

М. Д. Ефремов, С. А. Аржанникова, В. А. Володин, Г. Н. Камаев, Д. В. МаринИнститут физики полупроводников СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: efremov@isp.nsc.ru**НАНОМЕТРОВЫЕ КЛАСТЕРЫ И НАНОКРИСТАЛЛЫ КРЕМНИЯ ***

Статья посвящена рассмотрению серии результатов полученных оптическими, электронными методами исследования нанокристаллов кремния, помещенных в различные среды. Одним из объектов нашего изучения являлись нанопыльцы кремния, полученные при воздействии мощного пучка электронного ускорителя ЭЛВ-6 (ИЯФ) на монокристаллическую кремниевую мишень с последующим испарением и сбором атомов кремния в кристаллиты шарообразной формы. От нанопорошка кремния, полученного таким образом, был зарегистрирован сигнал фотолюминесценции в видимой области с широким спектром излучения от красного до голубого. Методом плазмохимического осаждения пленок кремния, его нитридов и оксидов, с помощью наносекундных лазерных воздействий проведено изучение образования нанокристаллов кремния в аморфном кремнии и диэлектриках. При лазерных обработках наблюдалась фазовая трансформация нанокластеров, проявлявшаяся в изменении фонового спектра включений кремния, регистрировавшегося методом Рамановской спектроскопии. Обнаружены особенности в виде ступенеобразной вольт-амперной характеристики, свидетельствующие о возможном вкладе кулоновского ограничения тока, протекающего в одноэлектронном режиме через нанокристаллы в диэлектрике. Проведено предварительное исследование процессов зарядки-разрядки электронных состояний на границе между кремнием и оксидами методами измерения дифференциальных емкости и проводимости на переменной частоте при обмене носителями заряда с кремниевыми кластерами в диэлектрике. Экспериментальные результаты сопровождаются оценками, теоретическими выкладками, поясняющими физические механизмы наблюдавшихся явлений, которые в основном содержатся в статьях авторов. В работе обозначаются перспективы использования наблюдаемых эффектов при создании приборных воплощений в области кремниевой нано-, микро- и широкоформатной электроники, таких как плоские экраны, элементы памяти, слаботочные тонкопленочные нанотранзисторы, светоизлучающие диоды.

Введение

Несмотря на то, что в последние годы усиленное внимание уделяется нанообъектам разного рода, интерес к включениям малых размеров, изменяющих свойства материалов, стал проявляться сравнительно давно. Среди примеров, которые можно упомянуть – использование цветных стекол, которые в основе своей являются окислом кремния, но малые добавки других материалов, в том числе и сферической формы, приносят окраску. Этот эффект нашел применение еще в древности. В последнее время такое изменение оптических свойств материалов вызывает широкий научный интерес при создании так называемых оптических кристаллов, где включения были бы упорядочены.

Кремний – непрозрачный в видимой области материал, и будучи помещенным в прозрачную среду его оксидов или нитридов может приводить к модификации их оптических характеристик. Непрозрачность кремния, определяется тем, что при освещении светом в нем происходят электронные переходы, поглощающие фотоны в видимом диапазоне. С тем чтобы понять природу таких электронных переходов, надо предварительно рассказать, как формируются уровни электронных энергий в кристалле кремния.

Каждый атом характеризуется спектром электронных уровней. При сближении атомов происходит увеличение числа электронных состояний на каждом из уровней, и формируются зоны так называемых разрешенных

* Авторы настоящей работы благодарны соавторам публикаций и проведенных работ, касающихся тематики статьи: С. П. Бардаханову, В. В. Болотову, А. В. Вишнякову, А. К. Гутаковскому, Г. М. Жарковой, В. Я. Зырянову, Г. А. Качурину, С. А. Кочубею, А. В. Кретинину, Д. В. Марину, И. Г. Неизвестному, А. А. Попову, Р. А. Салимову, И. В. Самсоновой, В. А. Смирновой, В. А. Терехову, Д. И. Тетельбауму, Л. И. Фефиной, С. Г. Черковой, А. Г. Черкову, В. Ф. Шабанову.

состояний. Зона, соответствующая валентным электронам, т. е. электронам, занимающим наивысшие электронные уровни в атомах, называется валентной зоной. В полупроводниках следующая зона разрешенных состояний называется зоной проводимости и отделена от валентной энергетическим зазором, называемым запрещенной зоной полупроводника. На рис. 1 схематично показано распределение потенциала электрона в электрическом поле соседних атомов кремния, периодически расположенных с расстоянием между ними a . Штриховкой обозначены разрешенные зоны состояний – валентная и проводимости с зазором между ними в 1,12 эВ, а ниже показаны следующие нижележащие на 100 эВ разрешенные зоны, соответствующие L2, L3 уровням электронов в атоме кремния. При переходе электрона из валентной зоны в зону проводимости в окрестности того места, из которого перешел электрон, остается нескомпенсированный положительный заряд, называемый дыркой. Дырки и электроны взаимодействуют с атомами в кристалле. Теоретическое рассмотрение этого взаимодействия привело к тому, что электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне стали считать свободными и описывать в качестве элементарных частиц в полупроводнике. Но факт, что эффективные массы, приписываемые электронам и дыркам, имеют значения масс, меньшие или большие массы элементарного электрона, говорит о том, что это не совсем элементарные частицы, а так называемые квазичастицы, спектр которых характеризует электронное взаимодействие в полупроводниках.

