

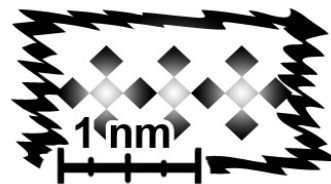
ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Председатели:

доц. Павликов Александр Владимирович

с.н.с. Трифонов Артем Сергеевич

с.н.с. Преснов Денис Евгеньевич



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ АНТИБЛИКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Артемьева О.С.

МИСиС, Институт новых материалов и нанотехнологий, Москва, Россия

E-mail: artemyewa-olga@yandex.ru

Антибликовые покрытия вносят существенный вклад в эффективность, КПД и внешний облик солнечных батарей. [1,4] В настоящее время создание антибликовых покрытий различных составов и толщины является актуальным вопросом в солнечной энергетике.

Цель исследования данной работы – эмпирическое определение оптимальной для КПД и внешнего вида солнечных модулей толщины двуслойных антибликовых покрытий различного состава для солнечных батарей из монокристаллического кремния.

Для выполнения поставленной задачи применялась программа OPAL 2, позволяющая рассчитать показатели отражения, поглощения и пропускания для спектра АМ 1,5 для многослойных покрытий и батарей различного состава. OPAL 2 это оптический симулятор поверхности солнечной батареи, рассчитывающий показатель отражения от поверхности, поглощение в тонкослойных покрытиях и пропускание в субстрате батареи в широком спектре длин волн. Также программа обладает богатой библиотекой оптических параметров для различных материалов. [2,3].

Проанализированы и сравнены между собой около 100 различных комбинаций. За оптимальный вариант принималось покрытие с минимальным показателем отражения в оптическом спектре.

Согласно расчетам определено, что толщина 1 слоя для рассмотренных двуслойных покрытий составляет 50 нм для покрытий всех рассмотренных составов и таким образом, общая толщина покрытий равна 100 нм.

Литература

1. *Barrera, M. et al.: Antireflecting – passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications, Solar Energy Materials & Solar Cells Vol.92, No.9, S.1115– 1122, 2008*
2. *McIntosh K.R., Baker-Finch S.C.: "A freeware program for precise optical analysis of the front surface of a solar cell," 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, pp. 2184–2187, 2010.*
3. *McIntosh K.R., Baker-Finch S.C.: "OPAL 2: Rapid optical simulation of silicon solar cells," Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, in-press, 2012.*
4. *Mertens, K.: Photovoltaik, 3. Auflage, Carl Hensner Verlag, München, 2015*

СИНТЕЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CDSE С РЕГУЛИРУЕМЫМИ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

Вострикова И.В.

Оренбургский ГУ, физический факультет, Оренбург, Россия

Квантовые точки (КТ) CdSe обладают уникальными оптическими свойствами, что делает их перспективным материалом для применения в самых различных областях. КТ

применяются в дисплеях, светоизлучающих диодах, в качестве активной среды лазеров и т.д. Перспективным, также, является их использование в качестве флуоресцентных меток в различных приложениях биоанализа – от иммунохимических тест-методов до визуализации тканей и отслеживания лекарственных веществ в организме.

В данной работе квантовые точки CdSe получались с помощью синтеза в водной среде [1-3]. В этой методике не нужен нагрев до значительных температур, используемые реагенты сравнительно малотоксичны, получаемые наночастицы хорошо растворимы в водных средах, поэтому их можно использовать в различных биологических системах. Схема синтеза приведена на схеме ниже. В качестве источника атомов кадмия использовался $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ и Na_2SeO_3 – в качестве источника атомов селена. Тиогликолевая (меркаптоуксусная) кислота играла роль хелатирующего агента поверхности квантовых точек. Образование КТ происходит при повышении температуры раствора выше $50\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}$.

Реакция протекает интенсивнее при более высоких температурах раствора, и квантовые точки, соответственно, получают другого размера. Для уменьшения дисперсии частиц по размерам важен быстрый нагрев раствора до требуемой температуры и устранение градиента температур в реакционной зоне. Этого можно достичь с помощью СВЧ активации образцов [3]. В нашем случае экспозиция образца в СВЧ поле в течение 10 секунд соответствовала температуре порядка $55\text{ }^\circ\text{C}$, для экспозиции 15 секунд – $70\text{ }^\circ\text{C}$, 20 секунд – $85\text{ }^\circ\text{C}$, 25 секунд – $95\text{ }^\circ\text{C}$.

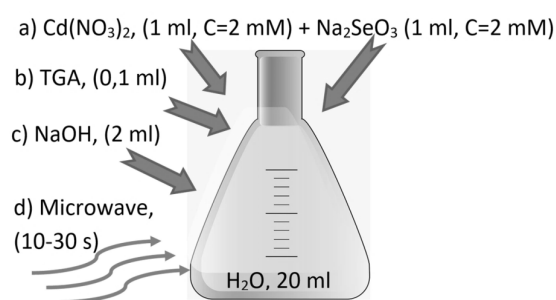


Рис. 1. Схема синтеза квантовых точек CdSe в водной среде.

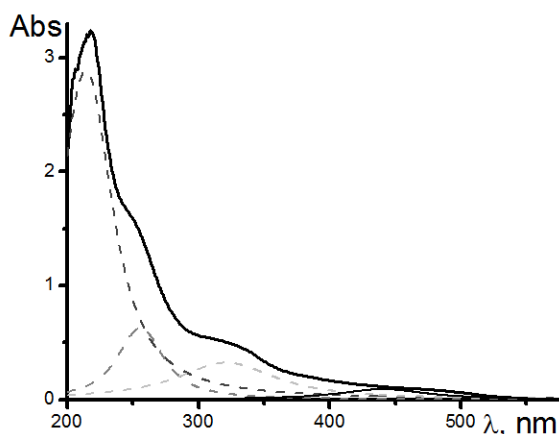


Рис. 2. Аппроксимация спектра поглощения водного раствора КТ лоренцевыми кривыми.

Образцы отличаются высокой оптической и химической стабильностью, что важно для применения последних в различных приложениях нанопотоники, биоанализа и т.д.

Далее приведены результаты экспериментов по изучению влияния температуры синтеза КТ CdSe в водном растворе на их оптические свойства. Абсорбционные характеристики растворов КТ регистрировались на спектрофотометре Т70 с кварцевой кюветой. На флуорометрической установке были сняты спектры люминесценции образцов. Оптическое возбуждение растворов осуществлялось и УФ диодом на длине волны 360 нм.

Таблица 1

Номер линии	1	2	3	4
Длина волны, нм	440	320	255	215
Ширина линии, нм	70	80	40	40
Сила осциллятора, отн.ед.	1	4,5	4	20
Энергия перехода, эВ	2,7	3,7	4,6	5,5

Как видно из рисунков 3-4 время экспозиции образцов в СВЧ поле существенно влияет на поглощение и люминесценцию растворов КТ. У образцов, приготовленных при более высоких температурах, спектры поглощения сдвигаются в длинноволновую область и возрастают по амплитуде. Максимум линии люминесценции также испытывает сдвиг в длинноволновую область.

Abs

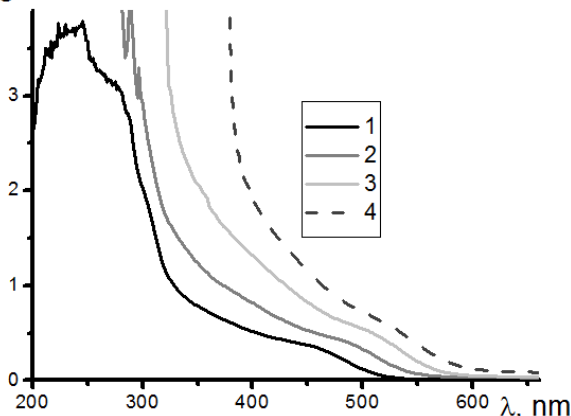


Рис. 3. Спектры поглощения водных растворов КТ при различном времени активации СВЧ полем на этапе синтеза. 1) 10 секунд ($t \sim 55$ 0С), 2) 15 секунд ($t \sim 70$ 0С), 3) 20 секунд ($t \sim 85$ 0С), 4) 25 секунд ($t \sim 95$ 0С)

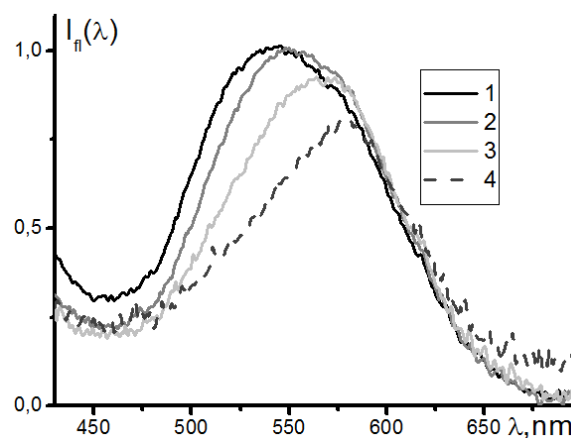


Рис. 4. Спектры люминесценции водных растворов КТ при различном времени активации СВЧ полем на этапе синтеза. 1) 10 секунд ($t \sim 55$ 0С), 2) 15 секунд ($t \sim 70$ 0С), 3) 20 секунд ($t \sim 85$ 0С), 4) 25 секунд ($t \sim 95$ 0С). Возбуждение на линии волны 360 нм

Дальнейшие исследования и разработки позволят создать, например, биометки и маркеры для медицинских исследований, дисплеи на квантовых точках. Лазеры на КТ обладают большим коэффициентом усиления, более высокой рабочей температурой, для них необходима меньшая пороговая плотность тока, ими легче управлять, чем традиционными полупроводниковыми лазерами.

E-mail: iirina.vostrikova@inbox.ru

Литература

1. Hodlur R.M., Rabinal M.K. // *Chemical Engineering Journal*. – 2014. – V. 244. P. 82–88.
2. Wang J., Han H. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2010. – V. 351. P. 83–87.
3. Wada Y., Kuramoto H., Anand J., Kitamura T., Sakata T., Mori H., Yanagida S. // *Journal of Materials Chemistry*. – 2001. – V. 11. – P. 1936-1940.

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ БАКТЕРИЙ МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Гончарова Т.С., Пылев И.С.

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: goncharova.ts15@physics.msu.ru, pylev.is15@physics.msu.ru

Устойчивость микроорганизмов к антибиотикам – это важная проблема, представляющая опасность для здоровья людей и имеющая серьезные последствия для мировой экономики. Каждый день фиксируются новые штаммы, не подверженные влиянию известных препаратов, и их число постоянно увеличивается. В 2017 году в США был зафиксирован первый случай смерти от инфекции, устойчивой ко всем разрешенным в стране антибиотикам.

Исследование кинематики бактерий является важным физическим принципом для создания качественных и быстродействующих тестов, предназначенных для исследования антибиотикорезистивности микроорганизмов. Известно, что бактерии совершают

собственные колебания за счет мембраны и дополнительных органелл (например, жгутиков). При воздействии на бактериальные клетки антибиотиком движение становится броуновским вследствие гибели микроорганизмов. Таким образом, можно предположить, что с помощью зонда для атомно-силовой микроскопии при закреплении живых бактериальных клеток на его поверхности возможно детектировать изменение частоты колебаний кантилевера.

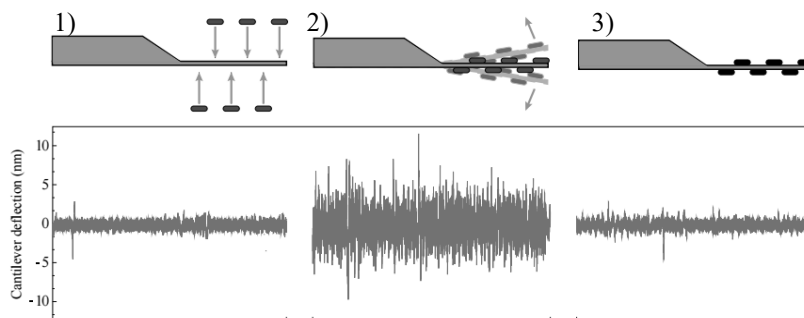


Рисунок 1. Влияние движения бактерий на колебания кантилевера. 1) колебания кантилевера без бактерий; 2) колебания кантилевера с прикрепленными живыми бактериями увеличиваются по амплитуде; 3) колебания кантилевера становятся прежними после гибели бактерий [1].

Основной задачей данной работы является проверка предложенного принципа. Главной целью является создание прибора, предназначенного для быстрого детектирования микроорганизмов в воздухе и воде.

Литература:

1. S. Kasasa, F.S. Ruggeria, C.Benadibaa, C.Maillarda, P. Stupara, H.Tournuc, G.Dietlera, G.Longo // «Detecting nanoscale vibrations as signature of life» // Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 112 no. 2, 378–381, 2015

ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПОДВЕШЕННЫХ НАНОСТРУКТУР

Дорофеев А.А

МГУ имени М.В.Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

E-mail: aa.dorofeev@physics.msu.ru

В последние годы активно разрабатываются и исследуются наноэлектромеханические системы (НЭМС). Такие структуры вызывают интерес как для фундаментальных, так и для прикладных исследований [1]. НЭМС крайне перспективны для создания сверхчувствительных детекторов массы [2], силы [3], давления [4] и смещения [5]. Основной элемент НЭМС – механический резонатор. В сенсорах на основе НЭМС нанорезонаторы часто сопряжены с оптическими или электронными преобразователями. Такие устройства дают возможность исследовать даже квантовые эффекты в механических системах [6]. Механические резонаторы сверхмалых размеров являются также эффективным инструментом в понимании свойств сверхтекучих жидкостей [7].

В работе предложена технология изготовления наноэлектромеханических резонаторов на основе подвешенных кремниевых нанопроводов. Структуры изготавливались из материала «кремний на изоляторе» с толщиной верхнего слоя кремния 110 нм и толщиной оксида кремния 200 нм. При изготовлении использовались стандартные КМОП технологические процессы: электронная литография с применением позитивного резиста, реактивно-ионное и жидкостное травления, электронно-лучевое напыление

тонких металлических пленок (Al, Cr). Изготовленные структуры могут быть использованы в качестве сверхчувствительных датчиков массы, смещения, силы, ускорения и давления.

Было изготовлено и изучено несколько серий образцов НЭМС на основе подвешенных кремниевых нанопроводов с размерами $L = 2...5$ мкм, $h = 130$ нм, $w = 50...150$ нм. Механические характеристики образцов были исследованы с применением магнитодвижущего метода.

Резонансные характеристики представленных структур изучались в вакууме, в магнитных полях до 5 Тл при температуре 20 мК и в частотном диапазоне до 500 МГц с полосой измерения 200 Гц. Форма частотной характеристики коэффициента прохождения сигнала, обусловленная наведением отрицательной электродвижущей силы при колебании проводника в магнитном поле, имела характерный минимум на резонансной частоте. В ходе исследования были получены значения резонансных частот для нанопроводов с длиной 5, 3 и 2 мкм. Они оказались равными 32.46, 71.99 и 150.25 МГц, соответственно, что совпадает с теоретическими оценками, полученными из теории Эйлера-Бернулли. Внутренняя добротность нанорезонатора длиной 5 мкм составила $3.62 \cdot 10^4$.

Проведенные измерения предоставили возможность оценить предельную чувствительность и диапазон измеряемых масс для представленных резонаторов в качестве детекторов. Предельная чувствительность по массе в линейном режиме составила $\sim 6 \cdot 10^{-20}$ г/Гц^{1/2} (в полосе 200 Гц). При этом оцененная минимальная детектируемая масса составила $\sim 8.5 \cdot 10^{-19}$ г.

Литература

1. Гринберг Я.С., Пашкин Ю.А., Ильичев Е.В., "Наномеханические резонаторы", Успехи физических наук 2012. 182, N 4, С. 407-436. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201204c.0407>.
2. S.T. Bartsch, M. Arp, and A.M. Ionescu, "Junctionless Silicon Nanowire Resonator", IEEE Journal of the Electron Devices Society 2(2), 8 (2014); <https://doi.org/10.1109/JEDS.2013.2295246>.
3. H. Mamin and D. Rugar, "Sub-attoneutron force detection at millikelvin temperatures", Appl. Phys. Lett. 79, 3358 (2001); <https://doi.org/10.1063/1.1418256>.
4. X. Zhao, J.M. Tsai, H. Cai, X.M. Ji, J. Zhou, M.H. Bao, Y.P. Huang, D. L. Kwong, and A.Q. Liu, "A nano-opto-mechanical pressure sensor via ring resonator", Opt. Express 20(8), 8535 (2012); <https://doi.org/10.1364/OE.20.008535>.
5. R.G. Knobel and A.N. Cleland, "Nanometre-scale displacement sensing using a single electron transistor", Nature 424, 291 (2003); <https://doi.org/10.1038/nature01773>.
6. Naik, O. Buu, M.D. LaHaye, A.D. Armour, A.A. Clerk, M.P. Blencowe, and K.C. Schwab, "Cooling a nanomechanical resonator with quantum back-action", Nature 443, 193 (2006); <https://www.nature.com/articles/nature05027>.
7. D. I. Bradley, R. George, A.M. Gu'enault, R.P. Haley, S. Kafanov, M.T. Noble, Yu.A. Pashkin, G.R. Pickett, M. Poole, J.R. Prance, M. Sarsby, R. Schanen, V. Tsepelin, T. Wilcox, D.E. Zmiev, Sci.Rep.7, 4876(2017); <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04842-y>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ СЕРИИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Ефремова А.А.

*Юношеская специализированная научно-исследовательская школа
(ЮСНИШ) «Основы нанотехнологий» при ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел*

Актуальность: кремний является основой современной микро- и наноэлектронной техники и находит широкое практическое применение в медицине, металлургии и биотехнологических системах. В силу уменьшения рабочих элементов кремния, использу-

емых на производстве, зачастую обнаруживают особые свойства, связанные с наноразмерами. В связи с этим становится необходимо разрабатывать новые методики изготовления наноматериалов и исследовать их. Квантово – размерные эффекты проявляются при механических, химических и физических воздействиях на поверхность кристалла, играя ключевую роль в процессе модификации поверхности. В данной работе исследуются кристаллы кремния на различных этапах технологической подготовки.

Целью данной работы является исследование поверхности кристаллов кремния после серии производственно – технологических обработок.

В качестве образцов использовались кристаллы монокристаллического кремния с ориентацией (111) (рис. 1.).

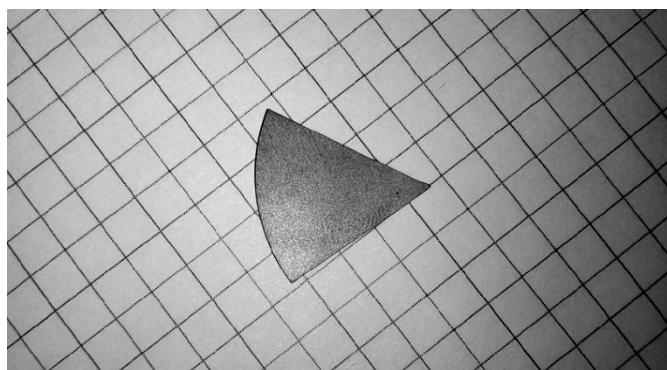


Рис. 1. Кристаллы монокристаллического кремния с ориентацией (111).

После резки кремниевых слитков полученные пластины подвергаются шлифовке, в результате которой удаляется нарушенный слой на поверхности кристалла. Одновременно решаются такие задачи, как:

- получения плоскопараллельности сторон пластины;
- доведения толщины пластины до нужной величины;
- получения требуемой чистоты обработки поверхности пластины.

Причем шлифовка в зависимости от требований этапа изготовления полупроводникового прибора, может быть, как двусторонней, так и односторонней. Таким образом, в процессе шлифовки формируются геометрические формы пластины нужного размера, но после данной операции на поверхности полупроводника остается нарушенный слой, который существенным образом влияет как на дальнейшую технологическую обработку (травление, окисление), так и в конечном счете на параметры полупроводниковых приборов, особенно с мелкими (меньше 1 мкм) активными слоями. Поэтому контроль структуры нарушенного слоя и способы его удаления представляют важную задачу современной планарной технологии.

