотности мощности излучения, что, в свою очередь, обеспечивает лучший контроль над процессом микроструктурирования. Диаметр облученной области составлял около 700 мкм, плотность мощности излучения –  $1,3 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ .

Выбранная схема облучения и режимы исключают появление даже мельчайших точек плавления кремния и признаков разрушения пленки двуокиси кремния. Температура поверхности пластины и ее распределение по площади контролировались в реальном времени с помощью инфракрасной камеры FLIR серии SC7000 (тепловизора).

На рис. 2 приведена микрофотография центральной части облученной области (рис. 2, а) и экспериментальный график изменения во времени температуры области облучения (рис. 2, б). После облучения наблюдается четко выраженная сетка линий скольжения, образованная пересечением ортогональных полос линий скольжения, характерных для монокристаллов кремния, ориентированных в кристаллографических плоскостях {100}. При длительности облучения 10 с суммарная доза составила  $56,4 \text{ Дж/см}^2$ .

Исследование характера изменения электрофизических свойств изучаемой системы кремний–окисел, обусловленных воздействием лазерного облучения, проводилось методом высокочастотных ( $\omega = 1 \text{ МГц}$ ) вольт-фарадных характеристик (ВФХ) структуры металл–окисел–полупроводник (МОП). Измерения производились на образцах, подвергнутых лазерному облучению различной длительности. В качестве металлического электрода, контактирующего с окисной пленкой, использовался эвтектический

сплав In-Ga (температура плавления  $T_{пл} = 15,7^{\circ}\text{C}$ ). На рис. 3 показаны полученные в ходе эксперимента типичные, нормированные по максимальной емкости, ВФХ структур, полученных после лазерного облучения различной длительности.

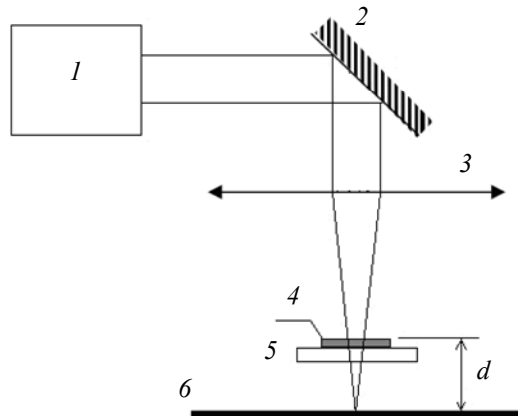


Рис. 1. Схема расположения структуры  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  в сходящихся лучах лазера: 1 – лазер; 2 – поворотное зеркало; 3 – объектив; 4 – образец; 5 – металлическая подложка; 6 – фокальная плоскость объектива;  $d$  – расстояние между фокальной плоскостью объектива и поверхностью образца

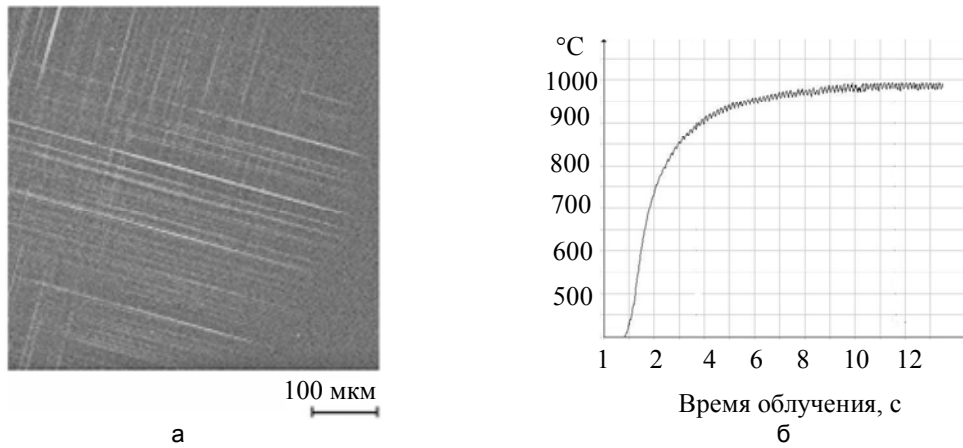


Рис. 2. Микрофотография центральной части облученной области (а) и временной график изменения температуры области облучения (б)

