

Разработка транзисторных гетероструктур нитрида галлия (GaN) на темплейтах 3C-SiC/Si(111) методом MOCVD

С.Д. Федотов^{1,3}, В.В. Лундин², С.Н. Родин², А.В. Сахаров², А.Ф. Цацульников², А.В. Бабаев^{1,3}

¹ООО ОНСИ

²НТЦ Микроэлектроники РАН

³АО Эпиэл

Аннотация: в докладе показаны актуальные результаты разработки и оптимизации технологического процесса формирования начального слоя состава (Al, Ga)N на подложке кубического карбида кремния на кремнии методом металлорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ). Определено, что оптимальной является многослойная буферная композиция из слоев (Al, Ga)N с последовательно уменьшающимся составом тройного раствора AlGa_{3-x}N. Изготовлены и исследованы экспериментальные образцы гетероэпитаксиальных структур GaN на подложке кубического карбида кремния на кремнии, проведены измерения подвижности электронов 2DEG в канале для приборных гетероструктур.

Ключевые слова: керамика, теплоёмкость, поляризация, титанат бария, энтропия

1. Введение

Технология транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе GaN на кремнии в последние десятилетия была определена как многообещающая платформа для разработки высокочастотных телекоммуникационных систем и систем управления питанием. Наличие подложек Si большого диаметра с низкой себестоимостью позволяет прогнозировать скорую интеграцию данной платформы в массовое производство потребительской электроники. На данный момент трудности, связанные с ростом материалов с высокой несогласованностью решеток и большой термоупругой деформацией, были преодолены с помощью буферных конструкций на основе (Al,Ga)N, выращенных на начальном слое AlN/Si. Однако в ряде научных работ сообщалось о паразитной диффузии примесей металлов III группы в кремниевую подложку и образовании инверсионного проводящего слоя на границе раздела AlN/Si [1,2]. Это приводило к увеличению паразитной проводимости и появлению потерь при работе СВЧ транзисторов на основе подобных гетероструктур [3]. Кроме того, технологичность проведения процесса металлорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) III-нитридов на кремнии крайне затруднена по причине разрушения поверхности Si при взаимодействии с атомами Ga. В этой связи использование слоя кубического карбида кремния (3C-SiC) как промежуточного слоя в процессе МОГФЭ GaN на Si является достаточно перспективным решением сложившейся технологической проблемы.

Формирование промежуточного слоя 3C-SiC на кремнии обладает рядом преимуществ: SiC обладает очень низкой реакционной способностью с различными элементами, используемыми при выращивании нитридов, что облегчает подготовку подложки и этапы образования зародышей [4]. Кроме того, в некоторых случаях положительный прогиб пластины, инициированный ростом SiC на Si(111), может уравновесить отрицательный прогиб подложки Si, возникающий вследствие роста AlGa_{3-x}N с деформацией сжатия на слоях AlN. Потенциальное преимущество таких виртуальных подложек (темплейтов, от англ. “template” – шаблон) 3C-SiC/Si было

продемонстрировано с помощью слоев GaN толщиной до 2 мкм без трещин, выращенных с довольно простой структурой буферного слоя в работах [5-6] с помощью метода МОГФЭ.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Эпитаксиальный рост Ga(Al)N гетероструктур на темплейтах 3C-SiC/Si диаметром 100 мм производился на опытно-промышленной МОГФЭ установке «Dragon - 125». Эпитаксиальный реактор данной установки обладает уникальным дизайном, оптимизированным с помощью компьютерного моделирования в ООО «Софт-Импакт». Горизонтальный реактор с индуктивным нагревом позволяет наращивать Ga(Al)N соединения с высокой скоростью: продолжительность процесса для НЕМТ-структур на Si составляет 1,5-2,5 ч [7].

В работе были использованы темплейты, полученные российским производителем (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург) [8], а также темплейты зарубежного производителя (Англия). Толщина слоя 3C-SiC на кремнии находилась в диапазоне 5-50 нм. Рост на промежуточном слое 3C-SiC методом MOCVD производился с помощью начального смачивающего слоя AlN. В зависимости от толщины слоя 3C-SiC варьировалась оптимальная толщина смачивающего слоя AlN и условия его роста. Формировались гетероструктуры толщиной до 3 мкм с канальной областью GaN для выбора оптимального варианта начального слоя AlN и буферной композиции тройного раствора $Al_xGa_{1-x}N$. Использовалась конструкция активной области с барьерным слоем $Al_xGa_{1-x}N$ и in situ пассивацией Si_3N_4 .

