

ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ – МАТЕРИАЛ С НОВЫМИ СВОЙСТВАМИ

С. П. ЗИМИН

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

POROUS SILICON – MATERIAL WITH NEW PROPERTIES

S. P. ZIMIN

Formation of porous silicon layers with the pores of different sizes by the anodic electrochemical treatment method is considered. It is shown that material properties can vary depending on the porosity values. The fields of application of porous structures in advanced technology are discussed.

Рассмотрено формирование слоев пористого кремния с порами различных размеров методом анодной электрохимической обработки. Показано, что свойства материала могут изменяться в широких пределах в зависимости от величины пористости. Обсуждаются области применения пористых структур в технике.

journal.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Пористый кремний является перспективным материалом микро-, нано- и оптоэлектроники. Его свойства на протяжении последнего десятилетия активно исследуются более чем в 40 странах мира, а объем научных публикаций достигает 500 статей в год. На крупных международных конференциях обсуждаются и уникальные свойства этого материала, и возможности его применения в приборах различного назначения.

МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ И ЕГО “БРАТЬЯ”

Широкое использование монокристаллов кремния в устройствах электроники стало настолько привычным, что мало кто из школьников задается вопросом, почему именно кремнию из всех полупроводников отдается предпочтение при создании электронных приборов. Ведущее положение кремния связано с широким набором положительных свойств, многих из которых нет у других полупроводниковых материалов. Кремний как химический элемент широко распространен в природе, и его содержание в земной коре составляет 29,5%. Он технологичен, инертен в обычных условиях, выдерживает высокие температуры, сопровождающие процесс изготовления приборов и интегральных схем. Для создания диэлектрических слоев нет необходимости специально искать диэлектрические материалы – собственный окисел SiO_2 , формируемый на кремнии при высоких температурах в окислительной среде, прекрасно выполняет изолирующие и маскирующие функции. В кристаллической решетке атомы кремния занимают только 25% объема, в результате чего материал имеет малую плотность (2,32 г/см³, для Ge 5,35 г/см³) и допускает сильное легирование элементами III и V групп. Каждый введенный в кристалл кремния атом III или V группы добавляет один носитель заряда с положительным знаком (дырку) или один электрон соответственно. Концентрация носителей заряда в результате этого может изменяться в широких

пределах – от 10^{10} до 10^{21} см^{-3} . Высокие значения коэффициентов диффузии легирующих элементов в кремнии позволяют формировать локальные области микронных и субмикронных размеров с дырочным (*p*-Si) или электронным (*n*-Si) типом проводимости, совокупность которых и составляет основу любой интегральной схемы или полупроводникового прибора. Производство кремниевых монокристаллов превышает 3000 тонн в год.

Однако монокристаллический кремний имеет и недостатки. Один из них связан с относительно невысокой подвижностью носителей заряда (для электронов $1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, дырок $600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), что ограничивает быстродействие приборов. Для этих целей применяют другой полупроводник – арсенид галлия GaAs, у которого подвижность электронов при комнатной температуре $8500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а при температуре кипения жидкого азота (77 К) $250\,000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Результатом этого стало появление нового технологического направления, получившего название арсенид-галлиевой микроэлектроники. Другой недостаток монокристаллического кремния заключается в том, что его нельзя использовать для создания светоизлучающих приборов. Светоизлучающие структуры широкого спектрального диапазона изготавливают на основе других полупроводников (GaAs, GaP, GaN, ZnS, ZnSe и др.), однако решение этой задачи в перспективе все же возможно в рамках кремниевой технологии. В настоящее время существуют два подхода к этой проблеме. Один из них состоит в легировании кремния редкоземельными элементами (Er, Eu, Gd), в результате чего такой модифицированный кремний обладает излучающими свойствами в инфракрасном диапазоне. Другой подход заключается в формировании на поверхности или в объеме диэлектрических материалов (например, SiO_2) кремниевых кристаллов нанометровых размеров ($1 \text{ нм} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$). Способы получения наноструктурированных материалов уже рассматривались на страницах “Соросовского Образовательного Журнала” [3]. Среди таких технологических приемов наиболее доступным и дешевым является создание нанокристаллов посредством вытравливания в монокристаллах кремния мельчайших пустот, в результате чего оставшиеся области кремния могут иметь размеры в несколько нанометров. Монокристаллический кремний, пронизанный сетью пор (пустот), получил название пористого кремния. Такой материал, как будет показано ниже, не только обладает светоизлучающими, но и другими уникальными свойствами.

