

УДК621.38

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНОГО КРЕМНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Ковалевич В.С.

Научный руководитель - старший преподаватель Германович Е.И.

Основными химическими элементами для создания изделий микроэлектроники являются германий и кремний. Кремний, по сравнению с германием, является идеальным материалом для микроэлектронного производства благодаря большому проценту его содержания в земной коре и уникальным технологическим свойствам. На этом материале легко создается диэлектрический слой двуокиси кремния путем обычного термического окисления. Толщина диэлектрика обычно находится в пределах 0,3 – 1,5 микрона, но такого слоя достаточно для защиты кремния от диффузии примесей и хорошей диэлектрической изоляции p – n переходов.

В кристаллической решетке атомы кремния занимают только 25% объема, в результате чего материал имеет малую плотность (2,32 г/см<sup>3</sup>, для германия – 5,35 г/см<sup>3</sup>) 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<sup>10</sup> до 10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>. 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.

Однако монокристаллический кремний имеет и недостатки. Один из них связан с относительно невысокой подвижностью носителей заряда (для электронов – 1500 см<sup>2</sup>/(В·с), дырок – 600 см<sup>2</sup>/(В·с), что ограничивает быстродействие приборов. Другой недостаток монокристаллического кремния заключается в том, что его нельзя использовать для создания светоизлучающих приборов.

Существуют два подхода в решении данной проблемы. 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<sub>2</sub>) кремниевых кристаллов нанометровых размеров (1 нм = 10<sup>-9</sup> м). Среди подобных 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 (ПК). Пористый кремний является низкоразмерным. В пористом кремнии в ходе электрохимического травления можно получать квантовые точки, квантовые нити, элементы с различной фрактальной размерностью. Поэтому пористый кремний с пористостью  $\Pi > 50\%$  следует рассматривать как один из материалов нанoeлектроники.

Характерной особенностью 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 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>, для мезопористого – от 100 до 300 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup> и для микропористого – от 300 до 800 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>.

Низкоразмерный кремний в зависимости от условий травления обладает широким интервалом величин удельного сопротивления 10<sup>-2</sup> – 10<sup>11</sup> Ом·см. С электрической точки зрения материал с пористостью более 50% полностью обеднен носителями заряда.

Наиболее удивительным свойством пористого кремния является его способность эффективно люминесцировать в видимой области спектра.

Уже в первых опытах выяснилось, что эффективно люминесцируют образцы пористого кремния, в которых пористость превышает 50 %. Эффективность фотолюминесценции может достигать десятков процентов. Длиной волны излучения можно управлять, изменяя условия анодирования. Оказалось, возможным получать красный, зеленый и синий цвета, необходимые для изготовления цветных дисплеев.

#### Формирование низкоразмерного кремния

Низкоразмерный кремний, как указывалось выше, представляет собой монокристаллический кремний, пронизанный сетью каналов с размерами от единиц микрон до единиц нанометров. Формирование таких каналов в кремнии осуществляют анодной обработкой пластины монокристаллического кремния в электролитах на основе плавиковой кислоты. На Рисунок 1 представлена упрощенная схема процесса анодизации.

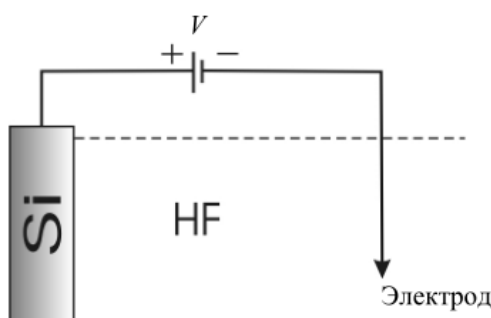


Рисунок 1. Упрощенная схема процесса анодизации

В кремнии, легированном донорными примесями, дырки являются неосновными носителями и их концентрация мала, поэтому для протекания анодной электрохимической реакции необходимы не только ионы фтора, но и внешний фактор, стимулирующий генерацию дырок. На рис. 2 показано распределение зарядов на кремниевом аноде n-типа проводимости, помещённом в электролит, содержащем плавиковую кислоту.

