

УДК 538.958; 539.234

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-3-14–20

**Ш.А. Нурмагомедов**

### **Структуры на основе твердых растворов SiC–AlN**

*Дагестанский государственный университет; Россия, 367000, Махачкала,  
ул. М. Гаджиева, 43а; n\_shamil@mail.ru*

В статье исследуются оптические свойства и политип структур образцов, образованных твердыми растворами SiC–AlN различного состава. Приведены спектры катодолюминесценции и оптического поглощения эпитаксиальных слоев  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ . Измерения проводились на образцах, выращенных как на подложках SiC, так и на сапфире в спектральной области  $0,2 \div 0,6$  мкм. Показано, что в спектрах люминесценции присутствуют две полосы излучения, причем коротковолновая полоса существенно сдвигается в область больших энергий с увеличением содержания нитрида алюминия. Изучение спектров поглощения твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  позволило предложить возможную структуру их зон.

Ключевые слова: *карбид кремния, нитрид алюминия, твердые растворы карбида кремния с нитридом алюминия, катодолюминесценция.*

В настоящее время освоение широкозонных материалов, в частности карбида кремния (SiC), становится одним из главных направлений развития твердотельной электроники [1–5]. При этом интерес представляют как фундаментальные исследования процессов гетероэпитаксии различных соединений на SiC, так и возможности использования результатов исследований для формирования дискретных приборных структур, применяемых в высокотемпературных интегральных схемах для силовой электроники.

Одним из наиболее информативных методов исследования получаемых полупроводниковых материалов являются исследования их оптических свойств. Они могут дать сведения о ширине запрещенной зоны, о глубине залегания примесей, об оптических константах материала. В подобных методах большое значение имеет выбор спектрального диапазона для возбуждения. Для широкозонных материалов, к которым и относятся твердые растворы  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ , необходимо использовать ультрафиолетовое излучение или пучок электронов достаточно высоких энергий. Для пленочных материалов и эпитаксиальных слоев более предпочтительным является возбуждение пучком электронов, так как при использовании УФ-излучения мы будем наблюдать интегральное излучение от подложки и от пленки вследствие проникновения УФ-излучения через пленку и возбуждения люминесценции подложки. В то же время пучок электронов не проникает через пленку и не будет возбуждать люминесценцию подложки. Поэтому в качестве метода исследования оптических свойств наших материалов был выбран метод катодолюминесценции.

Изучение оптических свойств твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  проводилось на образцах с различным содержанием AlN, полученных сублимационным методом [6; 7]. Как указывалось ранее, мы изучили спектры катодолюминесценции в слоях  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  различных составов. Измерения проводились при температуре жидкого азота (77 К) и при комнатной температуре (300 К). Для возбуждения катодолюминесценции применялся поток электронов с энергией 20 кэВ.

На рис. 1 показаны спектры катодолюминесценции структуры SiC–AlN с содержанием AlN 38 % мол. при различных температурах (77 и 300 К).