На рис. 1 видно, что кремний существует в нескольких структурных модификациях. Все эти материалы имеют различные физические свойства, разные области применения, хорошо совместимы и, взаимно дополняя друг друга, обеспечивают широкие возмож-



Рис. 1. Семейство кремния и области применения материалов

ности кремниевой технологии. Каждый из семейства кремниевых “братьев” достоин отдельного рассмотрения, однако перейдем к описанию самого загадочного из них – кремния с пористой структурой.

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Пористый кремний получается при анодной электрохимической обработке монокристаллического кремния в растворах на основе плавиковой кислоты HF. Кремниевая пластина в таких экспериментах (рис. 2) является анодом, а катодом служит платиновый электрод. Впервые пористый кремний был получен в середине 1950-х годов [1, 2] в ходе исследований процесса электрохимической полировки поверхности кремния в водных растворах HF. Такая операция необходима для придания рабочей поверхности идеально гладкого, зеркального состояния. В ходе травления было обнаружено, что при определенных режимах (низкой плотности анодного тока и высокой концентрации HF в электролите) вместо процесса электрополировки наблюдалось образование окрашенных пленок на поверхности кремния. Было установлено, что цветные слои имеют в своем объеме сеть мельчайших пор. Формирование пор начинается на поверхности пластины, с течением времени анодной обработки концы пор все дальше продвигаются в глубь кристалла. В результате этого толщина пленок пористого кремния в зависимости от времени травления может изменяться от нескольких микрон ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$) до сотен микрон.

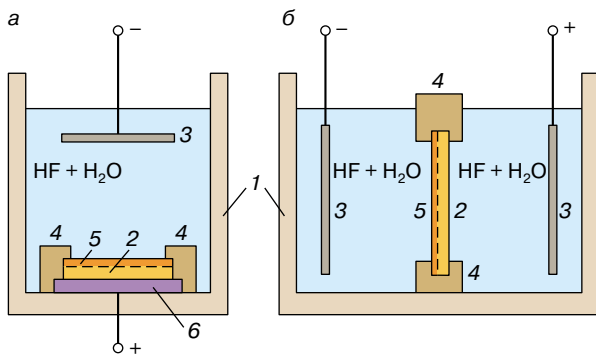


Рис. 2. Электролитические ячейки для формирования слоев пористого кремния: а – ячейка вертикального типа, б – двухкамерная ячейка с жидкостным контактом к Si. 1 – фторопластовая ванна, 2 – кремниевая пластина, 3 – платиновый электрод, 4 – уплотнители, 5 – слой пористого кремния, 6 – металлический электрод

Пленки пористого кремния длительное время считали лишь лабораторным курьезом и детально не изучали. И все же этот материал привлекал внимание исследователей, поскольку механизм его формирования был совершенно непонятен. Действительно, почему одни микрообласти на поверхности Si-анода растворяются, а другие остаются нетронутыми? Почему фронт травления движется равномерно в глубину пластины, при этом поры не обгоняют друг друга?

