

**А.А.Лебедев^{1,5}, С.В.Белов¹, С.П.Лебедев^{1,5}, Д.П.Литвин^{1,2},
И.П.Никитина¹, А.В.Васильев², Ю.Н.Макаров², С.С.Нагалюк²,
А.Н.Смирнов^{1,5}, В.В.Попов³, В.Н.Вьюгинов⁴, Р.Г.Шифман⁴,
Ю.С.Кузмичёв⁴, Н.К.Травин⁴, О.В. Венедиктов⁴**

¹УРАН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

²ГК «Нитридные кристаллы»

³ОАО «Светлана»

⁴ ЗАО «Светлана-Электронприбор»

⁵Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

Полуизолирующие 6H-SiC подложки для применения в современной электронике

Описаны результаты работ в ОАО «Светлана» по созданию базовой промышленной технологии роста монокристаллического полуизолирующего карбида кремния и изготовления подложек из него. Обсуждены параметры полученных подложек и рассмотрены наиболее перспективные применения.

Исследования карбида кремния (SiC) как материала для полупроводниковой электроники начались в Ленинграде (С. Петербурге) с работ О.В. Лосева, которые он проводил в ФТИ им. А. Ф. Иоффе в тридцатых годах прошлого века [1,2]. Уже в послевоенные годы эти исследования были продолжены сотрудниками ФТИ им. А.Ф.Иоффе и ЛЭТИ им В.И.Ульянова (Ленина). Были проведены широкие исследования электрофизических свойств данного материала, отработаны технологии получения объёмных кристаллов SiC, создания р-п структур, формирования омических контактов и меза-структур. Были разработаны прототипы целого ряда полупроводниковых приборов на основе SiC: диодов Шоттки [3], полевых транзисторов JFET [4] и MESFET [5], УФ фотоприёмников [6], р-і-п диодов [7] и ЛПД [8]. В последние годы технология роста объёмных кристаллов полуизолирующего карбида кремния (SI SiC), разработанная ГК «Нитридные кристаллы», была передана в ЗАО «Светлана-Электронприбор», где создано производство подложек из этого материала, включающее не только рост, но также резку объёмных кристаллов на пластины, их шлифовку, полировку и подготовку поверхности для эпитаксии [9].

Для роста монокристаллических слитков карбида кремния используется технология сублимации. Она основана на испарении источника поликристаллического SiC и осаждения его компонент на монокристаллическую затравку SiC, находящуюся в более холодном месте реактора [10-14]. Рост происходит в вакууме или атмосфере инертного газа. Техническая реализация ростовой установки с индукционным нагревом представлена на рисунке 1. С использованием двух подобных установок, разработанных и поставленных ГК «Нитридные кристаллы» в ЗАО «Светлана-Электронприбор», начато промышленное производство подложек полуизолирующего ($\rho \geq 10^5$ Ом х см) карбида кремния политипа 6H диаметром три дюйма. Были выращены кристаллы SI SiC двух типов: легированные

ванадием и без дополнительного легирования. Для получения полуизолирующего материала был разработан процесс синтеза чистого источника SiC из порошков Si и C.



Рисунок 1

Выращенные кристаллы SI SiC обрабатываются на технологической линейке, состоящей из самого современного импортного оборудования. Для резки кристаллов на пластины используется станок многопроволочной резки японской фирмы Takatori модели MWS-45SN (рис. 2). Японская фирма Takatori является одним из крупнейших производителей станков многопроволочной резки со свободным абразивом. Большинство мировых производителей полупроводниковых материалов использует оборудование данной марки, в том числе, фирма CREE – крупнейший производитель подложек SiC. За много лет на рынке фирма накопила немалый опыт в производстве оборудования резки и создала ноу-хау, например, процесс особого качания роликов, которые позволяют получать подложки с превосходными параметрами поверхности и геометрии при сравнительно высокой скорости реза даже таких твердых материалов как SiC. Станок MWS-45SN позволяет резать кристаллы SI SiC диаметром до 4 дюймов на пластины с разбросом толщины менее 20 мкм и нарушенным слоем, не превышающим 15 мкм.



