

УДК 621.373.535

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-417-425

МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ ОДНОКРАТНОМ ОБЛУЧЕНИИ СДВОЕННЫМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

Е.В. Кузьмин, Д.С. Поляков, А.А. Самохвалов, Г.Д. Шандыбина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: Kuzmin_ev@live.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.03.19, принята к печати 30.04.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Кузьмин Е.В., Поляков Д.С., Самохвалов А.А., Шандыбина Г.Д. Микроструктурирование поверхности кремния при однократном облучении сдвоенным фемтосекундным лазерным импульсом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 417–425. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-417-425

Аннотация

Предмет исследования. Оценка возможности формирования периодических микроструктур на поверхности кремния за один сдвоенный фемтосекундный лазерный импульс. **Метод.** Использован экспериментальный метод сдвоенных фемтосекундных лазерных импульсов на основе интерферометра Майкельсона и теоретический метод численного моделирования процесса фотовозбуждения полупроводника в приближении диэлектрической проницаемости. **Основные результаты.** Представлены экспериментальные результаты по облучению поверхности монокристаллического кремния одним сдвоенным фемтосекундным лазерным импульсом вблизи порога абляции при различных временных задержках. Результаты анализа полученных оптических изображений поверхности лазерооблученного кремния сопоставлены с результатами теоретического моделирования процесса фотовозбуждения полупроводника на основе представлений теории поляритонов. Обоснована проблематичность формирования поверхностных периодических микроструктур на кремнии за один фемтосекундный лазерный импульс. **Практическая значимость.** Проведенное исследование полезно при выборе промышленно выгодных высокочастотных режимов фемтосекундного микроструктурирования поверхности полупроводников.

Ключевые слова

поверхностная электромагнитная волна, фемтосекундное микроструктурирование поверхности, монокристаллический кремний

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-32-00839.

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-417-425

SILICON SURFACE MICROSTRUCTURING BY SINGLE-EXPOSURE FEMTOSECOND DOUBLE LASER PULSE

E.V. Kuzmin, D.S. Polyakov, A.A. Samokhvalov, G.D. Shandybina

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: Kuzmin_ev@live.ru

Article info

Received 27.03.19, accepted 30.04.19
 Article in Russian

For citation: Kuzmin E.V., Polyakov D.S., Samokhvalov A.A., Shandybina G.D. Silicon surface microstructuring by single-exposure femtosecond double laser pulse. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 417–425 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-417-425

Abstract

Subject of Research. The paper evaluates the possibility of periodic microstructures formation on the silicon surface by single-exposure double femtosecond laser pulse. **Method.** We used experimental method of double femtosecond laser pulses based on the Michelson interferometer and theoretical numerical simulation method of semiconductor photoexcitation process in the dielectric constant approximation. **Main Results.** Experimental results are presented on the monocrystalline silicon surface irradiation with one double femtosecond laser pulse near the ablation threshold at various time delays. Obtained optical images of the laser-irradiated silicon surface are analyzed and the results are compared with the results of photoexcitation

process theoretical simulation in semiconductor based on the polariton theory concepts. The problematic nature of the periodic surface microstructures formation on silicon by a single femtosecond laser pulse is demonstrated. **Practical Relevance.** This study is useful when choosing industrially advantageous high-frequency modes of semiconductor surface femtosecond microstructuring.

Keywords

surface electromagnetic wave, femtosecond microstructuring, monocrystalline silicon

Acknowledgements

This work was supported by the RFBR Grant No.18-32-00839.

Введение

Микроstructuring поверхности материала является незаменимой частью многих технологических процессов [1]. В настоящее время структурирование поверхности металлов, полупроводников и диэлектриков с характерными масштабами от десятков нанометров до нескольких микрон широко применяется в области нанотехнологий [2]. Основными методами являются литографические, когда структурирование поверхности производится поэтапно с помощью светового излучения, рентгеновского излучения или потока электронов/ионов, а также непосредственно методами сканирующей туннельной микроскопии или атомной силовой микроскопии. Стремительное развитие лазерной техники позволило методу лазерной обработки занять высокое место в ряду существующих способов микроstructuring поверхностей металлов, полупроводников и диэлектриков, и в том числе кремния – важнейшего материала микроэлектроники, фотоники, плазмоники. Переход к ультракоротким лазерным импульсам позволил добиться прецизионного управления процессами формирования микроструктур на поверхности полупроводников в зависимости от числа импульсов, плотности энергии лазерного облучения и от среды, в которой находится образец [3–9]. Лазероструктурированный кремний характеризуется высоким поглощением света с минимальным отражением от поверхности, что, в частности, важно для повышения эффективности работы солнечных элементов [8]. Лазероиндуцированные структуры также оказывают определяющее влияние на смачивание жидкостями твердых тел [10].

На сегодняшний день накоплен большой экспериментальный материал по лазерному формированию поверхностных упорядоченных структур. Разнообразие типов лазерных микроструктур столь велико, что попытки составить их полную классификацию до сих пор не увенчались успехом. Тем не менее выделен характерный тип линейных лазероиндуцированных периодических структур, которые ориентированы перпендикулярно вектору поляризации и имеют период, близкий к длине волны лазерного излучения. Механизм образования подобных поверхностных периодических структур (классические ППС) обусловлен частичным преобразованием падающего излучения в поверхностную электромагнитную волну (ПЭВ), интерференцией света и ПЭВ и последующим развитием тепловых процессов: испарение, вытеснение расплава избыточным давлением паров, термохимические реакции и др. [11, 12].

