

УДК 621.315.592

ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНО-ЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

В.П. Вейко^a, А.М. Скворцов^a, Хуинь Конг Ту^b, А.А. Петров^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Куинён университет, Куинён, Бинь Динь, 170 Ан Дьонг Вьонг, Вьетнам

Адрес для переписки: a-skvortsov@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.02.15, принята к печати 02.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-426-434

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Вейко В.П., Скворцов А.М., Хуинь Конг Ту, Петров А.А. Лазерная абляция монокристаллического кремния под действием импульсно-частотного излучения волоконного лазера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 426–434.

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы процессы абляции поверхности монокристаллических пластин кремния и свойства материалов, получаемых в результате абляции кремния при облучении сканирующим пучком импульсного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны $\lambda = 1062$ нм при варьировании мощности излучения лазера и режимов сканирования.

Метод. Исследования проведены на пластинах промышленного кремния КДБ-10 (111), КЭФ-4.5 (100) со слоем собственного оксида кремния толщиной в несколько десятков нанометров и толщиной слоя SiO₂ от 120 до 300 нм, выращенного методом термического окисления. Облучающая система включает в себя импульсный иттербиевый волоконный лазер с длиной волны $\lambda = 1062$ нм. Номинальная выходная мощность лазера 20 Вт, длительность импульсов 100 нс. Частота следования импульсов от 20 кГц до 100 кГц. Номинальная энергия в импульсе при максимальной выходной мощности 20 Вт составляла 1,0 мДж. Сканирование проводилось с помощью двухосевого сканатора на базе приводов VM2500+ с управлением через персональный компьютер с программным комплексом «SinMark™». Скорость сканирования от 10 мм/с до 4000 мм/с, перекрытие варьировалась с 100 лин/мм до 3000 лин/мм. Контроль образцов проводился на оптическом микроскопе типа Axio Imager A1m фирмы Carl Zeiss с цифровой видеокамерой высокого разрешения. Все эксперименты проводились в режиме сфокусированного лазерного пучка с диаметром пятна облучения на подложке 50 мкм. Изменение температуры и ее распределение по поверхности оценивались с помощью тепловизора FLIR серии SC7000.

Основные результаты. Показано, что процесс абляции происходит без плавления кремния с образованием факела плазмы. Частицы эжектированного кремния участвуют в формировании плазмы ионов кремния и атмосферных газов, обеспечивая процесс плазмо-химического роста SiO₂. Установлен диапазон режимов сканирования пучка, в котором наблюдается рост слоя SiO₂. Начиная со скорости сканирования 2000 мм/с, наличие факела визуально не фиксируется, прекращается образование оксида кремния, а в результате разрушения кремния образуются частицы кремния нанометровых размеров. При этом разрушение кремния сопровождается звуками разной частоты, зависящей от скорости сканирования.

Практическая значимость. Впервые показано, что на абляцию поверхности монокристаллов кремния существенно влияют такие характеристики процесса лазерного облучения, как скорость сканирования лазерного пучка и перекрытие линий сканирования. Выявлены режимы сканирования лазерного пучка импульсного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны $\lambda = 1062$ нм, обеспечивающие получение либо наноструктурированных частиц диоксида кремния, либо наночастиц кремния.

Ключевые слова

сканирование лазерного пучка, абляция, окисление, дислокации, линии скольжения, микротрещины, микроструктурирование.

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-02-00033, субсидией Правительства РФ 074-У01 и грантом Президента РФ на Ведущую научную школу НШ 1364.2014.2В.П.

LASER ABLATION OF MONOCRYSTALLINE SILICON UNDER PULSED-FREQUENCY FIBER LASER

V.P. Veiko^a, A.M. Skvortsov^a, Huynh Cong Tu^b, A.A. Petrov^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Quy Nhon University, Quy Nhon, Binh Dinh, 170 An Duong Vuong, Viet Nam

Corresponding author: a-skvortsov@yandex.ru

Article info

Received 26.02.15, accepted 02.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-426-434

Article in Russian

For citation: Veiko V.P., Skvortsov A.M., Huynh Cong Tu, Petrov A.A. Laser ablation of monocrystalline silicon under pulsed-frequency fiber laser. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 3, pp. 426–434.

Abstract

Subject of research. The paper deals with research of the surface ablation for single-crystal silicon wafers and properties of materials obtained in response to silicon ablation while scanning beam radiation of pulse fiber ytterbium laser with a wavelength $\lambda = 1062$ nm in view of variation of radiation power and scanning modes.

Method. Wafers of commercial p-type conductivity silicon doped with boron (111), n-type conductivity silicon doped with phosphorus (100) have been under research with a layer of intrinsic silicon oxide having the thickness equal to several 10s of nanometers and SiO₂ layer thickness from 120 to 300 nm grown by thermal oxidation method. The learning system comprises pulse fiber ytterbium laser with a wavelength $\lambda = 1062$ nm. The laser rated-power output is equal to 20 W, pulse length is 100 ns. Pulses frequency is in the range from 20 kHz to 100 kHz. Rated energy in the pulse is equal to 1.0 mJ. Scanning has been carried out by means of two axial scanning device driven by VM2500+ and controlled by personal computer with «SinMark™» software package. Scanning velocity is in the range from 10 mm/s to 4000 mm/s, the covering varies from 100 lines per mm to 3000 lines per mm. Control of samples has been carried out by means of Axio Imager A1m optical microscope Carl Zeiss production with a high definition digital video camera. All experiments have been carried out in the mode of focused laser beam with a radiation spot diameter at the substrate equal to 50 μ m. The change of temperature and its distribution along the surface have been evaluated by FLIR IR imager of SC7000 series.