Рисунок 2

Для шлифовки и полировки пластин после резки применяется оборудование немецкой фирмы Peter Wolters. Двусторонняя шлифовка осуществляется на станке AC470L (рис. 3), а двусторонняя полировка – на станке AC470P. Эти станки имеют одинаковую конструкцию. На станке AC470L производится обработка пластин с помощью суспензии на основе смеси порошков карбида кремния и карбида бора с зерном $18\div 20$ мкм, а на станке AC470P – с помощью алмазной суспензии с зерном 3 мкм. Эта технология в отличие от односторонней обработки, позволяет получить не только требуемые характеристики шероховатости – на обеих сторонах не более 2 нм после полировки, но и величины прогиба и коробления подложек, не превышающие 5 мкм. Разброс толщины по ансамблю подложек не превышает 1 мкм, что полностью удовлетворяет требованиям к этому параметру для последующей ХМП.



Рисунок 3

Финишная подготовка поверхности подложек с качеством, пригодным для эпитаксии (epi-ready), производится на станке 32GPAW-TD японской фирмы SpeedFam (рис. 4). В результате химико-механического полирования поверхность подложки имеет шероховатость менее $2\text{\AA}$.

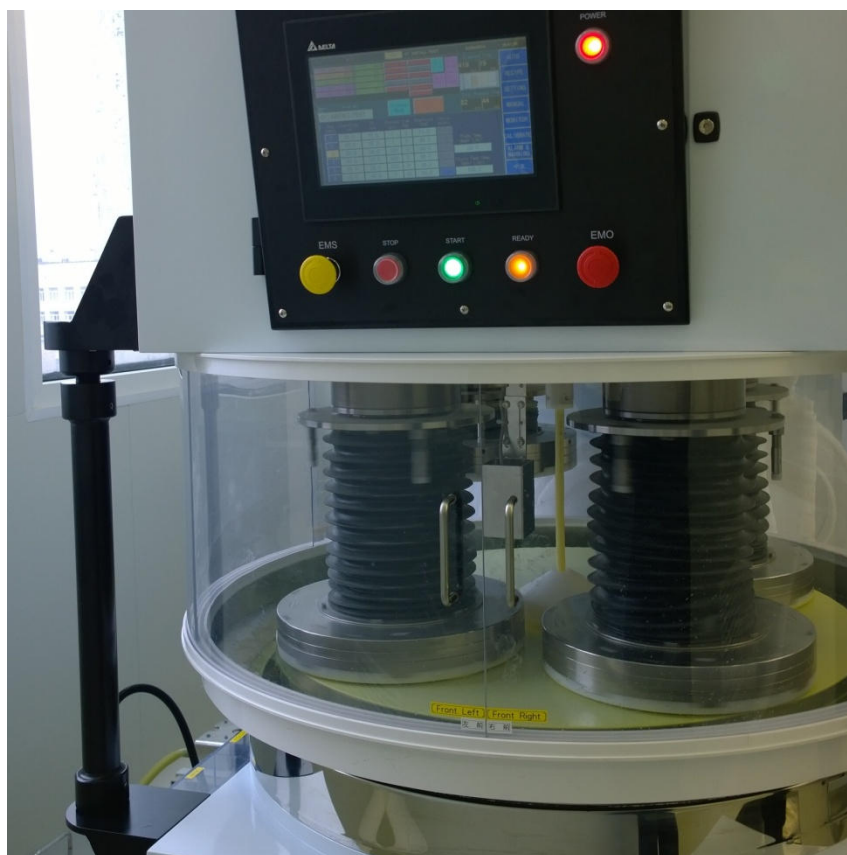


Рисунок 4

В составе технологической линейки имеются также средства для контроля

геометрических характеристик и электрических свойств подложек.

Описанное выше оборудование для резки, шлифовки, полировки и химико-механического полирования подложек было выбрано на основе предварительного тестирования. Выращенные в ЗАО «Светлана-Электронприбор» кристаллы SI SiC были переданы в Японию изготовителю станка MWS-45SN. После теста по резке на фирме Takatori полученные пластины были переданы в Германию на фирму Peter Wolters, где шлифовались и полировались на станках AC470L и AC470P. Впоследствии отполированные подложки были отправлены в Тайвань для ХМП на заводе SpeedFam на станке 32GPAW-TD. По результатам технологических процессов оценивалась пригодность оборудования для обработки подложек. В настоящее время вся обработка осуществляется в Санкт-Петербурге на участке, созданном в ЗАО «Светлана-Электронприбор».