Обычно формирование микроструктур происходит при многоимпульсном лазерном облучении. В этом случае определенную роль начинают играть различные эффекты накопления. При низких частотах следования лазерных импульсов определяющее значение отводится накоплению структурных изменений поверхности от импульса к импульсу [13]. При высоких частотах повторения импульсов (от 100 кГц до 2 МГц) важную роль в эволюции морфологии поверхностных структур отводят накоплению тепла [14]. Переход к высокочастотному режиму облучения позволяет сделать технологию фемтосекундного микроstructuring поверхности промышленно выгодной, поэтому важным становится вопрос о минимальном количестве лазерных импульсов, необходимых для микроstructuring поверхности. Большинство исследователей склоняется к тому, что формирование ППС на поверхности кремния происходит только после облучения несколькими (не менее двух) фемтосекундными лазерными импульсами в одно и то же пятно [15]. Тем не менее теоретически методом молекулярной динамики была показана возможность формирования ППС на поверхности металлов в режиме облучения одиночным фемтосекундным лазерным импульсом [16].

Целью данной работы является оценка возможности формирования периодических структур на поверхности кремния за один двоянный фемтосекундный лазерный импульс, используя экспериментальный метод двоянного импульса с различными временными задержками и численное моделирование процесса фотовозбуждения полупроводника в приближении диэлектрической проницаемости.

Эксперимент и результаты

Экспериментальный метод двоянных фемтосекундных лазерных импульсов позволяет получить дополнительную информацию о динамике формирования лазероиндуцированного микрорельефа поверхности. На рис. 1 представлена схема экспериментального макета.

Монокристаллический кремний облучается серией двоянных фемтосекундных лазерных импульсов с длительностью отдельного импульса ($\tau_{1,2}$) около 100 фс, на длине волны излучения (λ), равной 800 нм,

и с плотностью энергии отдельного импульса ($Q_{1,2}$) около $0,2 \text{ Дж/см}^2$ на частоте 10 Гц. При этом скорость перемещения образца выбирается такой, чтобы каждый последующий импульс попадал на новое место. Тем самым обеспечивается режим облучения одним сдвоенным фемтосекундным импульсом.

На рис. 2 представлены характерные оптические изображения поверхности кремния, облученного при различных значениях времени задержки Δt сдвоенного импульса.

При малых задержках Δt , равных 330 фс (рис. 2, а), большая часть облученной области покрыта двумерными, переходящими в хаотические, структурами (рис. 2, а, фрагмент 1). Разнообразная картина структурирования поверхности наблюдается при времени задержки Δt , равной 660 фс (рис. 2, б). На облученной поверхности кремния видны радиально-угловые микроструктуры, исходящие из центров дефектов, с периодом, близким к λ (рис. 2, б, фрагмент 3), классические линейные ППС с периодом близким к λ (рис. 2, б, фрагмент 1) (и те и другие ориентированы перпендикулярно вектору поляризации) и двумерные микроструктуры с периодами меньше λ (рис. 2, б, фрагмент 2). С переходом в пикосекундный диапазон (задержка Δt равна 1 пс) периодичность в структурировании поверхности нарушается, и поверхность приобретает мозаичную шероховатость (рис. 2, в, фрагмент 1). При увеличении задержки до более чем 3 пс (рис. 2, г, фрагмент 1) опять наблюдается формирование классических ППС.

Предварительная очистка поверхности раствором изопропилового спирта значительно уменьшает контрастность лазерооблученной поверхности при малых задержках, формирование классических ППС происходит при Δt , примерно равной 4 пс.

Таким образом, в зависимости от времени задержки сдвоенного импульса наблюдаются следующие характерные виды модификации поверхности: при временной задержке до 660 фс — двумерно-мозаичная структура; при временной задержке, равной 660 фс, — радиально-угловые, одномерные классические и двумерные периодические структуры; при временной задержке в диапазоне от 1 до 2 пс периодичность трансформируется в мозаичную шероховатость поверхности; при временной задержке не менее 3,3 пс образуются классические линейные ППС. Предварительная очистка поверхности приводит к формированию классических ППС при временной задержке примерно в 4 пс.