При описании кристаллитов нанометровых размеров, для электронов и дырок применяется квантовая теория, позволяющая оценить

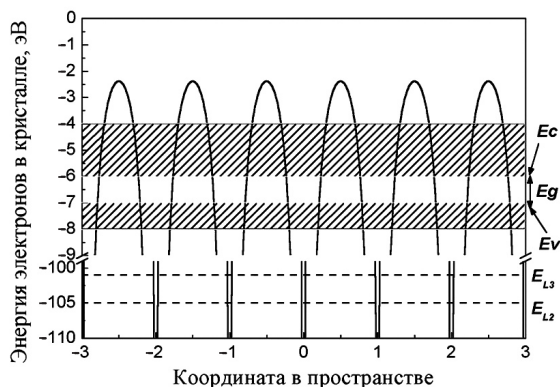


Рис. 1. Схематичное распределение потенциальной энергии электрона в электрическом поле кристаллической решетки

видоизменение гетероструктур с нановключениями. Сложные квантово-механические расчеты на основе взаимодействия отдельных атомов и электронов наталкиваются на значительные трудности из-за большого числа атомов даже в нанометровых кристаллах. Так, в нанокристалле размером 4 нм число атомов составляет тысячи, что и снижает достоверность расчетов электронных свойств. Однако для больших размеров имеются подходы, основанные на расчете электронного спектра свободных квазичастиц электронов и дырок в условиях ограничения размеров распространения их волновых функций. Оказалось, что качественно такие расчеты в приближении эффективной массы коррелируют с результатами сложных квантово-механических расчетов из первых принципов. Так, для электронов в зоне проводимости нанокристалла появляется дискретный спектр энергий и также, но с другими значениями, для дырок в валентной зоне.

Актуальность: фундаментальный и прикладной аспекты

Нанокристаллы кремния в более широкозонных материалах, таких как его оксиды и нитриды, проявляют квантовые свойства при температурах вплоть до комнатных, что имеет практический интерес в реализации приборов на основе диэлектриков с нанокристаллами кремния. В традиционной кремниевой технологии, благодаря которой и появилось большое разнообразие полупроводниковых приборов, нитриды и оксиды использовались в качестве изоляторов. Стремилась к тому, чтобы изолировать рабочую область прибора от управляющего затвора с тем, чтобы минимизировать токи утечки. Достигнутые характеристики оксида и нитрида кремния позволили создать полевые транзисторы, в том числе и для силовой электроники. Но можно использовать диэлектрики и с контролируемыми токами утечки для создания приборов нового типа. Это уже проявилось при реализации элементов памяти с островками кремния, встроенными в диэлектрик, которые служили центрами хранения заряда в так называемой перепрограммируемой памяти, или флэш-памяти. Островки кремния заряжаются при протекании тока через диэлектрик и могут разряжаться при подаче большого напряжения на структуру. В настоящее время речь

идет о том, чтобы в качестве островков кремния использовать нанокристаллы кремния с тем, чтобы уменьшить размеры полупроводниковых приборов и в дальнейшем увеличить число элементов на одном чипе.

Квантование электронов и дырок в пределах нанокристалла приводит к модифицированию свойств материала, причем за счет квантования расширяется спектр электронных переходов. В оптике это проявляется в том, что наблюдается излучение от нанокристаллов в видимом диапазоне спектра, а в электронике – в проводимости традиционных диэлектриков, протекание тока через которые может регулироваться наличием наперед заданной концентрацией нанокристаллов. Особенности протекания тока через нанокристаллы в широкозонном материале, а также и механизмы излучения света при электронных переходах с их участием составляют интересный предмет для научного изучения.

Методы создания нанокристаллов

Научный и практический интерес к нанокристаллам породил сравнительно большое количество методов их получения. Среди разнообразия методов можно отметить те, о которых пойдет речь в дальнейшем. Одним из методов является диффузионное собирание атомов кремния в нанокристаллы в газовой фазе. Для испарения кремния в газ используются мощные радиационно-лучевые обработки монокристаллического или поликристаллического чистого кремния. В работе применялся электронный ускоритель, мощный фокусированный пучок которого расплавлял и испарял в атмосферу кремний, в которой атомы кремния собирались в нанокристаллы [1].

Другим методом является собирание атомов кремния в разреженной атмосфере прекурсоров (моносилана) и газа-носителя (аргона, азота), в которой зажигалась плазма. Формирование нанокластеров может происходить как в атмосфере, так и на поверхности при росте пленки. Характерная температура подложки может быть около 50–300 °С, что применимо для низкотемпературной плазмохимической технологии изготовления приборов [2]. Модификация структуры встроенных кластеров кремния, полученных таким методом, может быть осуществлена с применением мощных эксимерных лазеров, что и было проделано в эксперименте. Еще одним методом получе-

ния пленок диэлектриков с нанокристаллами, которому посвящено большое количество работ, является использование ионной имплантации кремния, когда ионы кремния внедрялись в качественные пленки термического оксида [3]. При дальнейших высокотемпературных обработках около 1200 °С, часть кремния трансформировалась в кристаллическую фазу в виде шарообразных включений в оксиде кремния.

