



ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ-2016

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ,
АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ,
АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
«ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ-2016»,
ПОСВЯЩЁННОЙ ГОДУ ОБРАЗОВАНИЯ
В СОДРУЖЕСТВЕ НЕЗАВИСИМЫХ ГОСУДАРСТВ

КРАСНОЯРСК, СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

15-25 АПРЕЛЯ 2016 Г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Сборник материалов
Международной конференции студентов,
аспирантов и молодых учёных
«Перспектив Свободный-2016»,
посвящённой Году образования
в Содружестве Независимых Государств

Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15-25 апреля
2016 г.

Красноярск, 2016



ПЕРСПЕКТИВ СВОБОДНЫЙ-2016

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15-25 апреля 2016 г.

«Полупроводниковая электроника и наноэлектроника»



**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕМНИЕВОЙ
НИЗКОРАЗЕРНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЖИДКОСТНОГО СЕНСОРА****Авилов Н. Е., Семченко В. В.****научный руководитель канд. техн. наук Шелованова Г.Н.***Сибирский федеральный университет*

Применяя термин "низкоразмерный, или пористый, кремний", имеют в виду, что речь идет о материале с изменяющимися разнообразными свойствами, зависящими от показателя пористости и морфологии пор ^[1]. Многообразие морфологии пор низкоразмерного кремния приводит к многообразию оптических, электрических и механических характеристик материала. При формировании низкоразмерной среды могут быть получены кремниевые элементы нанометровых размеров. Для нанокристаллов с размерами менее 4 нм в пористом кремнии наблюдаются те же явления, что и в других наноструктурированных материалах: квантование энергетического спектра, увеличение ширины запрещенной зоны с 1,1 до 1,8 – 2,9 эВ, уменьшение диэлектрической проницаемости. ^[2]. Заполнение пор другими химическими веществами дает возможность формировать дополнительные низкоразмерные элементы в объеме пористого кремния. Возможность управления свойствами пористого материала, совместимость с технологическими операциями кремниевой микроэлектроники делают пористый кремний одним из самых перспективных материалов микро-, опто- и наноэлектроники. Исследование свойств низкоразмерного кремния с целью создания конкретных электронных устройств, например, жидкостных сенсоров, является актуальной задачей прикладной микроэлектроники.

В основе оптических явлений в полупроводниках лежит взаимодействие электромагнитного излучения со связанными и свободными носителями заряда, атомами кристаллической решетки, примесными атомами, электронно-дырочной плазмой. Поэтому оптические явления включают широкий круг процессов, протекающих в полупроводниковых кристаллах под действием электромагнитного излучения в интервале длин волн от 0,2 до 100 мкм. Измеряемыми параметрами, характеризующими взаимодействие света с веществом, являются коэффициент отражения R (определяет долю отраженного от поверхности кристалла света) и коэффициент пропускания T (характеризует долю прошедшего через образец света).

В данной работе исследовали оптические спектры низкоразмерных сред в кремнии, сформированных различными способами: электрохимическое травление в монокристаллическом кремнии, электроэрозионное формирование, а также химическое травление в пленке кремния, нанесенного на поликоричневую подложку вакуумно-термическим методом. Спектры зеркального отражения получены с помощью прибора "Specord-M-400", который представляет собой спектрофотометр для измерения поглощения в ультрафиолетовой ("UV") и видимой ("VIS") областях спектра.

Идея эксперимента заключается в том, что под воздействием диагностируемой среды происходит изменение спектра зеркального отражения, по которому можно отличить, какая именно среда воздействует на образец. В качестве диагностируемой среды были использованы две марки бензина АИ-80 и АИ-92 (с существенно отличающимися значениями октанового числа), в качестве сенсоров применялись вышеуказанные образцы. Проводилось сканирование спектров зеркального отражения для исходных образцов, затем на образец наносили дозированное количество диагностируемой жидкости и сканировали спектр, после испарения жидкости

сканирование повторялось. Было замечено, что спектр не восстанавливает первоначальный характер сразу же после испарения, на это уходит время в пределах двух-шести минут, по истечении которого спектр зеркального отражения практически полностью повторяет исходный. Были получены спектральные характеристики исходных образцов; образцов, помещенных в бензин одной марки; образцов с восстановленными характеристиками; образцов, помещенных в бензин другой марки.

Спектры низкоразмерных сред после испарения бензина не приводятся, поскольку повторяют характер спектров исходных образцов.

Для сравнения представлен спектр зеркального отражения монокристаллической подложки кремния (рисунок 1). В этой области спектра кремний имеет сверхвысокую дисперсию и самое большое значение показателя преломления $n = 3,4$.

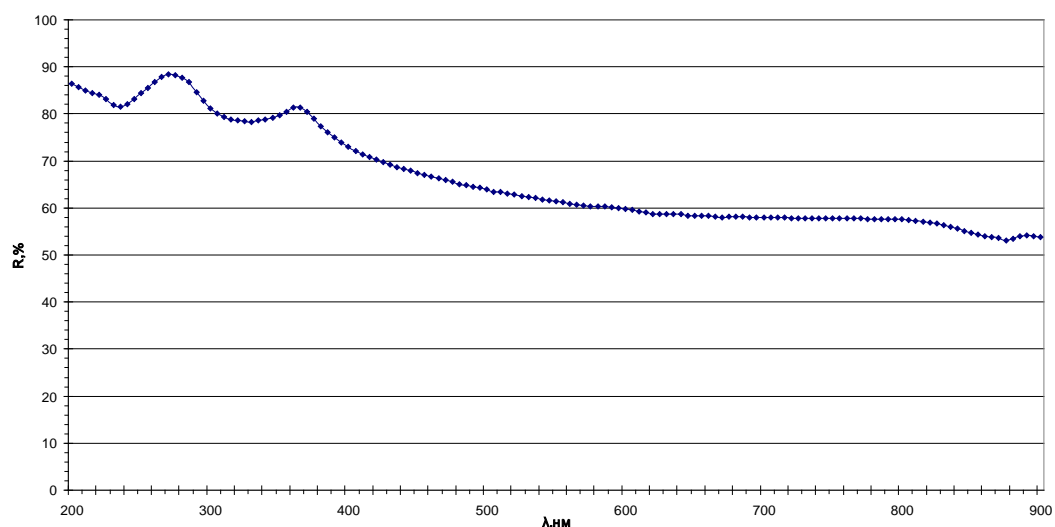


Рис. 1 - Спектр зеркального отражения подложки исходного кремния

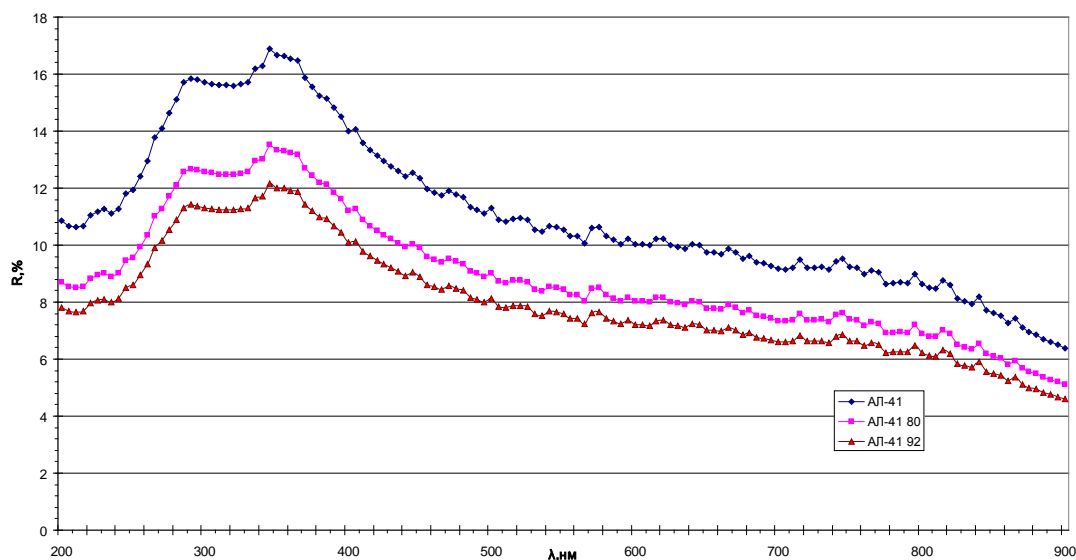


Рис. 2 – Спектр зеркального отражения образца пористого кремния, полученного электрохимическим способом на монокристаллической подложке

В зависимости от способа формирования пор спектр меняется (рисунок 2 и 3). В том случае, когда характерные размеры пор и нанокристаллов много меньше длины

волны, наноструктурированный полупроводник можно рассматривать как однородную оптическую среду с показателем преломления, отличным от показателя преломления исходного вещества ^[3].

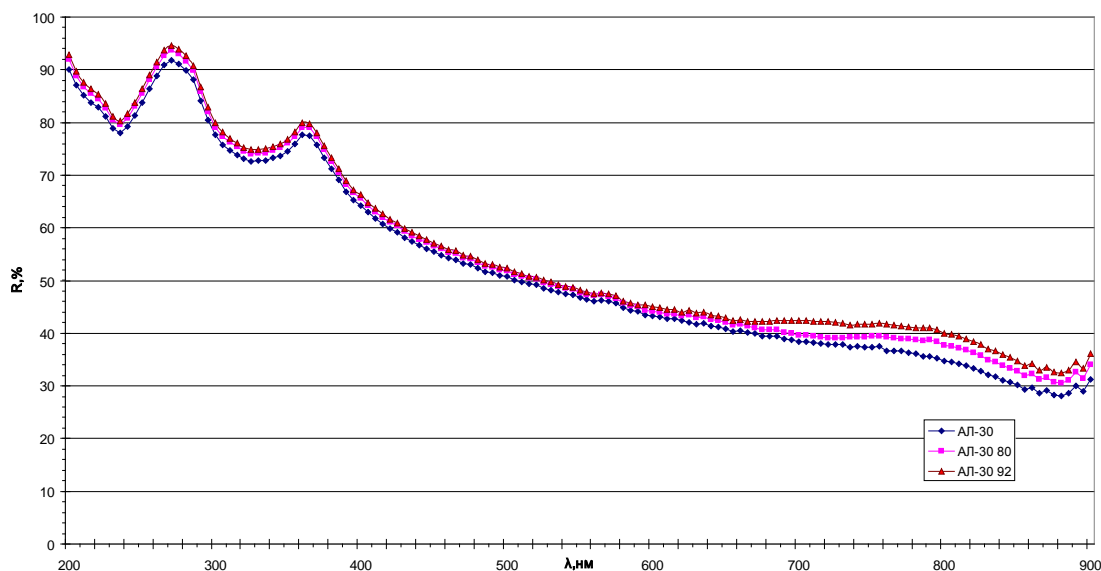


Рис. 3 – Спектр зеркального отражения образца пористого кремния, полученного электроэрозионным способом на монокристаллической кремниевой подложке

Анализ оптических свойств пористых полупроводников и диэлектриков показывает, что упорядоченная структура пор приводит к возникновению в них двулучепреломления формы. В тех случаях, когда размер пор и нанокристаллов мал по сравнению с длиной волны, двулучепреломление формы удастся описать в рамках приближения эффективной среды. В то же время, для неоднородных фотонных систем, у которых характерные размеры сравнимы с длиной волны, принципиальную роль начинают играть процессы рассеяния и локализации света.

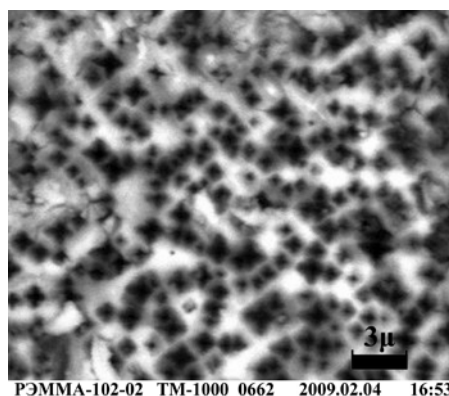


Рис.4 – Поверхность образца после электроэрозионной обработки кремниевой подложки

На рисунке 4 отображена поверхность образца, полученного электроэрозионным способом на монокристаллической кремниевой подложке. В качестве катода-инструмента для формирования такой среды использовали электрод, полученный методом порошковой металлургии, содержащий частицы соответствующего размера. Образцы с таким

размером пор проявляют изменение спектра отражения в видимой и инфракрасной области спектра значительно слабее образцов с меньшим размером пор (например, полученных электрохимической обработкой или химическим травлением).

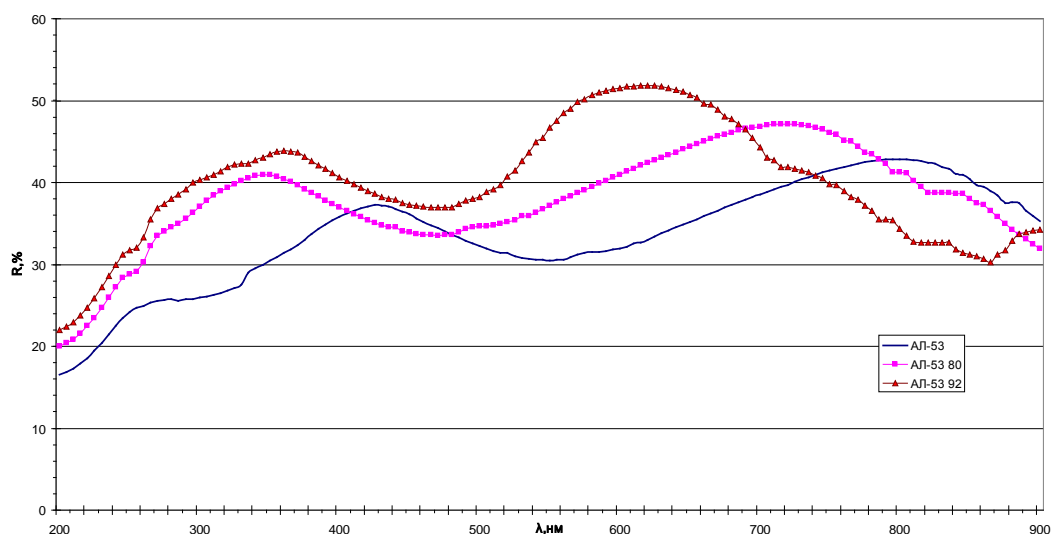


Рис.5 – Спектр зеркального отражения образца, полученного химическим травлением кремниевой пленки, нанесенной на поликоровую подложку

В результате проделанной работы было установлено, что низкоразмерная среда, полученная химическим травлением пленки кремния на поликоровой подложке (рисунок 5) наиболее сильно, по сравнению с низкоразмерными структурами в монокристаллическом кремнии, может изменять свой спектр зеркального отражения в диапазоне длин волн видимой области света в зависимости от воздействующей на них среды. Как показал эксперимент, возможно создание сенсорного устройства для экспресс-диагностики жидкой среды, например, качества бензина, путем разработки чувствительных элементов в виде пористых пленок кремния на диэлектрической подложке с помощью отработанных технологий микроэлектроники.

Список литературы

1. Зимин С. П. Пористый кремний – материал с новыми свойствами // Соросовский образовательный журнал, том, №1, 2004, с.101-107.
2. Соколов В. И. Некоторые характеристики пористого кремния (отражение, рассеяние, показатель преломления, микротвердость) / В. И. Соколов, А. И. Шелых // Письма в ЖТФ, 2008, т. 34, вып. 5, стр. 34 – 39.
3. Образцов А. Н. Поглощение света и фотолюминесценция пористого кремния / А. Н. Образцов, В. А. Караванский, Х. Окуши, Х. Ватанабе // ФТП, 1998, том 32, №8, с.1001–1005.

ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР В СИСТЕМАХ TCAD

Ануфриев И.И., Гаврилюк И.Н.

научный руководитель канд. техн. наук Семенова О.В.

Институт инженерной физики и радиоэлектроники

Введение

Стремительное развитие полупроводниковых технологий ставит ряд задач перед специалистами, работающими в области приборно-технологического проектирования. Важно не только предложить принципиально новое технологическое решение или устройство, но и осуществить быструю разработку и внедрение технологии в производство с минимальными затратами временных и денежных ресурсов. Успешное решение данных задач в конечном итоге определяет конкурентоспособность предприятия в условиях непрерывно развивающегося рынка технологий.