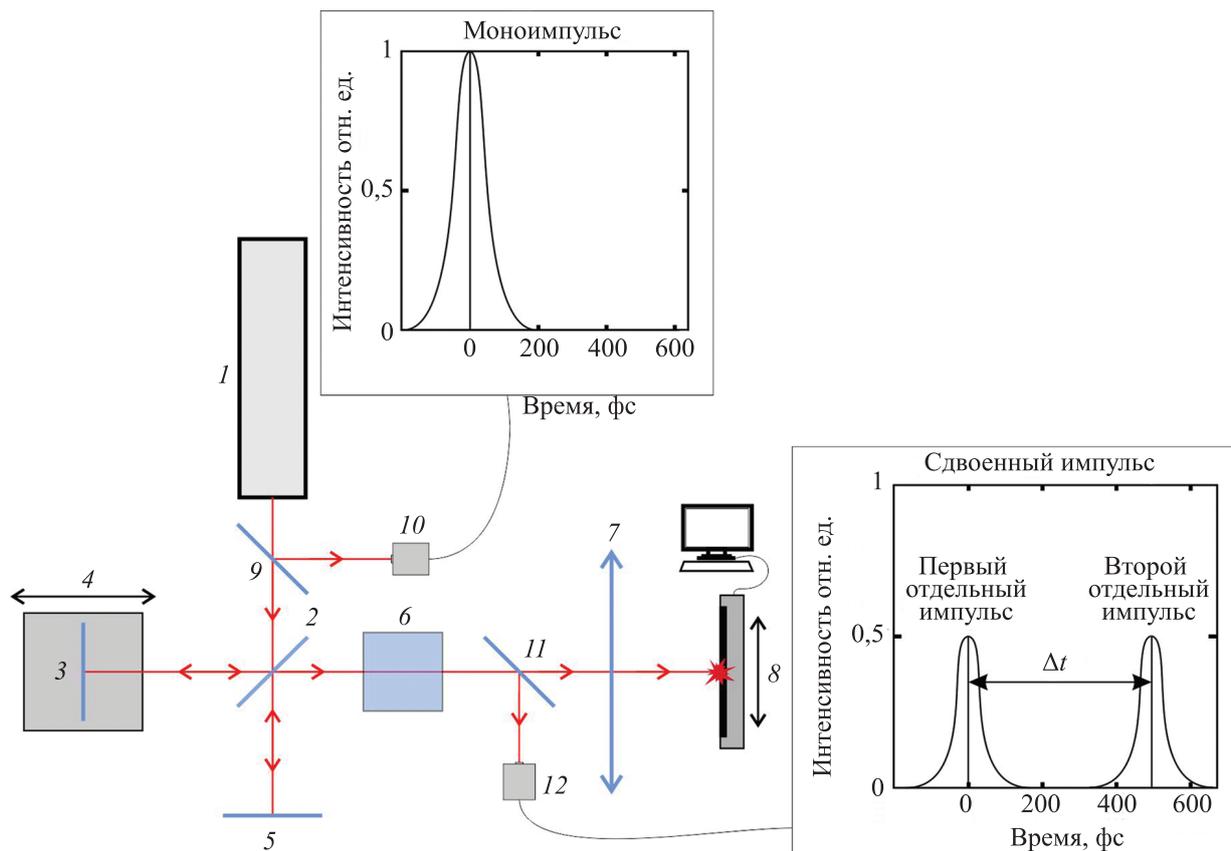


Рис. 1. Схема экспериментального макета: 1 — фемтосекундная лазерная система; 2 — полупрозрачное зеркало; 3, 5 — зеркала; 4 — линия задержки; 6 — дифракционный ослабитель; 7 — фокусирующая линза; 8 — мишень на программно-управляемом трансляционном столике; 9, 11 — откидные зеркала; 10, 12 — измерители энергии.

На вставке (Δt) — временная задержка между отдельными импульсами сдвоенного импульса

