

Аннотация

На сегодняшний день планарные и трехмерные микро- и наноструктуры демонстрируют уникальные свойства и активно используются во множестве различных областей. Для формирования наноструктур можно использовать широкий спектр методов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. На данный момент оптическая литография, в частности с использованием глубокого ультрафиолетового света, является самым распространенным методом производства наноструктур. Однако данные методы обладают высокой стоимостью, а в случае высокоаспектных, объемных наноструктур оказываются неэффективными.

Одним из возможных решений проблемы эффективного изготовления наноструктур на большой площади является - наноштамповая литография (НШЛ). НШЛ позволяет создавать структуры с разрешением в несколько нанометров на площадях от нескольких квадратных сантиметров до масштабов пластин.

Однако, как и в случае оптической литографии, ограниченной дизайном шаблона, НШЛ литография ограничена материалом и рисунком используемых штампов. Эти ограничения затрудняют быструю адаптацию процесса НШЛ к конкретным требованиям в различных областях исследований и производства. Данная работа направлена на расширение возможностей стандартного процесса НШЛ, а также на развитие НШЛ в комбинации с другими перспективными методами, в частности с метал-стимулированным каталитическим травлением (МСКТ), а также локальным анодным окислением (ЛОА). В работе разработаны нестандартные методы формирования наноструктур с помощью которых созданы упорядоченные массивы подвешенных металлических наномостиков, высокоаспектных кремниевых наностолбиков, nanoостровков из диоксида ванадия.

Исполнитель (Ф.И.О.): Тумашев Виталий Сергеевич

Наименование выпускной научно-квалификационной работы: Формирование упорядоченных массивов наноструктур на основе методов штамповой литографии

Объект исследования: Методы формирования упорядоченных массивов наноструктур на большой площади

Цель: Разработка технологий формирования упорядоченных массивов наноструктур большой площади, основанных на методах наноштамповой литографии

Методы исследования: атомно-силовая, сканирующая электронная, оптическая микроскопии; спектроскопии комбинационного рассеяния света, эллипсометрия.

Теоретическая/практическая значимость исследования

1. Предложена технология формирования нанорешёток с периодами 180 и 90 нм с контролируемой глубиной наноканавок от 10 до 50 нм в планаризированном слое резиста SU-8, покрывающем поверхность микроструктурированной подложки. Найдены условия НШЛ, позволяющие уменьшить период формируемых нанорешёток в 2 раза по сравнению с исходным мастер-штампом. Результаты

исследований будут полезны для технологии изготовления интегральных компонентов в различных оптических устройствах, таких как поляризаторы, светоизлучающие диоды, сенсоры, солнечные и жидкокристаллические элементы.

2. Разработан метод изготовления элементов наноэлектромеханических систем (НЭМС) - подвешенных металлических (Au и Au/Ti) наноструктур (наномостиков) длиной от 1 до 4 мкм, концы которых впечатаны в слой резиста на большой площади. Предложенный метод может быть реализован как на твердых, так и на полимерных подложках площадью более 150 см².
3. Развита технология последовательной многоуровневой адгезивной печати 1D Au нанорешеток, которая позволила создать многослойные трехмерные Au наноструктуры для высокоаспектного металл-стимулированного каталитического травления, которые невозможно создать другими известными нанолитографическими методами. Созданы упорядоченные массивы Si-наностолбиков с заданным углом наклона и сечением, а также их сверхпериодические массивы.
4. Сформированы плотные упорядоченные массивы нанокристаллов VO₂ ($\approx 100 \times 100$ нм) ($\rho = 3 \cdot 10^9$ шт/см²) из аморфной плёнки. Мы убеждены, что разработанные нами технологии найдут применения при изготовлении метаматериалов, фотонных кристаллов, метаповерхностей, приборов оптоэлектроники и фотоники.

Научная новизна:

1. Показана возможность управления движением катализатора, в процессе металл-стимулированного каталитического травления, как с помощью его геометрии (асимметрии формы катализатора), так и составом травителя.
2. Выполненные нами исследования подтверждают, что движение катализатора при каталитическом травлении определяется силами Ван-дер-Ваальса, которые сильно влияют на наклон и сечение формируемых наноструктур.
3. Сформированы наноструктурированные подложки, представляющие собой массивы наностолбиков контролируемой высоты и диаметра, на вершинах которых были выращены нанокристаллы VO₂ (CVD).
4. Показана возможность локального анодного окисления наноструктурированным штампом аморфных плёнок VO₂ на проводящей Si подложке и на подложке с изолирующим слоем SiO₂, а также возможность локального анодного окисления VO₂ без приложения внешнего напряжения.

Область применения: Жидкокристаллические элементы, оптика, нанофотоника, сенсоры, микро- и наноэлектромеханические системы, метаматериалы.

Список ключевых слов: Наноштамповая литография, наноадгезивная печать, SU-8, наноэлектромеханические системы, метал-стимулированное каталитическое травление, Si высокоаспектные наноструктуры, локальное анодное окисление штампом, нанокристаллы, диоксид ванадия.