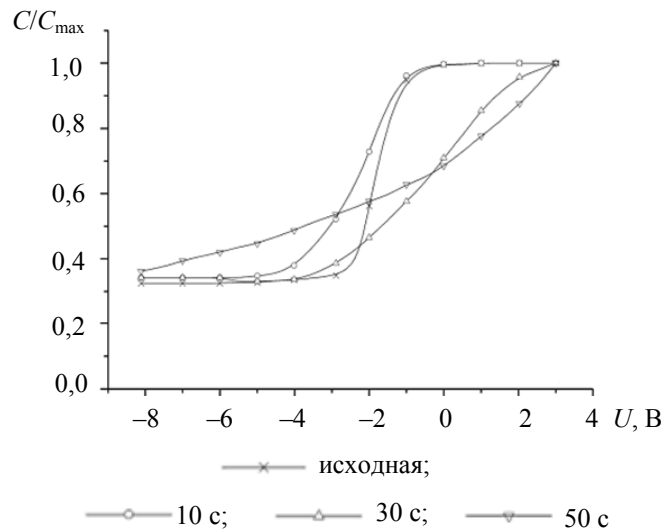


Рис. 3. ВФХ структур  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после лазерного облучения различной длительности

### Обсуждение полученных результатов

Ранее А.Ф. Банишевым с сотрудниками в ряде работ [7–9] были рассмотрены вопросы генерации как обратимых, так и необратимых дефектов в монокристаллах кремния под действием лазерного облучения. В экспериментах использовался импульсный YAG:Nd лазер. Особое внимание уделялось собственным точечным дефектам (междоузельным атомам кремния и вакансиям), а также генерации дислокаций и периодических структур на поверхности кремния.

В настоящей работе, как было отмечено ранее, применен импульсный иттербиевый волоконный лазер с той же длиной волны (1062 нм), что и в вышеперечисленных работах А.Ф. Банишева. Однако авторами облучение производилось при более высокой частоте следования импульсов (50 кГц) и энергии импульса (1 мДж).

Следует отметить особенности системы SiO<sub>2</sub>/Si. Контактующие структурные фазы имеют общий уровень Ферми, что приводит к соответствующему перераспределению зарядов между ними. Одновременно разная структура кремния и диоксида кремния обуславливают наличие упруго-напряженного состояния системы SiO<sub>2</sub>/Si, причем на поверхности кремния действуют максимальные касательные, растягивающие кристаллическую решетку напряжения.

При лазерном облучении системы SiO<sub>2</sub>/Si фотоны беспрепятственно достигают поверхности кремния, так как пленка SiO<sub>2</sub> прозрачна для излучения этой длины волны. Здесь часть энергии квантов расходуется на разогрев кристаллической решетки, часть – на образование собственных точечных дефектов и дислокаций. В результате действия многих факторов – исходного напряженного состояния системы, повышения температуры в облученной области, ускоренной генерации структурных дефектов, размножения и скольжения дислокаций – происходит пластическая деформация, реализуемая в виде сетки линий скольжения (рис. 2, а). Более подробные сведения о микроструктурировании системы SiO<sub>2</sub>/Si, при котором возникают сетки линий скольжения, приведены в работе [10].

В результате структурных изменений, связанных с образованием на облученной поверхности кремния сетки линий скольжения, происходит образование дефектных центров в приграничном к кремнию слое окисла, ответственных за встроенный заряд в пленке SiO<sub>2</sub>. Из рис. 3 видно, что в процессе облучения происходит модификация ВФХ, которая свидетельствует об изменении электрофизических свойств оксида кремния и границы раздела кремний-окисел.

Смещение ВФХ по оси напряжений на уровне емкости  $C/C_{\max} \approx 0,45$ , соответствующее режиму пересечения уровнем Ферми середины запрещенной зоны кремния, пропорционально изменению плотности встроенного в окисел заряда  $\Delta Q_f$ . На рис. 4 показан график изменения плотности встроенного заряда в зависимости от продолжительности облучения.

