

ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ СТРУКТУР GaN/AlGaIn В ХЛОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ Cl₂/Ar/O₂

А.В.Желаннов, Б.И.Селезнев*, Д.Г.Федоров

PLASMA ETCHING OF GaN/AlGaIn STRUCTURES IN A CHLORINE-CONTAINING MEDIUM Cl₂/Ar/O₂

A.V.Zhelannov, B.I.Seleznev*, D.G.Fedorov

ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Boris.Seleznev@novsu.ru

Рассмотрено травление гетероструктур GaN/AlGaIn на установке Sentech SI-500 с источником индуктивно-связанной плазмы. Травление проводилось в хлорсодержащей газовой смеси Cl₂/Ar с добавкой различных количеств кислорода. Исследовано влияние различных технологических факторов на скорость травления и селективность травления между слоями GaN и AlGaIn: количество кислорода в газовой смеси, мощность источника индуктивно-связанной плазмы, высокочастотная мощность. Установлены режимы травления, при которых селективность травления слоев GaN/AlGaIn достигает 30:1. С помощью разработанной технологии плазменного травления подготовлен маршрут изготовления транзисторов на основе гетероструктур с проводящими сар-слоями. Показано улучшение характеристик при использовании проводящего сар-слоя за счет уменьшения контактного сопротивления и сопротивления канала. Получены значения плотности тока 380 мА/мм и крутизны 143 мСм/мм.

Ключевые слова: нитрид галлия, гетероструктура AlGaIn/GaN, травление, индуктивно-связанная плазма, хлор, кислород, селективность, технологический процесс, транзисторная структура, выходные характеристики

Для цитирования: Желаннов А.В., Селезнев Б.И., Федоров Д.Г. Плазменное травление структур GaN/AlGaIn в хлорсодержащей среде Cl₂/Ar/O₂ // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.21-26. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).21-26](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).21-26)

Etching of GaN/AlGaIn heterostructures on a Sentech SI-500 installation with an inductively coupled plasma source is considered. Etching was carried out in a chlorine-containing Cl₂/Ar gas mixture with the addition of various amounts of oxygen. The influence of various technological factors on the etching rate and etching selectivity between GaN and AlGaIn layers: the amount of oxygen in the gas mixture, power source, inductively coupled plasma, high-frequency power. Etching modes have been established in which the selectivity of etching of GaN/AlGaIn layers reaches 30:1. Based on the developed plasma etching technology, a route for manufacturing transistors based on heterostructures with conductive cap layers has been developed. It is shown that the characteristics are improved when using a conductive cap layer by reducing the contact resistance and channel resistance. The values of the current density of 380 mA/mm and the steepness of 143 mS/mm are obtained.

Keywords: gallium nitride, heterostructure GaN/AlGaIn, etching, inductively coupled plasma, chlorine, oxygen, selectivity, technological process, transistor structure, output characteristics

For citation: Zhelannov A.V., Seleznev B.I., Fedorov D.G. Plasma etching of GaN/AlGaIn structures in a chlorine-containing medium Cl₂/Ar/O₂ // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.21-26. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).21-26](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).21-26)

1. Введение

Нитрид галлия (GaN) как материал для высокотемпературных, высоковольтных, высокочастотных и сильноточных приложений позволяет существенно расширить операционные возможности полупроводниковой техники. Уникальное сочетание физических свойств, включающее большую ширину запрещенной зоны, высокую дрейфовую скорость насыщения электронов, большие напряжения пробоя, высокую теплопроводность, высокую химическую и термическую стабильность, позволяет рассматривать GaN как наиболее перспективный материал для создания микроэлектронных приборов нового поколения. Именно с внедрением GaN в настоящее время связывается прогресс в СВЧ- и сильноточной электронике [1,2].

В настоящее время эпитаксиальные слои нитрида галлия преимущественно выращиваются на подложках сапфира (Al₂O₃) и карбида кремния (SiC), а в

последнее время проявляется интерес к получению нитрида галлия и на кремнии. Коммерциализации приборной GaN технологии способствовали успехи в разработке и промышленном освоении оборудования и технологии эпитаксиального наращивания GaN на подложках кремния большого диаметра [3].

