

СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ НА БАЗЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Махаринец А.В.

Научный руководитель – профессор Светличный А.М.

Южный федеральный университет, Технологический институт в г. Таганроге

Всего лишь несколько лет назад карбид кремния стал рассматриваться в качестве материала для приборов силовой электроники, что стало возможным благодаря развитию технологии выращивания кристаллов требуемого размера в необходимых количествах. На сегодняшний день всего лишь две компании производят коммерчески доступные изделия из карбида кремния - диоды с барьером Шоттки (ДШ) в диапазоне рабочих напряжений 300...1200В и токов 1...20А на кристалл.

Выдающиеся динамические характеристики, высокая рабочая температура и сверхнизкие потери проводимости полупроводников из карбида кремния выводят развитие элементной базы для силовой электроники на новый этап.

Для максимального использования температурных характеристик SiC прежде всего требуется решить проблему получения надежного электрического контакта. Связано это с тем, что при температуре свыше 500°C металлизация контакта сильно деградирует из-за взаимной диффузии между слоями, окисления контакта и композиционных и микроструктурных изменений на границе раздела металл-полупроводник. Это приводит к выходу прибора из строя. Вакуумирование полупроводника в специальном корпусе многократно увеличивает его стоимость, габариты и массу, делая не пригодным к широкому применению.

Карбид SiC применяется для изготовления мощных выпрямительных диодов, высокотемпературных резисторов, СВЧ-диодов и других приборов, способных работать в агрессивных средах. На основе порошка SiC по керамической технологии изготавливают варисторы, высокотемпературные нагреватели, покрытия графитовых деталей в рабочих камерах обработки кремния. Такое покрытие выполняет двойную задачу: исключает загрязнение Si углеродом и повышает срок службы графитовых деталей при высокой температуре.

Автоэмиссионные катоды (холодные эмиттеры) - это источники электронов, принцип работы которых основан на явлении автоэлектронной эмиссии, то есть на туннелировании электронов под действием приложенного электрического поля через потенциальный барьер на границе раздела "твердое тело-вакуум". Вероятность такого туннелирования определяется высотой потенциального барьера (работой выхода) и величиной приложенного электрического поля. Работа выхода определяется фундаментальными свойствами материала и для большинства материалов составляет 4-5эВ, при этом для получения достаточно больших для практических целей токов эмиссии требуются напряженности электрического поля $\sim 10^7 \text{Всм}^{-1}$.

Параметр, от которого сильно зависит автоэмиссия - напряженность электрического поля на эмиттере. Она, в свою очередь, зависит от среднего поля в приборе (отношение внешнего напряжения к величине зазора) и геометрии эмиттера, ибо для увеличения поля на эмиттере применяются, как правило, "острые" формы - выступы, нити, острия, лезвия, торцы трубок или их системы - пучки нитей, пакеты лезвий, углеродные нанотрубки и т.п. (рис. 1). Для отбора относительно больших токов используют многоострийные системы, многоэмиттерные системы на краях пленок и

фольг и т. п. В зависимости от размеров эмиттеров и расстояния до анода напряжение, обеспечивающее величину электрического поля, достаточную для возникновения автоэлектронной эмиссии, может составлять от сотен вольт до нескольких десятков киловольт.

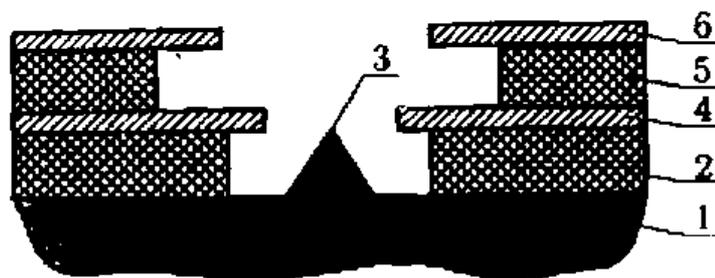


Рис. 1

Многоострийные автокатоды позволяют увеличить ток и довести его до значений, обычных для электровакуумной техники. При этом преимущество - отсутствие цепи накала и мгновенная готовность к работе - сохраняются. Требование более высокого вакуума можно считать непринципиальным, ибо технология получения вакуума все время усовершенствуется. Термокатоды допускают низковольтное или сеточное управление - размещенная над катодом сетка позволяет управлять эмиссией посредством приложения относительно малого - десятки вольт - напряжения. Этот способ управления применяется в низкочастотных электронных лампах и в некоторых СВЧ-приборах. Над многоострийным автокатодом можно расположить сетку, согласовав отверстия в ней с остриями, но напряжение на ней, необходимое для управления эмиссией, будет слишком велико. Для получения приемлемого напряжения (хотя бы в сотни вольт) зазор между вершинами острий и сеткой должен составлять единицы микрон.