Для уменьшения шероховатости поверхности и глубины нарушенного в кристалле слоя после шлифовки проводится полировка пластин. Она необходима только для обработки рабочей стороны пластины, т.е. стороны, на которой непосредственно создаются структуры элементов, но исследуемые пластины, в силу специфики конструкции силовых приборов, имеют полировку с обеих сторон.

Полировка может осуществляться механическим способом, с использованием алмазной пасты и мелкодисперсных абразивов из окислов редкоземельных элементов с величиной зерна 0,1 - 0,3 мкм, так и химическим способом, с использованием полирующих травителей.

Структуру нарушенного слоя полупроводниковой пластины после резки, шлифовки и полировки условно можно представить в виде четырех последовательных областей: верхняя область - микрорельеф, под ней расположена область микротрещин, далее область, содержащая петли и скопления дислокаций, затем следует слой кремния, где число дислокаций повышено по сравнению с остальным объемом полупроводника (рис. 2).

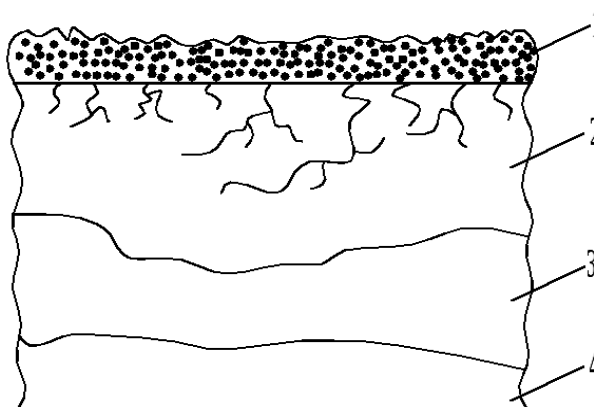


Рис. 2. Структура нарушенного при механической обработке поверхностного слоя: 1 - рельефный слой; 2 - микротрещины; 3 - область скопления дислокаций; 4 - монокристалл.

После серии производственно – технологических операций структура поверхности образцов была исследована с помощью металлографического (МГ) микроскопа Альтами MET1 М и атомно – силового (АСМ) СММ – 2000 (рис. 3, 4).

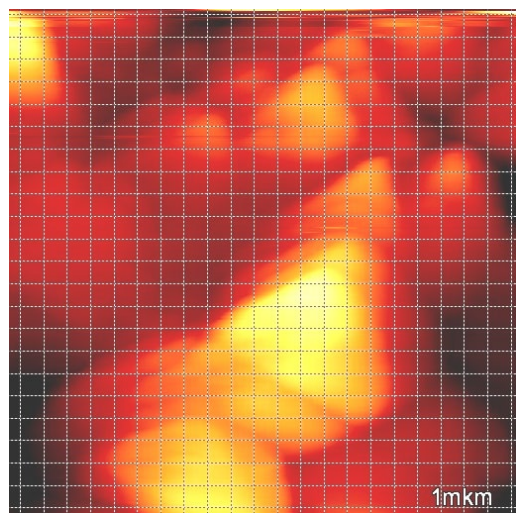


Рис. 3. АСМ – кадр поверхности кристалла кремния. Класс шероховатости: 10. Ориентация (111).

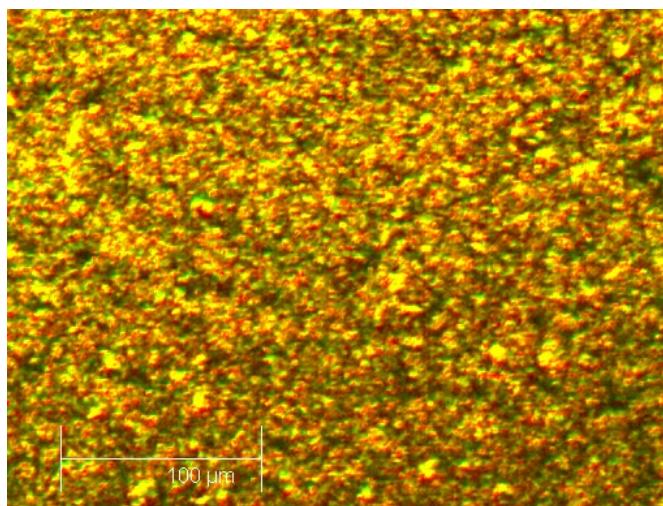


Рис. 4. МГ – кадр поверхности кристалла кремния. Класс шероховатости: 10. Ориентация (111). Увеличение: 400.

Объектный состав поверхности представляет собой неоднородную по формам и размерам структуру со множеством выступов и впадин различной высоты и глубины микрометрового масштаба. При этом при переходе от одного участка поверхности к другому на кристалле происходит изменение интерфейса. Неравномерность распределения структур по размеру и расположению является фактором риска и повышает вероятность брака при технологическом процессе формирования элементов электроники на основе кремниевых пластин.

При этом большая часть диагностированных участков поверхности имеет перепад высот в среднем 500 нм. Однако, локальные участки поверхности имеют перепад высот до 673 нм. Данные локальные участки имеют более выраженную развитость рельефа, что свидетельствует о наибольшей дефектности поверхностного слоя на них. Вероятнее всего, именно эти участки являются центрами формирования бракованных изделий, изготавливаемых на основе кремниевых пластин. Данное обстоятельство указывает, с одной стороны, на необходимость разработки новых методов контроля структуры поверхности пластин, с другой – уточнение параметров обработки.

Таким образом, результаты первого анализа показали сильное различие между шлифованными и полированными образцами, в следствие чего было сделано заключение о целесообразности введения контроля дефектности поверхности кремниевых пластин на каждом технологическом этапе производства. В качестве аналитических методов предлагалось использовать металлографические и АСМ – методы.

Результаты последнего анализа показали наличие отдельных локальных участков с наиболее выраженной дефектностью, что требует подробного изучения самих способов полировки и выяснение причин появления данных участков. Также следует отметить, что необходимо рассматривать в качестве возможных причин появления областей повышенной дефектности исходный кристалл и параметры его роста.

Литература

1. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
2. ГОСТ 2.309-73. Обозначения шероховатости поверхностей.
3. Учебное пособие Т.Ю. Черкасова «Основы кристаллографии и минералогии».

СТРУКТУРНЫЕ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ ИОННОЙ СТИМУЛЯЦИИ В АТМОСФЕРЕ АЗОТА

Завидовский И.А., Стрелецкий О.А.

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: ilyazavid@yandex.ru

Углеродные пленки, структура которых модифицирована при помощи допирования азотом, благодаря разнообразию своих свойств находят применение в биологической визуализации, солнечной энергетике и др. приложениях [1,2].

В нашей работе были исследованы углеродные пленки, изготовленные методом ионно-стимулированного импульсно-плазменного распыления графита в атмосфере смеси аргона и азота. В ходе процесса напыления осуществлялась стимуляция роста пленок ионами различных энергий (от 200 до 700 эВ) при фиксированном токе холлового ионного источника.

Данные просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) позволяют сделать вывод о росте графитовой компоненты в полученных образцах при увеличении энергии ионной стимуляции. Об этом свидетельствует рост интенсивности линии 3.35 Å (см. рис. 1), отвечающей межплоскостному расстоянию графита, который коррелирует с увеличением энергии ассистирующих ионов [3].

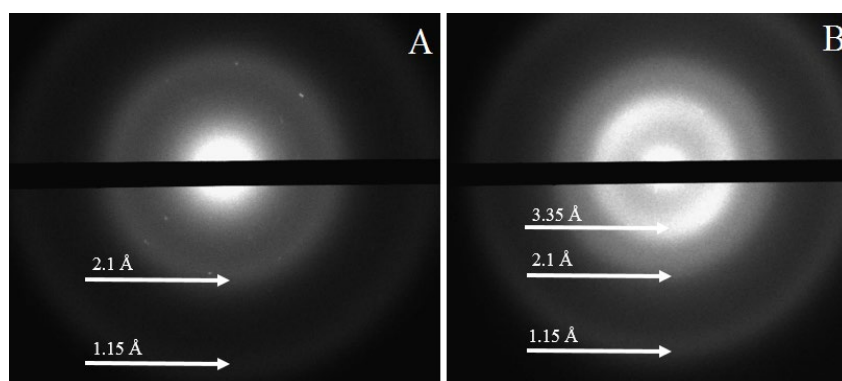


Рис. 1. Дифракционные картины образцов, нанесённых без ионной стимуляции (А) и при энергии ионной стимуляции 400 эВ (В).

Для исследуемых пленок были получены данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), благодаря которым были установлен химический состав образцов. Было установлено, что доля атомов азота в структуре растёт с увеличением энергии ионной стимуляции. Разложение пика C1s и N1s на гауссовы составляющие позволило получить данные о химических связях углерода и азота в структуре [4].

В образце присутствует и значительная доля углерода sp^3 -гибридизации (как пик 285,5 эВ, так и пик 286 эВ можно отнести к C-C связи с преимущественной sp^3 -гибридизацией). В то же время, положение пика C-N (286 эВ) и N1s (399,8 эВ), согласно литературным данным [5, 6], свидетельствует о том, что атомы азота связаны преимущественно с sp^2 -гибридизованными атомами углерода (рис. 1). Таким образом, именно внедрение азота в структуру плёнки, по нашему предположению, приводит к её перестройке и росту графитовой фазы.

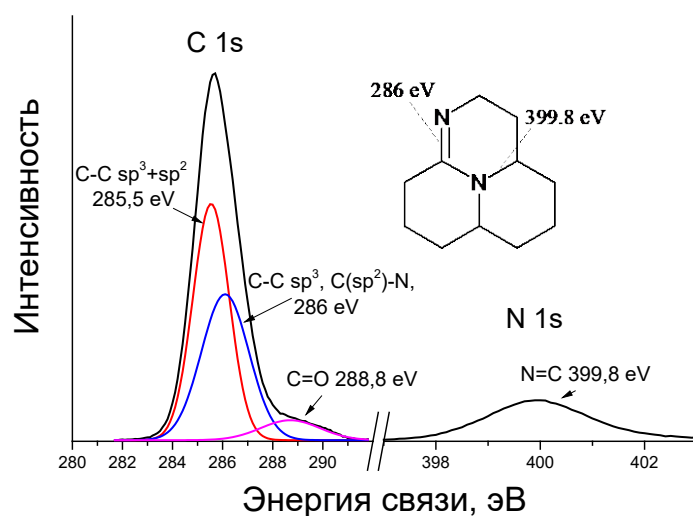


Рис.2. Разложение РФЭС C1s и N1s линии образца, нанесённого в атмосфере азота в условиях ионной стимуляции.

Полученные данные показывают увеличение интенсивности дифракционной линии 3.35 Å, свидетельствующее об увеличении доли sp^2 -гибридизованного углерода в структуре пленок под действием ионной стимуляции. Согласно данным РФЭС, ионная стимуляция приводит к эффективному внедрению азота в структуру (рис.2) и к началу роста графитовых нанокластеров.

Литература

1. J. Liu, H. Wang, M. Antonietti. Graphitic carbon nitride “reloaded”: emerging applications beyond (photo)catalysis // Chem. soc. rev. 2016. № 45.
2. Jia L., Wang H., Dhawale D., Anand C., Wahab M.A., Ji Q., Arigab K., Vinuab A. Highly ordered macro-mesoporous carbon nitride film for selective detection of acidic/basic molecules // Chem. Commun. 2014, № 50(45).
3. Wang Q., Wang C., Wang Z., Zhang J., He D. Fullerene nanostructure-induced excellent mechanical properties in hydrogenated amorphous carbon // Applied Physics Letters. 2007, № 91.
4. Ronning C., Feldermann H., Merk R., Hofsass H. Carbon nitride deposited using energetic species: A review on XPS studies // Physical Review B. 1988, №4.
5. Смирнова Т.П., Бадалян А.М., Борисов В.О., Каичев В.В., Бахтурова Ф.Ф., Рахлин В.И., Воронков М.Г., Мирсков Р.Г. Плазмохимический синтез плёнок карбонитрида кремния // Исследовано в России. 2004. Том 7.
6. Sivkov A., Pak A., Shanenkov I., Kolganova J., Shatrova K. Synthesis of ultra dispersed graphite-like structures doped with nitrogen in supersonic carbon plasma flow // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2014, № 66.

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И КВАНТОВЫХ СВОЙСТВ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Зеленский В.С., Цысарь К.М.

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: vladimir.zelenskiysu@yandex.ru

Методами классической молекулярной динамики исследованы механические свойства серебряных пленок, изучена зависимость упругих характеристик пленок от толщины. Методами первопринципной молекулярной динамики были исследованы квантовые оптические свойства тонких пленок серебра. Определена взаимосвязь между толщиной пленок и их квантовыми свойствами и проводимостью.

Изучение оптических, поглощающих и проводящих свойств металлических пленок сегодня связано с развитием ряда важных направлений технологического прорыва. Это и солнечная энергетика, и создание покрытий электромагнитной защиты, и развитие компьютерных технологий. Современный этап развития технологий требует от исследователей поиска новых материалов, обладающих оптимальными поглощающими характеристиками с минимальной толщиной и максимальными прочностными характеристиками [1,2]. В представленной работе проводится теоретическое исследование квантовых свойств пленок серебра методом первопринципной молекулярной динамики, реализованной в программном коде Vienna Ab-initio Simulation Package (VASP)[3]. Исследование механических свойств металлических пленок серебра проведено с помощью программного кода LAMMPS, основанном на методе классической молекулярной динамики [4].

Методом квантовой молекулярной динамики изучены оптические характеристики тонких серебряных пленок. В работе рассчитаны проводимость и коэффициенты поглощения наноразмерных тонких пленок в СВЧ и ИК диапазонах. Обнаружен квантовый размерный эффект в зависимости поглощающих и проводящих свойств нанопленок от толщины, исследовано влияние упругих деформаций пленок на квантовые свойства. Рассчитаны критические напряжения и деформации растяжения пленок, которые приводят к необратимым изменениям их квантовых свойств. Полученные значения критических деформаций существенно ниже тех, что приводят к механическим разрушениям, которые могут быть идентифицированы методами неразрушающего контроля.

Литература

1. Gong J., “Thickness Dispersion of Surface Plasmon of Ag Nano-thin Films: Determination by Ellipsometry Iterated with Transmittance Method” // Scientific Reports, 2015, Vol. 5, P. 9279
2. Tsysar K. M., Andreev V. G., Vdovin V. A. “Effective optical constants of silver nanofilms calculated in wide frequency range” // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, Vol. 10224, P. 1022408-1(2016).
3. Kresse G., Furthmüller J. “Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set” // Phys. Rev. B 1996 Vol. 54, P. 11169—11186
4. G.E. Norman, V.V. Stegailov, Method of classical molecular dynamics: contribution to the foundations of statistical physics, 141700, p.4-8

АНАЛИЗ И ОПИСАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК И ИХ МОРФОЛОГИИ

Иванченко И.О., Арутинов Н.Э.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Крым
+79787873302 ivanchenkoigor@gmail.com

Первым и одним из основных методов изучения тонкопленочных структур является оптическое изучение поверхности и рельефа. От характера поверхности и структуры

рельефа подобных образцов зависят их физические свойства. Из вышесказанного можно заключить, актуальность данных исследований состоит в сопоставлении толщин и морфологии тонкопленочных структур с их физическими свойствами, для последующего применения в области наноэлектроники.

Цель данного исследования состояла в анализе и описании поверхности пленок, активные углеродные слои которых были сформированы методом осаждения их жидкой фазы.

Исследуемые образцы были получены из растворов C_{60} в пяти различных растворителях. В рамках данного эксперимента рассмотрено формирование и распределение отдельных микрочастиц и их цепочек в осажденных материалах.

Оценка и фотоанализ микрогеометрии, поверхности и измерение толщин углеродных пленок производились с помощью микроинтерферометра ЛОМО МИИ-4М [1]. В целях повышения точности при измерении и аналитике толщин пленок использовалось ПО Optic Metr [2]. На снимках можно отметить появление отдельных объектов и сформированные цепочки. Зависимость поверхности от концентрации видна при рассмотрении 1 миллилитра раствора C_{60} и растворителя CH_2CL_2 . В этом случае видна относительно однородная поверхность, значительно выступающая над подложкой.

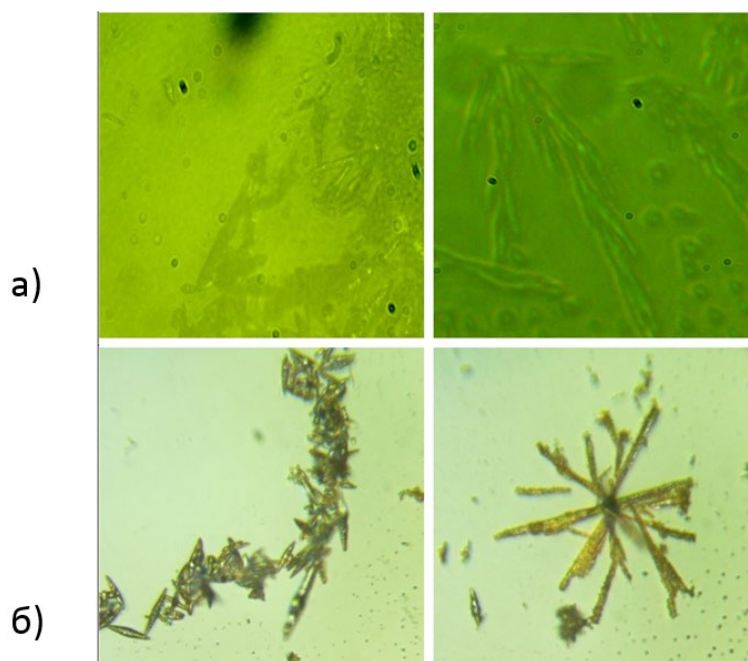


Рис.1. Раствор C_{60} и растворителя CH_2CL_2 а) 1мл б) 0,15 мл.

В рамках поставленной задачи были исследованы тонкие пленки фуллеренов, полученные посредством осаждения взвеси C_{60} в пяти различных растворителях. Полученные в ходе исследования зависимости позволяют судить о структуре и поверхности образцов эти сведения необходимо учитывать при синтезировании пленок, обладающих необходимыми свойствами.

Литература

1. Мазин А.С., Гурченко В.С., Тютюник А.С., Шевченко А.И. Влияние структурных особенностей фуллеренсодержащего материала на его резистивные свойства при осаждении из раствора ISSN 1729-5459. Экологический вестник научных центров ЧЭС. Т. 15. №4. С. 85–92 (2018).

2. Мешалкина А. Ю., Андриеш И. С., Абашкина В. Г., Присакара А. М., Тридуха Г. М., Акимова Е. А., Енакис М. А. Цифровой метод измерения толщины нанометровых пленок на базе микроинтерферометра МИИ-4 (Журнал Электронная обработка материалов).

ТУННЕЛЬНЫЙ ТОК В МОП-ТРАНЗИСТОРЕ

Исаева А.А.

МГТУ имени Н.Э. Баумана, факультет «Маш. технологии», Москва, Россия
E-mail: Isaevanastasiya13@gmail.com

Островковые тонкие пленки и наноструктуры (ОТП и ОНС) вызывают большой интерес ввиду уменьшения размеров приборов и устройств. Массивы островков применяются для получения новых свойств или усовершенствования известных в лазерах, газовых сенсорах, светодиодах, элементах памяти, при выращивании углеродных нанотрубок, также могут OTP алюминия использоваться в МОП-транзисторах в качестве проводящего слоя [1].

Через проводящий слой транзистора на основе ОНС проходит туннельный ток по пути наименьшего сопротивления между контактными площадками через массив островков (рисунок 1). Электроны от истока 1 проходят к стоку 3, выбирая из массива 2 островки, расстояние между которыми минимально.

На кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана реализован стенд контроля роста OTP в процессе формирования [2]. Контроль осуществляется с помощью пикоамперметра, позволяющего фиксировать малые токи.

При формировании ОНС с использованием пикоамперметра, можно заметить, что образуются пики и провалы на зависимости силы туннельного тока от времени формирования OTP (рисунок 2). Провалы образуются при коалесценции островков, в этом случае расстояние между соседними островками увеличивается и ток понижает свое значение. Пики образуются при появлении новых островков, когда расстояние между соседними островками уменьшается, что приводит к росту значения туннельного тока.

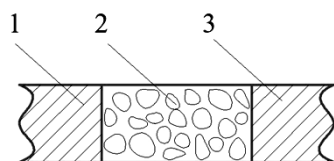


Рис. 1 Проводящий слой МОП-транзистора: 1 – исток; 2 – ОНС алюминия; 3 – сток.