Экспериментальные методы исследования

Полученные экспериментальные образцы были исследованы оптическими методиками: методом комбинационного рассеяния света, фотолюминесценции, пропускания и поглощения света, фотопроводимости, эллипсометрии. Кратко можно описать методики следующим образом. Регистрировалось комбинационное неупругое рассеяние света (КРС) на фононах, т. е. колебаниях решетки, для которых в кристалле имеются оптические и акустические моды. Свет рассеивается на оптических фононах, при этом происходит потеря энергии падающего фотона и рождается новый фотон с энергией, меньшей на энергию оптического фонона. Энергия оптического фонона характеризует силу связи между атомами кремния в кристалле и зависит от окружения. Так, для монокристаллического кремния в спектрах КРС наблюдается линия $520,6 \text{ см}^{-1}$, а для аморфного кремния – широкая линия с максимумом около 480 см^{-1} . Для нанокристаллов положение линии КРС варьируется с изменением размера. Квантово-механическое описание процесса КРС связывает с падающим фотоном рождение электронно-дырочной пары, может быть, даже на виртуальных уровнях энергии, после чего электрон или дырка отдадут энергию фонону или другой квазичастице, а потом рекомбинируют с излучением фотона на комбинационной частоте, меньшей частоты упавшего фотона на частоту фонона (квазичастицы). Спектр комбинационных фотонов регистрируется, и по разнице положения пиков в нем по сравнению с частотой падающих фотонов определяется спектр квазичастиц в материале.

Фотолюминесценция происходит также с возбуждением кристалла потоком фотонов, но генерируемые электронно-дырочные пары могут релаксировать обычно до характерных уровней энергии в кристалле, электроны – до

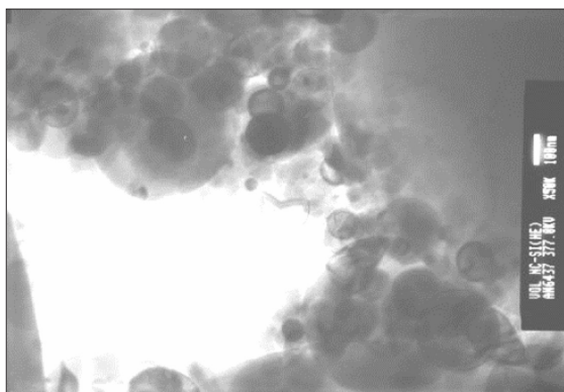


Рис. 2. Снимок электронной микроскопии нанопорошка кремния, полученного распылением

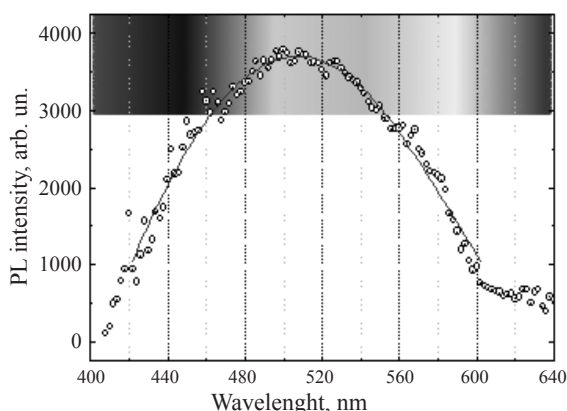


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции нанопорошка кремния

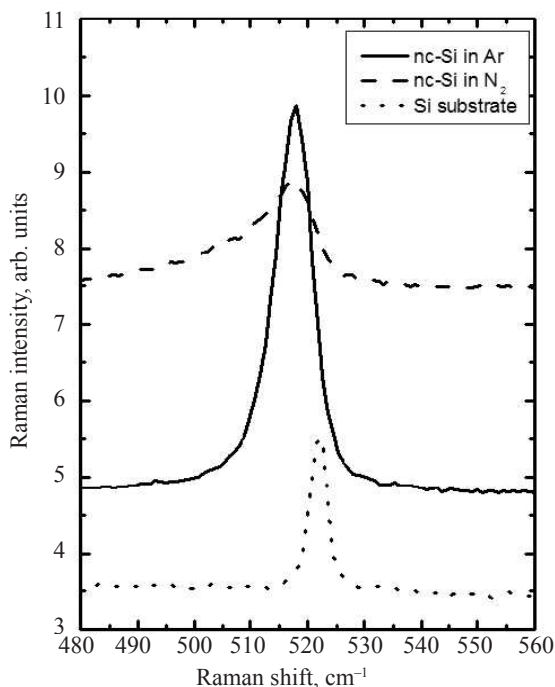


Рис. 4. Спектры КРС кристаллического кремния и нанопорошков

края зоны проводимости, а дырки – до края валентной зоны, и только затем происходит их рекомбинация с излучением, характерным для кристалла, свечения. Энергия пиков в спектре непосредственно отражает спектр электронных уровней в кристалле. Причем оптические переходы могут проходить через промежуточные уровни энергии в запрещенной зоне.

В методике пропускания света образец освещается излучением с различной длиной волны, и поглощение происходит тогда, когда энергия света совпадает с разницей разрешенных электронных уровней энергии в кремнии. Вследствие того, что кремний обладает диэлектрической проницаемостью, часть света может отражаться.

В методе эллипсометрии рассматривается отражение эллиптически поляризованного света от слоистых образцов и вычисляется значение диэлектрической проницаемости и толщины пленок.

При измерении вольт-амперных характеристик измеряется ток при изменении подаваемого напряжения на структуру и температуры образца.

Измерения дифференциальных емкости и проводимости осуществлялось модуляционным методом, когда на структуру подается и постоянное напряжение, и малая переменная добавка, на частоте которой измеряется сигнал методом синхронного детектирования.

Для контроля структуры применялись оптическая и электронная микроскопия. Спектр состояний в валентной и зоне проводимости регистрировался с использованием рентгеновского излучения с возбуждением электронов с нижележащих оболочек кремния.

