МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. Ломоносова

XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам



Международный молодежный научный форум

"ЛОМОНОСОВ-2023"

Секция "ФИЗИКА"

Подсекция "ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКА",

Сборник тезисов докладов

МОСКВА Физический факультет МГУ 2023 ХХХ Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2023». Секция «Физика». Сборник тезисов. — М. Физический факультет МГУ, 2023, 1052 с.

ISBN 978-5-8279-0255-3

Секция «Физика» включает следующие подсекции

- 1. Акустика
- 2. Астрофизика
- 3. Атомная и ядерная физика
- 4. Биофизика
- 5. Геофизика
- 6. Математика и Информатика
- 7. Математическое моделирование
- 8. Медицинская физика
- 9. Молекулярная физика
- 10. Нелинейная оптика
- 11. Оптика
- 12. Радиофизика
- 13. Сверхпроводящие и электронные свойства твердых тел
- 14. Твердотельная наноэлектроника
- 15. Теоретическая физика
- 16. Физика космоса
- 17. Физика магнитных явлений
- 18. Физика твердого тела
- Школа МГУ «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина»: Квантовые технологии Фотонные технологии Цифровая медицина

ISBN 978-5-8279-0255-3

© Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКА



Спектр фоточувствительности барьеров Шоттки Au-p-GaP М.Р. Аннабердиева	602 602
Фоточувствительность в видимом и ультрафиолетовом диапазоне спектра наноструктурированного А G_{2} O_{1} (Fe) р G_{2} P_{2} r^{+}_{2} $R^{$	u- 603
	603
Фотонулстрители иости изиоструктурировании у барьевов Шоттки. Ан оксия в СаАс в. УФ области	005
спектра	604
Языева А.Б., Мамедов Н.Б.	604
Возбуждение «горячих» электронов в металлоуглеродных комплексах содержащих линейный углерод	Į
	605
Абрамов А.С., Бухаров Д.Н., Самышкин В.Д., Халимов Н.А., Эйум Эссака С.П	605
Применение метода рентгеновской топо-томографии для исследования ростовых дефектов в	
монокристаллах синтетического алмаза.	607
Анисимов Н. П. ¹ , Золотов Д. А. ² , Бузмаков А. В. ² , Дьячкова И. Г. ² , Асадчиков В. Е. ²	607
Влияние переменного напряжения на резистивное переключение в нанокомпозитах на основе ниобата	1
лития	609
Баранова В.Н.	609
Impedance spectroscopy of the dynamics of charge carriers of CsPoI ₃ and CsPoBr ₃ nanoparticles deposited of tendem color collo	na
L Poudiamile ¹ G V Nanachay ² V G Malyahlin ² E L Tarukay ² A N Alashin ² D Vadimay ²	610
L. Boudjennia, G.V. Nenasnev, V.G. Maryshkin, E.I. Terukov, A.N. Alesnin, D.Vadinov	612
Разучение эффекта локализации света в нитевидных кремниевых наноструктурах	612
Перколянионные ансамбли нанонастии серебра и их мемристирные сройства	613
Василевская Ю О ¹ Савинкий А И ² Сибатов Р Т ²	613
Органические фотоэлементы на основе новых нефуллереновых акцепторных материалов	615
Габлуллин Р.Р. ^{1,2} Маннанов А.Л. ²	615
Моделирование лавинного фотодиода с планарной структурой на основе Ge/Si	616
Диб Х., Хомякова К.И.	616
Электрические свойства наноструктурированной системы MnSe-CuInSe ₂ в условиях изменяющейся	
влажности и освещения	618
Диденко Е.А. и др	618
Исследования особенностей наноразмерных гетероструктур GaN и AlGaN, полученных методом	
плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии на кремниевых подложках с	
использованием буферного слоя пористого кремния	621
Золотухин Д.С.', Середин П.В.', Леньшин А.С.', Мизеров А.М. ²	621
Рентгентопографические исследования резонаторов на основе кристаллов лангасита	622
Ибрагимов Э.С. ^{1,2,3} , Пиляк Ф.С. ^{2,3} , Куликов А.Г. ^{2,3} , Марченков Н.В. ^{2,3} , Писаревский Ю.В. ^{2,3} ,	(00
Ковальчук М.В.	622
пассивация гетерограниц перовскитных фотопреооразователей низкомолекулярными органическими	(22
Илинера Е А	623
Изинение массивов крассбав мемристовов (Со., Fe., B.,) (I iNbO.) и поствоение формали ной	023
изучение массивов кроссоар-мемристоров ($Co_{40} C_{40} D_{20}$) _x ($DIVOO_3$) _{100-x} и построение формальной чейроморфиой сети на их основе	625
Ильясов А И 1,2* Никируй К Э 1	625
Исспелование возлействия пазерной резки на поверхность гетероструктурного фотоэлектрического	020
преобразователя	626
Кочергин А.В. ^{1,2} , Теруков Е.И. ^{1,2,3}	626
Влияние температуры на изменения сверхструктуры 2xN при эпитаксии Ge на Si(100)	628
Кукенов О.И., Соколов А.С.	628
Численное моделирование переноса носителей заряда в ячейках энергонезависимой памяти МОНОП.	629
Кулиш А.М	629
Разработка метода определения концентрации фотовозбужденных электронов в зоне проводимости	
полупроводниковых наноматериалов	630
Кытина Е.В.	630
Разработка сенсора газов на основе кремний-углеродных пленок	631
Михайлова 1.С., Новиков С.П., Мясоедова Т.Н.	631
моделирование процесса рассеяния электронов на квантовых кольцах	632

Музыкина Е.А	632
Исследование оптических свойств перспективных материалов на основе квантовых точек для элемен	нтов
квантовой электроники	634
Мухаев Д.А., Игошина С.Е., Карманов А.А.	634
Фотодетекторы на основе наноалмазных покрытий, полученных методом плазмохимического осажд	ения
	636
Мухамадиев А.И., Стрелецкий О.А	636
Би-сквид как ячейка джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны	637
Николаева А.Н.	637
Высокоселективные газовые сенсоры на основе дегидрогалогенированного поливилиденфторида	638
Нуриахметов И.Ф., Завидовский И.А.	638
Разработка и изготовление наноэлектродов одноэлектронного транзистора	640
Мельников А.Е., Петрунин Д.А.	640
Формирование топологии элементов высокочастотных устройств телекоммуникации методами ионн	-01
плазменной обработки	641
Пименов И.Е.	641
Наноэлектромеханический сенсор с перестраиваемой частотой	643
Попов А.А. ¹ , Михайлов П.О. ¹ , Дорофеев А.А. ¹ , Трифонов А.С. ¹ , Преснов Д.Е. ^{1,2} , Снигирев О.В. ¹ ,	
Крупенин В.А. ¹	643
Создание полупроводниковой резистивной памяти на основе светодиодов InGaN/GaN путем	
импульсного воздействия	644
Рибенек В.А.	644
Электрические свойств полимерных пленок PCDTBT с внедренными нанопластинами CdSe	645
Русаков Д.М. ¹ , Саитов Ш.Р. ¹ , Ильин А.С. ^{1,2}	645
Адсорбция фторсодержащих фуллеренов на золотую подложку: моделирование ReaxxFF	
и эксперимент	646
Самородский А.В.1, Орешкин А.И.2	646
Электрические и фотоэлектрические свойства нановолокон композитов на основе оксида кобальта с	
цинком	647
Смирнова В.В., Мартышов М.Н., Ильин А.С.	647
Низкочастотный наномеханический резонатор	649
Снигирев Г.О., Попов А.А. ¹ , Михайлов П.О. ¹ , Дорофеев А.А. ¹ , Преснов Д.Е. ^{1,2} , Снигирев О.В. ¹ ,	
Крупенин В.А. ¹	649
Влияние размерного квантования на электронный транспорт в некристаллических 2D углеродных	
гетероструктурах	650
Шабунин Н.О. ^{1,2} , Яфаров Р.К. ^{1,2}	650
Изучение влияния площади структур на основе поли- <i>n</i> -ксилилена на их мемристивные	
характеристики	651
Юкляевских Г.А., ¹ Швецов Б.С. ²	651

СПЕКТР ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БАРЬЕРОВ ШОТТКИ АU-P-GAP

М.Р. Аннабердиева

Туркменский ГУ им. Махтымкули, физический факультет, Ашхабад, Туркменистан E-mail: <u>murzishmykgysh@gmail.com</u>

Барьеры Шоттки (БШ) на основе фосфида галлия (GaP) как n – типа, так р-типа давно привлекают внимание исследователей как перспективные структуры для создания высокотемпературных и радиационно – стойких фотоэлектрических приборов [1 – 3]. Исследование зонной структуры полупроводников, основанное на явлении фотоэлектроактивного поглощения в поверхностно-барьерных структурах "металл-полупроводник", несмотря на многолетние исследования, остается актуальной задачей физики полупроводников и полупроводниковых приборов [4]. В этой связи несомненный интерес представляют исследования БШ на основе фосфида галлия p – типа.



Настоящая работа посвящена исследованию фоточувствительности (ФЧ) структур Au-p-GaP с целью определения высоты потенциального барьера $q\varphi_{B_0}$ и получения новых данных о зонной структуре p-GaP при 300К.

Объектом исследования служили Au-p-GaP+p⁺-GaP структуры (рис.а). Активный слой GaP толщиной 15-20мкм выращивался методом жидкофазной эпитаксии на подложке p⁺-GaP (p⁺=2·10¹⁸см⁻²). Барьерный контакт (БК) к GaP формировался химическим осаждением золота (Au). Тольщина барьерного нанослоя золота составляла 12-20нм. Площадь БК разных структур составляла 0,05-0,3см2. Конструктивная схема (a), спектр ФЧ структур (рис.б,в) и основные результаты проиллюстрированы на рисунке.

Установлено, что для структур Au-p-GaP зависимость I_{f_0} от энергии в области hv = 0.85 - 1.30 эВ подчиняется закону Фаулера: $I_{f_0} \approx (hv_0 - q\varphi_{B_0})^2$ (рис.б,в). Из этой зависимости определена величина $q\varphi_{B_0}$, значения которой равно 0,78 эВ. Использование контактного фотоэлектрического метода [4] позволило получить новые данные о зонной структуре фосфида галлия р – типа (рис.б).

- 1. White H.G., Logan R.A. // J.Appl.Phys. 1963, Vol.34, №7. –p.1990-1997
- 2. Nannichi V., Pearson G.L.//Solid-State Electron. -1969, -Vol.12, №5.-p.341-348

- **3.** Гуткин А.А., Дмитриев М.В, Наследов Д.Н.// ФТП. -1972, -Том.6,вып.3, -С.502-508.
- Конников С.Г., Мелебаев Д., Рудь В.Ю., // Письма ЖТФ, -1993. –Т.19, №13. –С.47-54.

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ В ВИДИМОМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО AU-GA₂O₃(FE)-N-GAP-N⁺-GAP ФОТОДИОДА

Оразова Г.Б., Бабаева Ш.Б.

Туркменский ГУ им. Махтымкули, физический факультет, Ашхабад, Туркменистан E-mail: <u>guljahanorazowa@gmail.com</u>

В настоящее время научно-техническая революция связана с появлением и развитием нанотехнологии. По мнению знаменитых ученых внедрение нанотехнологий улучшает качество производимых товаров и продление продолжительности жизни человечества, внедрение в отрасли новых технологий в перераспределении ресурсов, избежании социальной напряженности и все это приведет к более интенсивному росту системы экологической адаптации. Метод нанотехнологий будет широко использоваться при изготовлении высокоэффективных фотодетекторов ультрафиолетового излучения при наноструктурировании Шоттки барьера полупроводника металлдиэлектрика. [1,2]

Au-Ga₂O₃(Fe)-n-GaP-n⁺-GaP-наноструктуры, изготовленные с использованием химических нанотехнологий, послужили объектом рассмотрения в данной работе. Для оксидного слоя использовался легированный железом (Fe) природный оксид Ga₂O₃(Fe) слоя n-GaP. Диэлектрические наноматериалы Ga₂O₃(Fe) толщиной 3-5 нм в системе наноструктур металл-диэлектрик-проводник (МДП) исследованы с помощью сканирующего и просвечивающего электронного микроскопа с высокой степенью воспроизводимости структуры и химического строения. Электрическими и фотоэлектрическими методами установлено, что оксидный слой состоит из двух компонентов: Fe₂O₃ и Ga₂O₃(Fe). [2]

Схема наноструктуры и научные результаты, полученные из спектра фототока Au-Ga₂O₃(Fe)-n-GaP-n⁺-GaP- наноструктуры, представлены на графике.

Произошло нормированное количество фотонов из спектра фототока. (рис)

Фоточувствительность (γ) фотодио- да при γ =0,45 эл/фотон при энергии фотона hv_m=3.20 эВ. Впервые выявлено значительное увеличение фоточувстви- тельности с 0,37 эл/фотон до 0,58 эл/фотон в hv=5.2-6.0 эВ диапазоне спектра.

До образования слоя оксида Ga₂O₃ в наноустройстве фоточувствительности МДП верхний эпитаксиальных слои n-GaP был очищен раствором бромированного метанола $Br_2(4\%)$ + +C₂H₅OH (96%). После этого очищенная поверхность n-GaP дополнительно очищалась раствором бромированного железа (FeBr₂·6H₂O) в этаноле и на активной поверхности n-GaP формировался легированный железом нанослой Ga₂O₃(Fe). В системе было приготовлено несколько Au-Ga₂O₃(Fe)-n-GaP-n⁺-GaP наноструктур, содержащих атомы железа. Исследовав фотоэлектрические свойства в (hv=1,5-6,2 эB) в видимой и ультрафиолетовой (hv=1,5-6,2 эB) области спектра, в наноструктурах на основе монокристалла GaP в коротковолновой ультрафиолетовой (hv=5-6,2 эB) части спектра, впервые выявлены ранее неизвестные квантово-оптические явления и новые закономерности. [1]. Исследуя новый Au-Ga₂O₃(Fe)-n-GaP-n⁺-GaP вид наноструктуры с научной стороны были обнаружены новые закономерности и квантово-оптические явления.



Таким образом, слой нанооксида железа Fe_2O_3 , сформированный поверх эпитаксиального слоя n-GaP, проявленный в Au-Ga₂O₃(Fe)-n-GaP-n⁺-GaP наноструктуре будет иметь важное научно-практическое значение.

Литература

Д. Мелебаев Гигантская фоточувствительность Au-Ga₂O₃(Fe)-n-GaP наноструктур в УФ области спектра.// Инженерный журнал Нанотехника.- Россия: Москва, 2014, № 2 (38), С.106-109

Д. Мелебаев, Г. Оразова Фоточувствительность Au-Ga₂O₃(Fe)-n-GaP наноструктуры в ультрафиолетовой части спектра. В честь 30 летию Независимости Туркменистана «Наука, техника и развитие инновационных технологий» краткое содержание докладов с научной конференции.: Наука, 2021.T1.S.377-379

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ БАРЬЕРОВ ШОТТКИ АU-ОКСИД-N-GAAS В УФ-ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Языева А.Б., Мамедов Н.Б.

Туркменский ГУ им. Махтумкули, физический факультет, Ашхабад, Туркменистан E-mail: yazyevaa@gmail.com, mamedownowruz18@gmail.com

В области физики барьеров Шоттки «металл (М) – диэлектрик (Д) – полупроводник (П)», нанотехнологии, в частности наноструктурирование, используются для создания фотоприемников ультрафиолетового (УФ) излучения [1, 2].

Настоящая работа посвящена исследованию фоточувствительности (ФЧ) наноструктурированных диодов Шоттки Au - оксид - n - GaAs в УФ-области спектра. В качестве исходного материала использовали пластинки n - GaAs (с концентрацией некомпенсированных доноров ($N_d - N_a = (2 - 3) \cdot 10^{16}$ см⁻³, 300К) толщиной около 350 мкм. На одной поверхности GaAs создавался омический контакт (ОК) вплавлением сплава 97% In + 3% Te. На другой поверхности GaAs сначала формировался нанооксидный слой (ОС) толщиной $\delta = 30 - 50$ Å, затем создавался барьерный контакт (БК) полупрозрачного слоя Pd + Au. Диэлектрическим (оксидным) слоем служил собственный оксид GaAs (Ga₂O₃) с $E_{g_{ok}} \cong 4,9$ эВ. ОС, БК создавались химическим методом [2].



Конструктивная схема и спектр ФЧ структур проиллюстрированы на рисунке. Токовая ФЧ структур Au - n - GaAs (рис. б, кривая 1) в максимуме спектра (hv_m) составляла $S_1 = 0,12 \ A/BT$. Для выяснения влияния промежуточного ОС на коротковолновую ($hv > 3 \ eB$) ФЧ был прведен сравнительный анализ спектров фототока I_{f0} структур Au - оксид - n - GaAs ($\delta \cong 40$ Å, кривая 2) и идеальных диодов

Au - n - GaAs ($\delta < 15$ Å, рис. б, кривая 1). В результате исследования ФЧ в УФобласти спектра впервые экспериментально установлено, что в структурах с $\delta \cong 40$ Å коротковолновая ФЧ примерно в 1,5 раза выше, чем ФЧ в структурах с $\delta < 15$ Å (рис. б). В созданных нами наноструктурах Au - оксид - n - GaAs (рис. б, кривая 2) максимум ФЧ смещается в коротковолновую сторону. В интервале 3,2 – 4,2 еВ они имеют участок практически постоянной ФЧ (рис. б, кривая 2). На интервале 4,2 – 5,0 еВ с увеличением hv ФЧ уменьшается и при $hv \cong 4,9$ еВ наблюдается минимум ФЧ. При hv > 5 еВ с увеличением hv происходить рост ФЧ.