При разработке приборных структур правильный выбор параметров исходного материала во многом определяет достижение предельных характеристик готового устройства. Для получения предельных характеристик транзисторных структур на основе AlGaIn/GaN важным является использование защитных (т.н. сар) слоев, в роли которых могут выступать как тонкие диэлектрические пленки (SiN, SiO₂, Al₂O₃), так и тонкие полупроводниковые слои нитрида галлия (легированные или нелегированные). Однако из-за низкой подвижности и широкой запрещенной зоны нелегированных слоев AlGaIn обычные подходы использования AlGaIn как поверхностного

защитного слоя ограничивают производительность устройств, особенно для СВЧ мощных приложений. Для уменьшения контактного сопротивления вводятся нелегированные или слабо легированные тонкие слои GaN, при этом характеристики приборов не улучшаются из-за увеличения расстояния от затвора до канала и уменьшения индуцированных пьезоэлектрических зарядов. Следовательно, добавление сильнолегированного n^+ -GaN слоя поверх традиционной HEMT структуры AlGaIn/GaN может улучшить производительность приборов. В то же время этот легированный слой должен быть удален перед формированием затворной металлизации Шоттки для уменьшения тока утечки затвора.

Химическое травление в растворах ограничено из-за сильной химической связи азота с галлием. Ограничения жидкостного травления для нитридов III группы вызвало значительный интерес к развитию «сухих» методов травления с малыми энергиями заряженных частиц в хлорсодержащей среде [4].

При использовании сухого травления в процессе изготовления приборных структур необходимо обеспечить относительно высоких скоростей, гладкой морфологии поверхности, минимального внесения дефектов и селективности травления. В HEMT структурах часто используются GaN *cap* слои [5]. Поэтому необходима разработка технологии селективного травления GaN/AlGaIn.

2. Исследование режимов плазменного травления структур GaN/AlGaIn

Для реализации «сухого» метода травления в данной работе использовалась установка с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП) Sentech SI-500 с широким диапазоном плазменных процессов. Пре-

имуществом использования ИСП является возможность травления низкоэнергетичными ионами большой плотности. В процессах травления источник ИСП использовался совместно с высокочастотным (ВЧ) электродом. Это обеспечивало режим реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме, позволяющий управлять напряжением смещения на ВЧ электроде. Напряжение смещения определяло энергию заряженных частиц, взаимодействующих с микроэлектронными структурами на нитриде галлия.

Большая концентрация заряженных частиц в реакторе и малые энергии заряженных частиц во время протекания плазмохимических процессов обеспечивают высокую скорость и качество травления, гладкую морфологию поверхности, селективность травления, позволяют минимизировать концентрацию радиационных дефектов в приповерхностных слоях гетероструктуры.

В качестве исходных образцов использовались эпитаксиальные структуры, выращенные методом MOCVD (химическое осаждение из газовой фазы) с использованием металлоорганических соединений) на сапфировой подложке диаметром 2 дюйма. Эпитаксиальная структура состояла из буферного слоя GaN толщиной 2,2 мкм, слоя $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$ толщиной 80 нм и слоя GaN толщиной 80 нм. Для формирования рельефа поверхности использовалась маска на основе фоторезиста.

Травление образцов проводилось в газовой среде на основе Cl_2/Ar с добавкой различных количеств кислорода (от 0 до 10 cm^3/min) при мощности ИСП источника 75, 100 и 200 Вт и смещении (ВЧ мощность) 30, 60 и 90 Вт при давлении в камере 1,2 Па.