В настоящее время одним из основных способов для решения вышеуказанных проблем является использование программного обеспечения *TCAD* (*Technology Computer – Aided Design* – технология автоматизированного проектирования). На сегодняшний день это основной инструмент, который используется в сквозном моделировании и разработке полупроводниковых приборов, устройств и элементов интегральных микросхем (ИМС), учитывая технологические процессы их производства. Так, использование *TCAD* позволяет заменить трудоемкие и затратные испытания подложек при разработке нового полупроводникового устройства или технологии.

Целью данной работы является экспериментальное исследование процесса моделирования технологического маршрута изготовления полупроводниковой структуры ячейки памяти в системе *TCAD* для демонстрации возможностей данного комплекса программ, а также для дальнейшей разработки методического обеспечения по подготовке специалистов в области технологического проектирования электронной компонентной базы.

Программное обеспечение *TCAD*

На сегодняшний день на рынке программного обеспечения представлено множество различных решений *TCAD*, использование которых существенно сокращает сроки разработки и упрощает приборно-технологическое проектирование полупроводниковых устройств. Одним из лидеров программных комплексов *TCAD* является система *Synopsys Sentaurus*, в которой реализован широкий набор инструментов для решения приборно-технологических задач. Основная задача системы – обеспечение разработчиков средствами приборно-технологического проектирования нового поколения, а также интеграция этих средств с САПР СБИС. Для инженера-физика, занимающегося разработкой современной элементной базы, предусмотрены средства точного физико-технологического моделирования. Инженер-технолог на производстве может воспользоваться инструментами на базе компактных моделей. Оба подхода, взаимно дополняя друг друга, позволяют ускорить разработку, улучшить параметры приборов и, как результат, снизить стоимость конечного продукта.

Моделирование полупроводниковой структуры ячейки памяти в *TCAD*

Моделирование технологических маршрутов интегральной микроэлектроники начинается с анализа маршрутной карты или описания технологического процесса. На этом этапе необходимо выделить структурообразующие операции, которые и будут исследованы средствами приборно-технологического моделирования.

Вспомогательные операции, обеспечивающие качество технологических операций и обрабатываемых поверхностей, относятся к подготовительным этапам основных технологических процессов и отдельно не моделируются.

В данной работе представлено приборно-технологическое моделирование ячейки памяти на базе n-MOS-транзистора, которая является основой твердотельных накопителей SSD. Данные устройства функционируют по принципу электрически стираемой перепрограммируемой flash-памяти (EEPROM). Флэш-память образуется из множества твердотельных ячеек, состоящих из одного специального флэш-транзистора. Строение ячейки флэш-памяти показано на рис. 1.

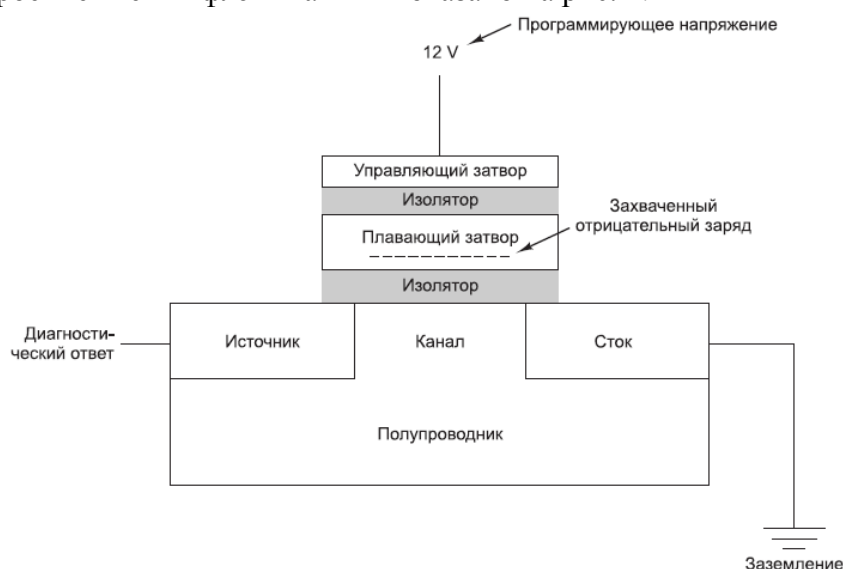


Рис.1 – Структура ячейки Flash-памяти

В транзистор встроены плавающий затвор, который может заряжаться и разряжаться при помощи высоких напряжений. До программирования плавающий затвор не влияет на работу транзистора, фактически являясь дополнительным изолятором между управляющим затвором и каналом транзистора. В этом состоянии ячейка функционирует как простой транзистор. Для программирования ячейки флэш-памяти на управляющий затвор подается напряжение 12 В, ускоряющее процесс инжекции горячих электронов в плавающий затвор. Электроны внедряются в плавающий затвор, что приводит к появлению отрицательного заряда внутри транзистора. Внедренный отрицательный заряд увеличивает напряжение, необходимое для включения транзистора; проверяя, включается ли канал при высоком или низком напряжении, можно определить, заряжен ли плавающий затвор, и таким образом получить результат 0 или 1 для ячейки флэш-памяти. Внедренный заряд остается в транзисторе даже при отключении питания, в результате чего ячейка флэш-памяти становится энергонезависимой.

Структура МОНОП (Метал - Оксид - Нитрид - Оксид - Полупроводник) – еще один из многообещающих типов энергонезависимой памяти, в котором на смену “плавающему” поликремниевому затвору пришел слой нитрида. За счет хранения носителей в пространственно изолированных ловушечных центрах нитрида (или на границе оксид - нитрид, где их концентрация выше) во много раз улучшаются характеристики надежности и удерживающей способности ячейки памяти.

Кроме того, в отличие от традиционных структур Flash-памяти с поликремниевым плавающим затвором, дефекты, вызванные SILC (Stress Induced Leakage Current - основной ограничивающий фактор для масштабирования толщины

туннельного диэлектрика) или технологией производства, в туннельном окисле не приводят к потере всего накопленного заряда. Отсюда следует еще одно преимущество МОНОП - структур: достигаются низкие напряжения программирования и стирания за счет использования очень тонкого слоя туннельного окисла. И, наконец, маршрут изготовления транзистора идентичен КМОП - техпроцессу за исключением формирования диэлектрического (Оксид – Нитрид - Оксид) стека.

Моделируемая ячейка памяти представляет собой полевой транзистор n-типа, структура которого состоит из следующих слоев:

1. Кремниевая подложка толщиной 50 мкм, легированная бором с концентрацией носителей $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Верхний слой кремния легирован примесью арсенида галлия с концентрацией носителей $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$;

2. Управляющий затвор из слоя поликремния толщиной 4 нм, легированного фосфором с концентрацией носителей $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;

3. Плавающий затвор состоит из 8-нанометрового слоя нитрида Si_3N_4 , 1,8-нанометрового слоя туннельного окисла, 4-нанометрового блокирующего слоя оксида.

Моделирование операций записи и стирания осуществляется варьированием напряжения на затворе (от V_{gp} до V_{ge}). Во время операции стирания при отрицательном напряжении на затворе часть электронов будет туннелировать из нитрида в область канала, но основную часть туннельного тока будут составлять дырки, туннелирующие в нитрид и рекомбинирующие с захваченными электронами.

Операция программирования (записи) информации в ячейку осуществляется подачей на управляемый затвор напряжения +12 В в течение 2 мс. Операция стирания информации осуществляется подачей напряжения обратной полярности -10 В в течение 8 мс.

Ниже представлены результаты приборно-технологического моделирования ячейки flash-памяти. Результаты технологического моделирования полупроводниковой структуры представлены на рисунках 2-4. Результаты приборного моделирования после проведения операций программирования и стирания информации представлены на рисунках 5, 6.

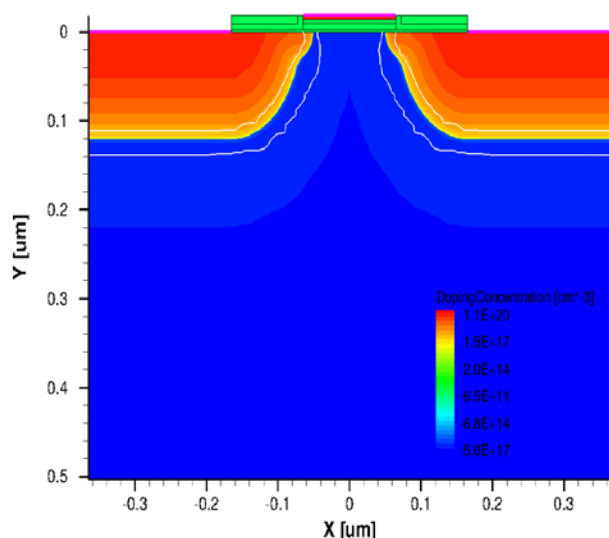


Рис.2 – Распределение примесей в МОНОП-структуре

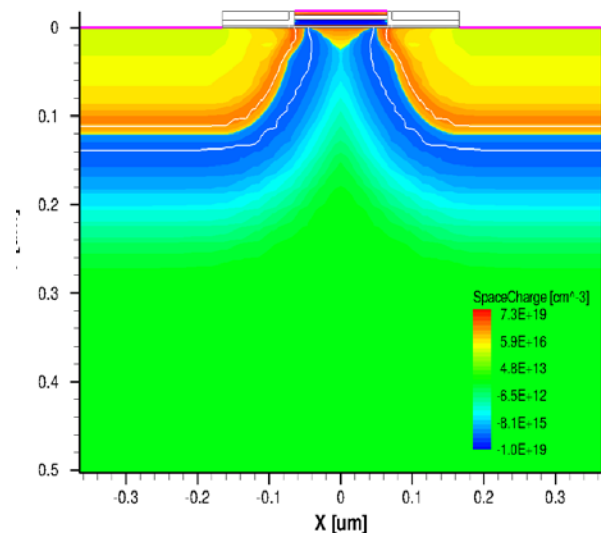


Рис.3 – Области пространственного заряда в МОНОП-структуре

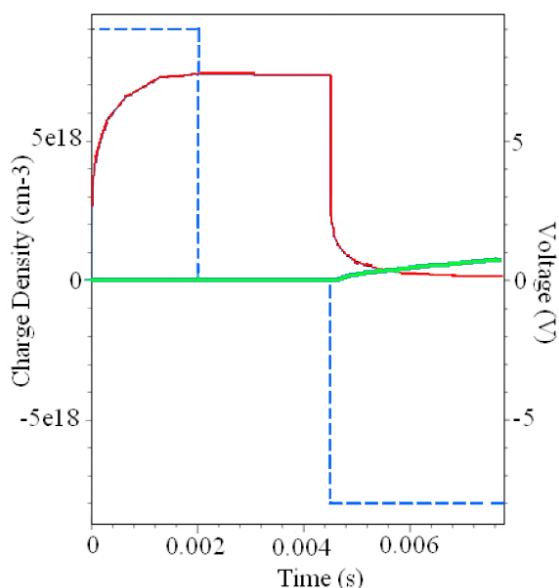


Рис.4 – Результаты моделирования работы МОНОП-транзистора: пунктирная линия-напряжение затвор-исток; красная линия – концентрация захваченных электронов, зеленая линия – концентрация захваченных дырок

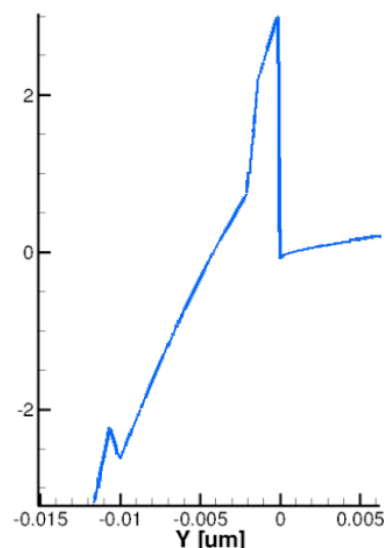


Рис.5 – Распределение границы зоны проводимости (зонная диаграмма) МОНОП-транзистора во время операции программирования

Заключение

Использование систем *TCAD* позволяет определить влияние параметров технологического процесса на электрические характеристики устройств и выявить оптимальный вариант конструкции полупроводниковой структуры без необходимости ее физической реализации и испытаний. Конструкторско-технологические режимы формирования ячейки с использованием *TCAD* позволяют промоделировать и рассчитать запоминающие свойства ячейки памяти в зависимости от выбора материала плавающего затвора и режимов операций программирования/стирания.

Материалы, используемые в данной работе, положены в основу разработки лабораторного практикума по дисциплине «Проектирование и технология электронной компонентной базы» для студентов направления 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» и могут быть использованы для разработки методического обеспечения подготовки и переподготовки специалистов на производственных предприятиях по изготовлению РЭА.

Список литературы

1. Гаврилюк И.Н., Окунев А.Ю. Программные средства *TCAD*: методические аспекты подготовки специалистов в области приборно-технологического проектирования электронной компонентной базы. Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научн. тр. / Красноярск: ИПК СФУ, 2014. С 446 – 452.
2. Артамонова Е.А., Балашов А.Г. и др. Лабораторный практикум по курсу «Моделирование в среде *TCAD*». Часть 2: Приборно-технологическое моделирование элементов интегральных схем. – М.: МИЭТ, 2012. – 156 с.
3. Коледов, Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок : учебное пособие / Л. А. Коледов. – СПб. : Лань, 2009. – 400 с.
4. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. 6-е изд. – СПб.: Питер, 2013. – 816 с.: ил.

РАДИОЛАМПЫ В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Бердников Г. К.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Левицкий А. А.

Сибирский федеральный университет

Введение

Первые вакуумные электронные лампы или как их чаще называют - радиолампы появились благодаря британскому ученому Джону Амброзу Флемингу, который прославился благодаря изобретению лампы с термокатодом (диода). Они были большими и с пластмассовыми цоколями. Вначале своей истории они использовались как детекторы слабых сигналов в телеграфах, и только позже их начали применять в радиоприемниках, радарх, усилителях и других устройствах.



Рис.1 – Диод Флеминга

Казалось бы разговор о применении радиоламп это уже история. Они потребляют большое количество энергии, у них небольшой срок службы, большие габариты, малая прочность и долговечность. Если сравнивать их с транзисторами, то все эти недостатки должны были вытеснить их из радиоэлектроники окончательно и навсегда. Но как оказалось даже по стечению многих лет лампам удаётся найти своё применение в радиоэлектронике т. к. у них оказались и свои «плюсы». Усилители звуковой частоты на радиолампах передают звук естественнее, чем полупроводниковые усилители. Общеизвестно считается, что самыми лучшими усилителями мощности звуковой частоты являются ламповые усилители.

Радиолампы используются в военных и космических аппаратах благодаря своей лучшей устойчивости к электромагнитному излучению по сравнению с транзисторной аппаратурой.

После катастрофы на Чернобыльской АЭС во всех станциях страны были проверены и доработаны блоки защиты реакторов, включивших в себя приборы на радиолампах.

Согласно стандарту организации «концерн Росэнергоатом» от 2007 г. все станции должны быть оборудованы защитными системами, в составе которых должна быть аппаратура, сделанная на радиолампах.

Эффективный техпроцесс химического вытравливания транзисторов в интегральных схемах позволил создавать чипы с миллиардами транзисторов. С годами они становились всё меньше, расстояние между истоком и стоком сокращалось, за счет чего росла производительность электроники (Закон Мура).

Сам по себе вакуум - это лучшая среда для передачи электрона, чем твёрдое тело, где возникают помехи из-за столкновения электронов с атомами материала, шумы и искажения.

Если бы в обычных транзисторах удалось использовать вакуум, то удалось бы совместить плюсы радиоламп и транзисторов. Ученые *NASA Ames* давно занимаются исследованиями в этой области. Теоретически вакуумный транзистор может работать на терагерцовых частотах, на порядок быстрее существующих кремниевых аналогов.

Кремниевые микросхемы подошли к своим физическим пределам миниатюризации, и сейчас рассматривается несколько направлений дальнейшего развития технологии: углеродные нанотрубки, графен, нанопровода, вакуум-канальный транзистор (*vacuum-channel transistor*) и проч.