Таким образом, промежуточный нанооксидный слой (Ga_2O_3) толщиной $\delta \cong 30 - 40$ Å между полупроводником и металлом приводит к существенному увеличению коротковолновой фоточувствительности фотоприемников *GaAs*.

Литература

- 1. Мелебаев Д. Фотоприемники УФ излучения на основе наноструктур Au-окисел-n-GaP // Тр.Междунар.научн.-технич.конф. "Нанотехнологии функциональных материалов". Россия, г.С.-Петербург. 2010.- с.114-115.
- Мелебаев Д. Фоточувствительность наноструктурированных диодов Шоттки Au-окиселn-GaP в УФ области спектра// Тр. Российской конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоэлектроники "Фотоника-2011". – Россия, г.Новосибирск. – 2011. – с.111.

ВОЗБУЖДЕНИЕ «ГОРЯЧИХ» ЭЛЕКТРОНОВ В МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫХ КОМПЛЕКСАХ СОДЕРЖАЩИХ ЛИНЕЙНЫЙ УГЛЕРОД

Абрамов А.С., Бухаров Д.Н., Самышкин В.Д., Халимов Н.А., Эйум Эссака С.П. Владимирский ГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия E-mail: abramov.andrey.1997@gmail.com

Молекулярная электроника позволяет создавать наноразмерные устройства на кристаллах, которые были бы невозможны в рамках обычной базы на основе кремния. Пространственная протяженность молекулярных структур, пригодных для электронных применений, колеблется от субнанометрового масштаба до масштаба сотен нанометров. Таким образом, молекулярная электроника устраняет разрыв между литографическими и атомными структурами.

Разнообразие предлагаемых типов наноразмерных проводящих структур в настоящее время растет очень быстро [1]. Среди наиболее перспективных материалов - оксиды переходных металлов, проводящие полимеры и т.д. Особое место занимает углерод. Разнообразие наноструктурированных форм углерода открывает возможность адаптировать электронные и оптические свойства устройств на основе углерода для различных перспективных применений [2]. Тем не менее массовое производство углеродных наноструктур для промышленного применения требует технологий контролируемого синтеза больших объемов специфических аллотропов углерода, характеризующихся высокой стабильностью.

В настоящее время существует несколько методов синтеза углеродных наноструктур, которые используются в промышленных масштабах. Однако до сих пор не разработана достаточно эффективная гибридная (комбинированная) технология получения sp-sp²-форм углерода в количествах, достаточных для лабораторных исследований. Существенное ограничение эффективного синтеза линейных углеродных цепей связано с необходимостью создания специфической комбинации давления и температуры, для обеспечения получения стабильной sp-гибридизованной фазы углерода [3]. В этой работе мы представляем гибридную схему для производства sp-sp²-форм углерода.

Способ основан на термическом разложении графитовых стержней в дуговом разряде в сочетании с одновременным воздействием интенсивного лазерного излучения в процессе накопления полученного материала в проточной кювете открытого типа. Дуговой разряд позволяет получать различные аллотропы углерода [4], в то время как дополнительное лазерное воздействие, с одной стороны, сохраняет плазму разряда, обеспечивая более эффективное разложение углерода, и, с другой стороны, создает условия для преимущественного образования линейных углеродных цепей [5].

Для стабилизации линейных формы углерода в жидкости используется коллоидный раствор на основе дистиллированной воды и сферических наночастиц золота, которые способны эффективно катализировать рост углерода и стабилизировать аллотропы углерода, предотвращая их скручивание и изгиб.

Для выявления морфологии и структурных особенностей полученных аллотропов углерода были использованы спектроскопия комбинационного рассеяния света и просвечивающая электронная микроскопия.

Исходный образец графитового стержня состоит из фрагментов неплоского графена, характеризующихся sp²-гибридизацией. По этой причине он проявляется в спектрах КРС двумя пиками на 1580 и 2580 см⁻¹. Спектры комбинационного рассеяния света аллотропов sp²-форм углерода в целом демонстрируют характерные пики в области 1200-1800 см⁻¹. Важно отметить, что следы D- и G-пиков около 1427 и 1575 см⁻¹, а также пик при 1808 см⁻¹ полностью пропадают в растворе, образованном совместным действием дугового разряда и лазерного облучения в присутствии Au NPs. Этот спектр показывает только сильную полосу около 2171 см⁻¹, характерную для линейного углерода [6,7].

Экспериментальное изучение электронных свойств отдельных углеродных цепей является сложной задачей по простой причине: углеродные цепи, как правило, без специальных пространственных органический не бывают одиночными. В предложенной схеме они образуют пучки, прикрепленные к поверхности металлических наночастиц.

В настоящей работе изучается туннельный транспорт в многокомпонентной тонкой пленке углеродных нитей, образованных полииновыми цепям закрепленными между наночастицами золота. Вольт-амперные характеристики (BAX), полученные с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), демонстрируют асимметричное поведение, которое было бы характерно для полупроводника. Напротив, наночастицы демонстрируют типичные металлические ВАХ. Облучение пленки на частота, близкая к плазмонному резонансу наночастиц золота, создает `горячие" носители. Величина туннельного тока, собираемого с линейных углеродных цепей (ЛУЦ) вдали от Au HЧ,

зависит от интенсивности возбуждения, которая отражает корреляцию интенсивности локального плазмонного поля с плотностью фотогенерированных носителей.

Сложные 2D-системах, состоящие из пучков линейных углеродных цепей, закрепленных частицами золота могут стать эффективным инструментом для лазерноиндуцированной генерации "горячих" носителей. Инжекция горячих электронов из металлических наночастиц диаметром приводит к образованию эффективного барьера Шоттки на стыке между углеродными цепями и проводящим наконечником туннельного микроскопа.

Эти результаты демонстрируют, что изготовление одноатомных углеродных проволок, покрытых металлическими наночастицами, обеспечивает универсальный инструмент для использования оптоэлектронных устройств.

Эта работа частично поддержана грантом РФФИ 20-21-00038 и выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания Владимирского государственного университета, тема FZUN-2020-0013.

Литература

- 1. Machín A. et al. One-Dimensional (1D) nanostructured materials for energy applications //Materials. 2021. T. 14. №. 10. C. 2609.
- 2. Bianco A. et al. A carbon science perspective in 2018: Current achievements and future challenges //Carbon. 2018. T. 132. C. 785-801.
- Lukin A., Gülseren O. Tuning the Spatially Controlled Growth, Structural Self-Organizing and Cluster-Assembling of the Carbyne-Enriched Nano-Matrix during Ion-Assisted Pulse-Plasma Deposition //Fluid Dynamics and Materials Processing. – 2022. – T. 18. – №. 6. – C. 1763-1779.
- 4. Fomin Y. D., Brazhkin V. V. Comparative study of melting of graphite and graphene //Carbon. 2020. T. 157. C. 767-778.
- 5. Taguchi Y. et al. Polyyne formation by graphite laser ablation in argon and propane mixed gases //Carbon. 2015. T. 94. C. 124-128.
- 6. Tschannen C. D. et al. Tip-Enhanced Stokes–Anti-Stokes Scattering from Carbyne //Nano Letters. 2022. T. 22. № 8. C. 3260-3265.
- 7. Yang G. Synthesis, properties, and applications of carbyne nanocrystals //Materials Science and Engineering: R: Reports. 2022. T. 151. C. 100692.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОПО-ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РОСТОВЫХ ДЕФЕКТОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА.

Анисимов Н. П.¹, Золотов Д. А.², Бузмаков А. В.², Дьячкова И. Г.², Асадчиков В. Е.²

¹МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия ²ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия E-mail: anisimov.np17@physics.msu.ru

Благодаря своим уникальным физическим свойствам алмаз является перспективным материалом с точки зрения физики полупроводников. Так, существует возможность создания на базе алмазных подложек полупроводниковых элементов, которые по многим своим параметрам превосходят ныне существующие устройства на основе кремния [1]. Однако это требует совершенствования технологии выращивания алмаза и контроля качества получаемых монокристаллов.

В данной работе представлены результаты, связанные с изучением пространственного распределения линейных дефектов в кубооктаэдрических монокристаллах синтетических алмазов, выращенных в лабораторных условиях методом HPHT (от англ. High Pressure and High Temperature). Исследование проводилось с помощью методов рентгеновской топографии и топо-томографии на лабораторном источнике рентгеновского излучения. Образцы были выращены при низких значениях температуры и давления в области термодинамической стабильности алмаза. Эти условия роста обуславливают характерный кубо-октаэдрический габитус образцов с развитыми кубическими гранями {100}. Исследовалось три монокристалла весом 2.48, 3.09 и 4.69 карата.



Рис. 1. Рентгеновские топограммы для образца массой 4.69 карата, полученные с угловым шагом в 30 градусов. Стрелка на рисунке показывает направление вектора дифракции [111], вокруг которого образец вращается на угол φ .

В результате проведения серии экспериментов были получены наборы рентгеновских топограмм для каждого из образцов. Картина распределения дефектов для всех кристаллов оказалось очень похожей. В частности, удалось выделить присутствие в образцах инородных металлических включений, захваченных в процессе роста НРНТалмазов из ростовой среды [2]. Из рис. 1 видно, что включения не дают контраста на топограммах, однако наблюдается сильный дифракционный контраст, связанный с локальными напряжениями решетки вокруг включений. Кроме того, анализ топографических и топо-томографических данных позволил установить наличие в образцах пучков ростовых дислокаций. Анализ конфигурации ростовых дефектов показывает, что рост алмазов происходил из единого центра кристаллизации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках проведения исследований по Государственному заданию ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН в части обработки экспериментальных данных, в рамках задания Минобрнауки России Грант №075-15-2021-1362 в части рентгеновских исследований.

Литература

Makoto Kasu. Diamond epitaxy: Basics and applications // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2016. N 2. P. 317-328.

Sumiya H. Toda N., Satoh S. Development of high-quality large-size synthetic diamond crystals // /SEI Technical Review-English Edition. 2005. N 60. P. 10.

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА РЕЗИСТИВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Баранова В.Н.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: vera.baranova00@mail.ru

В настоящее время одно из наиболее активно развиваемых направлений в мире в области информационных технологий связано с разработкой нейроморфных вычислительных сетей (HBC), являющихся более эффективными при малом энергопотреблении для решения когнитивных задач, чем вычислительные системы, базирующиеся на архитектуре фон Неймана [1]. Ключевым элементом НВС является синапс (связь между нейронами), однако попытки реализовать синаптическую пластичность и низкое энергопотребление на основе комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП) не дают желаемого результата. Действие синапса можно успешно моделировать одним двухэлектродным элементом - мемристором (сокр. от «memory resistor» резистор с памятью). Мемристорный эффект связан с изменением резистивного состояния объекта под действием приложенного электрического поля и протекшего через него заряда, а также с сохранением этого состояния после снятия импульса напряжения. Резистивное переключение (РП) отличается особой устойчивостью в структурах металл/нанокомпозит/металл (М/НК/М) и обусловлено наличием в НК перколяционных цепочек с заданными пространственным положением и концентрацией наногранул металла в НК [2,3]

Для создания исследуемых мемристивных структур $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}/(LiNbO_3)$ пленки нанокомпозита (HK) осаждались с помощью оригинальной установки методом ионно-лучевого напыления на окисленную кремниевую подложку через теневую маску. Подложка предварительно покрывалась металлической пленкой Cu, играющей роль нижнего контакта. Верхние контактные площадки (из Cu) также наносились через металлическую маску с размером отверстий S = 0.5×0.2 мм².

Измерения вольт-амперных характеристик мемристоров проводились при заземленном нижнем электроде и линейной развертки напряжения смещения U верхнего электрода в последовательности 0—U_{max}—U_{min}—0 В с ограничением по току 100 мА. Эксперименты проводились автоматизировано при помощи программного обеспечения, реализованного в среде LabVIEW.

Исследования импеданса, емкости и проводимости структур проводились методом импедансной спектроскопии с использованием импеданс-анализатора HP 4192A в интервале частот f от 5 Гц до 13 МГц. Вольт-фарадные характеристики измерялись в автоматизированном режиме с использованием программной среды LabView с различными временами задержки $\Delta t \approx -0.5 \div 1.5$ с, а также в ручном режиме, который реализовался следующим образом. Значения емкости фиксировались с шагом $\Delta U = 0.1$ В. При этом после каждого измерения емкости $C_i(U_i)$ устанавливалось напряжение U = 0 В на несколько секунд. Напряжение изменялось в диапазоне $U = -1.5 \div 4 = B$.

ВАХ исследуемых структур М/НК/М демонстрируют яркий гистерезис, обусловленный эффектом резистивного переключения (РП) мемристора из высокоомного в низкоомное состояние при отрицательных напряжениях смещения U=U_{set} и обратным переключением при положительном напряжении U=U_{res}, причем в области прямой полярности имеет место максимум тока при U<U_{max}.

Вольт-фарадные характеристики C(U) структур, измеренные в разных режимах, симметричны относительно U = 0 В и демонстрируют максимум в области U $\approx -1 \div 1$ В, причем вид кривой C(U) зависит от режима лишь при малых смещениях напряжения, а при больших значениях U – нет. Сравнение кривых C(U), полученных при различных частотах в диапазоне f $\approx 5.5 \times 10^5 \div 1 \times 10^6$ Гц для разных мемристоров, позволяет сделать

вывод о хорошей воспроизводимости параметров образцов. При более низких частотах ВФХ сильно зашумлены.

На основании выполненного исследования мемристорных характеристик структур М/НК/М можно сделать вывод о наличии воспроизводимого эффекта РП в образцах, зависящего от алгоритма их переключения.

Литература

- 1. Wang J., Zhuge F. Memristive Synapses for Brain-Inspired Computing // Adv.nMater. Technol.- 2019.- P. 1800544.
- 2. Рыльков В.В., Емельянов А.В., Николаев С.Н., Никируй К.Э., Ситников А.В., Фадеев Е.А., Демин В.А., Грановский А.Б. Транспортные свойства магнитных наногранулированных композитов с диспергированными ионами в изолирующей матрице // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 158, № 1(7). С. 164–183.
- 3ю Martyshov M.N., Emelyanov A. V., Demin V.A., Nikiruy K.E., Minnekhanov A.A., Nikolaev S.N., Taldenkov A.N., Ovcharov A. V., Presnyakov M.Y., Sitnikov A.V., Vasiliev A.L., Forsh P.A., Granovskiy A.B., Kashkarov P.K., Kovalchuk M. V., Rylkov V. V. Multifilamentary character of anticorrelated capacitive and resistive switching in memristive structures based on (CoFeB)x(LiNbO3)100-x nanocomposite // Phys. Rev. Appl.– 2020.– Vol. 14.– P. 034016.

IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF THE DYNAMICS OF CHARGE CARRIERS OF CSPBI₃ AND CSPBBR₃ NANOPARTICLES DEPOSITED ON A TANDEM SOLAR CELLS

L. Boudjemila¹, G.V. Nenashev², V.G. Malyshkin², E.I. Terukov², A.N. Aleshin², D.Vadimov²

1 Peter the Great St. Pb Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya, St. Pb, Russia 2 Ioffe Institute, 26 Politekhnicheskaya, St Petersburg 194021, Russian Federation E-mail: <u>lariessai21@gmail.com</u>

As is known, Lead Halid Perovskite materials are making headlines in the scientific journals, for their promising optoelectronic properties in different fields and principally in the field of photovoltaics [1]. However, the Lead side in Perovskites materials poses a serious ecological problem. For this reason, came the choice of nanoparticles (NPS) CsPbI₃ and CsPbBr₃. The latter were deposited as active layer on a tandem cell prepared beforehand by the PECVD process. In this work we are more interested in the mobility of charge carriers within active layers and Bulk *c*-Si. This type of material is characterized by the presence of an extended phonon disorder, this phonon disorder gives rise to a unique electron-phonon coupling and dielectric responses. And to better understand this, a measurement of the Impedance spectroscopy IS was carried out. The measurement was made under identical conditions and the Bulk *c*-Si is taken as a reference substrate. The Cole-Cole plots presented in Fig.1 for the two *c*-Si/CsPbI₃ and *c*-Si/CsPbBr₃ structures with top ITO contact coincide with the equivalent circuit model and respectively represent the series resistance, the recombination resistance and the geometric capacity, which occur due to the accumulation of charge, the charge transfer resistance and/ or additional interfacial electronic states.

When applying the polarization, the ohmic resistance of the contacts manifests itself by a zero shift to the intersection of the semicircle with the axis of the high frequencies. This is in all substrates including the reference sample. The series resistance represented R1 in the equivalent circuit is quite important in the *c*-Si/CsPbI₃ substrates while for *c*-Si/CsPbBr₃ and *c*-Si is more and less similar. This is due to the interfacial interaction of charge carriers with ITO contact. A smaller interception means a lower series resistance. Under polarization applied for *c*-Si/CsPbBr₃ and *c*-Si (reference substrate). Similar behavior is noticed, the interception is very small by comparing it to the interception without applied tension. It is also inter-

preted by the recombination resistance (R2) which is linked to the arc. A larger arc radius indicates a higher recombination resistance. The evolution of the diameter of the semicircles depends on the increase in the applied tension which is linked to the recombination process. [2] This can be explained by the fact that, as polarization through the N + -P junction, the Nyquist Plot radius increases due to an increase in the conductivity of the diode. R2 gradually increases with the increase in tension. On the other hand, a decrease in volume resistance is considered to be an answer to the introduction of load carriers [3]. On the other hand, a decrease in volume resistance is considered to be an answer to the introduction of charge carriers.