Структурное совершенство и политипная однородность подложек была исследована рентгеновскими методами и Рамановской спектроскопией. Измерения кривых дифракционного отражения (КДО) на симметричном отражении (0006) 6H-SiC проводились на двухкристальном спектрометре, собранном на базе промышленного дифрактометра ДРОН-3 с медным антикатодом $\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 15,40563$ нм. В качестве монохроматора использовался бездислокационный монокристалл 6H-SiC, выращенный традиционным методом Лэли, что обеспечивало практически бездисперсионную схему измерений и таким образом позволяло оценивать реальные полуширины КДО. Полуширины рентгеновских кривых качания (FWHM) полученных подложек находятся в диапазоне 20-40 arcsec (Рис.5).

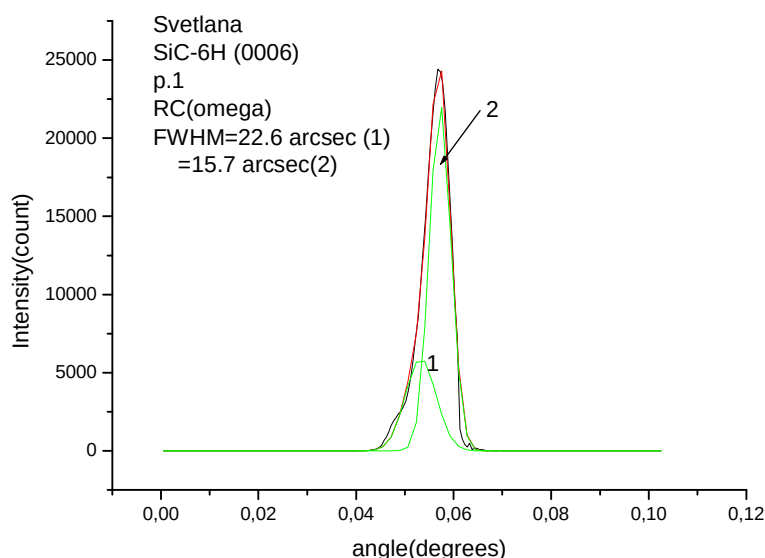


Рисунок 5

Определение плотности дислокаций в пластинах карбида кремния осуществлялось с помощью метода селективного травления в расплаве щелочи (KOH). Для удобства пластины SiC разрезались на квадраты со стороной 1см. Температура расплава KOH составляла 550-600°C, а время травления – от 5 до 20 минут. Для идентификации дефектов

использовалась оптическая микроскопия. После 20-ти минутного травления следы механической полировки полностью исчезали и на поверхности оставались только ямки травления, обусловленные различного рода дислокациями, присутствующими в пластинах SiC. При этом размеры ямок увеличились до 10-15 мкм. Плотность дислокаций на поверхности подложек не превышает $1 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Рамановские измерения проводились на спектрометре Horiba Jobin-Yvon T64000 при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния $z(xx)\bar{z}$. В качестве источника возбуждения использовался аргоновый лазер ($\lambda=514 \text{ нм}$). Анализ спектров показал, что подложка SI 6H-SiC производства ЗАО «Светлана-Электронприбор» является структурно-однородной по площади и не содержит включений других политипов, кроме 6H-SiC. Положения фоновых линий симметрии $E_2(\text{TO})$ (см. рис.6) соответствуют их положению в недеформированных слоях SiC, что также характерно и для подложек SI 6H-SiC производства фирмы CREE.