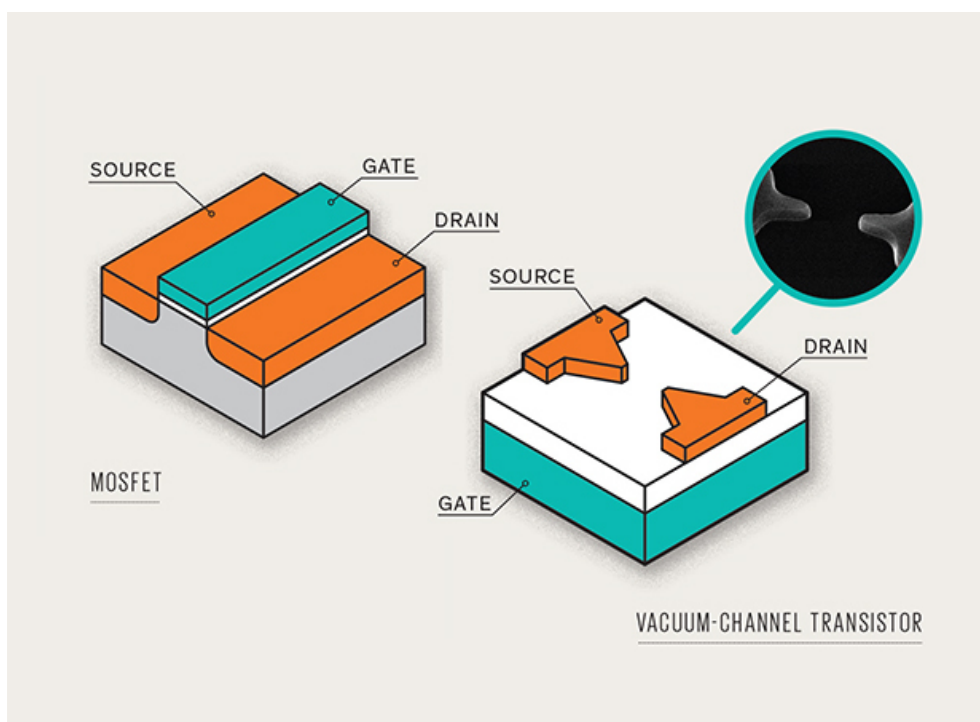


Рис.2 – Вакуум-канальный транзистор

Действие радиолампы основано на потоке электронов между катодом и анодом, первый нагревается до температур 800 - 2 000°C и начинает испускать электроны. Такая конструкция - причина высокого энергопотребления и низкой надёжности радиоламп, которые часто выгорают. Но в вакуум-канальном транзисторе отсутствует нить накаливания, и катод не нужно нагревать.

Если устройство сделать миниатюрного размера, то становится возможна автоэлектронная эмиссия под действием внешнего электрического поля без предварительного возбуждения электронов.

Проблему с наличием чистого вакуума под давлением инженеры *NASA Ames* решили, сократив расстояние между катодом и анодом настолько, что оно становится меньше, чем длина свободного пробега электрона, прежде чем он столкнётся с молекулой газа. При нормальном атмосферном давлении длина свободного пробега электрона составляет около 200 нм. А если использовать гелий, то она увеличивается до 1 мкм. При достаточно низком напряжении у электронов не хватает энергии, чтобы ионизировать гелий, так что деградации катода не происходит.

В прототипе вакуумного транзистора *NASA Ames* для управления транзистором используется стандартный затвор из диоксида кремния, как в MOSFET.

Первый прототип, который удалось сделать ученым, работает на частоте 460 гигагерц, что примерно в 10 раз выше, чем лучший кремниевый транзистор.

Инженеры считают, что именно вакуумный транзистор первым сможет преодолеть рубеж 1 терагерц.

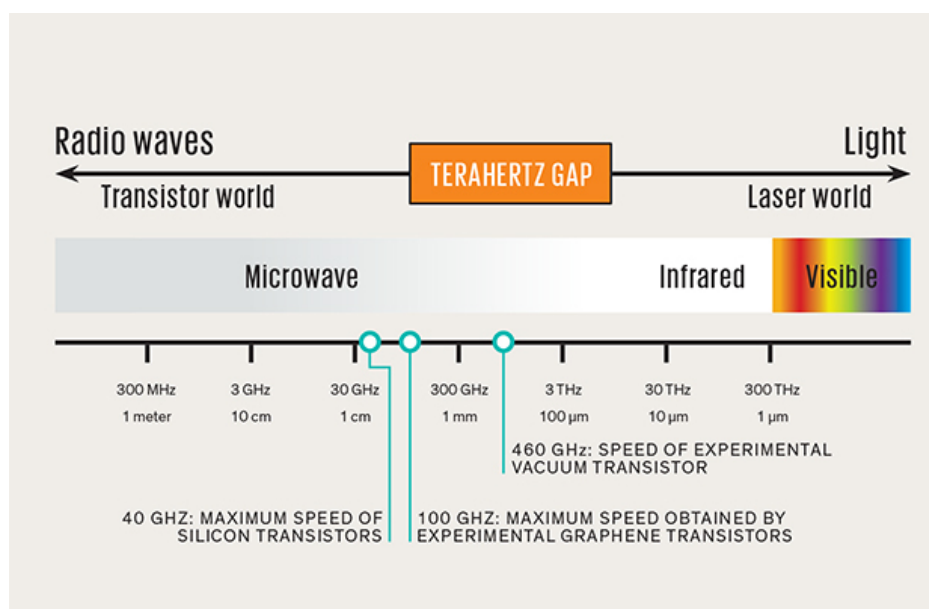


Рис. 3 – максимальные рабочие частоты транзисторов

Для того чтобы приступить к коммерческой реализации вакуум-канальных транзисторов, придётся решить множество проблем, в том числе и с энергопотреблением. Вакуумный транзистор *NASA Ames* работает от напряжения 10 вольт. Так же нужно будет найти способ размещения множества вакуумных транзисторов на одной микросхеме.

Список литературы

1. Гендин Г.С. Всё о радиолампах 2002. 296 с.
2. Галкин и др. Полупроводниковые приборы. 1987 год. 285 стр.
3. Introducing the Vacuum Transistor: A Device Made of Nothing [электронный ресурс] Режим доступа: <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/introducing-the-vacuum-transistor-a-device-made-of-nothing>
4. В.Л.Конинов: Справочник по радиолампам 1934. 114 стр.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

Бердников Г. К.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Левицкий А. А.

Сибирский федеральный университет

Введение

Постоянно возрастающие требования к точностным и эксплуатационным характеристикам датчиков угловой скорости (ДУС) стимулируют их дальнейшее развитие. Многие ученые и инженеры с каждым годом находят всё новые возможности для применения миниатюрных ДУС, называемых также микрогироскопами во вновь разрабатываемых технических устройствах. Писатели фантасты XX века писали о том, что мы можем видеть благодаря развивающимся гироскопам и датчикам угловых скоростей уже сегодня, например: боевые беспилотные летательные аппараты; автономные роботы, которые могут бегать и прыгать быстрее человека и т.д.

Для создания таких сложных систем нужно приложить немало усилий, проработав множество отдельных модулей, одним из которых является система определения положения в пространстве, построенная на основе микроакселерометров и микрогироскопов.

Целью данной работы является разработка методики определения масштабного коэффициента микромеханических датчиков угловых скоростей.

Чтобы с микрогироскопа снимать показания по беспроводному каналу нужно разработать систему, которая будет передавать данные о положении в пространстве на считывающее приемное устройство. Для этого была выбрана аппаратная платформа *Arduino* с поддержкой различных модулей, расширяющих её возможности. В виду своей простоты освоения, дешевизны и самое главное, наличия необходимого функционала для решения поставленных задач, эта платформа является удобным инструментом для достижения поставленной цели.

На рисунке 1 представлена функциональная схема системы, обеспечивающей беспроводную передачу информации от микрогироскопа.

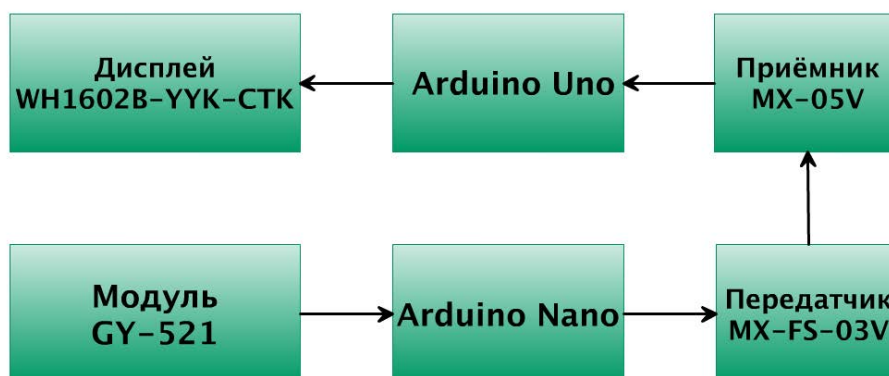


Рис.1 - Функциональная схема системы

В качестве считывающего датчика воспользуемся модулем *GY-521*, который является электронным функциональным аналогом вестибулярного аппарата человека.

Основа модуля – микросхема *MPU-6050*, содержащая два устройства: 3-х осевой гироскоп и акселерометр. Поступающие с них данные проходят предварительную обработку и выдаются на выход модуля по последовательному интерфейсу *I2C*.

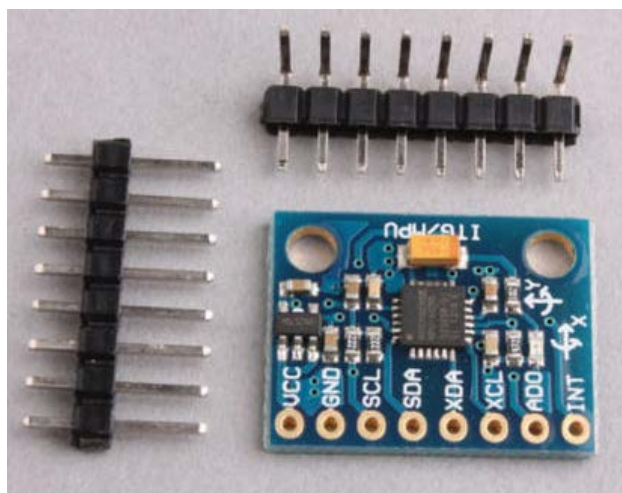


Рис.2 - Гироскоп-акселерометр GY-521 на микросхеме MPU6050

Назначение контактов модуля:

VCC – напряжение питания; *GND* – общий провод; *SCL* – тактовый сигнал *I2C*; *SDA* – данные *I2C*; *XDA* – данные шины *I2C* при работе в режиме мастера; *XCL* – тактовый сигнал шины *I2C* при работе в режиме мастера; *ADO* – бит 0 адреса *I2C*; *INT* – выход сигнала о готовности данных для использования как внешнего прерывания *МК*.

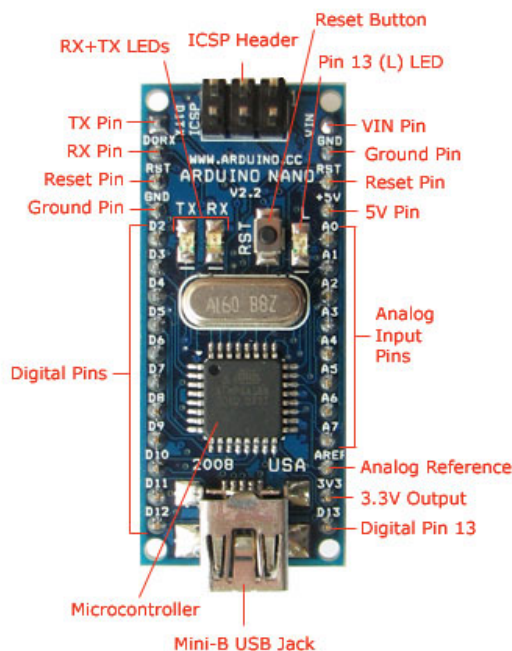


Рис.3 - Плата Arduino Nano

После того как данные были переданы на микроконтроллер, они обрабатываются и передаются с выхода микроконтроллера на модуль передатчика *MX-FS-03V*.

Подключение датчика к *Arduino Nano* происходит путём соединения выводов на плате с выводами датчика:

+5V *Arduino* – VCC; GND *Arduino* – GND; A4 *Arduino* – SDA; A5 *Arduino* – SCL; GND *Arduino* – AD0.

Модуль передатчика *MX-FS-03V* питается от источника напряжения 5 В, вывод данных (*ADATA*) подключен к выводу *D13 Arduino Nano*.

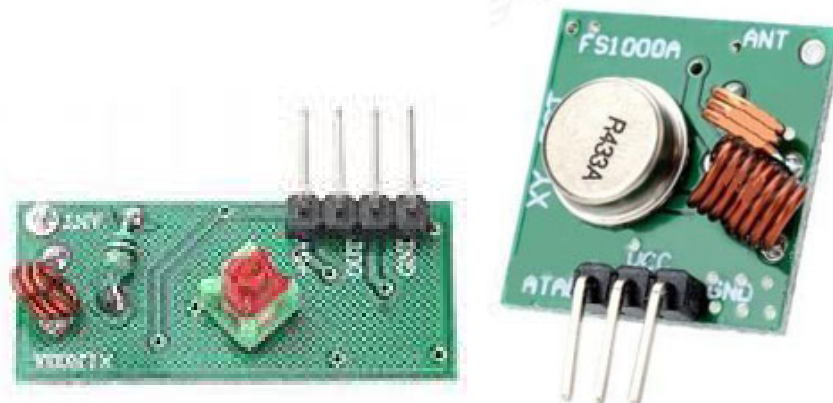


Рис.4 – Приемник и передатчик: MX-FS-03V+MX-05V

Модуль приемника подключается к аналоговому выводу *D10* на *Arduino Uno*, питание и земля соединяются соответственно.

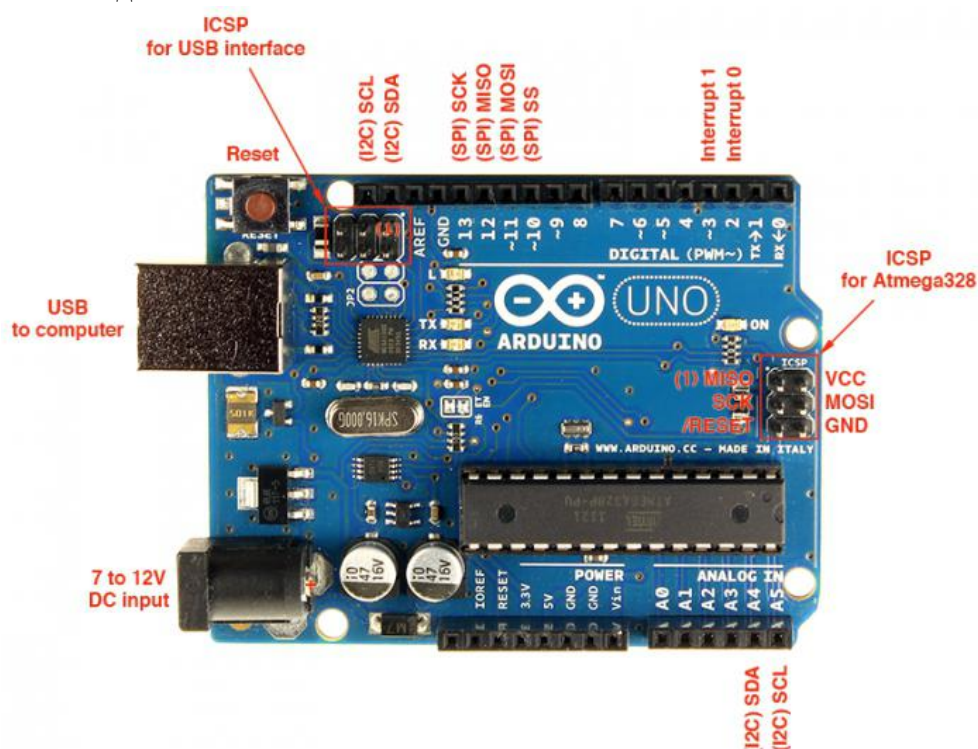


Рис.5 – Arduino uno

Для визуализации полученных данных подключим *LCD*-дисплей (*WH1602B-УУН-СТК*) к *Arduino Uno*. У дисплея есть 16 выводов, но для работы достаточно подключить 12 выводов: 1 - «GND», земля (минус питания); 2 - «Vcc», питание +5В; 3 - «VEE», контраст; 4 — «RS», выбор регистра; 5 — «R/W», направление передачи данных (запись/чтение); 6 — «EN», синхронизация; 7-14 — «DB0», «DB1», ..., «DB7»- шина данных; 15 — анод подсветки (+5В); 16 — катод подсветки (земля).

