

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-112-121

УДК 544.537

Генерация второй гармоники с эффектом активации в гибкой мембране с кремниевыми нитевидными нанокристаллами

Виктория Анатольевна Масталиева¹✉, Владимир Владимирович Неплох²,
Арсений Валерьевич Айбуш³, Владимир Викторович Фёдоров⁴,
Анастасия Артуровна Якубова⁵, Ольга Юрьевна Коваль⁶,
Александр Сергеевич Гудовских⁷, Сергей Владимирович Макаров⁸,
Иван Сергеевич Мухин⁹

1, 2, 4, 5, 7, 9 Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

1 Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

2, 9 Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

3 Федеральный исследовательский институт химической физики им. Н.Н. Семёнова, Москва, Россия

6 Московский физико-технический институт, Москва, Россия

8 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹strindberg76@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6247-9868>

²vneplox@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8158-0681>

³aiboosh@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0496-9105>

⁴burunduk.uk@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5547-9387>

⁵yakubova.nastya@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7226-0416>

⁶o.yu.koval@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1370-474X>

⁷gudovskikh@spbau.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7632-3194>

⁸s.makarov@metalab.ifmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9257-6183>

⁹imukhin@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9792-045X>

Аннотация

Предмет исследования. Нелинейные оптические свойства массивов кремниевых нитевидных нанокристаллов, сформированных методом травления в индуктивно-связанной плазме диаметром 80 нм и высотой 1,3 мкм, инкапсулированные в полидиметилсилоксан. **Цель работы.** Разработка преобразователя инфракрасного излучения в видимый диапазон на основе гибких полимерных мембран большой площади, инкапсулирующих массивы кремниевых нитевидных нанокристаллов. Диагностика нелинейных оптических свойств массивов нитевидных нанокристаллов, определение механизма преобразования падающего инфракрасного излучения в оптические гармоники высших порядков видимого спектрального диапазона, оценка эффективности генерации второй гармоники. **Метод.** Возбуждение генерации второй гармоники в области расширенного видимого спектрального диапазона с использованием параметрического усилителя для прецизионного выбора длины волны возбуждения в широком спектральном диапазоне позволяет исследовать нелинейные эффекты разных порядков, а также работать вблизи волноводных резонансов нанокристаллов. Нелинейно-оптические исследования мембран, содержащих кремниевые нитевидные нанокристаллы в полимере, проводились с помощью лазерного сканирующего микроскопа. Через внешний порт акустооптического модулятора микроскопа подавались фемтосекундные лазерные импульсы. **Основные результаты.** Исследование преобразователей инфракрасного излучения в видимый диапазон на основе кремниевых нитевидных нанокристаллов

мотивировано работами по генерации второй гармоники на поверхности кремния и в объёмном кремнии при наличии встроенных электрических полей. Предложенные методы отличаются от рассматриваемых в данной статье как материалами, так и методами диагностики: ранее изучались свойства планарных резонаторов, изготовленных стандартными методами процессирования и паттернирования тонких плёнок, а генерация второй гармоники возникает главным образом в объёмном кремнии, в котором необходимый параметр $\chi(2)$ возникает при приложении внешнего электрического поля или механического напряжения. Стоит отметить, что спектральная область сигнала второй гармоники лежит в диапазоне окна прозрачности оптического волокна, а диагностика выполнена в современной экспериментальной установке с перестраиваемой длиной волны. Таким образом, в данной работе продемонстрирована усиленная генерация второй гармоники в структурах нового дизайна мембран массивов кремниевых нитевидных нанокристаллов в прозрачном силиконе. В эксперименте обнаружен эффект активации генерации второй гармоники при облучении фемтосекундными лазерными импульсами, приводящий к значительному и необратимому увеличению сигнала генерации второй гармоники, который может быть связан с реструктуризацией поверхностного материала и электро-индуцированной второй гармоникой из-за зарядки электронных ловушек в приповерхностном слое кристалла. **Практическая значимость.** Полученные результаты представляют новые подходы к проектированию и производству преобразователей инфракрасного диапазона в видимый свет. Разрабатываемые мембраны кремниевых нитевидных нанокристаллов в прозрачном силиконе необходимы для создания интегрированных на кремнии преобразователей света, включая визуализаторы инфракрасного излучения.

Ключевые слова: нитевидные нанокристаллы, нелинейная оптика, нанофотоника, инфракрасное излучение, вторая гармоника, кремний, гибкие устройства

Благодарность: работа выполнена при поддержке РНФ 23-79-00018 «Исследование нелинейных оптических свойств Si и гибридных SiO₂/Si-наноструктур для создания ИК визуализаторов».

Ссылка для цитирования: Масталиева В.А., Неплох В.В., Айбуш А.В., Фёдоров В.В., Якубова А.А., Коваль О.Ю., Гудовских А.С., Макаров С.В., Мухин И.С. Генерация второй гармоники с эффектом активации в гибкой мембране с кремниевыми нитевидными нанокристаллами // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 112–121. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-112-121>

Коды OCIS: 190.0190, 300.0300.