Main results. It is shown that ablation occurs without silicon melting and with plasma torch origination. The particles of ejected silicon take part in formation of silicon ions plasma and atmosphere gases supporting the plasm-chemical growth of SiO₂. The range of beam scanning modes is determined where the growth of SiO₂ layer is observed. Beginning with scanning velocity equal to 2000 mm/s, the torch existence is not fixed visually; silicon oxide origination is stopped, and silicon particles with nanometer sizes are formed as a result of silicon destruction. The process of silicon destruction is followed by sounds of different frequency depending on scanning velocity.

Practical significance. The surface ablation for single-crystal silicon has been shown for the first time ever to be influenced significantly by such features of laser radiation as laser beam scanning velocity and the covering of scanning lines. Laser beam scanning modes of pulse fiber ytterbium laser with a wavelength $\lambda = 1062$ nm have been found out providing the synthesis of nanostructured silicon dioxide particles or silicon nanoparticles.

Keywords

laser beam scanning, ablation, oxidation, dislocation, slip lines, microcracks, microstructuring.

Acknowledgements

The work has been supported by RFBR grant #13-02-00033, by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01) and the Russian Federation President Grant for the Leading School of Sciences (SS 1364.2014.2).

Введение

Бурное развитие лазеров с ультракороткими импульсами открывает новые возможности прецизионной обработки материалов, в частности, кремния [1–5]. Благодаря своим термодинамическим, физико-химическим и полупроводниковым свойствам кремний получил широкое применение в микро- и наноэлектронике, сенсорной технологии, биомедицине и т.д. В связи с этим в настоящее время интерес к воздействию на кремний и систему SiO₂/Si (слой диоксида кремния на поверхности монокристаллической кремниевой пластины) лазерного излучения непрерывно растет.

Облучение твердых материалов лазерными импульсами высокой энергии может приводить к удалению вещества с поверхности материала. Это явление, называемое лазерной абляцией, широко используется в лазерных технологиях [6]. Одной из характерных особенностей абляции при использовании мощных импульсов лазерного излучения является формирование разного рода частиц (кластеров, капель или твердых фрагментов). Возможность предсказывать и контролировать эжекцию частиц и состав облака продуктов абляции является важным условием оптимизации параметров процессов во многих практических приложениях. Наиболее широко в последние годы лазерная абляция используется при получении нанокompозитных материалов для электронной техники: силицидов (сплавов металлов с кремнием), нитридов (в частности, нитрида кремния Si₃N₄), карбидов, керметов и других нанокompозитов.

Известно, что при воздействии лазерных импульсов на поверхность кристаллических твердых тел и, в частности, на монокристалл кремния, возможна генерация в поверхностном слое структурных дефектов – вакансий и междоузельных атомов кремния [7, 8], концентрация которых в течение лазерного воздействия может меняться по сравнению с исходной на несколько порядков и достигать значений 10^{19} – 10^{21} см⁻³. С увеличением концентрации точечных дефектов все большую роль начинает играть взаи-

модействие между ними через поле упругих деформаций решетки с образованием и ростом числа дислокаций. В результате такого взаимодействия возможно появление различных корреляционных эффектов, при этом в определенных режимах на поверхности либо образуются периодические структуры дефектов, либо начинается пороговое образование протяженных дефектов [1, 7]. Объединение протяженных дефектов в более крупные дефекты (в сетки дислокаций или скопление пор) может инициировать начало образования микротрещин и разрушение поверхности еще до начала плавления. Образование микротрещины в ряде случаев сопровождается разного рода эмиссионными явлениями, не связанными с термо- или фотоэмиссией. В работе [8] исследовалось твердофазное разрушение поверхности кремния при воздействии лазерных импульсов на воздухе и в вакууме. Было показано, что процесс разрушения поверхности наблюдается только при многоимпульсном воздействии, носит накопительный характер и связан с генерацией и ростом дислокаций. В другой работе этих же авторов [9] обнаружено, что при воздействии на поверхности кремния лазерных импульсов с интенсивностью выше порога плавления кремния происходит эмиссия частиц. Предполагается, что ее причиной является образование микротрещин в результате конденсации неравновесных дефектов в поле упругих напряжений. В работе по микроструктурированию системы SiO₂/Si показано влияние лазерного облучения системы импульсным иттербиевым волоконным лазером на появление локальной пластической деформации поверхности кремния под окислом кремния [10]. Деформация проявилась в виде сетки линий скольжения и развивалась последовательно – сначала появлением микротрещин в местах пересечения линий скольжения, затем увеличением длины и ширины микротрещин. Заканчивался рост микротрещин выходом их на обратную сторону кремниевой пластины. Дальнейшее увеличение времени облучения или плотности мощности приводило к растрескиванию всей пластины. В то же время при переходе к режиму сканирования пучка фотонов импульсного иттербиевого волоконного лазера по поверхности системы SiO₂/Si был продемонстрирован механизм появления локального плавления и его развития с увеличением мощности облучения [11].