Линии *VEE*, *RS* и четыре линии данных *DB4*, *DB5*, *DB6*, *DB7* подключаются к цифровым выводам *Arduino Uno*.



Рис. 5 – LCD-дисплей WH1602B-YUH-CTK

После подключения всех модулей и их проверки на исправность пишется код на языке программирования *C/C++*, после чего делается программная отладка, для локализации и исправления ошибок в коде.

Выводы

В данной работе представлен анализ варианта реализации беспроводной передачи информации от миниатюрного датчика угловой скорости (микрогироскопа) с использованием универсальных модулей *Arduino*. Это позволит решить проблему, связанную с проводами, которые могут запутаться и помешать снятию данных.

Список литературы

1. Стюарт Р. Болл Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. – М.: Издательство Додэка XXI, 2007. – 362 с.
2. ИгоТ. *Arduino*, датчики и сети для связи устройств: Пер. с англ. — 2-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2015. - 544 с.
3. Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат *Arduino/Freduino*. – СПб.: БХВ Петербург, 2012. – 256с.
4. Модуль 3-х осевого гироскопа и акселерометра *GY-521 MPU-6050* [электронный ресурс] Режим доступа: <http://arduino-kit.ru/catalog/id/modul-3-h-osevogo-giroskopa-i-akselerometra-gy-521-mpu-6050>.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Гаврилюк И. Н., Ануфриев И. И.

научный руководитель канд. техн. наук Семенова О.В.

Сибирский федеральный университет

В настоящее время одной из задач производства полупроводниковых приборов (ПП) является сокращение сроков их разработки, затрачиваемой стоимости и трудоемкости. Такие ПП включают в себя полупроводниковые микросхемы высокой степени интеграции (ИС), которые характеризуются большой плотностью размещения элементов на подложке. Это достигается применением прецизионных технологических операций в плоскости подложки и по её глубине. Такое производство требует сложных расчетов, и существенно усложняет проектирование ИС. Решить эти проблемы можно с помощью автоматизации процесса проектирования элементов ИС. На крупных предприятиях производителей ИС по всему миру используется система *TCAD* (*Technology Computer – Aided Design*) – технология автоматизированного проектирования [1-4].

Целью данной работы является исследование процесса приборно-технологического моделирования структуры биполярного транзистора для разработки методики анализа электрических характеристик транзисторных структур полупроводниковых ИС с использованием системы *TCAD*.

Технологическое моделирование подразумевает разработку технологического маршрута, в который входит описание всех проводимых технологических операций, выполненных в определенной последовательности. Приборное моделирование позволяет получить электрические характеристики структуры, то есть получить зависимости тока от напряжения. Благодаря этим характеристикам можно судить о работоспособности полученной структуры [5].

Транзистор, или полупроводниковый триод, является управляемым элементом. Он представляет собой трехслойную полупроводниковую структуру с чередующимся типом электропроводности слоев и содержит два *p-n* перехода. Моделирование технологического процесса биполярного транзистора в системе *TCAD* начинается с определения геометрических параметров и требуемой концентрации в различных областях транзисторной структуры, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры моделируемой структуры

Параметр	Значение
Размер подложки	1мкм×3мкм
Толщина эпитаксиального слоя	3 мкм
Концентрация примеси в <i>p</i> -подложке (В)	$1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Концентрация примеси в эпитаксиальном слое (As)	$1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Толщина базы	0.8 мкм
Глубина залегания высоколегированных <i>n</i> областей	0.4 мкм

Для создания транзисторной структуры необходимо оптимизировать параметры сетки. Высокая плотность сетки выбрана в области эпитаксиального слоя. Это повышает точность моделирования профиля легирования областей транзистора, от которого зависят его электрофизические параметры. Далее необходимо задать область кремниевой подложки легированной бором с концентрацией $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. После этого необходимо нанести эпитаксиальный слой кремния, легированного фосфором, который будет служить в качестве коллектора. Далее необходимо провести процессы последовательного нанесения оксидной маски, ионной имплантации и отжига структуры для области базы, эмиттера и высоколегированной области коллектора.

Последним этапом является формирование омических контактов. Для этого необходимо нанести диэлектрическую пленку, для предотвращения замыкания контактов, с протравленными окнами под контакты. Далее осадить слой алюминия и определить месторасположение контактов. Для этого достаточно задать только одну координату по оси X и программа автоматически присвоит значение контакта к вышестоящему металлу по заданной координате.

В результате проведенного моделирования в технологическом модуле формируется готовая структура биполярного транзистора (Рисунок 1), в которой четко выделены границы каждой рабочей области транзистора, а также представлено распределение концентраций и наименования материалов.

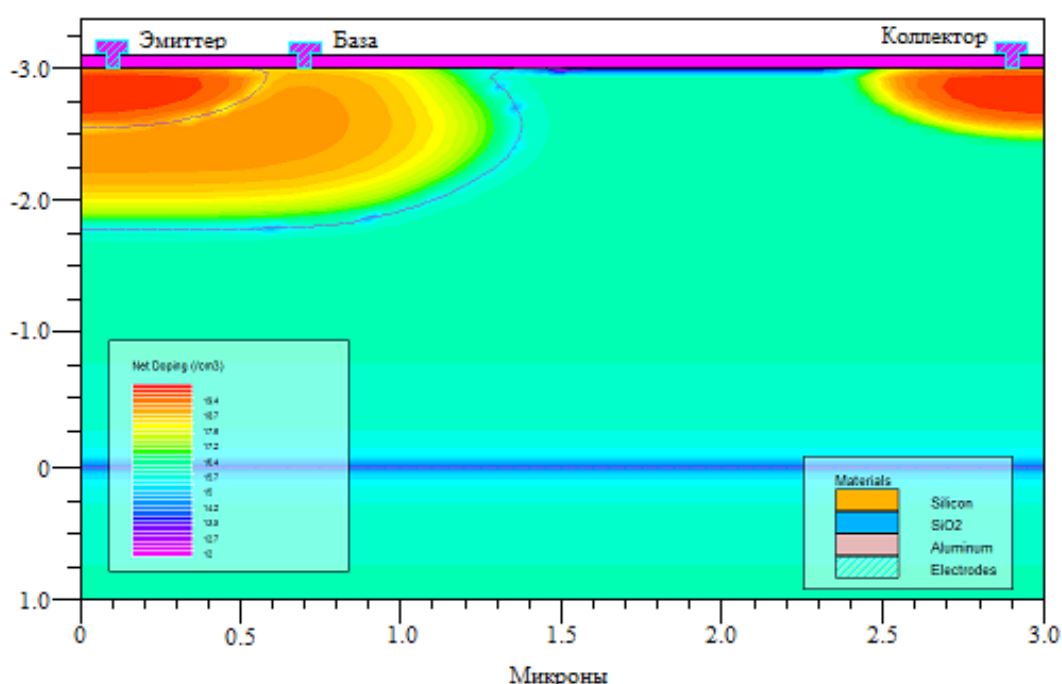


Рис.1 - Смоделированная структура биполярного транзистора

Последующее приборное моделирование позволяет определить электрические параметры структуры, по которым можно судить о том, насколько правильно и точно сформирована транзисторная структура и разработан технологический маршрут.

Приборное моделирование позволяет проводить:

1. DC-анализ. Расчет статических ВАХ приборов, напряжения пробоя (рассматриваются эффекты лавинного и теплового пробоя). Расчет зависимости коэффициента усиления биполярного транзистора от тока эмиттера;

2. АС-анализ. Моделирование работы прибора вблизи рабочей точки, расчет зависимости паразитных элементов (емкостей, проводимостей) прибора от напряжения на его электродах;

Базовой системой уравнений, описывающей перенос носителей в полупроводниках, является диффузионно-дрейфовая модель, используемая в программе приборного моделирования по умолчанию [5].

Для определения вольт-амперных характеристик было принято, что биполярный транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Входными величинами являются напряжение база-эмиттер и ток базы, а выходными – напряжение коллектор-эмиттер и ток коллектора. Входная характеристика биполярного транзистора это зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер (Рисунок 2). Выходная характеристика это зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при фиксированном токе базы (Рисунок 3).

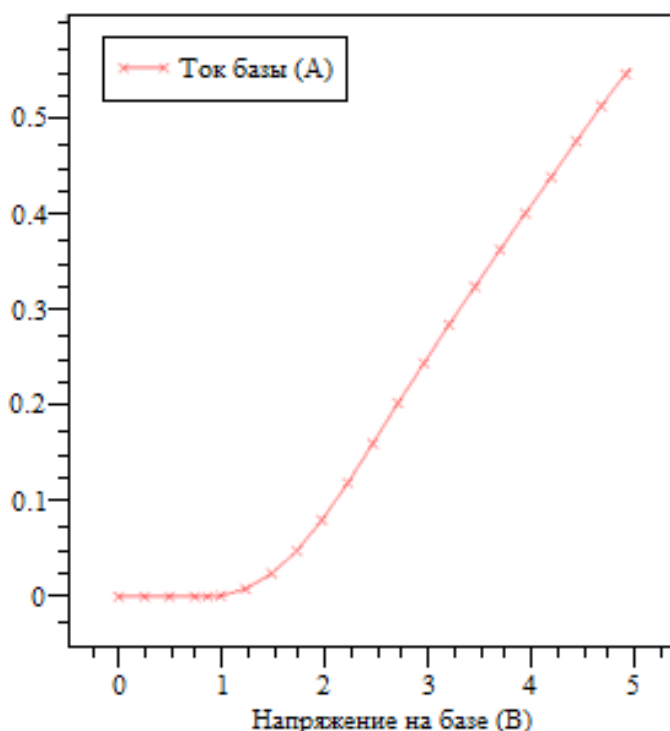


Рис.2 – Входная характеристика биполярного транзистора

По результатам приборно-технологического моделирования можно провести анализ электрических характеристик транзисторных структур и выделить, что моделирование полупроводниковых приборов требует учета множества параметров, однако с помощью системы TCAD возможно на несколько порядков сократить расходы времени и средств, что ускоряет производство полупроводниковых устройств. Успешное освоение приборно-технологического моделирования биполярного транзистора предполагает необходимость знаний физики полупроводников и электрических параметров транзисторов данного типа.

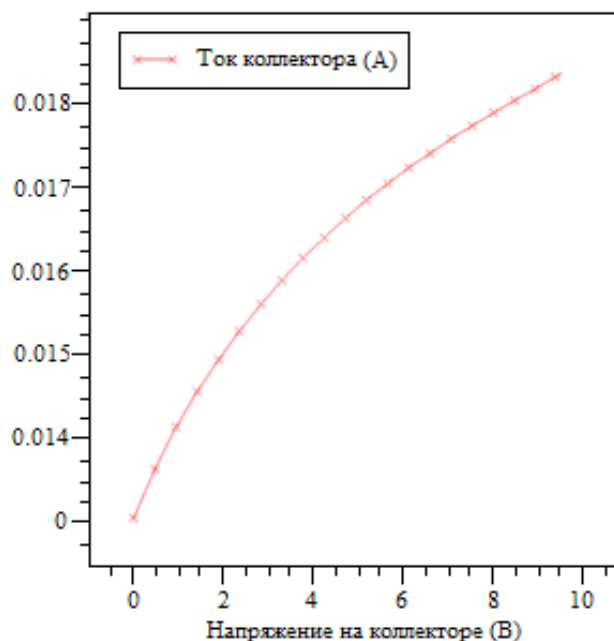


Рис.3 – Выходная характеристика биполярного транзистора

Материалы, используемые в данной работе, положены в основу разработки методики анализа электрических характеристик транзисторных структур полупроводниковых ИС с использованием системы *TCAD* и лабораторного практикума по дисциплине «Проектирование и технология электронной компонентной базы» для студентов направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» и могут быть использованы для разработки методического обеспечения подготовки и переподготовки специалистов на производственных предприятиях по изготовлению РЭА.

Список литературы

1. Гаврилюк И.Н., Окунев А.Ю. Программные средства *TCAD*: методические аспекты подготовки специалистов в области приборно-технологического проектирования электронной компонентной базы. Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научн. тр. / Красноярск: ИПК СФУ, 2014. С 446 – 452.
2. Сайт компании Silvaco, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.silvaco.com (дата обращения: 18.02.2016).
3. Гаврилюк И.Н., Ануфриев И.И. Simulation of a simple NMOS structure in *TCAD* system. Современные проблемы радиоэлектроники (английский язык): сб. научн. тр. / Красноярск: ИПК СФУ, 2015. С 574-576.
4. Ануфриев И.И., Гаврилюк И.Н. The simulation in Silvaco *TCAD*. The methodical aspects of training of specialists in the field of device-technological design. Современные проблемы электроники (английский язык): сб. научн. тр. / Красноярск: ИПК СФУ, 2015. С 577-580.
5. Гаврилюк И.Н., Ануфриев И.И. Моделирование субмикронного транзистора в системе *TCAD*. Проспект свободный – 2015: сб. научн. тр. / Красноярск: СФУ, 2015. С 8-12.
6. Артамонова Е.А., Балашов А.Г. и др. Лабораторный практикум по курсу «Моделирование в среде *TCAD*». Часть 2: Приборно-технологическое моделирование элементов интегральных схем. – М.: МИЭТ, 2012. – 156 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Копылова Н. А.

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Левицкий А. А.

Сибирский федеральный университет

Моделирование полупроводниковых устройств в настоящее время стало традиционным инструментом разработки в индустрии микроэлектроники. Несколько лет назад это моделирование выполнялось преимущественно на суперкомпьютерах. В настоящее время доступен ряд коммерческих двух- и трехмерных симуляторов процессов и устройств, главным образом, для автоматизированных рабочих мест на основе UNIX-подобных систем.

Увеличение производительности и широкое распространение персональных компьютеров и совместимых устройств обеспечивает развитие программного обеспечения, которое может использоваться для моделирования полупроводниковых устройств и технологических процессов [1-3].

Целью данной работы является анализ существующих подходов к разработке моделей технологических процессов, а также специализированных программных средств, обеспечивающих анализ технологии изготовления полупроводниковых приборных структур.

Существующие версии таких программных средств, называемых системами приборно-технологического моделирования (TCAD) обеспечивают процесс моделирования технологических процессов, включая имплантацию, диффузию и окисление, а также моделирование таких полупроводниковых устройств, как MOSFET, DMOS, JFET, BJT, IGBT, диодов Шоттки, фоточувствительных устройств и т.д.

Системы TCAD привлекательны и для образовательных целей из-за возможности иллюстрации с их помощью проектных решений. Это позволяет расширить набор задач при изучении физики полупроводниковых устройств с минимальными усилиями. Цель подобного компьютерного курса состоит в том, чтобы дать студентам основные сведения о современном проектировании полупроводниковых устройств. Гибкий и удобный графический интерфейс позволяет пользователю вывести результаты моделирования процесса или устройства на экран, практически на любой принтер, плоттер или в файл.

Современные системы приборно-технологического моделирования охватывают все основные потребности при проектировании полупроводникового процесса или устройства, в сочетании с эффективными и гибкими графическими инструментами. Они полезны для тех, кому необходимо разобраться в физических принципах и особенностях работы полупроводникового устройства, без дополнительного изучения компьютера или численных методов

Одной из наиболее распространенных базовых моделей устройств является диффузионно-дрейфовая модель. Для субмикронных структур (нанометрового диапазона размеров) применяют гидродинамическую (температурную) модель. Программы, как правило, используют технику конечных разностей на прямоугольной сетке с автоматической подгонкой. В основе используемых в программах алгоритмов лежат физические модели (подвижность, время жизни, рекомбинация и ионизирующее воздействие) и другие.

Важной составляющей систем приборно-технологического моделирования является моделирование операций, используемых для изготовления полупроводниковых приборов. Эта составляющая моделирования позволяет исследовать полупроводниковые приборы, в наибольшей степени соответствующие реальным устройствам с учетом неидеальности их структуры. Хорошо известно, что аналитические аппроксимации для профилей легирования обычно не отражают в достаточной мере результаты обработки при производстве, особенно для устройств с субмикронными размерами.