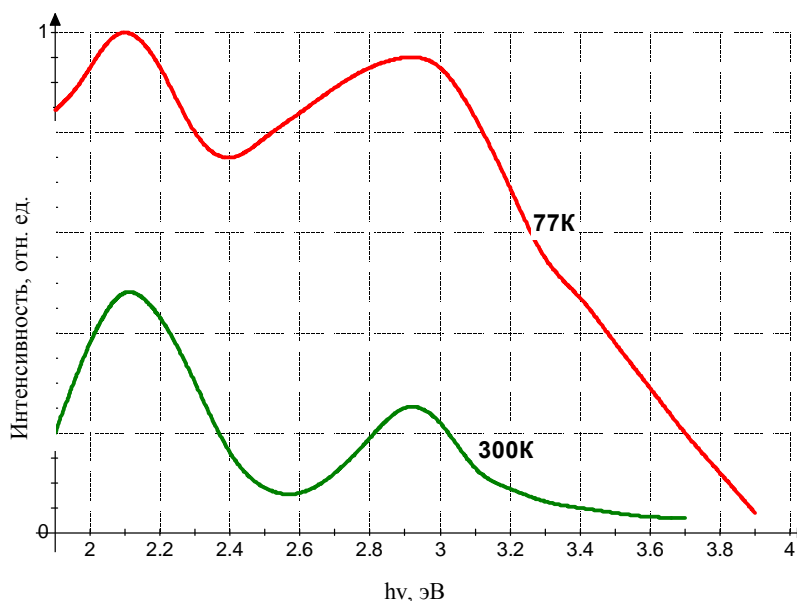


Рис. 1. Спектр КЛ для  $(\text{SiC})_{0.62}(\text{AlN})_{0.38}$

Из рисунка видно, что для этого образца при данных температурах наблюдаются две выраженные полосы излучения, расположенные примерно при 2,2 и 2,9 эВ. Установлено, что интенсивность полосы излучения с максимумом при 2,2 эВ с возрастанием температуры измерений уменьшается почти в два раза. В то же время интенсивность полосы излучения с максимумом 2,9 эВ уменьшается почти в четыре раза. Такое поведение, возможно, связано с тушением люминесценции при повышении температуры. Согласно мнению [8] излучение коротковолнового пика в 2,9 эВ обусловлено переходами между донорно-акцепторными уровнями, образованными атомами Al и атомами азота в карбиде кремния. А излучение длинноволнового пика в 2,2 эВ обусловлено дефектами в кристаллической решетке твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ . Так как количество дефектов при росте твердых растворов слабо зависит от температуры выращивания, то, естественно, и интенсивность излучения проявляет меньшую зависимость от температуры.

На рис. 2 приведены спектры КЛ эпитаксиальных слоев SiC–AlN с различным содержанием компонентов. В этих образцах также наблюдаются две полосы излучения, как и в предыдущем случае. Кроме того, очевидно, что с увеличением содержания нитрида алюминия пики длинноволновых полос излучения незначительно смещаются в область более высоких энергий. Что касается более коротковолновых полос излучения, то они намного больше сдвигаются в область высоких энергий. Так как ширина запрещенной зоны исследованных нами твердых раство-

ров больше, чем энергии излучения этих обеих полос [9], мы предположили, что за излучение ответственны какие-либо примеси в твердых растворах.

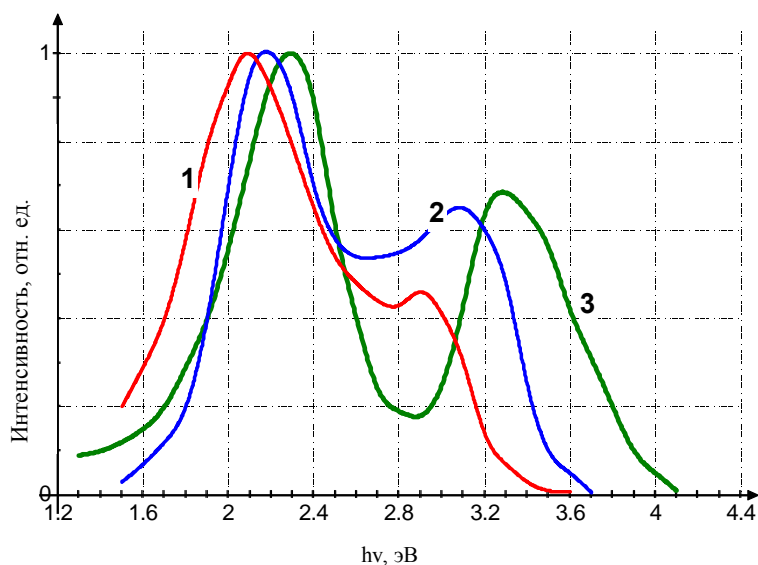


Рис. 2. Спектры КЛ  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  при  $x = 0,35$  (кривая 1),  $x = 0,41$  (кривая 2) и  $x = 0,73$  (кривая 3) ( $T = 300 \text{ K}$ )

Замечено, что при длительном воздействии электронного пучка на исследуемые образцы максимумы полос излучения немного перемещались в область меньших энергий. Возможно, что такое поведение связано с возрастанием концентрации дефектов под действием высокоэнергетического электронного пучка. Подобные дефекты создают дополнительные центры излучательной и безызлучательной рекомбинации и «размывают» границы примесных центров, между которыми осуществляются излучательные переходы, что и обуславливает незначительное смещение полос излучения.