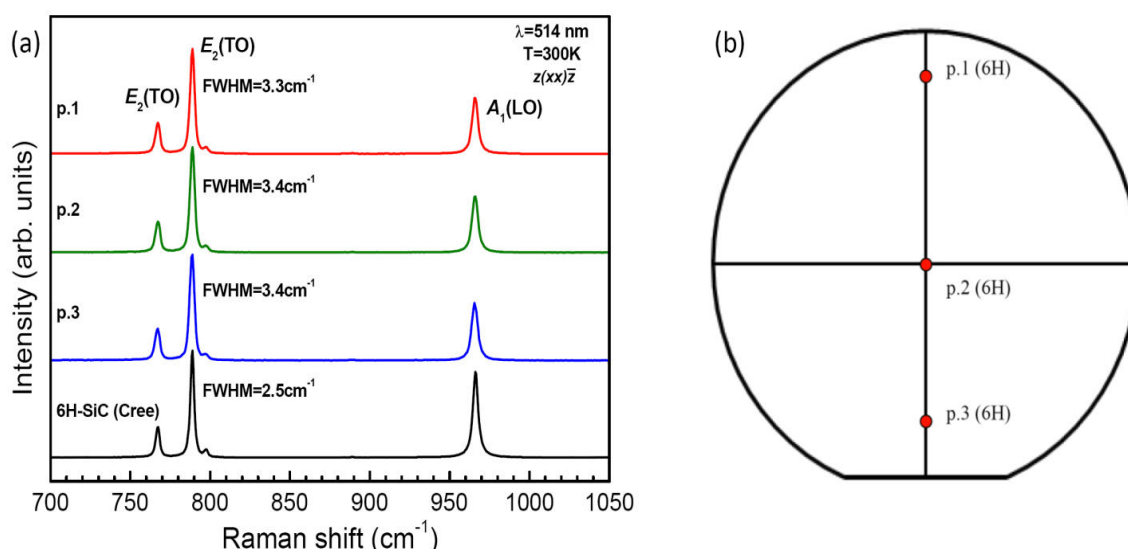


Рисунок 6. Рамановские спектры подложки SI 6H-SiC (a), полученные в разных точках образца (b). На рисунке (a) для сравнения приведен спектр подложки SI 6H-SiC производства фирмы CREE.

Таким образом, согласно полученным экспериментальным данным подложки SI 6H-SiC производства ЗАО «Светлана-Электронприбор» по своему качеству практически не уступают подложкам фирмы CREE.

Рассмотрим возможные практические применения полученных подложек SI 6H-SiC производства ЗАО «Светлана-Электронприбор».

Подложки могут быть использованы для создания MESFET транзисторов (ПТШ) на эпитаксиальных пленках SiC. На основе известных соотношений [15] можно оценить характеристики подобного транзистора. Для расчёта использовались следующие параметры.

Легирование канала $N_d = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Глубина канала $a = 0,2 \text{ мкм} = 2 \times 10^{-5} \text{ см}$

Длина канала $L = 1 \text{ мкм} = 1 \times 10^{-4} \text{ см}$

Ширина канала $Z = 1 \text{ мм} = 10^{-1} \text{ см}$

Согласно литературе [16]:

Подвижность электронов $\mu = 400 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$

Напряжение пробоя $U_{br.max} = 200 \text{ В}$

Диэлектрическая проницаемость 6H-SiC принималась $\epsilon = 10$

Диэлектрическая проницаемость вакуума $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-14} \text{ ф/см}$

Заряд электрона $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$

Определим максимальный ток насыщения I_p [15]

$$I_p = \frac{2 Z \mu q^2 N_d^2 a^3}{6 \epsilon \epsilon_0 L} \approx 1,2 \text{ А}$$

Известно, что толщина слоя объёмного заряда W равна:

$$W = (2 \epsilon \epsilon_0 U / q N_d)^{1/2}$$

Отсюда, полагая, что в момент перекрытия канала слой объёмного заряда равен глубине канала $W = a$, получаем напряжение U перекрытия канала без учета контактной разницы потенциалов U_k на границе металл-полупроводник:

$$U = a^2 q N_d / 2 \epsilon \epsilon_0 \approx 7 \text{ В}$$

С учетом контактной разницы потенциалов $U_k \approx 1 \text{ В}$ напряжение отсечки, приложенное к затвору относительно истока, равно $U_o = U - U_k \approx 6 \text{ В}$.