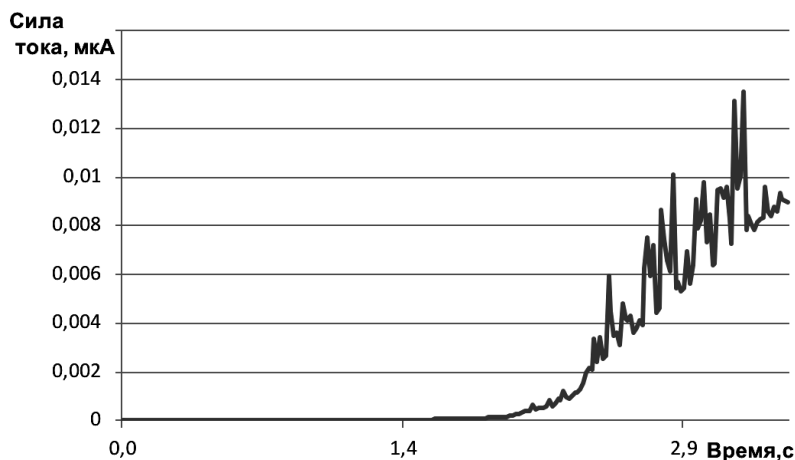


Рис. 2. Диаграмма изменения силы тока во времени в процессе нанесения покрытия из меди.

МОП-транзистор на основе массива островков обладает рядом преимуществ: увеличенное быстродействие, так как туннельный ток обладает более высокой скоростью вследствие туннелирования. Также, благодаря использованию островковых наноструктур снижается энергопотребление и размеры проводящего слоя, что приводит к миниатюризации изделия и снижению его стоимости.

Литература

1. Сидорова, С.В. Расчет технологических режимов и выбор параметров оборудования для формирования островковых тонких пленок в вакууме: Автореф. дис. ... канд. техн.

наук: 05.27.06: защищена 27.10.2016/Сидорова Светлана Владимировна. – Москва, 2016. – 16 с.

2. Sidorova S., Pronin M., Isaeva A, 2018, *International Russian Automation Conference*, Automated Unit for Control of Initial Stages of Metal Islands Thin Films and Nanostructures Growth.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Кратко А.О, Горбунов Н.Г.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Физико-технический институт, Симферополь, Крым
+79785685375, alexkratko@gmail.com

В современном мире нанотехнологии играют значительную роль в микроэлектронной промышленности. Характеристики нанометровых объектов в зависимости от их размеров меняются в значительном диапазоне. Следовательно, все характеристики нуждаются в углубленном изучении. Среди нанометровых объектов можно выделить пленки алюминия, которые могут применяться в качестве проводящих слоев микроэлектронных приборов [1, 2].

Нами исследовались пленки алюминия толщиной 3 нм, полученные методом ионного напыления в инертной среде аргона. В качестве подложек использовались стекло, стеклокерамика (ситалл), и гибкий полимерной материал (Iavsan, PET).

При такой малой толщине пленки металла имеют неоднородную структуру, в частности могут наблюдаться отдельные островковые образования. В связи с этим их физические характеристики могут значительным образом отличаться от характеристик толстых пленок, которые уже хорошо изучены.

Одним из важнейших исследований, проведенным нами, было измерение зависимости проводимости от приложенного напряжения и построение их вольт-амперных характеристик (ВАХ). Для получения экспериментальных данных нами использовался прибор Keysight (Agilent) B1500A, который позволяет исследовать электрические характеристики как проводящих так и диэлектрических материалов с высокой точностью. Снятие тока с образцов осуществлялось прижимными контактами. Для увеличения точности получаемых результатов каждый материал был исследован в нескольких точках, после чего производилось усреднение полученных данных.

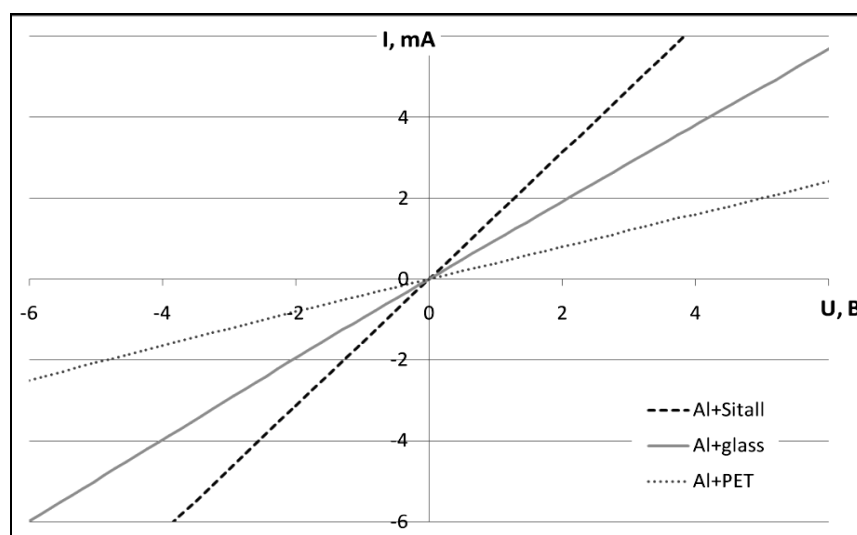


Рис.1. ВАХ пленок алюминия толщиной 3 нм на различных подложках в диапазоне от –6 до 6 В.

В общем ВАХ представляют линейные зависимости, которые подчиняются закону Ома. Как видно из рисунка 1, наибольшая проводимость наблюдалась у пленок алюминия, нанесенных на ситалловые подложки, наименьшая – на лавсановые. Данные результаты можно объяснить равномерностью поверхности подложки, на который наносилась пленка.

В результате проведенных исследований был сделан вывод о том, что химический состав и структура подложки оказывают влияние на проводимость нанесенных на них тонких пленок алюминия, что следует принимать во внимание при разработке микроэлектронных устройств.

Литература

1. С.П. Арсеничев, Е.В. Григорьев, В.В. Старостенко, Е.П. Таран, И.Ш. Фитаев. Особенности пробоя проводящих пленок при воздействии электромагнитных полей. Материалы 27-й международной крымской конференции "свч-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2017). С. 1225-1231 (2017)

2. В.А.Вдовин. Нанометровые металлические пленки в датчиках мощных свч импульсов. III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г

СОЗДАНИЕ NI-МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА РАЗВИТОЙ 3D ПОВЕРХНОСТИ P-N-ПЕРЕХОДА

Крылова Е.Н.¹, Усков В.С.¹, Старков В.В.²

¹*МИСиС, Инст. новых материалов и нанотехнологий, г. Москва, Россия
ekaterina_krilova@mail.ru, vladis.usckov@gmail.com*

²*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, г. Черноголовка, Россия, starka@iptm.ru*

Один из способов повышения мощности бета-вольтаических источников питания – использование микроканальных кремниевых структур вместо монокристаллических пластин. Очень важен грамотный подбор кремниевой микроканальной структуры и радиоактивного изотопа, выбор способа создания р-п-перехода, т.к. последствием, например, электрохимического травления, является увеличение шунтовой проводимости и токов утечки. Были проведены экспериментальные исследования по устранению проводящих шунтов и минимизации шунтовой проводимости р-п-перехода с глубиной до 0,4- 0,5 мкм при формировании слоя Ni металлизации на поверхности 3D диодной структуры бета-преобразователя.

Для отработки процесса нанесения никеля на внутреннюю поверхность микропор использовался стандартный никель. Процессу высаживания никеля в пористую структуру кремния в литературе уделяется значительное внимание [2-7]. Обычно для этого применяют катодный процесс. В качестве электролита используют так называемый Watts электролит (NiCl₂, NiSO₄) с борной кислотой в качестве буфера. В работе был опробован процесс осаждения никеля в два этапа. Первый этап представлял собой образование субмикронного подслоя природного никеля по реакции замещения Ni кремнием из водного электролита. Второй этап никелирования проводился по реакции восстановления из водного раствора. Результатом осаждения никеля в выбранном режиме явилось короткое замыкание р-п-структуры. Был проведен анализ изображений поперечного скола диодной структуры после осаждения никеля.

В растущем слое никеля наблюдались отдельные островки и впадины. Это свидетельствует о поверхностной неоднородности процесса замещения кремния никелем, лежащего в основе формирования слоя Ni на кремниевой поверхности [3,4]. Более того, никель не только электрически закортит р-п-переход, но и полностью «заместил» кремний, до полного исчезновения кремниевых стенок между порами.

Учитывая отрицательный результат двух стадийного процесса, была исключена вторая стадия и осаждение проводилось из растворов, использованных на первой стадии. Металл достаточно равномерно распределен по всей внутренней поверхности на всю глубину пористого слоя (Рисунок 1). Повышенная шероховатость не привела к увеличению темновых токов, что, очевидно связано с выбором достаточно большой глубины залегания р-п-перехода.

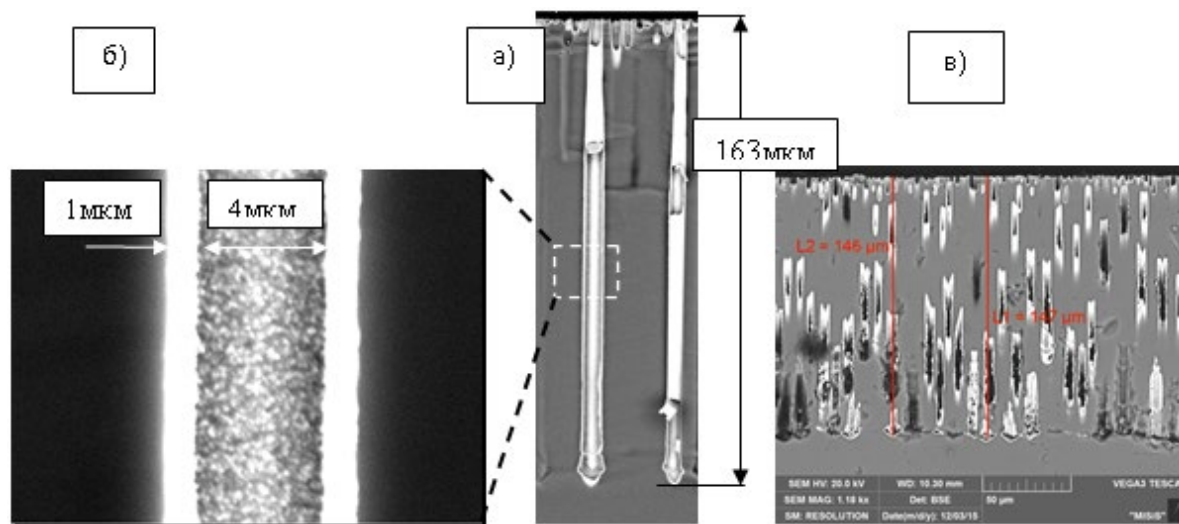


Рис. 1 – Микроканальная 3D структура диода с никелевым контактным слоем.

а) РЭМ изображение двух рядом расположенных пор на произвольном сколе диодной структуры с никелевым контактным слоем; б) Увеличенное РЭМ изображение фрагмента микроканала; в) Изображение косо́го шлифа (10 \times), характеризующее распределение никеля по глубине структуры.

Приведенные в работе оценки экспериментальных результатов позволяют предложить процесс формирования слоя никеля на поверхности мелкозалегающего р-п-перехода 3D структуры с минимальными токами утечки, который предполагает использование одностадийного процесса осаждения Ni с использованием Watts электролита. Дальнейшие усилия, направленные на практическую реализацию процесса формирования сплошного слоя радиоактивного ^{63}Ni в трехмерной диодной структуре по предложенной методике, позволят создавать высокоэффективные бета-вольтаические преобразователи на основе изотопа ^{63}Ni .

Литература

1. Sims, G. H. E.; Juhnke, D. G. /Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1967, 18, 727.
2. P. Granitzer and K. Rumpf. Porous Silicon—A Versatile Host Material. /Materials 2010, 3, 943-998.
3. Ch. Xu, X. Zhang, K. Tu, and Y. Xie. Nickel Displacement Deposition of Porous Silicon with Ultrahigh Aspect Ratio. /Journal of The Electrochemical Society, 154 .3. D170-D174 . 2007.
4. Xi Zhang, K. N. Tu, Y. H. Xie, and C. H. Tung. High Aspect Ratio Nickel Structures Fabricated by Electrochemical Replication of Hydrofluoric Acid Etched Silicon. /Electrochemical and Solid-State Letters, 9.C150-C152 . 2006.
5. Pau Gorostiza, M. Anbu Kulandainathan, Raúl Díaz, Fausto Sanz, Philippe Allongue, and Juan Ramon Morante. Charge Exchange Processes during the Open-Circuit Deposition of Nickel on Silicon from Fluoride Solutions. / Journal of The Electrochemical Society, 147 (3) 1026-1030 (2000)
6. Долгий, А. Л. Электрохимические методы осаждения металлов в пористый кремний для миниатюрных топливных элементов и бета преобразователей энергии / А. Л. Долгий, К. И. Холостов // «Актуальные проблемы физики твердого тела»: сб. докл. Между-нар. науч. конф. В 3 т. Т. 3. – Редкол.: Н.М. Олехнович. – Минск : Изд. центр БГУ. – 20-23 октября 2009. – С. 303-306.

7. A.A. Krasnov, V.V. Starkov, S.A. Legotin, et al. Development of betavoltaic cell technology production based on microchannel silicon and its electrical parameters evaluation. Applied Radiation and Isotopes 121 (2017) 71–75.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МАССИВАХ ПОСТ-ЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ МЕТОДОМ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Липкова Е.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: lipkovaliza@gmail.com

В настоящее время кремниевые нанонити (КНН), и в особенности, КНН, сформированные методом металл-стимулированного химического травления (МСХТ), являются объектом пристального исследования благодаря возможности их использования в микроэлектронике, сенсорике, солнечной энергетике [1]. Легирование КНН открывает новые перспективы для применения их в фотонике, инфракрасной плазмонике и термоэлектрических преобразователях энергии [2, 3]. Однако характерные размеры и морфология нитей, сформированных методом МСХТ, зависят от условий изготовления, поэтому для получения в них высоких концентраций свободных носителей заряда целесообразно проведение легирования после формирования нитей.

В работе исследовались массивы КНН толщиной 7–14 мкм, сформированные методом МСХТ на подложках слаболегированного бором кристаллического кремния с концентрацией СНЗ $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и дополнительно легированные примесью бора. Легирование проводилось путем нанесения на поверхность массивов технологической смеси и дальнейшего отжига в муфельной печи в потоке аргона в диапазоне температур 850–1000 °С. Остатки легирующего состава удалялись путем кратковременного погружения образцов в плавиковую кислоту.

Для определения концентрации СНЗ на германиевой приставке однократного нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с внутренним углом падения 45° фурье-спектрометра Brucker Alpha регистрировались спектры НПВО (рис. 1), которые в дальнейшем моделировались по формулам Френеля [4].

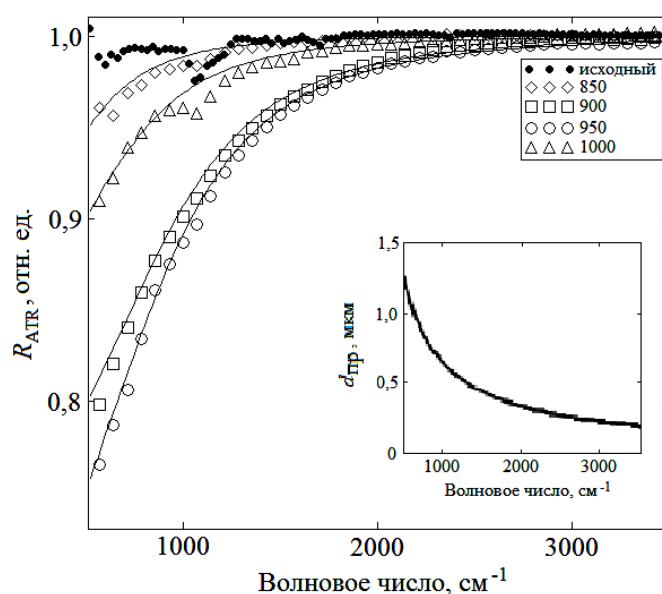


Рис. 1. Спектры НПВО исходного и отожженного при температурах 850, 900, 950 и 1000 оС массива КНН толщиной 7 мкм, сплошные линии – результат моделирования; на врезке – спектральная зависимость глубины проникновения $d_{пр}$ в массивы КНН с пористостью 68%.

Диэлектрическая проницаемость массивов КНН рассматривалась в рамках приближения эффективной среды (пористость массивов оценивалась из СЭМ-изображений) и модели Друде с учетом рассеяния квазиимпульса свободных дырок на поверхности КНН [5]. В этих же приближениях была рассчитана спектральная зависимость глубины проникновения эванесцентной волны в массив КНН $d_{\text{пр}}$ с учетом поглощения на СНЗ, которой соответствует глубина зондирования в $(2-3)d_{\text{пр}}$ [6].

В работе показано, что $d_{\text{пр}}$ практически не зависит от концентрации СНЗ в широком диапазоне ($5 \cdot 10^{18}$ – $5 \cdot 10^{20}$) см^{-3} . Это свидетельствует об одинаковых глубинах зондирования исследованных массивов КНН и целесообразности использования метода НПВО для анализа массивов КНН толщиной ~ 5 мкм и более. Установлено, что в зависимости от температуры термодиффузионного легирования концентрация свободных дырок в слоях КНН изменяется от $5 \cdot 10^{18}$ до $3 \cdot 10^{19}$ см^{-3} и максимальна при температурах отжига 900–950 °С.

Литература

1. Kalyuzhnaya A.S., Efimova A.I., Golovan L.A., Gonchar K.A., Timoshenko V.Y. Formation and optical properties of silicon nanowire arrays // Silicon nanomaterials sourcebook. Hybrid Materials, Arrays, Networks, and Devices. V. 2 by Klaus D. Sattler. Ch 1. 2017, v. 2, 40 pp.
2. Arcangeli A., Rossella F., Tomadin A., Xu J., Ercolani D., Sorba L., Beltram F., Tredicucci A., Polini M., Roddaro S. Gate-Tunable Spatial Modulation of Localized Plasmon Resonances // Nano Lett. 2016, 16, p. 5688–5693.
3. Snyder G.J., Toberer E.S. Complex thermoelectric materials // Materials Science. 2008, v. 7 (2), p. 105-114.
4. Герасимов В.В., Князев Б.А. Особенности спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения в терагерцовом диапазоне // Вестник НГУ. 2008, Т. 3, Вып. 4, с. 97-112.
5. Rodichkina S., Nychporuk T., Pastushenko A., Timoshenko V. Probing of free charge carriers in nanostructured silicon layers by attenuated total reflectance technique // Phys. Status Solidi RRL. 2018, p. 1800224-1800224.
6. Mirabella F.M Jr. Internal Reflection Spectroscopy // Applied Spectroscopy Reviews. 1985, v. 21, p. 45-178.

РАЗРАБОТКА МОЛЕКУЛЯРНОГО ОДНОЭЛЕКТРОННОГО ТРАНЗИСТОРА С КОНФИГУРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОДА ЗАТВОРА СНИЗУ

Лялина А.М., Морозова Е.К.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

E-mail: lyalina.an@yandex.ru

Молекулярный одноэлектронный транзистор – одно из самых перспективных направлений развития современной электроники, поскольку наблюдается тенденция к снижению характерных размеров устройств. Транзистор представляет собой систему из квантовой точки, соединенной с электродами истока и стока туннельными переходами предельно малой емкости. Туннелирование электронов через такую систему происходит коррелировано [1]. Применение таких транзисторов довольно широко: от точнейших измерительных приборов до квантового компьютера и квантового клеточного автомата.

Несмотря на то, что методика создания таких транзисторов в целом уже разработана [2], остается ряд проблем, связанных с реализацией этой методики. Одна из них: утечка заряда с истока на электрод затвора при очень близком расположении затвора к электродам.