В настоящей работе исследовалось влияние параметров плазмы при травлении в хлорсодержащей

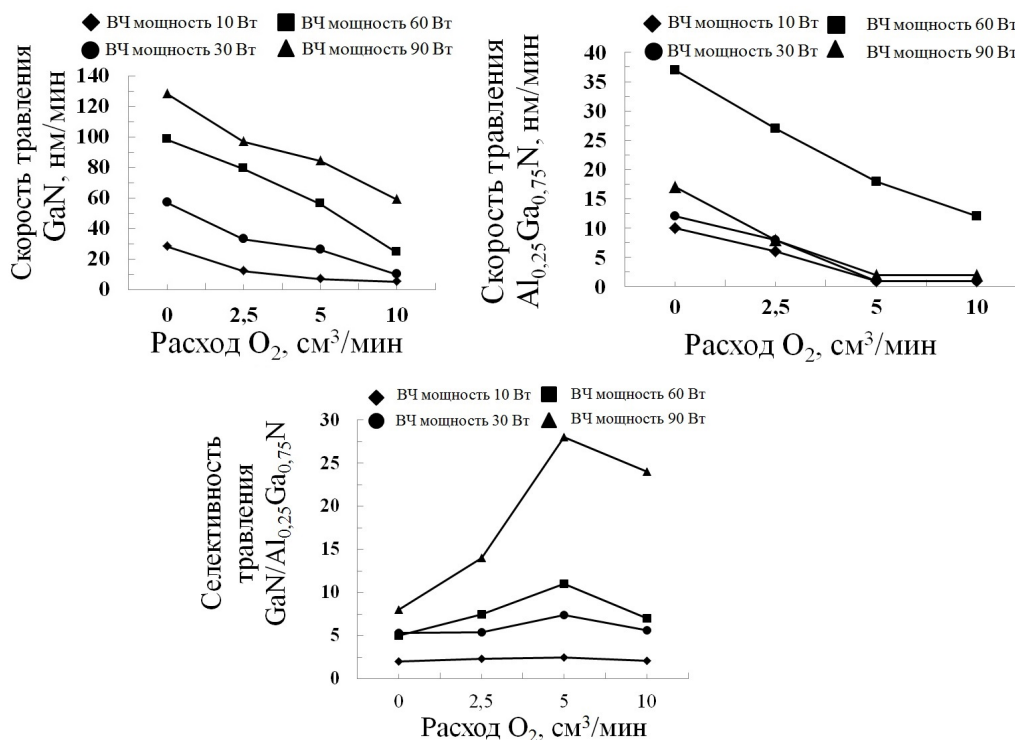


Рис.1. Зависимости скорости и селективности травления структур GaN/AlGaIn в хлорсодержащей среде $Cl_2/Ar/O_2$ от высокочастотной мощности