Нанопорошок кремния из отдельных кристаллитов

В эксперименте с электронным испарением кремния были получены нанопорошки кремния в виде порошка, электронная фотография которого показана на рис. 2 [4]. Не рассматривая технологические сложности изготовления такого материала, приведем основные результаты изучения свойств нанопорошка. Методом ФЛ наблюдался широкий спектр, покрывающий диапазон от красного до голубого (рис. 3).

Как уже говорилось выше, объемный кристаллический кремний не светится в видимом диапазоне. Это связано с шириной запрещен-

ной зоны кремния 1,12 эВ, значение которой соответствует краевой длине волны возможного излучения и поглощения. И тем самым длина волны возможного излучения лежит в ближней инфракрасной области спектра. Однако при ограниченных размерах кристаллитов квантование раздвигает зону оптических переходов, и излучение может появляться в видимой области спектра, т. е. быть видимо глазом.

Широта спектра ФЛ, возможно, характеризует разброс распределения по размерам. Особо мелкие нанокристаллы дают голубое свечение, а большего размера могут светиться в красной области (см. рис. 2, 3).

Процесс поясняется на энергетической диаграмме. Поскольку нанопорошок после получения находился в воздушной атмосфере, то поверхность наночастиц могла покрыться слоем естественного окисла, в котором также могут быть состояния, участвующие в излучении фотолуминесцентного сигнала. Следует подчеркнуть, что полностью окисленные наночастицы не обнаруживали такого широкого спектра фотолуминесценции. Наличие кремния в наночастицах доказывают приведенные спектры КРС (рис. 4), в которых виден сигнал от монокристаллического кремния, сдвинутый по энергии из-за малых размеров наночастиц. На рисунке высокого разрешения (рис. 5) видны кристаллическая структура внутреннего устройства наночастицы и граница раздела со слоем окружающего естественного окисла [5].

Зародыши в аморфной фазе кремния

Плазмохимическим способом можно осадить как аморфный кремний, так и оксиды, нитриды кремния с включениями кремния при сравнительно низких температурах – 50–300 °С. Затем с помощью лазерного воздействия трансформировать структуру аморфного кремния в кристаллическое состояние. Процесс трансформации имеет отношение к фазовым переходам первого рода и идет с первоначальным образованием зародышей новой фазы, появляющимся в результате теплового воздействия. Импульсные лазерные обработки позволяют локально нагревать пленку с зародышами, не перегревая подложку. Особенно важно это в случае использования не тугоплавких подложек, в частности стекла, пластика.

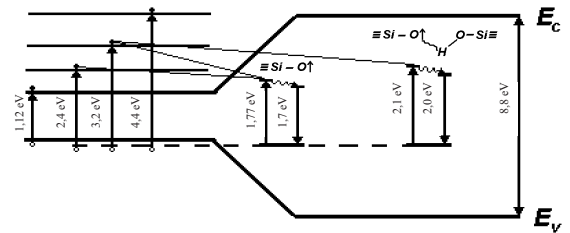
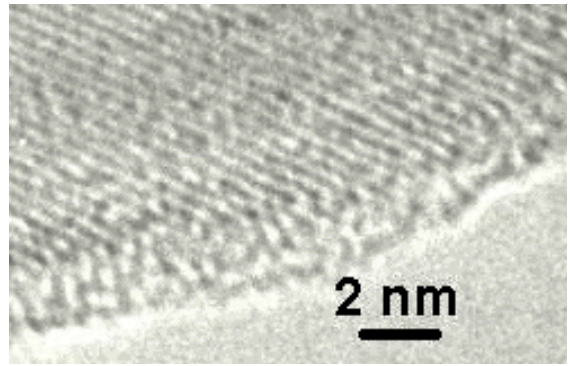


Рис. 5. Снимок электронной микроскопии высокого разрешения окисленной границы наночастицы кремния и энергетическая диаграмма границы

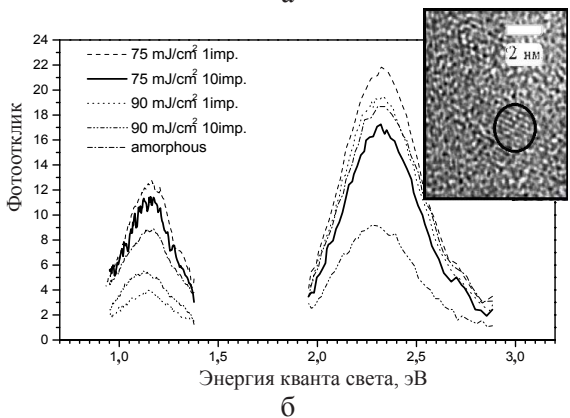
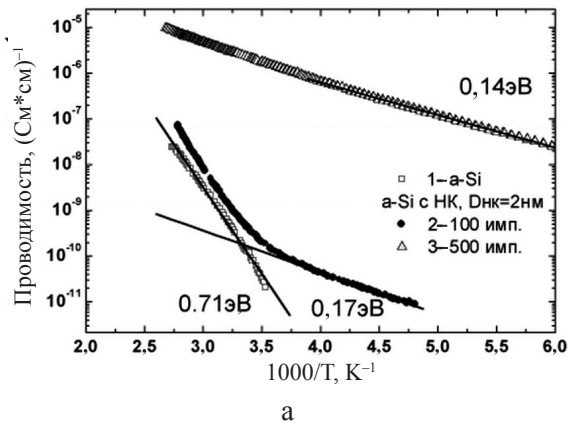


Рис. 6. Температурная зависимость проводимости (а): исходной пленки α-Si и пленок с нанокристаллами, введенными лазерными обработками 80 мДж/см² с количеством импульсов 100 и 500 соответственно; фото ЭДС (б)

На рис. 6, б приведены фотографии зародышей кристаллической фазы в аморфном кремнии, полученные при разных плотностях энергии воздействия лазером. Можно варьировать размер формирующихся зародышей при изменении плотности энергии воздействия. Интересно влияние наличия нанокристаллов на свойства пленок аморфного кремния. Так, в зависимости темновой проводимости от температуры было обнаружено резкое изменение эффективной энергии активации (см. рис. 6, а). Концентрация кристаллической фазы была ниже порога детектирования около 1 %, но нанокристаллиты наблюдались методом высокого разрешения (см. рис. 6) [6]. И даже такая малая добавка нанометровых кристаллитов выявила существенное изменение темновой проводимости аморфной пленки. При повышении концентрации нанокристаллов наблюдалось стабильное уменьшение энергии активации проводимости в широком диапазоне температур (см. рис. 6, а).