Fig.1. Representative impedance response for A - c-Si/CsPbBr3 under illumination at different biases, B - c-Si/CsPbI3 under illumination, C c-Si under illumination at different biases.

In the Nyquist plot, a high frequency signature is observed with a line which is linked to the L1 element. It represents the parasitic tail in the Cole-Cole routes to high frequencies is attributed to the parasitic inductance coming cables and electrodes. The relative contribution of this component becomes significant under high polarization because the resistance of the cell decreases with the increase in polarization. The CPE1 element is a non -ideal capacitor associated with the P + -N junction in the layer of *c*-Si [4] and the non -uniform distribution of the dielectric relaxation time presented by inhomogeneity in the perovskite layer. When the biases are applied, a significant decrease in the diameter of the semicircle arc is observed.

Fig. 2. clustered the two types of samples Studied in addition of the reference sample c-Si without applied bias and under illumination. The latter has a behavior that differs from the Substrates Coated on CsPbBr₃ and CsPbI₃ NPS. A presence of the recombination resistance is more imposing for c-Si while the series resistance is smaller in coated substrates with the Perovskite NPS.



It turns out that the addition of the CsPbI₃ layer improves the photoresponse under polarization, but such a photo-response leads to a decrease in direct current conductivity.

Fig.2 Nyquist plot of heterostructures c-Si, c-Si_CsPbBr3, c-Si_CsPbBr3.

On the contrary, the addition of the $CsPbBr_3$ layer blocks the photo response under the bias but slightly improves the photo response for zero bias. The results

obtained make it possible to improve the performance of the next generation of SC *c*-Si in tandem with higher layers of NC in perovskite.

Literature

- [1]. L. Boudjemila, A.N. Aleshin, V.G. Malyshkin, P.A. Aleshin, I.P. Shcherbakov, V.N. Petrov, E.I. Terukov, Electrical and Optical Characteristics of CsPbI3 and CsPbBr3 Lead Halide Perovskite Nanocrystal Films Deposited on c-Si Solar Cells for Photovoltaic Applications, Physics of the Solid State, 64 (2022) 1670
- [2] Li, J.; Gao, R.; Gao, F.; Lei, J.; Wang, H.; Wu, X.; Li, J.; Liu, H.; Hua, X.; Liu, S. Fabrication of Efficient CsPbBr3 Perovskite Solar Cells by Single-Source Thermal Evaporation. J. Alloys Compd. 2020, 818, 152903.
- [3] Tong, G.; Chen, T.; Li, H.; Song, W.; Chang, Y.; Liu, J.; Yu, L.; Xu, J.; Qi, Y.; Jiang, Y. High Efficient Hole Extraction and Stable All- Bromide Inorganic Perovskite Solar Cells via Derivative-Phase Gradient Bandgap Architecture. Sol. RRL 2019, 3, 1900030.
- [4] M.M. Shehata, T.N. Truong, R. Basnet, H.T. Nguyen, D.H. Macdonald, L.E. Black, Impedance spectroscopy characterization of c-Si solar cells with SiOx/ Poly-Si rear passivating contacts, Sol.

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ЛОКАЛИЗАЦИИ СВЕТА В НИТЕВИДНЫХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

Ван М., Саушкин Н.Ю., Осминкина Л.А., Гончар К.А.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: <u>1193088359@gg.com</u>

Исследование свойств нанокомпозитных сред представляет собой важную задачу, встающую перед современной физикой твердого тела. Свойства таких сред могут значительно отличаться от свойств как объемных материалов, так и отдельных наночастиц, формирующих композит. Таким образом, нанокомпозитные среды являются той базой, на которой создаются новые материалы с заданными структурными, электронными и оптическими свойствами, которые определяются размером, формой и упорядоченностью составляющих их наночастиц, а также факторами заполнения наночастицами.

Большой интерес сегодня вызывают кремниевые нанонити (КНН) диаметром около 100 нм. Такие нанонити используются при изготовлении транзисторов, сенсоров, солнечных батарей и наноконтейнеров для таргетированной доставки лекарств [1]. Данные нити получаются методом металл-стимулированного химического травления (МСХТ). В методе МСХТ для получения КНН чаще всего используются серебряные наночастицы. В данной же работе предложен метод получения КНН методом МСХТ с использованием золотых наночастиц и изучены структурные и оптические свойства получившихся КНН.

КНН были получены методом MCXT на пластинах с-Si кристаллографической ориентацией (100), р-типа проводимости с удельным сопротивлением 1-5 мОм·см и 0,8-1,2 Ом·см. На первом этапе MCXT пластина с-Si помещалась в раствор 0.02 M AuCl₃ : 5 M HF (1:1) на 15 с для осаждения на нее золотых наночастиц. На втором этапе пластина с-Si с осажденными наночастицами золота погружалась в травящий раствор 30% H_2O_2 : 5 M HF в соотношении 1 : 10 по объему на различное время от 1 минуты до 1 часа. От времени травления зависела толщина слоя КНН. Удаление частиц золота с границы раздела КНН/с-Si, а также с поверхности полученных КНН происходило путем погружения пластины в раствор HNO₃/HCl (царская водка) на 5 мин. После окончания процесса травления пластина с-Si с КНН промывалась дистиллированной водой и высушивалась. Структурные свойства КНН измерялись с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Carl Zeiss SUPRA 40 FE-SEM. Спектры отражения в диапазоне 2000-6500 см⁻¹ были исследованы с помощью ИК фурье-спектрометра фирмы Bruker IFS 66v/S. Спектры межзонной фотолюминесценции (ФЛ) и комбинационного рассеяния света (КРС) измерялись при возбуждении непрерывным излучением лазера Nd:YAG с длиной волны 1.064 мкм в геометрии обратного рассеяния при помощи того же инфракрасного Фурье-спектрометра фирмы Bruker IFS 66v/S, оборудованного приставкой комбинационного рассеяния FRA-106.

В результате были изучены структурные свойства полученных КНН с помощью СЭМ и показано, что КНН представляют собой нитевидные структуры, длина которых в зависимости от времени травления варьируется от 60 нм до 20 мкм. Диаметр нанонитей варьируется от 50 до 200 нм, расстояние между нанонитями 100-200 нм. Показано, что КНН, полученные на сильнолегированных подложках пористые, а на слаболегированных – непористые.

Были исследованы спектры ИК-отражения полученных образцов. С помощью модели эффективной среды по формуле Бруггемана посчитаны пористости массивов КНН. Пористость образцов составляла 50-85%.

Также был обнаружен рост усиления межзонной ФЛ и КРС для КНН по сравнению с с-Si, что объясняется эффектом локализации света в массивах КНН. Данный эффект ослабевает при толщинах слоя КНН больше 10 µм, что объясняется растравливанием нанонитей и их слипанием.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10062, <u>https://rscf.ru/project/22-72-10062/</u>.

Литература

 A.S. Kalyuzhnaya, A.I. Efimova, L.A. Golovan, K.A. Gonchar, V.Y. Timoshenko. Formation and optical properties of silicon nanowire arrays // Silicon nanomaterials sourcebook: Volume II: Hybrid Materials, Arrays, Networks, and Devices, CRC Press-Taylor & Francis Group, pp. 3-41 (2017).

ПЕРКОЛЯЦИОННЫЕ АНСАМБЛИ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА И ИХ МЕМРИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА

Василевская Ю.О.¹, Савицкий А.И.², Сибатов Р.Т.²

1 НИУ «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Россия 2 НПК «Технологический центр», Зеленоград, Россия E-mail: <u>fedorovauo@mail.ru</u>

Для выполнения алгоритмов нейронных сетей с энергоэффективностью и взаимосвязью, сравнимой с мозгом, необходимо эмулировать синаптическую функциональность. Существуют попытки разработать внутренне подобные мозгу архитектуры, которые могли бы поддерживать нейроморфные вычисления более естественным образом, чем стандартные (высокоорганизованные) архитектуры микросхем. Самоорганизующиеся сети наночастиц и нанопроволок недавно стали перспективными системами для нейроморфных вычислений [1, 2].

Сложные перколяционные сети наночастиц представляют естественную твердотельную систему с нейроморфным поведением [3]. Ниже порога перколяции сети состоят из групп частиц, разделенных туннельными промежутками; приложенное напряжение вызывает образование филаментов атомарного масштаба в промежутках, и лавина происходящих событий переключения подобна потенциации в биологических нейронных системах. Ниже представлены полученные перколяционные мемристивные сетки на основе наночастиц серебра (Ag) для резервуарных вычислений. Полученные системы обладают топологическими характеристиками биологических нейронных сетей, демонстрируют безмасштабную и самоподобную временную динамику, долговременные корреляции, синаптическую пластичность.



Рис. 1 Схематичное изображение топологии образца с прямоугольными электродами (а) и вид образца с нанесенными наночастицами Ag

Для электрофизических исследований была подготовлена планарная структура, представляющая собой термически окисленную кремниевую подложку с толщиной $SiO_2 \sim 100$ нм, со сформированными на ней двумя Au электродами. Электроды имеют прямоугольную форму (рисунок 1 а), длина электродов составляет 800 мкм, ширина 100 мкм. Зазор между электродами составляет ~ 2 мкм. В зазоре между электродами формировался массив Ag наночастиц методом двухстадийного вакуум-термического испарения с последующей термообработкой после каждой стадии испарения. Данный метод формирования наночастиц подробно описан в [4]. Кратко, осаждение металла на поверхность образца осуществлялось через металлическую маску с отверстием в области межэлектродного зазора, частично захватывающим электроды. РЭМ-изображения полученных массивов представлены на рисунках 2 и 3.



Рис. 2 РЭМ-изображение пространства между прямоугольными электродами структуры с массивом наночастиц серебра



Рис. 3 РЭМ-изображение массива наночастиц серебра, снятого под углом 52°

При подаче постоянного напряжения 15 В между электродами наблюдается рост кондактанса *G* системы, описываемый степенной зависимостью от времени. Степенная кинетика характерна для поведения неупорядоченной системы вблизи порога перколяции. Вследствие образования и разрушения филаментов между наночастицами этот порог является динамическим для протекания тока. Также исследованы циклические вольтамперограммы (отклики систем на пилообразный сигнал напряжения) (рисунок 4). Наблюдались мемристивные и емкостные состояния ансамблей наночастиц и переключения между ними при различных напряжениях. Результаты измерений обсужда-

ются в рамках фрактальной модели перколяционного кластера. Исследуемые системы оцениваются с точки зрения их применения для резервуарных вычислений.



Рис. 4 Циклические вольтамперограммы (отклики тока на пилообразный сигнал напряжения с амплитудой 12, 14 и 15 В)

Работа выполнена в рамках выполнения проекта Министерства науки и высшего образования РФ FNRM-2022-0008.

Литература

- 1. Milano G., et al. In materia reservoir computing with a fully memristive architecture based on self-organizing nanowire networks // Nat. Mater. 2022. V. 21 (2). P. 195–202.
- Kuncic Z., Nakayama T. Neuromorphic nanowire networks: principles, progress and future prospects for neuro-inspired information processing // ADV PHYS-X. 2021. V. 6 (1). P. 1894234.
- Fostner S., Brown S. A. Neuromorphic behavior in percolating nanoparticle films // Phys. Rev. E. 2015. V. 92 (5). P. 052134.
- 4. Gromov, D.G. Nucleation and growth of Ag nanoparticles on amorphous carbon surface from vapor phase formed by vacuum evaporation // Appl. Phys. A. 2015. V. 118. P. 1297–1303.

ОРГАНИЧЕСКИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ НОВЫХ НЕФУЛЛЕРЕНОВЫХ АКЦЕПТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Габдуллин Р.Р.,^{1,2} Маннанов А.Л.²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет фундаментальной физикохимической инженерии, Москва, Россия ²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова PAH, Москва, Россия E-mail: pt.os.ir@gmail.com

Органические фотоэлементы (ОФЭ) – многослойные системы малой толщины (толщина активного слоя порядка 50-100 нм) привлекают большое внимание в последнее десятилетие благодаря потенциальной полупрозрачности, гибкости, легкости, дешевизне и простоте производства.

Фотоэффект возникает в органических полупроводниках при поглощении фотонов, что, в свою очередь, ведет к первичному образованию экситонов – квазичастиц, представленных удерживаемой электростатическими взаимодействиями парой электрона и дырки, с их последующей диссоциацией на свободные носители заряда. Необходимую разницу потенциалов для разделения экситонов можно достичь за счет формирования гетероперехода между двумя разными материалами в фотоактивном слое, полупровод-

Катод
ЭТС
Полупроводники р- и п-типов
дтс
Анод
Субстрат

ником р-типа (донорный материал – ДМ) и полупроводником п-типа (акцепторный материал – АМ).

Рис. 1. Архитектура двух- или более компонентных ОФЭ с объемным гетеропереходом, ДТС – дырочно-транспортный слой, ЭТС – электронно-транспортный слой.

Таким образом, в активном слое экситоны диффундируют к границе фаз ДМ и АМ, где они могут образовывать промежуточные состояния с переносом заряда, которые затем уже могут диссоциировать на свободные носители заряда, которые транспортируются раздельно через донорную (в случае дырок) и акцепторную (в случае электронов) фазы активного слоя к соответствующем электродам, где они и собираются.

Цель нашей работы состояла в подготовке и модернизации оборудования для тестирования ОФЭ, в изготовлении и оптимизации прототипов ОФЭ на основе донорных [1] и акцепторных материалов [2], разрабатываемых в ИСПМ РАН. В работе будут пред-

ставлены результаты модернизации солнечного симулятора для измерения вольтамперных характеристик (BAX), оптимизация архитектуры органического фотоэлемента, морфологии и массовых соотношений фотоактивного слоя, материалов активного слоя, а так же BAX изготовленных фотоэлементов.

Автор выражает благодарность научному руководителю Лупоносову Ю.Н. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-73-10198).

Литература

- D.O. Balakirev, Yu. N. Luponosov*, A.L. Mannanov, P. S. Savchenko, Yury Minenkov, D. Yu. Paraschuk, S. A. Ponomarenko, "Star-shaped benzotriindole-based donor-acceptor molecules: synthesis, properties and application in bulk heterojunction and single-material organic solar cells", Dyes and Pigments, 2020, 181, 108523 https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108523
- 2. J. Wan, I. Dyadishchev, R. Sun, Q. Wu, J. Guo, Y. Wu, S. Peregudova, S. Ponomarenko, Yu. Luponosov, J. Min, "High-Performance Ternary Solar Cells by Introducing One Medium Bandgap Acceptor with Complementary Absorption, Reducing Energy Disorder and Enhancing Glass Transition Temperature", Journal of Materials Chemistry A 2022, 10, 17122-17131 https://doi.org/10.1039/D2TA04463C

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА С ПЛАНАРНОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ GE/SI

Диб Х., Хомякова К.И.

Национальный исследовательский томский ГУ, Томск, Россия E-mail: deeb.hazem.syr@gmail.com

Однофотонные фотоприемники, которые имеют возможность обнаружения одиночных фотонов, являются ключевыми устройствами для создания квантовых информационных технологий. Кроме того, высокопроизводительные фотоприемники также находят многочисленные применения в других областях исследований, таких как обнаружение света и определение дальности (ЛИДАР), флуоресцентная медицинская визуализация, регистрация слабого излучения в спектроскопии, в космических и т.д. В настоящее время доступно несколько однофотонных фотоприемников, включая фотоумножители, сверхпроводящие нанопроволки и полупроводниковые лавинные фотодиоды (ЛФД) [1].

Лавинные фотодиоды Ge/Si широко используются для обнаружения света в инфракрасном диапазоне благодаря следующим преимуществам: полоса поглощения в германии находится в диапазоне 800–1550 нм, кремний демонстрирует явления электронного умножения и его легко интегрировать с КМОП-технологией, германий недорогой и т. д [1-2].

В данной работе был проведен литературный обзор по структурам ЛФД для детекторов одиночных фотонов. Из всех рассмотренных структур с помощью программы TCAD для сравнения были смоделированы меза и планарная структура ЛФД) [3]. В этих структурах наблюдается отличие в распределение электрического поля рисунок 1, которое влияет на шумовые параметры и эффективность обнаружения одиночных фотонов. Для дальнейшего исследования характеристик и параметров фотоприемника, была спроектирована и смоделирована планарная структура ЛФД Ge/Si.



Рис. 1. Распределение электрического поля в меза и планарной структурах

В результате работы было проведено проектирование и моделирование планарной конструкции лавинного фотодиода Ge/Si. Выявлена концентрация легирования зарядового слой удовлетворяющая всем критериям проектирования с точки зрения электрического поля для данной структура. Получены графики ВАХ для температур в диапазоне 300К до 150К. Представленные результаты моделирования конструкции ЛФД послужат для создания экспериментальных структур, выращенных методом молекулярнолучевой эпитаксии и исследования их практических параметров.

Работа выполнена при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) (проект №2.0.6.22 ЛМУ).

- 1. Bulle, G. S., Collins R. J. Single-photon generation and detection // Measurement science and technology. 2010. V. 12, No 012002, P. 1-28.
- Cova S., Ghioni M., Lotito A., I. Rech, Zappa F. Evolution and prospects for single-photon avalanche diodes and quenching circuits // Journal of Modern Optics. 2004. V. 51, No 9-10, P. 1267–1288.
- Vines P., Kuzmenko K., Kirdoda J., Dumas D. C. S., Mirza M. M., Millar R. W., Paul D. J., and Buller G. S. High performance planar Ge-on-Si single-photon avalanche diode detectors // Nature Communications. 2019. V. 10, No 1086, P. 1–9.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ MNSE-CUINSE₂ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ВЛАЖНОСТИ И ОСВЕЩЕНИЯ

Диденко Е.А. и др.

