УДК 54 – 165.2; 539.21

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-43-49

Н.В. Официрова¹, В.И. Савина², М.А. Закарьяева¹

Исследование ВАХ гетероструктур SiC–(SiC)_{1-x}(AlN)_x.

¹ *Дагестанский государственный университет; Россия, 367001, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а; kalinof2002@mail.ru;*

² *Дагестанский государственный аграрный университет; Россия, 367012, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 180*

Карбид кремния и твердые растворы на его основе позволяют расширить класс полупроводниковых материалов для экстремальной электроники.

Поэтому в данной работе представлены результаты исследования вольт-амперных характеристик гетероэпитаксиальных слоев твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x в зависимости от содержания в них нитрида алюминия. В качестве подложек использованы образцы SiC, легированные азотом. Кроме того, исследована взаимосвязь типа проводимости твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x и количества AlN в них.

Характер вольт-амперных характеристик свидетельствует об образовании гетероструктур в системе SiC–(SiC)_{1-x}(AlN)_x как изотипных, так и анизотипных. Предполагается, что причиной такого поведения ВАХ являются свойства переходного слоя, соединяющего два полупроводника в гетеропереход.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что удельное сопротивление твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x проходит через минимум при содержании ~ 73 % AlN. В свою очередь, снижение удельного сопротивления в многокомпонентных структурах свидетельствует об упорядочении твердого раствора.

Величина удельного сопротивления коррелирует с типом проводимости исследованных образцов твердых растворов. При больших содержаниях AlN в твердых растворах (SiC)_{1-x}(AlN)_x величина удельного сопротивления образцов n-типа проводимости приблизительно на порядок выше, чем у акцепторных аналогов.

Вероятно, это связано, с одной стороны, с ростом дефектности эпитаксиальных слоев, с другой стороны – с влиянием углеродных вакансий, имеющих донорную природу.

Ключевые слова: *вольт-амперная характеристика, карбид кремния, удельное сопротивление, упорядочение структуры.*

Острая необходимость в создании устройств, работающих в экстремальных условиях, определила особенный интерес к карбиду кремния с начала 90-х гг. Высокие температуры Дебая и теплопроводность, большая ширина запрещенной зоны и другие параметры позволяют разрабатывать на его основе быстродействующие, радиационно-стойкие устройства, работающие при температурах свыше 500 °С.

Экспериментальные результаты, полученные авторами [1–12], позволяют предположить, что больший интерес в плане расширения класса материалов для экстремальной электроники представляют широкозонные твердые растворы в системе SiC–AlN. Известно, что твердые растворы в этой системе наследуют уникальные свойства карбида кремния [9]. С другой стороны, твердые растворы замещения при относительно невысоких температурах способны находиться в упорядоченном состоянии. Возникновение и исчезновение порядка в расположении атомов твердых растворов изменяют ос-

новые свойства, такие, как электропроводность, твёрдость и прочность и др. Таким образом, становится возможным управлять свойствами материала, в первую очередь электрическими.

В данной работе приведены результаты исследования вольт-амперных характеристик эпитаксиальных слоев твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x различного типа проводимости. Образцы получены методом сублимации, описанным в [9]. В качестве подложек использовались образцы n-SiC, легированные азотом.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) эпитаксиальных слоев твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x, как и тип проводимости, определялись по стандартной методике: методу Ван-дер-Пау и эффекту Холла соответственно. Результаты измерений ВАХ твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x и их обработки приведены на рис. 1–3.

Анализ полученных данных показал, прямая ветвь ВАХ аналогична обычному *p-n*-переходу. Однако в обратном направлении ток не достигает насыщения, а продолжает расти при увеличении обратного напряжения, хотя величина его намного меньше «прямой» ветви. Такой характер вольт-амперных зависимостей наблюдается для всех исследованных образцов твердых растворов с различным содержанием нитрида алюминия. Исключение составляют твердые растворы (SiC)_{1-x}(AlN)_x средних составов, для которых величина тока и в прямом и обратном состоянии достаточно мала (рис. 2).