Second harmonic generation with activation effect in a flexible membrane with silicon filamentary nanocrystals

VIKTORIA A. MASTALIEVA¹✉, VLADIMIR V. NEPLOKH², V. ARSENIY AYBUSH³,
VLADIMIR V. FEDOROV⁴, ANASTASIYA A. YAKUBOVA⁵, OLGA Y. KOVAL⁶,
ALEXANDER S. GUDOVSKIKH⁷, SERGEY V. MAKAROV⁸, IVAN S. MUKHIN⁹

^{1, 2, 4, 5, 7, 9}Alferov University, Saint-Petersburg, Russia

^{2, 9}Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

³N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁶Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

⁸ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

¹strindberg76@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6247-9868>

²vneplox@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-8158-0681>

³aiiboosh@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0496-9105>

⁴burunduk.uk@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5547-9387>

⁵yakubova.nastya@bk.ru <https://orcid.org/0000-0001-7226-0416>

⁶o.yu.koval@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-1370-474X>

⁷gudovskikh@spbau.ru <https://orcid.org/0000-0002-7632-3194>

⁸s.makarov@metlab.ifmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-9257-6183>

⁹imukhin@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-9792-045X>

Abstract

The subject of study is nonlinear optical properties of arrays of silicon filamentary nanocrystals formed by etching in inductively coupled plasma using a microsphere mask with a diameter of 80 nanometers and height of 1.3 micrometers, encapsulated in polydimethylsiloxane. **The aims of study** are: the development of a converter of IR radiation into the visible range based on flexible polymer membranes of large area encapsulating arrays of silicon filamentary nanocrystals; the diagnostics of nonlinear optical properties of arrays of filamentary nanocrystals, the determination of the conversion mechanism of incident IR radiation into the optical harmonics of higher orders of the visible spectral range, the estimation of the second harmonic generation efficiency. **Method.** Excitation of the second harmonic generation in the extended visible spectral range using a parametric amplifier for precise selection of excitation wavelength in a wide spectral range allows us to study nonlinear effects of different orders and to work near the electric and magnetic resonances of nanocrystals. Nonlinear optical studies of membranes of silicon filamentary nanocrystals in polymer were carried out using a laser scanning microscope. Femtosecond laser pulses were applied through the external port of the microscope acousto-optic modulator. **Main results.** The study of the infrared-to-visible range converters based on silicon filamentary nanocrystals is motivated by the works on second harmonic generation on the silicon surface and in bulk silicon under the external displacement. The proposed methods differ from those considered in this paper in both materials and diagnostic methods: the properties of planar resonators fabricated by standard methods of the thin film processing and patterning were studied earlier, while the second harmonic generation occurs mainly in bulk silicon, in which the necessary parameter $\chi(2)$ arises when the external electric field or mechanical voltage is applied. It is worth noting that the spectral region of the second harmonic signal lies within the range of the optical fiber transparency window, and the characterization is performed in a unique experimental setup with tunable wavelength. Thus, this work demonstrates the enhanced second harmonic generation in structures fundamentally new in the method of obtaining and analyzing nonlinear effects of silicon filamentary nanocrystals membranes in polymer. In the experiment the effect of irradiation with femtosecond laser pulses leading to a significant and irreversible increase of the second harmonic generation signal was found, which is related to the restructuring of the surface material and electro-induced second harmonic due to charging of electron traps in the near-surface layer of the crystal. **Practical significance.** The obtained results represent new approaches to the design and manufacture of converters of infrared range into visible light. The developed membranes of silicon filamentary nanocrystals in polymer are necessary for creation of silicon-integrated light converters, including visualizers of the infrared radiation.

Keywords: filamentary nanocrystals, nonlinear optics, nanophotonics, infrared radiation, second harmonic, silicon, flexible devices

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation, Project № 23-79-00018.

For citation: Mastalieva V.A., Neplokh V.V., Aybush V.A., Fedorov V.V., Yakubova A.A., Koval O.Y., Gudovskikh A.S., Makarov S.V., Mukhin I.S. Second harmonic generation with activation effect in a flexible membrane with silicon nanowires [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 112–121. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-112-121>

OCIS codes: 190.0190, 300.0300.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процесса генерации второй гармоники (ГВГ) в кремниевых нитевидных нанокристаллах (ННК) является одной из актуальных областей научных исследований [1]. Это связано с их способностью к функциональным модификациям поверхности, низкой стоимостью производства и возможностью эффективной настройки фотонных свойств.

Альтернативная конструкция устройства с использованием полупрозрачных мембран с ННК фосфида галлия в полимерной матрице полидиметилсилоксана (ПДМС) [2] оказалась весьма перспективной, поэтому за основу исследования взяты аналогичные структуры, но с использованием более удобного материала — кремния [3, 4]. В этой работе изучен процесс ГВГ в гибких мембранах из ННК кремния

и полимера. Проведены измерения на массивах вертикальных ННК диаметром приблизительно 80 нм и высотой 1,3 мкм. В результате эксперимента был зафиксирован сигнал второй гармоники при воздействии импульсного фемтосекундного лазерного излучения в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне от 800 до 1020 нм.

В данном исследовании рассматривается фундаментальная проблема изучения нелинейных оптических свойств кремния в прикладной задаче создания устройств на основе кремния в оптоэлектронике. Научная значимость содержится в новом подходе отделения мембран с массивом кремниевых ННК от подложки, а также за счёт метода сухого плазмохимического травления. Для получения кристаллов в дальнейшем можно варьировать площадь вытравливания и достигать большой площади (от 4 кв. см и до 50 кв. см) [5]. Массив ННК кремния, инкапсулированных в гибкую полимерную матрицу, представляет технологическую платформу для разработки оптических и электронных устройств, таких как солнечные батареи, преобразователи света, фотонные кристаллы и т.д. Научная значимость подтверждается также фундаментальными научными исследованиями в области взаимодействия света со средой. Поверхность кремния обладает специфическими, отличными от объёмного кремния свойствами из-за нарушения кристаллической симметрии. Литературные источники ранее исследовали эффективную ГВГ на поверхности кремния в связи с отличным от нуля параметрами квадратичной нелинейной проницаемости $\chi(2)$, который у объёмного кремния равен 0, что говорит о невозможности появления нелинейного процесса ГВГ [6, 7].