Расчеты проводимости и уровня Ферми в пленках с нанокристаллами подтвердили влияние нанокластеров и выявили стремление уровня Ферми к одному из уровней размерного квантования в нанокристалле при понижении температуры. При этом выбор уровня, к которому стремится уровень Ферми, определяется степенью легирования аморфных

пленок кремния дополнительными электрически активными примесями (рис. 7, б). Положение электронных уровней в кристалле (см. рис. 7, а) рассчитывалось в приближении эффективной массы, значения которой брались для электронов и дырок из работы [7]. Анализ структуры нанокристаллов показал, что около 90 % из них могут быть направлены кристаллографической осью [110] вдоль нормали к подложке, а около 30 % еще и одинаково ориентированы в планарных направлениях. При дальнейших лазерных или термических обработках введенные в аморфную пленку кристаллиты могут расти, за счет чего пленка может полностью кристаллизоваться. Одинаково ориентированные кристаллиты хорошо стыкуются, имея малоугловые расхождения на границах, при дальнейшем росте и столкновении [8]. Так были получены пленки поликремния на стекле, пластике с предельными температурами нагрева 350, 150 °С соответственно [9]. Такие пленки нашли широкое практическое применение в области создания плоских экранов, основным активным управляющим элементом которых является тонкопленочный транзистор (ТПТ), по типу – полевой транзистор.

В аморфном кремнии локализация волновых функций в нанокристалле происходит из-за неупорядоченности окружающей его

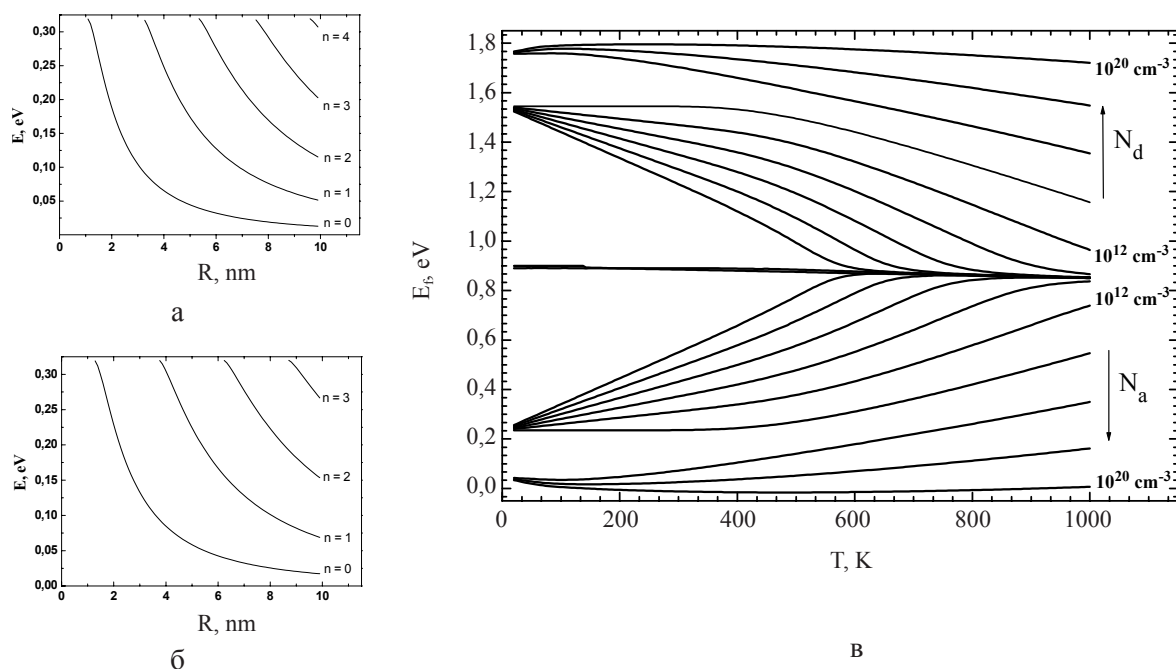


Рис. 7. Энергетический спектр электронов (а) и дырок (б) в нанокристалле Si, помещенном в матрицу α -Si; в – расчетная температурная зависимость уровня Ферми в α -Si с учетом мелкой примеси и нанокристаллов кремния $N_{nc} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

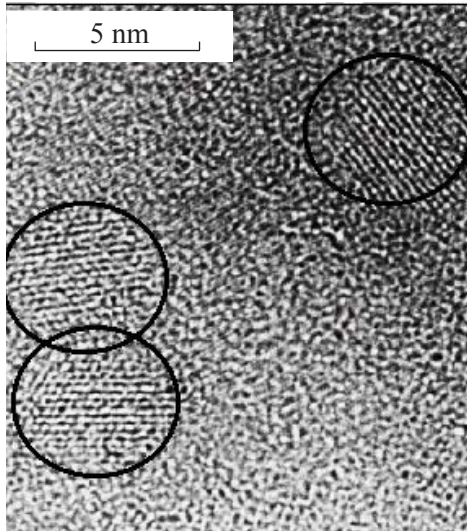


Рис. 8. Снимок нанокристаллов кремния в SiO_2 пленке, сделанный высокоразрешающей электронной микроскопией