Максимальная рабочая частота F_m определяется по известной формуле:

$$F_m = q N_d \mu a^2 / \pi L^2 \epsilon \epsilon_0 \approx 18 \text{ ГГц}$$

Для определения величины напряжения пробоя $U_{пр}$ сначала найдем толщину W_{max} слоя объёмного заряда, соответствующую напряжению пробоя для данной концентрации в канале:

$$W_{max} = (2 \epsilon \epsilon_0 U_{br.max} / q N_d)^{1/2} = 3,3 \text{ мкм}$$

Для длины канала $W=L$ напряжение пробоя составляет

$$U_{пр} = U_{br.max} L / W_{max} \approx 60 \text{ В}$$

Рассчитанные параметры транзисторов соответствуют литературным данным [17-18] на полевые транзисторы SiC.

В последние годы усилился интерес к получению и исследованию планарных наноуглеродных слоев, так называемого графена. Графен (англ. graphene) – это двумерный кристалл, состоящий из одного (или нескольких) слоев атомов углерода, соединённых посредством sp^2 связей в гексагональную двумерную кристаллическую решётку [19].

Среди достоинств графена можно отметить высокую подвижность носителей тока ($\sim 10^4$ см²/(В×с)) при комнатной температуре, высокую механическую прочность, сочетание прозрачности и низкого электрического сопротивления. Данные слои стабильны при комнатной температуре на воздухе и могут быть использованы для создания нанотранзисторов. Использование графена в качестве основы компонентной базы будущей нанoeлектроники позволит преодолеть ограничения, свойственные традиционной кремниевой электронике и касающиеся степени миниатюризации и энергопотребления устройств [20-21]. Фирма INTEL рассматривает графен как одну из возможных основ микроэлектроники будущего и как возможную замену кремния в интегральных микросхемах.

Существует несколько методов получения графена – «отшелушивание» от куска графита, выращивание на поверхности SiC методом термодеструкции, химическое осаждение на поверхности металлов, и др. (см. Таблицу 1).

Таблица 1

Технология	Существующие недостатки для промышленного применения
Механическое «отшелушивание»	Пленки неправильной формы и небольшой площади
Химическая интеркаляция	Неконтролируемая толщина получаемых пленок. Часто не происходит полного разделения отдельных плёнок, образцы в форме «книги».
Осаждение на поверхности металлов	Для создания приборов требуется отделения пленки от поверхности металлов и перенесение на диэлектрическую подложку. При этом происходит значительное ухудшение свойств графена
Электрохимические методы	Неконтролируемость формы и размеров получаемых плёнок
Термодеструкция поверхности карбида кремния в атмосфере инертных газов	Подвижность носителей заряда уступает подвижности в плёнках, полученных отшелушиванием. Других недостатков нет.

Наилучшим структурным совершенством обладают слои графена полученные методом отшелушивания. Однако эти слои имеют микронные размеры и неправильную геометрическую форму. Это делает их малопригодными для промышленного применения.

На втором месте по структурному совершенству и электрофизическими параметрам находятся пленки графена, полученные методом термодеструкции на поверхности карбида кремния (рис. 5). Такие пленки, выращенные на подложках SiC диаметром 3 дюйма, демонстрируют однородность параметров по всей площади пластины. Подобные пластины могут быть использованы в стандартной технологической линейке для изготовления полупроводниковых приборов. Дополнительным преимуществом данной

технологии является то, что графеновые пленки на полуизолирующей подложке SiC не требуется переносить на подложку диэлектрика, как это имеет место при росте на Mo и других металлах.

Достоинством метода термодеструкции SiC также является низкая себестоимость и достаточно высокое структурное совершенство полученных плёнок графена. Только на плёнках графена, полученных отшелушиванием и термодеструкцией, удалось наблюдать квантовый эффект Холла [22]. Все остальные технологии производят плёнки с худшим структурным совершенством. Технология на основе термодеструкции SiC сейчас рассматривается как наиболее перспективная с точки зрения промышленного применения в электронике.