В данной работе был разработан метод изоляции, основанный на помещении затвора под электродами сток-исток через прослойку изоляции. Для решения этой технологической задачи, в первую очередь на кремниевой подложке, покрытой диоксидом кремния, наносилась структура подводящих к центральной части нанопроводов: методами контактной фотолитографии формировалась маска из двух слоёв фоторезистов МА EL11 и РММА А2, в этой маске отличительная особенность заключается в том, что в центральной ее части присутствует окно под электрод затвора. Далее на образец напылялся слой золота толщиной 15 нм, под который напылялся 2 нм буферного слоя хрома. После чего проводился «взрыв» маски, удаление резиста со слоями металла на нем.

После этого необходимо было заизолировать затвор, для чего магнетронным напылением наносилось 20 нм диска кремния. Далее, для контакта подводящих проводов с нанопроводами центральной части необходимо было сделать небольшие окна в слое изолятора на подводящих проводах, для чего образец подвергался жидкостному травлению в плавиковой кислоте.

Следующим этапом необходимо было создать наползающие на затвор соединительные провода, а затем отдельно формировать нанопровода. Первым шагом являлось запыление всей подложки золотом толщиной 15 нм методом магнетронного напыления. Следующим шагом было необходимо сформировать алюминиевую маску, через которую затем будет травиться золото. Наносился резист РММА А4, а затем проходила электронно-лучевая литография. После этого на подложку методом термического напыления осуществляется нанесение слой алюминия толщиной 20 нм. После напыления образец необходимо поместить в нагретый ацетон для проведения процедуры «lift-off». В результате получались сформированные на пленке золота провода из алюминия. Теперь структура готова для травления не закрытого алюминия золотом.

После процесса ионно-химического травления на структуре остается золото только под алюминием. Следующим шагом является удаление маски алюминия в слабом растворе щелочи КОН в деионизованной воде.

Одним из последних шагов на технологическом пути к созданию необходимой структуры является формирование нанопроводов. На образце создаётся маска методом нанолитографии с помощью резиста РММА А4. Далее на образец методом термического напыления наносился буферный слой хрома толщиной 0.5 нм, а также 15 нм золота. После чего образец помещался в нагретый ацетон для проведения процедуры «lift-off». В конечном итоге, образец готов.

У готовых образцов было проведено исследование качества (проводимости) слоя изолятора. Между электродом затвора и проводом «минуса» подавалось напряжение до 50 В – во всех случаях сопротивление было около 1 ТОм, что соответствует входному сопротивлению установки. Этот факт делает нашу структуру пригодной для формирования зазоров с проводящим островом и корректного измерения всех характеристик одноэлектронных транзисторов с изолированным единым затвором. Такая структура является уникальной в своей области.

Таким образом, в данной работе разработан и реализован вариант молекулярного нанотранзистора с изолированным затвором, расположенным под нанопроводами, и показано, что сопротивление изоляции порядка 1 ТОм.

Литература

1. Konstantin K. Likharev: Single-electron devices and their applications, Proceedings of the IEEE 87, no. 4, 606-632 (1999).
2. Single-electron transistor based on intramolecular single-atom charge center / V. Gaydamachenko, E. Beloglazkina, R. Petrov et al. // Micro- and Nanoelectronics – 2016: Proceedings of the International Conference (October 3–7, 2016, Zvenigorod, Russia): Book of Abstracts. — MAKS Press Moscow, 2016. — P. 170.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ВАРИАЦИИ СОСТАВА ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ МЕМРИСТИВНЫХ НАНОУСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Макарецв И.В., Королев Д.С., Белов А.И., Михайлов А.Н.

Национальный исследовательский Нижегородский ГУ им. Н.И. Лобачевского,
Нижегород, Россия
E-mail: ilya0296@gmail.com

Для решения задач, трудно поддающихся реализации на современных цифровых компьютерах, например, задач обработки изображений и неточно определенных задач, необходимо построить систему, которая обрабатывала бы информацию подобно тому, как это делает человеческий мозг. Для создания таких вычислительных машин необходимы устройства, которые могли бы работать не с цифровым, а с аналоговым представлением данных. В качестве устройства, способного имитировать работу биологического синапса, одного из основных составляющих мозга, может выступать тонкопленочная структура, в которой наблюдается эффект резистивного переключения – мемристовая структура.

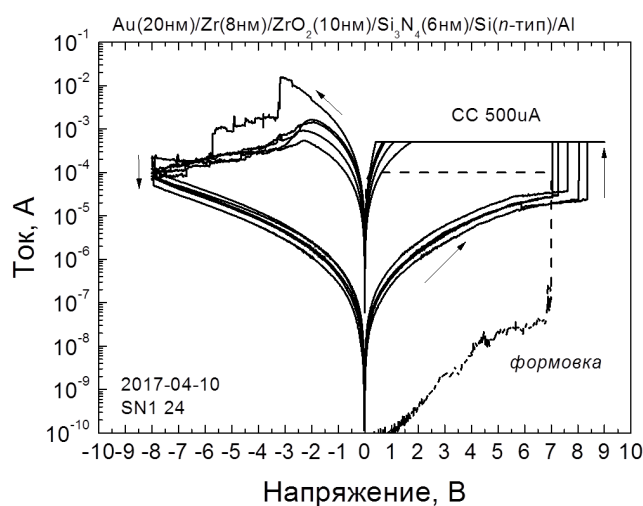
Чаще всего резистивный эффект наблюдается в структурах, представляющих из себя два электрода, между которыми имеется тонкий слой диэлектрика (металл-диэлектрик-металл, МДМ) [1]. Эффект резистивного переключения (обратимого изменения сопротивления) заключается в изменении сопротивления диэлектрика под действием электрического поля, создаваемого между электродами. В качестве диэлектрика используются оксиды кремния, циркония и т.д. Кроме вышеупомянутых материалов, для создания мемристовых наноструктур применяется нитрид кремния [2].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния состава тонкопленочной структуры на параметры резистивного переключения в мемристовых устройствах на основе нитрида кремния для повышения их воспроизводимости и устойчивости к деградации с помощью измерения и анализа вольт-амперных характеристик.

Исследование показало, что мемристовые наноструктуры на основе пленок нитрида кремния обладают эффектом резистивного переключения, при этом параметры переключения зависят от состояния границ раздела, изменение которых происходило путем дополнительного нанесения различных пленок на границу с нитридом кремния. Например, введение прослойки SiO_2 между пленкой нитрида кремния и подложкой приводит к обращению переключений – формовка (образование проводящих каналов в диэлектрике) в таких структурах происходит при обратной полярности. Введение в структуру пленки ZrO_2 и подслоя Zr также приводит к обращению переключений. Вероятно, в такой структуре слой Si_3N_4 не участвует в процессе переключения, а активные процессы формирования и разрыва филаментов происходят на границе ZrO_2/Zr .

Литература

1. The missing memristor found / D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams // Nature. – 2008. – V.453. – P.80-83.



2. Improved resistive switching characteristics in Ni/SiN_x/p⁺⁺-Si devices by tuning x / Sungjun Kim, Yao-Feng Chang, Min-Hwi Kim, and Byung-Gook Park // Appl. Phys. Lett. – 2017. – Vol.111. – P.033509.

ЗАРЯДКА И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ДОМЕНОВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ LiTaO₃ И LiNbO₃ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

Татаринцев А.А.¹, Марковец К.Е.²

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: tatarintsev@ftian.ru

Активное внедрение сегнетоэлектрических материалов в микро- и нанoeлектронику, а также их использование в оптических устройствах требует решения многих проблем в области сегнетоэлектрических технологий. Создание регулярных доменных структур (РДС) в сегнетоэлектрических кристаллах играет большую роль для развития опто- и акустоэлектроники [1, 2] – в структурах, основанных на поверхностно-акустических волнах благодаря их нелинейным оптическим, электрооптическим и пьезоэлектрическим свойствам. Доменные структуры используются для удвоения частоты оптического излучения и в качестве оптических дифракционных решеток в оптоэлектронике [3, 4]. Также доменные структуры являются эффективным устройством для генерации поверхностных и объемных акустических волн в акустоэлектронике [5, 6].

Одним из способов создания РДС микронного, субмикронного и (в очень тонких кристаллах) нанометрового масштаба является облучение образца сфокусированным электронным пучком в установках электронно-лучевой литографии [7, 8]. Однако сложный самосогласованный механизм зарядки сегнетоэлектриков при облучении электронным пучком не достаточно изучен и понятен.

Эта работа посвящена одновременному исследованию всех основных параметров процесса зарядки монокристаллов LiTaO₃ и LiNbO₃. Эксперименты были проведены на обеих сторонах Z-среза: на положительной и отрицательной. Были измерены временные зависимости следующих основных параметров: поверхностного потенциала V_s , вторичной электронной эмиссии I_σ , суммы тока смещения (аккумулируемого заряда) и токов утечки I_{L+D} (Рис. 1). Такой комплексный подход [9] позволяет нам установить основные особенности процесса зарядки сегнетоэлектриков и сопутствующего переключения доменной структуры.

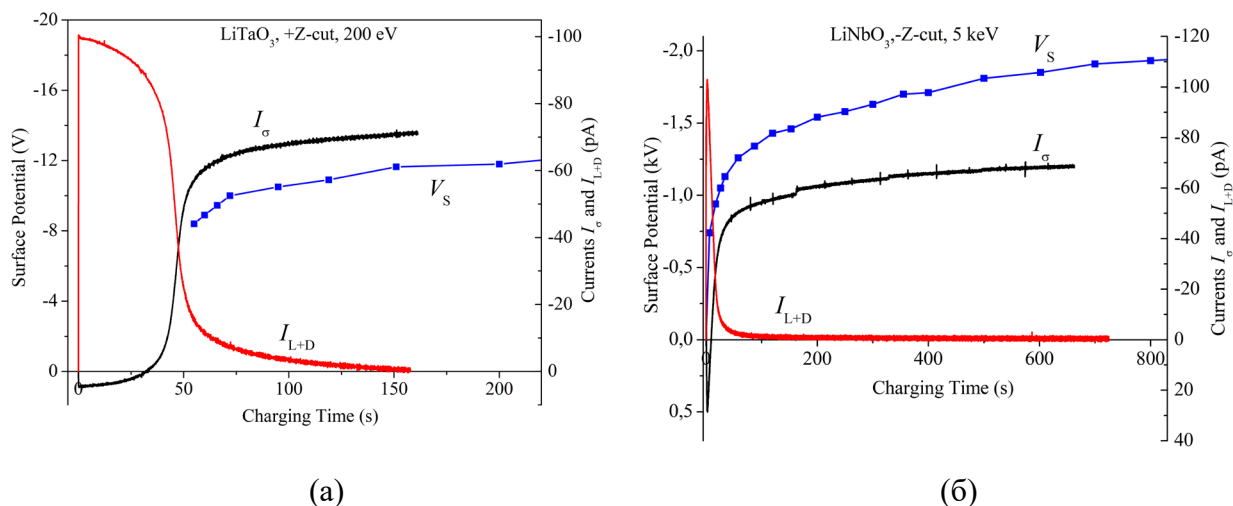


Рис. 1. Временные зависимости поверхностного потенциала V_s , тока вторичной электронной эмиссии I_σ , суммы тока смещения и токов утечки I_{L+D} при облучении электронами для +Z-среза LiTaO₃ (а) и для -Z-среза LiNbO₃ (б). Параметры зарядки: энергия первичного электронного пучка $E_0=1$ кэВ и плотность тока $j_0=10^{-6}$ А/см².

Было обнаружено очень интересное и необычное для классических диэлектриков явление: изменение знака тока, регистрируемого полусферическим коллектором. Этот факт объясняется определяющим влиянием тока смещения на коллектор, вызванного появлением на поверхности положительного заряда высокой плотности из-за переключения поляризации в случае $-Z$ -среза и ухода экранирующих зарядов в случае $+Z$ -среза.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-02-00813 А.

Литература

1. Ferraro P., Grilli S., De Natali P. et. al. *Ferroelectric Crystals for Photonic Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 1–132, 2009
2. Buzanov O.A., Sakharov S.A., Roshchupkin D.V., Emelin E.V., Lavrov S.D. LiTaO_3 - a multifunctional crystal for opto- and acoustoelectronics // *Materialy Elektronnoi Tekhniki*. (In Russ.). 2013. V. 3. P. 24-27.
3. Fujimura M., Kodama T., Suhara T., Nishihara H. Quasi-phase-matched self-frequency doubling waveguide laser in Nd:LiNbO_3 // *IEEE Photon. Tech. Lett.* 2000. V. 12. P. 1513—1515.
4. Sasaki Y., Avetisyan Yu., Kawase K., Ito H. Terahertz-wave surface-emitted difference frequency generation in slant-stripe-type periodically poled LiNbO_3 crystal // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81. P. 3323—3325.
5. Cheng S., Zhu Y., Lu Y., Ming N. Growth and transducer properties of an acoustic superlattice with its periods varying gradually // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 66. P. 291—292.
6. Wan Z., Wang Q., Xi Y., Lu Y., Zhu Y., Ming N. Fabrication of acoustic superlattice LiNbO_3 by pulsed current induction and its application for crossed field ultrasonic excitation // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 77. P. 1891—1892.
7. Emelin, E.V., Il'in A.I., and Kokhanchik L.S. Recording of domains by an electron beam on the surface of $+Z$ cuts of lithium niobate // *Fizika Tverdogo Tela*. 2013. V. 55. No. 3. P. 489–495.
8. Kokhanchik, L.S. and Irzhak D.V. Formation of regular domain structures and peculiarities of switching of the spontaneous polarization in lithium tantalate crystals during discrete electron irradiation // *Fizika Tverdogo Tela*. 2010. V. 52. No. 2. P. 285–289.
9. Tatarintsev A.A., Markovets K.E., Rau E.I. Charging and domain switching in ferroelectrics LiNbO_3 by electron beam // *Journal of Physics D - Applied Physics*. 2019. No. 52. P. 115104.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ПАССИВАЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В НИТ СТРУКТУРАХ НА ИХ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ

Мацукатова А.Н.

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: an.matcukatova@physics.msu.ru

Интерес к исследованию излучательной рекомбинации в структурах, содержащих слой монокристаллического кремния (с-Si), связан с наблюдаемыми в них высокими значениями внешнего квантового выхода фотолюминесценции, примерно 6 % [1], и электролюминесценции, примерно 1 % [2]. Для наибольшей эффективности фото и электролюминесценции необходимо использование слоев с-Si с большими временами жизни неосновных носителей заряда. В частности, на времена жизни влияет количество поверхностных состояний. Таким образом пассивация поверхности с-Si сильно влияет на эффективность фото и электролюминесценции структур с с-Si.

Сейчас в области солнечной энергетики все большую популярность набирают элементы НИТ (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer), содержащие гетеропереход аморфный гидрогенизированный кремний (a-Si:H) – монокристаллический кремний с пассивирующим слоем из собственного a-Si:H. Коэффициент полезного действия (КПД) фотопреобразования НИТ солнечных элементах (СЭ) превышает 25% [3]. Поскольку инте-

рес к НІТ СЭ возник относительно недавно, многие особенности функционирования данных солнечных элементов еще не объяснены. Одним из методов изучения НІТ СЭ может стать фотолюминесценция. Кроме этого большие значения КПД фотопреобразования НІТ СЭ позволяют надеяться на их эффективную фотолюминесценцию. В связи со всем вышесказанным данная работа посвящена изучению фотолюминесценции двух образцов НІТ СЭ с различной степенью пассивации поверхности c-Si.

Были получены низкотемпературные спектры фотолюминесценции обоих образцов и спектры при комнатной температуре. С помощью спектров фотолюминесценции при температуре 5 К удалось выделить вклады от рекомбинации связанных на примеси экситонов и от свободных экситонов в излучение образцов. Также было показано, что измерение кинетик фотолюминесценции – хороший способ оценки степени пассивации поверхности c-Si в НІТ СЭ.

Литература

1. Trupke, T. et al. Very efficient light emission from bulk crystalline silicon // Applied Physics Letters. 2003, № 82, p. 2996 - 2998.
2. Green, M.A. et al. Efficient silicon light-emitting diodes // Letters to nature. 2001, № 412, p. 805-808.
3. Masuko, K. et al. Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency with Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell // IEEE Journal of Photovoltaics. 2014, № 4, p. 1433 - 1435.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ H_2O_2 В МЕТОДЕ МЕТАЛЛ-СТИМУЛИРОВАННОГО ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ НАНОНИТЕЙ КРЕМНИЯ

Моисеев Д. В., Божьев И.В., Гончар К.А., Осминкина Л.А.

МГУ имени М.В.Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

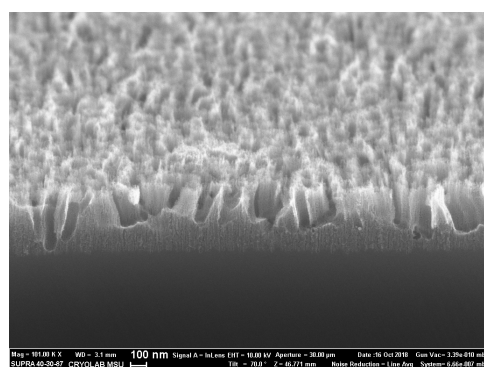
E-mail: daniilmoiseev0@gmail.com, osminkina@physics.msu.ru

Преимущество использования кремниевых нанонитей в сенсорике, фотовольтаике, фотонике, микро- и оптоэлектронике связано с их уникальными свойствами, такими как фотолюминесценция (ФЛ) в видимой области спектра, крайне низкое полное отражение (< 10%), усиление комбинационного рассеяния света и др.

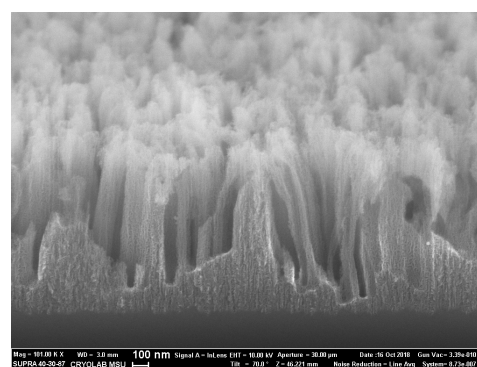
В работе получены образцы в виде массивов пористых нанонитей кремния (КНН) методом металл- стимулированного химического травления (МСХТ) сильно легированных пластин монокристаллического кремния (c-Si). В представленном методе на первом этапе пластины c-Si покрываются наночастицами серебра, и на втором этапе процесс травления производился в растворах плавиковой кислоты и перекиси водорода (H_2O_2).

Подробно изучено влияние концентрации H_2O_2 на структурные и оптические свойства КНН. Измерены скорость роста образцов, их полное отражение в средней ИК-области спектра, фотолюминесценция и ее квантовый выход. Согласно данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показано, что массивы КНН обладают двумя типами пористости, и скорость роста различных пористых слоев зависит от концентрации H_2O_2 . Фотолюминесценция образцов наблюдается в спектральном диапазоне 500-1100 нм и объясняется излучательной рекомбинацией экситонов в малых нанокристаллах кремния на поверхности и в объеме КНН (см. рис. 1). Квантовый выход ФЛ составил 3%.

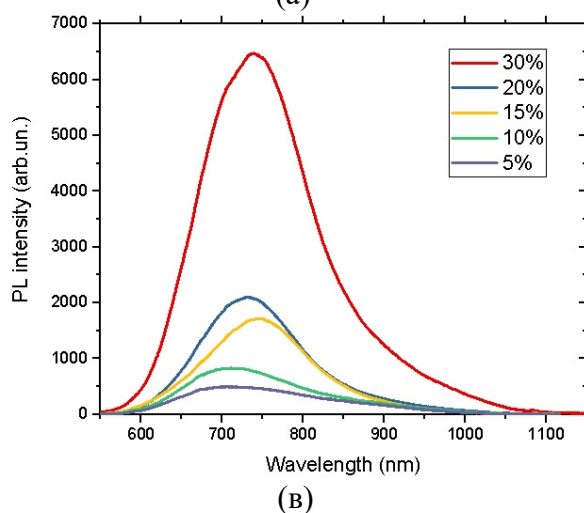
Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 17-12-01386.



(a)



(б)



(b)

Рис.1. Микрофотография СЭМ пористых КНН, полученных МСХТ при использовании 5% H_2O_2 (а) и 30% H_2O_2 (б). Спектры фотолюминесценции образцов, полученных при различных концентрациях H_2O_2 (в).