В наших образцах полоса излучения с меньшей энергией аналогична «дефектной» люминесценции в чистом карбиде кремния [8]. Она возникает из-за излучательной рекомбинации экситонного типа через комплекс дефектов, связанных, с одной стороны, с вакансией углерода, а с другой – с междоузельными атомами примесей в карбиде кремния.

Причина возникновения другой полосы излучения, наблюдаемой на спектрах катодолуминесценции, несколько другая. В псевдобинарных структурах типа  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  находятся, по крайней мере, две группы центров противоположного знака, которые являются «ловушками» для носителей заряда. Это атомы азота и алюминия. В случае увеличения содержания нитрида алюминия в твердых растворах  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  расстояние между Al и N достаточно мало и излучательная рекомбинация может идти за счет междоузельных переходов. Это означает, что излучательная рекомбинация может проходить через донорно-акцепторные пары азот–алюминий. И, скорее всего, генератором коротковолновых полос излучения в структурах SiC–AlN как раз и является указанный нами процесс. Смещение максимума полосы излучения с возрастанием содержания AlN в структурах SiC–AlN можно объяснить увеличением ширины запрещенной зоны самих структур.

тур, в то время как расстояние примесных уровней азота и алюминия относительно зоны проводимости и валентной зоны остается практически неизменным.

Исследование спектров оптического поглощения структур SiC–AlN производилось на образцах, выращенных как на подложках карбида кремния, так и на сапфире. Исследование проводилось в спектральной области длин волн  $0,2 \div 0,6$  мкм на модернизированной установке на основе спектрометра СДЛ-2.

На рис. 3 представлены спектры пропускания образцов SiC–AlN различных составов.

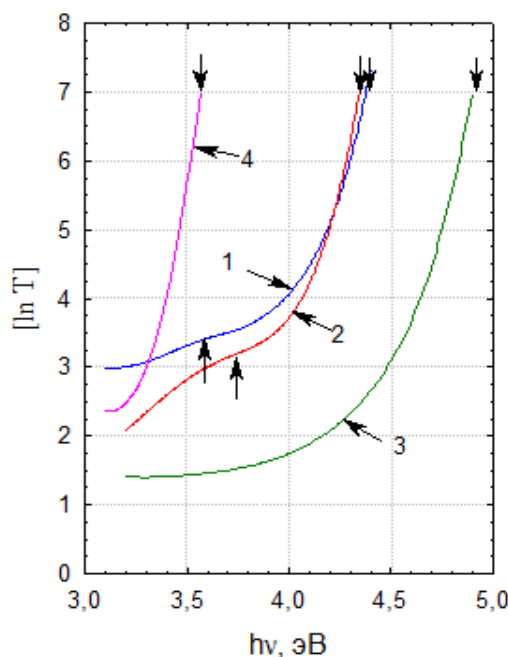


Рис. 3. Спектры пропускания структур  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  с различным содержанием AlN при 300 К: 1 –  $x = 0,375$ ; 2 –  $x = 0,545$ ; 3 –  $x = 0,79$ ; 4 –  $x = 0,4$

На спектральных зависимостях оптического края поглощения в образцах  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  с содержанием AlN менее 60 % (кривые 1, 2) наблюдались две особенности, заключающиеся в наличии «ступеньки» в области низких энергий и в резком возрастании коэффициента поглощения в коротковолновой области. Эти особенности, по-видимому, можно связать соответственно с переходом электронов в непрямой  $K$ -минимум зоны проводимости и с переходом в прямой  $\Gamma$ -минимум с потолка валентной зоны. Из рассмотрения зонной структуры твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  следует, что переходы  $\Gamma$ - $K$  и  $\Gamma$ - $\Gamma$  разделены сравнительно небольшим энергетическим зазором, а при  $x \geq 0,75$  твердые растворы  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  должны быть прямозонными. В случае такого «тесного» расположения прямых и непрямых переходов на одном и том же образце можно наблюдать оба вида переходов одновременно. Некоторая размытость нашего спектра пропускания, вероятно, связана с неоднородностью содержания компонентов структуры по толщине. Это предположение подтверждается данными рентгено-спектрального микроанализа образцов. Например, было обнаружено, что содержание AlN в структурах уменьшается в направлении от поверхности образца к подложке. С этим изменением AlN связано уменьшение ширины запрещенной зоны структуры, что и приводит к размытости спектра пропускания.