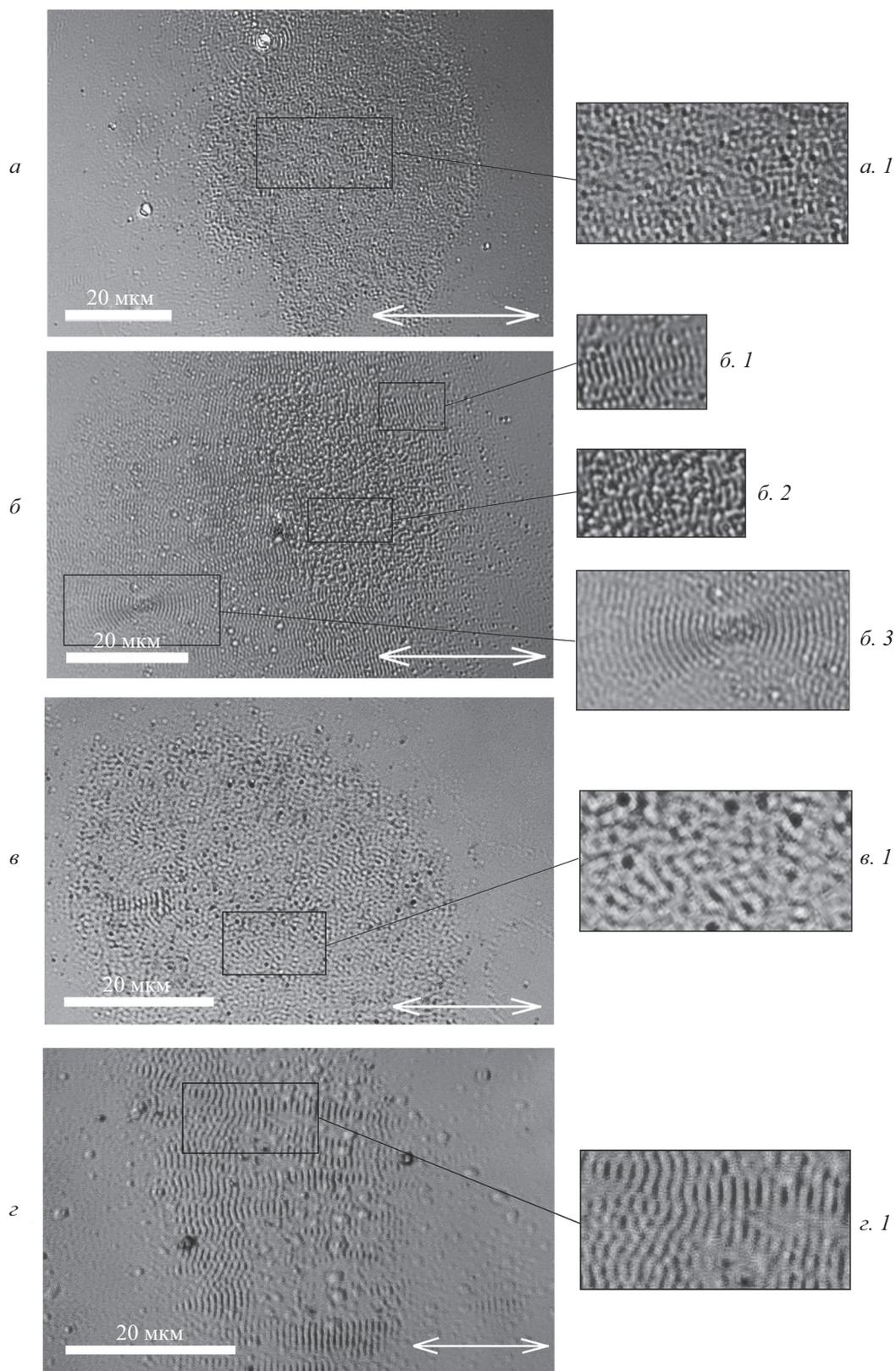


Рис. 2. Оптические изображения поверхности монокристаллического кремния, облученного одним сдвоенным фемтосекундным лазерным импульсом для различных временных задержек:
a — $\Delta t = 330$ фс; *б* — $\Delta t = 660$ фс; *в* — $\Delta t = 1$ пс; *г* — $\Delta t = 3,9$ пс.
 Стрелкой показано направление вектора поляризации лазерного излучения

Теоретическое моделирование

Расчет динамики фотовозбуждения кремния производится в рамках моделей, подробно рассмотренных в работах [17, 18], где предполагается, что концентрация возбужденных носителей меняется вследствие двухфотонного и однофотонного межзонного поглощения, Оже-рекомбинации и диффузии; поглощение свободными носителями оценивается на основе модели Друде, а нагрев электронной и решеточной подсистем рассчитывается в рамках двухтемпературной модели. Значения основных параметров, использованных при моделировании, взяты из работ [19–21].

На рис. 3 представлена динамика концентрации фотовозбужденных носителей на поверхности кремния и пространственно-временное распределение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости при облучении сдвоенным фемтосекундным лазерным импульсом с различными задержками. Видно, что при относительно небольших задержках (330 и 660 фс) (рис. 3, а, б) концентрация возбужденных носителей (n_e) после первого отдельного импульса не превышает критическое значение концентрации возбужденных носителей (n_e^*), равное $4,9 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, при котором действительная часть диэлектрической проницаемости ($\text{Re}\epsilon$) становится меньше -1 . Второй отдельный импульс, попадая в фотовозбужденную среду, способствует достижению максимальной концентрации и металлизации полупроводника. При этом толщина слоя, внутри которого $\text{Re}\epsilon$ меньше -1 , согласно проделанным расчетам, составляет около 20 нм.

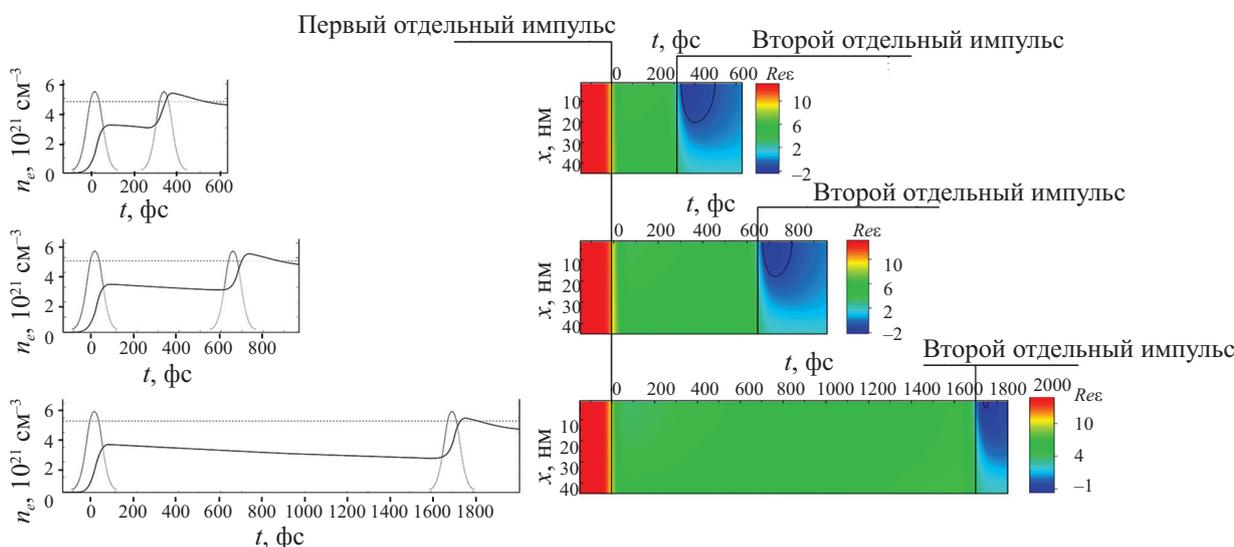


Рис. 3. Динамика концентрации фотовозбужденных носителей (n_e) на поверхности кремния и пространственно-временное распределение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости ($\text{Re}\epsilon$) при облучении сдвоенным импульсом для различных временных задержек: а — $\Delta t = 330$ фс; б — $\Delta t = 660$ фс; в — $\Delta t = 1700$ фс. (темно-синяя область соответствует уровню $\text{Re}\epsilon$, равному -1 ; t — время; координата x направлена вглубь)

В случае более длинных задержек (1–2 пс) (рис. 3, в) уменьшение концентрации носителей между импульсами, вызванное Оже-рекомбинацией, оказывается существенным, и при воздействии второго отдельного импульса максимальная концентрация носителей незначительно превышает критическую концентрацию, а толщина металлизированного слоя составляет всего лишь около 5 нм. При воздействии сдвоенным импульсом с задержкой более 3 пс решетка кремния успевает нагреться до температуры плавления между отдельными импульсами (рис. 4).