Литература

Sonodynamic therapy. *Nanoscale Research Letters* 2014, 9:463

АДАПТИВНЫЕ СВОЙСТВА НЕЙРОМОРФНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НАНОГРАНУЛИРОВАННЫХ МЕМРИСТОРОВ

Никируй К.Э.

ИНБИКСТ, МФТИ, Долгопрудный, Московская обл., Россия;

НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

E-mail: NikiruyKristina@gmail.com

Быстрое развитие информационных технологий требует новых методов решения различных типов проблем, в том числе антропоморфных задач, таких как распознавание текста, текста, распознавание речи и т.д. Классическим решением являются нейронные сети, запрограммированные на архитектуре фон Неймана, однако более эффективным способом является разработка аппаратной нейроморфной системы (НС). Особый интерес представляют НС способные к обучению «без учителя». Одним из возможных правил обучения таких сетей является пластичность, зависящая от времени спайка (spike-timing-dependent plasticity-STDP) [1]. В биологических системах STDP представляет собой зависимость изменения веса синаптической связи между пре- и постсинаптическими нейронами от времени спайка пре- и постсинаптических нейронов. В случае НС спайк моделируется импульсом, приложенным к мемристорным электродам. В данной работе использовались наногранулированные мемристоры, изготовленные методом ионно-лучевого распыления составной мишени ($Co_{40}Fe_{40}V_{20}$ и $LiNbO_3$). Принцип их работы основан на эффекте резистивного переключения, который можно объяснить [2] шунтированием нанокompозитного слоя проводящими нитями,

образованным из кислородных вакансий. Подача отрицательного напряжения приводит к разрушению проводящих нитей и уменьшению сопротивления.

Чтобы изучить механизм синаптической пластичности в мемристивных структурах и экспериментально продемонстрировать изменение синаптического веса была разработана НС, состоящая из четырех пресинаптических нейронов, связанных через мемристивные синапсы с постсинаптическим. Каждый нейрон был представлен программно: пресинаптические нейроны были запрограммированы для генерации предустановленных последовательностей, а постсинаптический был пороговым (генерировал спайки только в случае суммарного тока, превышающего заданный порог тока).

Было показано, что в такой системе конечное состояние системы не зависит от его обучения. Также было выбрано оптимальное значение порогового тока, которое позволяет реализовать обучение STDP, и используя данное значение получены аналоги 6 различных изображений. Данная система является первым шагом к большей НС на основе мемристорного кроссбара. Следующим этапом работы является разработка НС для распознавания образов по принципу «победитель получает все».

Работа выполнена в ресурсном центре электрофизических методов НИЦ “Курчатовский институт” при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-37-00267 в части изучения одиночных структур и РФФИ №18-79-10253 в части изучения нейроморфных систем.

Литература

1. Feldman D.E. // *Neuron*. 2012. Vol. 75. № 4. P. 556–571.
2. Рыльков В.В., Николаев С.Н., Демин В.А., et al. // *ЖЭТФ*. 2018. Vol. 153. № 3. P. 424–441.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РКСИДА КОБАЛЬТА

Павлов И.С.¹, Мартышов М.Н.²

МГУ имени М.В.Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

E-mail: win8765495@gmail.com

Полупроводниковые оксиды металлов являются перспективными материалами в создании различных электронных устройств. Эти материалы могут обладать высокой электропроводностью, оптической прозрачностью, низкой стоимостью по сравнению с кремнием и высокой чувствительностью к адсорбции различных молекул [1-2]. Большинство используемых в настоящее время полупроводниковых оксидов металлов обладают n-типом проводимости. Однако в последнее время всё больший интерес у исследователей стали вызывать полупроводниковые оксиды металлов p-типа. Это связано с возможностью создания на основе оксидов металлов различных p-n гетероструктур, которые могут работать как полупроводниковые диоды, транзисторы, сенсоры и солнечные элементы. В данной работе проведены исследования электрических и фотоэлектрических свойств нанокристаллического оксида кобальта (Co₃O₄) который является полупроводником p-типа и при этом обладает низкой стоимостью получения и высокой стабильностью.

Образцы были получены карбонатным методом с последующим отжигом при температурах 500 °С и 300 °С и состояли из нанокристаллов со средними размерами 26 и 12 нм. Исследование электрических свойств показало, что наилучшей проводимостью обладают образцы, отожжённые при температуре 500 °С, что связано с наибольшим средним размером нанокристаллов у данного образца. Обнаружено, что на температурных зависимостях проводимости наблюдается два участка с различной энергией активации, что может указывать на наличие двух разных механизмов проводимости. Пока-

зано, что при температурах ниже 250 К в образцах преобладает прыжковый механизм проводимости, который описывается законом Мотта.

Исследование фотоэлектрических свойств образцов показали, что кинетики нарастания и спада фотопроводимости характеризуются медленной и быстрой составляющими и хорошо аппроксимируются суммой двух экспонент. Рассчитаны времена релаксации для быстрой и медленной составляющих кинетик. Сравнение кинетик нарастания и спада фотопроводимости в воздухе и вакууме показало, что изменение проводимости при освещении не связано с процессами адсорбции и десорбции молекул с поверхности образцов. Сделано предположение о том, что причиной существования быстрой и медленной составляющей кинетик является рекомбинация неравновесных носителей заряда через локальные уровни в запрещенной зоне полупроводника.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-20101.

Литература

1. С. Рембеза, Металлооксидные нанокompозиты для газовой сенсорики. Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика, т. № 1, pp. 74-77, 2006.
2. Huiyong Liu, V. Avrutin, N. Izyumskaya, Ü. Özgür, H. Morkoç, Transparent conducting oxides for electrode applications in light emitting and absorbing devices, Superlattices and Microstructures, т. 48, № 5, pp. 458-484, 2010.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАНИЛИНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ КРЕМНИЯ

Перченко Е.М.¹, Савин К.А.^{1,2}, Новиков И.В.¹, Кабановой В.А.³

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия

³Институт физической химии и электрохимии имени А.Н.Фrumкина РАН, Москва, Россия

E-mail: perchenkoelizaveta@gmail.com

В настоящее время всё большую популярность для использования в солнечной энергетике, оптоэлектронике и фотосенсорике приобретают материалы на основе полимера с добавлением неорганических наночастиц [1–3]. Исследованию солнечных элементов и фотоприемников на таких композитах посвящено достаточно много научных статей, однако сами материалы исследуются крайне редко. Изучение электрофизических свойств таких композитов является крайне важной задачей, поскольку позволяет установить корреляцию между структурой и транспортными свойствами композитов и тем самым определить оптимальные параметры для использования полимеров с неорганическими наночастицами в солнечных элементах. В данной работе исследованы механизмы переноса на переменном сигнале в полианилине (ПАНИ), модифицированном кремневыми наночастицами.

Исследования проводились на импеданс-анализаторе Hewlett-Packard 4192A в диапазоне частот 5 Гц - 13 МГц. Амплитуда переменного сигнала составляла 30 мВ. В результате проведенных измерений были получены зависимости проводимости от частоты для различных концентраций наночастиц кремния в ПАНИ (рис. 1). Видно, что с увеличением концентрации кремневых наночастиц проводимость образца возрастает во всем исследованном интервале частот. Были построены эквивалентный схемы исследованных композитов, на основе которых сделаны выводы о причинах изменения проводимости при увеличении концентрации кремневых наночастиц в ПАНИ.

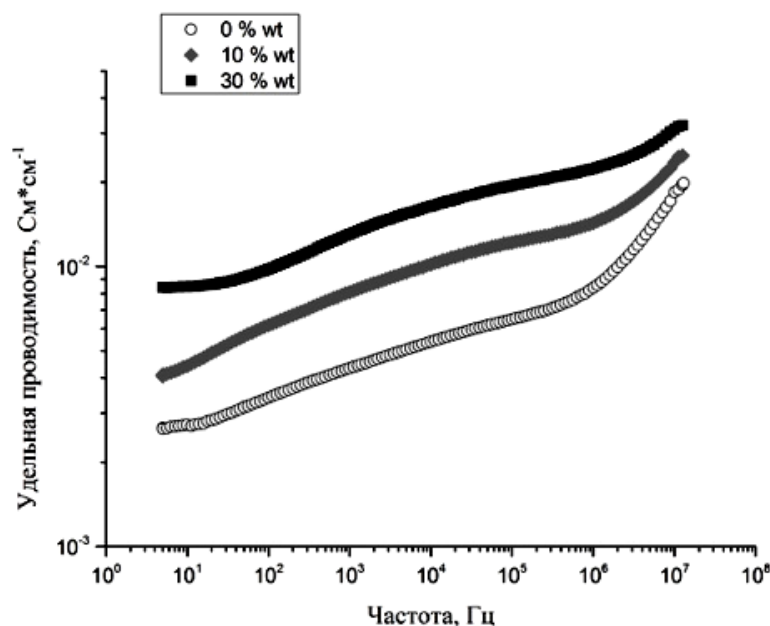


Рис.1. Зависимость удельной проводимости от частоты для разных концентраций кремниевых наночастиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-32-00417 мол_а).

Литература

1. Wright M, Uddin A. Solar Energy Materials & Solar Cells Organic — inorganic hybrid solar cells: A comparative review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* [Internet]. 107, 87–111 (2012). Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.07.006>.
2. Wei H, Fang Y, Yuan Y, Shen L, Huang J. Trap Engineering of CdTe Nanoparticle for High Gain, Fast Response, and Low Noise P3HT:CdTe Nanocomposite Photodetectors. *Adv. Mater.* 27(34), 4975–4981 (2015).
3. Hemaprabha E, Pandey UK, Chattopadhyay K, Ramamurthy PC. Doped silicon nanoparticles for enhanced charge transportation in organic-inorganic hybrid solar cells. *Sol. Energy* [Internet]. 173(June), 744–751 (2018). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.020>.

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СПИН-ТУННЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

Пестова А.Н.

Ярославский ГУ имени П.Г. Демидова, физический факультет, Ярославль, Россия
E-mail: yablokova-anastasia@yandex.ru

Спинтроника – одно из перспективных направлений развития электроники, которое сформировалось после открытия гигантского магнитосопротивления (ГМС), туннельного магнитосопротивления (ТМС), явления переманничивания спиполяризованным током и пр. В отличие от традиционной электроники, оперирующей электрическими зарядами, в спинтронике для переноса информации используется спин электронов [1].

В данной работе рассмотрен процесс создания ячейки памяти MRAM, а также ее анализ.

Многослойная структура, предназначенная для формирования ТМС переходов была изучена при помощи следующих методов: времяпролетная вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) – послойный элементный анализ; просвечивающая электрон-

ная микроскопия (ПЭМ) – исследование поперечного среза; рентгеновская дифрактометрия – анализ кристаллической структуры слоев.

Сравнение данных, полученных разными методами, позволило оценить точность послойного анализа и качество структуры. В результате использования перечисленных методов были достигнуты следующие результаты: определена шероховатость поверхности и качество межслойных интерфейсов; оценены толщины слоев; выяснен послойный элементный состав; проверен порядок следования слоев; идентифицирована кристаллическая фаза наиболее толстого слоя. Таким образом, послойный анализ дает ценную информацию о химсоставе и толщинах слоев в многослойных структурах, что может быть востребовано для контроля качества в процессе изготовления MRAM [2].

Так же были проведены работы по моделированию переключения трехслойной магнитной структуры (магнитомягкий, диэлектрический, магнито жесткий слой), и изучена зависимость формы петли гистерезиса от величины поля обменного смещения в магнито жестком слое (рисунок 1) [3].

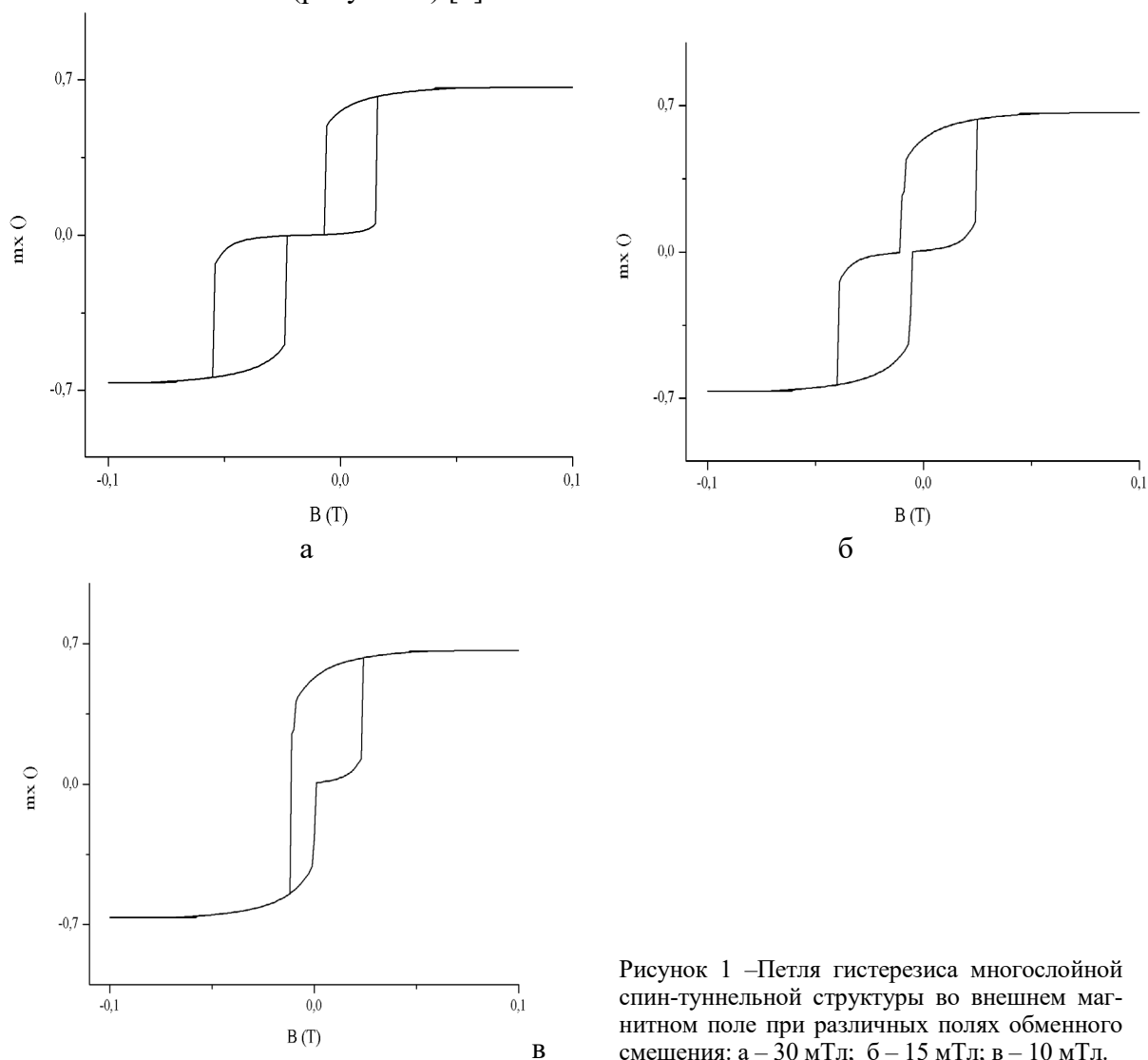


Рисунок 1 –Петля гистерезиса многослойной спин-туннельной структуры во внешнем магнитном поле при различных полях обменного смещения: а – 30 мТл; б – 15 мТл; в – 10 мТл.

Литература

1. А.И. Морозов. Магнитоэлектроника. М.: МИРЭА 2011.
2. О.С. Трушин, В.В. Наумов, А.А. Мироненко, Л.А. Мазалецкий. Проблемы экспериментальной реализации ячейки памяти MRAM // Интеграл. 2014, №4. С. 40-41.
3. Arne Vansteenkiste, Jonathan Leliaert, Mykola Dvornik, Mathias Helsen, Felipe Garcia-Sanchez, and Bartel Van Waeyenberge. The design and verification of mumax3 // AIP Advances. 2014, 4(10):107133.

НАНЕСЕНИЕ ПРИПОЙНЫХ ШАРИКОВ НА КРЕМНИЕВЫЕ КРИСТАЛЛЫ С АЛЮМИНИЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК В ТЕХНОЛОГИИ «FLIP-CHIP»

Побединский В.В.

Воронежский ГУ, физический факультет, Воронеж, Россия

E-mail: vitaly.pobedinsky@yandex.ru

Широкое распространение в отечественной и зарубежной микроэлектронике в производстве интегральных схем в настоящее время получила технология «flip-chip», особенностью которой являются припойные шариковые выводы, располагаемые на металлизированных контактных площадках кристаллов ИМС. Кристаллы монтируют на основание корпусов или плат планарной стороной. При этом рисунок их контактных площадок является зеркальным отображением расположения выводов [1].

Использование припойных шариковых выводов обеспечивает не только электрическую связь между интегральной схемой и подложкой, но и важную роль в механической, прочностной, температурной, теплоотводной составляющих корпусов. Соединения на припойном шарике по сравнению с проволочными, снижают задержки распространения электрических сигналов, обеспечивают большую пропускную способность и снижают ограничения по шинам питания и заземления [2]. Монтаж на припойные шарики методом «flip-chip» вытесняет проволочный монтаж, значительно уменьшая размеры корпусов микросхем. Важную роль при монтаже припойных шариков играет материал металлизации, на который они наносятся - Under Bump Metallization (далее UBM) [3,4].

С помощью модификации стандартного процесса термозвуковой проволочной сварки удалось сформировать платиновый stud-bump – первая точка сварки в сварном соединении методом «шарик-клин» при термозвуковом методе сварки (далее стад-бамп) [1] непосредственно на алюминиевой контактной площадке (Рис. 1).

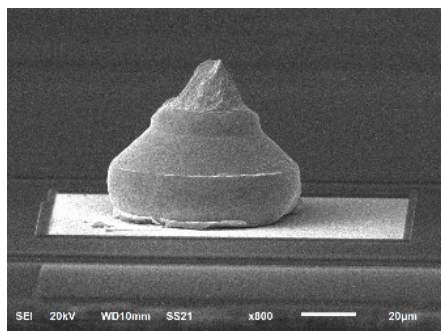


Рис.1. Платиновый стад-бамп на кремниевом кристалле с алюминиевой контактной площадкой (фотография растрового электронного микроскопа).

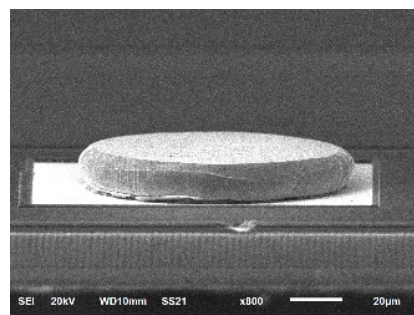


Рис.2. Платиновый стад-бамп после планаризации (фотография растрового электронного микроскопа).

Формирование стад-бампа на алюминиевой контактной площадке полупроводникового кристалла является первой частью двухстадийного процесса нанесения припойных шариков. Следующая стадия – планаризация сформированных стад-бампов чеканкой. Чеканка позволила получить равномерную плоскую поверхность стад-бампов и, как следствие, избавиться от их разновысотности. Таким образом планаризация стад-бампов обеспечила подготовленную поверхность для последующего применения в качестве металлизации под припойный шариковый вывод (UBM). (Рис. 2).

Планаризованные таким способом платиновые стад-бампы обеспечивают гладкую, смачиваемую припоем поверхность и главным образом играют роль диффузионного барьера между припоем шарикового вывода и поверхностью алюминиевой контактной

площадки [1]. Такая UBM металлизация может применяться как для припойных шариков из эвтектических оловянно-свинцовых (PbSn) сплавов, так и для других припоев на основе олова (Sn). Формирование припойных шариковых выводов выполнялось на установке нанесения припойных шариков в режиме поочередного размещения припойных шариков с одновременным оплавлением лазером. (Рис. 3).

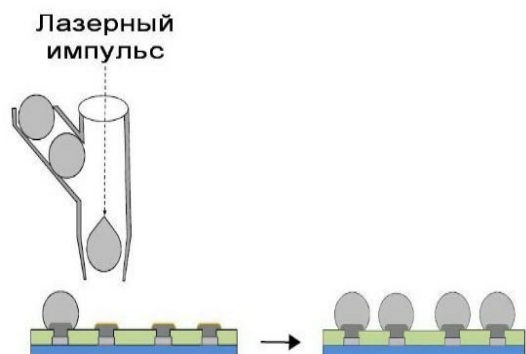


Рис. 3. – Поочередное нанесение припойных шариков с одновременным оплавлением.

