



НАУКА  
БУДУЩЕГО  
НАУКА  
МОЛОДЫХ

«НАУКА БУДУЩЕГО – НАУКА МОЛОДЫХ»

# СБОРНИК ТЕЗИСОВ УЧАСТНИКОВ ФОРУМА

МОСКВА  
2017

## Машиностроение и энергетика

дает завышенные результаты более чем на 25% и отражает идеализированную картину в случае минимизации влияния на течение вязких явлений;

2. Предложено две конфигурации ВЗУ в калибре УАС: со сливом пограничного слоя и без него. По результатам численного моделирования показано, что при малых сверхзвуковых скоростях полета (порядка  $M=1.5$ ) допустимо не использовать конфигурацию ВЗУ со сливом пограничного слоя. Эффективность слива с точки зрения коэффициента восстановления давления увеличивается по мере роста числа Маха невозмущенного потока с 4 % при  $M=1.5$  до 17 % при  $M=3$ . С точки зрения коэффициента расхода воздуха конфигурация со сливом пограничного слоя уступает варианту без слива на величину до 25 % в зависимости от числа Маха. Слив пограничного слоя наиболее эффективен в области  $M=2.5$ , поскольку в данном случае сочетаются увеличение коэффициента восстановления полного давления на 6 – 10 % с минимальными потерями в коэффициенте расхода воздуха 7 – 10 %.

3. Подводя общий итог, необходимо отметить, что для подтверждения полученных результатов необходимо разработать схему аэродинамического эксперимента и модель модульной конструкции с кормовым ВЗУ, для проведения аэродинамических продувок.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бабичев В.И., Ветров В.В., Елесин В.П., Коликов А.А., Костяной Е.М. Способы повышения баллистической эффективности артиллерийских управляемых снарядов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Издание Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – М., 2010. №3 – С. 3 – 9.
2. Бабичев В.И., Ветров В.В., Елесин В.П., Коликов А.А., Костяной Е.М. Способы повышения баллистической эффективности артиллерийских управляемых снарядов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Издание Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – М., 2010. №3 – С. 3 – 9.
3. Ветров В.В., Дикшев А.И., Костяной Е.М., Образумов В.И., Хохлов Н.И. Особенности баллистического проектирования ракет ближней зоны с ПВРД. Сборник трудов. – Санкт-Петербург, 2015. – С.18 – 20

ДОКЛАДЧИК	ТЕМА ПРОЕКТА
Пищагин Антон Александрович	Разработка конструкции высокоэффективного преобразователя солнечной энергии на основе полупроводниковых структур Ge/Si с квантовыми точками Ge

ВУЗ Национальный исследовательский Томский государственный университет

### РЕЗЮМЕ

В настоящее время основные тенденции развития солнечной фотоэнергетики направлены на уменьшение удельной стоимости фотопреобразователя. Сегодня практически вся полупроводниковая электроника основана на Si. Однако, максимальный КПД солнечных фотоэлементов, предлагаемых на рынке на сегодняшний день составляет 19-21%, лабораторных макетов ~ 30 %. Наиболее эффективные солнечные элементы – много переходные на основе GaAs (46% для лабораторных макетов). Но у них есть несколько существенных минусов: сложность производства, проблема сопряжения с традиционной кремниевой электроникой и близость достигнутых результатов к теоретическому пределу (47 %). Кроме того, существуют некоторые отрасли (космос, военное применение), которые предъявляют требования к высокому КПД солнечных элементов вне зависимости от их стоимости.

В рамках работы разрабатывался солнечный элемент в конструкции p-i-n диода с несколькими слоями квантовых точек (КТ) Ge в собственной области. Теоретический предел подобных солнечных элементов составляет 53%.

Основным методом получения массивов КТ Ge является метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Синтез гетероструктур Ge/Si проводится в нашей лаборатории на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь - 100». В модельном представлении массивы квантовых точек в собственной области создают в запрещенной зоне полупроводника промежуточную зону разрешенных состояний. Изменяя свойства массива КТ (размеры КТ, разброс по размерам, плотность). За счет существования промежуточной зоны и возможностью управления ее параметрами (в некоторых ограниченных пределах) в фотодетекторах на квантовых точках спектральный отклик расширен в инфракрасную область (до 1,6 мкм против границы 1,1 мкм в фотодетекторах на чистом кремнии).

В рамках исследования проводились эксперименты по синтезу массивов КТ Ge на Si. С целью определения зависимостей параметров и характеристик структур от условий роста эксперименты проводились при варьировании скоростей осаждения материалов, температуры подложки, температуры и времени отжига, количества примесей и т.д. Рассматриваются условия формирования различных типов квантовых точек по форме и размерам, условия, необходимые для формирования квантовых нитей. Синтезированные структуры исследуются методами атомно-силовой микроскопии, сканирующей туннельной микроскопии. Кроме того, при проведении экспериментов учитываются результаты теоретических расчетов. После определения условий роста, необходимых для получения высококачественных структур с КТ с требуемыми параметрами, будут проводиться эксперименты по синтезу многослойных структур различных конструкций с вертикально-упорядоченными массивами КТ. Электрические и оптические характеристики многослойных структур будут получены из исследования образцов методами адмиттансной спектроскопии, фотолюминесценции.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Германий, кремний, квантовая точка, молекулярно-лучевая эпитаксия, солнечный элемент, p-i-n структура.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель проекта – разработка конструкции высокоэффективного преобразователя солнечной энергии на основе полупроводниковых структур Ge/Si с квантовыми точками Ge.