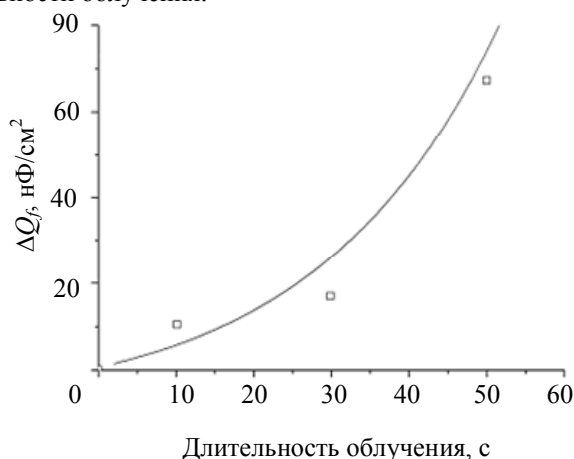


Рис. 4. Изменение плотности встроенного заряда в окисле в зависимости от длительности лазерного облучения

При длительности лазерного воздействия до 30 с наблюдаются незначительные изменения  $\Delta Q_f$ . Однако при дальнейшем увеличении длительности облучения происходит резкое увеличение плотности встроенного положительного заряда. Это свидетельствует об интенсивной генерации структурных дефектов в слое окисла. При этом с высокой долей вероятности можно утверждать, что эти дефекты индуцируются в переходной области окисла, прилегающей к границе раздела и являющейся наиболее напряженной в системе SiO<sub>2</sub>/Si.

Изменение наклона ВФХ в области напряжений, соответствующих переходу МОП-структуры из режима обогащения в режим инверсии (рис. 3), свидетельствует об изменении плотности заряда, пропорциональном изменению плотности поверхностных состояний  $\Delta N_{SS}$  на границе раздела кремний-окисел. Определение плотности поверхностных состояний, генерируемых лазерным излучением, произ-

водилось по методу Термана, суть которого заключается в следующем. На основе предварительно рассчитанной теоретической ВФХ определяется сдвиг по оси напряжений  $\Delta U(C)$  экспериментальной кривой относительно теоретической при различных значениях емкости МОП-структуры. Так как емкость МОП-структуры при высокой частоте измерения определяется только значением поверхностного потенциала кремниевой подложки  $\Psi_s$ , то на основе зависимости  $\Delta U(C)$  формируется функция  $\Delta U(\Psi_s)$ . Далее графическим дифференцированием кривой  $\Delta U(\Psi_s)$  рассчитывается  $\Delta N_{SS}$  с использованием следующего выражения:

$$\Delta N_{SS} = \frac{C_0}{q} \frac{d(\Delta U)}{d\Psi_s},$$

где  $q$  – заряд электрона;  $C_0$  – удельная емкость окисла.

На рис. 5 приведены графики, показывающие изменение плотности поверхностных состояний  $\Delta N_{SS}$  в областях энергий, соответствующих запрещенной зоне кремния, при лазерном облучении различной длительности. Характер изменения  $\Delta N_{SS}$  различается для разных энергетических диапазонов. Наибольшие изменения плотности поверхностных состояний наблюдаются в верхней половине запрещенной зоны вблизи уровня Ферми. В этом диапазоне энергий при увеличении времени облучения характер изменения  $\Delta N_{SS}$  коррелирует с характером изменения плотности встроенного заряда (рис. 4), т.е. происходит резкое увеличение скорости генерации поверхностных состояний на границе раздела при продолжительности облучения более 30 с.

В областях, удаленных от зоны облучения, также наблюдались изменения ВФХ. Однако эти изменения были не такими выраженными по сравнению с изменениями ВФХ в зоне облучения. Таким образом, можно утверждать, что дефекты, ответственные за появление различного рода зарядов при лазерном воздействии, индуцируются и за пределами облученных областей, но их максимальная концентрация локализована вблизи линий скольжения.