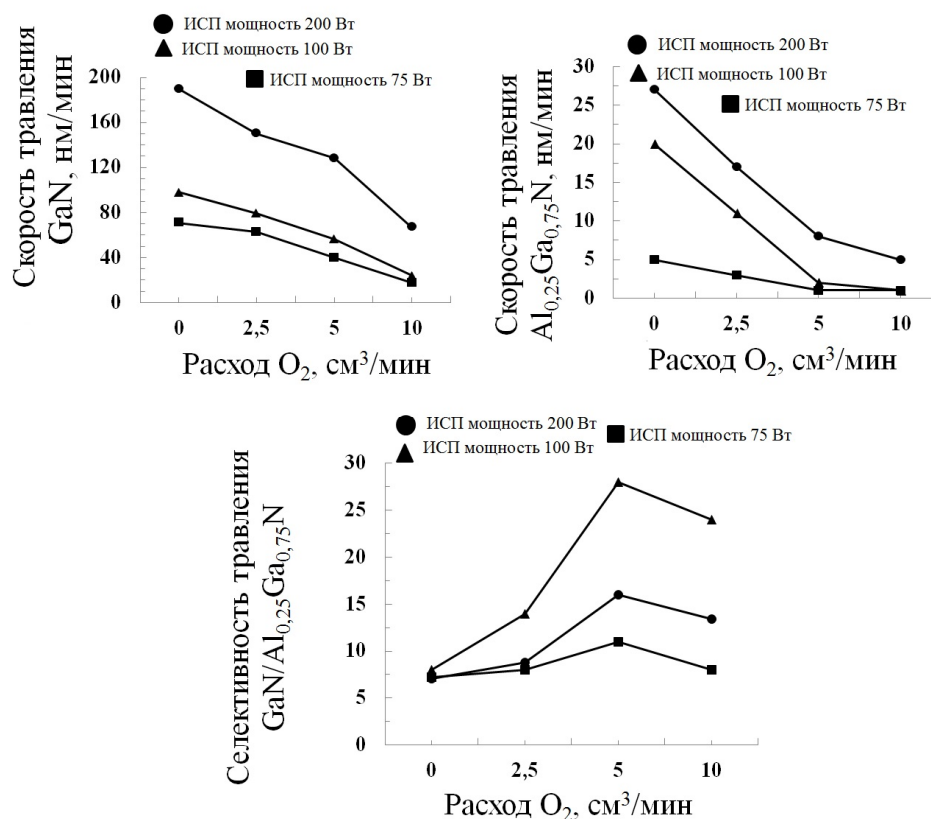


Рис.2. Зависимости скорости и селективности травления структур GaN/AlGaN в хлорсодержащей среде Cl₂/Ar/O₂ от мощности источника индуктивно-связанной плазмы

среде Cl₂/Ar с добавкой кислорода на скорость травления и селективность: ИСП мощность, ВЧ мощность, расход кислорода. Селективность травления GaN/AlGaN структур достигается путем введения кислорода в газовую смесь Cl₂/Ar. Кислород, содержащийся в плазме, реагирует с алюминием в слое AlGaN с образованием оксидного барьера на поверхности. Это предотвращает дальнейшее травление, а также защищает поверхность от ионной бомбардировки [6].

На рис.1, 2 представлено влияние расхода кислорода в газовой смеси Cl₂/Ar на скорость и селективность травления между GaN и AlGaN при разных значениях ИСП мощности и смещения.

Как видно из рис.1, добавление кислорода в газовую смесь резко снижает скорость травления GaN и AlGaN. Это связано с окислением слоя AlGaN при взаимодействии с кислородом и образованием стойкого к травлению в хлоре соединения. При этом зависимость селективности травления от расхода кислорода имеет максимум при расходе 5 см³/мин и составляет величину 30:1. Реактивное ионное травление в индуктивно-связанной плазме оксидной пленки на AlGaN происходит при смещениях на ВЧ электроде от 30 до 60 Вт при мощности источника 100 Вт. Использование сравнительно невысокого смещения и плазмы высокой плотности обеспечивает селективное удаление оксидной пленки.

Также исследовалось влияние мощности источника индуктивно-связанной плазмы на скорость и селективность травления GaN и AlGaN (рис.2). Как видно из рис.2, зависимость селективности травления имеет максимум при расходе кислорода 5 см³/мин и

значении ИСП мощности 100 Вт. Меньшие значения мощности не обеспечивают необходимых скоростей травления из-за достаточно низкой плотности плазмы. При значении мощности больше 100 Вт происходит рост скорости травления AlGaN в связи с более плотной плазмой и, соответственно, снижение селективности.

3. Формирование транзисторов на основе структур GaN/AlGaN с применением плазменного травления

Полученные режимы селективного травления использовались в технологии изготовления транзисторов на гетероструктурах с применением проводящих *cap*-слоев.

Структуры, задействованные в работе, были выращены на сапфировых подложках методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлорганических соединений (MOCVD). Структура слоев представлена на рис.3. Подвижность и концентрация носителей заряда в структуре с *n*⁺-слоем составляли 1820 см²/В·с и 1,04×10¹³ см⁻². Для структур без защитного слоя эти параметры составляли 1675 см²/В·с и 1,21×10¹³ см⁻². Уменьшение концентрации носителей заряда вызвано антинаправлением пьезоэлектрической поляризации между слоем *n*⁺-GaN и AlGaN барьерным слоем, где пьезоэлектрические заряды являются основными носителями заряда в HEMT AlGaN-GaN [7]. При этом уменьшение концентрации носителей заряда всегда приводит к более высокой подвижности двумерного электронного газа. После удаления защитного слоя под затворную металлизацию антинаправление пьезоэлектрического эффекта можно исключить.