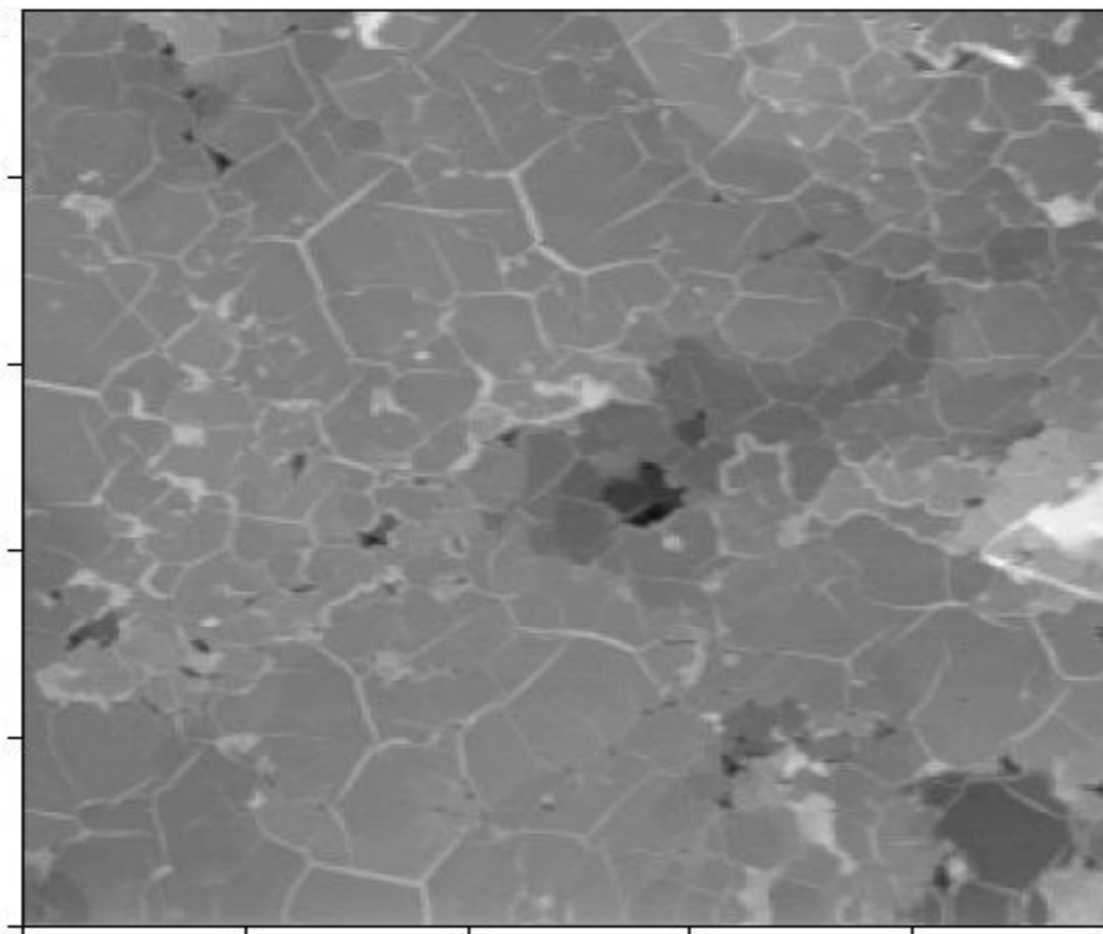


Рисунок 5

Поиск широкозонных полупроводников, которые могли бы заменить кремний для создания различных типовых силовых приборов, проводились достаточно давно [23]. Достигнутый в последние годы успех в технологии GaN и твёрдых растворов на его основе позволяет по-новому взглянуть на эту проблему. В Таблице 2 представлено сравнение параметров ряда полупроводниковых материалов. Как видно из таблицы, GaN уступает SiC лишь в теплопроводности. Кроме того, рост GaN происходит при меньших температурах и с использованием более дешёвых материалов. Широкому использованию GaN для производства силовых приборов мешало отсутствие собственной подложки и низкое структурное совершенство получаемых эпитаксиальных слоёв.

Таблица 2

Параметры	Полупроводники			
	Si	GaAs	GaN	6H-SiC
Запрещённая зона, эВ	1,1	1,4	3,4	3,1
Подвижность электронов, см ² /В×с	1400	8500	1000 (объём) 2000 (2DEG)	600
Скорость насыщения, см/с, 10 ⁷	1	2	2,5	2
Критическая напряженность электрического поля В/см, 10 ⁶	0,3	0,4	> 5	4
Теплопроводность, Вт/см	1690	1510	> 1700	> 2100

Другой проблемой является получение сильно легированного p+ GaN эмиттера. Однако для униполярных приборов – диодов Шоттки (ДШ) и HEMT транзисторов это недостаток несущественен. Достигнутый прогресс в технологии позволил получить дешевые ДШ на напряжение ~ 1200 В [24] и HEMT транзисторы [25], которые не уступают аналогичным приборам на основе пленок SiC.