В настоящей работе приводятся результаты исследования процессов разрушения монокристаллической кремниевой пластины в результате облучения волоконным лазером, работающим в режиме высокочастотного сканирования с высокой плотностью энергии облучения.

Методика эксперимента

Исследования проводились на пластинах промышленного кремния КДБ-10 (111), КЭФ-4.5 (100) со слоем собственного оксида кремния толщиной в несколько десятков нанометров и толщиной слоя SiO₂ от 120 до 300 нм, выращенного методом термического окисления.

Облучение проводилось с использованием лазерной системы МиниМаркер 2. Такая система включает в себя импульсный иттербиевый волоконный лазер с длиной волны $\lambda = 1062$ нм. Номинальная выходная мощность лазера 20 Вт, длительность импульсов 100 нс. Частота следования импульсов может регулироваться от 20 кГц до 100 кГц. Номинальная энергия в импульсе при максимальной выходной мощности 20 Вт составляет 1,0 мДж. Сканирование проводилось с помощью двухосевого сканатора на базе приводов VM2500+ с управлением через персональный компьютер с установленным программным комплексом «SinMarkTM». Управление скоростью сканирования и величиной перекрытия линий сканирования возможно в программном режиме. Скорость сканирования (v) меняется в пределах от 10 мм/с до 4000 мм/с. Плотность перекрытия линий сканирования ($\Pi_{\text{пр}}$) варьируется от 100 лин/мм до 4000 лин/мм.

Контроль экспериментальных образцов проводился на оптическом микроскопе типа Axio Imager A1m фирмы Carl Zeiss, укомплектованном цифровой видеокамерой высокого разрешения. Все эксперименты проводились в режиме сфокусированного лазерного пучка, когда диаметр пятна облучения на подложке составляет 50 мкм. Температура поверхности подложки и ее распределение по площади оценивались в реальном времени с помощью тепловизора FLIR серии SC7000.

Результаты эксперимента и обсуждение

На результаты микроструктурирования системы SiO₂/Si влияют такие факторы, как мощность излучения, плотность энергии излучения, частота следования и длительность импульсов, скорость сканирования луча, величина перекрытия линиями сканирования площади облучения. Исходя из этого, на начальном этапе проводились исследования, связанные с выбором режимов сканирования лазерного пятна на облучаемой площади подложки (площадь облучения 5×5 мм², диаметр пятна 50 мкм), так как в литературе такие данные отсутствовали. Вариации параметров сканирования v и $\Pi_{\text{пр}}$ производились на нескольких фиксированных мощностях излучения (от 2 до 20 Вт). Эти исследования выявили сильную зависимость процессов разрушения поверхности кремния от v и $\Pi_{\text{пр}}$. Вариации v и $\Pi_{\text{пр}}$ приводили к изменению общего количества импульсов излучения лазера, попадающего на область облучения подложки. Полученный результат подтвердил данные [8] о накопительном характере образования структурных дефектов в кремнии под действием лазерного облучения. В результате этого этапа работы был осуществлен выбор режимов сканирования лазерного пучка: скорость сканирования – 100 мм/с, величина перекрытия линий сканирования – 1000 лин/мм.

На первом этапе работы ставилась задача исследовать влияние мощности лазерного излучения на процесс абляции поверхности кремниевой пластины при выбранных выше режимах сканирования. С учетом выбранных скорости сканирования и перекрытия длительность импульсов волоконного лазера составила 100 нс при частоте следования 50 кГц. Мощность излучения волоконного лазера варьировалась от 2 до 20 Вт.

Как показали исследования, минимальная мощность лазера, при которой начинается абляция кремния, составила 4 Вт. Разрушение поверхности подложки сопровождается ее свечением и появлением над облучаемой поверхностью плазменного факела, содержащего ионы атмосферных газов и эжектированные с поверхности частицы кремния. При мощности 8 Вт и более наблюдается рост высоты и увеличение яркости факела, а также появление слоя вещества белого цвета на облученной поверхности. Толщина этого слоя над облучаемой областью быстро растет с ростом мощности облучения и может достигать по высоте толщины кремниевой подложки и более. Под микроскопом облученная область выглядит как бы накрытой сверху белой подушкой. Этот слой имеет рыхлую структуру и легко снимается с поверхности подложки пинцетом или бумажным фильтром. Травление таких образцов в растворе плавиковой кислоты (HF) приводит к быстрому и полному стравливанию возникших слоев, что подтверждает предположение об окислении частиц кремния в плазме кислорода и формировании на поверхности облучаемой области слоя SiO₂. На микрофотографии поверхности участка кремниевой пластины, облученной сканирующим пучком волоконного лазера при мощности 10 Вт (рис. 1, а), видны крупные скопления (кластеры) молекул SiO₂, которые выступают над необлученной поверхностью на высоту вдвое больше толщины эжектированного слоя кремния.