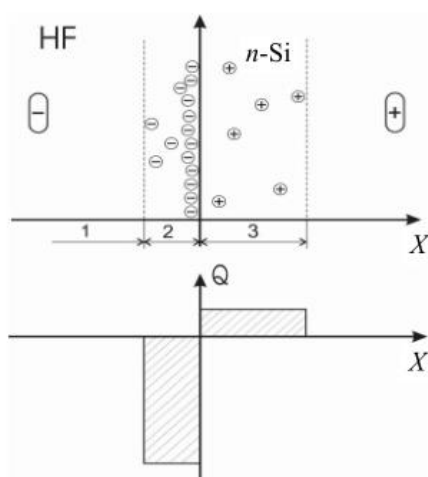


Рисунок 2. Распределение зарядов на границе монокристалла кремния и электролита:  
1 – электролит; 2 – слой Гуи – Гельмгольца; 3 – кремний n-типа проводимости

#### Применение низкоразмерного кремния

В приповерхностном слое кремния образуется обедненная область с положительным объемным зарядом, а в электролите на границе раздела – тонкий слой из отрицательно заряженных ионов.

Толщина обедненного слоя в полупроводнике и соответствующий потенциальный барьер определяются степенью легирования кремния. Без дополнительной генерации или инжекции дырок анодная реакция происходить не будет. Концентрацию дырок в приповерхностном слое кремния с электронным типом проводимости можно увеличить несколькими способами:

- нагреванием;
- воздействием электромагнитного излучения;
- ударной ионизацией при электрическом пробое приповерхностной области пространственного заряда в кремнии.

В кремнии, легированном акцепторными примесями, дырки являются основными носителями, и их концентрация в практически важных случаях оказывается достаточной для протекания реакции. Поэтому для кремния р-типа проводимости основное влияние на протекание анодных реакций будет оказывать процесс доставки ионов фтора.

Процесс формирования каналов в кремнии р-типа может идти и без внешних воздействий (нагревание, воздействие электромагнитного излучения, ударная ионизация при электрическом пробое приповерхностной области пространственного заряда).

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  $\Pi > 50\%$  следует рассматривать как один из материалов нанoeлектроники.

Необычайный интерес исследователей к пористому кремнию вызвало обнаруженное в 1990 г. Л. Кэнхэмом (L.Canham) излучение света пористым материалом ( $\Pi > 50\%$ ) при комнатной температуре в видимой области спектра при облучении лазером. Как уже было сказано 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 спектральном диапазоне. Исследования показали, что длиной волны  $\lambda$ , определяющей цвет излучения, можно управлять, изменяя условия анодирования. Оказалось, возможным получать красный, зеленый и синий цвета, необходимые для изготовления цветных дисплеев.

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 1–10 %. 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.

Ключевое место оптоэлектроники в информационных системах обусловлено тем, что более 90 % информации, которую получает человек, составляет видеоинформация. В связи с широким кругом применений в системах получения информации, ее обработки, хранения, передачи и отображения, а также разнообразием используемых материалов правомочной

является постановка вопроса о целой серии оптоэлектронных технологий, включая индикаторные системы, формирователи сигналов изображения, волоконно-оптические линии передачи информации, преобразователи солнечной энергии, оптическую вычислительную технику.

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), 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.

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. 3). На первом этапе на поверхности кремниевой пластины n-типа создается пленка  $\text{SiO}_2$ , 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.

Устройства, изготовленные на основе низкоразмерного кремния: фотодетекторы, световоды, антиотражающие покрытия солнечных элементов, светоизлучающие структуры, геттер нежелательных примесей из кремния, фотоприемники, солнечные батареи, элементы кремниевой микромеханики, толстые диэлектрические слои, теплозащитные пленки, сверхчувствительные сенсоры, интегральные конденсаторы, буферные слои для металлизации, буферные слои для эпитаксии, биологические имплантаты, интерференционные фильтры, катоды вакуумной микроэлектроники, фотонные кристаллы.

#### Литература

1. Шелованова, Г.Н. Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники: курс лекций / Г.Н. Шелованова; ИПК СФУ. – Красноярск, 2009. – 220 с.
2. Интернет ресурсы: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/1159.html>