

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК [620.3:661.8'046.1]-026.657

Холяво  
Виктор Иванович

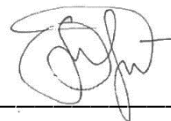
Электрофизические свойства наночастиц благородных металлов на  
наноструктурированном кремнии

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике»

---

Научный руководитель  
Бондаренко Анна Витальевна  
Кандидат технических наук,  
доцент



---

Минск 2020

## ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий все более интенсивно ведутся исследования в области разработки методик формирования кремниевых фотоприемников и солнечных элементов, которые позволят максимально приблизиться к пределу эффективности для однопереходных фотоэлектрических устройств. Несмотря на то, что ряд альтернативных материалов для преобразования солнечной энергии уже активно изучается и сообщается, что они более эффективны, чем кремний, в настоящей работе внимание сфокусировано именно на этом полупроводнике, поскольку он традиционно применяется для производства коммерческих фотоэлектрических устройств. Магистерская диссертация направлена на разработку методик формирования наночастиц металлов на наноструктурах кремния, изучение их свойств и моделирование распределения электрического поля в них. Такие наночастицы обеспечат улучшенное поглощение света в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах электромагнитного спектра. Ансамбли упорядоченных кремниевых наноструктур будут выступать в роли шаблона, который определяет размеры и форму осаждаемых структур металлов, а также расстояние между ними. В результате будет возможно управлять оптическими свойствами металлических наноструктур. Например, в полосе поверхностного плазмонного резонанса наночастиц никеля, серебра, золота, меди с размерами 10 – 150 нм значительно возрастает коэффициент поглощения и локальные электромагнитные поля в мягком УФ, синем, зеленом и красном диапазонах электромагнитного спектра соответственно. Создание наностержней и геометрических наноструктур этих металлов с аспектным соотношением более 4 позволяет «расщепить» их полосы поглощения за счет возникновения мультипольных плазмонных резонансов более высокого порядка. Это обеспечивает расширение полосы поглощения металлических наночастиц вплоть до ИК диапазона. Кроме того, кремниевые наноструктуры размером менее 10 нм характеризуются смещением края оптического поглощения в коротковолновую область, что связано с квантовыми эффектами. Это также будет способствовать увеличению поглощения в ИК диапазоне.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Актуальность темы диссертации определяется тем, что плазмонные свойства металлических наночастиц на наноструктурах кремния особенно перспективны с точки зрения повышения эффективности тонкопленочных солнечных элементов. Разработка надежных методик моделирования электродинамических свойств и формирования, а также изучение свойств таких структур позволят в будущем добиться максимальной эффективности тонкопленочных солнечных элементов на основе кремния.

**Цели и задачи исследования.** Цель данной работы заключается в разработке методик формирования, экспериментальном и теоретическом исследовании морфологии и электродинамических свойств наночастиц металлов на наноструктурах кремния для применения в солнечных элементах в качестве тонких пленок, усиливающих поглощение электромагнитного излучения в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах.

Для достижения цели, поставленной в данной магистерской диссертации, необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ современного состояния исследований по формированию, свойствам и применению в фотовольтаике металлических и кремниевых наноструктур;
- разработать методику и провести моделирование распределения электрического поля и температуры в наночастицах металлов, расположенных на кремниевых наноструктурах;
- методики формирования и изучения морфологии и оптических свойств наночастиц металлов на наноструктурах кремния;
- сформировать наноструктуры кремния и осадить наночастицы металлов на них;
- изучить морфологию и оптические свойства наночастиц металлов на наноструктурах кремния.

**Объектом исследования** являются наночастицы металлов, расположенных на кремниевых наноструктурах.

**Предметом исследования** является распределение электрического поля и температуры в наночастицах серебра на наноструктурах кремния.

**Область исследования:** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени

(магистратуры) специальности 1-41 81 03 «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике».

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в разработке моделей распределения электрического поля в различных наночастицах металлов (полусферах, нанополостях, дендритах) на наноструктурах кремния и методик формирования и изучения их свойств для применения в качестве тонких слоев в солнечных элементах, поглощающих электромагнитное излучение в видимом и ближнем ИК диапазонах.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

Воздействие электромагнитного излучения с длиной волны от 473 до 785 нм на серебряные нанополости (антинаночастицы) в кремнии, диаметр и глубина которых составляет 0,5 мкм, приводит к возникновению квазисферического «облака» локально усиленного электрического поля диаметром 300–400 нм, напряженностью которого можно управлять в пределах от  $2 \times 10^6$  до  $3 \times 10^6$  В/м путем изменения длины волны излучения, в отличие от материалов, состоящих из наночастиц серебра со средним диаметром 75 нм, обеспечивающих усиление электрического поля в пределах пятна диаметром 3–10 нм.

**Личный вклад магистранта** заключается в проведении анализа литературы, формировании, анализе свойств и расчете распределения электрического поля и температуры в наночастицах серебра на наноструктурах кремния.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследования были представлены на конференциях: 20-ая международная конференция ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES, 27-31 августа, 2018, Паланга, Литва; The 2018 European Materials Research Society Fall Meeting, 17-20 сентября 2018, Варшава, Польша.