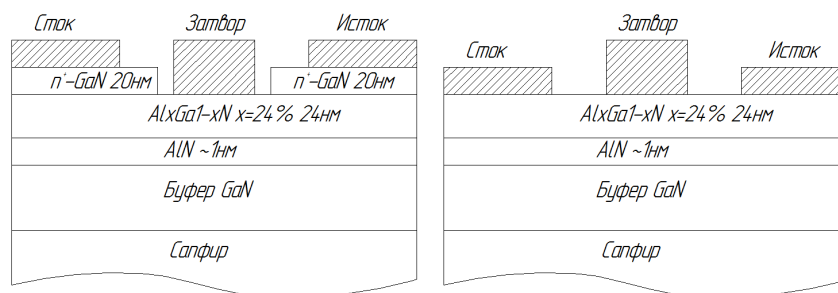


Рис.3. Поперечное сечение структур, используемых в работе

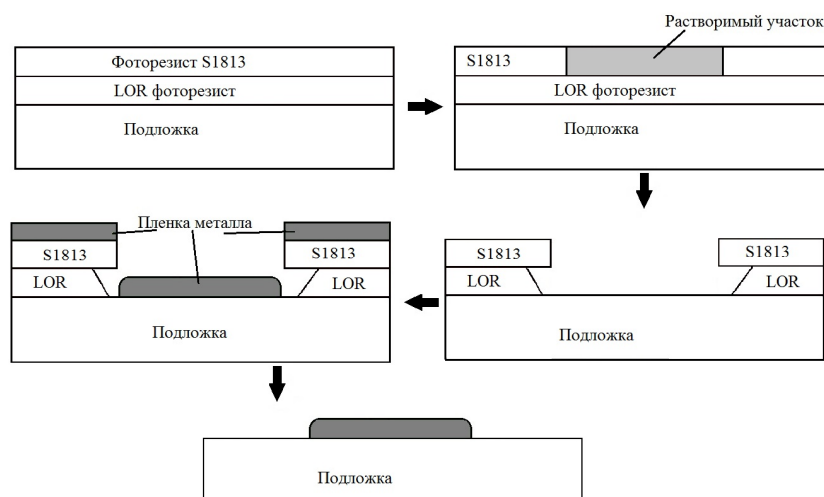


Рис.4. Этапы формирования резистивной маски под «взрывную» фотолитографию

Изготовление приборных структур начиналось с формирования меза-изоляции. Под формированием мезы подразумевается создание структуры на гетероэпитаксиальной пластине с проводящими (активными) и непроводящими слоями с помощью травления поверхности гетероструктуры. Цель операции — отделение активных областей, на которых формируются приборы, друг от друга, чтобы избежать электрического контакта между приборами. Ограничения жидкостных методов травления для нитридных полупроводников приводят к необходимости внедрения плазменных методов травления. Наиболее эффективной в настоящее время является технология травления нитридных полупроводников в плазме с использованием источников на индуктивном ВЧ-разряде. Такие источники позволяют создавать более плотную плазму с высокой однородностью и управляемостью.

В данной работе для формирования мезаизоляции применялось травление в смеси $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$ с использованием ИСП плазмы со скоростью 800 нм/мин [8].

Омические контакты стока и истока формировались с помощью процесса взрывной фотолитографии с применением двухслойной системы фоторезистов LOR 10A и S1813. Использование двухслойной системы на основе LOR резиста позволяет формировать отрицательный наклон стенок, облегчающий процесс удаления металлизации и обеспечивающий ровный край контактных площадок, как показано на рис.4. В качестве металлизации омических контактов

применялась система $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$, изготавливаемая электронно-лучевым напылением. Отжиг металлизации проводился при температуре 820°C в течение 30 секунд в атмосфере азота.