Это исследование предлагает новые подходы к проектированию и производству преобразователей, способных преобразовывать излучение в ИК диапазоне в видимый. Оно открывает перспективы для применения нанотехнологий в различных областях, таких как оптическая электроника, фотоника и солнечные батареи.

Исследование преобразования ИК излучения в видимый диапазон, основанное на кремниевых ННК, было мотивировано предыдущими исследованиями в области изучения ГВГ на поверхности кремния и в объёмном кремнии при внешнем смещении [8, 9].

Результаты множества исследований показали некоторые нелинейные оптические свойства кремния [10–13], связанные с ГВГ, которая может быть индуцирована внешним электрическим полем в планарных волноводах и микрорезонаторах. Ранее ГВГ изучалась в планарных волноводных структурах, изготовленных стандартными методами процессирования и паттернирования тонких плёнок [14]. Однако проявление ГВГ в основном наблюдали в объёмном кремнии, где параметр $\chi(2)$ возникает при приложении внешнего электрического поля или механического напряжения.

Целью работы является разработка преобразователя ИК излучения в видимый диапазон на основе гибких полимерных мембран большой площади, инкапсулирующих массивы кремниевых нитевидных нанокристаллов. Диагностика нелинейных оптических свойств массивов нитевидных нанокристаллов, определение механизма преобразования падающего ИК излучения в оптические гармоники высших порядков, соответствующих видимому спектральному диапазону, оценка эффективности генерации второй гармоники.

Интенсивность ГВГ тесно связана с поверхностью кремния, где происходит нарушение кристаллической симметрии кристалла, обладающего центрально-симметричной решёткой [15]. Использование диаметра ННК в диапазоне 40–80 нм позволяет снизить многофотонную флуоресценцию (ФЛ) за счёт низкого поглощения падающего излучения массивом ННК.

Для решения практических задач, связанных с конверсией излучения ИК диапазона в видимый и созданием фотонных платформ, интегрированных с комплементарной металлооксид-полупроводниковой (МОП) структурой, необходимы новые подходы, такие как использование наноразмерных структур и их включение в состав гибких полупрозрачных корпусов. Это позволит создать устройства с повышенной эффективностью и дополнительными функциональными возможностями для использования в различных областях, включая оптическую электронику и фотонику.

ФОРМИРОВАНИЕ МЕМБРАН КРЕМНИЕВЫХ ННК/ПОЛИМЕР

Формирование мембран из массивов кремниевых ННК в кремнийсодержащем полидимере

тилсилоксане Sylgard 184 Dow Corning осуществляется с использованием метода высокоскоростной гравитационной накрутки. При этом полимер наносится перпендикулярно плоскости подложки (вдоль оси ННК), обеспечивая равномерное распределение полимера по поверхности образца и проникновение его между ННК до их оснований [16, 17]. После нанесения ПДМС образцы подвергаются отверждению путём нагрева на плите до 120 °С в течение 8 часов. Таким образом, массив ННК остаётся вертикально ориентированным после отверждения ПДМС (рис. 1).

Для повышения механической стабильности мембран и облегчения последующих манипуляций поверхность образцов обрабатывается в кислородной плазме и приклеивается к дополнительному поддерживающему слою ПДМС толщиной 200–400 мкм. Затем мембраны кремниевых ННК/ПДМС отделяются от ростовой подложки с помощью лезвия микротомы. Этот процесс обеспечивает создание устойчивых мембран, готовых для дальнейших приложений и исследований.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Для проведения исследований нелинейно-оптических свойств мембран ННК кремния/ПДМС использовался лазерный сканирующий микроскоп LSM-980 от компании Zeiss (Германия). Внешний порт акустико-оптического модуля (АОМ) микроскопа LSM был использован для генерации фемтосекундных лазерных импульсов с помощью лазера Discovery-NX от компании Coherent (США). Характеристики данного лазерного источника следующие: 1) частота повторения 80 МГц; 2) длительность импульсов около 150 фс, с полной шириной спектра при половине максимума менее 10 нм; 3) линейная поляризация. Диапазон длин волн настраиваемого лазера ограничен оптикой LSM и составляет 800–1020 нм для центральной длины волны импульсов.