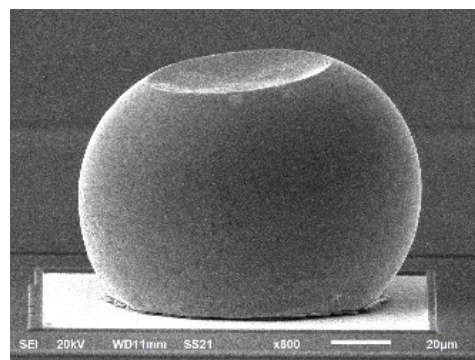


Рис. 4. Планаризованные платиновые стаб-бампы с нанесенным на них припойными шариками (фотография растрового электронного микроскопа).

На стадии оплавления припой смачивает поверхность платинового стаб-бампа, таким образом, формируется припойный шариковый вывод с платиновым твердым ядром (Рис. 4).

Проведенное исследование показало, что применение платиновых стаб-бампов в качестве UBM металлизации под припойные шариковые выводы может применяться для решения задач прототипирования и создания макетных образцов.

Литература

1. Платиновые стаб-бампы с припойными шариками на алюминиевой металлизации кремниевых кристаллов в технологии flip-chip / В.В. Побединский, Н.В. Rogozin, Е.В. Лаврентьев, А.В. Рябов, В.В. Зенин, Е.Н. Бормонтов // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, Выпуск 2 (170) – С. 27-31, 2018.
2. В.В. Зенин, Н.В. Rogozin, В.В. Побединский и др. //Способ формирования шариковых выводов на алюминиевой металлизации контактных площадок кристалла, Патент Российской Федерации (19) RU (ID 2671383 (13) C1 (51) H01L 21/321 (2006.01), дата регистрации в государственном реестре изобретений 30.10.2018.;
2. Bond Pad with multiple layer over pad metallization and method of formation: Patent No.: US 12/705,021. Robert King, Pat Thomas, Assignee: Varughese Mathew. Filing Data: February 12, 2010.
3. Under-Bump metallization layers and electroplated solder bumping technology for flip-chip: Patent No.: US 7,199,036 B2: Int. Cl. H01L 21/44. Chingho Philip Chan, Guowei David Xiao, Assignee: The Hong Kong University of Science and Technology. Prior Publication Data US 2005/0014355 A1 Jan. 20, 2005.

СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ГРАФЕНОВОЙ НАНОЛЕНТЫ

Пономарев В.В.

Северо-Восточный ФУ имени М.К.Аммосова,
Физико-технический институт, Якутск, Россия. E-mail: pon_slav@mail.ru

Все электронные устройства в процессе своего развития имеют тенденцию к миниатюризации, соответственно, приходится искать новые компактные материалы нано-

электроники. Графеновые наноленты представляют собой вполне подходящий материал для изготовления транзисторов, являющихся стандартными узлами всех микросхем. При этом транзисторы на их основе могут с успехом работать даже при комнатной температуре, в то время как предшествующие разработки функционировали только при низких температурах в силу своей большей толщины.

После получения графена наноленты подверглись активному исследованию как отдельная наноструктура как теоретически [1–2], так и экспериментально. Параллельно этим исследованиям стремительно развивались и методы синтеза.

Одним из наиболее распространенных способов изменения электронных свойств нанолент является допирование атомом азота в связи с образованием более прочной ковалентной связи, по сравнению со связью С-С. К тому же допирование азотом может значительно увеличить проводимость графеновых нанолент, изменить ширину запрещенной зоны. Следовательно, допирование азотом представляется интересным и перспективным с точки зрения управления электронными свойствами материала.

В данной работе с помощью квантово-химических методов были детально исследованы структурные и электронные свойства нанолент различной ширины. Проведено исследование электронных свойств таких структур в зависимости от ширины нанолент.

Все вычисления проводились с использованием программы Quantum Espresso. В основе лежит метод псевдопотенциала с использованием плоских волн в рамках теории функционала плотности (DFT). Влияние остовных электронов учитывалось путем использования ультрамягких псевдопотенциалов. Использовался нелокальный обменно-корреляционный функционал в параметризации Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE). Энергия обрезания плоских волн для самосогласованного расчета составляла 60 Ry. Для интегрирования линейной зоны Бриллюэна была использована сетка $9 \times 9 \times 1$ в обратном пространстве. Для вычисления электронной структуры монослоя использовалась изолированная плоская структура. Во избежание взаимодействия между слоями расстояние между ними устанавливалось равным 15 Å.

Получена зонная структура и плотность состояний нанолент. Построен график зависимости запрещенной зоны от ширины нанолент.

Литература

1. Wang ZF, Shi QW, Li Q, Wang X, Hou J. C. Z-shaped graphene nanoribbon quantum dot device // *Appl Phys. Lett.* 2007, 91: 053109. 10.1063/1.2761266
2. Barone V, Hod O, Scuseria GV Electronic structure and stability of semiconducting graphene nanoribbons // *Nano Lett.* 2006, 6(12):2748. 10.1021/nl0617033

ВЫСОКОТОЧНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Пылев И.С., Гончарова Т.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: ivan_pylev@bk.ru, goncharova.ts15@physics.msu.ru

Литография (от латинского Lithos - камень + grapho - рисую) — это техника плоской печати, которая заключалась в переносе изображения с камня (плоской поверхности), на котором оно изначально находилось, на бумагу.

В нанотехнологиях литография широко применяется для высокоточной модификации поверхности. Такая технология носит название “Нанолитография”.

Нанотехнологии охватывают множество процессов, которые используются при изготовлении интегральных микросхем, устройств памяти, биочипов и биосенсоров. Одним из ключевых процессов в нанотехнологиях является построение функциональных элементов диапазоном менее 100 нм.

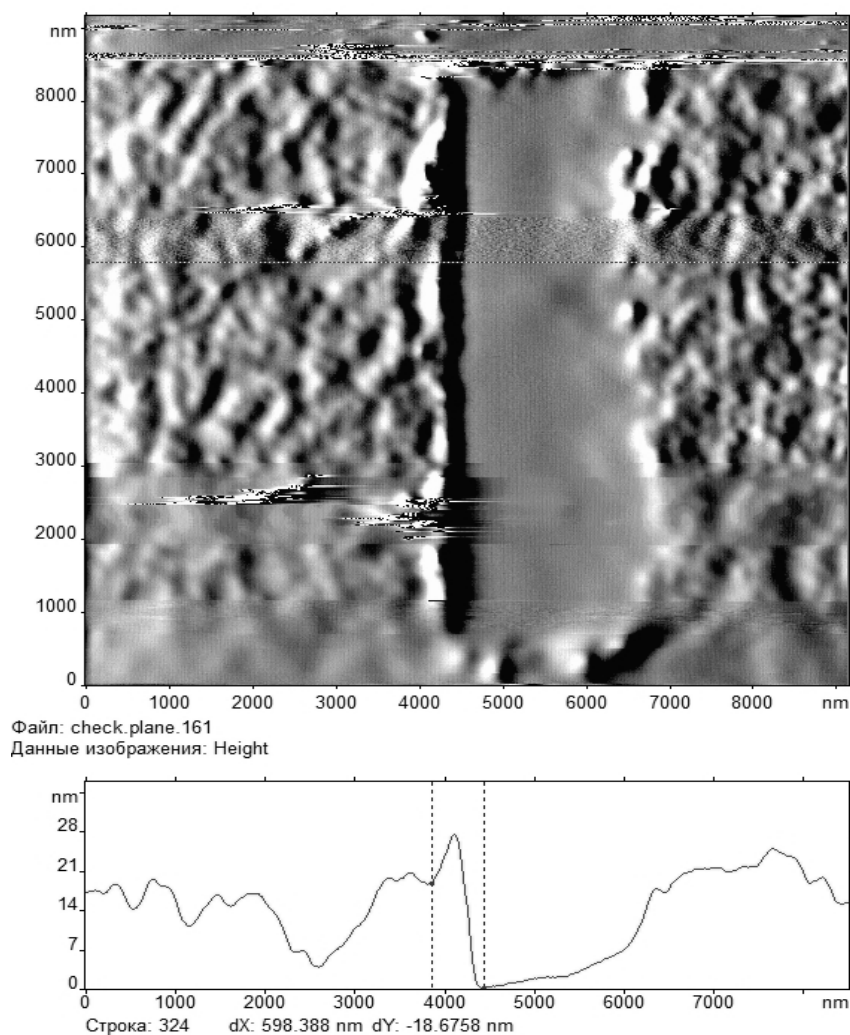


Рис. 2. Поверхность мягкого полимера полиимида Р84, модифицированная с помощью СЗМ в контактном режиме. Изображение получено с помощью программного обеспечения FemtoScan Online.

Для успешного создания прецизионных элементов наноэлектроники требуется разработка высокоточных методов формирования углеродных наноструктур. Одним из перспективных методов на сегодняшний день является сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) — незаменимый инструмент нанотехнологий. Инструментарий сканирующей зондовой микроскопии позволяет не только получать изображение поверхности твердых тел в высоком разрешении, но и проводить ее высокоточную модификацию (зондовую литографию).

Для классификации способов создания наноструктур выделяют следующие два подхода: нисходящую (top-down) и восходящую (bottom-up) нанолитографию.

При нисходящей нанолитографии наноразмерные объекты создаются путем механической обработки поверхности. Изготовление интегральных схем, а также каналов жидкости, является примером данного вида модификации поверхности. В качестве исходного материала часто используются кристаллический кремний.

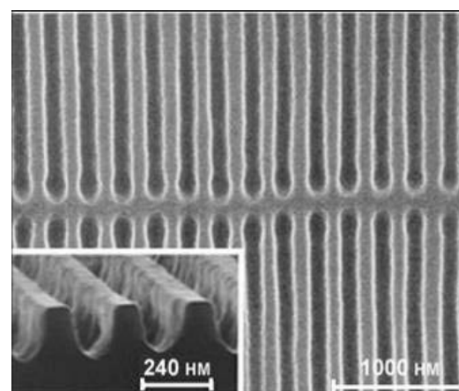


Рисунок 1. Микроструктура с элементами шириной 80 нм и шагом 200 нм, изготовленная на кремниевой пластине методом фотолитографии с использованием ультрафиолетового излучения с длиной волны 248 нм[1].

Принцип восходящей нанолитографии заключается в создании наноструктур из атомов и молекул. С уменьшением размер создаваемого объекта возрастает роль восходящей нанолитографии.

Метод модификации поверхности, проводимый с помощью СЗМ, является одним из самых точных. Так, например, фотолитография, которая успешно применяется в производстве полупроводниковых приборов, имеет точность, ограниченную половиной длины волны используемого света (дифракционный предел).

Точность нанолитографии, проводимой с помощью СЗМ, ограничена лишь точностью позиционирования микроскопа и параметрами иглы (кантилевера), что в сумме может достигать значения десятых долей ангстрем. На рисунке 1 представлена модификация поверхности мягкого полимера. Сканирование проводилось справа налево с последовательным увеличением относительной силы до 15 нН.

Одной из основных задач научной работы является создание модифицированной поверхности мягкого полимера полиимида Р84. Такая модификация позволит создать жидкокристаллическую структуру определённого направления.

В научной работе принимали участие школьники Лицея “2 школа”: Юлия Михайлова, Лучкина Екатерина, Мартынов Михаил, Сорокин Степан.

Литература

А.Ф. Бенда “Материалы нанотехнологий в полиграфии”. Ч. 3. учеб. пособие / Моск. гос. ун-т печати имени Ивана Федорова. — М. : МГУП имени Ивана Федорова, 2014. — 220 с.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕЗЕРВУАРНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ МЫШЬЯКА В КРЕМНИИ

Рыженкова С.Ю.

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: ryzenkova.s@physics.msu.ru

Последние несколько десятилетий активно развиваются вычисления на основе искусственных нейронных сетей [1].

В 2001 году была предложена новая парадигма в обучении искусственной рекуррентной нейронной сети РНС, где резервуар (множество нейронов со взаимными связями) генерируется случайным образом [2]. Такие нейронные сети можно реализовывать как программным путём на классических компьютерах, так и на основе реальных физических объектов, выступающих в роли нейронов и случайным образом связанных друг с другом. Так, в работе 2015 года описывается система на основе случайного массива наночастиц, окруженных металлическими электродами [3], где искусственно развиваются электрические свойства системы путем оптимизации значений управляющих напряжений с использованием генетического алгоритма для реконфигурируемого выполнения разных вычислительных задач. Обнаруживается, что на этой наноразмерной архитектуре может быть сконфигурирована система выполняющая любую элементарную булеву функцию.

В нашей работе описана технология, позволяющая создать аналогичный резервуар на основе примесных атомов мышьяка в кремнии вместо наночастиц. Такая структура должна быть гораздо стабильнее, так как мышьяк встроен в кристаллическую решетку кремния, а также должна обеспечивать работу при более высоких температурах за счёт более высокой зарядовой энергии примесных атомов. Кроме того, технология позволяет регулировать плотность массива примесных атомов путем травления подложки.

Изготовленные нами структуры представляют собой системы электродов из хрома, ведущих к наноразмерной области диаметром 50 - 200 нм на тонком слое кремния, до-

пированного мышьяком. Структура изолирована от подложки слоем оксида. Концентрация допантов максимальна у поверхности кремниевого слоя и уменьшается в глубине, что позволило с помощью травления кремния добиться нужной плотности примесных атомов. Электрические свойства полученной структуры были измерены при температуре 77 и 300 К.

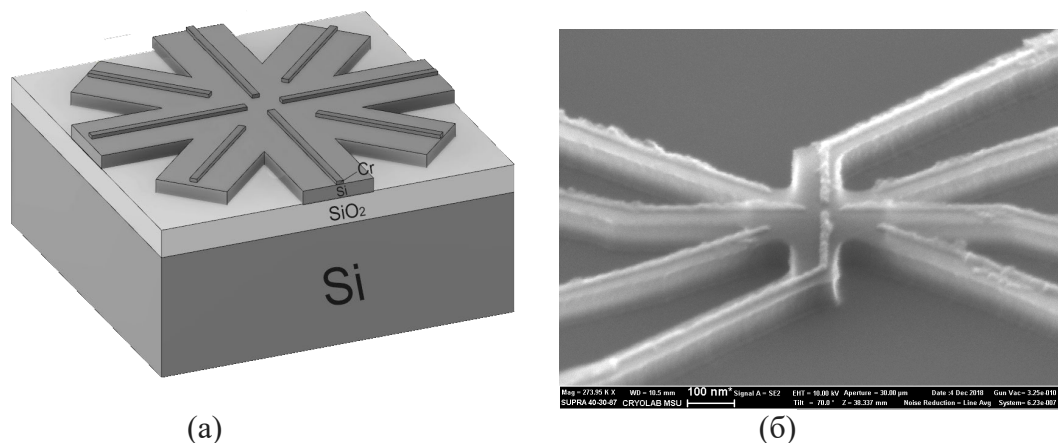


Рис.1 (а) – 3D-модель изготовленной структуры, (б) – снимок структуры, полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Литература

1. Gallicchio, C., Micheli A., Pedrelli, L. Deep reservoir computing: A critical experimental analysis //Neurocomputing. 2017, 268. p. 87-99.
2. Jaeger, H. The “echo state” approach to analysing and training recurrent neural networks-with an erratum note //Bonn, Germany: German National Research Center for Information Technology GMD Technical Report. 2001, №. 34(148) p. 13.
3. Bose, S. K. et al. Evolution of a designless nanoparticle network into reconfigurable boolean logic //Nature nanotechnology. 2015, №.12(10) p. 1048.

ПОДАВЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ КИСЛОРОДА TiN ЭЛЕКТРОДОМ НА МЕЖФАЗОВОЙ ГРАНИЦЕ TiN/SiO₂ ПОСРЕДСТВОМ ВВЕДЕНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ Al₂O₃

Сахоненков С.С., Филатова Е.О.

С-Пб. ГУ, физический факультет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sergei.sakhonenkov@gmail.com

Увеличение числа транзисторов, размещаемых на одной интегральной микросхеме, диктует необходимость снижения потребляемой мощности. Одним из решений данной проблемы является значительное снижение напряжения на транзисторе. Однако это приводит к существенному увеличению влияния внутренних электрических полей, образующихся в результате различий эффективных работ выхода (ЭРВ) на границах в МОП структурах, на выходные параметры (например, на пороговое напряжение V_t). В этой связи, для обеспечения работы устройств при данных параметрах, необходим жесткий контроль значений ЭРВ.

Модулирование значений ЭРВ в достаточно широком диапазоне можно проводить за счет имплантации различных ионов в материал металлического затвора [1]. Также, существенную роль играет стехиометрия материала, определяемая методом синтеза. В случае TiN электрода, синтезированного на термически выращенном SiO₂ [2], в зависимости от метода его синтеза ЭРВ может меняться от 4.2 до почти 5 эВ. Дополнительным фактором, влияющим на стехиометрию TiN на границе раздела, является его окис-

ление за счет поглощения кислорода из нижележащего оксида или прямого взаимодействия с молекулами окислителя [3]. Таким образом, для обеспечения желаемого контроля ЭРВ, необходимо также контролировать процесс окисления материала электрода на границе раздела. Один из способов влияния на данный процесс – использование на границе раздела тонких слоев материалов, препятствующих миграции кислорода из оксида.

В данной работе исследовалось формирование интерфейса в системе TiN/SiO₂/Si, а также влияние тонкого слоя Al₂O₃, введенного между TiN электродом и пленкой SiO₂, на состав и протяженность интерфейса в зависимости от толщины Al₂O₃. Исследования проведены методом фотоэлектронной спектроскопии высоких энергий. Установлено, что в результате вымывания кислорода из пленки SiO₂ на границе раздела формируются слои TiO₂ и TiN_xO_y. Введение тонкого слоя оксида алюминия уменьшает общую протяженность межфазовой границы, причем при толщине Al₂O₃ 1 нм она минимальна. Выявлено отсутствие TiO₂ фазы на межфазовой границе при толщинах Al₂O₃ ≥ 1 нм.

Литература

1. Kothari S., et al. Plasma-Assisted As Implants for Effective Work Function Modulation of TiN/HfO₂ Gate Stacks on Germanium // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112 (20). P. 203503.
2. Afanas'ev V.V., et al. Internal Photoemission Metrology of Inhomogeneous Interface Barriers // Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci. 2018. V. 215 (6). P. 1–12.
3. Filatova E.O., et al. Control of TiN oxidation upon atomic layer deposition of oxides // Phys. Chem. Chem. Phys. 2018. V. 20 P. 27975-27982

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВОГО ТРАНСПОРТА В НАНОДИОДАХ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕКТЕННЫ

Тимкаева Д. А.

Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия

E-mail: dianatimkaeva@mail.ru

Создание наноантенны, работающей в инфракрасном и видимом диапазоне частот электромагнитного излучения, связано с проблемой работы выпрямителя (диода) на терагерцевых и более высоких частотах без больших потерь мощности (потери мощности вызваны влиянием ёмкости рп-перехода).

В данной работе с помощью теории функционала плотности и метода неравновесных функций Грина моделируются оптические отклики массива одно-, двух- и трехстенных углеродных нанотрубок (УНТ) и квантовый транспорт в диодах на основе УНТ, где рп-переход реализуется с помощью поперечного электрического поля, создаваемого плоскими и цилиндрическими электродами-затворами. Рассматривается возможность использования этих выпрямителей в оптических наноантеннах.

