

УДК 538.911

DOI: 10.21779/2542-0321-2022-37-3-58-63

Н.В. Офицерова, А.А. Ахмедханов

О взаимосвязи типа проводимости и электрических свойств твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$.

*Дагестанский государственный университет; Россия, 367000, г. Махачкала,
ул. М. Гаджиева, 43а; kalinof2002@mail.ru*

Исследована связь типа проводимости и удельного сопротивления твердых растворов на основе SiC и AlN, полученных методом сублимации. Содержание нитрида алюминия в исследованных образцах твердых растворах варьировалось от 0 до 85 мол.%.

При малых количествах AlN возможно получение обоих типов проводимости в твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, что обычно характерно для SiC. Для образцов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с $x > 0,7$ наблюдается инверсия типа проводимости (преимущественно n-тип проводимости), связанная, вероятно, с перестройкой кристаллической структуры. С ростом содержания AlN преобладает n-тип проводимости.

Обнаружено, что тип проводимости исследованных образцов твердых растворов связан с величиной удельного сопротивления. Причем при малых количествах AlN в твердом растворе величина удельного сопротивления практически не зависит от типа проводимости. Однако с ростом количества второго компонента растет дефектность образцов, и удельное сопротивление существенно зависит от типа проводимости.

Таким образом, в твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ удельное сопротивление коррелирует с типом проводимости. При больших мольных долях x в твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ удельное сопротивление образцов с n-типом проводимости приблизительно на порядок выше чем с p-типом. Такой эффект, вероятно, связан с ростом дефектности образцов и поведением углеродных вакансий в них.

Ключевые слова: *тип проводимости, карбид кремния, дефектность, удельное сопротивление.*

Развитие техники невозможно без модификации и создания новых материалов с улучшенными свойствами. Добиться получения заданных параметров компонентов и изделий позволяет использование твердых растворов и композиционных материалов. Особый интерес представляют материалы, применяемые для реализации «экстремальных» технологий: высоких механических нагрузок, температур, коррозионной и радиационной стойкости. Наибольший интерес в этом плане представляют бескислородные тугоплавкие соединения, такие, как SiC, B₄C, Si₃N₄, AlN и т. д., способные сделать возможным получение авангардных материалов, определяющих прогресс в технике.

Целью работы было исследование взаимозависимости типа проводимости и удельного сопротивления твердых растворов на основе SiC и AlN. В работе использованы образцы твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, полученных методом сублимации [1]. Содержание нитрида алюминия в исследованных образцах твердых растворов варьировалось от 0 до 85 мол. %. Для определения удельного сопротивления и типа проводимости образцов применяли методы Ван-дер-Пау и эффект Холла, соответственно.

Анализ данных и результаты, полученные при исследовании растворимости примесей в карбиде кремния [1], показали, что наибольший интерес в плане получения и применения представляют твердые растворы SiC с AlN. Наряду с уникальными свойствами карбида кремния [2; 3], которые наследуются, получение таких твердых растворов позволяет управлять основными параметрами полупроводникового материала: шириной запрещенной зоны, энергией активации примеси, а следовательно, и удельным сопротивлением. Ряд работ [4–9] посвящен исследованию различных свойств вышеупомянутых твердых растворов в этой системе.

При высоких температурах в широком диапазоне составов SiC и AlN могут образовывать твердые растворы. Кроме того, как отмечается в [1], при $x > 0,7$ в образующихся твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, наблюдается переход от «непрямой» структуры энергетических зон (для карбида кремния) к «прямой» (для нитрида алюминия). В этом случае за образование кристаллической структуры и основные электрофизические свойства отвечает AlN. Известно [10], что нитриды в группе полупроводниковых соединений типа A^3B^5 обладают преимущественно донорным типом проводимости благодаря избытку азота, всегда присутствующего в данных соединениях.

Корреляции типа проводимости твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с составом исследованы с помощью экспресс-метода на основе эффекта Холла. Полученные результаты приведены в таблице 1. Анализ данных позволяет отметить, что если исключить влияние условий получения, то можно заметить наличие обоих типов проводимости во всем диапазоне составов от 5 до 85 % AlN.