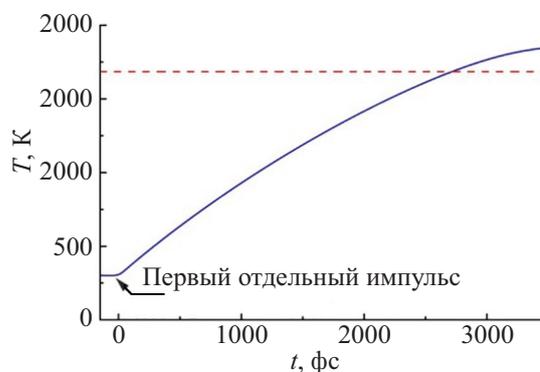


Рис. 4. Зависимость температуры решетки кремния (T) на поверхности от времени после воздействия первого отдельного импульса. Пунктирная линия обозначает температуру плавления кремния

Сопоставление экспериментальных и теоретических результатов

Из решения уравнений Максвелла в приближении диэлектрической проницаемости следует, что ПЭВ распространяется вдоль границы раздела двух сред, если у одной из сред диэлектрическая проницаемость (ϵ_1) положительна, а у другой среды действительная часть диэлектрической проницаемости ($\text{Re}\epsilon_2$) отрицательна, причем должно выполняться условие [22]:

$$\epsilon_1 > 0, \text{Re } \epsilon_2 < 0, |\epsilon_2| > \epsilon_1; \mathbf{k}_s = \mathbf{k}_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}, \quad (1)$$

и волновой вектор ПЭВ (\mathbf{k}_s) больше волнового вектора падающей волны (\mathbf{k}_0). Поэтому для возбуждения ПЭВ должны использоваться специальные приспособления.

Для полупроводников условие (1) выполняется в зависимости от длительности лазерного импульса различными путями. Если длительность импульса больше времени электрон-фононного взаимодействия ($\tau > \tau_{ep}$, где τ_{ep} порядка 10^{-12} с), то нагрев поверхности и плавление происходят в течение действия лазерного импульса. Фазовый переход твердое тело-расплав сопровождается переходом полупроводника в металлизированное состояние, что делает возможным распространение ПЭВ на границе воздух/металлизированный полупроводник. Если длительность импульса меньше времени электрон-фононного взаимодействия (ультракороткие импульсы), то металлизация полупроводника может произойти в результате роста концентрации электронно-дырочной плазмы полупроводника в течение действия лазерного импульса. Согласно выражению (2), при n_e , превышающем n_e^* , $\text{Re}\epsilon$ становится меньше -1 и возможно распространение ПЭВ:

$$\text{Re}\epsilon = \epsilon_{si} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}; \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi n_e e_0^2}{m_e^*}, \quad (2)$$

где ϵ_{si} — диэлектрическая проницаемость невозбужденного кремния; γ — частота столкновений; ω_p — плазменная частота, зависящая от концентрации n_e и эффективной массы свободных электронов; e_0 — заряд электрона; m_e^* — масса электрона.

Обычно ПЭВ рассматриваются как плоские волны [11]. Согласно представлениям, развитым в работе [23], при взаимодействии лазерного излучения с твердым телом возможно также возбуждение цилиндрических поверхностных волн (ЦПВ). Условия (1)–(2) являются общими для существования ПЭВ и ЦПВ на границе раздела двух сред. Различие состоит в способах возбуждения того или иного типа волн. Преобразование падающего излучения в ПЭВ происходит на неровностях границы, в пространственном спектре которых всегда присутствует необходимая для ввода ПЭВ «резонансная» дифракционная решетка. При этом на случайной поверхности должна возбуждаться не одна, а целый набор ПЭВ различных направлений. Возбуждение ПЭВ возможно также на протяженных периодических микронеоднородностях диэлектрической проницаемости среды [23]. Для возбуждения ЦПВ не требуется периодического рельефа. ЦПВ возбуждается на отдельных неоднородностях (дефектах) поверхности, и в отличие от ПЭВ амплитуда ЦПВ затухает в радиальном направлении и имеет сильную угловую зависимость. Микроструктуры на поверхности образуются в результате интерференции поверхностных волн (как ПЭВ, так и ЦПВ) с падающим излучением и последующим неоднородным нагревом. При этом возбуждение ПЭВ приводит к формированию линейных периодических структур, а возбуждение ЦПВ – радиально-угловых структур. И те, и другие ориентированы вектором поляризации.

Особенностью проведенного эксперимента явилась возможность реализации только электронных процессов, если Δt меньше τ_{ep} , либо подключение тепловых процессов, если Δt больше τ_{ep} в промежутке между отдельными импульсами сдвоенного импульса. Хотя упрощенная численная модель не учитывает особенностей возбуждения ПЭВ и ЦПВ и интерференционные явления, тем не менее она позволила проследить изменение толщины слоя с отрицательной $\text{Re}\epsilon$ с временем задержки и соответственно вероятность возбуждения ПЭВ, а оценка температуры поверхности при пикосекундных задержках показала возможность нагрева решетки кремния между отдельными импульсами до температуры плавления, что также способствует трансформации падающего излучения в ПЭВ.

Используя представления теории поляритонов и результаты моделирования, можно представить следующую картину фемтосекундного микроstructuringа поверхности кремния.