В процессе разработки буферной конструкции для роста на 3C-SiC было определено, что на данный момент оптимальной является многослойная буферная композиция из слоев (Al, Ga)N с последовательно уменьшающимся составом тройного раствора $Al_xGa_{1-x}N$. На рисунке 2 показана типичная рефлектограмма процесса роста гетероструктуры (Ga, Al)N на темплейте 3C-SiC/Si(111). Полученные гетероструктуры были изучены с помощью рентгеноструктурного анализа, растровой электронной микроскопии (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

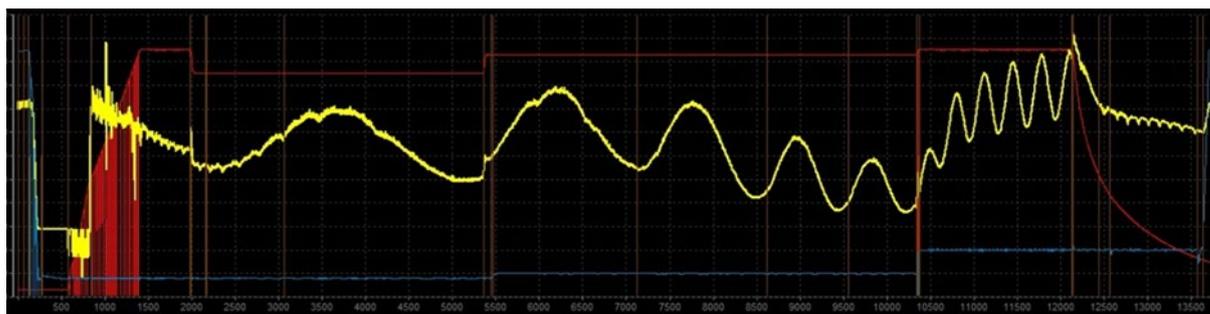


Рисунок 2. Рефлектограмма процесса роста тестовой гетероструктуры (Ga, Al)N на темплейтах 3C-SiC/Si.

На рисунке 3 показаны снимки РЭМ срезов гетероструктур (Ga, Al)N, выращенные на темплейтах 3C-SiC/Si. Исследование поверхности слоев GaN показало отсутствие инверсионных доменов, однако присутствовали характерные структурные дефекты типа «pinhole» (V-образные дефекты). Это может быть связано как с наличием микропор, характерных для слоев 3C-SiC полученных методом замещения атомов, так и с неоптимальным режимом роста начального слоя AlN в MOCVD процессе. Судя по снимкам РЭМ, поверхность слоя GaN достаточно гладкая и однородная.

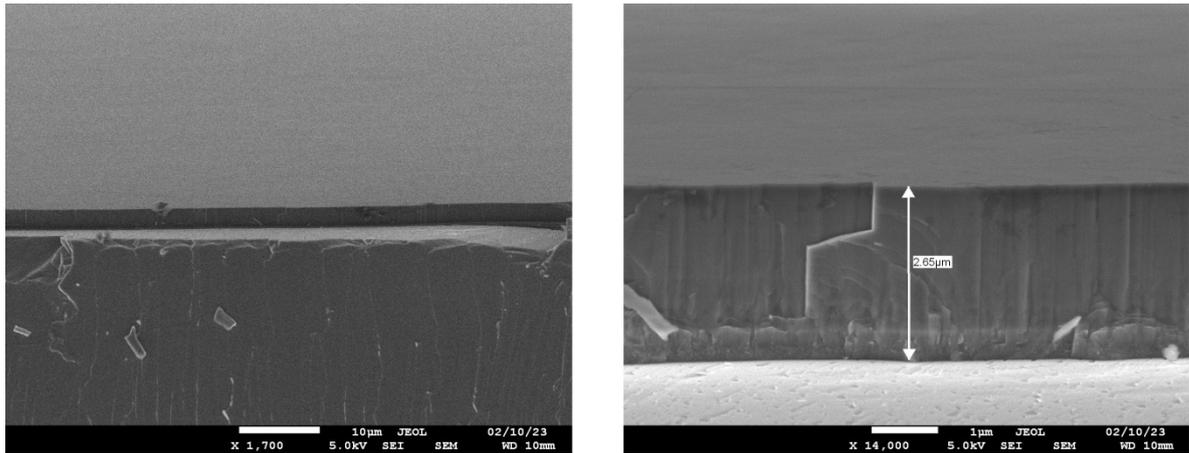


Рисунок 3. Снимки РЭМ срезов гетероструктуры GaN (без активной области) на темплексте 3C-SiC/Si.

Стоит отметить подтверждение защитных свойств 3C-SiC на кремнии, упоминаемых в работах [4-6]. Использование 3C-SiC позволяет защитить поверхность кремния от разрушающего воздействия прекурсоров, используемых в MOCVD процессе, а также от металлического Ga, накапливающегося на внутренней поверхности реактора во время роста GaN. Использование темплекстов 3C-SiC/Si позволило проводить подряд до 5-6 процессов роста в серии, не прибегая к замене оснастки реактора или химическим методам удаления депозитов. Аналогично объемным подложкам 4H-SiC, ростовая поверхность 3C-SiC сохраняет свои изначальные свойства на начальных стадиях роста соединений (Ga, Al)N.