Отсутствие собственной подложки GaN приводит к тому, что эпитаксиальные слои GaN чаще всего выращиваются на сапфире. Однако такая подложка является изолятором и не позволяет изготавливать приборы в вертикальной геометрии. Кроме того, сапфир обладает низкой теплопроводностью, что существенно снижает выходную мощность прибора и ограничивает область его применения. С нашей точки зрения, дальнейшее развитие технологии для силовой электроники лежит в области GaN HEMT на подложках SiC. Использование более дорогой, чем сапфировые, подложки SiC, можно было бы компенсировать за счёт использования более дешёвой технологии роста эпитаксиальных слоёв HVPE вместо MOCVD.

Заключение

Согласно полученным экспериментальным данным разработанные ЗАО «Светлана-Электронприбор» SI 6H-SiC подложки по своему качеству практически не уступают подложкам других производителей. Они могут быть использованы как для гомоэпитаксии SiC, так и для гетероэпитаксии III-N и создания плёнок графена.

Результаты работы доложены на 1-й Российско-Белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники», посвященной 110-летию со дня рождения О. В. Лосева, Нижний Новгород, 11-14 сентября 2013 г [9].

Работа частично выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

Библиографический список

1. А.Г.Остроумов, А.А.Рогачёв, О.В.Лосев — пионер полупроводниковой электроники. Сб. Научных трудов. Физика: проблемы, история, люди/ Под ред. В.М.Тучкевича. Наука Л. (1986).
2. М.А.Новиков, Олег Владимирович Лосев — пионер полупроводниковой электроники. ФТТ, 46, (2004) 5-9.
3. Аникин М.М., А.Н.Андреев, А.А.Лебедев, С.Н.Пятко, М.Г.Растегаева, Н.С.Савкина, А.М.Стрельчук, А.Л.Сыркин, В.Е.Челноков, Высокотемпературный диод Шоттки, ФТП 25, (1991) 328.
4. М.М.Аникин, П.А.Иванов, А.Л.Сыркин, Б.В.Царенков, В.Е.Челноков SiC 6H — полевой транзистор с рекордной для карбидкремневых транзисторов крутизной, Письма в ЖТФ, 15 (1989) 36.
5. А.А.Лебедев, М.М.Аникин, М.Г.Растегаева, Н.С.Савкина, А.Л.Сыркин, В.Е.Челноков, Полевой транзистор на основе 6H-SiC с затвором в виде диода Шоттки, ФТП, 29 (1995) 1231-1236.
6. М.М.Anikin, A.N.Andreev, S.N.Pyatko, N.S.Savkina, A.M.Strelchuk, A.L.Syrkin and V.E.Chelnokov, UV photodetectors in 6H-SiC, Sensotrs and Actuators A, 33 (1992) 91-93.,
7. A.V.Bludov, M.S.Boltovets, K.V.Vasilevski, A.V.Zorenko, K.Zakentes, A.A.Lebedev, V.A.Krivitsa. *Simulation and prototype fabrication of microwave modulators with 4H-SiC p-I-n diode*. Material science Forum V 457-460 (2004) 1089-1092.
8. K.V.Vasilevski, A.V.Zorenko, K.Zekentes, Experimentsl observation of microwave oscillations produced by pulsed silicon carbide IMPATT diodes, Electron.letters 37 (7), (2001) 466-467.
9. 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.
10. Yu.M.Tairov, and V.F.Tsvetkov, Investigation of Growth proceses of ingots of silicon carbide single crystals, J.Crystal Growth 43 (1978) 209-212.
11. Yu.A.Vodakov and E.N.Mokhov Patent USSR No 403275 (1970), Patent GB No 1458445 (21/02/74), Patent USA (1970) No. 4147575 (03/04/79).
12. E.N.Mokhov, I.L.Shulpina, A.S.Tregubova, and Yu.A.Vodakov, Cryst. Res. Technol. 16 (1981) 879
13. S.Yu.Karpov, Yu.N.Makarov, E.N.Mokhov, M.G.Ramm, M.S.Ramm, A.D.Roenkov, R.A.Talalaev, Yu.A.Vodakov, Analysis of silicon carbide growth by sublimation sandwich method, J. of Crystal Growth 173 (1997) 408-416.
14. С.М.Зи Физика полупроводниковых приборов, Москва, «Энергия», 1973
15. M.E.Levinshstein, S.L.Rumyantsev, M.S.Shur 2001 Properties of Advanced Semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe (New York: Wiley)
16. J.H.Yim et al, 4H-SiC Planar MESFETs on High-Purity Semi-insulating Substrates, Materials Science Forum V 556-557 (2007) pp 763-766
17. S.Katakami, M.Ogata, S. Ono and M.Arai, Improvement of Electrical Characteristics of Ion Implanted 4H-SiC MESFET on a Semi-insulating Substrate, Materials Science Forum V 556-557 (2007) pp 803-806/
18. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov, Electric field effect in atomically thin carbon films, Science 306, 666 (2004).
19. M.C. Lemme, Current status of graphene transistors, Solid State Phenomena 156, 499 (2009).
20. F. Schwierz, Graphene transistors, Nature Nanotech. 5, 487 (2010)
21. Y. Wu, Y. Lin, K. Jenkins et al, RF performance of short channel graphene field-effect transistor, Tech. Dig. of Int. Electron Device Meeting (IEDM), 226 (2010).
22. A.Tzalenchuk, S.lara-Avila, A.Kalaboukhov, S.Paolillo, M.Syvajarvi, R.Yakimova, O.Kazakova, T.J.B.M. Janssen, V.Fal'ko and S.Kubatkin, Nature Nanotechnology 5, 186-189 (2010).
23. А.А.Лебедев, В.Е. Челноков Широкозонные полупроводники для силовой электроники, ФТП, т33, №9, (1999), стр1096-1099