Модельные представления о механизме порообразования начали формироваться с середины 1960-х годов, но единая точка зрения пока так и не выработана. Обобщая различные модели, можно отметить следующее. Поверхность Si при контакте с водными растворами HF насыщается водородом и становится химически инертной по отношению к электролиту. Если на электроды подать разность потенциалов, то дырки в кремниевой пластине начинают мигрировать к поверхности раздела кремний–электролит. При этом атомы Si освобождаются от блокирующего их водорода, начинают взаимодействовать с ионами и молекулами электролита и переходят в раствор. Если электролиз проводят при высокой плотности тока, то к поверхности электрода поступает большое количество дырок. Они движутся к границе раздела сплошным фронтом и обеспечивают реакцию практически каждому атому Si. Поскольку микровыступы имеют большую поверхность, чем ровные участки, то они растворяются быстрее. Таким образом, поверхность кремниевого анода постепенно выравнивается. Это и есть режим электрохимической полировки.

Если же электролиз проводить при низкой плотности тока, то количества дырок не хватает для организации сплошного фронта и поэтому происходит локаль-

ное растворение кремния на поверхности. Согласно различным моделям, зарождение пор может начинаться на микроуглублениях, дефектах структуры, механически напряженных участках или локальных возмущениях потенциального поля поверхности. С течением времени появившиеся поры продолжают свой рост в глубину электрода за счет дрейфа дырок к кончикам пор, где напряженность электрического поля выше.

Очевидно, что в кремнии *n*- и *p*-типа количество дырок различно и поэтому процессы порообразования в *n*-Si и *p*-Si имеют свои особенности. В *p*-Si дырки являются основными носителями заряда и их концентрация составляет 10^{14} – 10^{18} см⁻³. В этом случае, как правило, формируются поры нанометровых размеров. Тонкая высокопористая структура типа губки показана на рис. 3, а. В *n*-Si, где основными носителями заряда являются электроны, концентрация дырок крайне мала (10^2 – 10^6 см⁻³). Необходимое минимальное количество дырок можно получить за счет фотогенерации (при подсветке Si-электрода) или за счет лавинной генерации (при анодировании в области высоких напряжений). Полученная структура пор существенно отличается от предыдущей и характеризуется наличием пор

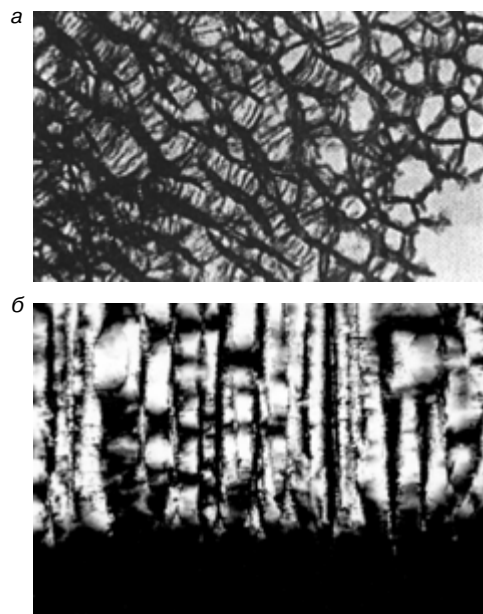


Рис. 3. а – изображение структуры пористого кремния на *p*-Si, полученное на просвечивающем электронном микроскопе. Размеры пор составляют около 50 нм, а кремниевые нити (темные области) имеют диаметр менее 10 нм (фотография A. G. Cullis из работы [7]); б – электронно-микроскопический снимок структуры макропористого кремния на *n*-Si. Размеры пор составляют 0,7–1,0 мкм. Темная область внизу – монокристаллический кремний

достаточно большого диаметра (рис. 3, б). На рис. 3, а, б представлены два предельных случая в ряду получаемых пористых структур. Изменяя условия анодирования, можно получать пористый кремний с различной морфологией (геометрией) пор. На поперечный размер R пор влияют плотность тока анодирования, время, дополнительная подсветка, состав электролита, уровень и вид легирования кремния и т.д., в результате чего этот размер может меняться от 10 мкм до 1 нм. По существующей классификации пористый кремний подразделяется на микропористый ($R < 2$ нм), мезопористый (2 нм $< R < 50$ нм) и макропористый ($R > 50$ нм).