В системах TCAD представлены соответствующие программные модули (SiDif в программе MicroTEC, Dios в программе ISE TCAD, Sentaurus Process в программе Synopsys Sentaurus TCAD), чтобы вычислять профили распределения примесей в полупроводниковых структурах (например, в элементах СБИС), прошедших различную технологическую обработку. Процесс изготовления может включать такие этапы как, например, ионная имплантация или поверхностное осаждение (мышьяка, бора или фосфора) с последующим отжигом при окисляющей или инертной окружающей среде. Получившийся профиль легирования может быть использован напрямую, чтобы формировать всю структуру полупроводникового устройства для последующей оценки кривых вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Используемые алгоритмы основаны на конечно-разностной (конечно-элементной) формулировке. Принятая физическая модель описывает процесс диффузии вплоть до трех взаимодействующих заряженных примесей в заданной области с движущейся границей окисления и отделением примеси на границе Si/SiO₂ в случае кремния. В случае имплантации исходные профили каждой примеси аппроксимируются стандартной моделью Рунге.

Физическая модель диффузии

На диффузию заряженных примесей влияет присутствие внутреннего электрического поля. Физическая модель для коэффициента диффузии с учетом влияния заряженных примесей, может быть представлена соотношением

$$J_k = D_k \nabla C_k + q Z_k \mu_k C_k E ,$$

где – C_k концентрация k -й примеси, D_k – коэффициент диффузии, Z_k – номер заряда, μ_k – электрическая подвижность, q – элементарный заряд и E – электрическое поле. Эта модель использует квазинейтральную аппроксимацию, которая связывает электрическое поле с концентрациями примеси:

$$E = -\nabla\varphi = -\frac{kT}{q} \nabla \ln \left(\frac{n}{n_i} \right) ,$$

где

$$n = -\frac{1}{2} \left(\sum_k Z_k C_k + \sqrt{\left(\sum_k Z_k C_k \right)^2 + 4n_i} \right) ,$$

Здесь n – концентрация электронов и n_i – концентрация собственных носителей

$$n_i = n_{i0} T^{\zeta} \exp \left(\frac{-E_G}{2kT} \right) .$$

Аналитическая модель оксидирования

Для аналитической модели оксидирования в используется формулировка Deal-Grove:



$$\frac{dU}{dt} = \frac{B}{2U+A},$$

где U – толщина окиси и A, B – кинетические константы, которые пропорциональны давлению и зависят от состава окружающей среды. Величины A, B значительно больше, если окружающая среда содержит водяной пар или HCl . В последнем случае константы определяются:

$$B = P_{ox} B_o \exp\left(\frac{-E_B}{kT}\right), \quad \frac{B}{A} = OR_{ox} P_{eff} R_o \exp\left(\frac{-E_R}{kT}\right).$$

Здесь P_{ox} – давление окисной окружающей среды в атмосфере и P_{eff} – эффективное давление для линейного кинетического коэффициента B/A . В случае окисления в атмосфере влажного кислорода $P_{eff} = P_{ox}$ и в случае сухого окисления $P_{eff} = P_{ox}^{bp}$. Показатель OR_{ox} зависит от ориентации кремниевой структуры.

Модель сегрегации

Окисление кремния сопровождается сегрегацией, другими словами, резким изменением концентрации примеси при движении на границе раздела Si/SiO_2 . Сегрегация вызывает плотность потока примеси на границе, которая может быть записана как

$$J_{ox} = C_b \left(1 - \frac{1}{\alpha_s m}\right) v_{ox},$$

где C_b – концентрация примеси в Si на границе SiO_2 , m – коэффициент сегрегации,

v_{ox} – скорость роста окиси в нормальном направлении на границе раздела, α – коэффициент объемов Si и SiO_2 .

Модель ионной имплантации

Ионная имплантация широко используется как стандартное средство для легирования полупроводниковых пластин. В программных TCAD широко применяется аналитическая ионная модель имплантации.

В одномерном случае имплантированная примесь описывается гауссовым распределением (нормальным распределением), которое описывается выражением

$$I(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(\frac{-(y - R_p)^2}{2\sigma_y^2}\right),$$

где R_p и σ_y – глубина внедрения и среднеквадратичное отклонение от вертикали соответственно, и y – расстояние от вершины материала пластины.

Двумерный профиль внедряемой примеси описывается формулой

$$I(x, y) = \frac{I(y)}{2} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{x - x_r}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - x_l}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) \right),$$



где x_r и x_l – координаты левых и правых краев ячейки сетки.

Для того чтобы получить конечное распределение внедренной примеси, последнее выражение следует проинтегрировать по экспонируемой поверхности пластины.

Анализ моделей и алгоритмов моделирования

Конечно-разностный (конечно-элементный) метод для дискретизации уравнения диффузии обеспечивает удобство решения системы уравнений в матричном виде (симметричная пятидиагональная матрица с мажорированием диагонали). Для каждого узла сетки записывается разностное уравнение баланса массы. Для узлов смежных с границей окисла включается поток сегрегации примеси, вызванный движением окисла. Общая доза примеси в полупроводнике и окисле сохраняются с точностью, соответствующей представлению чисел с плавающей точкой в компьютере.

Для решения нескольких связанных уравнений диффузии, конечно-разностные уравнения для каждой примеси решаются последовательно, с начальными значениями концентрации примеси, полученными из предшествующей итерации или предыдущего шага по времени. Итерации продолжаются до тех пор, пока решения для всех примесей не сойдутся к результирующим значениям с заданной точностью. Для решения системы, описываемой пятидиагональной матрицей, используется метод с неполным разложением на составляющие, объединенный с сопряженным градиентным методом.

Алгоритмы могут быть протестированы при сравнении результатов с примерами, опубликованными в работе [4].

Следующий пример моделирования процесса LOCOS демонстрирует затраты времени центрального процессора [5]. Бор внедряется с энергией 100 КэВ при дозе 10^{14} ионов/см², и мышьяк внедряется с энергией 100 КэВ при дозе 10^{15} ионов/см². Этап отжига при 1000 °С во влажной среде продолжается в течение 30 минут. Затраты времени на персональном компьютере составляют единицы минут.

Различия в расположении контурных линий для вычислений на различных компьютерах не превышало 0,01 мкм в области $p-n$ соединения. В областях с значениями концентрации $10^{14} - 10^{15}$ см⁻³, несовпадение было 0,02 – 0,03 микрометров. Таким образом, такой важный параметр, как глубина $p-n$ перехода, определяется с точностью достаточно высокой для построения кривой ВАХ.

Список литературы

1. Королев М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : в 2-х т./ред. Ю. А. Чаплыгин. Ч. 1 : Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королев, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева. – 2010. – 397 с.
2. MicroTec. Software Package for Two-Dimensional Process and Device Simulation. Version 3.02 for Windows. User's Manual. Siborg Systems Inc.
3. M.S.Obrecht, A.L.Alexandrov, "SIDIF - a program for two-dimensional modelling of diffusion and oxidation," Solid-State Electronics, Software Survey Section, v.34, No 8, 1991.
4. "Process and Device Simulation for MOS-VLSI Circuits," Ed.by P.Antognetti, R.W.Dutton et al., Martinus Nijhoff Publishers, 1983.
5. A.L.Alexandrov, M.S.Obrecht, G.V.Gadiyak, "Efficient finite-difference method for numerical modelling of thermal redistribution of interacting impurities under oxidizing ambient", Solid State Electronics, v.35, p.1549-1552, 1992.



АНАЛИЗ МЕТОДОВ СУПЕРФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ СУСПЕНЗИЯМИ НАНОАЛМАЗА

Машуков И. Н.

научный руководитель Юзова В.А.

Институт инженерной физики и радиоэлектроники

Проанализированы используемые в настоящее время схемы суперфинишного полирования хрупких материалов, к которым относится кремний, с применением суспензий наноалмаза. Рассмотрено взаимодействие частиц наноалмаза с обрабатываемой поверхностью. Показана перспективность применения наноалмаза с модифицированной поверхностью для целей полирования во всех способах.

Основным требованием, предъявляемыми к обработке поверхности кремния (подложкам), особенно теперь, когда электронная промышленность шагнула в новую фазу развития – нанотехнологию, является резкое снижение микронеровностей обработанной поверхности при сохранении значений других параметров. Совершенствование процесса обработки может идти несколькими путями: либо разработкой нового “инструмента” (дисперсионная среда, дисперсная фаза), либо созданием более оптимального технологического оборудования с оптимальными режимами работы.

Открытие и изучение свойств нового, обладающего уникальными физико-химическими свойствами, материала – наноалмаза детонационного синтеза, позволило повысить эффективность процессов механической обработки за счет использования технологических жидкостей, содержащих абразивные частицы НА.

Однако частицы НА, наряду с уникальными свойствами имеют ряд недостатков, затрудняющих бурное развитие методов обработки поверхностей с участием данного материала. К недостаткам можно отнести высокую стоимость, термодинамическую и кинетическую неустойчивость. Поэтому наиболее целесообразное применение этого материала представляется в процессах суперфинишного полирования.

В данной работе проводится анализ исследований взаимодействий частиц НА с хрупкой обрабатываемой поверхностью в различных методах суперфинишной обработки с целью возможности использования суспензий НА в качестве инструмента.

На суперфинишных стадиях чаще всего используются механическое и химико-механическое полирование.

Взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемым материалом при механическом полировании хрупких материалов, к которым относится кремний, может осуществляться по двум механизмам. Во-первых, твердые зерна частиц НА царапают поверхность, срезая на ней микронеровности и, тем самым, сглаживают микрорельеф. Преимущества НА перед порошками более крупных размеров сводится к тому, что микровыступы с поверхности удаляются малыми порциями, т.е. постепенно, не травмируя поверхность глубоко. Во-вторых, зерна порошка могут свободно перекатываться по поверхности без ее микроцарапания, как это показано на рисунке 1. В этом случае зерна при перекатывании будут производить удар о поверхность, деформируя ее, создавая в ней микротрещины, микровыколки. Деформированный шероховатый слой в процессе обработки отслаивается и выглаживает поверхность.

Первый механизм механического полирования реализуется с помощью связанного абразива, представляющего частицы порошка, закрепленные неподвижно и достаточно прочно в полировальнике. Второй механизм присущ обработке с

применением свободного абразива, когда его зерна могут совершать перекатывающее движение [1].

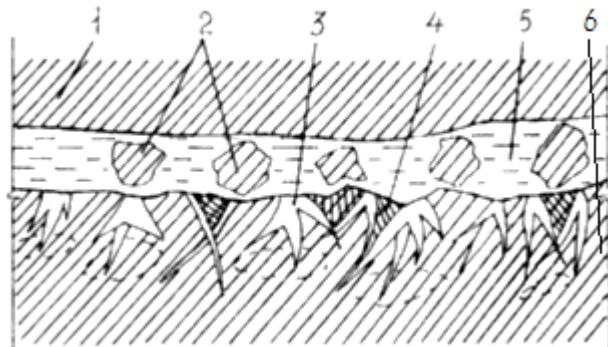


Рис.1– Модель полирования свободным абразивом: 1 –полировальный круг; 2 – зерна абразива; 3 – конические трещины; 4 – выколки; 5 – суспензия; 6 – обрабатываемая поверхность

Условиями реализации механического полирования являются:

- твёрдость абразивных частиц должна превосходить твёрдость обрабатываемого материала;
- твёрдость полировальника должна обеспечить абразивным зёрнам режим микрорезанья или деформирования обрабатываемой поверхности путём их перекатывания;
- кинетические параметры полирования и давления всегда подбирают так, чтобы гидродинамический зазор между полировальником и обрабатываемой поверхностью был меньше размера зёрен полировального порошка;
- объём и масса полировальной частицы должна быть достаточными, для осуществления механической работы по удалению материала с обрабатываемой поверхности;
- роль жидкостной основы полировального состава сводится к равномерному распределению зёрен порошка по обрабатываемой поверхности и охлаждению зоны контакта.

Водная суспензия наноалмазного порошка нейтральной реакции как нельзя лучше удовлетворяет всем этим условиям. При этом процентное содержание твердой фазы в суспензии не превышает 1 % масс. [2].

Традиционные схемы полирования, заключаются в использовании полировальника, на который наносится суспензия. При этом осуществляется контакт (в той или иной мере) полировальника с обрабатываемой поверхностью. Но контакт с полировальником ухудшает приповерхностные свойства обрабатываемого изделия, увеличивая толщину всех зон нарушенного приповерхностного слоя (рельефная зона, трещиноватая зона, упругая зона). На рисунке 2 приведена структура нарушенных приповерхностных слоев. Если первые две зоны, в традиционных схемах, убираются химическими методами обработки или значительно уменьшаются режимами обработки (уменьшается размер абразива, совершенствуется материал полировальника), то упругие деформации нарушенного слоя в данных методах присутствуют всегда.

Упругие деформации приводят к нарушению кристаллических свойств поверхности по сравнению с объемными свойствами, что отрицательно скажется на качестве элементов, изготавливаемых на данных подложках.

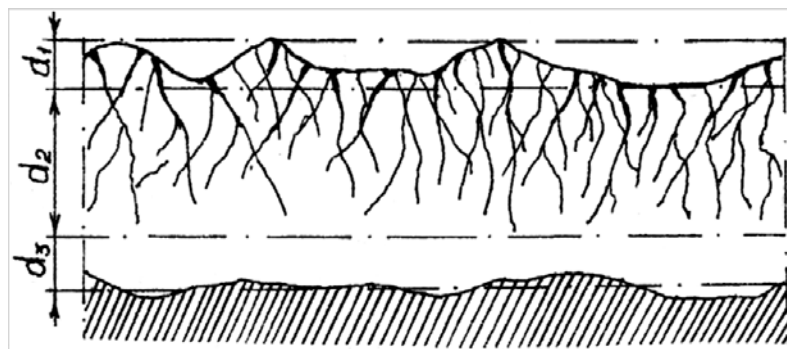


Рис.2– Структура нарушенного слоя: d_1 – рельефный слой; d_2 – трещиноватый слой; d_3 – напряженный слой

Поэтому осуществляется поиск новых методов обработки прецизионных подложек. Одним из таких методов является, метод, основанный на бесконтактном полировании. К примеру, разработанный японскими специалистами механохимический метод полирования был реализован в работах [3] и получил название эласто-эмиссионного метода обработки (ЕЕМ). Схема реализации этого метода приведена на рисунке 3.

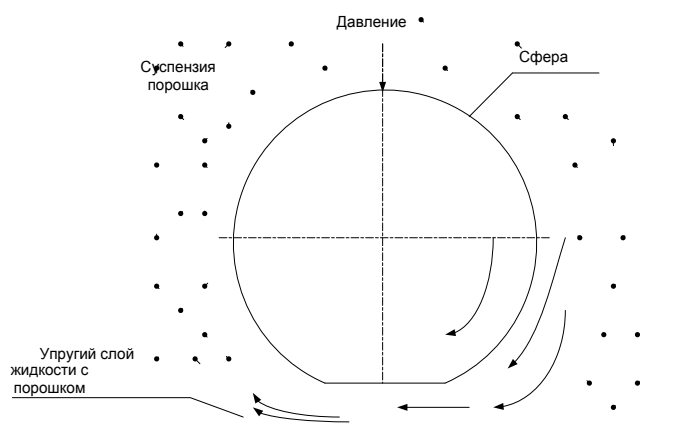


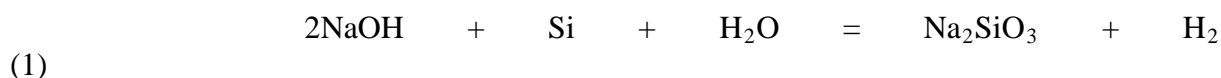
Рис. 3– Схема реализации ЕЕМ

Согласно этой схеме полирование осуществляется следующим образом. Частицы порошка ускоряются вращением сферы и перемещаются на обрабатываемую поверхность. Когда частицы порошка контактируют с рабочей поверхностью, происходит активация атомов обрабатываемой поверхности и абразива за счет деформации кристаллической решетки под воздействием высоких скоростей движения абразивных частиц. Активированные атомы вступают во взаимодействие подобно химическим реакциям, образуя между собой химические связи. Так как абразивная частица при движении по обрабатываемой поверхности в первую очередь достигает микровыступов ее рельефа, взаимодействие осуществляется по этим микровыступам, снижая шероховатость обрабатываемой поверхности. Для исключения различного рода механических повреждений толщину зазора регулируют таким образом, чтобы она была больше величины диаметра частицы. Поскольку энергия связи в алмазе больше, чем у кремния, то отрыв атома кремния от обрабатываемой поверхности будет осуществляться с большей вероятностью. Таким образом, можно снимать с

поверхности очень малые фрагменты материала, вплоть до фрагментов атомарных размеров.