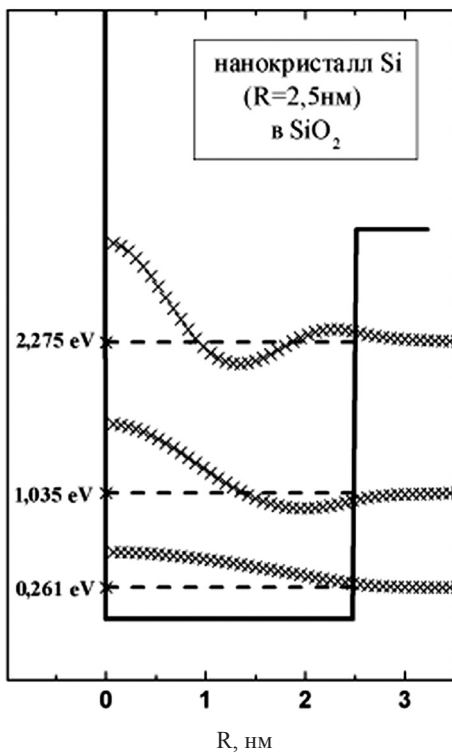


Рис. 9. Расчет дискретного электронного спектра и волновых функций нанокристалла кремния в SiO_2 пленке

матрицы. Так, в аморфном кремнии границы зоны проводимости и валентной зоны флуктуируют в пространстве, вследствие отсутствия трансляционной симметрии, характерной для кристалла. Как следствие, волновая функция электрона с энергией, большей E_c , может быть локализована. Длина локализации в аморфном кремнии и определяет степень ло-

кализации волновой функции электрона в нанокристалле в зависимости от номера квантового уровня.

Нанокластеры и нанокристаллы в диэлектрике

Помещенные в более широкозонный материал нанокристаллы (рис. 8) представляют собой также объект, проявление квантовых свойств которого может наблюдаться при комнатных температурах. Локализация волновых функций в данном случае происходит из-за барьеров для электронов и дырок (рис. 9). Барьер для электронов составляет 3,2 и 2,0 эВ при помещении нанокристалла в оксид и нитрид

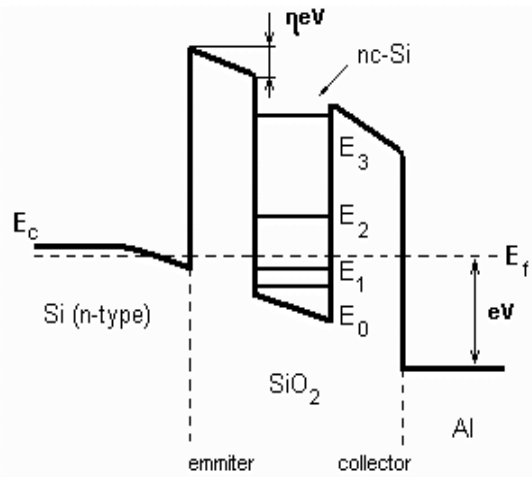


Рис. 10. Энергетическая диаграмма МДП-структуры с нанокристаллом кремния в диэлектрике

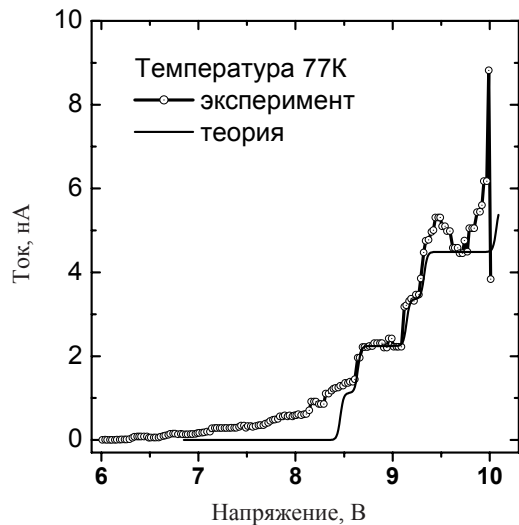


Рис. 11. Экспериментальная и расчетная вольт-амперная характеристика МДП-структуры с нанокристаллами в SiO_2 пленке

кремния, тогда как для дырок эти величины составляют значения 4,34 и 1,5 эВ соответственно. Для нанокристаллов кремния в диэлектрике также наблюдается фотолюминесценция. Но можно ожидать более интересные электронные свойства нанокристаллических включений в диэлектрике.