Задачи проекта:

1. Оптимизация технологии синтеза многослойных гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge методом молекулярно-лучевой эпитаксии.
2. Теоретические расчеты и экспериментальные исследования солнечных элементов с квантовыми точками различной конструкции.
3. Исследование влияния количества слоев квантовых точек, наличия/отсутствия промежуточных i-слоев Si на КПД солнечного элемента,

определение оптимальной конструкции.

4. Изготовление опытных образцов солнечных элементов на основе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из глобальных проблем, стоящих перед человечеством, является угроза исчерпания запасов полезных ископаемых. Вследствие этого, ведутся обширные научные исследования по поиску альтернативных источников энергии. Среди альтернативных источников энергии наибольшие перспективы повсеместного внедрения имеет солнечная энергетика. Это подтверждается тем фактом, что за последние 15 лет рынок солнечных фотоэлектрических систем вырос в среднем на 30% в год.

В настоящее время основные тенденции развития солнечной фотоэнергетики направлены на уменьшение удельной стоимости фотопреобразователя, которая определяется как \$/кВтч. Таким образом, возникает проблема создания дешевого, но в то же время высокоэффективного фотопреобразователя. Наиболее дешевой и развитой полупроводниковой технологий сегодня является кремниевая технология. Однако эффективность фотопреобразователей на основе кремния составляет ~15% (эффективность лабораторных образцов фотопреобразователей не превышает 25%). Одним из путей повышения эффективности преобразования солнечной энергии является расширение спектра поглощаемых фотонов в длинноволновую область вплоть до инфракрасной путем оптимизации энергетического спектра полупроводникового материала при использовании нанотехнологий. Теоретические расчеты показывают, что применение массивов квантовых точек германия в фотопреобразователях на основе кремния позволит повысить эффективность преобразования вплоть до 53%. Однако, для полной реализации всех преимуществ применения наноструктур массив квантовых точек должен удовлетворять некоторым условиям по плотности массива, размерам островком, разбросу размеров и т.д.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Основным методом решения поставленных задач является проведение экспериментов по синтезу гетероструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100». Молекулярно-лучевая эпитаксия является одним из самых современных методов создания многослойных полупроводниковых структур с квантовыми точками. данный метод позволяет получать высокочистые слои материалов с резкими границами и контролировать толщину нанесения слоя материала вплоть до одного атомного слоя. Для определения параметров и характеристик синтезированных наноструктур будут использоваться такие методы, как атомно-силовая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия, адмиттансная спектроскопия, метод фотолюминесценции и пр.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках исследования проводились эксперименты по синтезу массивов квантовых точек Ge на Si. С целью определения зависимостей параметров и характеристик структур от условий роста, эксперименты проводились при варьировании скоростей осаждения материалов, температуры подложки, температуры и времени отжига, количества примесей и т.д. Рассматривались условия формирования различных типов квантовых точек по форме и размерам, условия, необходимые для формирования квантовых нитей. Синтезированные структуры исследовались методами атомно-силовой микроскопии, сканирующей туннельной микроскопии. Кроме того, при проведении экспериментов учитывались данные теоретических расчетов, проведенных сотрудниками нашей лаборатории. После определения условий роста, необходимых для получения высококачественных структур с квантовыми точками с требуемыми параметрами, проводились эксперименты по синтезу многослойных структур различных конструкций с вертикально-упорядоченными массивами квантовых точек. Электрические и оптические характеристики многослойных структур были получены из исследования образцов методами адмиттансной спектроскопии, фотолюминесценции.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // ФТП. – 2004. – Т. 38. – № 8. – С. 937–948.
2. M. Green, K. Emery, Y. Hishikawa etc. Solar cells efficiency tables // Prog. Photovolt: Res. Appl. 2013. – pp. 21; 1-11
3. Иванов С.В. Молекулярно-пучковая эпитаксия: принципы, оборудование, применения, мировые тенденции.: Лекции для аспирантов ФТИ / Физико-Технический Институт. – СПб, 2011. – С. 54.
4. Шкляев А.А., Ичикава М. Предельно плотные массивы наноструктур германия и кремния // УФН. –2008. – Т. 178. – № 2. – С. 139–169.
5. Дроздов Ю.Н., Новиков А.В., Шалеев М.В. и др. Исследование перехода эпитаксиальной пленки Ge от послойного к трехмерному росту в гетероструктурах с напряженными подслоями SiGe // ФТП. – 2010. – Т. 44. – № 4. – С. 538–543.
6. Arapkina L.V., Yuryev V.A. CMOS compatible dense arrays of Ge quantum dots on the Si(001) surface // Nanoscale Research Letters. – 2011. - 6:345
7. Nikiforov A.I., Mashanov V.I., Timofeev V.A. et al. Reflection high energy electron diffraction studies on SixSnyGe1-x-y on Si(100) molecular beam epitaxial growth // Thin Solid Films. – 2014. – Vol. 557. – pp. 188-191.
8. Mashanov V.I., Ulyanov V.A., Timofeev V.A. et al. Formation of Ge-Sn nanodots on Si (100) surfaces by molecular beam epitaxy. // Nanoscale Research Letters. – 2011. - 6:85.
9. Zhang J.J., Rastelli A., Schmidt O.G. et. al. Self-organized evolution of Ge/Si(001) into intersecting bundles of horizontal nanowires during annealing // Appl. Phys. Lett. – 2013. – V. 103. – Iss. 8. – 083109.
10. Montalenti F., Scopecce D., Miglio L. One-dimensional Ge nanostructures on Si(001) and Si(1110): Dominant role of surface energy // C.R. Physique. – 2013. – V. 14. – Iss. 7. – pp. 542-552.