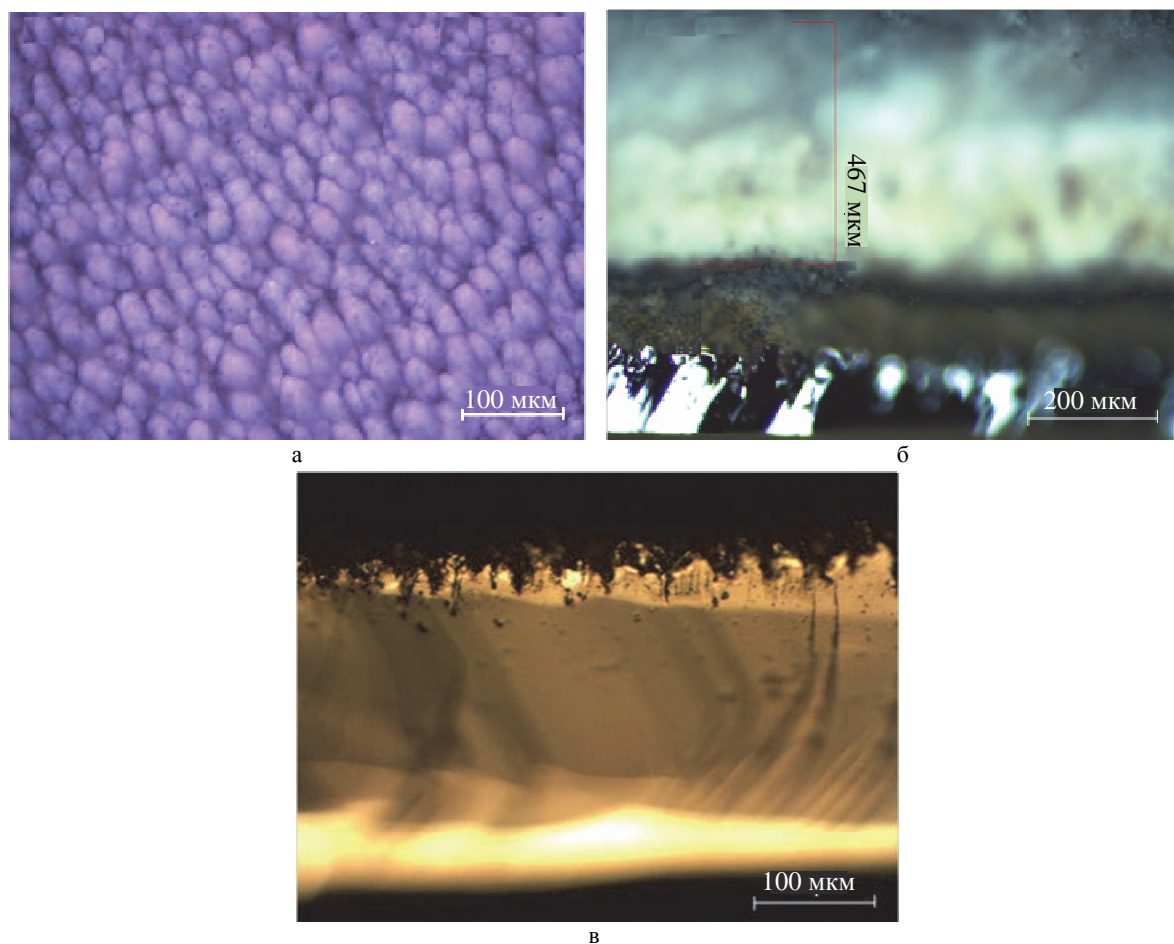


Рис. 1. Фото экспериментальных образцов: поверхность облученного участка кремниевой пластины после сканирования пучка лазера (а); фрагмент скола облученного участка (б); фрагмент скола после травления слоя SiO₂ в растворе HF и промывки подложки в потоке воды (в)

Как видно на микрофотографии скола (рис. 1, б), толщина этого слоя может превышать 470 мкм. Слой имеет белый цвет, рыхлую структуру и удаляется с поверхности в виде мельчайшего порошка пинцетом, фильтровальной бумагой или ватным тампоном. Инфракрасные (ИК) спектры пропускания вещества, образовавшегося при абляции кремния, приведены на рис. 2. В этих спектрах обнаружены интенсивные полосы пропускания, располагающиеся в области волновых чисел 527, 612, 980 и 1130 см⁻¹. По-

явление этих полос свидетельствует об образовании на поверхности облученной области подложки наночастиц фазы SiO_2 либо SiO_x ($x=1,5-2$). В спектрах образцов, в дополнение к перечисленным выше модам колебаний, принадлежащих оксидной фазе, появились полосы пропускания в областях 667 и 1105 см^{-1} , которые можно отнести к оксинитридной фазе $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ или, скорее всего, следу адсорбированной воды [12, 13]. Таким образом, ИК спектры пропускания подтверждают химический состав конденсата и его происхождение, связанное с окислением частиц эжектированного кремния в среде плазменного факела и их последующей конденсацией на поверхности с формированием слоя SiO_2 .