Так, на рис. 11 приведена вольтамперная характеристика структуры металл / оксид кремния / кремний (МОП) с нанокристаллическими включениями в диэлектрике (рис. 10), фотография которых показана на рис. 8. При температуре жидкого азота 77 К наблюдалась ступенеобразная I–V характеристика, которая объяснена теоретическим расчетом, приведенным на том же рисунке [10]. Видно хорошее согласие между расчетом и вольтамперной характеристикой. Физически это объясняется тем, что инкрустация нанокристаллов в диэлектрик влияет на пути протекания тока через диэлектрический слой. При понижении температуры проводимость диэлектрика падает, но наличие нанокристаллов может приводить к действию цепочек проводимости по состояниям в них. Если в цепочке проводимости имеется один нанокристалл, то при попадании одного электрона в него из эмиттера он заряжается, и его энергия повышается на величину электростатической энергии заряженного шара. Для очень маленьких нанокристаллов эта величина может быть весьма существенна, и попадание следующего электрона будет затруднено до тех пор, пока не повысится напряжение, подаваемое на структуру. Электрон, попавший в нанокристалл, может выйти из него в коллектор с какой-то вероят-

ностью. Если вероятность попадания выше вероятности выхода, то нанокристалл может быть большее время заряжен, и перенос заряда осуществляется по одному электрону. При повышении напряжения – по два электрона и т. д. Избыточные электроны должны занимать разные уровни в нанокристалле из-за квантово-механического ограничения и запрета Паули. Поскольку каждому последующему электрону приходится занимать все более высокие уровни, то и токовая характеристика имеет ступенеобразный характер при подаче все большего напряжения на структуру. Теоретическое обоснование наблюдаемого кулоновского ограничения тока через квантовую точку приведено, например, в работе [11], в которой выведены выражения для тока, протекающего с учетом резонансного туннелирования через барьеры с эмиттером и коллектором. Для образца в данной работе толщина окисла кремния была слишком большой, чтобы обеспечить туннелирование однократным прыжком. Поэтому электрону приходилось осуществлять транспорт по состояниям в диэлектрике, возможно связанным с избыточными атомами кремния, не собравшимися в нанокристаллические включения. Этому способствовало и достаточно широкое пространственное распределение атомов кремния в оксиде кремния, внедренных с помощью ионной имплантации.

Для нитрида и оксида кремния, полученных плазмохимическим способом с избытком кремния, также наблюдались сигналы фотолюминесценции, комбинационного рассеяния света, пропускания света. Край оптического поглощения, так же как и сигнал фотолюминесценции, сдвигался в красную область при увеличении концентрации кремния, что по-

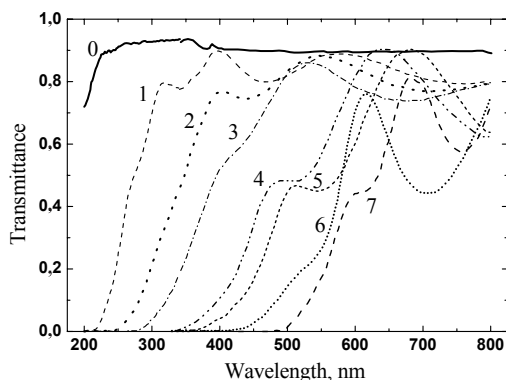


Рис. 12. Спектральная зависимость пропускания пленок SiN_x на кварцевой подложке, полученных плазмохимическим методом (кривые 1–7) и кварцевой подложки (кривая 0)

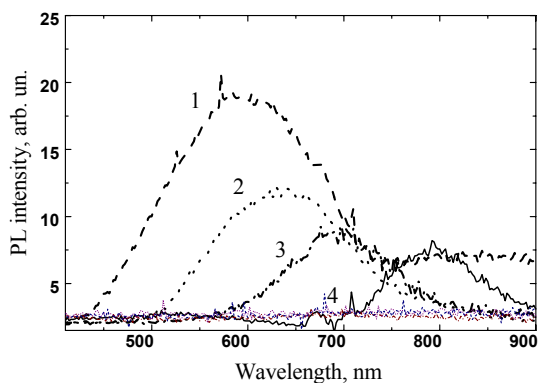


Рис. 13. Спектры фотолюминесценции пленок нитрида

казано на рис. 12 и 13. Дополнительные измерения эллипсометрии и подгонка оптических констант по спектрам пропускания света с учетом интерференции в пленках позволили установить взаимосвязь ширины оптической зоны и состава пленок нитрида кремния.

На основе полученных данных были изготовлены трехслойные пленки нитрида кремния с повышенной концентрацией атомов кремния в среднем слое диэлектрика. Лазерные обработки таких структур приводили к кристаллизации кластеров кремния. Для трехслойных пленок наблюдались интересные эффекты перезарядки состояний кремниевых кластеров. Измерения перезарядок осуществлялись с помощью методик $C-V$, $G-V$. Емкостные характеристики приведены на рис. 14. В отличие от стандартных высокочастотных $C-V$ -характеристик МДП-структур в эксперименте наблюдались два дополнительных изгиба в области перехода емкости полупроводника от инверсной к обогащенной. По отклонению емкости в этой области от стандартной можно рассчитать плотность состояний в приграничной области между кремнием и окислом. Расчеты отражены на рис. 15. Видно, что в энергетическом распределении состояний доминируют два пика плотности состояний, которые могут соответствовать состояниям в нанокристаллах или кластерах кремния. При изменении направления сканирования по напряжению величины пиков изменялись, что свидетельствует об изменении зарядового состояния кластеров в приграничной области диэлектрика рядом с подложкой кремния [12].

Для ряда образцов экспериментальная дифференциальная емкость МДП-структуры существенно превышала емкость диэлектрика, что обычно не наблюдается для стандартных структур. Такое превышение емкости объясняется участием нанокластеров кремния в диэлектрике в обмене зарядом с подложкой. При перезарядке нанокластеров переменный ток увеличивается, что и дает дополнительный сигнал в дифференциальную емкость [13]. Темп перезарядки определяется вероятностью обмена носителями заряда и зависит оттого, успевают ли носители заряда переместиться на состояния в диэлектрике при частоте измерения в эксперименте. С повышением частоты измерения эта избыточная емкость может уменьшаться, что и наблюдалось в эксперименте для трехслойных пленок SiO_x .