При малых временах задержки (около 300 фс) первый отдельный импульс формирует в фотовозбужденном полупроводнике некое пространственно-временное распределение диэлектрической проницаемости, которое не успевает релаксировать к приходу второго импульса, и второй отдельный импульс падает на поверхность с наведенной диэлектрической проницаемостью. Высота исходных случайных резонансных решеток, на которых возбуждается набор плоских ПЭВ различных направлений, крайне мала. Поэтому на опыте вместо периодического рельефа наблюдаем поверхность, частично покрытую слабовыраженными двумерными структурами, переходящими в хаотические. Эта картина свидетельствует о развитии лазерно-индуцированной неустойчивости поверхности. В то же время дефекты, присутствующие на поверхно-

сти, могут служить центрами возбуждения ЦПВ, так как порог их возбуждения ниже порога возбуждения плоских ПЭВ. ЦПВ интерферируют с падающим излучением, создавая протяженные периодические микронеоднородности в поле диэлектрической проницаемости. При увеличении времени задержки до 600 фс второй отдельный импульс падает на поверхность с наведенной диэлектрической проницаемостью в виде протяженного периодического рельефа. Эффективность возбуждения плоских ПЭВ резко возрастает. ПЭВ, так же как и ЦПВ, интерферирует с падающим излучением. Создается сложное интерференционное поле, а по окончании сдвоенного лазерного импульса в результате электрон-фононного взаимодействия происходит нагрев и структурирование поверхности. На облученной поверхности кремния наблюдаем радиально-угловые микроструктуры, обусловленные возбуждением ЦПВ, классические ППС, связанные с генерацией ПЭВ, и двумерные микроструктуры, возможно, обусловленные взаимной интерференцией ПЭВ. При переходе в пикосекундный диапазон временных задержек (от 1 до 2 пс) эффективность возбуждения ПЭВ падает в связи с межимпульсной релаксацией наведенной диэлектрической проницаемости, что проявляется в резком уменьшении области ППС. При больших временах задержки (более чем 3 пс) образец между импульсами успевает нагреться и расплавиться, поэтому к приходу второго импульса расплавленный полупроводник ведет себя, как металл и запускается не плазменный, а тепловой механизм возбуждения ПЭВ, что и проявляется в формировании классических ППС. Предварительная очистка поверхности полупроводника уменьшает число дефектов и снижает эффективность возбуждения ЦПВ и соответственно эффективность возбуждения ПЭВ. Поэтому на опыте наблюдается формирование классических ППС при Δt , равной 4 пс, когда второй импульс падает на расплавленную поверхность. При меньших задержках контрастность микрорельефа слабо выражена.

Заключение

Воздействие одного сдвоенного фемтосекундного лазерного импульса на кремний с временными задержками, составляющими десятые доли — единицы пикосекунд, показало, что для получения линейных периодических поверхностных структур необходимо не только создание электронной плазмы с высокой концентрацией, но и создание протяженных периодических микронеоднородностей диэлектрической проницаемости среды.

Это объясняет проблематичность моноимпульсного фемтосекундного режима формирования поверхностных периодических структур. На практике при многоимпульсной фемтосекундной обработке первый фемтосекундный импульс (моноимпульс) формирует на поверхности в основном протяженные периодические неоднородности рельефа в виде радиально-угловых структур (возбуждая цилиндрические поверхностные волны). Последующие импульсы падают на поверхность, на которой присутствуют периодические структуры, и эффективность возбуждения поверхностных электромагнитных волн резко возрастает, что способствует формированию классических поверхностных периодических структур и подтверждается многочисленными экспериментальными данными [15, 24–26].

Влияние цилиндрических поверхностных волн на эффективность возбуждения поверхностных электромагнитных волн указывает на важную роль дефектов поверхности в режимах фемтосекундного микроструктурирования.

Впервые опыты и численное моделирование продемонстрировали возможность получения классических поверхностных периодических структур при действии сдвоенного фемтосекундного импульса путем плавления поверхности полупроводника подобно действию наносекундного импульса при задержках, составляющих единицы пикосекунд.

Проведенное исследование полезно при выборе промышленно выгодных высокочастотных режимов фемтосекундного микроструктурирования поверхности полупроводников.

Литература

1. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение, 1982. 247 с.
2. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
3. Nayak B.K., Mool C.G. Ultrafast laser-induced self-organized conical micro/nano surface structures and their origin // *Optics and Lasers in Engineering*. 2010. V. 48. N 10. P. 966–973. doi: 10.1016/j.optlaseng.2010.05.009
4. Ming Z., Yin G., Zhu J-T., Zhao L. Picosecond pulse laser microstructuring of silicon // *Chinese Physics Letters*. 2003. V. 10. P. 1789–1791. doi.: 10.1088/0256-307X/20/10/338
5. Chichkov B.N., Momma C., Nolte S., von Alvensleben F., Tunnermann A. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids // *Applied Physics A*. 1996. V. 63. N 2. P. 109–115. doi: 10.1007/BF01567637
6. Kautek W., Kruger J. Femtosecond pulse laser ablation of metallic, semiconducting, ceramic and biological materials // *Proc. SPIE*. 1994. V. 2207. P. 600–611. doi: 10.1117/12.184768

References

1. Shneider Yu.G. *Maintenance Properties of Components with a Regular Microrelief*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982, 247 p.
2. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 416 p. (in Russian)
3. Nayak B.K., Mool C.G. Ultrafast laser-induced self-organized conical micro/nano surface structures and their origin. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, vol. 48, no. 10, pp. 966–973. doi: 10.1016/j.optlaseng.2010.05.009
4. Ming Z., Yin G., Zhu J-T., Zhao L. Picosecond pulse laser microstructuring of silicon. *Chinese Physics Letters*, 2003, vol. 10, pp. 1789–1791. doi.: 10.1088/0256-307X/20/10/338
5. Chichkov B.N., Momma C., Nolte S., von Alvensleben F., Tunnermann A. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A*, 1996, vol. 63, no. 2, pp. 109–115. doi: 10.1007/BF01567637
6. Kautek W., Kruger J. Femtosecond pulse laser ablation of metallic, semiconducting, ceramic and biological materials. *Proc. SPIE*, 1994, vol. 2207, pp. 600–611. doi: 10.1117/12.184768