Характер полученных вольт-амперных зависимостей (рис. 1) свидетельствует о том, что исследованные образцы представляют гетеропереходы подложка SiC – твердые растворы (SiC)_{1-x}(AlN)_x с различным содержанием AlN. Так как образцы твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x проявляли оба типа проводимости, то вышеупомянутые гетеропереходы могут быть как изотипными, так и анизотипными.

Причина такого поведения ВАХ обусловлена, главным образом, свойствами переходного слоя, соединяющего два полупроводника в гетеропереход. Из-за различия величины постоянной решетки гетероструктуры подложка – твердый раствор (SiC)_{1-x}(AlN)_x, в переходном слое возникают механические напряжения. Для их компенсации развивается сетка дислокаций несоответствия, создающих ловушки как для дырок, так и для электронов, аналогично тому, как это имеет место на поверхности полупроводника.

Рис. 1. ВАХ эпитаксиального слоя твердого раствора (SiC)_{0,89}(AlN)_{0,11}

Рис. 2. Прямые ветви ВАХ слоя твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ для разных составов

Ловушки, создаваемые на границе раздела подложка – слой твердого раствора, удерживают уровень Ферми в переходном слое посередине запрещенной зоны. В результате происходит искривление краев энергетических зон со стороны полупроводника как n-, так и p-типа аналогично переходу металл-полупроводник.

На рис. 2 представлены прямые ветви ВАХ для твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с разным содержанием нитрида алюминия. Анализ приведенных зависимостей позволяет заключить, что при увеличении содержания AlN величина тока через образцы твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ проходит через минимум. Ток уменьшается до значений, близких к нулю (порядка 0,6 мкА) при AlN ~ 50 %, а затем вновь начинает расти, хотя и незначительно (при концентрации AlN ~ 85 %).

Этот эффект особенно хорошо заметен на рис. 3, где приведены концентрационные зависимости прямого тока для разных значений приложенного напряжения (4–8 В). При малых напряжениях величина тока практически не зависит от состава, тогда как при увеличении приложенного напряжения ток возрастает приблизительно на порядок. По-видимому, при небольших содержаниях нитрида алюминия в твердом растворе AlN генерирует дополнительные носители заряда, что снижает величину удельного сопротивления. С ростом содержания AlN растет дефектность структуры твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ [9], что, несомненно, будет сказываться и на электрических характеристиках.

Вероятно, наблюдаемое поведение ВАХ связано с изменением кристаллической структуры твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ [13] и, может быть, и её упорядочением при составах порядка 60–85 % AlN. На это указывает и величина дифференциального сопротивления.

Поскольку Si действует в AlN как донор, а углерод как акцептор, то SiC, растворенный в AlN, будет электрически нейтральным в первом приближении.

Рис. 3. Концентрационная зависимость прямого тока через гетероэпитаксиальные слои SiC – (SiC)_{1-x}(AlN)_x при разных приложенных напряжениях

Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления от типа проводимости твердого раствора (SiC)_{1-x}(AlN)_x

Малая величина тока с ростом содержания нитрида алюминия в твердом растворе, по-видимому, связана с увеличением ширины запрещенной зоны твердого раствора (SiC)_{1-x}(AlN)_x [13].

При больших же содержаниях нитрида алюминия в твердом растворе (~85 % AlN), когда твердый раствор (SiC)_{1-x}(AlN)_x, согласно [9], уже является прямозонным, вероятно, ток через образец незначительно возрастает благодаря наличию нестехиометрического азота. Скорее всего, наличие свободного заряда в твердых растворах (SiC)_{1-x}(AlN)_x обусловлено нарушением стехиометрии и наличием избытка азота в исследуемых образцах и подложке SiC, легированной азотом.

Согласно [9] в твердых растворах (SiC)_{1-x}(AlN)_x при содержании AlN ~ 73 % происходит изменение структуры энергетических зон от не прямой (характерной для SiC) к прямой (для AlN). При перестройке зонной структуры, вероятно, изменяется и тип химической связи (от ковалентной к донорно-акцепторной). Вероятно, именно этим и обусловлено снижение сопротивления образцов в твердых растворах (SiC)_{1-x}(AlN)_x при больших количествах нитрида алюминия в них.