В области прямых переходов (кривая 3) край оптического поглощения представляет собой плавную кривую без особенностей. Крутизна края составляет  $100 \div 150$  МэВ на порядок изменения коэффициента пропускания. Меньшая крутизна края поглощения по сравнению с крутизной спектров поглощения, полученных на образцах 1 и 2 в области прямых переходов (60–70 МэВ) на порядок изменения коэффициента пропускания, объясняется тем, что в структурах с большим содержанием AlN увеличивается и неоднородность его распределения по толщине ЭС.

Образцы 1–3 были выращены на подложках из сапфира, и спектры снимались вместе с подложкой. Край собственного поглощения эпитаксиального слоя  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ , выращенного на SiC (кривая 4), отличается от 1–3 большей крутизной (50 МэВ на порядок изменения коэффициента поглощения). Это указывает на однородность состава твердых растворов, выращенных на подложках SiC. Особенности, соответствующие прямым и непрямым переходам, отражены на рисунке вертикальными стрелками.

Полученные экспериментальные значения прямых и не прямых переходов для SiC и AlN мы использовали для применения полуэмпирической теории псевдобинарных полупроводников к нашим структурам SiC–AlN. На основе этой модели была рассчитана зависимость энергий различных переходов от состава эпитаксиальных слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ :

$$E_g = 3,86x^2 - 0,56x + 3,3[\text{эВ}]; \quad 0 \leq x \leq 0,7 \quad (1)$$

$$E_g = 3,86x^2 - 2,23x + 4,39[\text{эВ}]; \quad 0,7 \leq x \leq 1,0 \quad (2)$$

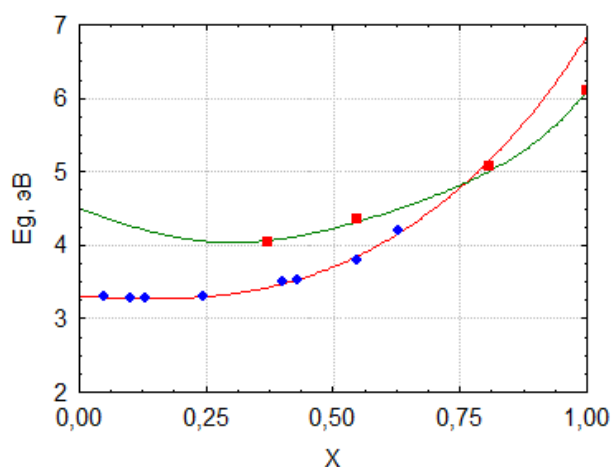


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей для прямых (■) и не прямых (●) переходов в ЭС  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$

Как видно из рисунка, экспериментальные значения, полученные из анализа спектров поглощения, находятся в удовлетворительном согласии с расчетными кривыми. Как следует из формулы (1), край поглощения твердых растворов должен сдвигаться в коротковолновую область с увеличением содержания AlN и при  $x \geq 0,7$  твердые растворы  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ , вероятно, становятся прямозонными. Ширина запрещенной зоны при этом уже определяется из выражения (2).

Исследование политипизма полученных твердых растворов показало, что структуры  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  при  $x \geq 0,20$  кристаллизуются преимущественно в поли-

типной модификации 2Н (рис. 5); таким образом, подтверждается высказанное ранее предположение о том, что кристаллизация SiC с материалом со структурой вюртцита должна стабилизировать политип 2Н [6; 10]. При меньшем содержании AlN твердые растворы кристаллизуются в политипных модификациях 3С, 4Н, 6Н.