Государственный Университет «Дубна», ФЕИН, Дубна, Россия <u>dea.21@uni-dubna.ru</u>

Соавторы:

2) Дорошкевич А.С., к. ф. –м. н., с. м. с., начальник группы^{2,3}, <u>doroh@jinr.ru</u>

3) Самедова У.Ф., к. ф. –м. н., с.^{2,9}, <u>ulsamadova@beu.edu.az</u>

4) Кириллов А.К., д. ф. – м. н., ведущий н. с.², <u>kirillov1953@inbox.ru</u>

5) Василенко Т.А., д. ф. –м. н., проф., вед. н. с.⁴

6) Оксенгендлер В.А., д. ф. – м. н., проф., главный н. с.⁵, <u>oksengendlerbl@yandex.ru</u>

7) Никифорова Н.Н., к. ф. –м. н., с. м. с.⁵

8) Балашою М., к. ф. – м. н., ведущий н. с.^{2,4}, masha.balasoiu@gmail.com

9) Мардаре Д., *PhD*, *Prof*⁸

10) Мита К., PhD, Lecture, dr.⁸, caty11mita@gmail.com

11) Станкулеску А., PhD, Prof^{\hat{f}}

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, e-mail: <u>doroh@jinr.ru</u>;

³Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin, Kiev, Ukraine, e-mail: doroh@jimnr.ru;

⁴Saint-Petersburg Mining University, St.-Petersburg, Russia e-mail: <u>kirillov1953@inbox.ru</u>

⁵Ion-plasma and laser technologies Institute after U.Arifov, Uzbekistan, Tashkent, e-mail: <u>oksengendlerbl@yandex.ru</u>;

⁶Horia Hulubei National Institute for R&D in Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH), Bucharest Romania, e-mail: masha.balasoiu@gmail.com;

⁷Alexandru Ioan Cuza" University of Iasi, Faculty of Physics, Bld. Carol I, No. 11, Iasi 700506, Romania; e-mail: caty11mita@gmail.com;

⁸National Institute for Materials Physics (NIMP) StradaAtomiștilor 405, Măgurele 077125, Romania; e-mail: <u>sanca@infim.ro</u>;

⁹Institute of Physics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, pr. Dzhavida 33, Baku, AZ1143 Republic of Azerbaijan; email: ulsamadova@beu.edu.az;

В настоящее время актуальна проблема возобновляемых источников энергии в связи с истощением традиционных энергоресурсов [1, 2]. В этом аспекте проведена большая работа в области разработки преобразователей в электрический вид солнечной энергии [3, 4]. Разрабатываются новые устройства, в основе которых лежат новые физические принципы. В частности, получены обнадеживающие результаты в области адсорбционной электроэнергетики [5, 6]. Разработки устройств, способных преобразовать химическую энергию адсорбции молекул атмосферной влаги в электрический вид, в том числе путем электростатического захвата заряда микроскопических капель воды [7] с использованием электрострикции, вызванной адсорбцией воды [8].и др. [9, 10, 11].

В данном аспекте представляют интерес материалы системы MnSe-CuInSe₂, ввиду их высокой адсорбционной способности к влаге и способности к фотоэлектрическому преобразованию. На их основе имеются перспективы практической реализации гибридных источников энергии, позволяющих преобразовывать в электрический вид как энергию фотонов, так и энергию адсорбции молекул влаги.

Актуальным является исследование электрических свойств кристаллов MnSe-CuInSe₂, что было целью данной работы.

В качестве исследуемых объектов использовались кристаллы двух составов: 10mol%MnSe-90mol%CuInSe₂ (длина 9 мм, ширина 5 мм, высота 3 мм) и 5mol%MnSe-95mol%CuInSe₂ (длина 7 мм, ширина 3 мм, высота 2 мм), полученные с использованием химической технологии [12]. Вольтамперограммы (VAC) были получены в режиме ли-

нейной развертки (от -2000мВ до +2000мВ, стандартное значение -1800мВ, конечное значение 1800мВ, максимальный потенциал 2000мВ, минимальный потенциал - 2000мВ) на устройстве R-20 ("Elinns") в режиме насыщения влагой в четырех точках (85, 75, 35 и 26% \pm 5%). Камера для образцов представляла собой закрытый контейнер объемом 350 мл с контролируемой атмосферной влажностью с помощью солей KCl (85%) и NaCl (75%) [13].

Вольтамперограммы, полученные при различной атмосферной влажности 26%, 75%, 85% приведены, соответственно, на рис. 1, 2 и 3. Полученные при значениях влажности 26% и 75% ВАХ вне окрестности нуля имеют линейный вид, что свидетельствует о выполнении в исследуемых объектах закона Ома. Прямая и обратная ветвь располагаются, соответственно, в первом и третьем квадрантах. Наблюдается увеличение разницы между углами наклона кривых, свидетельствующее о снижении электросопротивления в образцах 5mol%MnSe-95mol%CuInSe₂, эффект наиболее выражен при влажности 85%. Полученная при влажности 85 % вольтамперограмма немонотонна в области значений напряжений свыше 1 вольта, что свидетельствует о резком изменении электропроводности системы. Резкий скачек в области напряжений свыше 1 вольта, вероятно, обусловлен насыщением канала ионной электропроводности, наоборот, в области свыше 1,5 вольт наблюдается падение, что может свидетельствовать об истощении канала ионной электропроводности [14].

Вольтамперограммы, полученные при различной атмосферной влажности и дополнительном факторе освещенности приведены на рис.4, 5 и 6. При 26% и 85% ВАХи имеют форму, близкую к линейной, что свидетельствует о выполнении в исследуемых объектах закона Ома. Прямая и обратная ветвь располагаются соответственно в первом и третьем квадрантах. Обе ветви практически симметричны относительно начала координат, наблюдаемые изменения угла наклона, свидетельствуют о снижении электросопротивления в образцах 5mol%MnSe-95mol%CuInSe₂. Поведение кривых при влажности 75%, вероятно, обусловлено включением «фотоэлектронного» канала электропроводимости, т.е. генерации дополнительных свободных носителей заряда, предположительно электронного типа.



 Рис.
 1.
 Семейство
 ВАХ
 образцов

 10mol%MnSe-90mol%CuInSe2
 и
 5mol%MnSe 95mol%CuInSe2
 и

 5mol%MnSe 95mol%CuInSe2
 при
 влажности 26%
 10
 10





На основании анализа, установлено, что электропроводность в образце состава 5mol%MnSe-95mol%CuInSe₂ увеличивается и значительно превышает электропроводность образца 10mol%MnSe-90mol%CuInSe₂, как при увеличении влажности, так и при наличии дополнительного фактора освещенности.

Acknowledgments. The study was performed in the framework of the JINR-Romania cooperation program in 2022 (topic 03-4-1128-2017/2022).

Список литературы

- [1] Любарская М. А. Обзор тенденций инновационного развития технологий возобновляемой энергетики //Российский экономический интернет-журнал. – 2019. – №. 3. – С. 54-54.
- [2] Чернышев А. С., Мордивинов С. Е. Обзор возобновляемых источников энергии //Юность и знания-гарантия успеха-2019. – С. 146-149.
- [3] Стребков Д. С. И др. Солнечная энергетика: состояние и перспективы развития //Техника и оборудование для села. – 2019. – №. 3. – С. 43-47.
- [4] Тычков А. Ю. И др. Альтернативная энергетика на объектах военного назначения: литературный обзор //Вестник Пензенского государственного университета. – 2020. – №. 4 (32). – С. 101-106.
- [5] S. Doroshkevich, A. I. Lyubchyk, A. V. Shilo, T. Yu. Zelenyak, V. A. Glazunovae, V. V. Burhovetskiy, A. V. Saprykina, Kh. T. Holmurodov, I. K. Nosolev, V. S. Doroshkevich, G. K.

Volkova, T. E. Konstantinova, V. I. Bodnarchuk, P. P. Gladyshev, V. A. Turchenko, S. A. Sinyakina Chemical-Electric Energy Conversion Effect in Zirconia Nanopowder Systems. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2017, Vol. 11, No. 3, pp. 523–529. DOI: 10.1134/S1027451017030053

- [6] S. Doroshkevich, A. I. Lyubchyk, A. V. Shilo, T. Yu. Zelenyak, V. A. Glazunovae, V. V. Burhovetskiy, A. V. Saprykina, Kh. T. Holmurodov, I. K. Nosolev, V. S. Doroshkevich, G. K. Volkova, T. E. Konstantinova, V. I. Bodnarchuk, P. P. Gladyshev, V. A. Turchenko, S. A. Sinyakina Chemical-Electric Energy Conversion Effect in Zirconia Nanopowder Systems. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2017, Vol. 11, No. 3, pp. 523–529. DOI: 10.1134/S1027451017030053
- [7] N.Miljkovic, D. Preston, R. Enright, and E. Wang. Jumping-droplet electrostatic energy harvesting // APPLIED PHYSICS LETTERS. 2014. V. 105, P.013111.
- [8] Georgen B., Nienhaus H., Weinberg W. H., Mc Farland E. Chemically induced electronic excitations at metal surfaces // Science. 2001. V.294. P. 2521–2523.
- [9] Leandra P. Santos, Telma R. D. Ducati, Lia B. S. Balestrin, and Fernando Galembeck* Water with Excess Electric Charge // J. Phys. Chem. C 2011, 115, 11226 –11232. Dx. Doi.org/10.1021/jp202652q.
- [10] Rubia F. Gouveia and Fernando Galembeck Electrostatic Charging of Hydrophilic Particles Due to Water Adsorption // J. AM. CHEM. SOC. 2009, 131, 11381–11386 9 11381.
- [11] Rubia F. Gouveia, Carlos A. R. Costa, and Fernando Galembeck* Water Vapor Adsorption Effect on Silica Surface Electrostatic Patterning // J. Phys. Chem. C 2008, 112, 17193–17199.
- [12] Sh. M. Gasanlya, A. A. Abdurragimovb, and U. F. Samedovaa The Electric and Thermoelectric Properties of cuinse2based Chalcopyrite // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2012, Vol. 48, No. 5, pp. 439–443, 1068-3755, DOI 10.3103/S106837551205004.
- [13] Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами / А.Г.Терещенко Томск, 2010. 22 с.
- [14] E.A. Gridina The effect of percolation electrical properties in Hydrated nanocomposite systems based on polymer Sodium alginate with a filler in the form nano-particles ZrO₂-3mol% Y₂O₃ // Advanced Physical Research Vol.1, No.2, 2019, pp.70-80.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ НАНОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР GAN И ALGAN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-АКТИВИРОВАННОЙ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУФЕРНОГО СЛОЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Золотухин Д.С.¹, Середин П.В.¹, Леньшин А.С.¹, Мизеров А.М.²

 ¹ Воронежский ГУ, физический факультет Воронеж, Россия
 ² С-Пб национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия E-mail: seredin@phys.vsu.ru

В настоящее время большой интерес вызывают гетероструктуры на основе (Al,In,Ga)N системы материалов, которая используется как для изготовления радиационно-стойких, высокотемпературных транзисторов с высокой подвижностью (HEMT), так и для оптоэлектронных приборов ультрафиолетового диапазона. Объединение AIIIN материалов с кремниевой схемой обработки сигнала открывает широкое поле для появления новых функциональных устройств, которые объединили бы в себе высокие оптоэлектронные свойства AIIIN и развитые, более экономичные технологии на основе подложек Si.

Однако, формирование гетеростуктур III-N/Si все еще значительно затруднено в силу различий в свойствах материалов: разница в коэффициентах температурного расширения (КТР) и параметрах решетки приводит к генерации высокой плотности про-

растающих дислокаций и прочих дефектов и ухудшает приборные характеристики конечных устройств.

Один из перспективных технологических приемов, дающих возможность получить у сформированных гибридных гетероструктур высокие функциональные свойства, может быть основан на использовании податливой структурированной кремниевой подложки, состоящей из пористого кремния и слоя карбида кремния. Поэтому темой нашей работы стало структурно-спектроскопическое исследование эпитаксиальных слоев III–N, выращенных на гибридной подложке, содержавшей слои карбида кремния и пористого кремния. Слои пористого кремния (~100 нм) были получены электрохимическим травлением пластин монокристаллического кремния КДБ и ориентацией (111) в растворе плавиковой кислоты, аналогично описанному в работах[1,2]. Эпитаксиальные слои GaN и AlGaN на подложках двух типов выращивались в едином ростовом процессе методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (ПА МПЭ) на установке Veeco Gen 200. Морфология поверхности изучалась с помощью атомно-силовой (ACM) и сканирующей электронной (СЭМ) микроскопии.

Проведены структурно-спектроскопические исследования эпитаксиальных слоев AlGaN и GaN, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на гибридных подложках SiC/por-Si, содержавших слои карбида кремния и пористого кремния. С использованием методов рентгеновской дифрактометрии, рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии показано, что сформированные на гибридной подложке тонкие пленки имеют минимальные остаточные напряжения и интенсивную фотолюминесценцию.

Полученные экспериментальные результаты открывают перспективы в изготовлении прототипов новой элементной базы нано- и оптоэлектроники, на основе разработанных GaN/Si гетероструктур на гибридных нанопористых por-SiC/por-Si буферных слоях. Использование нано-пористого слоя Si и SiC позволяет подавить генерацию прорастающих дислокаций, являющихся дефектами кристаллической структуры, растягивающих напряжений и избежать растрескивания приборных слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 19-72-10007.

Литература

P.V. Seredin, A.S. Lenshin, et al. //Mat. Sci. in Sem. Proc., 2015. V.**39**, P.551. P.V. Seredin, D.L. Goloshchapov, A.S. Lenshin et al. // Physica E, 2018. V.**104**, P.101.

РЕНТГЕНТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ЛАНГАСИТА

Ибрагимов Э.С. ^{1,2,3}, Пиляк Ф.С. ^{2,3}, Куликов А.Г. ^{2,3}, Марченков Н.В. ^{2,3}, Писаревский Ю.В. ^{2,3}, Ковальчук М.В. ^{2,3}

¹ МГУ им.М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия 2 ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия 3 НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия E-mail: ibragimov.es18@physics.msu.ru

В начале 1980-х годов группой ученых Московского государственного университета и Института кристаллографии РАН были получены и исследованы первые отечественные монокристаллы лангасита (лантан галлиевого силиката – La₃Ga₅SiO₁₄) [1, 2]. Планировалось их использование в качестве активного элемента твердотельных лазеров с изменяемой частотой излучения, однако благодаря ярко выраженным пьезоэлектрическим свойствам они получили большое распространение при изготовлении специальных резонаторов и фильтров. Кристалл имеет ряд значимых преимуществ – высокий коэффициент электромеханической связи (в 3-4 раза выше по сравнению с кварцем), широкая полоса пропускания и высокая температурная стабильность в отличии от кристаллов танталата и ниобата лития.

В рамках данной работы были проведены рентгенотопографические исследования резонаторов под внешним воздействием переменного электрического поля на различных колебательных модах. Рентгеновская топография получила большое распространение в практике физического материаловедения, поскольку позволяет получать общее представление о деформационной структуре кристалла. При этом данный метод оказывается полезным при производстве и разработке фильтров и резонаторов, позволяя локализовать область резонанса, установить взаимосвязь между геометрией разработки и профилем электромеханического возмущения. В данной работе впервые получены топограммы резонаторов на основе кристаллов лангаситов. Топограммы была получена в интегрирующем режиме, при котором регистрируется картина дифракции в режиме накопления интегральной интенсивности с одновременным ω - сканированием вблизи брэгговского максимума в процессе съемки.



Рис. 1. Рентгеновские топограммы резонаторов на основе кристаллов лангасита под воздействием внешнего поля с частотой (а) 0 Гц, (б) 11,976857 МГц, (в) 35,933864 МГц.

Литература

- Mill B.V., Pisarevsky Yu.V. Langasite-type materials: from discovery to present state // Proc. 2000 IEEE Inter. Frequency Control Symp. - 2000. -P. 133-144.
- 2. И. А. Андреев, М. Ф. Дубовик, Новый пьезоэлектрик « лангасит» La₃Ga₅SiO₁₄ материал с нулевым температурным коэффициентом частоты упругих колебаний // Письма в ЖТФ – 1984. – Т. 10, № 8. – С. 487–491.

ПАССИВАЦИЯ ГЕТЕРОГРАНИЦ ПЕРОВСКИТНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫМИ ОРГАНИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Ильичева Е.А.

Университет науки и технологий МИСИС, Институт новых материалов и нанотехнологий, Москва, Россия <u>kate_ilich@mail.ru</u>

Неорганический оксид никеля (NiOx) – один из наиболее распространенных дырочно-транспортных слоев (ДТС) для перовскитных фотопреобразователей p-i-n архитектуры. NiOx обладает большой шириной запрещенной зоны (> 3,6 эВ) [1], высокой подвижностью дырок (> 101 см²B⁻¹c⁻¹) [1] и лучшей термостабильностью в сравнении с органическими ДТС [2]. Тем не менее, электрохимическое взаимодействие между перовскитом и слоем оксида никеля ведет к накоплению ионных дефектов и захвату заряда на гетерогранице перовскит/NiOx, что может привести к необратимой деградации приборных характеристик структуры.

С целью пассивации гетерограницы оксид никеля/перовскит был использован самоорганизующийся монослой SPK047, молекула которого представлена на рисунке 1. Для данного материала B3MO = -5,5 эB, а HCMO = -2,71 эB, что позволяет использовать его со стороны ДТС в p-i-n ПСЭ.