При измерении зависимости интенсивности второй гармоники (ВГ) от мощности лазерной накачки на длине волны 920 нм было обнаружено явление резкого увеличения сигнала ВГ, которое можно назвать эффектом активации (рис. 2). Область 2а на графике представляет

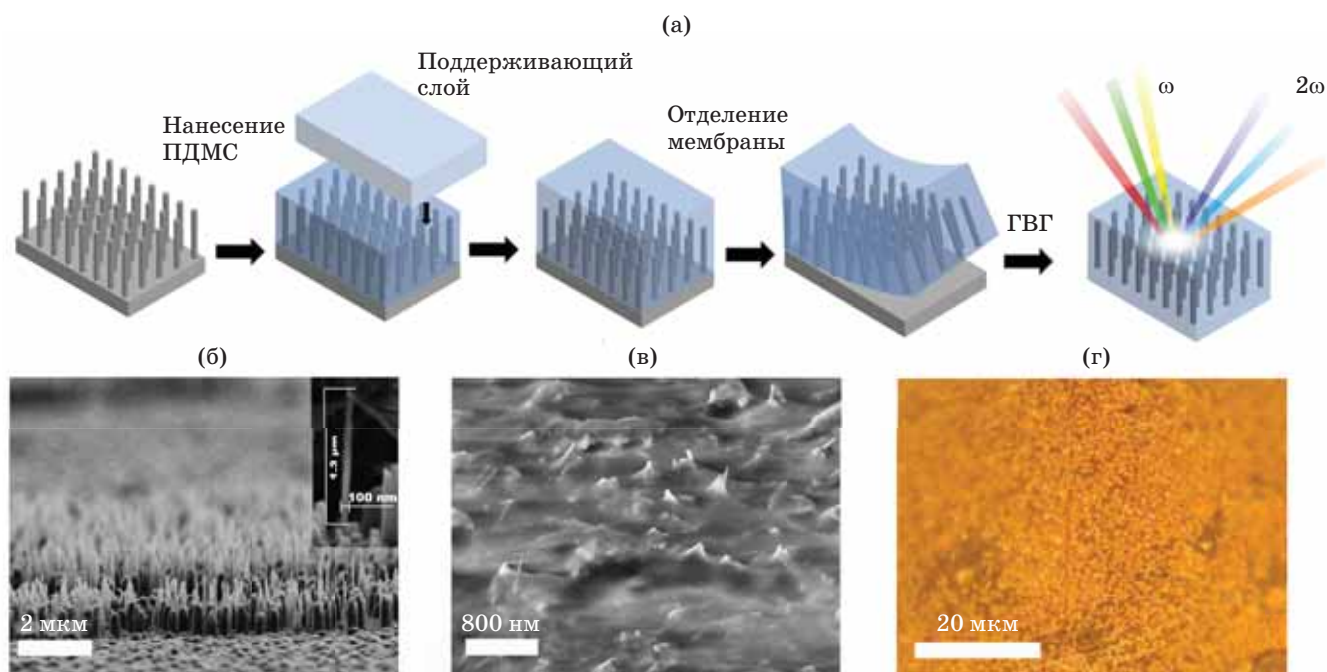


Рис. 1. (а) Схема с этапами создания мембраны ННК/полимер. (б, в) РЭМ-изображения сформированного массива кремниевых ННК и инкапсулированного в ПДМС. (г) Фотография мембраны кремниевых ННК/полимер после её отсоединения от подложки кремния

Fig. 1. (a) Processing diagram of SiNW/PDMS membrane. (б, в) SEM images of formed SiNW array and encapsulated into PDMS. (г) Photo of the SiNW/PDMS membrane after the release from the Si substrate

собой карту сигнала ВГ образца во время измерения при мощности ниже пороговой, а область 2б, отмеченная красным прямоугольником, соответствует области образца, которая была «активирована» при пороговой мощности накачки, примерно равной 3 мВ. После такой «активации» исследуемая область продолжает демонстрировать повышенный сигнал ВГ даже при мощности ниже пороговой. Это наблюдение свидетельствует о наличии долговременного воздействия активации образца на его нелинейно-оптические свойства.

Установка конфокального картирования SHG также обеспечивала возможность 3D ви-

зуализации сигнала ВГ в исследуемой области, построенной на основе набора 2D карт, измеренных с последующим смещением фокальной плоскости (рис. 3). Эта 3D карта подтверждает наличие неоднородного сигнала от матрицы кремниевых ННК/ПДМС, однако конфокальная оптическая система имеет относительно низкое разрешение как в боковой плоскости (около 300 нм), так и по фокальной оси (около 1–2 мкм), что выше или сопоставимо с размерами ННК. На карте можно заметить неоднородность сигнала ВГ в массиве ННК, что связано с неоднородным распределением диаметра ННК, приводящим к уменьшению объёма активного материала.

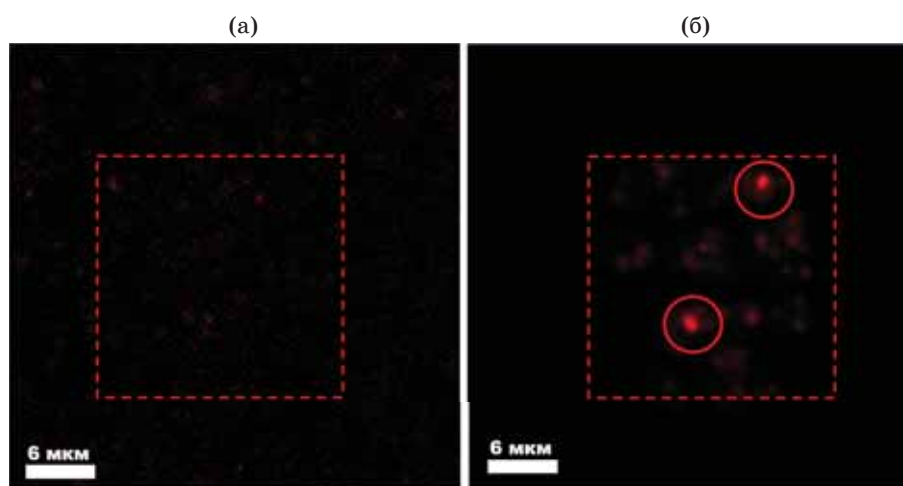


Рис. 2. Карты ГВГ для области мембраны ННК/ПДМС (а) до и (б) после лазерной активации