Апробация работы:

По материалам научно-квалификационной работы опубликовано 4 статьи в научных журналах. Результаты, полученные в рамках данной работы, были представлены

на 8 международных и российских конференциях, а также представлялись на конкурсах стипендий ИФП СО РАН для молодых ученых в 2021 и 2023 годах.

Публикации по теме диссертации:

Список статей:

- 1) V.S. Tumashev, V.A. Seleznev, A New Technique of Au Nanopattern Formation for Metal-Assisted Chemical Etching of Silicon, in: 2021 IEEE 22nd Int. Conf. Young Prof. Electron Devices Mater., IEEE, **2021**: pp. 91–94. doi:10.1109/EDM52169.2021.9507704.
- 2) V.A. Seleznev, V.S. Tumashev, H. Yamaguchi, V.Ya. Prinz, Fabrication of large-area metal and semiconductor nanobridge arrays using nanotransfer printing and UV lithography, Precision Engineering, Vol. 82, p. 316-323, **2023** doi:org/10.1016/j.precisioneng.2023.04.009
- 3) В.А. Селезнев, С.В. Голод, В.С. Тумашев, А.Е. Гайдук, Б.В. Волошин, С.В. Мутилин, В.Я. Принц. «Массивы гибридных 3D наноструктур на основе VO₂, перспективные для сверхбыстрого управления светом», глава в монографии «Квантовые структуры для посткремниевой электроники» под ред. А.В.Латышева, Новосибирск **2023** doi 10.34077/ISP.2023-kvant
- 4) Antonova I. V., Seleznev V. A., Nebogatikova N. A., Ivanov A. I., Tumashev V. S., “1D Chains of composite nanoparticles graphene: h-BN and fluorinated graphene: V₂O₅ on a nanostructured polymer surface”, Physics of the Solid State, **2024** Vol. 66, issue 3, p. 382-390, doi: 10.61011/FTT.2024.03.57481.270

Тезисы и труды конференций:

- 1) V.S. Tumashev; V.A. Seleznev, A.I. Komonov, S.V. Mutilin “Nanoimprint lithography technique for the formation of planarized SU-8 nanogratings on microstructured surfaces” **2024** IEEE 25nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)
- 2) V.S. Tumashev; V.A. Seleznev “A New Technique of Au Nanopattern Formation for Metal-Assisted Chemical Etching of Silicon” **2021** IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) doi:10.1109/EDM52169.2021.9507704
- 4) Б.В. Волошин, В.С. Тумашев, В.А. Селезнев “Атомно-слоевое осаждение пленок оксидов ванадия на наноструктурированные поверхности кремния для суперконденсаторов” Тезисы докладов Третьей школы молодых ученых «Электрохимические устройства: процессы, материалы, технологии», 11-13 сентября, **2023**, Новосибирск.
- 5) В.А. Селезнев, В.С. Тумашев, Б.В. Волошин “Технологии формирования массивов наноструктур, основанные на методах штамповой литографии и атомно-слоевого осаждения пленок оксидов ванадия” Международная конференция по актуальным проблемам физики и технологии полупроводниковых наноструктур, 22 - 24 апреля **2024** г. Новосибирск

- 6) В.С. Тумашев, В.А. Селезнев “Формирование высокоаспектных массивов Si-наностолбиков на большой площади методами металстимулированного каталитического травления для суперконденсаторов” Тезисы докладов Третьей школы молодых ученых «Электрохимические устройства: процессы, материалы, технологии», 11-13 сентября, **2023**, Новосибирск.
- 7) Капогузов К.Е., Тумашев В.С., Яковкина Л.В., Кичай В.Н., Мутилин С.В. Многоуровневые резистивные переключатели на основе диоксида ванадия с фазовым переходом полупроводник-металл // Школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем», 29-30 ноября, **2023**, Новосибирск.
- 8) Тумашев В.С., Селезнев В.А. “Влияние состава травителя и геометрии Au катализатора на формирование упорядоченных массивов наностолбиков при метал-стимулированном каталитическом травлении кремния” Тезисы докладов XIV Международной конференции и XIII Школы молодых ученых и специалистов “Кремний-2022” стр.125 DOI 10.34077/SILICON2022-125
- 9) Тумашев В.С., Селезнев В.А. “Влияние геометрии Au-катализатора на формирование упорядоченных массивов наностолбиков при металл-стимулированном каталитическом травлении кремния” Тезисы докладов XV российской конференции по физике полупроводников. **2022** стр.381
- 10) I.V. Antonova, V.A. Seleznev, N.A. Nebogatikova, A.I. Ivanov, V. Tumashev “Application of composite nanoparticles G:BN and FG/V2O5 to the surface of a nanostructured polymer substrate”, Стендовый доклад на международной конференции, "Micro- and nanoelectronics - 2023", Москва, Звенигород, 2-6 октября, **2023**