

**В.Н. Вьюгинов¹, Н.К. Травин¹, О.В. Венедиктов¹,
М.М. Коровкина¹, А.Ф. Цацульников^{2,3}, В.В. Лундин^{2,3}**

¹ЗАО «Светлана-Электронприбор»

²НТЦ микроэлектроники РАН

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

Развитие базовой технологии производства подложек полуизолирующего карбида кремния

В статье описаны результаты работ в ЗАО «Светлана-Электронприбор» по оптимизации технологии производства подложек карбида кремния диаметром 76.2 мм. Обсуждаются результаты апробированных методов эпитаксии нитрида галлия на отечественных подложках карбида кремния и перспективы использования материала.

Ключевые слова: карбид кремния, эпитаксиальный рост, транзисторы с высокой подвижностью электронов.

В настоящее время все больше становятся востребованы транзисторы СВЧ диапазона с высокой подвижностью электронов (HEMT) GaN/SiC для использования в радиолокационных системах с АФАР наземного, морского и воздушного базирования, а также в системах навигации, радиосвязи и беспроводных линиях передачи информации. Для производства приборов такого класса необходимы подложки, изготовленные из полуизолирующего карбида кремния (SiC). В силу своих электрофизических свойств он является одним из наиболее перспективных материалов в полупроводниковой СВЧ электронике, поскольку расширяет функциональные возможности электронных приборов [1,2].

В ОАО «Светлана» в 2011÷13 гг. была разработана базовая технология производства подложек SiC для СВЧ применений [3]. В 2014÷15 гг. были продолжены работы, направленные на оптимизацию технологии роста монокристаллов и производства подложек полуизолирующего SiC, по двум направлениям:

- рост некомпенсированных монокристаллов SiC с высоким удельным сопротивлением;
- оптимизация технологии обработки подложек для достижения качества «epi-ready».

Для достижения высокого удельного сопротивления монокристаллов, т.е. материала с низким содержанием легирующей донорной примеси, могут использоваться различные методы:

- высокотемпературное химическое осаждение из газовой фазы (метод HTCVD) [4,5];
- компенсационное легирование кристаллов SiC в процессе роста. Обычно для этого используется ванадий, при легировании которым вблизи середины запрещенной зоны образуется глубокие акцепторные уровни;

- рост монокристаллов SiC методом газофазного транспорта и осаждения (метод PVT) [6,7] на основе источника SiC с исходным низким содержанием примесей азота и бора.

Первоначально в ЗАО «Светлана-Электронприбор» использовался метод компенсационного легирования кристаллов в процессе роста с помощью ванадия. Благодаря этому было достигнуто удельное сопротивление на уровне $10^{11} \div 10^{12}$ Ом×см практически на всей площади подложек SiC.

В начале 2015 года была поставлена задача получать некомпенсированные подложки полуизолирующего SiC с сопротивлением более $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и начата разработка технологии синтеза источника SiC с предельно низким содержанием легирующих примесей азота на уровне $5\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и бора $2\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. К настоящему времени выполнен большой объем исследований по очистке исходных материалов и оптимизации процесса синтеза. Благодаря этому концентрация азота в источнике SiC снижена с $5\cdot 10^{18}$ до $9\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а концентрация бора – до $(2\div 3)\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что было показано исследованиями методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Дальнейшее снижение примесей в источнике SiC требует не только очистки исходных материалов, но также и снижения давления остаточных газов в ректоре. Эксперименты по данному направлению продолжаются.

Для достижения «epi-ready»-качества подложек для последующего использования их для эпитаксии гетероструктур была выполнена оптимизация практически всех операций технологического маршрута обработки пластин SiC.

С целью повышения точности ориентации подложек изготовлена и апробирована прецизионная оснастка для установки рентгеновской ориентации монокристаллов и разработан способ их приклейки в эту оснастку перед резкой. Это позволило достичь точности ориентации подложек относительно оси (0001) не хуже $15'$, что сразу положительно повлияло на качество эпитаксиальных слоев, выращиваемых на подложках. Удалось устранить так называемый «террасовый» эпитаксиальный рост (рис.1).