7. Her T., Finlay R.J., Wu C., Deliwala S., Mazur E. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses // *Applied Physics Letters*. 1998. V. 73. N 12. P. 1673–1675. doi: 10.1063/1.122241
8. Sarnet T., Carey J., Mazur E. From black silicon to photovoltaic cells, using short pulse lasers // *AIP Conference Proceedings*. 2012. V. 1464. P. 219. doi: 10.1063/1.4739876
9. Dolgaev S.I., Lavrishev S.V., Lyalin A.A., Simakin A.V., Voronov V.V., Shafeev G.A. Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids // *Applied Physics A*. 2001. V. 73. N 2. P. 177–181. doi: 10.1007/s003390100530
10. Cunha A., Serro A.P., Oliveira V., Almeida A., Vilar R., Durrieu M. Wetting behaviour of femtosecond laser textured Ti–6Al–4V surfaces // *Applied Surface Science*. 2013. V. 265. P. 688–696. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.11.085
11. Бонч-Бруевич А.М., Коченгина М.К., Либенсон М.Н., Макин В.С., Пудков С.Д., Трубаев В.В. Возбуждение поверхностных и волноводных мод интенсивным лазерным излучением и их влияние на характер поверхностного разрушения конденсированных сред // *Изв. АН СССР. сер. Физ.* 1982. Т. 46. № 6. С. 1186–1193.
12. Емельянов В.И., Земсков Е.М., Семиногов В.Н. Теория образования поверхностных решеток при действии лазерного излучения на поверхность металлов, полупроводников и диэлектриков // *Квантовая электроника*. 1983. Т. 10. № 12. С. 2389–2398.
13. Guk I.V., Kuzmin E.V., Shandybina G.D., Yakovlev E.B., Dyukin R.V., Kulagin V.S. Influence of multi-pulse action on the evolution of silicon microrelief under femtosecond laser irradiation // *Journal of Optical Technology*. 2017. V. 84. N 7. P. 462–466. doi: 10.1364/JOT.84.000462
14. Fraggelakis F., Mincuzzi G., Lopez J., Manek-Honninger I., Kling R. Texturing metal surface with MHz ultra-short laser pulses // *Optics Express*. 2017. V. 25. N 15. P. 18131–18139. doi: 10.1364/OE.25.018131
15. Bonse J., Baudach S., Kruger J., Kautek W., Lenzner M. Femtosecond laser ablation of silicon-modification thresholds and morphology // *Applied Physics A*. 2002. V. 74. N 1. P. 19–25. doi: 10.1007/s003390100893
16. Shugaev M.V., Gnilitzkiy I., Bulgakova N.M., Zhigilei L.V. Mechanism of single-pulse ablative generation of laser-induced periodic surface structures // *Physical Review B*. 2017. V. 96. N 20. P. 205429. doi: 10.1103/PhysRevB.96.205429
17. Polyakov D.S., Yakovlev E.B. Modelling of heating and photoexcitation of single-crystal silicon under multipulse irradiation by a nanosecond laser at 1.06 μm // *Quantum Electronics*. 2018. V. 48. N 3. P. 255–262. doi: 10.1070/QEL16526
18. Polyakov D.S., Yakovlev E.B. Influence of Burstein-Moss effect on photoexcitation and heating of silicon by short and ultrashort laser pulses at wavelength 1.06 μm // *Applied Physics A*. 2018. V. 124. N 12. P. 803. doi: 10.1007/s00339-018-2225-x
19. Derrien T. J.-Y., Kruger J., Itina T.E., Holm S., Rosenfeld A., Bonse J. Rippled area formed by surface plasmon polaritons upon femtosecond laser double-pulse irradiation of silicon // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 24. P. 29643–29655. doi: 10.1364/OE.21.029643
20. Аксипетров О.А., Баранова И.М., Евтюхов К.Н. Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур. М.: Физматлит, 2012. 544 с.
21. Sokolowski-Tinten K., von der Linde D. Generation of dense electron-hole plasmas in silicon // *Physical Review B*. 2000. V. 61. N 4. P. 2643–2650. doi: 10.1103/PhysRevB.61.2643
22. Либенсон М.Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. СПб: Наука, 2007. 423 с.
23. Либенсон М.Н., Румянцев А.Г. Возбуждение светом цилиндрических поверхностных электромагнитных волн // *Оптика и спектроскопия*. 1986. Т. 60. № 4. С. 675.
24. Bonse J., Kruger J. Pulse number dependence of laser-induced periodic surface structures for femtosecond laser irradiation of silicon // *Journal of Applied Physics*. 2010. V. 108. N 3. P. 034903. doi: 10.1063/1.3456501
25. Tull B.R., Carey J.E., Mazur E., McDonald J.P., Yalisove S.M. Silicon surface morphologies after femtosecond laser irradiation // *MRS Bulletin*. 2006. V. 31. N 8. P. 626–633. doi: 10.1557/mrs2006.160
7. Her T., Finlay R.J., Wu C., Deliwala S., Mazur E. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses. *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 73, no. 12, pp. 1673–1675. doi: 10.1063/1.122241
8. Sarnet T., Carey J., Mazur E. From black silicon to photovoltaic cells, using short pulse lasers. *AIP Conference Proceedings*, 2012, vol. 1464, pp. 219. doi: 10.1063/1.4739876
9. Dolgaev S.I., Lavrishev S.V., Lyalin A.A., Simakin A.V., Voronov V.V., Shafeev G.A. Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids. *Applied Physics A*, 2001, vol. 73, no. 2, pp. 177–181. doi: 10.1007/s003390100530
10. Cunha A., Serro A.P., Oliveira V., Almeida A., Vilar R., Durrieu M. Wetting behaviour of femtosecond laser textured Ti–6Al–4V surfaces. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 265, pp. 688–696. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.11.085
11. Bonch-Bruevich A.M., Kochengina M.K., Libenson M.N., Makin V.S., Pudkov S.D., Trubaev V.V. Excitation of surface and waveguide modes with intense laser radiation and their influence on the nature of surface destruction of condensed media. *Izvestiya AN SSSR. seriya Fizika*, 1982, vol. 46, no. 6, pp. 1186–1193 (in Russian).
12. Emel'yanov V.I., Zemskov E.M., Seminogov V.N. Theory of formation of surface gratings under the action of laser radiation on surfaces of metals, semiconductors, and insulators. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1983, vol. 13, no. 12, pp. 1556–1561. doi: 10.1070/QE1983v013n12ABEH004989
13. Guk I.V., Kuzmin E.V., Shandybina G.D., Yakovlev E.B., Dyukin R.V., Kulagin V.S. Influence of multi-pulse action on the evolution of silicon microrelief under femtosecond laser irradiation. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 7, pp. 462–466. doi: 10.1364/JOT.84.000462
14. Fraggelakis F., Mincuzzi G., Lopez J., Manek-Honninger I., Kling R. Texturing metal surface with MHz ultra-short laser pulses. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 15, pp. 18131–18139. doi: 10.1364/OE.25.018131
15. Bonse J., Baudach S., Kruger J., Kautek W., Lenzner M. Femtosecond laser ablation of silicon-modification thresholds and morphology. *Applied Physics A*, 2002, vol. 74, no. 1, pp. 19–25. doi: 10.1007/s003390100893
16. Shugaev M.V., Gnilitzkiy I., Bulgakova N.M., Zhigilei L.V. Mechanism of single-pulse ablative generation of laser-induced periodic surface structures. *Physical Review B*, 2017, vol. 96, no. 20, p. 205429. doi: 10.1103/PhysRevB.96.205429
17. Polyakov D. S., Yakovlev E. B. Modelling of heating and photoexcitation of single-crystal silicon under multipulse irradiation by a nanosecond laser at 1.06 μm . *Quantum Electronics*, 2018, vol. 48, no. 3, pp. 255–262. doi: 10.1070/QEL16526
18. Polyakov D.S., Yakovlev E.B. Influence of Burstein-Moss effect on photoexcitation and heating of silicon by short and ultrashort laser pulses at wavelength 1.06 μm . *Applied Physics A*, 2018, vol. 124, no. 12, p. 803. doi: 10.1007/s00339-018-2225-x
19. Derrien T. J.-Y., Kruger J., Itina T.E., Holm S., Rosenfeld A., Bonse J. Rippled area formed by surface plasmon polaritons upon femtosecond laser double-pulse irradiation of silicon. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 24, pp. 29643–29655. doi: 10.1364/OE.21.029643
20. Aktsipetrov O.A., Baranova I.M., Evtyukhov K.N. *Nonlinear Optics of Silicon and Silicon Nanostructures*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 544 p. (in Russian)
21. Sokolowski-Tinten K., von der Linde D. Generation of dense electron-hole plasmas in silicon. *Physical Review B*, 2000, vol. 61, no. 4, pp. 2643–2650. doi: 10.1103/PhysRevB.61.2643
22. Libenson M. N. *Laser-Induced Optical and Thermal Processes in Condensed Matter and Their Mutual Influence*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2007, 423 p. (in Russian)
23. Libenson M.N., Rumyantsev A.G. Light excitation of cylindrical surface electromagnetic waves. *Optics and Spectroscopy*, 1986, vol. 60, no. 4, p. 675.
24. Bonse J., Kruger J. Pulse number dependence of laser-induced periodic surface structures for femtosecond laser irradiation of silicon. *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 108, no. 3, p. 034903. doi: 10.1063/1.3456501
25. Tull B.R., Carey J.E., Mazur E., McDonald J.P., Yalisove S.M. Silicon surface morphologies after femtosecond laser irradiation. *MRS Bulletin*, 2006, vol. 31, no. 8, pp. 626–633. doi: 10.1557/mrs2006.160