Вычисления проводились с помощью программы QuantumATK. С привлечением подхода Кубо–Гринвуда и теории функционала плотности рассчитаны оптические характеристики (спектр поглощения, отражения, закон дисперсии диэлектрической восприимчивости и частотная зависимость проводимости) массивов однослойных и многослойных углеродных нанотрубок, выявлена связь с параметрами периодической структуры и параметрами индивидуальных нанотрубок. Формула Кубо–Гринвуда для тензора восприимчивости имеет вид:

$$\chi_{ij}(\omega) = -\frac{e^2 \hbar^4}{m^2 \varepsilon_0 V \omega^2} \sum_{nm} \frac{f(E_m) - f(E_n)}{E_{nm} - \hbar\omega - i\Gamma} \pi_{nm}^i \pi_{mn}^j,$$

где π – матричный элемент i -й компоненты дипольного момента для состояний n и m , V – объем, $-$ уширение, f – функция Ферми–Дирака. Далее рассматривались устройства с рп-переходами на основе УНТ, где переход создавался поперечным электрическим полем. Система разделялась на три области: левая, центральная, правая. Реализация устройства основывается на так называемом приближении экранирования, предполагающем, что свойства левой и правой областей (электродов) могут быть описаны путем решения объемной задачи для полностью периодической ячейки. Для расчета неравновесной электронной плотности QuantumATK использует метод неравновесной функции Грина (NEGF). Расчеты электронных состояний проводились с помощью расширенного метода Хюккеля и метода функционала плотности. Вольт-амперная характеристика рассчитывалась с помощью формулы:

$$I = \frac{e}{h} \int T(E) [f_L(E, T_L) - f_R(E, T_R)] dE,$$

где f_L и f_R – функции распределения электронов по энергии в левом и правом электродах, соответственно, $T(E)$ – спектр пропускания. Важное преимущество рассматриваемых выпрямителей – возможность управления рп-переходом с помощью геометрии, параметров электродов и напряжения на них.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЛОКАЛИЗОВАННЫЙ ФОТОЭФФЕКТ В АМБИПОЛЯРНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Труханов В.А.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет
и международный лазерный центр, Москва, Россия;*

Институт спектроскопии Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: trukhanov@physics.msu.ru

Органическая электроника – интенсивно развивающаяся область знаний на стыке физики, химии и материаловедения – во многом основана на органических полевых транзисторах, которые служат для управления током с помощью напряжения на затворе. Кроме того, органические полевые транзисторы могут выступать как излучатели света (светоизлучающие транзисторы) либо как приёмники света (фототранзисторы). Эффективные свето- и фототранзисторы должны быть амбиполярными, то есть проводить как электроны, так и дырки, так как для генерации фотонов необходимо наличие обоих типов носителей заряда, а при поглощении фотонов в активном слое образуются экситоны (связанные пары электронов и дырок), которые разделяются на свободные носители заряда под действием электрического поля (Рис. 1а). Известно, что в амбиполярных транзисторах может существовать небольшая область размером 15-200 нм по оси x [1], в которой происходит рекомбинация электронов и дырок и в которой имеется максимум напряжённости электрического поля (Рис. 1в).

В настоящей работе с помощью простой одномерной численной дрейф-диффузионной модели органического полевого транзистора показано, что положение пика напряженности электрического поля E_x зависит от напряжения на затворе V_G (Рис. 1б,в), а данная область пика E_x является фоточувствительной областью транзистора, т.к. высокое E_x способствует эффективному разделению зарядов, генерируемых под действием падающего оптического или УФ излучения. Также с помощью численного моделирования показана возможность воспроизвести с довольно хорошей точностью форму распределения интенсивности падающего излучения вдоль канала транзистора, измерив зависимость фототока J_{ph} от V_G , и пересчитав шкалу V_G в шкалу x с помощью зависимости x_m от V_G (Рис. 1б).

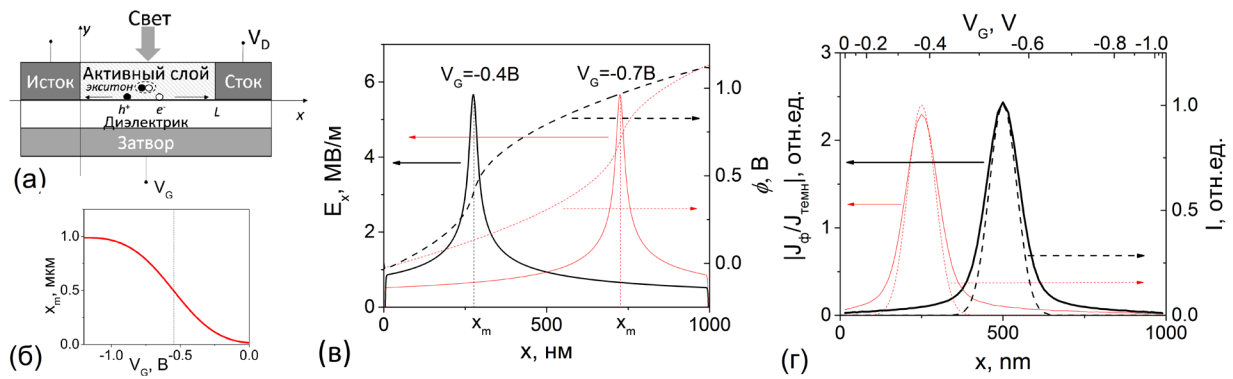


Рис.1. Схема органического полевого транзистора (а), зависимость положения пика напряжённости поля x_m от V_G (б), распределение напряжённости электрического поля E_x и электрического потенциала ϕ вдоль канала транзистора при двух значениях напряжения на затворе V_G (в), зависимости чувствительности $|J_\phi/J_{\text{теплн}}|$ от V_G при двух различных распределениях интенсивности падающего излучения I от x (г).

Исследование поддержано грантом РФФИ №17-79-00341.

Литература

1. Kemerink M, Charrier D.S.H., Smits E.C.P., Mathijssen S.G.J., de Leeuw D.M., and Janssen R.A.J. On the width of the recombination zone in ambipolar organic field effect transistors. // Appl. Phys. Lett., 2018, № 93, P. 033312.

СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ КРЕМНИЕВОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Усков В.С., Крылова Е.Н., Конюхов М.В.

МИСиС, Институт новых материалов и нанотехнологий, г. Москва, Россия

vladis.usckov@gmail.com

Введение. Энергия бета-частиц может быть преобразована в электрическую энергию с использованием бета-вольтаических преобразователей. При проектировании бета-вольтаического элемента в качестве бета-источника был выбран радионуклид ^{63}Ni . Недостатком, который необходимо учитывать при разработке BVC, является низкая удельная активность радиоизотопа ^{63}Ni . Расчетные данные свидетельствуют о том, что удельная мощность кремниевого BVC с изотопом ^{63}Ni не превышает 10^{-8} Вт/см². Поэтому, для повышения мощности источника целесообразно использовать трехмерную (3D) структуру BVC с максимально развитой поверхностью [1].

Цель данной работы: создание структуры с развитой поверхностью преобразователя и низкими токами утечки.

Формирование кремниевой 3-D структуры BVC. Наиболее доступным способом контролируемого формирования микроканальной структуры кремния с требуемой морфологией является метод глубокого анодного травления [2]. Расположение на поверхности центров нуклеации в такой структуре стремится к наиболее плотному, квази-гексагональному расположению пор [3]. При этом, диаметр поперечного сечения микроканалов определяется величиной удельного сопротивления кремния, расстояние между порами (толщина стенки) зависит от плотности анодного тока травления, а глубина микроканалов задается временем травления [4]. Для изготовления экспериментальных образцов микроканальных структур BVC был использован кремний с удельным сопротивлением 1000 Ом·см, толщина пластин составляла 200 мкм. Анодное травление пластин проводилось в режиме RPF при постоянной плотности тока 6 мА·см⁻², в растворе HF:DMF = 1:10, время травления 240-250 минут. Глубина травления образцов

составила 160-163 мкм, среднее значение диаметра сечения микроканалов 5-6 мкм. Среднее расстояние между центрами пор 10 мкм.

Полученные геометрические характеристики микроканалов при квазигексагональном расположении на обозреваемой поверхности такой структуры обеспечивают площадь поверхности не менее 50 см².

Для формирования сравнительно мелкой структуры p-n перехода на развитой поверхности микроканалов осуществлялась диффузия фосфора при температуре 900°C в течение 10 минут в потоке аргона. Глубина перехода составила 0.4-0.5 мкм, поверхностное сопротивление 26-32 Ом/м.

Для формирования электрического контакта на обратную сторону структур магнетронным напылением наносилась металлическая пленка, состоящая из последовательных слоев Ti (20 нм) и Ni (20 нм). Эта металлизация и не подверженный анодному травлению объемный кремний (примерно 40 мкм) на обратной стороне пластины, обеспечивают необходимое низкое значение величины сопротивления структуры при прямом смещении на p-n-переходе.

Эффективность никелевого контакта в пористой структуре 3D p-n перехода оценивалась по вольтамперным характеристикам. Вид вольтамперных характеристик без внешнего воздействия (темновые) приведен на рисунке 1. Необходимо отметить, что измеренные ВАХ 3D диодов без осаждения Ni и после формирования Ni металлизации в микроканальной структуре в указанном режиме [5] совпадали в рассмотренных диапазонах напряжений и токов.

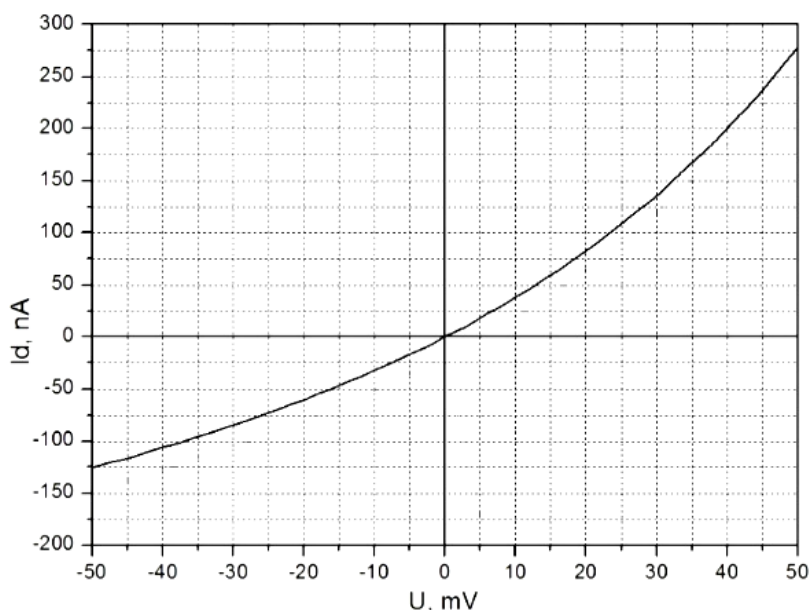


Рис. 1 – Вольт-амперная характеристики 3D структуры BVC без внешнего воздействия.

Вывод. Используя метод анодного травления RPF, были изготовлены микроканальные BVC с глубиной каналов ~ 160 мкм и диаметром 6 мкм. На всей поверхности 3D диодной структуры сформирован p-n-переход с низкими значениями темновых токов. Результаты по формированию Ni контактных слоев к развитой поверхности p+-слоя, представленные нами в [5], свидетельствуют о том, что выбранные режимы формирования слоя Ni позволяют сохранить на исходном уровне ВАХ трехмерных BVC структур.

Литература

1. A.A.Krasnov, S.A.Legotin, V.N.Murashev, et al. Development and investigation of silicon converter beta radiation ⁶³Ni isotope. /IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110 (2016) 012029

2. Vyatkin A., Starkov V., Tzeitlin V., Presting H., Konnle J., König U. Random and ordered macropore formation in p-type silicon./ J. Electrochem. Soc. 2002.149(1). G70-G76.

3. V.I. Emel'yanov, V.V. Starkov. Nonlinear Dynamics of Selforganization of Hexagonal Ensembles of Pores under oxidation and Etching of Metals and Semiconductors. Journal of surface investigation. /X-ray, synchrotron and neutron techniques. 2006. №6, pp. 116.

4. Старков В.В., Цейтлин В.М., Конли И., Престинг Х., Кениг У. Вяткин А.Ф. Неупорядоченное формирование макропор в кремнии р-типа.(Nonordered Macropores Formation in p-type Silicon). /Микросистемная техника, №7, 2001. стр.35-39.

5. Крылова Е.Н., Усков В.С., Старков В.В., создание Ni-металлизации на развитой 3D поверхности р-n-перехода. Настоящая конференция. В печати.

СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С КРЕМНИЕВЫМ КАНАЛОМ-НАНОПРОВОДОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОСПЕЦИФИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ.

Циняйкин И.И.¹, Крупенин В.А.¹, Божьев И.В.¹, Преснова Г.В.³, Рубцова М.Ю.³, Уляшова М.М.³, Преснов Д.Е.^{1,2}

¹МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

²НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³МГУ имени М.В.Ломоносова, химический факультет, г. Москва, Россия

E-mail: ii.tcinyaykin@physics.msu.ru

В последние десятилетия полевые транзисторы с каналом-нанопроводом приобретают все большую популярность среди исследователей, поскольку они находят свое практическое применение в качестве наноразмерных сенсоров в физике, химии, биологии и медицине [1-2]. Особенно перспективны разработки в области биоаналитических применений. Локальные изменения поля достаточной величины способны изменить проводимость нанопровода, что дает возможность регистрации с помощью такого устройства присоединения или приближения к поверхности нанопровода малых заряженных частиц. Транзистор способен с высокой чувствительностью обнаруживать биомолекулярные взаимодействия на поверхности канала-нанопровода.

Наиболее удобным материалом для изготовления структур полевых транзисторов с каналом-нанопроводом является кремний на изоляторе (КНИ). КНИ представляет собой тонкий (50 - 100 нм) слой монокристаллического кремния, отделенный от кремниевой подложки слоем (100 -200 нм) оксида кремния. В этом верхнем слое кремния и формируют полупроводниковую часть структуры.

Полевые транзисторы из КНИ с толщиной верхнего кремниевого слоя 110 нм изготавливались традиционными для полупроводниковой электроники методами фото- и электронной литографии, реактивно-ионного травления и вакуумного осаждения.

Для увеличения эффективной площади поверхность кремниевого нанопровода была модифицирована отдельно расположенными наночастицами золота на которые ковалентно иммобилизованы фрагменты специфических антител с использованием их собственных тиоловых групп [2]. Чувствительность полевого транзистора с модифицированным каналом превосходит аналогичные показатели транзисторов с обычным каналом-нанопроводом.

Предложенная конструкция биосенсорной системы позволяла модифицировать поверхность нанопроводов антителами различной специфичности. Это позволило идентифицировать различные биомаркеры рака: специфический для простаты антиген (PSA), тиреоглобулин (Tg) и тиреотропный гормон (TSH) в буфере и искусственных человеческих сыворотках.

Исследуемая биосенсорная система продемонстрировала высокую чувствительность и широкий диапазон определяемых концентраций. Кроме того, подобная система

не требует использования больших объемов исследуемого вещества для проведения анализа, обладает большим потенциалом для широкого использования, так как легко масштабируется, имеет низкую стоимость, высокую чувствительность и скорость анализа.

Литература

1. D.E. Presnov, S.V. Amitonov, P.A. Krutitskii, et al., *Beilstein journal of nanotechnology*, 4, 330 (2013).
2. G. Presnova, D. Presnov, V. Krupenin, et al., *Biosensors and Bioelectronics*, 88, 283–289, (2017).

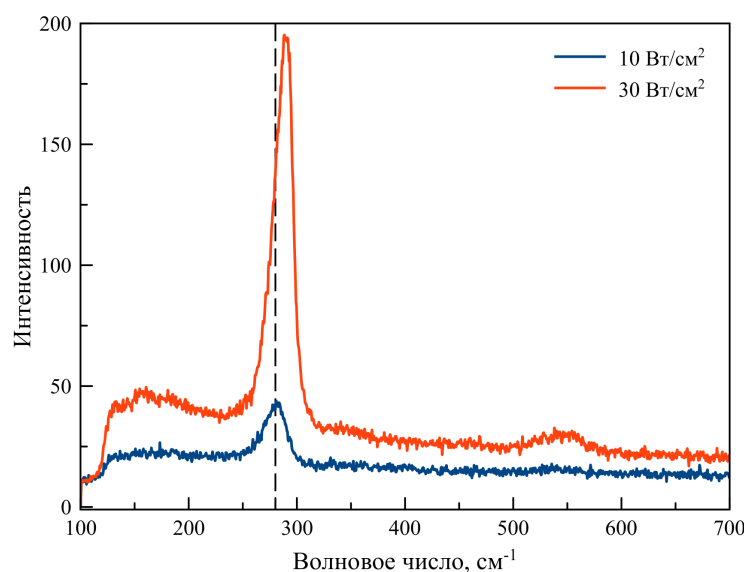
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ В ГЕРМАНИЕВЫХ НАНОНИТЯХ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Шарафутдинова А.М.

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: alfick2001@gmail.com

В последнее время большое внимание направлено на изучение физических свойств наноструктур германия [1,2]. В сравнении с кремнием, германий обладает рядом преимуществ: большая подвижность носителей заряда, обещающая большую частоту работы устройств, хорошая совместимость с диэлектрическими материалами [2]. Существует перспектива использования нанонитей германия как основы для создания полевых транзисторов для интегральных схем, в качестве анодного материала в литий-ионных батареях вместо графита, а также в газовых сенсорах и фотодетекторах [1,2].



К настоящему моменту разработано множество различных методов синтеза германиевых нанонитей: метод лазерной абляции, CVD-метод, шаблонный синтез и другие [2]. Наиболее распространенным способом получения нанонитей германия является метод химического осаждения из пара (CVD-метод) [3]. Для выращивания нанонитей германия этим методом необходимо поддержание высоких температур, что приводит к большим энергетическим затратам при синтезе. В нашей работе нанонити были выращены методом электрохимического осаждения из раствора. В качестве затравки на подложку из титановой фольги наносились наночастицы легкоплавкого металла - индия. Жидкий индий служит электродом, в котором происходит восстановление германия из раствора. Восстановленный германий осаждается на подложке, формируя таким образом нанонити.

Преимуществом описанного метода является то, что синтез нитей происходит при относительно низких температурах, однако это может привести к формированию неустойчивой по отношению к нагреванию или воздействию электромагнитного излучения структуры. Мы можем наблюдать необратимые изменения в кристаллической структуре нитей при воздействии лазерного излучения относительно небольшой интенсивности.

Для исследования морфологии и кристалличности нитей применялась электронная микроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Метод КРС позволяет получить информацию о кристаллической структуре нитей. Вместе с этим лазерное излучение, используемое в КРС-спектроскопии, может оказывать локальный нагрев материала. В данной работе методом КРС изучались возникающие таким образом тепловые эффекты в выращенных нитях.

На рисунке приведен спектр КРС нанонитей германия, полученных на титановой подложке. Из приведенного спектра видно, что увеличение интенсивности возбуждения в 3 раза приводит к изменению структуры нитей, которые исходно, как видно из спектра, были аморфными.

Литература

1. Seifner M.S., Perti P., Bernardi J., Biswas S., Holmes J.D., Barth S. Lead-supported germanium nanowire growth // *Materials Letters*. 2016, v.173, p. 248-251.
2. Li Z.P., Zheng Y.C. A Review on Germanium Nanowires // *Recent Patents on Nanotechnology*. 2012, v.6(1), p. 44-59.
3. Mahenderkar N.K., Liu Y.-C., Koza J.A., Switzer J.A. Electrodeposited Germanium Nanowires // *ACS nano*. 2014.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ СЛОЕВ ПОЛИ-ПАРА-КСИЛИЛЕНА

Швецов Б.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: b.shvetsov@mail.ru

Одним из перспективных элементов для создания нейроморфных вычислительных систем является мемристор – прибор, сочетающий в себе одновременно функции обработки информации и ее хранения. Главная физическая особенность мемристора – нелинейная вольтамперная характеристика (ВАХ), обладающая гистерезисом. Мемристивные элементы на основе органических материалов к настоящему моменту не уступают по основным характеристикам неорганическим мемристорам: отношению сопротивлений в низко- и высокопроводящем состояниях, времени хранения состояния, количеству циклов переключения и др. При этом органические материалы обладают рядом несомненных преимуществ: дешевизна и простота изготовления, возможность исполнения на гибких подложках и возможность трехмерного конструирования материала. Одними из наиболее перспективных структур являются мемристоры на основе полимерных слоев поли-пара-ксилилена (ппк) [1]. Несмотря на то, что в таких мемристивных элементах памяти продемонстрированы довольно сильные эффекты резистивного переключения, механизм переключения в них изучен не в полной мере. Поэтому целью данной работы является изучение электрофизических свойств мемристоров на основе слоев ппк и механизма их переключения.