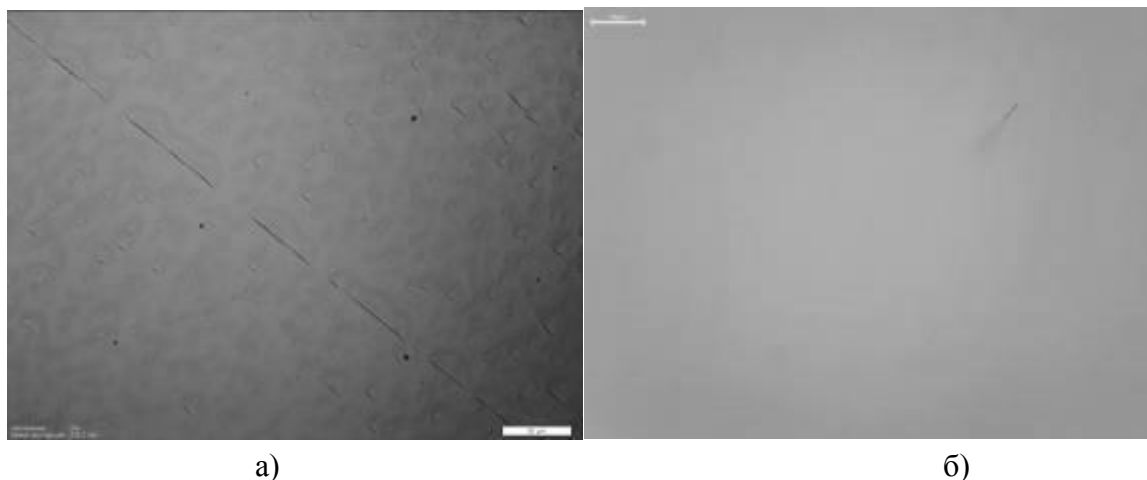
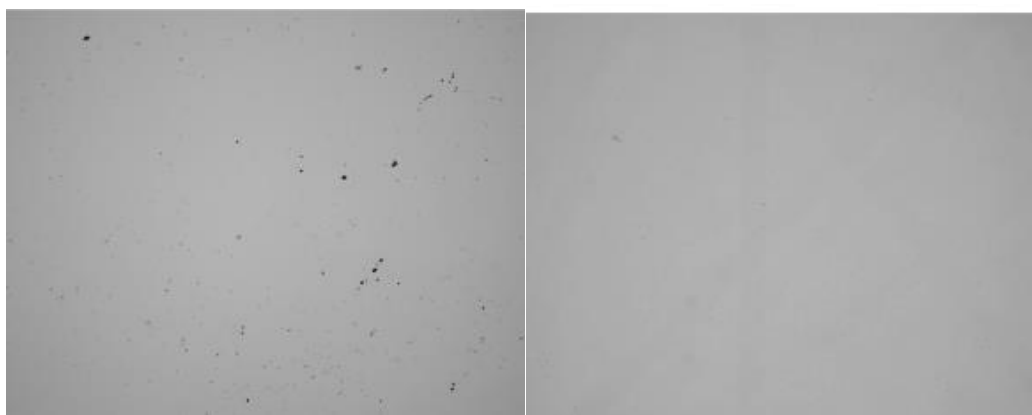


Рисунок 1. Оптическое изображение эпитаксиальной пленки GaN на подложке SiC
а) разориентация $1^\circ 23'$, б) разориентация $0^\circ 15'$

В технологический маршрут обработки пластин SiC введена операция обработки фаски. Вместе с оптимизацией шлифовки и полировки путем изменения режимов этих операций и подбора состава суспензий это исключило царапины и привело к общему улучшению качества поверхности. Была также усовершенствована технология химико-механического полирования и финишной отмывки подложек перед эпитаксией. На рисунке 2 видно, что в результате проведенных работ общее количество микродефектов на эпитаксиальной пленке снизилось более чем на порядок.



а)

б)

Рисунок 2. Фотография эпитаксиальной пленки на поверхности SiC
а) после стандартной отмывки, б) после оптимизированной отмывки

Выполненные работы по оптимизации технологии производства подложек SiC позволили достичь качества «epi-ready». Оно было подтверждено в опытах по эпитаксиальному росту гетероструктур на основе GaN тремя способами:

- методом газофазной эпитаксии из металл-органических соединений (MOCVD) в НТЦ микроэлектроники РАН, СПбГПУ и ЗАО «Элма-Малахит»;
- методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МВЕ) в ЗАО «Светлана-Рост»;
- хлорид-гидридной эпитаксией (HVPE) в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Все три способа показали положительные результаты.

Таким образом, проведенные исследования доказали, что технология производства подложек SiC, развиваемая в ЗАО «Светлана-Электронприбор», соответствует мировым требованиям и обладает большими перспективами для использования получаемого карбида кремния в качестве подложек для эпитаксии гетероструктур на основе AlGaIn/GaN и дальнейшего их использования в производстве транзисторов с высокой подвижностью электронов СВЧ диапазона.

Библиографический список

1. J.D. Blevins, A.K. Gupta, I. Zwieback, E. Emorhokpor, A. Souzis, T. Anderson, C. Avvisato Development of a Manufacturing Process for Large Diameter Semi-Insulating Silicon Carbide Substrates/ CS MANTECH Conference, May 16th-19th, 2011, Palm Springs, California, USA.
2. M.E.Levinshtein, S.L.Rumyantsev, M.S.Shur 2001 Properties of Advanced Semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe (New York: Wiley).
3. Лебедев А.А., Белов С.В., Лебедев С.П., Литвин Д.П., Никитина И.П., Васильев А.В., Макаров Ю.Н., Нагалюк С.С., Стрельчук А.М., Попов В.В., Вьюгинов В.Н., Шифман Р.Г., Кузмичёв Ю.С., Травин Н.К., Венедиктов О.В. Начало промышленного выпуска SiC подложек и приборов на их основе // Труды 1-й российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники», посвящённой 110-ю со дня рождения О. В. Лосева / Под ред. А. Э. Рассадина. --- Н. Новгород: НИЖЕГОРОДСКАЯ РАДИОЛАБОРАТОРИЯ. 2013. В 2-х т. Т. 1. С. 23-24.
4. Lebedev A.A., Tregubova A.S., Chelnokov V.E., Scheglov M.P. Growth and investigation of the big area Lely-growth substrates // Mat. Sci. Eng. – 1997. – В 46. – P.291-295.
5. Власкина С.И., Свечников Г.С., Смынтына Пленки карбида кремния. – Одесса: Астропринт, 2007.
6. Tairov Yu.M., Tsvetkov V.F. General principles of growing large-size single crystals of various silicon carbide polytypes // J. Cryst. Growth. – 1981. – 52, N1. – P.146-150.
7. Ziegler G., Lanig P., Theis D., Single crystal growth of SiC substrate material for blue light emitting diodes // IEEE Trans. Electron Dev. – 1983. – ED-30, N.4 – P.277-281.