При малых количествах AlN возможно получение обоих типов проводимости в твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, что обычно характерно для SiC. Малое содержание нитрида алюминия (5–7 %) в электрических свойствах проявляется как высокая степень легирования. При содержаниях AlN выше 30 % наблюдается получение высокоомных образцов твердых растворов, что, вероятно, обусловлено большой шириной запрещенной зоны нитрида алюминия (~6,2 эВ) и, как следствие, высоким удельным сопротивлением ($\sim 10^8 \text{ Ом м}$) [2].

Для образцов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с $x > 0,7$ наблюдается инверсия типа проводимости (преимущественно n-тип проводимости), связанная, вероятно, с перестройкой кристаллической структуры. Исходя из данных авторов [5 – 9], можно предположить, что речь идет о глубоких донорных уровнях, создаваемых карбидом кремния в запрещенной зоне.

При $x \sim 0,73$ в твердом растворе $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ величина удельного сопротивления такова, что образец ведет себя как слаболегированный карбид кремния. Такое поведение удельного сопротивления в многокомпонентных системах может свидетельствовать об упорядочении структуры, приводящей к снижению рассеяния электронов и, следовательно, снижению величины сопротивления. Наблюдаемый эффект, вероятно, подтверждает то, что при $x \sim 0,7$ меняется структура энергетических зон в твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ [9].

Для образца твердого раствора с 85 %-ным содержанием AlN получен n-тип проводимости. При таких составах твердого раствора основные свойства и энергетическая структура материала в основном определяются нитридом алюминия. Кроме того, известно, что в нитридах полупроводниковых соединений типа A^3B^5 возникают проблемы с инверсией типа проводимости. Таким образом, в нитриде алюминия удается получить преимущественно n-тип проводимости, что и наблюдается для образца твердого раствора данного состава.

Таблица 1. Тип проводимости твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ в зависимости от состава

№ п/п	Содержание AlN в ЭС, %	Тип проводимости
1	5	n ⁺ -тип
2	7	p ⁺ -тип
3	7,5	n-тип
4	9,2	p-тип
5	10	n-тип
6	11,3	n-тип
7	11,5	p-тип
8	15	p-тип
9	20	p-тип
10	25,3	p-тип
11	28–30	n-тип (высокоомный)
12	45	p-тип
13	55,7	n-тип (высокоомный)
14	58	p-тип
15	60	p-тип
16	73	n-тип (слаболегированный)
17	85	n-тип

Исследована взаимозависимость типа проводимости с электрическими свойствами, в частности, величиной удельного сопротивления. Изменение величины сопротивления для образцов с различным содержанием нитрида алюминия, предположительно, связано с особенностями зонной структуры твердого раствора, образующегося в системе SiC–AlN. С ростом содержания AlN меняется параметр решетки согласно закону Вегарда (рис. 1). Разброс значений в интервале до 30 % AlN, вероятно, связан с образованием смеси политипов в этом диапазоне составов [1]. Соответственно растет и ширина запрещенной зоны твердого раствора, и при составах порядка $x \sim 0,7$ в твердом растворе $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ происходит переход «непрямая» – «прямая» структура энергетических зон [1; 9]. В результате возможно также и изменение типа химической связи (от ковалентной на донорно – акцепторной).

Обнаружено, что тип проводимости исследованных образцов твердых растворов также определяет величину удельного сопротивления (рис. 2). Хорошо видно, что при малых количествах AlN величина удельного сопротивления практически не зависит от типа проводимости. С ростом количества второго компонента увеличивается дефектность твердых растворов, приводящих к образованию блочных структур в виде столбиков и правых и левых конусов [1; 11]. Рост дефектности приводит к увеличению подвижности носителей заряда [2] и рассеяния носителей заряда на дефектах. Как результат, удельное сопротивление образцов твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с n-типом проводимости приблизительно на порядок превышает аналогичные значения для p-типа образцов. Образующиеся блочные структуры, очевидно, становятся ловушками захвата для электронов, ведущих к росту удельного сопротивления образцов n-типа.