Удельное сопротивление твердых растворов проходит через минимум при $x \sim 73$ м % AlN. В свою очередь, снижение удельного сопротивления в многокомпонентных структурах свидетельствует об упорядочении в твердых растворах (SiC)_{1-x}(AlN)_x.

Величина удельного сопротивления также зависит от типа проводимости исследованных образцов твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x (рис. 4). Из рис. 4 видно, что если при малых содержаниях AlN величины удельного сопротивления образцов обоих типов проводимости близки друг к другу, то с ростом количества нитрида алюминия в твердых растворах удельное сопротивление образцов с электронным типом проводимости приблизительно на порядок выше.

Это связано, с одной стороны, с ростом дефектности эпитаксиальных слоев твердых растворов SiC–AlN при больших количествах AlN [9]. В данном случае дефекты структуры играют роль ловушек для захвата электронов, поэтому удельное сопротивление образцов n-типа значительно выше акцепторных аналогов. С другой стороны, свое влияние оказывают углеродные вакансии, имеющие донорную природу [14]. С ростом количества AlN в твердых растворах количество углеродных вакансий уменьшается либо компенсируется, что приводит к росту удельного сопротивления.

Далее, из [10] известно, что рост дефектности образцов приводит к увеличению подвижности носителей заряда, что, безусловно, влияет на величину удельного сопротивления. С учетом снижения структурного совершенства твердого раствора с ростом содержания AlN (свыше 40 %) [9], а также изменения ширины запрещенной зоны твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x при большом содержании нитрида алюминия, получаем величину удельного сопротивления, приведенную на рис. 4.

Следует заметить, что на характер вольт-амперных зависимостей твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x, кроме содержания, несомненно, оказывают влияние условия получения, толщина и размеры образцов, состояние поверхности подложки и т. д. Однако это тема отдельного исследования.

Исследованные ВАХ твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x позволяют заключить, что образуются гетеропереходы подложка SiC – твердые растворы (SiC)_{1-x}(AlN)_x с различным содержанием AlN. Величина прямого тока через гетеропереходы, как и удельное сопротивление, зависит от содержания AlN в твердых растворах и типа проводимости.

Литература

1. Офицерова Н.В., Сафаралиев Г.К., Билалов Б.А., Нурмагомедов Ш.А., Сорокин Н.Д. // Твердые растворы на основе карбида кремния // Изв. РАН. Неорганические материалы. – 2002. – Т. 38, № 7. – С. 817–819.
2. Рамазанов Ш.М., Курбанов М.К., Билалов Б.А., Сафаралиев Г.К. Способ получения эпитаксиальных пленок твердого раствора (SiC)_{1-x}(AlN)_x. Патент № 2482229. – 2013. – № 14.
3. Филонов К.Н., Курлов В.Н., Классен Н.В., Самойлов В.М., Водовозов А.Н. Новая профилированная керамика на основе карбида кремния // Известия РАН. Сер.: Физика. – 2009. – Т. 73, № 10. – С. 1460–1462.