Рис. 1 – Молекула SPK047

Рис. 2 – Изменение нормализованного КПД во времени

Устройства с SPK047, нанесенным методом центрифугирования, демонстрируют увеличение напряжения холостого хода (Uxx) и КПД без снижения стабильности по сравнению с эталонными структурами. КПД, в среднем, вырос с 15,42% до 17,48% (более, чем на 13%), а Uxx – с 0,90 В до 1,06 В (почти на 8%). При этом обе конфигурации устройств демонстрируют сохранение более 100% начальной производительности в течение 1000 часов (рисунок 2).

Устройства с монослоем SPK047, нанесенным методом slot-die, также демонстрируют увеличение КПД и Uxx по сравнению с эталонными структурами. В таблице 1 представлено сравнение приборных характеристик ПСЭ p-i-n архитектуры без использования монослоя SPK047 и с монослоем, нанесенным 2 методами.

Конфигурация	Uxx, B	Ікз, мА/см ²	FF, %	КПД, %
Без SPK047	1,028	22,83	76,08	17,85
SPK047 (центрифуга)	1,100	23,70	74,81	19,50
SPK047 (slot-die)	1,075	23,35	75,60	18,98

Таблица 1 – Приборные характеристики полученных устройств

Полученные результаты показали, что использование низкомолекулярных органических монослоев может повысить приборные характеристики ПСЭ без снижения фотостабильности, а возможность нанесения методом slot-die позволяет использовать их не только в лабораторных образцах, но и в промышленном производстве.

- 1. Xingtian Y., Yuxiao G., Haixia X., Wenxiu Q. Nickel Oxide as Efficient Hole Transport Materials for Perovskite Solar Cells // Advanced Science News. 2019, 3, 1900001.
- 2. Boyd C.C., Cheacharoen R, Leijtensand T. Understanding Degradation Mechanism and Improving Stability of Perovskite Photovoltaics // Chem. Rev. 2019, 119, 5, 3418–3451.

ИЗУЧЕНИЕ МАССИВОВ КРОССБАР-МЕМРИСТОРОВ (СО₄₀FE₄₀B₂₀)_X(LINBO₃)_{100-X} И ПОСТРОЕНИЕ ФОРМАЛЬНОЙ НЕЙРОМОРФНОЙ СЕТИ НА ИХ ОСНОВЕ

Ильясов А.И.^{1,2*}, Никируй К.Э.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, 123098 ²МГУим. М.В. Ломоносова, г. Москва, *E-mail: sashailyasov99@gmail.com

В настоящее время вычислительные системы, построенные по классической архитектуре фон Неймана, сталкиваются с рядом трудностей, связанных со свойственными ей неотъемлемыми недостатками и ограничениями. В первую очередь это повышенное энергопотребление и ограничение скорости работы из-за необходимости постоянного проведения операций чтения из памяти/записи в память данных и результатов вычислений [1]. Одним из многообещающих путей решения этой проблемы является реализация нейронных сетей на базе мемристоров. Мемристоры – устройства, способные действием приложенного изменять свою проводимость под напряжения, превышающего некоторый порог, а также сохранять резистивное состояние после прекращения внешнего воздействия. Это свойство мемристоров делает их прекрасными кандидатами для использования в качестве синапсов в формальных и импульсных нейроморфных сетях. Эффективные алгоритмы обучения первых изучены значительно лучше [2], чем вторых, а применение мемристоров позволяет избежать выполнения самой энергозатратной операции — чтения/записи весов связей в память.

Большой интерес представляют мемристоры на основе нанослоёв LiNbO₃ (LNO) и композита (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(LiNbO₃)_{100-x} (HK), поскольку уже были продемонстрированы устройства такого типа, имеющие до 256 различных резистивных состояний, время удержание состояний до 10^5 с и сохранение этих свойств после 10^6 циклов РП [3]. Механизм переключения в устройствах на основе НК заключается в формировании и разрушении проводящих мостиков (филаментов) в изолирующей диэлектрической матрице LNO. Добавление наногранул металла, формирующих при определённых условиях перколяционные цепочки, на базе которых растут филаменты, уменьшает стохастичность этого процесса, а, следовательно, и разброс характеристик мемристоров от цикла к циклу и от устройства к устройству, а также увеличивает их надёжность.

Настоящая работа посвящена изучению свойств массива мемристоров HK/LNO, выполненных в кроссбар-геометрии построению простой ФНС их основе. Была продемонстрирована повторяемость резистивных переключений мемристоров как от циклак-циклу, так и от устройства-к-устройству, устойчивость отдельного мемристора массива к 10^5 циклических переключений, время удержания резистивных состояний оп и оff не менее 10^4 с и наличие не менее 16 различных промежуточных состояний. Отдельно была изучена кинетика переключения мемристора импульсами различных амплитуд. Путем экстраполяции результатов эксперимента, определено минимальное время резистивного переключения, равное 1 пс (см. рис. 1). Созданная ФНС обучалась ех-situ распознаванию образов «1010» и «0101». На рис. 2 представлены токи выходных нейронов такой сети при подаче каждого из образов. Показана возможность распознавания как идеальных, так и зашумленных образов, в которых один из битов инвертирован.

Таким образом, в данной работе были изучены свойства массива HK/LNO кроссбар-мемристоров, в том числе кинетика их резистивного переключения. Построена простая ФНС на их основе мемристоров, продемонстрирована классификация простых образов такой сетью после предварительного её обучения ex-situ, а также показана возможность классификации зашумленных образов. Полученные результаты могут быть использованы при реализации более сложных аппаратных ФНС на основе мемристоров. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10253) на оборудовании Ресурсного центра электрофизических методов (НИЦ "Курчатовский институт").



Рис. 2 Результат работы обученной сети – токи двух выходных нейронов при подаче образов «1010» и «0101»

Литература

- 1. Jouppi N.P., Young C., Patil N. et al. // Proc. Int. Symp. Comput. Archit. 2017. P. 1. https://doi.org/10.1145/3079856.3080246
- 2. Xia Q., Yang J.J. Nat. Mater. 2019. V. 18. № 4. P. 309. http://dx.doi.org/10.1038/s41563-019-0291-x
- 3. В.В. Рыльков, А.В. Емельянов, С.Н. Николаев, и др., ЖЭТФ, 158, Вып. 1, стр. 164-183 (2020). DOI: 10.31857/S0044451020070159

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НА ПОВЕРХНОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУРНОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Кочергин А.В.^{1,2}, Теруков Е.И.^{1,2,3}

¹ С-Пб ГЭУ "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия ² НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике, Санкт-Петербург, Россия ³ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия *E-mail: tem47@mail.ru*

Для подзарядки мобильных устройств, зарядное оборудование должно иметь следующие электрические параметры: рабочее напряжение Umpp = 5-12 B, и силу тока Impp = 1-2 A. Стандартный фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) размером 156,75х156,75 мм, изготовленный по гетероструктурной технологии (HJT) имеет электрические характеристики Umpp = 0,76 В и Impp = 8,87 A [1]. Данные электрические параметры ФЭП не подходят для портативного зарядного устройства. Для достижения требуемых электрических параметров, необходимо увеличить Umpp, что достигает путем последовательного соединения нескольких ФЭП. Значение Impp напрямую зависит от площади активной поверхности, на которой происходит преобразование солнечной энергии в электрическую. Для работы портативного зарядного устройства на основе ФЭП Impp = 8,87 A более чем достаточно. Однако, для оптимизации размеров устройства, Impp можно уменьшить до 2 - 3 A, за счет уменьшения активной площади ФЭП. Для выполнения данной задачи может быть применён метод лазерной резки материалов [2].

В данной работе исследовалось воздействие лазерной резки на поверхность НЈТ ФЭП.

Результаты изучения воздействия лазерной резки на поверхность НЈТ ФЭП показали, что при резке пластины насквозь образцы переставали работать в нормальной режиме, из-за образования закороток в местах реза. Вовремя исследование лазерного скрайбирования с фронтальной и тыльной сторон было обнаружено, что из-за тонкого слоя р на тыльной стороне отсутствует возможность создания достаточно глубокого реза для дальнейшей поломки пластины из-за образования закороток, смотреть рисунок 1. После скрайбирования на фронтальной стороне наблюдаются менее выраженные темные области на краях ФЭП, по сравнению со скрайбированием на тыльной стороне, однако сбой в рабочем режиме не наблюдается. Сравнение вольт-амперных характеристик целого ФЭП и после лазерной обработки показало, уменьшение фактора заполнения (FF) с 76 на 73 %, что связано с образование темных областей по краю пластины.



Рис. 1. Снимок фотолюминесценции фотоэлектрического преобразователя после лазерного скрайбирования с фронтальной и тыльной сторон.

В данной работе показано, что использование лазерной резки для структуры НЈТ Φ ЭП невозможно из-за закорачивания пластины в области n-p – перехода. Исследована возможность лазерного скрайбирвания Φ ЭП с тыльной и фронтальной стороны. Показано, что на тыльной стороне лазерное скрайбирование с последующим разделением платины невозможно без образования закороток. Скрайбирования на фронтальной стороне, что приводит к уменьшению полезной площади, однако сбой в рабочем режиме не наблюдаются.

- S. Saravanan, ChSR. Suresh, V. Subraveti, K. Kumar, U. Jayaram. Effects of texture additive in large-area diamond wire cut multicrystalline silicon solar cells // Photovoltaics International. 2019, Vol. 42, pp. 46-49
- E. Korzeniewska, M. Tomczyk, Ł. Pietrzak, M. Hadžiselimović, B. Stumberger, Klemen Sredenšek, S. Seme Efficiency of Laser-Shaped Photovoltaic Cells // Energies, 2020, vol.12. DOI: 10.3390/en13184747

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИЗМЕНЕНИЯ СВЕРХСТРУКТУРЫ 2XN ПРИ ЭПИТАКСИИ GE HA SI(100)

Кукенов О.И., Соколов А.С.

Национальный исследовательский Томский ГУ, Томск, Россия E-mail: okukenov@mail.ru

Исследование полупроводниковых наноструктур является неотъемлемой частью развития современной наноэлектроники. Поскольку сейчас ставятся высокие требования к качеству и параметрам структур, метод дифракции отражённых быстрых электронов (ДОБЭ) особенно востребован, т.к. является лучшим неразрушающим методом контроля поверхности в процессе роста. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии за счёт сверхвысокого вакуума позволяет получать чистые структуры с минимальным количеством дефектов.

При отражении потока высокоэнергетичных электронов от поверхности образца формируются дифракционные картины на флуоресцентном экране, по которым определяют морфологию выращиваемой наноструктуры [1].

Начальным этапом формирования квантовых точек является возникновение сверхструктуры 2xN на поверхности. За величиной димерного ряда сверсхструктуры 2xN можно следить с помощью картин ДОБЭ (Рис.1). Так, по относительному расстоянию между рефлексами 01, 1/N и 00 судят о числе N [2].



Рис. 1. Картина дифракции и соответствующее ей распределение интенсивности рефлексов

В данной работе проведено экспериментальное исследование изменений величины N методом ДОБЭ при молекулярно-лучевой эпитаксии германия на кремнии (100) в температурном диапазоне 250–750 °C. Сделаны предположения по объяснению поведения этой кривой.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-10031.

- Dirko V. V., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., Voitsekhovskii A. V. Thickness-dependent elastic strain in Stranski–Krastanow growth // Phys. Chem. Chem. Phys. 2020. 22. P. 19318-19325.
- 2. Voigtlaender B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studies by scanning tunnelling microscopy during Surf. Sci. Rep. 2001. 43. 127.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ЯЧЕЙКАХ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ МОНОП

Кулиш А.М.

МФТИ, АО «НИИМЭ», Москва, Россия E-mail: kulish.am@phystech.edu

Интерес производителей микросхем энергонезависимой памяти с хранением электрического заряда на ловушечных центрах в Si₃N₄ в настоящее время растет, что связано с большим потенциалом к масштабированию ячеек памяти и большим временем хранения информации, по сравнению с ячейками памяти с «плавающим» затвором. Данные преимущества обусловлены наличием в нитриде кремния большой (порядка $10^{19}-10^{21}$ см⁻³) концентрацией дефектов кристаллической структуры, которые способны локализовать электрический заряд и хранить его на протяжении 10 лет [1]. Численное моделирование процессов, протекающих в ячейке памяти под различными внешними воздействиями, способствует успешному прогнозированию результатов масштабирования и выбора оптимальных режимов работы устройства.

В работе для исследования была выбрана ячейка МОНОП (Метал-Оксид-Нитрид-Оксид-Полупроводник), имеющая структуру конденсатора с легированной областью электронной проводимости, служащей источником электронов для образования проводящего канала [2].

При помощи средств численного моделирования (TCAD), в работе показано влияние параметров диэлектрических слоев (SiO₂, Si₃N₄) и свойств ловушечных центров в нитриде кремния на динамику изменения напряжения плоских зон МОНОПконденсатора с увеличением длительности импульса программирования на электроде затвора – $V_{FB}(t_{prog})$ (рисунок 1).



Puc. 1. Зависимость величины напряжения плоских зон от длительности программирующего напряжения и сравнение с аналогичными результатами работы [2]

- 1. Гриценко В. А. Электронная структура нитрида кремния //Успехи физических наук. 2012. Т. 182 (5). С. 531-541.
- Насыров К. А. и др. Инжекция электронов и дырок в структурах металл-оксид-нитридоксид-кремний //Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2006. Т. 129 (5). С. 926-937.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ФОТОВОЗБУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЗОНЕ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Кытина Е.В.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: kata13012002@mail.ru

В настоящее время наноструктурированные полупроводники находятся в центре внимания мирового научного сообщества благодаря присущим им необычным свойствам, одним из которых является внушительная удельная площадь поверхности, достигающая сотен квадратных метров на грамм вещества и открытая для воздействия молекул окружающей среды [1, 2]. Это обуславливает их применение в качестве фотоэлектродов, сенсоров, фотокатализаторов и т.п. [1, 2]. Для практических применений очень важно знать концентрацию фотовозбужденных электронов в зоне проводимости, поскольку они вовлечены как в процесс транспорта, так и участвуют в окислительновосстановительных реакциях на поверхности наноструктур. Поэтому целью данного исследования являлась разработка быстрого и эффективного метода определения указанной характеристики. Для достижения цели была использована спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), а в качестве объекта исследования были выбраны массивы нанотрубок диоксида титана (HT-TiO₂).

Установлено, что основным типом парамагнитных дефектов в HT-TiO₂ являются оборванные связи углерода и определена их концентрация. Присутствие углерода в НТ-TiO₂ обусловлено вхождением в состав электролита, используемого при синтезе образцов, полиэтиленгликоля. Для практических приложений важно использовать источники света видимого диапазона. Поскольку TiO₂ является широкозонным полупроводником, поглощение видимого света будет происходить за счет дефектов. Продемонстрировано, что при освещении HT-TiO₂ непосредственно в резонаторе спектрометра наблюдается увеличение концентрации оборванных связей углерода. Данный эффект был обратим, что можно объяснить перезарядкой дефектов. Действительно, наряду с парамагнитными дефектами есть непарамагнитные, содержащие два спаренных электрона. При фотовозбуждении фотонами с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны, вследствие примесного поглощения один из электронов забрасывается в зону проводимости, а оставшийся (неспаренный) электрон обуславливает переход дефекта в парамагнитное состояние и рост концентрации оборванных связей углерода. Таким образом, рассчитав концентрацию дефектов до освещения и при освещении и найдя их разность, мы получим приращение концентрации парамагнитных дефектов, равное по величине концентрации фотовозбужденных электронов в зоне проводимости HT-TiO₂. Разработанный метод был многократно протестирован на сериях образцов HT-TiO₂, полученных при различных температурах и атмосферах отжига. Предлагаемый метод может быть эффективно использован для экспресс-диагностики концентрации фотовозбужденных электронов в зоне проводимости наноструктурированных полуроводников.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00494, https://rscf.ru/project/21-19-00494/.

- 1. Fu J., et al. Product Selectivity of Photocatalytic CO2 Reduction Reactions // Mater. Today 2020. V. 32. P. 222–243.
- 2. Hua L., et al. Recent Advances in Synthesis and Applications of Carbon-Doped TiO₂ Nanomaterials // Catalysts 2020. V. 10 (12). P. 1431.

РАЗРАБОТКА СЕНСОРА ГАЗОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК

Михайлова Т.С., Новиков С.П., Мясоедова Т.Н.

Южный федеральный университет, институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Таганрог, Россия E-mail: tmihaylova@sfedu.ru

Проблема контроля воздушной среды никогда не теряет своей актуальности. Постоянно разрабатываются новые приборы для детектирования газов и паров с функциональными характеристиками, улучшенными за счет совершенствования методов обнаружения компонентов воздушной среды. При этом по-прежнему большое число разработок посвящено развитию простых в эксплуатации сенсоров резистивного типа [3, 5].

В данной работе был изготовлен резистивный сенсор на основе модифицированных медью кремний-углеродных пленок, отожженных при температуре 200 °C. Технология создания сенсора включает следующие основные этапы: 1) формирование структуры подложки в виде группы проводящих электродов Cr/Cu/Cr на поликоре; 2) формирование чувствительного слоя на основе кремний-углеродной пленки, модифицированной марганцем и медью путем трехэтапного электрохимического осаждения [2]; 3) отжиг при температуре 200 °C в течение 120 мин для стабилизации поверхностного сопротивления. Выбор температуры отжига был обусловлен тем, что согласно литературным данным отжиг на воздухе при температурах ниже 300 °C не приводит к существенным изменениям в фазовом и химическом составе кремний-углеродных нанокомпозитов [1]. Функциональные характеристики сенсоров исследовались по отношению к различным целевым газам и парам этанола. Коэффициент газовой чувствительности рассчитывался по формуле:

$$S = \frac{(|R-R_{\rm H}|)}{R_{\rm H}}$$

где R_H – это начальное поверхностное сопротивление сенсора; R – сопротивление сенсора при воздействии газа.