В этой схеме полирования роль жидкости сводится к доставке частиц алмаза к обрабатываемой поверхности и охлаждению зоны контакта. Поэтому рН жидкости также нейтрален. Положительный эффект в качестве обработки целиком обусловлен сверхмалым размером порошка.

Следующим способом полирования является химико-механическое полирование, которое заключается в том, что гидроксильная группа щелочных компонентов вступает в реакцию с кремнием, образуя на его поверхности силикаты этих материалов, обладающие меньшей твердостью, нежели кремний (формула 1), которые механически разрушаются при контакте с полировальником и абразивными частицами. Из-за малого размера абразивных зерен (~0,1 мкм) между ними и обрабатываемых материалом прямого контакта почти не происходит.



Достоинством этой разновидности полирования является то, что возможно использование очень мягких абразивов. Тогда поверхность подложки получается без механических, кристаллических повреждений и упругих деформаций в приповерхностном слое. Однако, в работе [4] сообщалось о бесперспективности использования наноалмазов в этом способе полирования из-за присутствия на обрабатываемой поверхности мелких царапин, которые возникали за счет укрупнения зерен порошка. Следовательно, возникает задача предотвращения термодинамической и кинетической нестабильности порошков сверхмалых размеров. Иными словами, необходимо, чтобы порошок в химически агрессивных средах не конгломерировал (не укрупнялся).

В этом плане могут оказаться перспективными наноалмазы с модифицированной поверхностью (МНА) [5, 6]. МНА по сведениям авторов этих работ седиментационно устойчивы в нейтральных жидкостях в течение нескольких лет.

Таким образом, анализ методов суперфинишного полирования кремния суспензиями наноалмаза показал, что при изменении свойств НА, которые повышают их устойчивость к агрегации в жидкостях, возможно их использование при достижении высокого качества обработки.

Список литературы

1. Карбань В.И., Борзаков Ю.И. Обработка монокристаллов в микроэлектронике. – М.: Радио и связь, 1988. – 104 с.
2. Захаров А.А., Юзова В.А. Физико- химические основы размерной обработки полупроводников. Механическая обработка: Учеб. пособие/ КГТУ. Красноярск, 1995. – 176 с.
3. Mori Y., Yamauchi K., Endo K. et al. Evaluation of elastic emission machined surfaces by scanning tunneling microscopy. // J. Vac. Sci. Technol. A. vol 8, № 1, 1990, P. 621-624.
4. Артемов А.С. Наноалмазы для полирования. //ФТТ, 2004, Т.46, Вып.4, С.670-678.
5. Пузырь А.П., Бондарь В.С. Патент RU 2252192 С2. МПК С01 В36/06. БИ 15 (2005).
6. Пузырь А.П., Бондарь В.С. Патент RU 2258671 С2. МПК С01 В36/06. БИ 23 (2005).

ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ БАЛАНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Нохрин Ю.С.

научный руководитель канд. физ.-мат. Наук Левицкий А. А.

Сибирский федеральный университет

Введение

В настоящее время все более широкое применение находят системы автоматической стабилизации и управления положением в пространстве технических объектов. Примерами таких разработок могут служить системы наведения и стабилизации положения антенн спутниковой связи, различные автономные транспортные механизмы. Одним из интересных с практической точки зрения вариантов транспортной системы с элементами стабилизации является балансирующий робот [1, 2].

Целью данной работы является проработка решений, обеспечивающих создание подобных устройств (см. рис. 1).

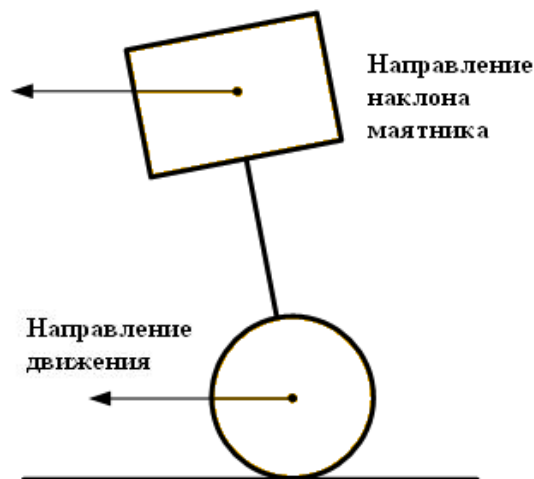


Рис. 1 - Робот в состоянии динамического равновесия

Балансирующий робот содержит колесную опору (колесную пару, расположенную на оси) и закрепленную над ней массу m . При смещении центра тяжести робот наклоняется и стремится упасть. Вращением колес угол наклона платформы поддерживается постоянным и производится перемещение робота. При этом вращающий момент M , необходимый для компенсации опрокидывания можно представить в виде формулы:

$$M = \omega * K_{\omega},$$

где ω – угловая скорость вращения колеса, K_{ω} – коэффициент, определяемый конструкцией платформы, в частности массой и плечом конструкции.

Уравнения движения системы

Рассмотрим различные ситуации для случаев неподвижного и перемещающегося балансирующего робота (см. рис. 2).

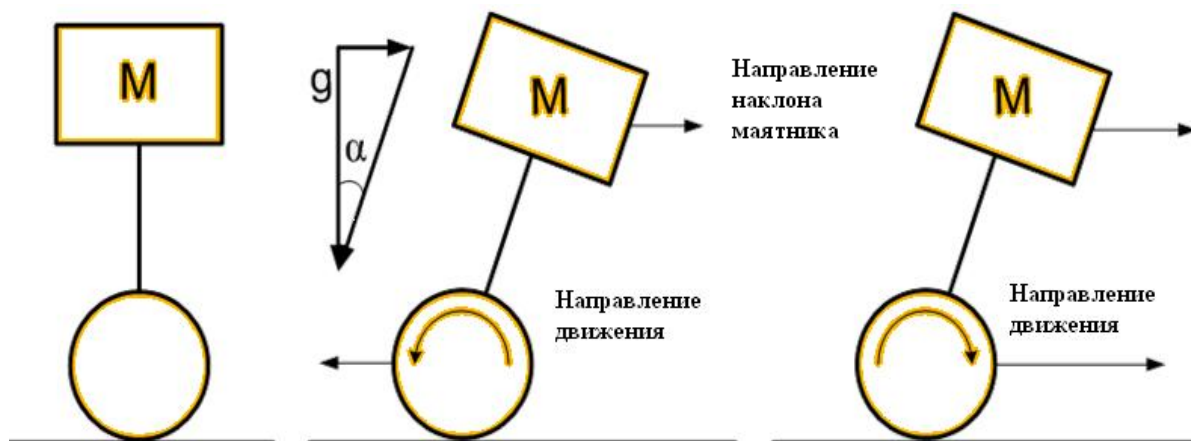


Рис. 2 – Возможные состояния балансирующего робота

Уравнения, описывающие движение системы можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 F &= g * \sin(\alpha), \\
 F &= A * m, \\
 A * m &= g * \sin(\alpha), \\
 \alpha &= \sin^{-1}\left(A * \frac{m}{g}\right),
 \end{aligned}$$

где m – масса, A – ускорение, g – сила тяжести F – сила.

Исходя из этих выражений можно строить систему управления платформой.

При управлении моментом вращения колес необходимо учитывать следующие аспекты.

- При увеличении числа оборотов у коллекторных двигателей постоянного тока падает момент, если для вращения колес применяются коллекторные двигатели.
- Необходимо учитывать зависимость вращающего момента от угла наклона, поскольку зависимость вращающего момента от угла наклона не линейна.
- Превышение некоторых граничных значений скорости и угла наклона приводит к некомпенсируемому сваливанию.

Всё это должна учитывать встроенная система балансировки, поэтому в далее рассмотрим требования как к системе в целом, так и к отдельным ее элементам.

Элементы системы управления положением балансирующего робота

Датчиками, обеспечивающими контроль положения и перемещения балансирующего робота, служат микрогироскоп и микроакселерометр.

Начнём наверно с самой главной части этой системы – это гироскоп. Кратко можно так описать работу гироскопов ADXRS150 или 300: в равновесном состоянии напряжение на их выходе равно 2,5 В. Если гироскоп наклоняется в ту, или другую сторону, то значение напряжения будет увеличиваться, или уменьшаться относительно исходного. Это тот аналоговый сигнал, который следует подать на АЦП, а потом на микроконтроллер. Точность определения угла, обеспечиваемая ADXRS150 – 12,5 мВ/градус при скоростях поворота не больше 150 градусов в секунду. При необходимости эту величину можно настраивать. Изменение напряжения пропорционально скорости изменения наклона: чем быстрее робот наклоняется, тем больше изменение напряжения.

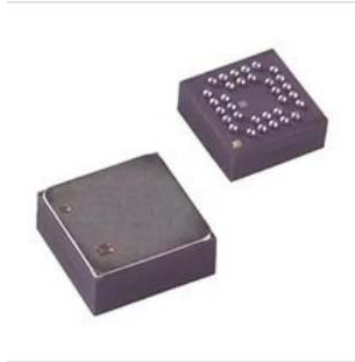


Рис.3 - Гироскоп ADXRS150

Гироскоп использовать, конечно, удобно, но при его работе медленно накапливается ошибка определения наклона. Например: допустим, вы наклонили гироскоп и заметили изменения напряжения, но потом, если угол наклона не изменяется, оно быстро возвращается в нейтральное состояние. Таким образом, если робот немного наклонится и задержится там, на секунду, то по данным гироскопа нельзя будет определить, что в действительности он наклонен. Такие ошибки последовательно складываются и робот переворачивается. Акселерометр позволяет решить эту проблему. Скважность его сигнала в равновесном положении робота принимает строго определенное значение, а если робот наклоняется, то она изменяется и остается измененной, пока компьютер управления роботом не заставит робота исправить его положение. Кажется, что при движении робота можно использовать только акселерометр, но гироскоп гораздо быстрее реагирует на наклон робота. Таким образом, гироскоп обеспечивает ускорение реакции системы, а акселерометр позволяет исправить ошибки в определении наклона и определяет где находится верх, а где низ.

Гироскоп измеряет изменение угла, при его использовании производится интегрирование отклонения при известном начальном значении угла наклона. Гироскопы в силу своей конструкции привносят ряд ошибок различного характера, в том числе следующие.

- Отклонение нуля – определяет «ненулевые» показания гироскопа при отсутствии угловой скорости.
- Температурный дрейф – из-за него вносится погрешность в выходной сигнал гироскопа вследствие изменения температуры.
- «Временной» дрейф (уход нуля) – гироскопы накапливают ошибку с течением времени, вследствие чего требуется периодическая перекалибровка.
- Акселерометр способен производить измерение притяжения земли, путем пересчета возможно получение угла наклона.
- Недостатком применения акселерометра является его чувствительность к движению и существенное усложнение вычислений угла наклона в движении.

Таким образом, наиболее перспективным является совмещение совместное гироскопов и акселерометров для компенсации ошибок каждого сенсора.

Список литературы

1. Балансирующий робот [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://robochamp.ru/index.php/articles/42-mechanics> Дата обращения 20.12.2012г.
2. Anderson D. P. nBot Balancing Robot. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/nbot_4.html Дата обращения 20.12.2014г.

СОЗДАНИЕ СТРУКТУР НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ С ТИТАНАТОМ БАРИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ**Раилко М.Ю., Меркушев Ф. Ф.****научный руководитель канд. техн. наук Семенова О. В.***Сибирский федеральный университет*

С развитием новых научно-технических направлений в электронике и возникновением микросистемной техники возникли задачи в поиске новых материалов и технологий для изготовления микро-, наноструктур и использование их в изделиях микро-, наноэлектроники и микроэлектромеханики. Интерес в настоящее время ученых и специалистов в данных областях привлекает получение нанокристаллических сегнетоэлектриков в пористых матрицах различных материалов. Первые исследования подобных структур показывают возможность применение их для создания суперконденсаторов, пироэлектрических и пьезоэлектрических преобразователей, ячеек энергонезависимой памяти, датчиков для мониторинга различных параметров окружающей среды [1].

Получаемые методом анодирования оксидные пленочные структуры, отличающиеся большой толщиной слоя из упорядоченного массива квазицилиндрических пор, являются наиболее привлекательными в качестве матричной основы для создания наноструктур с улучшенными сегнетоэлектрическими свойствами, и демонстрирующие в широком интервале температур все свойства, присущие сегнетоэлектрикам. Известны исследования пористого оксида алюминия с внедренными одноосными сегнетоэлектриками на примере триглицинсульфата [1] и практически отсутствуют сведения по исследованию гетероструктур на основе пористого кремния. Вместе с тем, пленки пористого кремния с самоорганизованным массивом цилиндрических пор различной толщины сравнительно просто получить.

Сегнетоэлектрические материалы включают пьезоэлектрические и пироэлектрические материалы и обладают специфическими свойствами, такими как высокая, зависящая от внешнего электрического поля, диэлектрическая проницаемость, обратимая поляризация, прямой и обратный пьезоэлектрический эффект, пироэлектрический эффект [2-4]. В большинстве своем они представляют собой сложные оксиды, при этом наиболее яркими представителями сегнетоэлектриков являются титанаты бария, стронция, свинца и применяются в преобразователях электрической энергии в механическую и обратно, для стабилизации частоты, в фильтрах, миниатюрных конденсаторах, термометрах, модуляторах, умножителях частоты, диэлектрических усилителях, а также в затворах и модуляторах лазерного излучения. Благодаря стабильности температурного коэффициента ёмкости и низкой величине коэффициента рассеяния $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ может быть использован для изготовления многослойных керамических конденсаторов, для устройств на основе материалов с положительным температурным коэффициентом сопротивления, или материалов, у которых диэлектрическая проницаемость изменяется не более, чем на 15 % в интервале температур от -55 до $+125$ °С.

Получение сложных оксидов тугоплавких металлов твердофазным методом характеризуется высокой температурой процесса ($1100 - 1300$ °С), при этом различия в температурах плавления оксидов металлов, таких как Ba, Ti и Pb, создает значительные трудности синтеза гомогенных материалов. Использование растворных методов синтеза позволяет значительно снизить температурные параметры процессов синтеза сложных оксидов. Так, сегнетоэлектрические пленки получали гидротермальным методом и золь-гель методом, которые не обеспечивают должной

чистоты получаемых продуктов. Для получения качественных сегнетоэлектриков с улучшенными свойствами важно развивать методы синтеза материалов, гомогенных по составу и однородных по морфологии, что возможно с использованием экстракционно-пиролитического метода [5].

Данная работа посвящена разработке и исследованию морфологических и диэлектрических свойств структур на пористом кремнии с внедрением одного из перспективных сегнетоэлектрических материалов титаната бария.

Для формирования структур на пористом кремнии (ПК) используется достаточно простая, экономичная технология с использованием электрохимического анодирования. Образцы пористого кремния, получены в соответствии с технологическим маршрутом, разработанным ранее [6]. Формирование пористых структур проводилось в электрохимической ячейке при напряжении $U = 10$ В, плотности тока $j = 80$ мА/см², времени анодирования $t = 40$ мин и воздействии излучения определенной длины волны видимого диапазона ($\lambda = 450$ нм). В экспериментальной работе электрохимическая обработка образцов кремния проводилась в водных растворах плавиковой кислоты (HF : H₂O = 1:1). В качестве катода использовали никелевую пластину цилиндрической формы. В качестве исходных пластин применялись стандартные кремниевые подложки монокристаллического кремния марки КЭФ-10 (100) толщиной 450 мкм.

Оптические исследования полученных образцов проводились на оптическом интерференционном микроскопе МИИ-4. В результате исследований [7] выявлено, что электрохимическая обработка n-типа кремния при дополнительном излучении ($\lambda = 450$ нм) позволяет получить слои пористого кремния с высокой однородностью и равномерностью расположения пор по всей поверхности подложки, а также достаточно высокой плотностью пористой структуры (рис. 1).