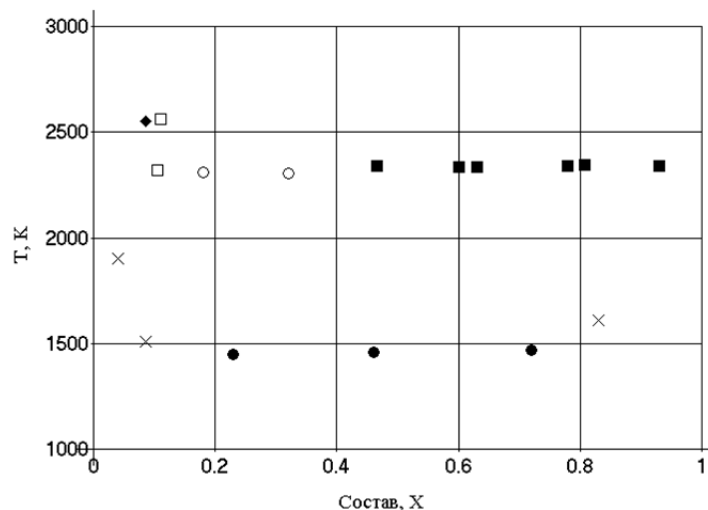


Рис. 5. Зависимость политипной структуры  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  от состава и температуры получения (×, ● – литературные данные (2Н); наши данные: модификации □ – 6Н, ◆ – сростки политипов 15R и 4Н; ○ – сростки политипов 4Н и 2Н; ■ – 2Н)

### Литература

1. Радьков А.В. Карбид кремния – перспективный материал силовой электроники: свойства и характеристики // Молодой ученый. – 2016. – № 7 (111). – С. 149–152. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/111/27351/> (дата обращения: 01.07.2021).
2. Джимми Луи (Jimmy Liu), Кин Лап Вонг (Kin Lap Wong), Скотт Аллен (Scott Allen), Джон Муккен (John Mookken). Преимущества нового поколения SiC MOSFET в системах высокой мощности // Силовая электроника. – 2017. – № 6. – С. 32–37.
3. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О.А. Агеев, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовцев, В.С. Киселев, Р.В. Конакова, А.А. Лебедев, В.В. Миленин, О.Б. Охрименко, В.В. Поляков, А.М. Светличный, Д.И. Чередниченко; под общ. ред. чл.-корр. НАЛУ, д. ф.-м. н., проф. А.Е. Беляева и д. тех. н., проф. Р.В. Конаковой. – Харьков: ИСМА, 2010. – 532 с.
4. Колтаков А. Карбид кремния: панацея или не будем спешить? // Силовая электроника. – 2015. – № 6. – С. 6–12.
5. Карташов Е., Смирнова В. SiC силовые приборы: прорыв на системном уровне // Силовая электроника. – 2019. – № 5. – С. 16–17.
6. Сафаралиев Г.К. Твердые растворы на основе карбида кремния. – М.: Физматлит, 2011. – 296 с.
7. Билалов Б.А., Курбанов М.К., Нурмагомедов Ш.А., Офицерова Н.В. Процессы сублимации и конденсации твердых растворов на основе карбида кремния // Тезисы Всероссийской конференции «Физика полупроводников и нано-

структур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника» (г. Махачкала, ДГТУ, 5–8 ноября 2009 г.). – Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2009. – С. 22–23.

8. Водаков Ю.А., Ломакина Г.А., Мохов Е.Н.. Эффективность различных полос люминесценции в карбиде кремния // Широкозонные полупроводники: сб. статей. – Махачкала: Изд-во ДГУ, 1988. – С. 169.

9. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 726 с.

10. Рамазанов Ш.М. Получение и исследование эпитаксиальных пленок твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  и поверхностно-барьерных структур на их основе: автореф. дис. ... к. физ.-мат. н. – Махачкала, 2015.

*Поступила в редакцию 17 июня 2021 г.*

UDC 538.958; 539.234

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-3-14–20

### **Structures Based on SiC–AlN Solid Solutions**

***Sh.A. Nurmagomedov***

*Dagestan State University; Russia, 367000, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a;  
n\_shamil@mail.ru*

The optical properties and polytype structures of samples formed by SiC–AlN solid solutions of various compositions are investigated. The cathodoluminescence and optical absorption spectra of epitaxial layers  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  are presented. The measurements were performed on samples grown on both SiC and sapphire substrates in a spectral range of  $0,2 \div 0,6$  microns. It is shown that two radiation bands are present in the luminescence spectra, and the short-wave band is significantly shifted to the range of high energies with an increase in the content of aluminum nitride. The study of the absorption spectra of solid solutions  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  suggests a possible structure of their zones.

Keywords: *silicon carbide, aluminum nitride, solid solutions of silicon carbide with aluminum nitride, cathodoluminescence.*

*Received 17 June 2021*