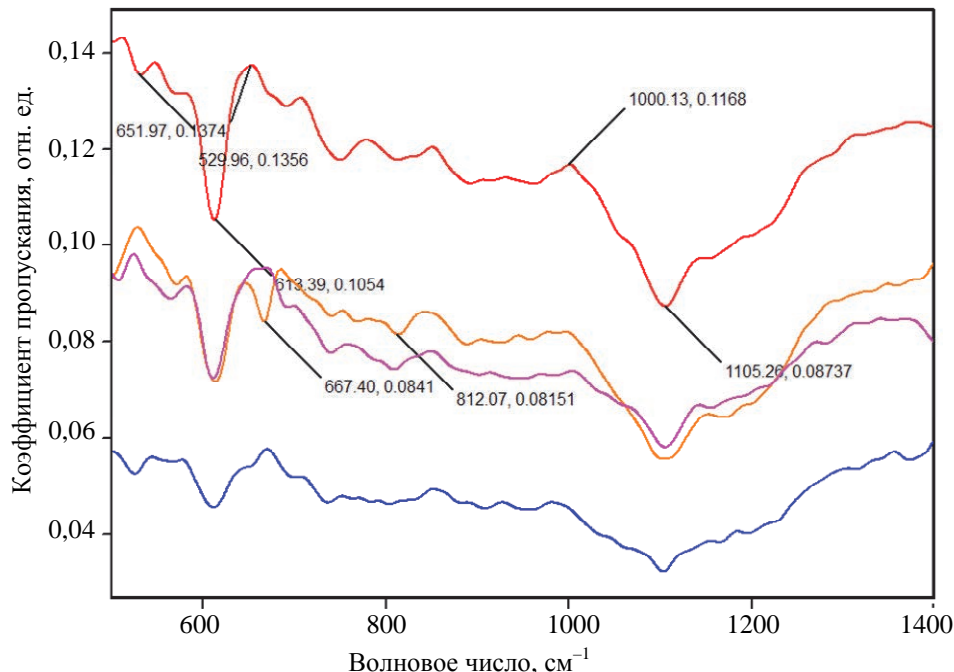


Рис. 2. ИК спектры пропускания вещества, образовавшегося при абляции кремния. Образец получен при следующих режимах работы лазера и сканирующей установки: мощность лазера 20 Вт, длительность импульсов 100 нс, частота следования импульсов 50 кГц, перекрытие линий сканирования 1000 лин/мм. Кривые соответствуют скорости сканирования: желтая – 8750 мм/с; красная – 3000 мм/с; розовая – 1000 мм/с; синяя – 100 мм/с

На рис. 1, б, также наблюдается нижний слой с бликами от поверхности отдельных выступов кристалла, представляющий собой нарушенный слой монокристаллической подложки. Средний (темно-серый) слой представляет собой мелкие частички кремния, образующиеся в результате послойного дробления (растрескивания) монокристаллической подложки. Эти частички выбрасываются наружу с поверхности кремния и составляют часть плазмы факела. В факеле они частично или полностью (в зависимости от режимов и условий облучения) распадаются на атомы, ионизируются и вступают в химическую реакцию с ионами кислорода.

Часть мелких кристаллов, вследствие действия высокой температуры плазмы в факеле, может напрямую окисляться в плазме кислорода. Следует отметить, что процесс окисления кремния («сжигания» кремния) носит экзотермический характер, что приводит к дополнительному существенному повышению температуры плазмы и преобладающему взаимодействию ионов кремния с ионами кислорода. При этом, как следует из рис. 3, температура области облучения кремниевой пластины составляет около 1000 °С, т.е. существенно ниже температуры плавления кремния (1423 °С). Об этом свидетельствует и тот факт, что после травления экспериментальных образцов в растворе плавиковой кислоты (HF) (рис. 1, в) слой SiO_2 полностью удаляется, а мелкие частички кремния после промывки в потоке воды оседают в растворе. На сколе подложки после травления поверхность нарушенного слоя имеет трещиноватую структуру без каких-либо следов плавления кремния.

Часто полагают, что процессы эжекции (абляции) являются чисто тепловыми (тепловая десорбция, плавление, перегрев, взрывное вскипание) и зависят, прежде всего, от величины плотности энергии импульса, поглощенной в поверхностном слое мишени. В частности, переход от десорбции к абляции и количество эжектированного материала полностью определяются энергией излучения, начальной температурой мишени и коэффициентом поглощения [6, 14, 15]. Однако результаты следующего эксперимента свидетельствуют о том, что кроме количества энергии, полученной материалом в результате воздействия лазерного импульса и распределения этой энергии в облучаемом образце, способ передачи энергии кристаллу также является важным фактором, влияющим на механизмы абляции и параметры эжектированного материала.