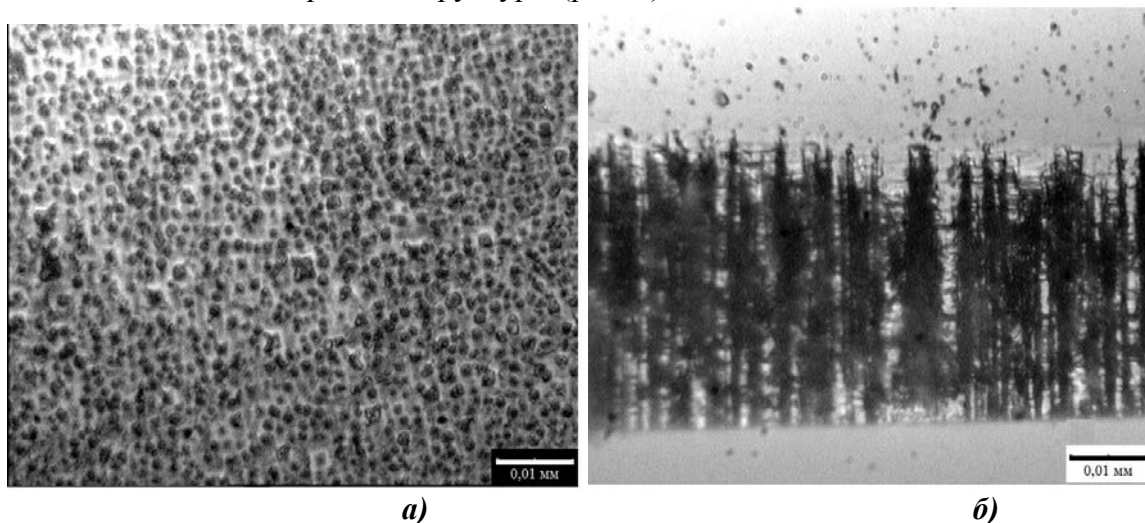


Рис. 1-Микрофотографии образца пористого кремния: а – поверхности; б – скола

Для получения структур пористый кремний-сегнетоэлектрик проводились экспериментальные исследования по заполнению пор органическими прекурсорами, которые формируются в процессе экстракции металлов из водных растворов их неорганических солей, при этом примесные катионы остаются в водной фазе [5]. Оптимальная концентрация раствора составила около 1,5 % по содержанию металлов. Снижение концентрации карбоксилатов в органическом раствора заметно улучшает качество наносимой пленки, устраняются наплывы и подтеки. После нанесения раствора смеси экстрактов – карбоксилатов бария и титана на подложки пористого кремния проводился пиролиз при температуре 500 °С с последующим отжигом в

течение 10 минут при 700 °С. Процессы нанесения и пиролиза чередовали для получения необходимого количества слоев.

Как показали результаты рентгенофазового анализа на приборе ДРОН, в процессе отжига пленки в течение 10 минут при 700 °С получается чистая фаза сегнетоэлектрика. По полуширине рентгеновского с использованием уравнения Шеррера $\Delta 2\theta = m\lambda/D_{hkl} \cos\theta$ ($m=1$, $\lambda=1,5418$ нм) определен размер зерен в полученной пленке ВаТiО₃ 20 нм.

Исследования на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S5500 показали, что пленки ВаТiО₃, полученные экстракционно-пиролитическим методом при температуре 700 °С, состоят из однородных по размеру и форме зерен величиной около 20 нм (Рис. 2).

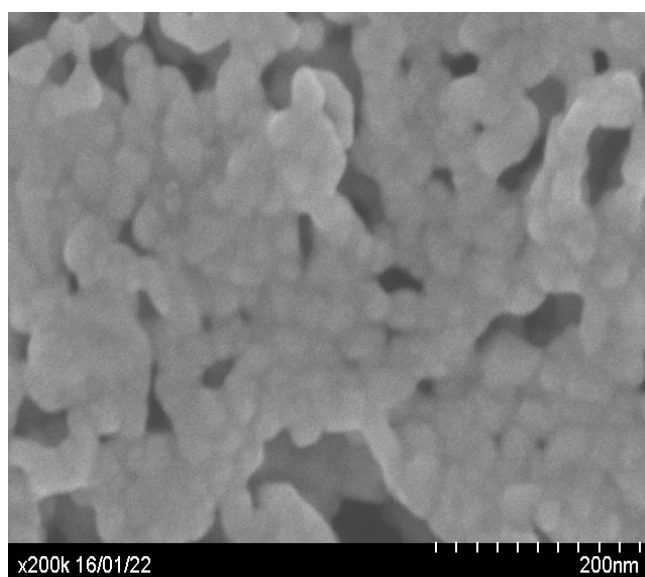


Рис.2 - Микрофотография поверхности пористого кремния с ВаТiО₃

Исследования микроструктуры сколов пористого кремния и пористого кремния, покрытого пленкой титаната бария, на электронном микроскопе ТМ 1000 показали (рис. 3), что происходит внедрение ВаТiО₃ в поры кремниевой матрицы (рис. 3,б) на большую глубину, что обусловлено капиллярным эффектом и низким поверхностным натяжением используемого органического раствора.

Для исследования диэлектрической проницаемости формировались конденсаторные структуры. Для этого на обе стороны образцов пористого кремния с титанатом бария в качестве обкладок наносили металлические пленки, которые были получены методом вакуумно-термического испарения. Измерения емкости проводились с помощью измерителя индуктивности и емкости МУ 6243 при комнатной температуре. Измеренная емкость и вычисленные значения низкочастотной диэлектрической проницаемости конденсатора на пористом кремнии с нанесенными пленками ВаТiО₃, полученными экстракционно-пиролитическим методом указали на зависимость данных параметров от количества наносимых слоев титаната бария и от выбора материала для обкладок конденсаторных структур. Величины емкости первых двух партий образцов при площади 1.5 - 2,25 см² составили от 1.6 до 41.7 нФ на частоте 900 Гц при напряжении U₀=150 мВ.

Результаты исследований первых партий образцов указывают на необходимость дальнейшего подбора режимов получения пористой матрицы, типа сегнетоэлектрика, количества слоев нанесения его на поверхность кремния, а также

выбора конструкции конденсатора. Все эти факторы влияют на диэлектрические свойства получаемых структур. В дальнейшем планируется проведение исследований зависимости диэлектрической проницаемости от температуры в различных частотных диапазонах с целью создания конденсаторов с высокими стабильными диэлектрическими параметрами.

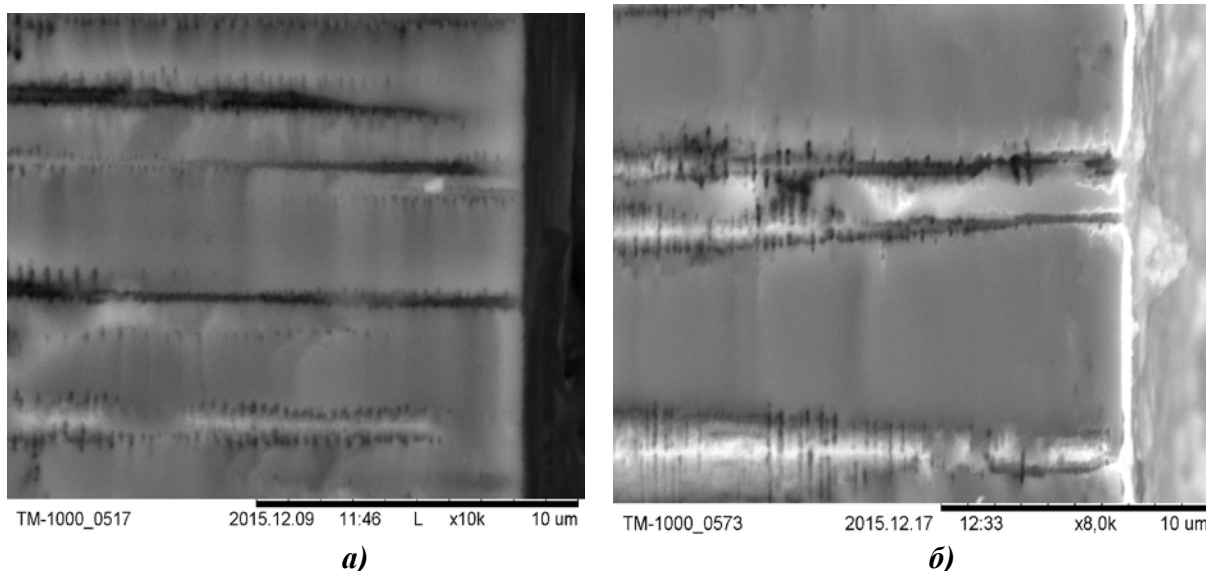


Рис. 3- Микротографии: а – пористого кремния б – пористого кремния с $BaTiO_3$

Таким образом, с помощью электрохимического анодирования и экстракционно-пиролитического метода получены структуры на основе матрицы пористого кремния, имеющие высокую величину диэлектрической проницаемости.

Список литературы

1. Диэлектрические свойства пористого кремния с включениями триглицидсульфата. О. М. Голицина, С. Н. Дрожнин и др. // Конденсированные среды и межфазные границы, Том 17, № 2 2015. С. 153-159.
2. Theis C.D., Yeh J. Absorbtion controlled growing of $PbTiO_3$ by reactive molecular beam epitaxy // Thin Solid Films, 1998. V. 325. № 1. P. 107–114.
3. Tunabajlu B. Kinetics of phase transition in film $Pb-Ga-Zr-TiO_3$ // J. Mater Sci Lett. 1998. V. 17. № 17. P. 1445–1447.
4. Martin Maria Jose. Influence of deposition parameters and substrate on the quality of pulsed – laser deposited $Pb_{1-x}Ca_xTiO_3$ ferroelectric films // J. Amer. Ceram Soc. 1998. V. 81. № 10. P. 2542–2548.
5. Экстракционно-пиролитический метод получения оксидных функциональных материалов. Холькин А.И., Патрушева Т.Н. / М.: КомКнига. 2006. 276 с.
6. Разработка пористых структур на кремнии. Е.А. Сакун, А.В. Полюшкевич, П.А. Харлашин, О.В. Семенова, А.Я. Корец/ Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 4 (2010 3) 430-443.
7. Формирование пористых структур на кремнии. О. В. Семенова, В. А. Юзова, Ф. Ф. Меркушев, М. Ю. Раилко / Химическая технология № 2 2015. С 80-84. ISSN 1684-5811.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Селиванов А.С.

научный руководитель канд. биол. наук Барашков В.А.

Сибирский федеральный университет

Печатные платы являются одним из наиболее важных компонентов электронного оборудования. Они представляют собой платформу, на которой устанавливаются и связываются между собой микронные компоненты, такие как полупроводниковые микросхемы и конденсаторы.

Более всего используют ручной демонтаж. Автоматизированный демонтаж электронного оборудования хорошо развит, но, к сожалению, его применение в утилизации электронного оборудования, по-прежнему, сталкивается со многими проблемами. Опасные вещества удаляются только частично, особенно из очень малых компонентов. Это означает, что значительное количество опасных веществ направляются на последующие механические процессы дробления и переработки, в результате чего значительно повышается количество загрязняющих веществ.

В полуавтоматических методах демонтажа электронные компоненты удаляются с помощью комбинаций нагревания и нанесения ударов, механических ножниц, вибрации для разъединения паяных соединений и нагревом до температуры на 40-50°C выше, чем температура плавления припоя. Во время нагревания может происходить пиролиз, а это значит, что возможно образование диоксинов.

Переработка плат включает в себя три типа обработки: предварительная обработка, физическая переработка и химическая переработка. Предварительная обработка включает в себя демонтаж многоразовых и токсичных элементов, измельчение или разделение. Затем следует физическая переработка. Потом материалы извлекают путем химического процесса переработки.



Рис.1 – Механическая переработка печатных плат

Механическая переработка – это физический метод, при котором разобранные детали размалываются до необходимых размеров (рис. 1), после чего они поступают на установку тонкого измельчения. Температура печатных плат быстро возрастает из-за сжатия и достигает более 250°C в процессе дробления, поэтому пиролитическое расщепление химических связей в матрице производит бромированные и не бромированные фенолы и простые эфиры.

Магнитные сепараторы и барабанные сепараторы низкой интенсивности широко используются для извлечения ферромагнитных металлов из цветных металлов и других немагнитных отходов. Использование сепараторов высокой интенсивности позволяет отделить медные сплавы из матрицы отходов.

Разделение по электрической проводимости на основе таких технологий, как вихретоковое разделение, электростатическое и трибоэлектрическое разделения отделяют материалы различной электропроводности цветных металлов из инертных материалов.

Методом воздушной сепарации разделение диспергированных твердых частиц происходит благодаря различным размерам частиц и их различным плотностям. Подвешенные в газе частицы, в основном воздухе, занимают разные положения в сепараторе под воздействием различных сил в зависимости от материала. У тяжелых частиц предельная скорость осаждения больше, чем скорость воздуха, в то время как у более легких частиц предельная скорость осаждения меньше скорости воздуха. Следовательно, тяжелые частицы перемещаются вниз против воздушного потока, в то время как легкие частицы поднимаются вместе с воздушным потоком в верхнюю часть сепаратора.

Электростатический метод разделения для разделения сыпучих материалов использует электростатическое поле, которое воздействует на заряженные или поляризованные тела. Эти технологии применяются для переработки металлов и пластмасс из промышленных отходов. Электростатические технологии разделения могут использоваться для отделения Cu, Al, Pb, Sn и железа и некоторых благородных металлов и пластика.

Магнитные сепараторы широко используются для отделения ферромагнитных металлов от цветных металлов и других немагнитных отходов. Недостатком магнитного разделения является агломерация частиц, вследствие которой магнит вытягивает вместе с ферромагнитными металлами и неметаллические включения. Следовательно этот метод не очень эффективен.

Химические методы переработки отходов печатных плат включают пиролиз, гидрометаллургический, биометаллургический методы и газификацию.

Пиролиз — это химический метод, который широко используется для переработки синтетических полимеров, включая полимеры со стекловолокном. При пиролизе таких полимеров образуются газы, углеводороды и обугленный остаток. Эти вещества в дальнейшем можно использовать в качестве химического сырья или топлива. Платы нагревают до достаточно высокой температуры, чтобы расплавить припой, используемый для связывания электрических компонентов. Обугленный конгломерат, который называется также «черным металлом», содержит в себе большой процент меди, а также небольшое количество железа, кальция, никеля, цинка и алюминия, эти металлы можно затем восстановить.

Гидрометаллургический метод главным образом используется для переработки плат с целью извлечения металлической фракции. Метод заключается в выщелачивании металлов с применением растворов кислот и щелочей, за которым следует электрорафинирование желаемых металлов. Этот метод считается более гибким и энергосберегающим, следовательно, экономически эффективным. Широко используемыми выщелачивателями являются царская водка, азотная кислота, серная кислота и цианистые растворы. В случае неметаллических подложек, металлы выщелачиваются в раствор с подложки. Металлические подложки перерабатываются электрохимическим способом. Таким образом, гидрометаллургический метод позволяет восстанавливать металлы без какой-либо дополнительной обработки. Остальные материалы в плате перед повторным использованием или захоронением

должны подвергаться дополнительной термической обработке. Основным недостатком этого метода является едкость и ядовитость используемых жидкостей.

Биометаллургический метод сепарации используется для извлечения драгоценных металлов и меди из руды уже давно, однако до сих пор он не очень хорошо развит. Микроорганизмы используют металлы, присутствующие во внешней среде и на поверхности клеток для своих внутриклеточных функций. Каждый тип микроорганизма имеет характерную тенденцию переносить конкретный металл в определенной среде. Биовыщелачивание и биосорбция в целом – два основных направления биометаллургии, используемые для извлечения металлов. Биовыщелачивание успешно применяется для извлечения драгоценных металлов и меди из руд в течение многих лет. Та же методика может применяться для извлечения меди и других ценных металлов из отходов печатных плат.

Основное применение процесса газификации — это генерация синтез-газа (CO, H₂). Газификация протекает приблизительно при температуре 1600 °С и давлении около 150 бар. Богатый водородом синтез-газ — основной продукт газификации, который является ценным сырьем для производства метанола. После соответствующей обработки, некоторые фракции этого газа могут использоваться для производства тепловой и электрической энергии. Схема процесса газификации отходов печатных плат, приведенная на рис. 3, включает печь газификации, в которую подается кислород, высокотемпературную печь, охладитель и анализатор газов.

Преимущества физических методов переработки, таких как магнитные сепараторы, сепараторы отделяющие материалы в зависимости от плотности, и т.д. по сравнению с химической переработкой заключаются в том, что они не требуют больших финансовых вложений, относительно просты, удобны, меньше загрязняют окружающую среду, требуют меньших затрат энергии. Металлические фракции, полученные физическими методами, можно использовать в коммерческих целях без значительных процедур восстановления. Однако для использования в коммерческих целях неметаллических фракций последние должны подвергнуться химической переработке. Таким образом, физические методы являются более экономически выгодными для переработки металлических фракций, чем неметаллических. Основная цель химических методов переработки, таких как пиролиз, заключается в преобразовании полимеров, содержащихся в неметаллических фракциях, в химическое сырье или топливо. Химические методы переработки имеют преимущества в преобразовании бром антипиренов и извлечении тяжелых металлов, оставшихся после физических методов переработки.