Оценка контактного сопротивления выполнялась методом длинной линии [9] с набором квадратных контактных площадок 100×100 мкм с расстоянием между ними 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мкм. Расчет контактного сопротивления дает величину 0,8 Ом·мм для структуры с $\text{n}^+\text{-GaN}$ защитным слоем и порядка 1,0 Ом·мм для структур без защитного слоя.

Измерение зависимости сопротивления от расстояния по методу длинной линии и вольт-амперные характеристики контактов с расстоянием 30 мкм для рассматриваемых структур представлены на рис.5 и 6.

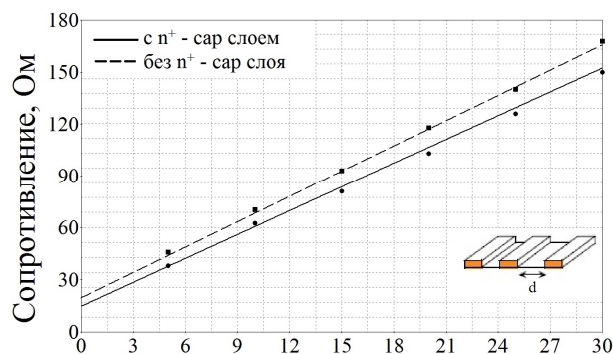


Рис.5. Зависимость сопротивления от расстояния между контактными площадками. На вставке представлен фрагмент тестовой структуры

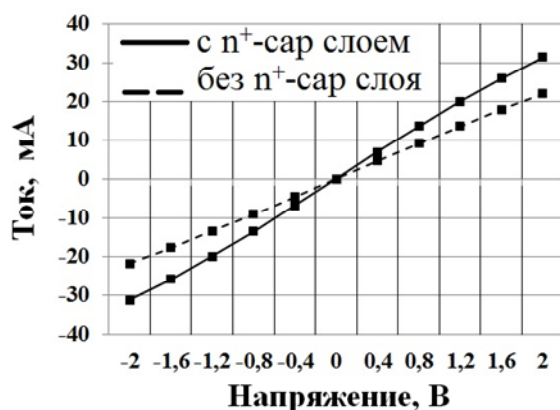


Рис.6. Вольт-амперные характеристики сток-исток на разных структурах

Перед формированием барьерной металлизации необходимо провести удаление проводящего сар слоя GaN. Для проведения этой операции, был разработан процесс селективного травления GaN относительно AlGaIn, описанный выше.

В соответствии с представленными выше зависимостями были выбраны режим травления $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{O}_2$ 60/10/10 $\text{см}^3/\text{мин}$, ИСП мощность 200 Вт, ВЧ мощность 30 Вт и давление 1,2 Па, позволяющие получить максимальное значение селективности травления.

После удаления n^+ -GaN слоя проводилось формирование барьерной металлизации. Затворы транзисторных структур длиной 1,0 мкм и шириной 100 мкм изготавливались путем последовательного выполнения электронно-лучевого напыления системы Ni/Au и взрывной фотолитографии.

После формирования контактных систем транзисторной структуры приборы пассивировались пленкой Si_3N_4 , полученной плазмо-химическим осаждением при температуре 250°C. Диэлектрическая пленка обеспечивает стабилизацию поверхностных состояний приборной структуры.

4. Характеристики транзисторных структур

В результате проведенного технологического процесса были получены макетные образцы транзисторных структур. Исследование характеристик начиналось с определения параметров барьерной металлизации с использованием тестовых структур диодов Шоттки. Из вольт-амперной характеристики определялись высота барьера и коэффициент неидеальности. Результаты расчета приведены в таблице.

Расчет параметров барьерной металлизации

	Коэффициент неидеальности	Высота барьера, эВ
n^+	0,62	1,77
без n^+	0,66	1,73

Близкие значения параметров барьерной металлизации показывают, что разработанный процесс селективного травления не вносит значительных дефектов в барьерный слой AlGaIn.

