

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПАССИВИРУЮЩИХ СЛОЕВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ GaN-ТРАНЗИСТОРАХ

С. А. ДЕМИДОВИЧ¹⁾, А. Д. ЮНИК¹⁾, С. В. КОЗОДОЕВ¹⁾,
Н. С. КОВАЛЬЧУК¹⁾, А. Г. ДЕМИДОВИЧ²⁾

¹⁾«Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,
ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Беларусь

²⁾Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО,
ул. Макаенка, 23, к. 1, 220114, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Разработка высоконадежных пассивирующих покрытий, подавляющих поверхностные токи утечки, является ключевой задачей современных транзисторов на основе нитрида галлия (GaN). Описывается всестороннее исследование свойств пленок нитрида кремния (SiN_x), синтезированных методом индуктивно связанного плазмохимического осаждения из газовой фазы (ICP-CVD) в уникальном режиме повышенного давления. Показывается, что варьирование ключевых параметров процесса осаждения позволяет эффективно управлять функциональными характеристиками пленок, такими как показатель преломления, уровень остаточных механических напряжений и диэлектрическая прочность. Наиболее значимым результатом является достижение рекордно высокого пробивного напряжения (>900 В) в пленках, осажденных в оптимальном режиме и характеризующихся минимальными внутренними напряжениями, что критически важно для предотвращения деформации пластины и деградации элементов. Полученные данные открывают возможность целенаправленного синтеза диэлектрических пленок SiN_x для интеграции в качестве высокоэффективных пассивирующих и защитных слоев в GaN-приборах, внося существенный вклад в повышение их надежности.

Ключевые слова: нитрид кремния; GaN-транзистор; диэлектрическая прочность; ICP-CVD.

Благодарность. Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Разработка технологических способов формирования контактно-барьерных структур силовых транзисторов на основе нитрида галлия для улучшения их энергоэффективности» (государственная программа научных исследований «Фотоника и микроэлектроника» на 2026–2030 гг., подпрограмма 5.3 «Микроэлектроника. Перспективные материалы, технологии» (грант Президента Республики Беларусь)).

Образец цитирования:

Демидович СА, Юник АД, Козодоев СВ, Ковальчук НС, Демидович АГ. Получение пленок нитрида кремния для формирования диэлектрических и пассивирующих слоев в высоковольтных GaN-транзисторах. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2026;1:44–52. EDN: YKNAJL

For citation:

Demidovich SA, Yunik AD, Kozodoev SV, Kovalchuk NS, Demidovich AG. Fabrication of silicon nitride films for forming dielectric and passivating layers in high-voltage GaN transistors. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2026;1:44–52. Russian. EDN: YKNAJL

Авторы:

Сергей Александрович Демидович – ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов.

Андрей Дмитриевич Юник – ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов.

Сергей Владимирович Козодоев – ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов.

Наталья Станиславовна Ковальчук – кандидат технических наук, доцент; заместитель генерального директора, главный инженер.

Александра Георгиевна Демидович – начальник отдела управления качеством.

Authors:

Sergey A. Demidovich, leading engineer at the branch laboratory of new technologies and materials.

sdemidovich@integral.by

<https://orcid.org/0009-0006-8791-9272>

Andrey D. Yunik, leading engineer at the branch laboratory of new technologies and materials.

ayunik@integral.by

Sergey V. Kozodoev, leading engineer at the branch laboratory of new technologies and materials.

skozodoev@integral.by

Natalya S. Kovalchuk, PhD (engineering), docent; deputy general director and chief engineer.

nkovalchuk@integral.by

Alexandra G. Demidovich, head of the department of quality management.

selina29@yandex.ru

FABRICATION OF SILICON NITRIDE FILMS FOR FORMING DIELECTRIC AND PASSIVATING LAYERS IN HIGH-VOLTAGE GaN TRANSISTORS

S. A. DEMIDOVICH^a, A. D. YUNIK^a, S. V. KOZODOEV^a,
N. S. KOVALCHUK^a, A. G. DEMIDOVICH^b

^a«Integral» – Holding Management Company, 121a Kazinka Street, Minsk 220108, Belarus

^bScientific and Technical Centre «LEMT» of the BelOMO,
23 Makajonka Street, 1 building, Minsk 220114, Belarus