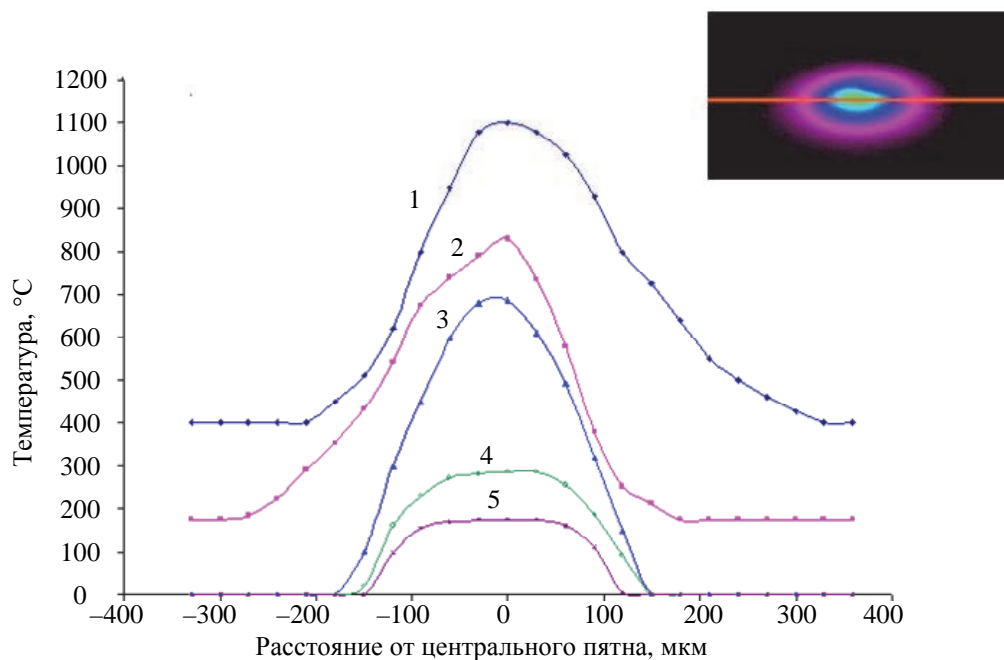


Рис. 3. Температурные профили пятна вдоль направления сканирования при разных мощностях (1 – 20 Вт; 2 – 16 Вт; 3 – 12 Вт; 4 – 8 Вт; 5 – 4 Вт). На вставке – термограмма зоны облучения

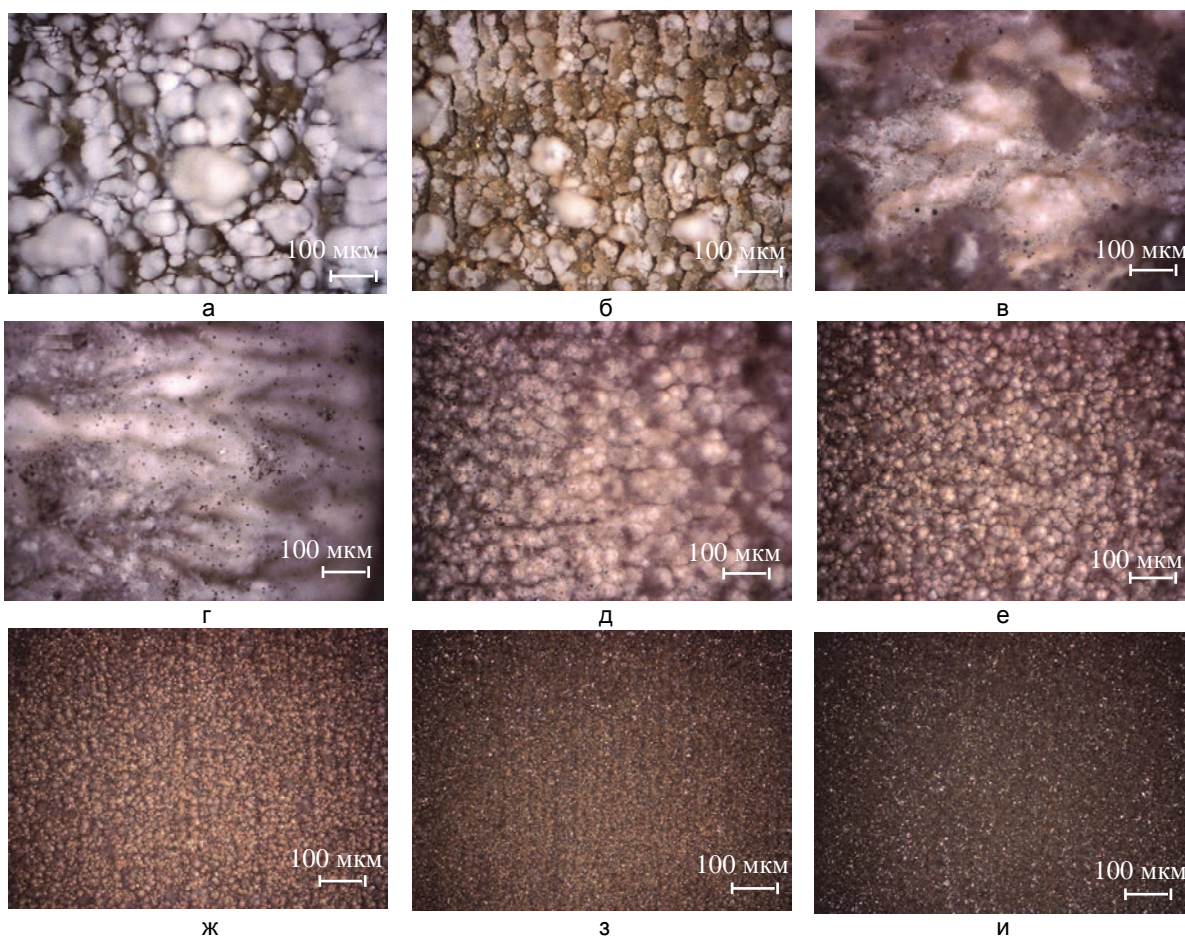


Рис. 4. Микрофотографии участков области сканирования, полученных при плотности мощности $1,02 \cdot 10^6$ Вт/см² с разными скоростями сканирования: 10 мм/с (а); 50 мм/с (б); 100 мм/с (в); 300 мм/с г); 600 мм/с (д); 1000 мм/с (е); 2000 мм/с (ж); 3000 мм/с (з); 4000 мм/с (и). Во всех случаях плотность перекрытия $P_{np} = 1000$ лин/мм, $f = 99$ кГц