Вольт-амперные и переходные характеристики изготовленных структур представлены на рис.7 и 8.

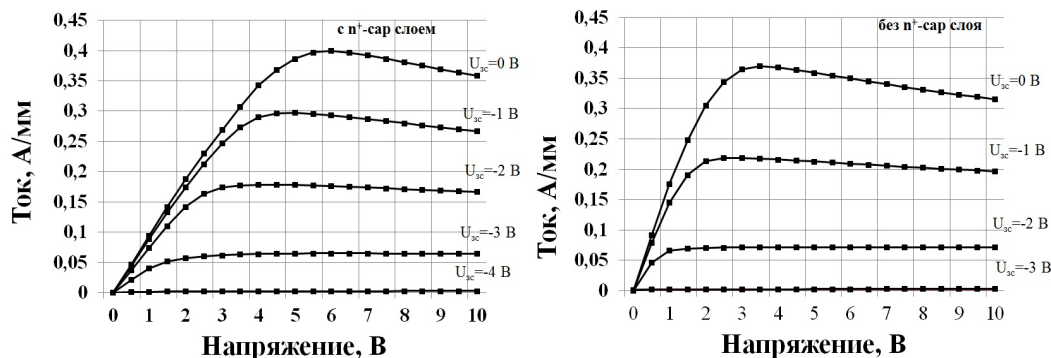


Рис.7. Выходные вольт-амперные характеристики транзисторных структур

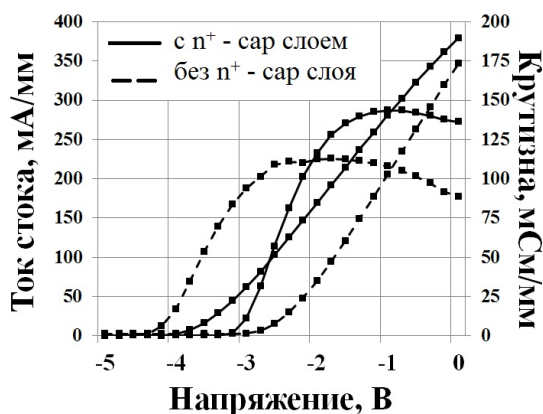


Рис.8. Переходные характеристики транзисторных структур

Отметим, что добавление проводящего слоя обеспечивает низкое удельное сопротивление проводящего канала. Это приводит к низкому пороговому напряжению, большей крутизне и плотности тока. Для структур с n^+ -GaN максимальная крутизна и плотность тока были 380 мА/мм и 143 мСм/мм, в то время как для структур без защитного слоя они составляли 345 мА/мм и 112 мСм/мм.

5. Заключение

Таким образом, в ходе проведенной работы получены режимы селективного травления между слоями GaN и AlGaIn, определено влияние на эти режимы основных технологических параметров: мощности источника индуктивно-связанной плазмы, высокочастотной мощности и количества кислорода. Достигнутая величина селективности составляет 30:1 при режиме травления: мощность ИСП источника — 100 Вт; смещение — 60 Вт; давление в камере — 1,2 Па; расход газовой смеси $Cl_2/Ar/O_2$ — 60/10/5 см³/мин.

С использованием полученных режимов травления изготовлены транзисторы на основе гетероструктур с проводящими защитными слоями.

В работе проведено сравнение характеристик транзисторных структур с защитным сильнолегированным слоем нитрида галлия и без него. Показано улучшение характеристик при использовании n^+ -слоя за счет уменьшения контактного сопротивления и сопротивления канала. Получены значения плотности тока — 380 мА/мм, крутизны — 143 мСм/мм и плотности выходной мощности на уровне 5 Вт/мм.