Было показано, что сенсоры проявляют газовую чувствительность к выбранным целевым газам при рабочей температуре 100 °С. При этом наблюдается селективная газочувствительность сенсоров по отношению к диоксиду азота в диапазоне концентраций 5-50 ppm (рис 1, а). Максимальное значение коэффициента газовой чувствительности сенсора составило около 0,21 отн. ед. по отношению к 50 ppm диоксида азота (рис. 1, б).



Рис. 1. (а) Динамика отклика-восстановления сенсора на диоксид азота; (б) Отклик сенсора по отношению к 50 ppm различных газов и паров этанола; Рабочая температура - 100 °C

Исследование стабильности отклика по отношению к целевому газу проводилось на протяжении шести месяцев (рис. 2). Было показано, что дрейф значений коэффициента

(1)

газовой чувствительности составляет около 7 %. Он может быть связан с медленной десорбцией молекул газов из пор чувствительного слоя сенсоров. В то же время, по сравнению с сенсорами на основе неотожженных кремний-углеродных пленок, данные сенсоры характеризуются стабильностью начального поверхностного сопротивления при воздействии детектируемых веществ и меньшей рабочей температурой [4].



Рис. 2. Дрейф значений коэффициента газовой чувствительности в течение 6 месяцев при периодическом воздействии 50 ppm NO₂

Таким образом, было показано, что на основе кремний-углеродной пленки, модифицированной медью, возможно изготовить резистивный сенсор диоксида азота, функционирующий при температуре 100 °C и обладающий относительной стабильностью газочувствительного отклика в течение 6 месяцев при периодическом воздействии целевым газом.

Литература

Баринов А.Д., и др. Влияние термообработок на структуру, химический состав и электропроводность алмазоподобных кремний-углеродных нанокомпозитов // Вестник Московского энергетического института (Вестник МЭИ). 2015. № 1. С. 85-90.

Григорьев М.Н., и др. Получение кремний-углеродных пленок на электропроводящей и диэлектрической подложках методом электрохимического осаждения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 7 (201). С. 56-66.

Петров В.В., и др. Исследование физико-химических и электрофизических свойств, газочувствительных характеристик нанокомпозитных пленок состава SiO₂-SnO_X-CuO_Y // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 8 (121). С. 15-21.

Myasoedova T.N., et al. Fabrication of gas-sensor chips based on silicon–carbon films obtained by electrochemical deposition // Chemosensors. 2019. V. 7. P. 52.

Petrov V.V., et al. Investigation of rapid gas-sensitive properties degradation of ZnO-SnO₂ thin films grown on the glass substrate $\$ Chemosensors. 2020. T. 8. No 2. C. 40.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА КВАНТОВЫХ КОЛЬЦАХ

Музыкина Е.А.

НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия E-mail: kotya.muzykina@gmail.com

Гетероструктуры, содержащие слои квантовых точек или квантовых колец являются перспективными материалами для приборов электроники и фотоники – например, фотодетекторов. При рассмотрении электронных транспортных свойств таких материалов важным этапом является моделирование рассеяния носителей заряда на наноструктурах. В частности, решение задачи рассеяния позволяет получить ток вероятности для электронов проводимости, его зависимость от энергии и вольт-амперную характеристику материала.

В данной работе выводится решение двумерного уравнения Шрёдингера для стационарной и нестационарной задачи рассеяния электрона на потенциале в виде квантового кольца и квантовой точки. Используется модель квазидвумерного электронного газа, которая несмотря на свою простоту позволяет получить качественно верные результаты.



Рис. 1. Сравнение метода Фурье (слева)и конечно-разностного метода (справа): а – для гауссова кольца; б – для гауссовой точки

Для решения стационарной задачи был разработан метод, основанный на разложении волновой функции в ряд Фурье и на разбиении потенциала на множество кусочнопостоянных. Таким образом, для каждого участка получаем уравнение на коэффициенты разложения, решение которого имеет вид (1).

$$C_{j}(r) = P J_{j} \left(\sqrt{k^{2} - u_{0}} r \right) + Q Y_{j} \left(\sqrt{k^{2} - u_{0}} r \right)$$
(1)

Где C_j - коэффициент разложения, P и Q - константы, определяющиеся из граничных условий и сшивки решений на границах участков с постоянным значением потенциала, k - волновое число, u_0 - значение потенциала в размерности квадрата длины, J_j и Y_j - функции Бесселя первого и второго рода порядка j.

Метод решения нестационарной задачи основан на представлении электрона в виде волнового пакета. Уравнение решалось с помощью конечно-разностной схемы (2). Использовалась асимметричная схема Саульева [1].

$$i\frac{\partial}{\partial\tau}\psi_{j_{x}j_{y}} = -\frac{\psi_{j_{x}-1j_{y}} - 2\psi_{j_{x}j_{y}} + \psi_{j_{x}+1j_{y}}}{\Delta x^{2}} - \frac{\psi_{j_{x}j_{y}-1} - 2\psi_{j_{x}j_{y}} + \psi_{j_{x}j_{y}+1}}{\Delta y^{2}} + u_{0}(x_{j_{x}}, y_{j_{y}})\psi_{j_{x}j_{y}}$$
(2)

Где *i* - мнимая единица, $\psi_{j_x j_y}$ - волновая функция в точке сетки, τ - время в размерности квадрата длины, Δx и Δy - интервалы сетки по двум координатам.

Для моделирования квантовых точек использовались цилиндрическая потенциальная яма и яма в виде функции Гаусса. Для квантовых колец аналогичным образом использована разность двух цилиндрических или двух Гауссовых потенциалов. Оба подхода показывают, что при рассеянии на квантовой точке происходит фокусировка волновой функции внутри ямы – рис. 1(а). Для квантового кольца видно движение по обеим частям кольца с последующей интерференцией – рис. 1(б). Метод Фурье позволяет рассчитать приведенное 2D сечение рассеяния и ток вероятности в зависимости от энергии налетающего электрона – рис. 2.

В отличие от имеющихся работ, в данной моделируется именно рассеяние на наноструктуре, а не распространение потока электронов по разветвлённым каналам [2]. Результаты метода, основанного на разложении в ряд Фурье, не противоречат результатам работы [3], где рассматривалась упрощенная задача рассеяния на непроницаемом цилиндре.



Рис. 2. Приведенное 2D сечение рассеяния (а, б) и ток вероятности (в) для квантового кольца с радиусами 30 и 50 нм и квантовой точки радиуса 40 нм.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания, проект FSWU-2023-0075.

Литература

- 1. Саульев В.К. Интегрирование уравнений параболического типа методом сеток. Москва: Физматгиз, 1960. 324 с.
- 2. McAlinden S., Shertzer J. Quantum scattering from cylindrical barriers // American Journal of Physics. 2016. 84(10). P. 764-769
- 3. Sousa A.A., Chaves A., Pereira T.A.S., Farias G.d.A., Peeters F.M. Wave packet propagation through branched quantum rings under applied magnetic field, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2019. Vol. 114. Id. 113598.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Мухаев Д.А., Игошина С.Е., Карманов А.А.

Пензенский ГУ, факультет инф. технологий и электроники, Пенза, Россия E-mail: <u>muxaev008778@mail.ru</u>

Изучена зависимость энергии связи электрона с примесными центрами от величины напряжения внешнего электрического поля в квантовых точках на основе таких материалов как CdSe и InSb.

Рассмотрена модель примесной D_2^- -системы в сферически-симметричной потенциальной яме в приближении эффективной массы, которая находится под действием внешнего электрического поля [1]. На рисунках 1 и 2 показана зависимость энергии связи электрона $E_{\lambda}^{(QD)}$ от расстояния R_{12} , $(R_{12} \equiv x_{a2})$ между центрами $(\vec{R}_{a1} = (0,0,0)$ и $\vec{R}_{a2} = (x_{a2},0,0)$) в КТ на основе InSb и CdSe, соответсвенно.



Рис. 1. Термы D_2^- – центра на основе InSb при внешнем напряжении A)E = 0 B/м, B)E=2 · 10⁶B/м;(красный: g-терм, зеленый: u-терм)



Рис. 2. Термы D_2^- – центра на основе CdSe при внешнем напряжении A)E = 0 B/м, B)E=2 · 10⁶B/м; (красный: g-терм, зеленый: u-терм)

Из рисунков 1 и 2 видно, что энергия связи электрона с примесными центрами в D_2^- -системе InSb в отсутствие внешнего поля несколько меньше энергии связи электрона с примесными центрами в D_2^- -системе CdSe. В электрическом поле условия существования g-состояния становятся менее жесткими, и несколько увеличивается координатная область существования этого состояния. Условия существования и-состояния становятся, что обусловлено квантово-размерным эффектом Штарка[2]. Из рисунков также видно, что увеличение расстояния между центрами приводит к вырождению g- и u-состояний.

- 1. В.Д. Кревчик, М.Б. Семенов, Н.Ю. Черепанова // Нанотехника. 2008. -№ 14. С. -87.
- 2. В.Ч. Жуковский, Ю.И. Дахновский, В.Д. Кревчик и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. -2007. -№ 2. -С. 10

ФОТОДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ НАНОАЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

Мухамадиев А.И., Стрелецкий О.А.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: amy9717@mail.ru

В настоящее время различными научными группами ведутся работы по созданию и исследования покрытий на основе алмаза и смешанных углеродных фаз [1]. Покрытия на основе алмаза обладают рядом уникальных свойств такими как высокая твердость, температуропроводность, широкая запрещенная зона и др. Такие покрытия могут служить в качестве мощных полевых транзисторов и диодов в силовой электронике [2], приборов СВЧ электроники [3], а также в качестве детекторов и источников ультрафиолетового излучения [4]. Разработка источников и детекторов на основе алмазоподобных покрытий имеют значительный интерес в первую очередь благодаря широкой запрещенной зоны алмаза (~5.5 эВ), что позволяет перекрывать участки ультрафиолетового диапазона с длинами волн ниже 280 нм, в отличие от традиционных кремниевых фотоэлементов, а управляя процессом роста алмазных покрытий, возможно в широком диапазоне изменять их оптические свойства.

В настоящей работе образцы изготавливались методом плазменно-химического осаждения углерода из газовой фазы при дуговом разряде в атмосфере смеси водорода, аргона и метана. Покрытия осаждались при рабочем давлении 60 Тогг, ток разряда составлял 1 А, напряжение - 700 V. Соотношение относительных концентраций газов в рабочей камере H₂/Ar/CH₄ составляло 77.5/20/2. Толщина покрытий составляла порядка 1 µm.

Исследование структурных свойств образцов проводилось с использованием методов растровой электронной микроскопии (РЭМ), спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) и рентгеноструктурного анализа. На рис.1.а представлена изображение поверхности образца полученная при помощи РЭМ. Видно, что морфология поверхности представлена в виде неоднородностей рельефа с характерным размером (0,4 мкм). Исследования при помощи рентгеноструктурного анализа (рис.1.б) и спектроскопии КР свидетельствуют о том, что образцы представляют собой наноалмазные кристаллы (~10 нм), окруженные разупорядоченным углеродом на основе графитовых включений и полиеновых субструктур.



Рис. 1. а – фото образца в РЭМ, б – дифрактограмма

С целью исследования фотоотклика полученных образцов изготавливались два типа структур: с напыленными алюминиевыми контактами (рис.2.а) и высаженной на поверхности наноалмазной пленки однослойного графена. В дальнейшем для данных образцов проводились измерения фотоотклика при воздействии на их поверхность короткими импульсами от ультрафиолетового излучения с длиной волны 365 нм.



Рис. 2. а – фото маски, б - отклик образца

Измерения фотоотклика при воздействии коротких УФ импульсов, а также спектрального фотоотклика в широком диапазоне длин волн демонстрируют высокую энергетическую эффективность как для образцов с напыленными контактами, так и для образцов с осажденным монослоем графена. При этом времена отклика и восстановления составляют ~ 10 мс.

Литература

- 1. Lavini, F., Rejhon, M. & Riedo, E. Two-dimensional diamonds from *sp*2-to-*sp*3 phase transitions. *Nat Rev Mater* 7, 814–832 (2022).
- Syamsul M, Oi N, Okubo S, et al. Heteroepitaxial diamond field-effect transistor for high voltage applications. IEEE Electron Device Lett. 2018;39(1):51–54.] [Funaki T, Hirano M, Umezawa H, et al. High temperature switching operation of a power diamond Schottky barrier diode. IEICE Electron Express. 2012;9(24):1835–1841.
- 3. Zhou C, Wang J, Guo J, et al. Radiofrequency performance of hydrogenated diamond MOSFETs with alumina. Appl Phys Lett. 2019;114(6):063501.
- 4. Balducci A, Bruzzi M, De Sio A, et al. Diamond-based photoconductors for deep UV detection. Nucl Instrum Methods Phys Res A. 2006;567(1):188–191.] [Kuwabara D, Makino T, Takeuchi D, et al. Unique temperature dependence of deep ultraviolet emission intensity for diamond light emitting diodes. Jpn J Appl Phys. 2014;53(5S1):05FP02.

БИ-СКВИД КАК ЯЧЕЙКА ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Николаева А.Н.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: nikolaeva.an19@physics.msu.ru

Параметрические усилители обладают очень высокой чувствительностью: их шумовая температура может быть ниже физической температуры окружающей среды. Такие устройства на основе сверхпроводниковых технологий являются весьма перспективными для создания систем считывания сигналов квантовых устройств.

Джозефсоновские параметрические усилители бегущей волны представляют собой искусственную волноводную линию, состоящей из сверхпроводниковых ячеек с нелинейной индуктивностью на основе джозефсоновских переходов. В усилителе на основе одной общей искусственной волноводной линии амплитуда волны накачки ограничена величиной критического тока используемых джозефсоновских элементов (для сохранения сверхпроводящего состояния линии) – это ограничивает достижимую амплитуду выходного сигнала, то есть величину коэффициента усиления. Для устранения явления

истощения мощности волны накачки в линии усилителя было предложено схема [1] на основе двух индуктивно связанных линий: искусственной джозефсоновской линии на основе цепочки двухконтактных сквидов для волны сигнала и LC-линии для волны накачки. Волна накачки прикладывает магнитный поток к джозефсоновским ячейкам сигнальной линии и обуславливает модуляцию линейных индуктивностей ячеек, движущуюся волновым образом вдоль этой линии. В силу того, что амплитуда волны накачки в такой конструкции ничем не ограничена, эффект истощения волны накачки в таком усилителе отсутствует, что позволяет увеличить его коэффициент усиления. Ограничением амплитуда выходного сигнала в этом усилителе является возникновение нелинейных искажений. Это ограничение принято фиксировать на уровне достижения компрессии коэффициента усиления на 1дБ. Нелинейные искажения сигнала возникают за счет появления и увеличения нелинейности джозефсоновской индуктивности ячеек линии по мере приближения амплитуды сигнала к величине критического тока джозефсоновской ячейки. Увеличение критического тока джозефсоновских элементов в сквид-ячейках для увеличения диапазона линейного усиления наталкивается на ограничение со стороны других параметров, влияющих на глубину модуляции индуктивностей ячеек и шумовые свойства усилителя. Этими параметрами являются безразмерная индуктивность сквид-ячейки $l=(2\pi/\Phi 0)$ IcL и фактор шума гамма γ .

В данной работе была предложена ячейка искусственной сигнальной линии на основе би-свида (см рис. 1) [2]. При значениях критического тока Іс джозефсоновских элементов, выбранных из условий оптимизации величин параметров l и γ, использование би-сквид–ячейки позволяет увеличить максимальный сверхпроводящий ток ячейки и линейный диапазон индуктивности ячейки по сравнению с ячейкой на основе двухконтактного сквида, что дает увеличение коэффициента усиления на 6-10 дБ.



Рис. 1. Элементарная ячейка сигнальной линии на основе би-сквида, индуктивно связанная с ячейкой LC линии для волны накачки.

Литература

A.B.Zorin. Josephson traveling-wave parametric amplifier with magnetic flux drive// Phys. Rev. Appl., vol.12, no. 4, 2019, Art no.044051.

ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЕ ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ДЕГИДРОГАЛОГЕНИРОВАННОГО ПОЛИВИЛИДЕНФТОРИДА.

Нуриахметов И.Ф., Завидовский И.А.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: <u>islam.nuriakhmetov@mail.ru</u>

С появления резистивных сенсоров появился особый интерес для использования их в качестве газовых детекторов [3]. В основе работы резистивных сенсоров лежит эффект изменения электрофизических свойств наноструктур при взаимодействии материала сенсора с детектируемым газом. В настоящее время ведутся активные разработки в области газовых резистивных сенсоров на основе углеродных наноструктур [1], таких как графен, углеродные нанотрубки [5] и нановолокна [4]. Это дало возможность создавать гибкие газовые сенсоры и повысить чувствительность к низким концентрациям молекул газа. Однако такие сенсоры обладают рядом недостатков среди которых - относительно низкая селективность. Вследствие этого актуальной задачей является поиск новых материалов, направленный на её увеличение. Такими материалами, благодаря своим нетривиальным свойствам [2], могут стать структуры на основе sp-гибридизированных углеродных цепочек.