Для установления более точного диапазона режимов сканирования пучка, в котором наблюдается рост слоя SiO_2 , в качестве переменного параметра, обеспечивающего более плавное изменение общего количества импульсов, падающих на облучаемую площадь подложки, была выбрана скорость сканирования пучка. Процесс микроструктурирования проводился при тех же режимах работы лазера, что и в ранее описанном эксперименте. Была изменена только частота следования импульсов (99 кГц вместо 50 кГц). Как и ранее, площади областей облучения составляли $5 \times 5 \text{ мм}^2$, диаметр лазерного пятна – 50 мкм. При облучении лазером поверхности монокристалла кремния изменялась только скорость сканирования лазерного луча в диапазоне скоростей от 10 мм/с (когда на облучаемой площади появляются первые кластеры оксида кремния) до 4000 мм/с. На рис. 4 приведены микрофотографии поверхности экспериментальных образцов после лазерного микроструктурирования как системы SiO_2/Si , так и кремниевых пластин при различных скоростях сканирования.

Установлено, что максимальное количество SiO_2 образуется на облучаемом участке при скоростях сканирования от 100 до 300 мм/с. При этих скоростях сканирования пучка визуально наблюдаются максимальные высота и яркость факела, а образующиеся молекулы SiO_2 группируются в крупные кластеры. Следует, однако, отметить, что в отличие от результата исследования первых экспериментальных образцов (рис. 1), здесь на поверхности кластеров SiO_2 наблюдается небольшое количество не окисленных частиц кремния. По нашему мнению, это обусловлено тем, что в этом эксперименте почти в два раза увеличилась энергия падающего излучения (частота следования импульсов составляла 99 кГц вместо 50 кГц).

Дальнейший рост скорости сканирования приводит к уменьшению размеров и яркости факела, уменьшению размеров кластеров молекул SiO_2 и увеличению числа частиц не окисленного кремния. Начиная со скорости сканирования 2000 мм/с, наличие факела визуально не фиксируется, прекращается образование оксида кремния, а на поверхности формируется слой наночастиц кремния. Толщина этого слоя растет с увеличением времени облучения.

Процесс разрушения монокристаллического кремния, как указывалось ранее, обусловлен дислокационным механизмом, который начинается с бурного роста собственных точечных дефектов (собственных междоузельных атомов и вакансий). На основе междоузельных атомов кремния происходит рост дислокаций. Постоянная подпитка поверхности высокоэнергетическими импульсами излучения при большом перекрытии областей воздействия приводит к увеличению плотности и протяженности дислокаций, а также к увеличению скорости их движения и взаимодействию между собой. Затем, согласно теории Т. Екобори [16], в кристаллах хрупких материалов, к которым относится и кремний, в местах пересечения нескольких дислокаций возникают микротрещины. Далее, при условии энергетической подпитки они увеличиваются и в длину, и в ширину. Наконец, происходит хрупкое разрушение кристалла. Полученный здесь результат хорошо совпадает с данными работ [8, 9], в которых исследовалось твердофазное разрушение поверхности кремния при воздействии лазерных импульсов на воздухе и в вакууме. В цитированных работах было показано, что процесс разрушения поверхности наблюдается только при многоимпульсном воздействии, носит накопительный характер и связан с генерацией и ростом дислокаций.

В настоящем эксперименте процесс разрушения области облучения сопровождался хорошо слышимым звуком достаточно высокой частоты, обусловленным интенсивным развитием трещин и связанным с ними измельчением частиц монокристалла. Звуковая частота, связанная с процессом разрушения монокристалла кремния, растет с ростом скорости сканирования. На ход процесса абляции не влияют ни электрические свойства и кристаллографическая ориентация монокристалла, ни наличие или отсутствие на поверхности пленки SiO_2 .

Заключение

В работе приведены результаты исследования процесса лазерной абляции кремния при облучении сканирующим пучком импульсного итербиевого волоконного лазера с длиной волны $\lambda = 1062 \text{ нм}$. Показано, что процесс абляции кремния в этих условиях происходит, минуя плавление кремния. Разрушение облученной поверхности кремния имеет дислокационную природу, т.е. связано с возникновением, ростом, размножением и взаимодействием дислокаций и с последующим хрупким механическим разрушением кремния. Определяющим фактором в этом процессе является общее число импульсов лазерного излучения, падающих на площадь облучения. Определены режимы облучения, которые влияют на состав образующихся продуктов абляции. Если абляция кремния сопровождается ионизацией частиц и образованием факела плазмы, то происходит образование диоксида кремния, который осаждается на облученной поверхности кремния. Максимум скорости роста кластеров SiO_2 совпадает с максимальной высотой и максимальной яркостью факела. Дальнейшее наращивание числа импульсов облучения путем увеличения частоты следования (99 кГц вместо 50 кГц) приводит к увеличению числа эжектированных частиц кремния с поверхности пластины, снижению степени ионизации плазмы, уменьшению скорости роста кластеров SiO_2 и увеличению числа частиц эжектированного неокисленного кремния. Начиная со скорости сканирования 2000 мм/с, наличие факела визуально не фиксируется, а процесс разрушения сопровож-