Основным параметром любого пористого материала является показатель пористости P . Он определяет, какая доля объема материала занята порами. Для пористого кремния значения пористости могут находиться в необычайно широком интервале от 5 до 95%(!). Когда объем, занимаемый порами, невелик (5%), свойства такого материала близки к свойствам кристаллического кремния. При высоких показателях пористости картина существенно изменяется и такой пористый кремний проявляет новые свойства, многие из которых являются уникальными. В заключение сказанного необходимо отметить, что пористая структура кремния может быть получена и другими способами, например при лазерном распылении кремния и его осаждении на расположенную рядом подложку (метод лазерной абляции).

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Когда специалисты применяют термин “пористый кремний”, то обязательно имеют в виду, что речь идет о материале не с фиксированными параметрами, а с изменяющимися разнообразными свойствами, зависящими от показателя пористости и морфологии пор. Известно, что поры принимают самые причудливые формы и могут иметь вид кактуса с отростками, зигзагообразного колодца, корневой системы дерева, цилиндрических колонн и т.д. Поэтому многообразие морфологии пор пористого кремния неизбежно приводит к многообразию оптических, электрических, механических характеристик материала. Кроме этого необходимо иметь в виду, что стенки пор покрыты продуктами электрохимических реакций и адсорбированными атомами, химический состав которых заметно влияет на свойства пористого кремния.

Характерной чертой пористого кремния является большая суммарная площадь его внутренней поверхности. В зависимости от величины пористости и геометрии пор она может составлять для макропористого кремния от 10 до 100 м²/см³, для мезопористого от 100 до 300 м²/см³ и для микропористого от 300 до 800 м²/см³. Для того чтобы наглядно представить себе последнюю

цифру, попробуем мысленно развернуть 1 см³ такого материала. В результате нашего эксперимента мы закроем площадь больше футбольного поля! Для сравнения следует отметить, что удельная поверхность монокристаллического кремния составляет всего 0,1–0,3 м²/см³. Наличие развитой химически активной поверхности определило первые области практического применения пористого кремния в микроэлектронике, две из которых мы рассмотрим ниже.

Для создания кремниевых приборов, работающих при высоких напряжениях, возникла необходимость в толстых диэлектрических слоях толщиной более 10 мкм. Известно, что диэлектрические пленки SiO₂, получаемые методом термического окисления кремния, не могут быть толще нескольких микрон. Для создания толстых диэлектрических пленок во второй половине 1970-х годов было предложено использовать слои пористого кремния. Если такой материал подвергнуть операции термического окисления, то за счет развитой системы пор молекулы кислорода способны проникнуть на всю толщину пористого кремния и привести к полному его окислению. Показано, что оптимальными для этих целей являются слои с пористостью около 50%. Это связано с необходимостью минимизации механических напряжений, возникающих при окислении, так как при этом происходит увеличение объема твердой фазы приблизительно на 56%, которое компенсируется за счет пространства пор. Важно отметить, что процесс формирования диэлектрических пленок с использованием пористых слоев происходит при температурах более низких, чем при традиционном термическом окислении кремния.

К середине 1970-х годов возникла необходимость решения и другой задачи. Плотность упаковки интегральных схем увеличилась настолько, что активные элементы стали очень близко располагаться один к другому. Для исключения токов утечки между ними через кремниевую подложку была предложена структура “кремний на изоляторе” (КНИ). КНИ-структура представляет собой основу из диэлектрического материала с выращенным монокристаллическим слоем кремния. В этом случае элементы интегральных схем формируются в объеме слоя, после чего выполняется операция локального окисления по их периметру и каждый элемент становится изолированным от своих соседей. В качестве изолирующей основы КНИ-структур уже в первых экспериментах хорошо зарекомендовал себя окисленный пористый кремний. Последовательность технологических операций включала в себя формирование пористого кремния, выращивание на его поверхности слоя монокремния с последующим прокислением пористого материала.