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации – 70 страниц. Работа содержит 8 таблиц, 29 рисунков. Библиографический список включает 48 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описано современное состояние проблемы солнечных элементов, в частности их низкий КПД, определены основные направления исследования, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлено положение, выносимое на защиту, приведены сведения об апробации результатов диссертационной работы.

В **первой** главе рассматриваются общие сведения о современном состоянии исследований по формированию и свойствам наноструктур кремния и металлов для применения в фотовольтаике.

Во **второй** главе описаны методики формирования и анализа свойств наночастиц металлов на наноструктурах кремния.

В **третьей** и **четвертой** главах описана экспериментальная часть магистерской диссертации. Представлены полученные результаты морфологии, оптические свойства, полученные экспериментально и моделированием, для наночастиц металлов на наноструктурах кремния, а также проведен их анализ.

В **пятой** главе приведены рекомендации по применению солнечных элементов на основе кремниевых нанонитей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы достигнута ее цель, которая заключалась в разработке методик формирования, экспериментальном и теоретическом исследовании морфологии и электродинамических свойств наночастиц металлов на наноструктурах кремния для применения в солнечных элементах в качестве тонких пленок, усиливающих поглощение электромагнитного излучения в видимом и ИК диапазонах.

Был проведен анализ современного состояния исследований по формированию, свойствам и применению в фотовольтаике металлических и кремниевых наноструктур. Показано, что на настоящий момент разработаны покрытия на основе кремниевых нанонитей, которые позволяют в значительной степени повлиять на КПД кремниевых солнечных элементов. Представлен краткий обзор современного состояния исследований по повышению коэффициента поглощения в тонкопленочных солнечных элементах при помощи плазмонных материалов на основе наночастиц металлов. Тем не менее установлено, что на сегодняшний день существует необходимость в проведении комплексных исследований по моделированию, формированию и изучению свойств наночастиц металлов на кремниевых структурах для их успешного применения в солнечной энергетике.

Разработаны методики и проведено моделирование распределения электрического поля и температуры в наночастицах металлов, расположенных на кремниевых наноструктурах. Все наноструктуры серебра при моделировании условно были разделены на три основные группы, включая наночастицы, дендриты и нанополости. Также при моделировании в качестве характеристик слоя наноструктур кремния были использованы характеристики аморфного кремния. Для каждой структуры были разработаны и исследованы универсальные модели распределения напряженности электрического поля, возникающего при возбуждении лазерами 473, 633 и 785 нм.

Сформированы наноструктуры кремния, на которые были осаждены наночастицы металлов, а также изучена морфология и оптические свойства наночастиц металлов на наноструктурах кремния. В качестве материала наночастиц было выбрано серебро, что обусловлено его хорошими плазмонными свойствами по сравнению другими металлами, а также возможностью управлять положением и интенсивностью поверхностного плазмонного резонанса наночастиц серебра в пределах видимого и ближнего ИК диапазонов электромагнитного спектра, путем изменения их геометрических параметров. Показано, как изготовить наночастицы серебра, используя только один вид

полупроводникового шаблона. Основываясь на анализе ранее представленных данных, был предложен системный подход к контролируемому изготовлению наночастиц серебра, дендритов и нанополостей на/в пористом кремнии. Установлено, что морфология и геометрия структур серебра определяется изменением типа легирующей примеси исходного монокристаллического кремния, режимами формирования пористого кремния и осаждения серебра электрохимическими и химическими методами. Описаны подходы, которые были использованы для моделирования распределения электрического поля и температуры в наночастицах серебра на наноструктурах кремния. В качестве структурных форм наночастиц металлов были выбраны квазинаносферы, нанополости (антнаночастицы) и дендриты, состоящие из элементов нанометрового размера. Форма наночастиц задавалась параметрами наноструктур кремния, включавших в себя мезо- и макропористый кремний, покрытый слоем микропористого кремния.

Было показано, что разработанные подходы к осаждению серебра на пористый кремний позволяют добиться контролируемого роста указанных выше наноструктур серебра. Установлено, что морфология и геометрия структур серебра определяется изменением типа легирующей примеси исходного монокристаллического кремния, режимами формирования пористого кремния и осаждения серебра электрохимическими и химическими методами. Для каждой структуры были зарегистрированы спектры оптического отражения и ГКР-спектры молекул, осажденных на них, при возбуждении лазерами 473, 633 и 785 нм.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Viktor Khaliava, Arseni Klimenka, Simulation of optical properties of Ag/SiNWs structures. The 2018 European Materials Research Society Fall Meeting. Warsaw, Poland. p.222.
2. Viktor Khaliava, H. Bandarenka, V. Bandarenka. Simulation of Optical Properties of SERS-active Substrates. 20th International Conference-School “Advanced Materials and Technologies 2018”.
3. A.K. Sarychev, A. Ivanov, A. Merzlikin, H. Bandarenka, S. Zavatski, V. Khaliava, G. Arzumanyan, K. Mamatkulov. Optical properties of mesoscopic, multiscale silver films: surface plasmon localization and giant SERS. Proceedings of SPIE Nanoscience + Engineering Conference 2018, August 19-23, 2018, San Diego, CA, USA, P. 10719-62.
4. Nadia Khinevich, Sergey Zavatski, and Hanna Bandarenka. Bimetallic nanostructures on porous silicon with controllable surface plasmon resonance. The European Physical Journal Plus, 2019. – Vol. 134. – P. 75.