ждается звуком развивающихся микротрещин в кремнии. Частота звука, связанного с разрушением кремния, растет с увеличением частоты сканирования лазерного пучка. На процесс абляции кремния с последующим формированием диоксида кремния в приведенных режимах не влияют ни параметры кремния (тип проводимости, ориентация и удельное сопротивление), ни наличие или отсутствие на поверхности кремниевой подложки слоя диоксида кремния.

Литература

1. Вейко В.П., Дышлошенко С.С., Скворцов А.М. Лазерное микроструктурирование поверхности кремния / Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов. Часть 2. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 138–153.
2. Eliseev P.G., Krokhin O.N., Zavestovskaya I.N. Nonlinear absorption mechanism in ablation of transparent materials by high power and ultrashort laser pulses // Applied Surface Science. 2005. V. 248. N 1–4. P. 313–315. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.03.063
3. Zavestovskaya I.N., Eliseev P.G., Krokhin O.N., Men'kova N.A. Analysis of the nonlinear absorption mechanisms in ablation of transparent materials by high-intensity and ultrashort laser pulses // Applied Physics A: Materials Science and Processing. 2008. V. 92. N 4. P. 903–906. doi: 10.1007/s00339-008-4609-9
4. Veiko V.P., Skvortsov A.M., Sokolov V.I., Tung P.Q., Khalecki R.A., Efimov E.I. Effect of laser irradiation on the structures properties such as SiO₂/Si // Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2011. V. 7996. Art. 79960S.
5. Veiko V.P., Skvortsov A.M., Sokolov V.I., Quang Tung Pham, Khalecki R.A., Efimov E.I. Effect of laser irradiation on the structures properties such as SiO₂/Si // Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2010. V. 7996. Art. 79960S.
6. Bauerle D. Laser Processing and Chemistry. 4th ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 851 p. doi: 10.1007/978-3-642-17613-5
7. Банишев А.Ф., Голубев В.С., Кремнев А.Ю. Генерация и накопление дислокаций на поверхности кремния при воздействии импульсно-периодического излучения YAG: Nd-лазера // Журнал технической физики. 2001. Т. 71. № 8. С. 33–38.
8. Банишев А.Ф., Павлов А.М. Формирование структур дислокаций в приповерхностном слое кремния под воздействием лазерного излучения с микроструктурированным распределением интенсивности // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 6. С. 11–17.
9. Банишев А.Ф., Голубев В.С., Кремнев А.Ю. Разрушение поверхности кремния в твердой фазе при воздействии импульсов YAG:Nd-лазера // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 10. С. 941–944.
10. Скворцов А.М., Вейко В.П., Хуинь Конг Ту. Применение импульсного волоконного лазера для микроструктурирования системы SiO₂/Si // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 5 (81). С. 128–133.
11. Скворцов А.М., Хуинь Конг Ту, Халецкий Р.А. Механизм микроструктурирования системы SiO₂/Si при облучении сканирующим пучком импульсного волоконного лазера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3 (85). С. 137–143.
12. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. М.: МГУ, 1967. 139 с.
13. Budhani R.C. et al. Structural order in Si–N and Si–N–O films prepared by plasma assisted chemical vapor deposition process // Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 1987. V. 5. N 4. P. 1644–1648.
14. Zhigilei L.V., Yingling Y.G., Itina T.E., Schoolcraft T.A., Garrison B.J. Molecular dynamics simulations of matrix assisted laser desorption – connections to experiment // International Journal of Mass Spectrometry. 2003. V. 226. N 1. P. 85–106. doi: 10.1016/S1387-3806(02)00962-4
15. Zhigilei L.V., Leveugle E., Garrison B.J., Yingling Y.G., Zeifman M.I. Computer simulations of laser ablation of molecular substrates // Chemical Reviews. 2003. V. 103. N 2. P. 321–347. doi: 10.1021/cr010459r
16. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов. Киев: Наукова думка, 1978. 352 с.

Вейко Вадим Павлович

– доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, veiko@lastech.ifmo.ru

Скворцов Альберт Матвеевич

– доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a-skvortsov@yandex.ru

Хуинь Конг Ту

– кандидат технических наук, преподаватель, Куинён университет, Куинён, Бинь Динь, 170 Ан Дыонг Вьонг, Вьетнам, Picochip912@yahoo.com

Петров Андрей Анатольевич

– кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, petrovandrey79@gmail.com

- Vadim P. Veiko* – D.Sc., Professor, Department head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, veiko@lastech.ifmo.ru
- Albert M. Skvortsov* – D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a-skvortsov@yandex.ru
- Huynh Cong Tu* – PhD, lecturer, Quy Nhon University, Quy Nhon, Binh Dinh, 170 An Duong Vuong, Viet Nam, Picochip912@yahoo.com
- Andrey A. Petrov* – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, petrovandrey79@gmail.com