Дальнейшие исследования показали, что пористый кремний служит хорошей основой не только для выращивания монокристаллических пленок кремния. Низкопористые слои ($P < 30\%$) оказались эффективными в качестве буферного слоя при выращивании (эпитаксии) монокристаллических пленок других полупроводников на кремнии. Одним из основных условий проведения процесса эпитаксии является условие близости величин постоянных решеток кремния и наносимого материала. Однако для многих полупроводниковых материалов и кремния этот критерий не выполняется, в результате чего на поверхности растут пленки с плохими структурными характеристиками. Использование промежуточных слоев пористого кремния позволило решить задачу выращивания качественных пленок полупроводников GaAs, PbS, PbTe и других с большим рассогласованием параметров кристаллических решеток.

“Соросовский Образовательный Журнал” неоднократно рассказывал об основах нанoeлектроники — науки о способах создания и свойствах активных элементов с размерами от единиц до десятков нанометров [3–5]. Читатель уже знает, что в пористом кремнии в ходе электрохимического травления возможно формирование кремниевых элементов 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. Возможности технологии анодного травления позволяют получать квантовые точки, квантовые нити, элементы с различной фрактальной размерностью. Поэтому пористый кремний с $P > 50\%$ следует рассматривать как один из материалов нанoeлектроники. Более того, перспективным может оказаться заполнение пор другими химическими соединениями, что даст возможность формировать дополнительные низкоразмерные элементы в объеме пористого кремния. Первые эксперименты в этом направлении уже начаты в ведущих научных лабораториях мира.

Необычайный интерес исследователей к пористому кремнию вызвало обнаруженное в 1990 г. Л. Кэнхэмом (L. Canham) излучение света пористым материалом ($P > 50\%$) при комнатной температуре в видимой области спектра при облучении лазером [6]. Мы уже говорили о том, что монокристаллический кремний не может быть использован для создания светоизлучающих устройств, так как его излучательная способность ничтожно мала (менее 0,001%). Открытие Кэнхэмом интенсивной фотолюминесценции с эффективностью 5% дало возможность приступить к разработке кремниевых приборов, испускающих свет в широком спек-

тральном диапазоне. Исследования показали, что длиной волны λ , определяющей цвет излучения, можно управлять изменяя условия анодирования. Оказалось возможным получать красный, зеленый и синий цвета, необходимые для изготовления цветных дисплеев. Вслед за этим открытием в начале 1990-х годов были созданы первые электролюминесцентные ячейки на основе пористого кремния, которые излучали свет в многослойной структуре прозрачный электрод — пористый кремний — монокристаллический кремний — металл при протекании тока.

Эффективность первых электролюминесцентных приборов была невелика ($10^{-5}\%$), фотолюминесцентные и электролюминесцентные структуры быстро деградировали. В настоящее время удалось выяснить причины старения светоизлучающего пористого кремния и наметить пути создания стабильных во времени структур. Явление фотолюминесценции эффективно поддерживается при введении в объем атомов углерода или железа, а современные электролюминесцентные приборы имеют срок службы несколько лет при квантовой эффективности порядка $10^{-1}\%$. Прогнозы, сделанные авторами [7], говорят, что в будущем реально поднять квантовую эффективность электролюминесцентных ячеек до 10%.

Пористый кремний в зависимости от условий травления обладает широким интервалом величин удельного сопротивления ($10^{-2}–10^{11}$ Ом · см), диэлектрической проницаемости (1,75–12) и показателя преломления (1,2–3,5). Это означает, что пористый кремний может быть использован как в качестве полупроводниковых, так и диэлектрических слоев в приборах и интегральных схемах. Оказалось, что в рамках одного процесса травления варьированием режимов (плотностью тока анодирования, освещенностью) можно получать многослойные структуры, когда каждый слой обладает заданной пористостью и геометрией пор. Такая технология содержит в себе большие потенциальные возможности для разработки различных устройств. Наглядным примером использования многослойных пористых структур является создание световодных элементов. Назначение световодов заключается в передаче светового луча без потерь энергии, в том числе и по криволинейным трассам.