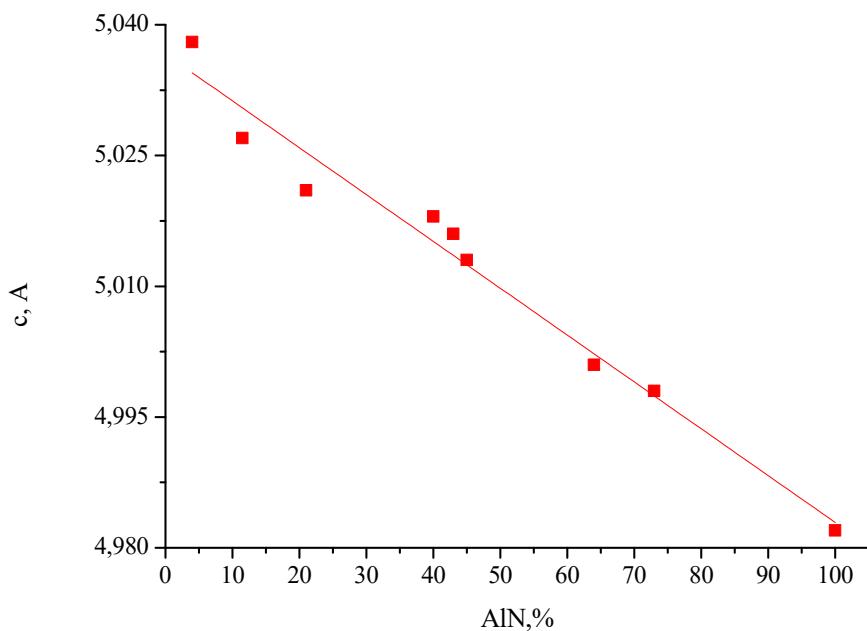


Рис. 1. Изменения параметра решетки «с» с ростом AlN в образцах твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$.

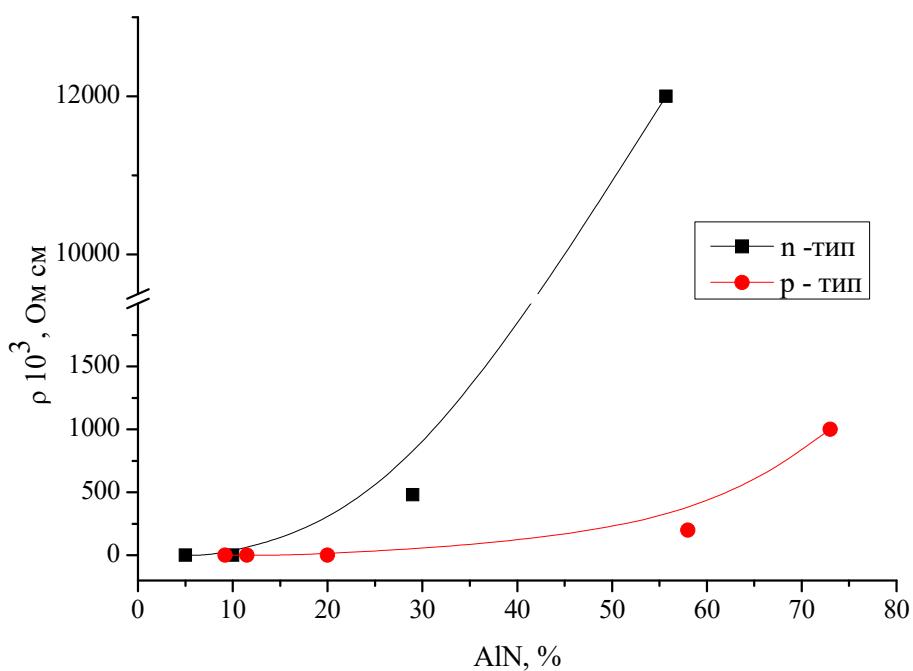


Рис. 2. Корреляции удельного сопротивления и типа проводимости в твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$.

Кроме того, нельзя исключить и роль углеродных вакансий, имеющих донорную природу. Снижение количества карбида кремния в образцах твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ ведет к тому, что количество углеродных вакансий либо уменьшается, либо компенсируется. Это, в свою очередь, также приводит к росту удельного сопротивления образцов.

Характер изменения удельного сопротивления (и соответственно электропроводности) твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ позволяет предположить, что в исследованных образцах при некоторых составах ($x \sim 0,7$) формируются полупроводниковые материалы, в которых наблюдается упорядочение структуры.