Fig. 2. SHG maps for the SiNW/PDMS membrane area (a) before and (b) after laser activation

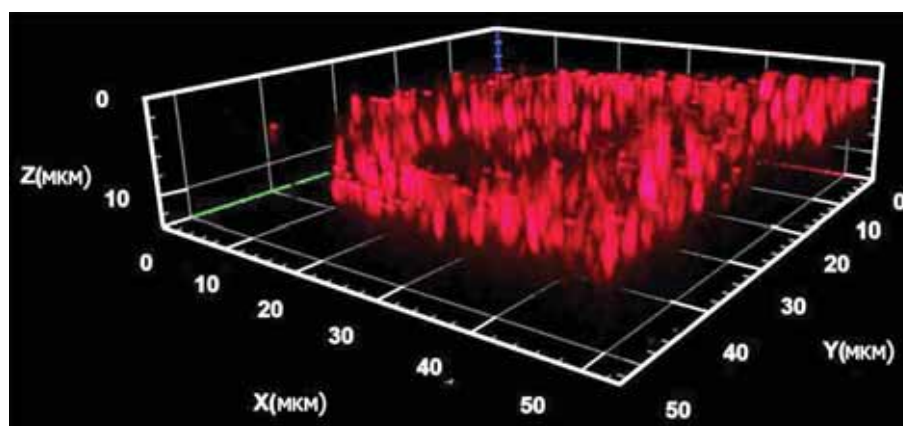


Рис. 3. Трёхмерная визуализация экспериментального сигнала ГВГ с мембраны ННК кремния/ПДМС. Распределение интенсивности сигнала по исследуемой площади мембраны (z-stack)

Fig. 3. 3D visualization of the experimental SHG signal from the SiNW/PDMS membrane. Distribution of the signal intensity over the studied membrane area (z-stack)

Измерения мощности ГВГ проводились при оптимальной длине волны 920 нм. Замечено, что после появления эффекта активации исследуемая область продолжает демонстрировать усиленный сигнал ГВГ. Чтобы детально изучить это явление, было проведено повторное исследование мощности накачки. Поставлен эксперимент, в ходе которого вдоль ННК в 3-х направлениях было оказано влияние мощности накачки, а именно 3 прохода по длине кристалла в направлении сверху вниз в диапазоне мощностей от минимального до максимального (от 1% до 100% мощности, где 100% — это 18 мВт, второй проход в направлении снизу вверх (от 100% до 1% мощности) и снова сверху вниз, повторяя первый проход с увеличением мощности накачки от минимального 1% до максимального 100%. Заранее была определена максимальная мощность накачки, которая доводит до момента разрушения ННК из-за перегрева.

Полученные данные были обработаны для построения кривых выбранных ярких пятен, соответствующих наиболее эффективным отдельным ННК кремния (рис. 4а–4в), и всей области карты для определения зависимости среднего значения ГВГ массива ННК от значения накачки (рис. 4г–4е).

Ожидаемо значение наклона для первоначальных измерений на площади образца, когда возникает эффект активации. Он значительно отличается от характерного значения ГВГ, равного 2. Значение наклонной варьируется от 3 до 3,6 для отдельных ННК и составляет около 2,1–2,2 для усреднённого сигнала по всей площади образца. Замечено, что наклон кривой ГВГ к накачке при повторных измерениях после первого запуска очень близок к 2 как для отдельных ННК, так и для массива (рис. 4). На основании этого сделан вывод, что первоначальные измерения «активации» характеризуются своего рода переходными