Для целей интегральной оптики применяются планарные световоды, представляющие собой пленочную структуру, в которой свет распространяется в слое с высоким показателем преломления, ограниченном с двух сторон слоями с меньшим показателем преломления. Для пористого кремния этот показатель зависит от пористости (чем больше пористость, тем меньше показатель преломления), и поэтому формирование многослойных структур с разной пористостью позволяет

получать на их основе волноводные элементы с низким уровнем потерь. Потери на поглощение можно дополнительно уменьшить окислением слоев пористого кремния.

Другим примером использования многослойных пористых структур является их применение в качестве интерференционных фильтров в оптике для инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой области спектра. Интерференционный фильтр Фабри–Перо на основе пористого кремния представляет собой семислойную структуру, в которой между толщиной слоев пористого кремния и их коэффициентами преломления существует определенная взаимосвязь. Применение таких фильтров позволяет при прохождении света выделить из него узкий интервал длин волн $\Delta\lambda = 10$ нм. Кроме этого пористый кремний обладает низкой теплопроводностью (на два–четыре порядка меньше, чем у монокремния), что дает возможность использовать его в качестве теплоизоляционного слоя в устройствах кремниевой электроники.

Большие перспективы пористый кремний имеет для создания датчиков влажности, газовых, химических и биологических сенсоров. Принцип действия таких датчиков основан на влиянии внешних молекул на электронное состояние поверхности. В случае пористого кремния за счет высокой удельной поверхности это влияние становится более эффективным и сенсоры обладают высокой чувствительностью. Обычно такие датчики фиксируют изменение емкостных, проводящих, люминесцентных свойств пористого кремния при наличии в контролируемой среде заданных молекул и химических соединений. Интересным представляется применение пористого кремния в качестве рабочего элемента биохимических и биологических сенсоров. Это стало особенно актуальным после того, как было показано, что пористый кремний является биосовместимым материалом [8]. Биоматериалы по своим свойствам подразделяются на биоинертные, биоактивные и биорезорбируемые. Биоинертные материалы (титан) испытывают минимальные изменения в окружающей ткани, биоактивные материалы (bioglass) подвергаются определенным изменениям в живом организме, а биорезорбируемые материалы обладают способностью рассасывания в тканях с регулируемой скоростью. Оказалось, что в зависимости от величины пористости пористый кремний может быть отнесен к любому из этих классов, что открывает большие перспективы в создании биомедицинских приборов.

Новым этапом в исследовании и применении пористого кремния стало создание регулярных пористых матриц – кремниевых кристаллов, в которых в определенном порядке сформированы глубокие (до 500 мкм) поры с поперечным размером до 20 мкм (рис. 4). Как

формируются такие структуры? На первом этапе на поверхности кремниевой пластины *n*-типа создается пленка SiO_2 , в которой методом фотолитографии формируется сетка правильных отверстий (окон). Далее в окнах создаются ямки травления в виде перевернутых пирамид. После этого проводится уже знакомое нам электрохимическое травление при дополнительной подсветке с тыльной стороны.

Такие структуры можно использовать в различных областях, в частности для создания интегральных конденсаторов и фотонных кристаллов. Фотонные кристаллы, разрабатываемые для применения в системах телекоммуникации и лазерных технологиях, представляют собой двумерные структуры с периодически изменяющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью. Эти структуры имеют частотную щель, позволяющую с высокой точностью контролировать частоту распространяющейся электромагнитной волны в зависимости от направления волнового вектора. Пространственно модулированная макропористая структура подпадает под приведенное определение фотонного кристалла. В настоящее время на основе макропористых периодических структур созданы фотонные кристаллы для ближней инфракрасной области спектра с $\lambda = 4,9$ мкм.