1. Балакирев А., Туркин А. Перспективы нитрида галлия в СВЧ-электронике. Решения компании RFHIC // Электроника: наука, технология, бизнес. 2015. № 4(144). С.64-68.
2. Туркин А.Н. Гетероструктуры на основе GaN в СВЧ-электронике: обзор работ // Электроника: наука, технология, бизнес. 2018. № 6. С.1-4.
3. Боднар Д. Нитрид галлия – премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники // Компоненты и технологии. 2018. №4. С.134-137.
4. Павлов А.Ю., Гамкрелидзе С.А., Томош К.Н. и др. Технология изготовления взаимодополняющих транзисторов на нитриде галлия // Проблемы разработки перспективных микро- и наносистем. 2018. №3. С.69-74. DOI: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-69-74>
5. Wang W.K., Lin P.-C., Lin C.-H. et al. Performance enhancement by using the n^+ /GaIn cap layer and gate recess technology on the AlGaIn-GaN HEMT fabrication //

IEEE Electron device letter. 2005. Vol.26. №1. P.5-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2004.840395>

6. Zhelannov A.V., Seleznev B.I. Improvements in the performance of the n^+ cap-layer GaN in the formation of transistor structures based on AlGaIn/GaN // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol.441. Article number: 012065.
7. Heikman S., Keller S., Y.Wu et al. Polarization effects in AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN heterostructures // J. Appl. Phys. 2003. Vol.93. P.10114-10118. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1577222>
8. Желаннов А.В., Ионов А.С., Петров А.В., Селезнев Б.И. Использование технологии микропрофилирования при формировании приборных структур на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т.19. №7. С.399-405. DOI: <https://doi.org/10.17587/nmst.19.399-405>
9. Reeves G.K., Harrison H.B. Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements // IEEE Electron Device Letters. 1982. Vol.3. №5. P.111-113. DOI: 10.1109/EDL.1982.25502

References

1. Balakirev A., Turkin A. Perspektivy nitrída galliya v SVCh-elektronike. Resheniya kompanii RFHIC [GaN Prospects for Microwave Electronics. RFHIC's Solution]. Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes, 2015, no.4, pp.64-68.
2. Turkin A.N. Geterostruktury na osnove GaN v SVCh elektronike: obzor rabot [GaN heterostructures in microwave electronics: scientific papers review]. Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes, 2018, no.6, pp.70-73.
3. Bodnar' D. Nitrid galliya – prem'er sredi novykh materialov poluprovodnikovoy mikroelektroniki [Gallium nitride is a leader among new materials for semiconductor microelectronics]. Komponenty i tekhnologii, 2018, no.4, pp.134-137.
4. Pavlov A.Yu., Gamkrelidze S.A., Tomosh K.N., et al. Tekhnologiya izgotovleniya vzaimodopolnyayushchikh tranzistorov na nitrída galliya [The Technology of Manufacturing of Complementary Transistors on Gallium Nitride]. Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanosistem, 2018, no.3, pp.69-74. DOI: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-69-74>
5. Wang W.K., Lin P.-C., Lin C.-H., et al. Performance enhancement by using the n^+ /GaIn cap layer and gate recess technology on the AlGaIn-GaN HEMT fabrication. IEEE Electron device letter, 2005, vol.26, no.1, pp.5-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2004.840395>
6. Zhelannov A.V., Seleznev B.I. Improvements in the performance of the n^+ cap-layer GaN in the formation of transistor structures based on AlGaIn/GaN. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol.441, article #: 012065.
7. Heikman S., Keller S., Y.Wu, et al. Polarization effects in AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN heterostructures. J. Appl. Phys., 2003, vol.93, pp.10114-10118. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1577222>
8. Zhelannov A.V., Ionov A.S., Petrov A.V., Seleznev B.I. Ispol'zovanie tekhnologii mikroprofilirovaniya pri formirovani pribornykh struktur na osnove nitrída galliya [Micro-profiling Technique Use in Gallium Nitride Based Device Structure Formation]. Nano- i miksistemnaya tekhnika, 2017, vol.19, no.7, pp.399-405. DOI: <https://doi.org/10.17587/nmst.19.399-405>