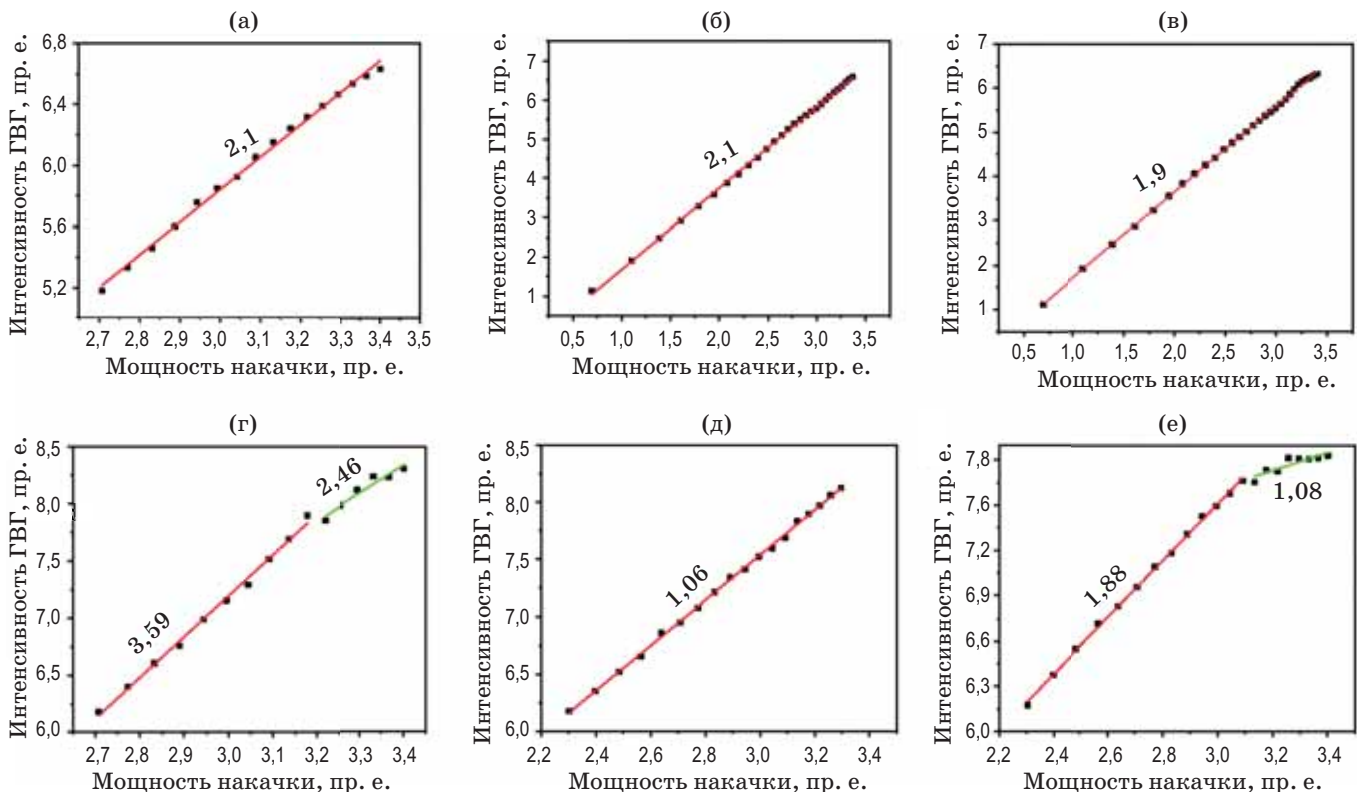


Рис. 4. Наклоны зависимости ГВГ от накачки и соответствующие значения наклона. (а–в) Цифры соответствуют яркой области на карте ГВГ. (г–е) Соответствуют интегральному сигналу исследуемой области на карте

Fig. 4. SHG-to-pump curves and the corresponding slope values. (a–в) Figures correspond to a representative bright spot in the SHG map, measured one after another. (г–е) Correspond to the integral signal over the studied area in the map

процессами в кремниевых ННК, поэтому эффективность ГВГ становится выше с увеличением мощности лазерной накачки. Как только при первом запуске достигается максимальная мощность, этот переходный процесс завершается, и заряженные поверхностные состояния генерируют ВГ с высокой эффективностью.

Переходный процесс может быть объяснён либо структурными (материальными) преобразованиями в ННК кремния, индуцированными мощностью накачки (например, превращение монокристаллического в поликристаллический кремний) [18], либо эффектом поверхностного окисления [19]), либо функциональными преобразованиями (например, ловушечные состояния на поверхности ННК улавливают носители, возбуждаемые лазерным лучом, что приводит к появлению встроенного электростатического поля).

Учитывая centrosymmetричную структуру кремния Si ($\chi_{\text{Si}}^{(2)} = 0$), сигнал ГВГ от кремниевых ННК можно описать как разложение членов в ряд Тейлора $I_{2\omega} \approx |\chi_{\text{Si}}^{(2)} + \chi_{\text{Si}}^{(3)} E_{\text{dc}}|^2 I_{\omega}^2 \approx |\chi_{\text{Si}}^{(3)} E_{\text{dc}}|^2 I_{\omega}^2$ [20], где E_{dc} — нарастающее электрическое поле на поверхности ННК кремния (вторая гармоника электрического поля, которая в нашем случае привела к эффекту электроиндуцированной внешней электрическим полем второй гармоники (ЭВГ)).

Более того, из-за переходного процесса E_{dc} также может зависеть от интенсивности/плотности потока, давая надквадратичную зависимость. Под воздействием лазерного излучения окисленная поверхность кремния или другой материал, окружающий ННК (например, Si, C, SiOx или SiC, образующийся при облучении фемтосекундным лазером), может улавливать возбуждённые светом носители, что приводит к изменению высоты поверхностного потенциального барьера в ННК кремния. Таким образом, с увеличением интенсивности I_{ω} встроенное поле E_{dc} также может нелинейно увеличиваться ($E_{\text{dc}} \approx I^{\beta}$).

Учитывая эти возможные механизмы, мы можем составить следующую степенную зависимость $I_{2\omega} \approx I_{\omega}^{2+\gamma}$, где $\gamma > 0$, которая определяется доминирующим нелинейным процессом, хорошо описывающую наши экспериментальные результаты.

Переход завершается после первоначальных измерений ГВГ, поэтому в облучённой области генерируется нормальный сигнал ВГ, характеризующийся типичным значением наклона 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны преобразователи ИК излучения в видимый диапазон на основе гибких полимерных мембран большой площади, инкапсулирующих массивы кремниевых нитевидных нанокристаллов. Продемонстрирована усиленная генерация ВГ с помощью мембран ННК/ПДМС. Процесс ГВГ можно отнести к приповерхностному микрокристаллическому материалу кремниевых ННК, и этому способствует собственное электрическое поле, создаваемое механизмом ЭВГ. В эксперименте исследован эффект облучения фемтосекундным лазером, приводящий к резкому и постоянному увеличению сигнала ГВГ, который объясняется реструктуризацией поверхностного материала и ЭВГ из-за зарядки приповерхностных состояний электронных ловушек, что подтверждается наклонами накачки сигнала около 3,5.