Для синтеза ппк покрытий был использован метод газофазной полимеризации на поверхности. Пленки ппк толщиной 100 нм осаждались на стеклянные подложки с нанесенным прозрачным проводящим материалом ИТО, который выступал в качестве нижнего электрода. В качестве верхнего электрода использовались металлы: серебро,

алюминий, медь и титан, которые наносились магнетронным распылением через теневую маску с размером отверстия $0,2 \times 0,5$ мм². Электрофизические характеристики измерялись на аналитической зондовой станции Cascade Microtech PM5, оснащенной источником-измерителем National Instruments PXIe-4139.

Для изготовленных мемристоров были измерены ВАХи, исследование которых показало наличие эффекта резистивного переключения с отношением сопротивлений в высоко- и низкоомном состояниях более 10^3 . Изменение сопротивления материала связано с миграцией ионов металлов из слоя верхнего электрода в слой ппк и обратно. Также была продемонстрирована возможность задания не менее 16 стабильных резистивных состояний в структурах с медным верхним электродом со временем хранения промежуточных состояний более 10^3 с. Исследована возможность изменения сопротивления мемристоров по био-подобным правилам типа пластичности, зависящей от времени прихода импульсов (STDP).

Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-37-20014.

Литература

Cai Y. et al. A flexible organic resistance memory device for wearable biomedical applications // Nanotechnology. – 2016. – Vol. 27. – № 27. – P. 275206.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР, ВЛИЯЮЩИХ НА НЕЛИНЕЙНО ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК СРЕДЫ, МЕТОДАМИ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Шилов В.А.

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
E-mail: schilov.va15@physics.msu.ru

Из экспериментов известно, что наночастицы на поверхности кремния влияют на поверхностную генерацию второй гармоники (ГВГ)[1,5,6] и генерацию терагерцового излучения[2,3,4], в том числе, наблюдается усиление этих эффектов. Для ГВГ заметное усиление происходит при средней толщине ~ 5 Å, когда плёнка ещё является островковой и состоит из множества отдельных золотых капель. Для генерации терагерцового излучения тоже заметен значительный вклад в его интенсивность и спектр, связанный с наличием золотой пленки на поверхности кремния. Для дальнейшего исследования этих эффектов необходимой задачей является решение проблемы характеристики этих наночастиц и тонких островковых плёнок. Для построения модели взаимодействия излучения с островковой золотой плёнкой необходимо знать форму частиц золота и их размеры, со слоем графена – толщину плёнки (для определения количества слоёв), средний размер, процент покрытия поверхности образца графеном. В настоящее время зондовая микроскопия – один из основных методов высокоточного исследования поверхности. В данной работе приведены результаты работы по характеристике поверхности нескольких образцов при помощи сканирующего туннельного (STM) и атомно-силового (AFM) микроскопа: островковые золотые плёнки толщиной 0.1-15 Å на кремнии, слой графена на кремнии. А так же произведено сравнение точности различных методов микроскопии для характеристики этих образцов.

Графен на кремнии – кристаллический монослой графена на кремниевой подложке. Для него были получены сканы на STM и AFM микроскопе, два из них показаны на (рис.1).

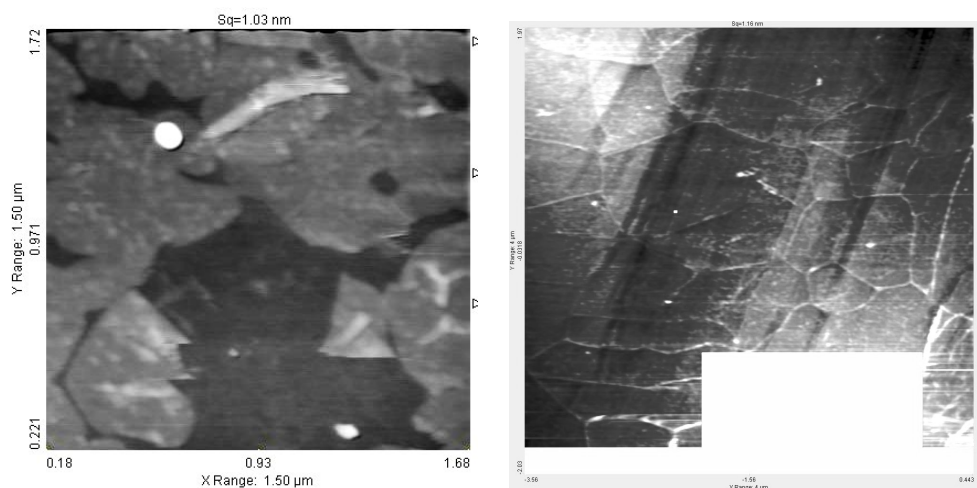
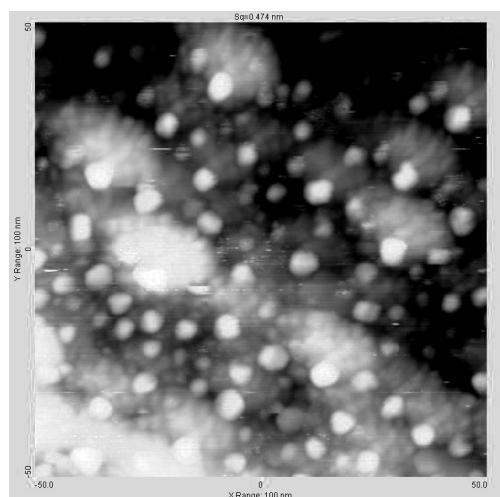


Рис. 1 AFM сканы графена на Si. Получены характерные размеры структур на поверхности: средний размер чешуйки: 800нм, толщина слоя графена: 6-8Å.

Для образцов кремния с золотыми островковыми плёнками с эффективной толщиной 0.1-15 Å при помощи STM микроскопа были определены размеры капель и результат был сопоставлен с результатами, полученными на электронном микроскопе. Один из сканов показан на (рис. 2)



Эффективная толщина плёнки, Å	Средний радиус капли золота, по SEM скану ± среднеквадратичное отклонение радиуса капль, нм	Средний радиус капли золота, по STM скану ± среднеквадратичное отклонение радиуса капль, нм
10	3.76±1.82	3.82±2.14
5	3.31±1.66	3.28±1.62
2	2.81±1.41	2.75±1.45
...		

Рис. 2. STM скан золота на Si.

В случае малого радиуса капль (при средней толщине плёнки 2-6 Å) более точным является характеристика при помощи STM микроскопа, т. к. маленькие капли золота имеют размеры, близкие к разрешению электронного (SEM) микроскопа, и некоторые капли совсем маленького размера могут не разрешаться, из-за этого средний радиус получается завышенным, а STM имеет гораздо большее разрешение и позволяет увидеть все капли золота.

Для больших капль золота (при средней толщине плёнки >6 Å) более точным является характеристика при помощи электронного микроскопа, т. к. большие капли хорошо разрешаются, и он имеет большую область сканирования и позволяет набрать большую статистику.

Литература

1. Козлов И.С. Влияние субволновых пленок золота на нелинейно-оптический отклик поверхности кремния в условиях сверхвысокого вакуума //Дипломная работа. Физический факультет МГУ – 2017. <https://istina.msu.ru/diplomas/60758827/>

2. Синько А.С. Нелинейно-оптическая диагностика в видимом и терагерцовом диапазоне частот субволновых квантовых точек на поверхности кремния в условиях сверхвысокого вакуума // Дипломная работа. Физический факультет МГУ – 2018.
3. Coutaz J. L., Kuzel P., Kadlec F. Study of terahertz radiation generated by optical rectification on thin gold films // Optics letters: A publication of the Optical Society of America. – 2005. – №. 11. – С. 1402-1404.
4. Jin Y. et al. Anomalous optically generated THz beams from metal/GaAs interfaces // Applied physics letters. – 1994. – Т. 65. – №. 6. – С. 682-684.
5. Wang F. X. et al. Surface and bulk contributions to the second-order nonlinear optical response of a gold film // Physical Review B. – 2009. – Т. 80. – №. 23. – С. 233402.
6. Zhang, Mengyu Yao, Fuhao Ji, Dong Qian, Shan Qiao, Y. R. Shen, and Wei-Tao Liu Surface and bulk contributions to the second-harmonic generation in Bi₂Se₃ Hui Shi, Yu // Phys. Rev. B 94, 205307 – 28 November 2016

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОДИСКОВ ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Юшков В.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: iushkov@physics.msu.ru

Прогресс, достигнутый в последние годы в области нанофотоники, привёл к созданию двумерных сверхтонких оптических элементов – метаповерхностей, позволяющих эффективно управлять фазовым и амплитудным профилем световых волн. Изначально такие метаповерхности изготавливались из металлов [1], но они имели высокие омические потери в оптическом диапазоне. Решением этой проблемы стало использование диэлектриков в качестве материала нанорезонаторов, формирующих метаповерхность. На основе этой идеи были созданы различные примеры метаповерхностей, реализующих металлинзы [2], голограммы [3] и другие оптические устройства. Отдельный интерес к этой тематике связан с созданием наноструктур, позволяющих проводить аналоговые математические операции, такие как свёртка, интегрирование и дифференцирование с оптическим сигналом. Основная идея проведения таких операций основана на управлении Фурье-образом анализируемого изображения. с помощью оптических наноструктур [4].

Целью настоящей работы является разработка и численное исследование устройства, работающего в ближней ИК области спектра, позволяющего проводить распознавание определённого образа на изображении. Ключевым элементом такого устройства является метаповерхность, созданная из кремниевых дисков, разбитая на ячейки-пиксели, имеющие собственный коэффициент отражения и сдвиг фазы падающей волны, определяемые Фурье-образом опорного изображения. Выбор дизайна основан на том, что его легко изготовить известными методами микроэлектроники и он нечувствителен к поляризации в силу симметрии. Кроме того, было показано, что с помощью таких метаповерхностей можно управлять фазой световой волны с сохранением высокого коэффициента пропускания и низких потерь [5].

В ходе работы был проведён численный эксперимент, позволяющий установить зависимость коэффициента отражения и сдвига фазы для однородной метаповерхности. Также было выбрано распознаваемое изображение и найден его Фурье-образ, что позволило спроектировать метаповерхность, позволяющую проводить свёртку падающего изображения с искомым. С её помощью было проведено моделирование реальной установки, использующей линзы для создания прямого и обратного Фурье-образа. В качестве метода расчета отражения и сдвига фазы был выбран метод конечных разностей во

временной области (Finite-difference time-domain method), реализованный в коммерческом программном пакете Lumerical FDTD Solutions.

Результаты, полученные в рамках данной работы, могут быть использованы для создания аналоговых сверхтонких устройств для корреляционного анализа оптических изображений. Это может быть актуально для систем, в которых компактность и энергопотребление играет решающую роль.

Литература

1. Isabelle Staude, Jorg Schilling, «Metamaterial-inspired silicon nanophotonics», *Nature Photonics* 11, 274-284 (2017).
2. Mohammadreza Khorasaninejad, Federico Capasso, «Metalenses: Versatile multifunctional photonic components», *Science* 358, 1146 (2017).
3. Katie E. Chong et al., «Efficient polarization-insensitive complex wavefront control using Huygens' metasurfaces based on dielectric resonant meta-atoms», *ACS Photonics* 3, 514-519 (2016).
4. Ata Chizari et al., «Analog optical computing based on a dielectric meta-relect array», *Opt. Lett.* 41, 3451-3453 (2016)
5. Isabelle Staude et. al, «Tailoring Directional Scattering through Magnetic and Electric Resonances in Subwavelength Silicon Nanodisks», *ACS Nano* 7, 7824-7832 (2013).

ЭЛЕКТРОННЫЙ И ДЫРОЧНЫЙ ТРАНСПОРТ В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ ТИОФЕН-ФЕНИЛЕНОВЫХ ОЛИГОМЕРОВ

Якушкин Л.Е.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: yakushkin@mail.ru

В последние несколько десятилетий органические материалы играют всё более заметную роль в производстве электронных устройств. В связи с этим поиск новых органических полупроводниковых материалов и определение их электрических свойств представляет собой важную задачу. В исследовании органических электронных и оптоэлектронных устройств существенную роль играют тиофен-фениленовые олигомеры. Это обусловлено высокой подвижностью носителей заряда в активных слоях транзисторов на основе таких материалов, а также большим разнообразием молекулярных структур тиофен-фениленов [1].

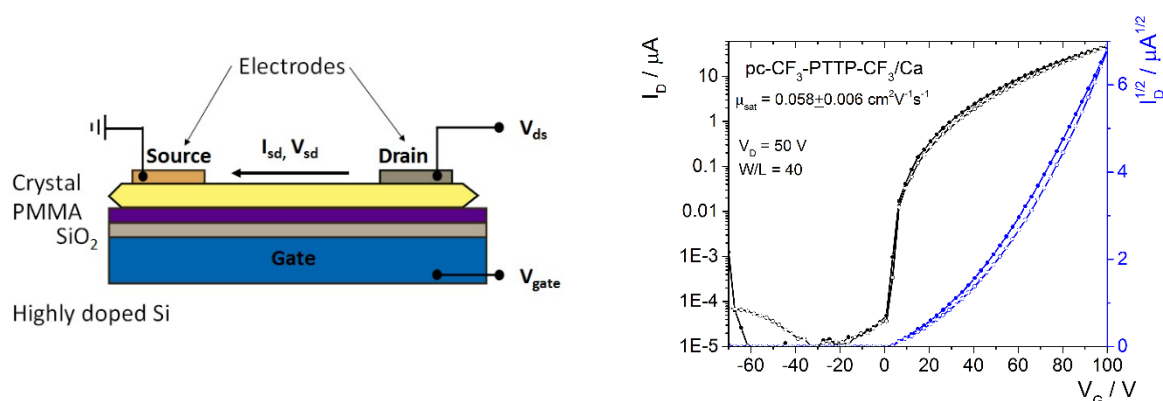


Рис. 3. Устройство полевого транзистора и его передаточная характеристика.

Одно из возможных применений органических материалов в электронике – органические светоизлучающие транзисторы и фототранзисторы. Для работы таких устройств существенным является наличие в активном слое носителей заряда как p-типа, так и n-типа, то есть электронов и дырок одновременно. В связи с этим одно из направлений исследования органических полупроводниковых структур – определение типа про-

димости в тонком слое таких веществ и измерение подвижности носителей зарядов, а также некоторых других характеристик.

В настоящей работе исследовался электронный и дырочный транспорт в канале транзисторов на основе веществ $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ и $\text{CF}_3\text{-PTTP-CF}_3$. Предполагалось, что в этих полупроводниках будет обнаружена высокая подвижность носителей заряда [2].

Методом напыления в вакуумной камере были изготовлены транзисторы на основе данных веществ. Проведённые измерения вольтамперных характеристик показали, что в активном слое вещества $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ наблюдается дырочный транспорт, а в $\text{CF}_3\text{-PTTP-CF}_3$ – электронный, при этом в $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ отсутствует электронный транспорт, а в $\text{CF}_3\text{-PTTP-CF}_3$ – дырочный.

Литература

1. Qi Xia, Martin Burkhardt, Marcus Halik Oligothiophens in organic thin film transistors – Morphology, stability and temperature operation // Organic Electronics. 2008, №9.

2. D.I. Dominskiy, A.Yu. Sosorev, T.V. Rybalova, N.I. Sorokina, O.A. Alekseeva, A.V. Andrianova, I.A. Gvozdikova, O.V. Borshchev, S.A. Ponomarenko, D.Yu. Paraschuk. Book of abstracts, 13th International Conference on Organic Electronics - 2017 (ICOE-2017), Moscow: Printeltech (2017) p. 96.

СОДЕРЖАНИЕ

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Определение оптимальной ширины антибликовых покрытий.....	625
Артемьева О.С.	
Синтез квантовых точек CDSE с регулируемыми спектральными характеристиками в водном растворе	625
Вострикова И.В.	
Изучение кинематики бактерий методами сканирующей зондовой микроскопии	627
Гончарова Т.С., Пылев И.С.	
Исследование кремниевых нанoeлектромеханических резонаторов на основе подвешенных наноструктур	628
Дорофеев А.А.	
Исследование поверхности кристаллов кремния после серии производственно-технологической обработки методом атомно-силовой микроскопии.....	629
Ефремова А.А.	
Структурные и спектроскопические свойства углеродных пленок, полученных при различных энергиях ионной стимуляции в атмосфере азота	632
Завидовский И.А., Стрелецкий О.А.	
Комплексное теоретическое исследование механических и квантовых свойств тонких металлических пленок.....	634
Зеленский В.С., Цысарь К.М.	
Анализ и описание поверхности углеродных пленок и их морфологии.....	634
Иванченко И.О., Арутинов Н.Э.	
Туннельный ток в МОП-транзисторе.....	636
Исаева А.А.	
Электрические характеристики тонких пленок алюминия на различных подложках.....	637
Кратко А.О, Горбунов Н.Г.	
Создание Ni-металлизации на развитой 3D поверхности p-n-перехода	638
Крылова Е.Н., Усков В.С., Старков В.В.	
Определение концентрации свободных носителей заряда в массивах пост-легированных кремниевых нанонитей методом нарушенного полного внутреннего отражения.....	640
Липкова Е.А.	
Разработка молекулярного одноэлектронного транзистора С конфигурацией электрода затвора снизу	641
Лялина А.М., Морозова Е.К.	
Исследование зависимости параметров резистивного переключения при вариации состава тонкопленочной структуры мемристивных наноструктур на основе нитрида кремния	643
Макарецов И.В., Королев Д.С., Белов А.И., Михайлов А.Н.	
Зарядка и переключение доменов сегнетоэлектриков LiTaO_3 и LiNbO_3 при облучении их электронными пучками средних энергий.....	644
Татаринцев А.А., Марковец К.Е.	
Влияние степени пассивации кристаллического кремния в НИТ структурах на их фотолюминесценцию	645
Мацукатова А.Н.	
Влияние концентрации H_2O_2 в методе металл-стимулированного химического травления на структурные и оптические свойства пористых нанонитей кремния	646
Моисеев Д. В., Божьев И.В., Гончар К.А., Осминкина Л.А.	
Адаптивные свойства нейроморфных систем на основе наногранулированных мемристоров	647
Никируй К.Э.	
Электрические и фотоэлектрические свойства нанокристаллического оксида кобальта	648
Павлов И.С., Мартышов М.Н.	
Электрофизические свойства полианилина, модифицированного наночастицами кремния	649
Перченко Е.М., Савин К.А., Новиков И.В., Кабановой В.А.	

Исследование многослойных спин-туннельных структур	650
Пестова А.Н.	
Нанесение припойных шариков на кремниевые кристаллы с алюминиевой металлизацией контактных площадок в технологии «flip-chip»	652
Побединский В.В.	
Структурные и электронные свойства графеновой наноленты	653
Пономарев В.В.	
Высокочастотная модификация поверхности методами сканирующей зондовой микроскопии	654
Пылев И.С., Гончарова Т.С.	
Изготовление резервуарной нейронной сети на основе примесных атомов мышьяка в кремнии	656
Рыженкова С.Ю.	
Подавление поглощения кислорода TiN электродом на межфазовой границе TiN/SiO ₂ посредством введения тонкого слоя Al ₂ O ₃	657
Сахоненков С.С., Филатова Е.О.	
Моделирование квантового транспорта в нанодиодах на основе углеродных нанотрубок с целью разработки оптической ректенны	658
Тимкаева Д. А.	
Пространственно-локализованный фотоэффект в амбиполярных органических полевых транзисторах	659
Труханов В.А.	
Создание трехмерной кремниевой структуры для бета-вольтаического преобразователя	660
Усков В.С., Крылова Е.Н., Конюхов М.В.	
Сенсоры на основе полевых транзисторов с кремниевым каналом-нанопроводом для исследования биоспецифических взаимодействий.	662
Циняйкин И.И., Крупенин В.А., Божьев И.В., Преснова Г.В., Рубцова М.Ю., Уляшова М.М., Преснов Д.Е.	
Исследование тепловых эффектов в германиевых нанонитях методом комбинационного рассеяния света	663
Шарафутдинова А.М.	
Изучение механизма резистивного переключения в структурах на основе слоёв поли-пара-ксилилена	664
Швецов Б.С.	
Оценка параметров поверхностных наноструктур, влияющих на нелинейно оптический отклик среды, методами зондовой микроскопии	665
Шилов В.А.	
Оптические метаповерхности на основе кремниевых нанодисков для корреляционного анализа изображений	667
Юшков В.В.	
Электронный и дырочный транспорт в полевых транзисторах на основе тиофен-фениленовых олигомеров	668
Якушкин Л.Е.	