4. Гусев А.С., Рындя С.М., Каргин Н.И., Бондаренко Е.А. Низкотемпературный синтез тонких пленок карбида кремния методом вакуумной лазерной абляции и исследование их свойств // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – № 5. – С. 18–22.
5. Гусев А.С., Рындя С.М., Зенкевич А.В., Каргин Н.И. и др. Исследование морфологии и структуры тонких пленок 3C – SiC на кремнии методами электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии // Материалы электронной техники. – 2013. – № 2. – С. 44–48.
6. Каргин Н.И., Сафаралиев Г.К., Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д., Рындя С.М. Кинетические особенности получения пленок твердого раствора (SiC)_{1-x}(AlN)_x ионным распылением // Технические науки. – 2013. – С. 118–121.
7. Лебедев А.А., Белов С.В., Лебедев С.П., Литвин Д.П., Никитина И.П. и др. Полуизолирующие 6H – SiC подложки для применения в современной электронике. Н. Новгород, 11–14 сентября 2013 г. – Нижний Новгород, 2013. – С. 56–67.
8. Рамазанов Ш.М., Курбанов М.К., Сафаралиев Г.К., Билалов Б.А. и др. Структурные свойства эпитаксиальных пленок твердого раствора (SiC)_{1-x}(AlN)_x, полученных магнетронным распылением составных мишеней SiC с Al // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, вып. 7. – С. 49–55.
9. Сафаралиев Г.К. Твердые растворы на основе карбида кремния. – М.: Физматлит, 2011. – 296 с.
10. Карбид кремния: технология, свойства, применение / Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Киселев В.С., Конакова Р.В., Лебедев А.А., Миленин В.В., Охрименко О.Б., Поляков В.В., Светличный А.М., Чередниченко Д.И.; под общ. ред. член-корр. НАЛУ, д. ф.-м. н., проф. Беляева А.Е. и д. т. н., проф. Конаковой Р.В. – Харьков: ИСМА, 2010. – 532 с.
11. Офицерова Н.В., Нурмагомедов Ш.А., Савина В.И., Дибиргаджиев Д.Ш. Исследование влияния добавок на катодолюминесценцию твердых растворов на основе SiC // Вестник ДГУ. – 2015. – Вып. 6. – С. 35–41.
12. Офицерова Н.В., Савина В.И., Исабекова Т.И. Образование упорядоченных твердых растворов в карбидкремниевых материалах // Мат-лы IX Всероссийской конференции ФЭ-2016, 19–22 октября 2016 г. – Махачкала: Издательство ДГУ, 2016. – 319 с.
13. Нурмагомедов Ш.А., Пихтин А.Н., Разбегаев В.Н., Сафаралиев Г.К., Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Получение и исследование эпитаксиальных слоев широкозонных твердых растворов (SiC)_{1-x}(AlN)_x // Письма в ЖТФ. – 1986. – Т. 12, вып. 17. – С. 1043–1045.
14. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Корицкого Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1988. Т. 3. – 728 с.

Поступила в редакцию 4 декабря 2017 г.

UDC 54 – 165.2; 539.21

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-43-49

The investigation of the current-voltage characteristics of SiC–(SiC)_{1-x}(AlN)_x heterostructures

N.V. Oficerova¹, V.I. Savina², M.A. Zakaryaeva¹

¹ *Dagestan State University; Russia, 367001, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a; kalinof2002@mail.ru;*

² *Dagestan State Agrarian University; Russia, 367012, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 180*

The silicon carbide and solid solutions on its basis make it possible to extend the class of semiconductor materials for extreme electronics.

Therefore the current-voltage characteristics (CVC) results of (SiC)_{1-x}(AlN)_x solid solutions heteroepitaxial layers depending on the aluminum nitride content are given in this work. SiC samples doped with nitrogen were used as substrate. In addition, the interconnection of the conductivity type of (SiC)_{1-x}(AlN)_x solid solutions and the AlN amount is investigated.

The character of CVC indicates the heterostructures formation in the SiC–(SiC)_{1-x}(AlN)_x system, both isotypic and anisotypic ones. It is assumed that the reason of such CVC behavior is caused, mainly, by properties of the transition layer that connects two semiconductors into a heterojunction.

The data analysis allows to conclude that the (SiC)_{1-x}(AlN)_x solid solutions resistivity passes through a minimum at ~ 73 % AlN content. In its turn, the resistivity decrease in multicomponent structures indicates the ordering of the solid solution.

The resistivity value correlates with the conductivity type of the investigated solid solutions. At large, AlN contents in (SiC)_{1-x}(AlN)_x solid solutions the resistivity of n-type conductivity samples is approximately an order of magnitude higher than at the acceptor analogs.

On the one hand, it is probably connected, with the increase of defectiveness of epitaxial layers. On the other hand, the contribution is made by the carbonic vacancies having the donor nature.

Keywords: current-voltage characteristic, silicon carbide, resistivity, ordering of the structure.

Received 4 December, 2017