В результате предлагаемая мембрана ННК кремния/ПДМС благодаря эффекту лазерной активации может служить преобразователем ИК диапазона в видимый диапазон и может быть востребована в передовых оптических схемах, где важное значение имеет не только эффективное преобразование излучения, но и сама конструкция в виде полупрозрачной, гибкой и неразрушающейся под лазерным воздействием, как и в рядовом использовании при юстировке лазеров, так и в КМОП-интегральных фотонных схемах на основе кремния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Han S.T., Peng H., Sun Q., Venkatesh S., Chung K.S., Lau S.C., Roy V.A.L. An overview of the development of flexible sensors // *Advanced materials*. 2017. V. 29(33). P. 1700375. <https://doi.org/10.1002/adma.201700375>
2. Fedorov V.V., Bolshakov A., Sergaeva O., Neplokh V., Markina D., Bruyere S., Mukhin I.S. Gallium phosphide

- nanowires in a free-standing, flexible, and semitransparent membrane for large-scale infrared-to-visible light conversion // *ACS nano*. 2020. V. 14(8). P. 10624–10632. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04872>
3. Hoeh M.A., Neu J., Schmitt K., Rahm M. Optical tuning of ultra-thin, silicon-based flexible metamaterial

- membranes in the terahertz regime // *Optical Materials Express*. 2015. V. 5(2). P. 408–415. <https://doi.org/10.1364/OME.5.000408>
4. Bhowmik G., An Y.Q., Schujman S., Diebold A.C., Huang M. Optical second harmonic generation from silicon (100) crystals with process tailored surface and embedded silver nanostructures for silicon nonlinear nanophotonics // *Journal of Applied Physics*. 2020. V. 128(16). P. 165106. <https://doi.org/10.1063/5.0012529>
 5. Vyacheslavova E.A., Morozov I.A., Kudryashov D.A., Uvarov A.V., Baranov A.I., Maksimova A.A., Gudovskikh A.S. Study of cryogenic unmasked etching of “Black Silicon” with Ar gas additives // *ACS omega*. 2022. V. 7(7). P. 6053–6057. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06435>
 6. Schriever C., Bianco F., Cazzanelli M., Ghulinyan M., Eischmidt C., de Boer J., Schilling J. Second order optical nonlinearity in silicon waveguides: Inhomogeneous stress and interfaces // *Advanced Optical Materials*. 2014. V. 3(1). P. 129–136. <https://doi.org/10.1002/adom.201400370>
 7. Borghi M., Castellan C., Signorini S., Trenti A., Pavesi L. Nonlinear silicon photonics // *J. Opt.* 2017. V. 19. P. 093002. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa7a6d>
 8. Makarov S.V., Petrov M.I., Zywiets U., Milichko V., Zuev D., Lopanitsyna N., Kivshar Y.S. Efficient second-harmonic generation in nanocrystalline silicon nanoparticles // *Nano letters*. 2017. V. 17(5). P. 3047–3053. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00392>
 9. Cazzanelli M., Bianco F., Borga E., Pucker G., Ghulinyan M., Degoli E., Pavesi L. Second-harmonic generation in silicon waveguides strained by silicon nitride // *Nature materials*. 2012. V. 11(2). P. 148–154. <https://doi.org/10.1038/nmat3200>
 10. Borghi M., Bazzanella D., Mancinelli M., Pavesi L. On the modeling of thermal and free carrier nonlinearities in silicon-on-insulator microring resonators // *Optics Express*. 2021. V. 29(3). P. 4363–4377. <https://doi.org/10.1364/OE.413572>
 11. Borghi M., Biasi S., Pavesi L. Reservoir computing based on a silicon microring and time multiplexing for binary and analog operations // *arXiv preprint arXiv:2101.01664*. 2021
 12. Franchi R., Castellan C., Ghulinyan M., Pavesi L. Second-harmonic generation in periodically poled silicon waveguides with lateral pin junctions // *Optics letters*. 2020. V. 45(12). P. 3188–3191. <https://doi.org/10.1364/OL.391988>
 13. Vecchi C., Castellan C., Ghulinyan M., Bernard M., Pavesi L. Electric field-induced second harmonic generation in silicon waveguide by interdigitated contacts // *Integrated photonics platforms: Fundamental research, manufacturing and applications*. 2020. V. 11364. P. 113640L. <https://doi.org/10.1117/12.2555308>
 14. Rudenko A., Ladutenko K., Makarov S., Itina T.E. Photogenerated free carrier induced symmetry breaking in spherical silicon nanoparticle // *Advanced Optical Materials*. 2018. V. 6(7). P. 1701153. <https://doi.org/10.1002/adom.201701153>
 15. Bloembergen N., Chang R.K., Jha S.S., Lee C.H. Optical second-harmonic generation in reflection from media with inversion symmetry // *Physical Review*. 1968. V. 174(3). P. 813. <https://doi.org/10.1103/physrev.174.813>
 16. Kochetkov F.M., Neplokh V., Fedorov V.V., Bolshakov A.D., Sharov V.A., Eliseev I.E., Mukhin I.S. Fabrication and electrical study of large area free-standing membrane with embedded GaP NWs for flexible devices // *Nanotechnology*. 2020. V. 31(46). P. 46LT01. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abae98>
 17. Nasibulin A.G., Ollikainen A., Anisimov A.S., Brown D.P., Pikhitsa P.V., Holopainen S., Kauppinen E.I. Integration of single-walled carbon nanotubes into polymer films by thermo-compression // *Chemical engineering journal*. 2008. V. 136(2–3). P. 409–413. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.033>
 18. Bonse J., Brzezinka K.W., Meixner A.J. Modifying single-crystalline silicon by femtosecond laser pulses: an analysis by micro Raman spectroscopy, scanning laser microscopy and atomic force microscopy // *Applied surface science*. 2004. V. 221(1–4). P. 215–230. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00881-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00881-X)
 19. Hoh K., Koyama H., Uda K., Miura Y. Incorporation of oxygen into silicon during pulsed-laser irradiation // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1980. V. 19(7). P. L375. <https://doi.org/10.1143/JJAP.19.L375>
 20. Fomenko V., Lami J., Borguet E. Nonquadratic second-harmonic generation from semiconductor-oxide interfaces // *Phys. Rev.* 2001. V. 63. P. 121316. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.121316>