26. Gurevich E.L. On the influence of surface plasmon-polariton waves on pattern formation upon laser ablation // *Applied Surface Science*. 2013. V. 278. P. 52–56. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.01.103.

26. Gurevich E.L. On the influence of surface plasmon-polariton waves on pattern formation upon laser ablation. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 278, pp. 52–56. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.01.103

Авторы

Кузьмин Евгений Викторович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-6322-6838, Kuzmin_evg@live.ru

Поляков Дмитрий Сергеевич — кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 49962165400, ORCID ID: 0000-0002-6240-4057, polyakovdmitry1988@gmail.com

Самохвалов Андрей Александрович — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55504105600, ORCID ID: 0000-0003-4318-1991, samokhvalov.itmo@gmail.com

Шандыбина Галина Дмитриевна — кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6602435275, ORCID ID: 0000-0003-3501-1925, corchand@gmail.com

Authors

Evgeniy V. Kuzmin — postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-6322-6838, Kuzmin_evg@live.ru

Dmitry S. Polyakov — PhD, Leading engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 49962165400, ORCID ID: 0000-0002-6240-4057, polyakovdmitry1988@gmail.com

Andrey A. Samokhvalov — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55504105600, ORCID ID: 0000-0003-4318-1991, samokhvalov.itmo@gmail.com

Galina D. Shandybina — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6602435275, ORCID ID: 0000-0003-3501-1925, corchand@gmail.com