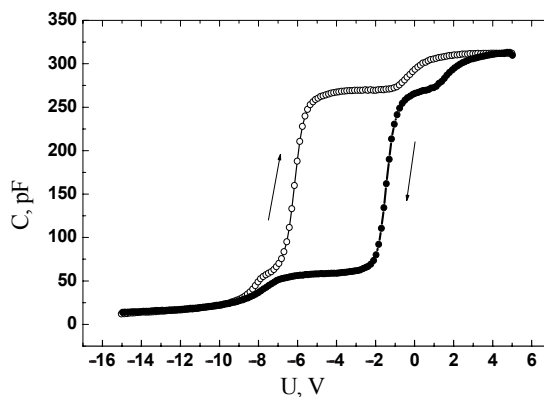


Рис. 14. Вольт-фарадная характеристика МДП-структур с нанокристаллическими включениями кремния в пленке нитрида

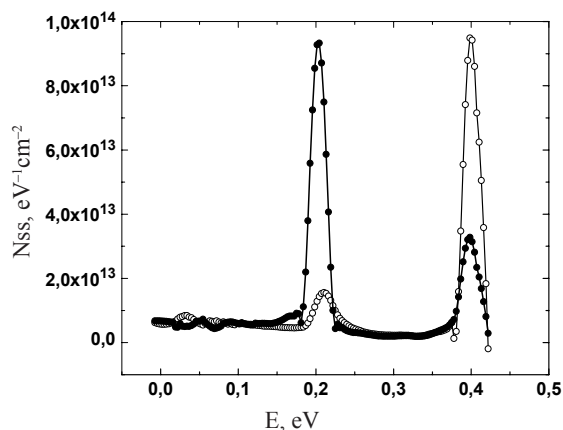


Рис. 15. Плотность состояний, рассчитанная по вольт-фарадным характеристикам

Потенциальные приборные применения

В настоящее время ведутся работы по созданию упорядоченных массивов нанокристаллических включений в диэлектрике с целью их дальнейшего научного изучения и реализации приборных воплощений. Активные матрицы на основе структур поликремния на стекле уже созданы и эффективно используются при создании экранов новых поколений. Ведутся научно-изыскательские работы и разработки для получения элементов памяти с нанокристаллами, тонкопленочных слаботочных транзисторов, «одноэлектронных» транзисторов. Идет поиск схемотехнических решений управления силовыми приборами на основе маломощных транзисторов в матричном исполнении, что актуально для создания плоских устройств отображения информации, матричных сенсоров видимого и рентгеновского излучения и др.

Список литературы

1. Бардаханов С. П. Радиация и наноструктуры / Наука в Сибири. № 5. 2006.
2. Arzhannikova S. A., Efremov M. D., Kamaev G. N. et al. Laser assisted formation on nanocrystals in plasma-chemical deposited SiN_x films // Solid State Phenomena. 2005. Vol. 108–109. P. 53–58.
3. Качурин Г. А., Тетельбаум Д. И., Марин Д. В. и др. Формирование кремниевых нанокристаллов в слоях SiO₂ при имплантации ионов Si с промежуточными отжигами // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 5. С. 582–586.
4. Ефремов М. Д., Марин Д. В., Аржанникова С. А. и др. Видимая фотолюминесценция нанопорошков кремния, созданных испарением кремния мощным электронным пучком // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80, вып. 8. С. 619–622.
5. Терехов В. А., Иванов М. Г., Ефремов М. Д. и др. Структура и оптические свойства нанопорошков кремния. Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сб. тр. V Международ. конф. СПб., 2006. С. 222–223.
6. Аржанникова С. А., Володин В. А., Ефремов М. Д. и др. Особенности электропроводности легированных пленок α-Si:H с нанокристаллами кремния // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 4. С. 472–478.
7. Burdov V. A. Dependence of the Optical Gap of Si Quantum Dots on the Dot Size // Semiconductors. 2002. Vol. 36. No. 10. P. 1154.
8. Ефремов М. Д., Болотов В. В., Володин В. А. и др. Образование нанокристаллов кремния с выделенной ориентацией (110) в аморфных пленках Si:H на стеклянных подложках при наносекундных воздействиях ультрафиолетового излучения // ФТП. 2002. Т. 36, вып. 1. С. 109–116.
9. Efremov M. D., Volodin V. A., Bolotov V. V. et al. Eximer laser and RTA stimulation of solid phase nucleation and crystallization in amorphous silicon films on glass substrates // J. Phys.: Cond. Mat. 8. 1996. P. 273–286.
10. Efremov M. D., Kamaev G. N., Volodin V. A. et al. Coulomb blockade in silicon nanocrystals embedded in SiO₂ matrix // Solid State Phenomena. 2003. Vol. 95–96. P. 629–634.
11. Averin D. V., Korotkov A. N., Likharev K. K. Theory of single-electron charging of quantum well and dots // Phys. Rev. B. 1991. Vol. 44. No. 12. P. 6199–6211.
12. Аржанникова С. А., Ефремов М. Д., Володин В. А. и др. Наблюдение перезарядки кремниевых кластеров в нитриде кремния, полученном методом PCVD. Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сб. тр. V Международ. конф. СПб., 2006. С. 255–256.
13. Arzhannikova S. A., Efremov M. D., Kamaev G. N. et al. Laser assisted formation on nanocrystals in plasma-chemical deposited SiN_x films // Solid State Phenomena. 2005. Vol. 108–109. P. 53–58.

Материал поступил в редколлегию 17.05.2007