АВТОРЫ

Виктория Анатольевна Масталиева — аспирант СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, младший научный сотрудник Лаборатории ФАП ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 57220809068; <https://orcid.org/0000-0002-6247-9868>; strindberg76@mail.ru

Неплож Владимир Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 56820288600; <https://orcid.org/0000-0001-8158-0681>; vneplokh@gmail.com

Арсений Валерьевич Айбуш — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, Москва, 119991, Россия; Scopus ID: 57193427236; <https://orcid.org/0000-0002-0496-9105>; aiboosh@gmail.com

Владимир Викторович Фёдоров — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, 194021, Россия;

AUTHORS

Viktoriia A. Mastaliev — Postgraduate student of Alferov University RAS, Junior Researcher, FAP Laboratory, A.F. Ioffe FTI RAS, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57220809068; <https://orcid.org/0000-0002-6247-9868>; strindberg76@mail.ru

Vladimir V. Neplokh — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher of Alferov University RAS, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 56820288600; <https://orcid.org/0000-0001-8158-0681>; vneplokh@gmail.com

Arseniy V. Aybush — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher at the Federal Research Center for Chemical Physics named after N.N. Semenov RAS, 119991, Moscow, Russia; Scopus ID: 57193427236; <https://orcid.org/0000-0002-0496-9105>; aiboosh@gmail.com

Vladimir V. Fedorov — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher at SPbAU RAS, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 194021, Saint-Petersburg, Russia;

Scopus ID: 57061690000; <https://orcid.org/0000-0001-5547-9387>; burunduk.uk@gmail.com

Анастасия Валерьевна Якубова — аспирант СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 58246550800; <https://orcid.org/0000-0001-7226-0416>; yakubova.nastya@bk.ru

Ольга Юрьевна Коваль — научный сотрудник Центра фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, Москва, 141701, Россия; Scopus ID: 57204086198; <https://orcid.org/0000-0002-1370-474X>; o.yu.koval@gmail.com

Александр Сергеевич Гудовских — доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 6602958574; <https://orcid.org/0000-0002-7632-3194>; gudovskikh@spbau.ru

Сергей Владимирович Макаров — доктор физ.-мат. наук, профессор, декан факультета фотоники ИТМО, главный научный сотрудник Физического факультета, руководитель лаборатории гибридной нанофотоники и оптоэлектроники, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57205955669; <https://orcid.org/0000-0002-9257-6183>; s.makarov@metalab.ifmo.ru

Иван Сергеевич Мухин — доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, директор Высшей инженерной физической школы СПбПУ, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 36761195300; <https://orcid.org/0000-0001-9792-045X>; imukhin@yandex.ru

Scopus ID: 57061690000; <https://orcid.org/0000-0001-5547-9387>; burunduk.uk@gmail.com

Anastasiya A. Yakubova — Postgraduate Student of Alferov University RAS, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 58246550800; <https://orcid.org/0000-0001-7226-0416>; yakubova.nastya@bk.ru

Olga Y. Koval — Researcher, Center for Photonics and Two-Dimensional Materials, Moscow Institute of Physics and Technology, 141701, Moscow, Russia; Scopus ID: 57204086198; <https://orcid.org/0000-0002-1370-474X>; o.yu.koval@gmail.com

Alexander S. Gudovskikh — Dr.Sc. in Technical Sciences, Leading Researcher at SPbAU RAS named after. Zh.I. Alferova, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 6602958574; <https://orcid.org/0000-0002-7632-3194>; gudovskikh@spbau.ru

Sergey V. Makarov — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Dean of the Faculty of Photonics at ITMO University, Chief Researcher of the Faculty of Physics, Head of the Laboratory of Hybrid Nanophotonics and Optoelectronics, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57205955669; <https://orcid.org/0000-0002-9257-6183>; s.makarov@metalab.ifmo.ru

Ivan S. Mukhin — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Laboratory of Renewable Energy Sources of St. Petersburg SPbAU RAS named after. Zh.I. Alferova, Director of the Higher Engineering Physical School of St. Petersburg Polytechnic University, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 36761195300; <https://orcid.org/0000-0001-9792-045X>; imukhin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2023
Одобрена после рецензирования 20.11.2023
Принята к печати 29.12.2023

The article was submitted to the editorial office 28.09.2023
Approved after review 20.11.2023
Accepted for publication 29.12.2023