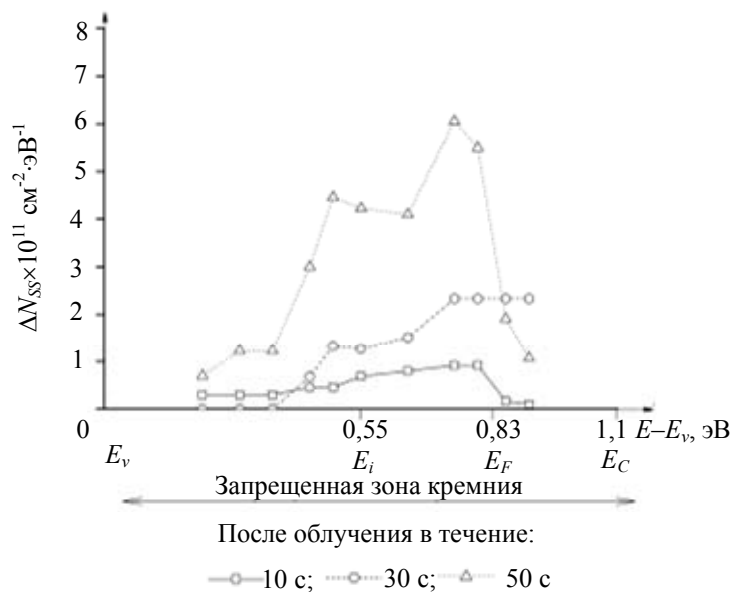


Рис. 5. Энергетическое распределение плотности поверхностных состояний в зависимости от длительности лазерного облучения

### Заключение

Таким образом, при воздействии лазерного излучения в системе кремний–двуокись кремния происходят структурные изменения, которые обуславливают изменение электрофизических свойств системы SiO<sub>2</sub>/Si. Изменения электрофизических свойств окисла и границы раздела в большей степени наблюдаются в зоне непосредственного воздействия лазерного луча на кремниевую подложку. Здесь происходят максимальные изменения структуры, проявляемые в виде сетки линий скольжения. Также авторами обнаружено появление лазерно-индуцированных дефектов и на участках, удаленных от зоны облучения.

Необходимо отметить, что при воздействии лазерного излучения наблюдается нелинейный рост плотности дефектов при увеличении дозы облучения. Причем было обнаружено, что при превышении определенной дозы происходит резкое увеличение скорости генерации лазерно-индуцированных дефектов. Для дефектов, расположенных на границе раздела кремний-двуокись кремния, скорость генерации определяется их энергетическим положением в запрещенной зоне кремния и максимальна вблизи уровня Ферми легированного полупроводника.

**Литература**

1. Вейко В.П., Дышлошенко С.С., Скворцов А.М. Лазерное микроstructuring поверхности кремния // Научно-технический сборник «Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов». Ч. 2. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – С. 138–153.
2. Zavestovskaya I.N., Eliseev P.G., Krokhin O.N. Nonlinear absorption mechanisms in ablation of transparent materials by high-intensity and ultrashort laser pulses // Applied Surface Science. – 2005. – V. 248. – P. 313–315.
3. Zavestovskaya I.N., Eliseev P.G., Krokhin O.N., Menkova N.A. Analysis of the nonlinear absorption mechanisms in ablation of transparent materials by high-intensity and ultrashort laser pulses // Appl. Phys. A. – 2008. – V. 92. – P. 903–906.
4. Medvid A., Onufrijevs P., Mellikov E., Kropman D., Muktepavela F., Bakradze G. Low-K factor of SiO<sub>2</sub> layer on Si irradiated by YAG:Nd laser // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2007. – V. 353. – Is. 5–7. – P. 703–707.
5. 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. – 2010. – P. 103.
6. Khaletsky R.A., Zamoraynskaya M.V., Kolesnikova E.V., Skvortsov A.M., Sokolov V.I., Pham Qung Tung, Veiko V.P. «Long-range action» effect under laser irradiation of SiO<sub>2</sub>–Si system // International conference «Fundamentals of laser assisted micro- and nanotechnologies» (FLAMN-10): Abstracts. – 2010. – P. 105.
7. Банишев А.Ф., Володин Б.Л., Емельянов В.И., Мерзляков К.С. Образование периодических структур дислокаций при лазерном воздействии на поверхность полупроводников // ФТП. – 1990. – Т. 32. – Вып. 9. – С. 25–29.
8. 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.
9. 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.
10. Скворцов А.М., Вейко В.П., Хуинь Конг Ту. Применение импульсного волоконного лазера для микроstructuring системы SiO<sub>2</sub>/Si // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 5 (81). – С. 128–133.

- Скворцов Альберт Матвеевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, a-skvortsov@yandex.ru
- Халецкий Роман Александрович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, halecky@yandex.ru
- Хуинь Конг Ту* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Picochip912@yahoo.com