В проведенной работе тонкие пленки изготавливались в несколько этапов. На первом этапе получали тонкие пленки (толщиной ~1 мкм) путем растворение исходного прекурсора поливинилиденфторида в N,N диметилформамиде с ацетоном с последующим испарением в чашке Петри. На следующем этапе полученные пленки подвергались химической реакции дегидрофторирования в растворе ацетона и метанола в соотношении 9:1 и перенасыщенного раствора КОН. Реакция проходит в соответствии с формулой (1).

 $(-CH_2 - CF_2 -)_n + 2nKOH = (-C \equiv C -)_n + 2nKF + 2nH_2O \quad (1)$

После проведения химической реакции проводилось промывание пленок в этаноле и дистиллированной воде. На третьем этапе, в условиях вакуума, полученные образцы подвергались облучению различными дозами низкоэнергетических ионов аргона. После завершения ионного облучения с помощью метода магнетронного осаждения осуществлялось напыление серебряных контактов с использованием специальной маски (рис. 1(б)).

Структурные свойства образцов были изучены при помощи различных методов, такие как спектроскопия комбинационного рассеяния, инфракрасная спектроскопия, растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Результаты исследования показали, что полученные образцы имеют наноразмерные (15-70 нм) и микроскопические (25 мкм) поры (рис. 1(а)), а структура представляет собой разупорядоченные полиинполиеновые цепочки. Результаты исследований облученных пленок показали изменение поверхностной морфологии, образование укороченных полиеновых цепочек и формирование графитизированных областей.

Сенсорные свойства образцов с нанесенными контактами измерялись внутри перчаточного бокса. Газы вводились внутрь камеры при помощи самодельного дозатора, в котором предварительно испарялось требуемое вещество (гидроксид аммиака, этанол и вода). Расчет сенсорного отклика проводился по формуле (2).

$$\Delta \sigma / \sigma_0 = \frac{(\sigma - \sigma_0)}{\sigma_0} / \sigma_0 \quad (2)$$

В зависимости от ионного облучения наблюдается проявление селективности по отношению к выбранным типам газа (рис.2.). Так, для необлученного образца отношение отклика гидроксида аммиака к этанолу и воде составляет 325 и 158 соответственно. При дозе 0.3×10^{17} , данное соотношение становится 3 и 30, а отношение отклика на этанол к воде 10. При дозе 3×10^{17} соотношения становятся равными 8 – для этанола, а для воды меняется знак на отрицательный и отношение достигает -10. При дозе 1×10^{18} соотношения равны 2 и -0.5. При этом стоит отметить, что для доз 3×10^{17} и 1×10^{18} наблюдается изменение характера отклика – для воды сохраняется положительный отклик, для гидроксида аммиака и этанола знак становится отрицательным.



Рисунок 1. Изображения в ПЭМ (а), пленки после напыления контактов (б).



Рисунок 2. Относительное изменение проводимости в зависимости от дозы облучения для различных газов.

Литература

- 1. Basu S., Bhattacharyya P. Recent developments on graphene and grapheme oxide based solid state gas sensors // Sens. Actuators B. 2012, V. 173, P. 1-21.
- Marabotti P., Peggiani S., Facibeni A., Serafini P., Milani A., Russo V., Li Bassi A., Casari. C.S. In situ surface-enhanced Raman spectroscopy to investigate polyyne formation during pulsed laser ablation in liquid // Carbon. 2022, V. 189, P. 219-229.
- Willner Marjorie R., Vikesland Peter J. Nanomaterial enabled sensors for environmental contaminants // Journal of Nanobiotechnology. 2018, V.16, P. 95-110.
- 4. Zhang L., Aboagye A., Kelkar A., Lai C., Fong H. A review: carbon nanofibers from electrospun polyacrylonitrile and their applications // J. Mater. Sci. 2014, V. 49, P. 463-480.
- 5. Zhang T., Mubeen S., Myung N.V., Deshusses M.A. Recent progress in carbon nanotube-based gas sensors // Nanotechnology. 2008, V. 19, P. 33.

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ НАНОЭЛЕКТРОДОВ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО ТРАНЗИСТОРА

Мельников А.Е., Петрунин Д.А.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: <u>petrunin.da19@physics.msu.ru</u>

Одним из наиболее перспективных для создания новых поколений наноэлектронных устройств является планарный одноэлектронный транзистор атомарномолекулярного размера. Однако во всех известных реализациях таких элементов (см., например, [1]) для создания нанозазора «сток-исток» использовался эффект электромиграции, пригодный лишь в лабораторных условиях. Настоящая работа посвящена разработке и изготовлению электродной системы планарного одноэлектронного транзистора без использования эффекта электромиграции.

Образцы изготавливались на стандартных подложках из кремния со слоем оксида кремния. Наноструктуры формировались при помощи сочетания методов электронной и фотолитографии, электронно-лучевого, высокочастотного магнетронного и термического напыления, а также химического травления в кислоте и щёлочи.

Первым этапом создания наноэлектродов одноэлектронного транзистора является подготовка кремниевых подложек. На образцы наносится слой оксида алюминия (Al₂O₃) толщиной 50-60 нм. На следующем шаге на одной половине подложки с помо-

щью оптической литографии с последующим термическим напылением металлов формируются пленочные подводящие провода из золота с буферным слоем из титана. Затем проводится жидкостное травление в гидроксиде калия (КОН), в ходе которого со всех незанятых подводящими проводами участков образца стравливается слой оксида алюминия толщиной около 40 нм. В результате поверхность оказывается ниже первой, а на краях пленочных проводов на подложке формируется ступенька такой же высоты с подтравом оксида алюминия под пленку провода. Далее на этой (нижней) половине образца симметрично первой половине проводов с помощью оптической литографии формируется маска второй половины полной системы подводящих проводов, а с помощью электронной литографии засвечиваются области центральных узких нанопроводов, соединяющих (с переходом через ступеньку) обе части полной системы подводящих проводов. В завершение проводилось повторное напыление проводов из золота и титана таким образом, чтобы суммарная толщина напыляемой пленки была меньше высоты ступеньки на желаемую ширину нанозазора «сток-исток» (не более 3-4 нм).

В итоге мы получаем систему подводящих наноэлектродов одноэлектронных транзисторов с полученными без электромиграции нанозазорами «сток-исток» молекулярного масштаба на переходе/ступеньке между двумя уровнями проводов.

Литература.

J. Park, A. N. Pasupathy, J. I. Goldsmith, C. Chang, Y. Yaish, J. R. Petta, M. Rinkoski, J. P. Sethna, H. D.Abruna, P.L.McEuen, D.C.Ralph, "Coulomb blockade and the Kondo effect in single-atom transistors," Nature, Vol. 417, 722, (2002).

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Пименов И.Е.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, фак. «Машиностроительные технологии», Москва, Россия E-mail: ilyapimenov2004@gmail.com

С момента появления электронных устройств они все глубже проникают в обиход человека. Сегодня не возможно представить ни одно устройство, не использующее микроэлектронику. Даже, на первый взгляд, сложные механические устройства не обходятся без датчиков и контроллеров. С развитием промышленных технологий электроника становится компактнее, а ее функционал и производительность возрастают. Эти факторы и влияют на ее проникновение во все области машиностроения, приборостроения и другие сферы жизни человека, что сказывается постоянно растущим спросом на микроэлектронные компоненты.

Связь – одна из крупнейших сфер применения микроэлектронных устройств. Постоянно увеличивающееся количество устройств и абонентов связи требует увеличения их количества, при этом необходимо сохранять условие миниатюризации. Основными элементами устройства приема и передачи высокочастотного радиосигнала являются: антенны, усилители радиочастоты, гетеродины, смесители, фильтры частот, детекторы и другие. Многие из этих элементов можно выполнить по планарной технологии. Это позволит формировать на одной подложке несколько элементов одновременно, избегая соединительных элементов, применимых при сборке устройств из отдельных компонентов, а также снизить стоимость производства посредством отказа от аналогичных элементов: индивидуальных корпусов, разъемов, соединительных кабелей. Кроме того, использование планарных технологий позволяет расширить диапазоны характеристик для элементов систем приема–передачи данных. Например, микрополосковые фильтры могут работать в диапазоне частот от 1 до 50 ГГц, в отличие от керамических, ПАВ и LC фильтров, работающих на частотах до 2 ГГц. Именно из-за кардинальных преимуществ перед аналогами, для проведения экспериментов по получению опытных образцов и отработки технологии формирования были выбраны микрополосковые полоснопропускные фильтры, применяемые в современных системах передачи информации, средствах радиоэлектронной борьбы и радарах [1].

Для формирования структуры фильтра были выбраны методы ионно-плазменной обработки: ионное травление и магнетронное распыление. Методы ионно-плазменной обработки, позволяющие формировать функциональные слои, удалять вспомогательные и обеспечивать требуемую морфологию подложек перед нанесением комплекса покрытий. Преимуществами данных методов является высокая частота покрытий благодаря работе в среде вакуума, а также высокая точность работы с наноразмерными структурами.

Для изготовления опытных образцов был разработан технологический маршрут. Первым этапом является ионная обработка предварительно подготовленных подложек, это позволяет удалить загрязнения и газы с приповерхностных слоев подложки. Вторым этапом, в том же вакуумном цикле, проводится осаждение тонкопленочного покрытия методом магнетронного распыления. После металлизации на подложках формируется фоторезистивная маска, повторяющая рисунок топологии будущего фильтра. Через сформированные окна, методом ионного травления производится удаление медного слоя. Распыление производилось при давлении 10⁻³ Па, мощность ВЧ-блока питания 75 Вт. Ионное травление производилось при давлении 10⁻⁵ Па и мощности постоянного тока 90 Вт. Заключительным этапом является удаление фоторезистивной маски жидкостным методом. На рис. 1 приведено изображение требуемой топологии фильтра с размерами, полученными в результате расчета в программном пакете iFilter design системы автоматизированного проектирования AWR Design Environment. На рис. 2 представлен образец фильтра, полученный по описанной технологии [2].

В результате работы были получены образцы топологий полоснопропускных фильтров. Использование метода магнетронного распыления позволило получить равномерное покрытие толщиной 1 мкм с высокими показателями адгезии. Применение ионного травления позволило получить неискаженные геометрические параметры топологии, в отличие от жидкостных методов травления, при которых неизбежно появление бокового подтрава. Исследования структуры на профилометре показали, что отклонения толщины от заданных по итогам моделирования значений составляют менее 5 %, отклонения геометрических параметров менее 10%, что является допустимым для экспериментальных образцов [3].

В дальнейшем планируется проведение экспериментов по формированию других элементов устройств связи по отработанной технологии, а также формирование одновременно нескольких устройств на одной подложке за один технологический цикл.



Рис.1 Геометрия требуемой топологии с размером



Рис.2 Образец полученной топлогии

Литература

- 1. А. А. Данилин. Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Измерения на СВЧ». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2021. – 26 с.
- Пименов И.Е., Купцов А.Д., Сидорова С.В. Исследование технологии создания частотного фильтра // XV Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: [электронный ресурс]. – 2022. – URL: https://bmr.bmstu.press/preprints/3529/ (дата обращения: 28.01.2023)
- 3. Пименов И.Е. Разработка технологии создания планарного частотного фильтра для систем телекоммуникации // Сборник тезисов докладов региональной научно-технической конференции «Молодежь Зауралья III тысячелетию». 2022. с. 12-14.

НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ СЕНСОР С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ЧАСТОТОЙ

Попов А.А.¹, Михайлов П.О.¹, Дорофеев А.А.¹, Трифонов А.С.¹, Преснов Д.Е.^{1,2}, Снигирев О.В.¹, Крупенин В.А.¹

1МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва, Россия 2НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия E-mail: popov.aa16@physics.msu.ru

Последние десятилетия внимание исследователей приковано к наноразмерным объектам, в частности, наноэлектромеханическим системам (НЭМС). Такие структуры нашли широкое применение в решении как прикладных, так и фундаментальных задач [1]. На базе НЭМС изготавливают сверхчувствительные датчики массы, силы, ускорения [2].

В данной работе теоретически исследованы и численно промоделированы резонансные свойства наноэлектромеханических резонаторов с изменяемой резонансной частотой на основе закрепленных с двух концов нанопроводов, с расположенными на расстоянии 100 – 1000 нм от резонатора управляющими электродами. С использованием численного моделирования построена зависимость резонансной частоты нанопровода от напряжения на управляющем электроде.

Данные численного моделирования хорошо согласуются с результатами реальных измерений резонансной частоты [3], полученных магнитодвижущим методом при температуре 4.2 К, которая составляет f = 2,166 МГц для нанопровода длиной 70 мкм, высотой 130 нм и шириной 200 нм. Резонансная частота, полученная по результатам численного моделирования, составила f = 2,150 МГц.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научнообразовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

1. Presnov, D. E., et al. "High quality factor mechanical resonance in a silicon nanowire." *JETP Letters* 108.7 (2018): 492-497.

- 2. Гринберг, Яков С., Юрий А. Пашкин, and Евгений В. Ильичев. "Наномеханическиерезонаторы." *Успехифизическихнаук* 182.4 (2012): 407-436.
- 3. Guthrie, Andrew, et al. "Nanoscale real-time detection of quantum vortices at millikelvin temperatures." *Nature Communications* 12.1 (2021): 1-6.

СОЗДАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ INGAN/GAN ПУТЕМ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рибенек В.А.

Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия E-mail: rib198@mail.ru

На сегодняшний день память типа RRAM (Resistive random-access memory - резистивная память с произвольным доступом) является наиболее молодым и перспективным типом энергонезависимой памяти и представляет собой прекрасную альтернативу flash и SSD накопителям, а также может быть применена для нейроморфных систем. В последние годы особый интерес в этой области представляет создание конфигурации, объединяющей технологию RRAM и полупроводниковый светодиод [1-3] для возможности параллельного оптического считывания информации. Нами предложен метод создания резистивной памяти на базе светодиодов InGaN/GaN с одной квантовой ямой путем импульсного воздействия.

Светодиоды с центральной длиной волны излучения 468 нм подвергались нами импульсному воздействию с помощью источника сигналов специальной формы АКИП-3418/2. При протекании тока большой величины в импульсном режиме происходит образование подвижных дефектов и формирование в области пространственного заряда проводящих каналов, которые отвечают за эффект резистивного переключения и памяти в полупроводниковом светодиоде. Данные эффекты подтверждаются наличием явления гистерезиса на вольт-амперных (рис.1, а) и вольт-фарадных (рис.1, б) характеристиках исследуемого прибора. На графиках виден четкий переход между резистивным и диодным состояниями структуры. Стоит отметить, что установившееся состояние сохраняется даже при отсутствии питания. Таким образом, описанный прибор является энергонезависимым, как и все устройства с резистивной памятью.



Рис. 1. Вольт-амперная (а) и вольт-фарадная (б) характеристики прибора (1 – измерение от прямого напряжения смещения к обратному; 2 – измерения от обратного напряжения смещения к прямому).

Литература

- 1. Che-Wei Chang, Wei-Chun Tan, Meng-Lin Lu1, Tai-Chun Pan, Ying-Jay Yang, Yang-Fang Chen. Electrically and Optically Readable Light Emitting Memories. Scientific Reports vol.4, article number: 5121, 2014.
- 2. K. Zheng, J. L. Zhao and others. An Optically Readable InGaN/GaN RRAM. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, vol. 63, number 6, 2016.
- 3. Kai Fu, Houqiang Fu, Student Member, IEEE, Xuanqi Huang, Tsung-Han Yang, Hong Chen and others. Threshold switching and memory behaviors of epitaxially regrown GaN-on-GaN vertical p-n diodes with high temperature stability. IEEE Electron Device Letters Vol. 40, Is. 3, 2019.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК РСDТВТ С ВНЕДРЕННЫМИ НАНОПЛАСТИНАМИ CDSE

Русаков Д.М.¹, Саитов Ш.Р.¹, Ильин А.С.^{1,2}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия ²ФИ им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия *E-mail:* rusakov.dm20@physics.msu.ru

Полимер PCDTBT является перспективным материалом для создания фотоэлементов. Поэтому электрофизические свойства данного материала и его модификаций вызывают пристальный интерес. В частности, изменение свойств полимера при добавлении нанопластин на основе CdSe. Внедрение неорганических наночастиц в органическую матрицу чаще всего производится с целью получить материал, сочетающий в себе свойства обоих компонентов. Так добавление указанных частиц в объем пленки PCDTBT позволило получить транспортные свойства неорганического компонента, при сохранении и усилении оптических и фотоэлектрических свойств органического компонента. Модификация полимерной пленки нанопластинками на основе CdSe привело к увеличению фотопроводимости материала на один порядок величины в видимом диапазоне длин волн при определенных условиях [1].

Данная работа посвящена изучению влияния добавления нанопластинок CdSe в активный слой фотоэлемента на основе PCDTBT на механизм переноса носителей заряда. Для этого были изготовлены три образца с различной массовой долей нанопластин: 0, 25 и 90%.

Нанопластинки типа ядро-оболочка CdSe/2CdS были получены по методике, описанной в работе [2]. Однофазные нанопластинки CdSe были использованы в качестве материала ядра, в котором реализуется экситонный переход из подзоны тяжелых дырок в подзону проводимости (1hh-1e) на длине волны 463 нм. Рост оболочки проводился коллоидным методом атомно-слоевого осаждения. Пленка композитного материала была изготовлена методом центрифугирования смеси растворов полимера и наночастиц в хлороформе. Готовая пленка была высушена при температуре 70 °C в атмосфере аргона.