Большое количество неметаллических отходов печатных плат, которые зачастую являются опасными для людей и окружающей среды (из-за наличия бромированных антипиренов и тяжелых металлов, таких как свинец, кадмий, бериллий и т.п.) сбрасываются на свалках. Чтобы предотвратить это необходимо найти им оптимальное применение. Неметаллические фракции получаются легче, чем цемент и песок, их гранулы гораздо меньше, следовательно, они обладают более надежной микроструктурой. Механическая прочность материала повышается в присутствии грубых стекловолокон. Поэтому, благодаря вышеуказанным свойствам, неметаллические фракции могут успешно использоваться в качестве наполнителя в строительных материалах, для изготовления клеев и декоративных агентов.

Разработана методика использования неметаллических фракций печатных плат в производстве неметаллических пластин, которые могут использоваться для получения композитных плит. Композитные плиты находят применение во многих областях, включая автомобильную промышленность, мебель, различное оборудование и отделочные материалы. Фенольные компаунды используются в производстве

радиодеталей и кухонной утвари. В связи с уменьшением лесных ресурсов и повышения их стоимости, производители ищут альтернативы деревянному полу. Неметаллические фракции печатных плат на бумажной основе кажутся хорошим вариантом замены деревянному полу.

Переработка электроники очень важна, так как компоненты технических средств и предметов электроники – это скорее ресурсы, чем отходы. В компонентах электроники, подлежащих переработке, достаточно высокое содержание полезных ресурсов, что делает их извлечение экономически выгодным. Но минимизация вреда, наносимого окружающей среде, которую мы достигаем при переработке электроники, гораздо важнее.

Список литературы

1. Xiang, Y.; Wu, P.; Zhu, N.; Zhang, T.; Liu, W.; Wu, J. & Li, P. Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacterial consortium enriched from acid mine drainage // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 184, N° 1-3, pp. 812–818, ISSN: 0304389
2. Xiu, F.R. & Zhang, F.S. Materials recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 178, pp. 628–634, ISSN:03043894
3. Zhan, M. & Wool, R. P. Biobased Composite Resins Design for Electronic // *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. Vol. 118, pp. 3274–3283, ISSN: 00218995
4. Zheng, Y.; Shen, Z.; Cai, C.; Ma, S.; & Xing Y. The reuse of nonmetals recycled from waste printed circuit boards as reinforcing fillers in the polypropylene composites // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 163, pp. 600–606, ISSN: 03043894
5. Zhou, Y.;& Quj, K. A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol 175, pp. 823-828, ISSN: 03043894
6. Zhou, Y.; Wu, W. & Quj, K. Recovery of materials from waste printed circuit boards by vacuum pyrolysis and centrifugal separation // *Waste management*. 2010. Vol. 30, pp.2299-2304, □ISSN: 03043894



СОЛНЕЧНЫЕ ЯЧЕЙКИ НА СТЕКЛЕ

Торокова Е.Л.

научный руководитель д-р техн. наук Патрушева Т.Н.

Сибирский федеральный университет

Сенсибилизированные красителем солнечные элементы (DSSC – *dye sensitized solar cells*) представляют собой с технической и экономической стороны весьма обоснованную альтернативную идею фотоэлектрических устройств на основе $p-n$ -перехода. В отличие от классических систем, где полупроводнику отводится двойная роль поглощения света и переноса носителей заряда, в данных элементах реализован принцип разделения функций переноса и световой абсорбции.

Существенными преимуществами сенсибилизированных красителями фотоэлектрохимических ячеек перед кремниевыми фотоэлектрическими элементами являются их: способность улавливать не только яркий свет, но и рассеянное излучение, подающее на элемент под небольшим углом; высокая эффективность работы в широком интервале температур; высокое соотношение цена/производительность; слабая чувствительность к частичному затенению рабочей поверхности; использование стандартного, не дорогостоящего оборудования, распространённых материалов, не требующих высокого уровня очистки; малый вес и низкая токсичность производства и компонентов элементов. Преимуществом DSSC по отношению к конкурирующей кремниевой технологии является то, что производительность DSSC практически нечувствительна к изменению температуры в интервале от $+10$ до $+60$ °С. Тогда как классические элементы из кремния характеризуются значительным снижением производительности на ~ 20 % при повышении температуры. Поскольку температура солнечной батареи достигнет $+60$ °С в условиях полного солнечного освещения, эта особенность инжекционных ячеек особенно привлекательна для генерации электроэнергии в естественных условиях [1].

DSSC элемент в основном состоит из слоев полупроводникового оксида TiO_2 , красителя, электролита и катализатора, которые расположены между двумя прозрачными проводящими электродами (рис. 1).

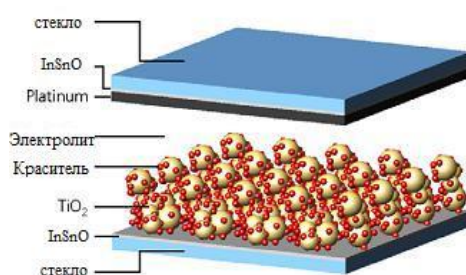


Рис.1 – Функциональная структура и компоненты DSSC

Электроды классического сенсибилизированного красителем солнечного элемента DSSC изготавливают из обычного стекла соответствующего ГОСТ 111–2001, покрытого прозрачной оксидной проводящей пленкой $\text{In}_2(\text{Sn})\text{O}_3$. Проводящее покрытие электродов служит для отвода сгенерированного тока в нагрузку, а материал подложки, чаще всего стекло, выступает в роли надежного опорного каркаса для ячейки, т. е. электроды выполняют двойную функцию, являясь элементом корпуса конструкции, герметизирующим ячейку от воздействий окружающей среды (кроме излучения).

Методы изготовления пленки TiO_2 – это важный аспект в производстве высокоэффективных DSC. При изготовлении фотоанода обычно используют методы трафаретной печати для нанесения нанокристаллических и субмикронных кристаллических слоев TiO_2 , а также обработку хлоридом титана. В методе трафаретной печати используются специально приготовленные пасты диоксида титана. Для получения пленок TiO_2 применяются различные методы, такие как вакуумное термическое напыление, анодное окисление титана, CVD-метод и спрей-пиролиз, пиролиз аэрозоля и др. [2,3].

Экстракционно-пиролитический метод получения наноструктурированных тонких пленок и наноразмерных порошков [4] используют для синтеза гомогенных простых, сложных оксидов заданного состава. Для экстракции металлов использованы монокарбоновые кислоты, в частности α -разветвленные кислоты фракций C_5 – C_9 (далее ВИК – высшие изомеры карбоновых кислот). Перед использованием ВИК как вторичный продукт нефтепереработки подвергали перегонке под вакуумом. Экстракция Ti проводилась путем контактирования водных растворов солей металлов и монокарбоновой кислоты при добавлении в раствор щелочи. В процессе экстракции катион Ti^{2+} из водной фазы 1 М раствора сульфата титана переходит в органическую фазу карбоновых кислот (ВИК) в виде карбоксилата титана $\text{Ti}(\text{RCOO})_2$. Метод экстракции позволяет получить органические растворы с различной концентрацией, которая регулируется добавлением щелочного реагента. На стеклянную подложку с предварительно нанесенным экстракционно-пиролитическим методом проводящим слоем ИТО наносили пленку экстракта титана методом погружения, сохраняя участок с проводящей пленкой для присоединения контактов.

Пленки различной толщины были получены последовательным нанесением раствора экстракта титана на стеклянные полочки с последующим пиролизом каждого слоя при $450\text{ }^\circ\text{C}$ с повторением цикла 10–20 раз. Формирование пленки TiO_2 происходило при термическом разложении прекурсора. После пиролиза на подложке формируется пористый наноструктурный слой оксида титана. Фотохимическая активность пленок TiO_2 зависит от их толщины и размеров нанокристаллитов.

Фотоанод TiO_2 с адсорбированным красителем и прозрачный анод (контрэлектрод) были собраны в запечатанную ячейку типа сэндвич нагреванием с горячей плавящейся пленкой. Капля раствора электролита была помещена в просверленное отверстие в контрэлектроде собранной ячейки. Отверстие было запечатано. Полученные солнечные ячейки вырабатывали электрический ток под действием солнечного излучения.

Производство нанокристаллических материалов, открывает огромные возможности для этих систем. Сенсibilизированный красителем солнечный элемент осуществляет оптическое поглощение и процесс разделения зарядов благодаря контакту сенсibilизатора как поглощающего свет материала с широкозонным полупроводником с нанокристаллической морфологией.

Список литературы

1. Патрушева Т.Н. Технологии изготовления компонентов оксидных солнечных батарей. Монография. Изд. СФУ: Красноярск. 2015 – 328 с.
2. Huang C.-Y, Hsu Y.-C., Chen J.-G. et al. The effects of hydrothermal temperature and thickness of TiO_2 film on the performance of a dye-sensitized solar cell // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2006. Vol. 90. P. 2391.
3. Yoshida T., Zhang J., Komatsu D. et al. Electrodeposition of inorganic/organic hybrid thin films// Advanced Functional Materials. 2009. .Vol. 19. P. 17–43.



4. Холькин, А. И. Патрушева Т. Н. Экстракционно-пиролитический метод. Получение окисдных функциональных материалов М.: КомКнига, 2006. – 187 с.



ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ**Шадрин Е.В., Гаврилов Е.Е.****научный руководитель д-р техн. наук Патрушева Т.Н.***Сибирский федеральный университет*

Большая часть теплопотерь из помещения происходит через стекло, при этом существует тенденция к остеклению всё большей поверхности зданий и сооружений для придания им современного дизайна и внутренней комфортности. При этом целесообразно использовать энергосберегающее стекло. Энергосберегающее стекло - это полированное флоат-стекло, на поверхность которого нанесено покрытие из полупроводниковых окислов металлов или цветных металлов. За счет явлений интерференции и электропроводимости стекло с таким покрытием отражает тепловые волны в инфракрасном диапазоне, что позволяет существенно сократить теплопотери помещения.

Существует несколько видов энергосберегающих стекол. Твёрдое энергосберегающее покрытие (к-стекло) получают нанесением на поверхность еще горячего стекла методом пиролиза в процессе производства на флоат-линии тонкого слоя специального металлооксидного покрытия, например оксида олова. Такое покрытие, «спекаясь» со стеклом, отличается особой прочностью, и поэтому называется «твёрдое покрытие». Мягкое энергосберегающее покрытие (i-стекло) получают нанесением на поверхность стекла оптического низкоэмиссионного (Low-E) покрытия, например серебра, с использованием высоковакуумного производственного оборудования, оснащенного системой магнетронного распыления.

Строение энергосберегающего стеклопакета с i-стеклом включает стекло со специальным покрытием ионами серебра, газ аргон в воздушной камере, дистанционную рамку и осушитель (абсорбент). Обычные стеклопакеты имеют такое же строение, за исключением серебряного покрытия и наполнения аргоном. Серебряное напыление наносится на внутреннюю сторону стеклопакета и играет, своего рода, роль отражателя. При этом обладает способностью отражать и вредное инфракрасное излучение, и длинноволновое излучение. Визуально практически не различимо, поэтому на прозрачность металлопластиковых окон не влияет. Аргон предохраняет серебро от окисления в процессе взаимодействия с воздухом, т.е. препятствует разрушению энергосберегающего покрытия стеклопакета. Но это не единственная цель, преследуемая производителями металлопластиковых окон и стеклопакетов к ним. Аргон также повышает уровень звукоизоляции, т.к. его динамический модуль упругости выше, чем у воздуха, и повышает уровень теплоизоляции.

Процесс получения энергосберегающего к-стекла и i-стекла довольно трудоемок и требует от производителя высочайшей квалификации. Неслучайно в мире существует всего несколько компаний, выпускающих энергосберегающие стекла в больших объемах. Российские производители стеклопакетов закупают энергосберегающее стекло в основном в Китае.

Наличие сырья и затраты на метод изготовления являются важными факторами в изготовлении материалов. Нами разработан экстракционно-пиролитический метод нанесения энергосберегающего покрытия [1], который обеспечивает снижение затрат на из производство. Для получения ITO и YZO пленок экстракты металлов In, Sn, Zr, Y и др. смешивают в необходимой стехиометрии In:Sn=9:1, Zr:Y=9,3:0,7 в растворе после уточнения концентрации металлов в экстрактах методом атомной абсорбции. Полученные экстракты – соли органических кислот – хорошо смачивают стеклянные подложки и образуют самоорганизующиеся тонкие пленки. Пленки были нанесены

накатыванием слоя экстракта на стеклянную подложку, которая была предварительно очищена. После подсушивания подложка со смачивающей пленкой помещалась в печь для пиролиза на воздухе. Пиролиз смачивающей пленки приводит к формированию многочисленных центров кристаллизации оксидных пленок, которые в результате отжига образуют наноструктурные твердые пленки сложного оксида.

Прозрачные оксидные проводящие пленки целесообразно использовать для оптических приложений, поэтому одной из основных характеристик таких пленок является коэффициент оптического пропускания.

На рисунке 1 представлены спектры оптического пропускания пленок ИТО, полученных ЭП-методом, на стекле и кварце в видимом диапазоне длин волн. Исследования серии образцов показали, что в видимой области спектра пропускание пленок составляет 90–95 %. Волнообразный характер спектра обусловлен зависимостью пропускания пленки от длины волны.

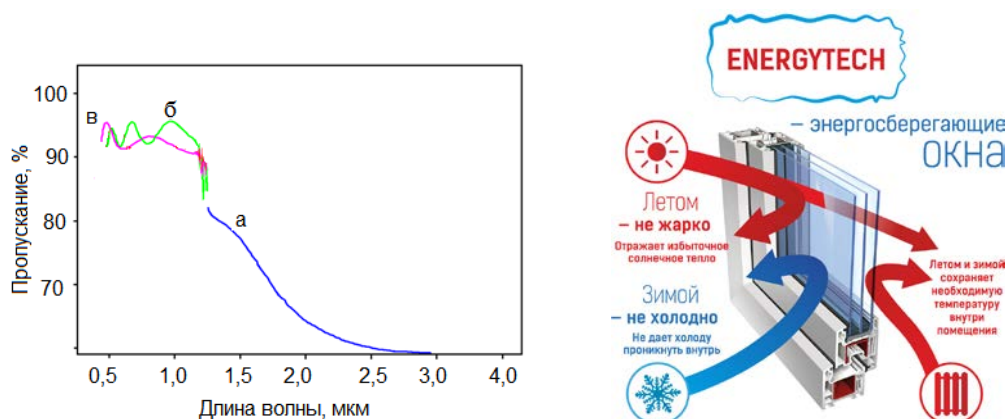


Рис.1 – Спектры оптического пропускания пленок ИТО на стекле (в), кварце (б) и кремнии (а)

Для исследования поглощения в ИК-области на длинах волн 1,2–3 мкм пленку ИТО наносили на кремниевую подложку, поскольку кремний пропускает ИК-излучение. Пропускание в ИК области спектра резко понижается в области 1,2–2,5 мкм (рис. 1). Свойство ИТО пленок задерживать ИК излучение используется для создания энергосберегающих окон. В оконном стекле, как правило, проводимость не имеет никакого значения, но высокая инфракрасная отражательная способность нужна для того, чтобы получить хорошее светопропускание в видимом диапазоне, при сведении к минимуму передачу тепла. Эта функция используется, чтобы минимизировать затраты на кондиционирование воздуха в летний период и расходы на отопление в зимнее время, в зданиях, оснащенных соответствующим покрытием окон.

Полученные экстракционно-пиролитическим методом прозрачные проводящие покрытия на стекле были использованы в качестве электродов для солнечных ячеек, сенсibilизированных красителем [2].

Список литературы

1. Patrusheva T. N., Snezhko N. Yu., Belousov A. L. at all. Transparent Conductive ITO Coatings obtained by by pyrolysis of metal extracts // Journal of Applied Chemical Science International. 2015, Volume 3 [Issue 1] Page 21-28.
2. Патрушева Т.Н. Технологии изготовления компонентов оксидных солнечных батарей. Монография. Изд. СФУ: Красноярск. 2015 – 328 с.