24. L.Young, et.al. Field plate engineering for GaN-based Schottky barrier diodes, J. of Semiconductors, V 34 No 5 (2013) 054007
25. J.R .LaRoche, B.Luo, F. Ren, K.H. Baik, D.Stodilka, B Gila, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, A. Usikov, D. Tsvetkov, V.Soukhoveev, G. Gainer, A.Pechnikov, V. Dmitriev, G.-T. Chen, C.-C. Pan, J.-I. Chyi. GaN/AlGaIn HEMTs grown by hydride vapor phase epitaxy on AlN/SiC substrates.: Solid-State Electronics 48, pp. 193-196 (2004).

The research of SiC material for semiconductor electronics began in Leningrad (Saint-Petersburg) from the pioneer works by O.V. Losev, pursued in Ioffe Physical-Technical Institute in 1930-s. These studies were continued at the Ioffe Institute and at St. Petersburg State Electro-technical Technical University "LETI". Extensive studies of the electrophysical parameters of this material were pursued. Bulk SiC crystals, p-n structures, ohmic contacts, and mesa-structures were obtained and studied. Prototypes of many semiconductor devices on SiC were developed, such as Shottky diodes, field-effect transistors (JFETs and MESFETs), UV photo detectors, p-i-n diodes and IMPATT diodes. The technology of bulk semi-insulating silicon carbide (SI SiC) crystal growth, developed by the group of companies Nitride Crystals, was transferred to JSC "Svetlana-Electronpribor", where the manufacturing of the wafers from this material is founded at the present moment. The complete technological cycle includes bulk crystal growth, multi wire slicing, double side lapping, polishing, and CMP. The SI 6H-SiC wafers, developed by JSC "Svetlana-Electronpribor", are approximately equal in quality to those of the other manufacturers. They can be used for SiC homoepitaxy, heteroepitaxy of III-N materials and for graphene films production. The results of the research were presented at the 1-st Russian-Belorussian scientific and technical Conference "The Russian Radio Electronics Element Base", devoted to the 110 anniversary of O.V. Losev's birth, held in Nizhny Novgorod, September 11-14, 2013.