Проводимость образцов на постоянном токе измерялась с помощью пикоамперметра Keithley 6487. Импеданс образцов измерялся на анализаторе импеданса HP 4192A. Все измерения проводились при комнатной температуре. Обнаружено, что с увеличением концентрации нанопластин CdSe проводимость на постоянном токе значительно падает как на постоянном, так и на переменном токе. При добавлении 90% CdSe сопротивление увеличивается на порядок. На рис. 1 представлены зависимости проводимости образцов от частоты. Видно, что проводимость значительно падает при добавлении нанопластин. Зависимость проводимости от частоты можно объяснить прыжковой проводимостью по локализованным состояниям [3]. Эквивалентная схема составлена из годографа адмиттанса и представляет собой параллельно соединенные резистор и конденсатор. Исследование комплексной части адмиттанса показывает, что добавление нанопластин CdSe в полимер PCDTBT скачкообразно снижает ёмкость с 7.8 пФ для образца без CdSe до 0.8 пФ для образцов с содержанием CdSe 25% и 90%.



Рис. 1. Частотные зависимости проводимости образцов с различными концентрациями нанопластин CdSe (черным, зеленым и синим цветами) и их аппроксимации (красным цветом)

Литература

- 1. Saitov S. R. at al. Photoconductivity and electronic processes in PCDTBT polymer composite with embedded CdSe nanoplatelets // Organic Electronics. 2023. T. 112. C. 106693.
- 2. Saidzhonov B. M. at al. Ultrathin CdSe/CdS and CdSe/ZnS core-shell nanoplatelets: The impact of the shell material on the structure and optical properties // Journal of Luminescence. 2019. T. 209. C. 170–178.
- 3. Попов А.И. Физика и технология неупорядоченных полупроводников: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

АДСОРБЦИЯ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ ФУЛЛЕРЕНОВ НА ЗОЛОТУЮ ПОДЛОЖКУ: МОДЕЛИРОВАНИЕ REAXXFF И ЭКСПЕРИМЕНТ

Самородский А.В.1, Орешкин А.И.2

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: and.legkov@yandex.ru

Потенциальной областью практическкой физики является изучение различных аллотропных изменений углерода и связанных с ним соединений. Для развития техноллогий микроэлектроники и оптоэлектроники в настоящее время большой интерес представляет самоорганизующиеся наноструктуры и тонкие пленки органических материалов, совместимые с кремниевыми полупроводниковыми системами. Например фуллерен, перспективный материал обладающий широким спектром физических и химических свойств, включая исключительную склонность к самоорганизации [1]. Изучение адсорбции фуллеренов на поверхности полупроводниклв и металлов стимулировало прогресс к пониманию таких явлений и методов, как самосборка и самоорганизация, одномолекулярная спектроскопия и визуализация молекулярных орбиталей, а также манипулирование и контролируемое позициорнирование отдельных молекул с изпользованием зондов. В основном адсорбция изучалась на полупроводниках (Si, Ge). В настоящее время исследователи заинтересованы в изучении экзо- и эндо-производных фуллерена. Трудная, но интересная задача состоит в том, чтобы исползовать размер и форму молекул для достижения химических реакций в наномасштабных размерах. Молекулы фторфуллерена, являющиеся экзо-производной формой фуллерена С₆₀, являются интересным и мнгообещающим объектом для проведения таких исследований. Поверхностные наноструктурированные материалы и наноструктуры на основе молекул фторфуллерена могут быть использованы для решения различных научно-технических задач в области наноэлектроники и физики наносистем. Таким образом, цель предложенной работы выглядит весьма актуальной.

Для изучения структурных и электронных свойств молекул фторфуллеренов на поверхности металлов в данной работе роименялся метод сканирующей тунельной микроскопии, который позволяет проводить исследования, а также полноатомное компьютерное моделирование ReaxFF.

В результате эксперимента были получены изображения поверхности золота с адсорбированным на нем фтором. Сканирование проходило в течение двух недель и было обнаружено, что фторированная поверхность не является стабильной. Атомы фтора самоорганизуются собираясь в отдельные островки, оставляя часть занятой раннее поверхности Au(111) чистой. Скорость самоорганизации зависит от фуллерена носителя.

Методом ReaxFF с использованием потенциала [2], включающего в себя взаимодействие Au, C и F проведено моделирование процессов самоорганизации фуллеренов C₆₀F₁₈, C₆₀F₃₆, C₆₀F₄₈ на золотой подложке Au(111).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-22-00571.

Литература

- 1. Керл Р.Ф., Смолли Р.Э. Фуллерены // В мире науки.- 1991.- No 12.- С.14-24.
- 2. H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl & R.E. Smalley // NATURE VOL. 318

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОВОЛОКОН КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА КОБАЛЬТА С ЦИНКОМ

Смирнова В.В., Мартышов М.Н., Ильин А.С.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: foxxvalera@gmail.com

Оксид кобальта является полупроводником р-типа и рассматривается как перспективный материал для применения в качестве катализаторов в реакциях разложения воды, анодов Li-ионных аккумуляторов, в суперконденсаторах, газовых сенсорах и т.д. [1, 2]. К его существенным недостаткам можно отнести низкую проводимость по сравнению с оксидами металлов п-типа. Кристаллы Co_3O_4 имеют структуру нормальной шпинели по типу AB_2O_4 , состоящую из двух подрешеток – тетраэдрической и октаэдрической, в которой ионы кобальта Co^{2+} занимают тетраэдрические позиции, а катионы Co^{3+} – октаэдрические [3], что даёт возможность в широком диапазоне управлять электрофизическими свойствами этих материалов, вводя катионы металлов в степени окисления +2 и +3. Например, введение атомов Zn в структуру Co_3O_4 приводит к значительному увеличению проводимости. В данной работе методом электроспиннинга были получены образцы нановолокон $Zn_xCo_{3-x}O_4$ ($0 \le x \le 1$) и изучены их структурные, электрические и фотоэлектрические свойства.

Структурные свойства полученных образцов исследовались методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и низкотемпературной адсорбции азота. Исследования электрических свойств полученных образцов проводились на пленках толщиной около 1 мкм с напыленными на них золотыми контактами. Проводимость образцов измерялась с помощью пикоамперметра Keithley 6487. Для изучения фотоэлектрических свойств образцы освещались УФ светодиодом с длиной волны $\lambda = 385$ нм и интенсивностью излучения 5 мВт/см².

С помощью сканирующей электронной микроскопии было обнаружено, что образцы Zn_xCo_{3-x}O₄ представляют собой нановолокна диаметром 150-200 нм (рис. 1). Кроме того, было обнаружено, что не все атомы цинка встраиваются в структуру шпинели. С увеличением содержания цинка в материале появляется фаза ZnO.



Рис. 1. СЭМ-изображения нановолокон a) Co₃O₄, б) ZnCo₂O₄

Измерения температурных зависимостей удельной проводимости образцов проводились в диапазоне температур от 180 до 380 К в ячейке криостата, снабженной температурным контроллером. Было обнаружено, что температурные зависимости проводимости Co_3O_4 являются линейными в координатах $ln\sigma$ (1000/T) во всём диапазоне изменения температур. Для образцов $Zn_xCo_{3-x}O_4$ данные зависимости состоят из двух линий с разными значениями энергий активации, что может быть связано с образованием двух акцепторных уровней в запрещенной зоне. Введение атомов цинка в структуру Co_3O_4 приводит к значительному увеличению проводимости (более 4 порядков при комнатной температуре). При этом зависимость проводимости от процентного содержания атомов цинка имеет немонотонный характер (рис. 2а). Уменьшение проводимости при большой концентрации цинка может быть связано с образованием фазы ZnO, обладающей n-типом проводимости. В результате формируется p-n гетеропереход, который приводит к образованию вблизи него областей, обедненных свободными носителями заряда [4].



Рис. 2. а) Зависимость проводимости нановолокон Zn_xCo_{3-x}O₄ от содержания Zn (параметра х), б) кинетика нарастания и спада проводимости нановолокон Zn_{0.45}Co_{2.55}O₄, полученная при освещении ультрафиолетовым светом.

При освещении образцов ультрафиолетовым светодиодом были получены кинетики нарастания и спада проводимости (рис. 26). Для их аппроксимации были использованы уравнения с двумя экспонентами. В результате было показано, что в исследуемых структурах при освещении наблюдается два процесса: быстрый и медленный. Быстрый процесс можно связать с рекомбинацией неравновесных носителей заряда на дефектах структуры. Медленный процесс, как в случае других оксидов металлов [5], может быть связан с адсорбцией и десорбцией молекул на поверхности материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 21-32-70038.

Литература

- 1. Su D., Xie X., Munroe P., Dou S., Wang G. Mesoporous hexagonal Co₃O₄ for high performance lithium ion batteries // Scientific Reports. 2014. V. 4. P. 1–8.
- Hutchings G., Zhang Y., Li J., Yonemoto B., Zhou X., Zhu K., Jiao F. In situ formation of cobalt oxide nanocubanes as efficient oxygen evolution catalysts // Journal of the American Chemical Society. 2015. V. 137 (12). P. 4223–4229.
- Chen J., Wu X., Selloni A., Electronic Structure and Bonding Properties of Cobalt Oxide in the Spinel Structure // Physical review. B. 2011. V. 83 (24). P. 245204.
- Мартышов М.Н., Смирнова В.В., Ильин А.С., Платонов В.Б., Форш П.А., Кашкаров П.К. Особенности проводимости композитов нановолокон ZnO и NiO // Письма в Журнал Технической Физики. 2023. Т. 49 (4). с. 20–23.
- 5. Форш Е.А., Ильин А.С., Мартышов М.Н., Форш П.А., Кашкаров П.К. Релаксация фотопроводимости в нанокристаллическом оксиде индия // Российские нанотехнологии. 2014. Т. 9 (11-12). с. 18-22.

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ НАНОМЕХАНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

Снигирев Г.О., Попов А.А.¹, Михайлов П.О.¹, Дорофеев А.А.¹, Преснов Д.Е.^{1,2}, Снигирев О.В.¹, Крупенин В.А.¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва, Россия ²НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия E-mail: snigirev.go21@physics.msu.ru

Современные разработки в сфере нанотехнологий являются двигателями прогресса в аэрокосмической промышленности [1], сфере безопасности [2], вычислительной техники [3], биохимии и медицине [4]. Для определенных задач [5, 6] требуются наноэлектромеханические системы (НЭМС) с малой резонансной частотой наномеханического резонатора (НМР).

В данной работе представлен метод изготовления низкочастотных HMP. Изготовленные структуры представляют собой подвешенные нанопровода из нитрида кремния, закрепленные с обоих концов. За основу взята пластина кремния, покрытая 200 нм слоем Si_3N_4 . В верхнем слое Si_3N_4 формируются нанорезонаторы, с использованием электронной литографии, термического осаждения тонких плёнок металла, анизотропного реактивно-ионного и жидкостного травлений. Высота и ширина нанопроводов составляют 230 нм и 200 нм соответственно, а длина лежит в диапазоне от 500 мкм до 100 мкм, что обеспечивает их низкие резонансные частоты.

Согласно теории Эйлера-Бернулли, резонансные частоты основной моды изготовленных нанопроводов лежат в диапазоне 0,031МГц - 0,307 (при нормальных условиях).

Ряд экспериментальных исследований с использованием НЭМС, необходимо проводить при низких температурах[5]. В связи с чем, разработана модель, описывающая колебания НМР при различных температурах. Согласно полученной модели, резонансные частоты при температуре 4К увеличиваются до значений 0,268 - 1,414. Такое расхождение с теорией Эйлера-Бернулли обусловлено возрастанием внутреннего натяжения нанопровода возникающего в результате термического сжатия материалов.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научнообразовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина». В работе использовалось оборудование Учебнометодического центра литографии и микроскопии МГУ им. М.В. Ломоносова.

[1] Буханец Д.И. Нанотехнологии м наноматериалы в космической технике // Новые исследования в разработке техники и технологий. 2014. №2

[2] https://www.nature.com/articles/s41378-020-00213-2

[3] https://www.nature.com/articles/s41467-021-22909-3

[4] https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08423

[5] https://www.nature.com/articles/s41467-021-22909-3

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНОГО КВАНТОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ 2D УГЛЕРОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Шабунин Н.О.^{1,2}, Яфаров Р.К.^{1,2}

¹Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН ²СаратовскийНИГУ имени Н.Г. Чернышевского» E-mail: n-shabunin@bk.ru

Основу современной наноэлектроники составляют структуры, состоящие из чередующихся полупроводниковых слоев с различными электрофизическими свойствами и толщиной порядка нескольких нанометров. Создание подобных структур стало возможным благодаря развитию техники молекулярно-лучевой и газовой эпитаксии из металлоорганических соединений, которая позволила получать различные по составу слои с очень резкими границами, а переходные слои составляют не более одного или двух моноатомных слоев.

Цель работы - исследование влияния неоднородности электрофизических свойств по координате на транспорт и полевую эмиссию электронов в квантово-размерных некристаллических 2D углеродных гетероструктурах, полученных с использованием микроволнового плазмохимического осаждения в парах этанола низкого давления.

Исследованы ВАХ поперечных токов и полевая эмиссия гетероструктур в зависимости от толщины обедненного алмазографитового промежуточного слоя с работой выхода электронов 4,6 эВ и верхнего графит-графенового слоя с работой выхода 4,8 эВ, одинакового по электрофизическим свойствам с основанием гетероструктры толщиной 200 нм (рис.1 и 2).

Можно видеть, что при толщинах обедненного слоя 5 и 10 нм на ВАХ поперечных токов при малых напряжениях наблюдаются очень низкие токи, обусловленные высоким, по сравнению со средней кинетической энергией электронов, нулевым уровнем квантоворазмерного потенциального барьера. Его снижение при увеличении напряжения приводит к резкому увеличению тока через гетероструктуру.

Установлено оптимальное сочетание размеров потенциальных барьеров и квантовых ям углеродных туннельно-тонких покрытий различного структурно фазового состава, обеспечивающих при комнатной температуре повышение поперечных токов и плотностей полевых токов более чем в пять раз, по сравнению с однослойными обогащенными покрытиями.



Рис. 1. ВАХ трехслойных структур при толщине верхнего слоя 200 нм и различных толщинах обедненного слоя, нм: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 0



Рис.2. Зависимости максимальных полевых токов от толщин верхнего обогащенного слоя при толщине обедненного слоя 10 нм

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОЩАДИ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПОЛИ-П-КСИЛИЛЕНА НА ИХ МЕМРИСТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Юкляевских Г.А.,¹ Швецов Б.С.²

¹МГУ им. М.В.Ломоносова,, физический факультет, Москва, Россия ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия *E-mail:* iukliaevskikh.ga19@physics.msu.ru

Одним из перспективных элементов для создания нейроморфных вычислительных систем является мемристор – элемент цепи, обладающий многоуровневым характером резистивного переключения (РП), а также возможностью одновременного хранения и энергоэффективной обработки информации непосредственно в массивах мемристивных ячеек. Образцы мемристоров на основе органических материалов на сегодня ничем не уступают образцам на основе неорганических материалов, а также, в свою очередь, обладают рядом преимуществ: дешевизна и простота производства, возможность создания образцов на гибких подложках и трехмерного конструирования материала. Од-

ним из перспективных материалов для создания мемристивных структур являются полимерные слои поли-*n*-ксилилена (ППК) [1]. Масштабирование мемристоров достигается через возможность реализовать их в кроссбар-геометрии: в виде поперечных шин, на пересечении которых находится активный мемристивный слой [3]. В структурах на основе ППК такого типа были обнаружены довольно сильные эффекты РП [2], но влияние параметров на эти эффекты не изучены в полной мере, в частности, влияние размеров контактов на РП. Поэтому целью данной работы является установление зависимости электрофизических свойств как одиночных образцов, так и кроссбар-массивов мемристоров от их площади.

Для создания одиночных структур использовались следующие методы. Для синтеза пленки ППК был использован метод газофазной полимеризации на поверхности. Пленки ППК толщиной ~120 нм наносились на стеклянные подложки с нанесенным прозрачным проводящим оксидом индия олова (ITO), который использовался в качестве нижнего электрода. В качестве верхнего электрода использовался Си, который наносился магнетронным распылением через теневую маску с разными размерами отверстий.

Для создания кроссбар-массивов мемристоров использовались следующие методы. Мемристоры были изготовлены на подложках SiO₂/Si, на которые был предварительно нанесен слой Si₃N₄. Для нанесения нижнего электрода из золота использовался метод оптической литографии, который состоял из нанесения слоя фоторезиста, его экспонирование и проявление. Затем производилось травление Si₃N₄, после которого на подложку был нанесен слой золота. Последним этапом было удаление фоторезиста с лишним золотом. Далее методом газофазной полимеризации на поверхности был нанесен слой ППК толщиной ~100 нм. В качестве верхнего электрода использовался Cu, который наносился магнетронным распылением через теневую маску с разными размерами отверстий.



В работе были изучены одиночные мемристивные структуры Cu/ППК/ITO с разными площадями нижнего электрода (0,2 мм², 0,1 мм², 0,08 мм², 0,04 мм²), а также кросс-бар массивы мемристоров Си/ППК/Аи с разной шириной золотого контакта (20 мкм, 40 мкм, 60 мкм, 80 мкм, 100 мкм и 150 мкм). Были проведены исследования электрофизических свойств образцов (вольтамперные характеристики (Рис. 1), стабильность, выносливость) в зависимости от их площади. Помимо этого, был проведен эксперимент по изменению сопротивления мемристивных устройств с помощью биоподобного алгорит-

ма типа пластичности, зависящей от времени прихода импульсов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10253). Измерения проводились на оборудовании Ресурсных центров НБИКС НИЦ «Курчатовский институт».

- 1. Cai Y et al 2016 Nanotechnology 27 275206
- 2. Minnekhanov A A et al 2019 Org. Electron. 74 89
- 3. Shvetsov B S et al 2022 Nanotechnology 33 255201