О свойствах и применении пористого кремния можно говорить достаточно много, однако читатель на основании рис. 5 может представить себе возможности материала. Достаточно, например, заметить, что на базе пористого кремния могут быть созданы светоизлучающие диоды, фотоприемники и световоды, которые в одной твердотельной схеме могут быть объединены в единый комплекс излучатель – оптическая среда

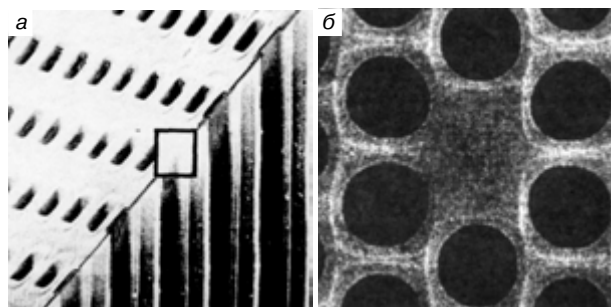


Рис. 4. а – регулярная макропористая структура, используемая для создания интегральных конденсаторов. Выполнен срез образца под углом 45°. Размер прямоугольной рамки в центре – 2 × 3,5 мкм (фотография взята из статьи V. Lehmann в [8]; б – элемент макропористой матрицы фотонного кристалла. Расстояние между порами 1,5 мкм (снимок из работы: Muller F. et al. // Materials of the International Conference “Porous Semiconductors – Science and Technology”, Spain, 1998. P. 118)



Рис. 5. Основные области применения пористого кремния

передачи информации – приемник. Легкость управления свойствами пористого материала, совместимость с технологическими операциями кремниевой микроэлектроники позволяют надеяться на разработку и других электронных и оптических приборов на основе слоев с низкой, средней, высокой пористостью и макропористых регулярных структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный краткий обзор подтверждает одну из тенденций развития современной твердотельной электроники: для решения многих практических задач нет необходимости использовать идеальные, бездефектные, сверхчистые монокристаллы. Здесь на помощь могут прийти дешевые материалы с управляемой структурой, примером чего являются пористый кремний и другие пористые полупроводниковые материалы (GaAs, SiC, SiGe, GaP, InP).

В последнее время были предложены новые области применения пористого кремния: создание акустических излучателей широкого диапазона, использование пористых слоев для отделения и перенесения монокристаллических кремниевых пленок на другие подложки и т.д. Это свидетельствует о том, что наука о пористом кремнии продолжает активно развиваться. Читателю, заинтересовавшемуся пористым кремнием, мы предлагаем дополнительно познакомиться с публикациями из списка “Рекомендуемая литература”.

Автор признателен Э.Ю. Бучину за ценные замечания при чтении рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uhlir A. Electropolishing of silicon // Bell Syst. Tech. J. 1956. Vol. 35. P. 333–338.
2. Turner D. Electropolishing silicon in hydrofluoric acid solutions // J. Electrochem. Soc. 1958. Vol. 5. P. 402–405.
3. Демиховский В.Я. Квантовые ямы, нити, точки: Что это такое? // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 80–86.
4. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника – основа информационных систем XXI века // Там же. С. 100–104.
5. Белявский В.И. Физические основы полупроводниковой нанотехнологии // Там же. 1998. № 10. С. 92–98.
6. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 57. P. 1046–1048.
7. Collins R.T., Fauchet P.M., Tischler M.A. Porous silicon: From luminescence to LEDs // Phys. Today. 1997. Vol. 50. P. 24–31.
8. Properties of Porous Silicon / Ed. L. Canham. DERA: Malvern, UK, 1997. 405 p.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Балагуров Л.А. Пористый кремний: Получение, свойства, возможные применения // Материаловедение. 1998. Вып. 1. С. 50–56; Вып. 3. С. 23–45.
- Каишкаргов П.К. Необычные свойства пористого кремния // Соросовский Образовательный Журнал. 2001. № 1. С. 102–107.

Рецензент статьи С.Н. Козлов

* * *

Сергей Павлович Зимин, доктор физико-математических наук, доцент кафедры микроэлектроники Ярославского государственного университета, действительный член Нью-Йоркской академии наук. Область научных интересов – физика полупроводников, полупроводниковое и пленочное материаловедение. Автор более 160 работ и четырех патентов на изобретения.