Таким образом, в итоге проведенного исследования можно заключить, что в твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ удельное сопротивление коррелирует с типом проводимости. При больших мольных долях x в твердых растворах $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ удельное сопротивление образцов с n-типа проводимости приблизительно на порядок выше, чем с p-типа. Такой эффект, вероятно, связан с ростом дефектности образцов и поведением углеродных вакансий в них.

Литература

1. Сафаралиев Г.К. Твердые растворы на основе карбида кремния. – М.: Физматлит, 2011. – 296 с.
2. Карбид кремния: технология, свойства, применение / Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Киселев В.С., Конакова Р.В. и др.; под общ. ред. член-корр. НАЛУ, д. ф.-м. н., проф. Беляева А.Е. и д. тех. н., проф. Конаковой Р.В. – Харьков: ИСМА, 2010. – 532 с.
3. Jow-Lay Huang and Jyh-Ming Jih. Investigation of SiC–AlN system: Part I. Microstructure and solid solution // Journal of Materials Research. 2011. Vol. 10, iss. 3. – Pp. 236–245.
4. Eu²⁺-doped AlN–SiC solid solution phosphors: Synthesis and cathodoluminescence properties / Rong-Jun Xie, Hirosaki Naoto, Benjamin Dierre, Takahashi Takeda et al. // Journal of the Society for Information Display. 2011. № 19 (9) – P. 627.
5. Рамазанов Ш.М., Курбанов М.К., Сафаралиев Г.К., Билалов Б.А. и др. Структурные свойства epitаксиальных пленок твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, полученных магнетронным распылением составных мишеней SiC с Al // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 7. – С. 49–55.
6. 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.
7. Офицерова Н.В., Савина В.И., Лабазанов Х.У. Математическое прогнозирование технологических условий получения твердых растворов в системе SiC–AlN // Вестник ДГУ. Сер.: Естественные науки. 2017. Т. 32, вып. 4. – С. 7–13.
8. Офицерова Н.В., Нурмагомедов Ш.А., Сафаралиев Г.К. Морфология твердых растворов на основе SiC // Вестник ДГУ. Сер. 1: Естественные науки. 2021. Т. 36, вып. 2. – С. 80–87.
9. Нурмагомедов Ш.А. Структуры на основе твердых растворов SiC–AlN // Вестник ДГУ. Сер. 1. Естественные науки. 2021. Т. 36, вып. 2. – С. 14–20.
10. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. – СПб.: Лань, 2015. – 448 с.

11. *Huabin Wang, Derek Northwood, Jiecai Hanm, Shanyi Du.* Growth Mechanisms for SiC–AlN Solid Solution Crystals Prepared by Combustion Synthesis // Journal of the American Ceramic Society. 2005. № 89 (2). – Pp. 501–508.

Поступила в редакцию 1 июня 2022 г.

UDC 538.911

DOI: 10.21779/2542-0321-2022-37-3-58-63

On the Correlation of the Conductivity Type With $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ Solid Solutions Electrical Properties

N.V. Oficerova, A.E. Akhmedkhanov

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

The correlation between the conductivity type and resistivity of solid solutions based on SiC and AlN obtained by sublimation is investigated. The aluminum nitride content in the researched solid solutions varied from 0 to 85 mol.%.

With the AlN small amounts, it is possible to obtain the both conductivity types in $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ solid solutions, which is usually characteristic for SiC. At $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ samples with $x > 0.7$, an inversion of the conductivity type (mainly n-type of conductivity) is observed, probably associated with the crystal structure restructuring. With an increase in the AlN content, the n-type of conductivity prevails.

It was found that the conductivity type of the researched solid solutions is associated with the resistivity. Moreover, AlN small amounts in the solid solution, the resistivity value practically does not depend on the conductivity type. However, an increase of the second component, the samples defectiveness increases, and the resistivity significantly depends on the conductivity type.

Thus, $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ solid solutions resistivity correlates with the conductivity type. At the large x value for $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ solid solutions the resistivity of samples with n-type conductivity is approximately an order of magnitude higher than with p-type. This effect is probably related to the samples defectivity increase and the carbon vacancies behavior.

Keywords: *type of conductivity, silicon carbide, defectivity, resistivity.*

Received 1 June 2022