Для получения высоких напряженностей электрического поля, как правило, используют микроострия с их существенными недостатками: (1) технологическими трудностями производства и (2) недостаточной стабильностью микроострий при эксплуатации (острия из традиционных металлов или кремния расплываются и химически деградируют даже в условиях высокого вакуума, что приводит к снижению их эмиссионных свойств).

Альтернативный подход – использование тонких пленок на основе углерода (среди них наилучшие результаты получены для алмазоподобных пленок и пленок из углеродных нанотрубок) – уже привел к снижению требуемой напряженности электрического поля до $\sim 10^5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ ($10 \text{ В} \cdot \text{мкм}^{-1}$).

Описание технологии формирования автоэмиссионного катода субмикронных (нано) размеров на карбиде кремния (рис. 2). Процесс газофазного химического осаждения (ГФХО) применяется при получении углеродных нанотрубок. Рассмотрим метод ГФХО с точки зрения использования для получения других наноструктур. ГФХО является процессом, в котором один или более газообразных носителей вещества адсорбируются в местах реакции или разлагаются на горячей поверхности в виде стабильно твердого продукта. Основные ступени осуществления ГФХО могут быть представлены в виде следующих процессов:

- транспортировка реактивных газообразных носителей вещества на поверхность;
- адсорбция атомов или молекул на поверхности;
- гетерогенные поверхностные реакции катализа с поверхности;
- диффузия атомов или молекул по поверхности и рост нанообъектов;

- зарождение и рост пленки;
- десорбция газообразных продуктов реакции и транспортировка их с поверхности.

Метод ГФХО является более сложным методом формирования тонких пленок, чем обычное термическое напыление. Однако метод ГФХО привлекателен тем, что появляется возможность получать высокочистые и плотные пленки или наночастицы с достаточно высокой скоростью. Становится возможным получать однородные покрытия из сложных по составу компонентов. Метод ГФХО широко используется для осаждения металлических, полупроводниковых и сверхпроводящих тонких пленок. В качестве источников активации химических реакций можно использовать термический, лазерный или плазменный нагрев. В работе [9] для нагрева реакционной смеси использовалась раскаленная нить вольфрама.

Метод ГФХО с таким нагревом применялся для выращивания одномерных нанопрутков карбида кремния SiC. Процесс выращивания сводился к следующему. Вначале на подложку SiO₂ в виде иммерсии наносится водный раствор Fe(NO₃)₃. Кремниевые и углеродные источники предварительно наносятся на пластину в виде компактированных порошков углерода, кремния и диоксида кремния. Затем камера заполняется газообразным водородом, и раскаленная вольфрамовая нить используется для реакции с водородным газом. Температура разогретого газа составляет 2570 К, тогда как подложка из SiO₂ нагревается только до 1373 К. Нагретая нить вольфрама приводит к диссоциации молекул водорода на атомы. Частицы Fe(NO₃)₃, расположенные на поверхности подложки из оксида кремния, уменьшаются в размерах за счет высокой концентрации атомов водорода в железных наночастицах, действующих как катализатор. Далее кремниевые и углеродные источники термически активируются пламенем, образованным углеводородом и монооксидными радикалами. В результате на подложке образуются нанотрубки β-SiC в виде прямых прутков диаметром 20...70 нм и длиной около 1 мкм. На верхней части нанотрубки имеются железные частицы. Нанотрубки имеют нанокристаллическую структуру и растут в направлении [100]. Наноструктуры SiC являются хорошим материалом для использования в создании новых приборов в микроэлектронике, поскольку обладают такими замечательными свойствами, как высокая термическая и химическая стабильность. Как полупроводник, карбид кремния имеет ширину запрещенной зоны ~ 3 эВ и высокую подвижность электронов. Модуль Юнга нанопрутков достигает значений 600 ГПа, что близко к теоретическим значениям, предсказанным для SiC с ориентацией [111].

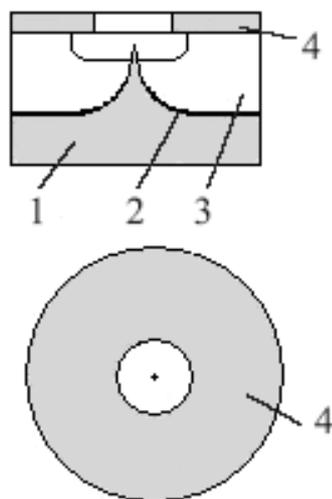


Рис. 2. 1 – подложка, 2 - графен, 3 – SiO₂, 4 – металлическая пленка