Проведены исследования электрофизических свойств выращенных на Dragon-125 гетероструктур (подвижности μ , концентрации n и слоевого сопротивления R_s) с помощью измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау. Омические контакты на фрагменты гетероструктур с активной областью AlGaIn были нанесены с помощью жвжгания эвтектики индия. Измерения проведены на установке Escoria HMS-3000 (Ю. Корея). Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 2. Результаты измерений электрофизических параметров при 297К

Номер образца	$n \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$	$\mu, \text{ см}^2/\text{В} \times \text{сек}$	$R_s, \text{ Ом } \square$
Образец № 1			
#005e – 1	1.43	1430	305
#005e – 2	1.28	1550	315
Образец № 2			
#011c – 1	1.54	1610	255
#011c – 2	1.38	1730	260
Образец № 3 (калибровочный, на Si)			
#124c – 1	1.5	1540	278
#124c – 2	1.6	1460	268

Полученные результаты показывают достаточно высокий уровень полученных электрофизических параметров GaN НЕМТ гетероструктур, выращенных на подложках 3C-SiC/Si(111). Сравнение с калибровочным процессом № 3, где аналогичная гетероструктура с активной областью AlGaIn выращена на стандартном высокоомном кремнии, позволяет заключить, что электрофизические параметры образцов № 1 и № 2 находятся в пределах погрешности измерений (до 20%) или

превосходят образец № 3.

3. Заключение

Разработан и оптимизирован технологический процесс формирования начального слоя состава (Al, Ga)N на подложке кубического карбида кремния на кремнии, определено, что оптимальной является многослойная буферная композиция из слоев (Al, Ga)N с последовательно уменьшающимся количеством Al в тройном растворе AlGa₃N. Продемонстрирована потенциальная возможность формирования гладких, качественных слоев канального GaN на темплейтах 3C-SiC/Si, сравнимых с результатами идентичного процесса роста GaN на epi-ready подложках Si(111). Рост качественного слоя GaN в реакторе с депозитами (последовательные процессы) возможен только на темплейтах 3C-SiC/Si. В случае использования чистого Si(111), не покрытого защитным слоем SiC, атомарный Ga из депозитов взаимодействует с поверхностью Si, делая ее непригодной для эпитаксиального роста III-N. Использование темплейтов 3C-SiC/Si позволит значительно увеличить производительность процессов роста транзисторных гетероструктур GaN на кремнии за счет возможности проведения непрерывных серий по 5-10 процессов без необходимости полной очистки реактора от депозитов GaN после каждого процесса роста. Получены и исследованы приборные гетероструктуры на темплейтах 3C-SiC/Si(111) диаметром 100 мм. Показано, что электрофизические характеристики 2DEG в каналах тестовых транзисторов не уступают или превосходят транзисторы с аналогичной конструкцией на гетероструктурах GaN/Si.

Работа выполнена при финансовой поддержке **Фонда содействия инновациям**, соглашение № 30ГТС2РЭС1472138 от 24.12.2021 г.

Список литературы

1. H. Yacoub, D. Fahle, M. Finken, H. Hahn, C. Blumberg, W. Prost, H. Kalisch, M. Heuken, A. Vescan // *Semicond. Sci. Technol.* 2014, 29, 115012.
2. H. Chandrasekar, M. J. Uren, M. A. Casbon, H. Hirshy, A. Eblabla, K. Elgaid, J. W. Pomeroy, P. J. Tasker, M. Kuball // *IEEE Trans. Electron. Devices* 2019, 66, 1681.
3. F. Berber, D. W. Johnson, K. M. Sundqvist, E. L. Piner, G. H. Huff, H. R. Harris // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2017, 65, 1465.
4. Y. Cordier, F. Semond, J. Massies, M. Leroux, P. Lorenzini, C. Chaix // *J. Cryst. Growth* 301/302 (2007) 434.
5. Y. Cordier, M. Portail, S. Chenot, O. Tottereau, M. Zielinski, T. Chassagne // *J. Cryst. Growth* 310 (2008) 4417.
6. H. M. Liaw, R. Venugopal, J. Wan, and M. R. Melloch, *Solid-State Electron.* 45, 1173 (2001).
7. Лундин В.В. и др. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // *Научное приборостроение.* – 2017. – Т. 27, № 1. – с. 5-9.
8. S.A. Kukushkin, K. Kh. Nussupov, A.V. Osipov, N.B. Beisenkhanov, D.I. Bakranova // *Superlattices and Microstructures*, Volume 111, 2017, p. 899-911.