Corresponding author: S. A. Demidovich (sdemidovich@integral.by)

Abstract. The development of highly reliable passivation coatings that suppress surface leakage currents is a key challenge for modern gallium nitride (GaN) transistors. A comprehensive study of silicon nitride (SiN_x) films synthesised by inductively coupled plasma chemical vapour deposition (ICP-CVD) using a unique elevated pressure regime is described. It is shown that varying the key deposition process parameters makes it possible to effectively control the functional characteristics of the films, such as the refractive index, residual mechanical stress level and dielectric strength. The most significant result is the achievement of a record-high breakdown voltage (>900 V) in films deposited under the optimal regime and characterised by minimal internal stress, critically important for preventing wafer deformation and element degradation. The obtained data demonstrate the possibility of the targeted synthesis of SiN_x dielectric films for integration as highly effective passivating and protective layers in GaN devices, making a significant contribution to enhancing their reliability.

Keywords: silicon nitride; GaN transistor; dielectric strength; ICP-CVD.

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the research work «Development of technological methods for forming contact-barrier structures of power transistors based on gallium nitride to improve their energy efficiency» (state programme of scientific research «Photonics and microelectronics» for 2026–2030, subprogramme 5.3 «Microelectronics. Advanced materials, technologies» (President's of the Republic of Belarus grant)).

Введение

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (*high electron mobility transistors*, HEMT) на основе нитрида галлия (GaN) привлекают значительное внимание исследователей в области силовой электроники благодаря таким преимуществам, как высокое пробивное напряжение (V_{br}), низкое сопротивление в открытом состоянии и высокая скорость переключения [1; 2]. За последние два десятилетия их коммерческое внедрение, особенно для высоковольтных приложений и микроэлектромеханических систем, существенно возросло. Данной тенденции способствовало появление большого диаметра пластин, разработанных с помощью технологии GaN-on-Si и совместимых с обработкой в экономичных технологических линиях комплементарных структур металл – оксид – полупроводник [3; 4].

Хотя методы компенсации напряжений при эпитаксиальном росте позволяют получать пластины по технологии GaN-on-Si с приемлемо малым начальным прогибом (несмотря на значительную решеточную и тепловую несовместимость GaN и Si), проблема чрезмерной деформации пластин (*wafer bow*) становится критичной на последующих этапах изготовления силовых приборов. Причина заключается в необходимости нанесения множества толстых диэлектрических, пассивирующих и проводящих металлических слоев. Эта деформация вызывает трудности при фотолитографии, а возникающие остаточные механические напряжения (σ) могут приводить к деградации рабочих характеристик приборов, появлению дефектов и трещин на пластине, что в итоге снижает качество эпитаксиальных структур (*epi-wafer*) и выход годных приборов. Как показано в публикации [5], толстые пассивирующие слои, необходимые для обеспечения высокого рабочего напряжения, являются основным источником остаточных механических напряжений и деформаций.

Для изоляции и пассивации HEMT на основе AlGaN/GaN было продемонстрировано применение различных диэлектриков, например SiO₂ [6; 7], SiN_x [8; 9], SiON [10; 11], Al₂O₃ [12] и др. Эти материалы осаждались такими методами, как плазмохимическое осаждение из паровой фазы (*plasma enhanced chemical vapour deposition*, PECVD), химическое осаждение из паровой фазы при низком давлении (*low pressure chemical vapour deposition*, LPCVD), металлоорганическое химическое осаждение из паровой фазы (*metal-organic chemical vapour deposition*, MOCVD) *in situ* [13; 14].

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению механических и оптических свойств пассивирующих пленок нитрида кремния (SiN_x), формируемых методом индуктивно связанного

плазмохимического осаждения из газовой фазы (*inductively coupled plasma chemical vapour deposition*, ICP-CVD) при повышенном давлении. Основная цель исследования – разработка технологии получения пленок SiN_x с высокой диэлектрической прочностью, предназначенных для эффективной пассивации высоковольтных GaN-транзисторов.

Материалы и методы исследования

Осаждение проводилось на установке STE ICP200D (*SemiTEq*, Россия). Мощность высокочастотного генератора (частота 13,56 МГц), возбуждающего индуктивно связанную плазму, составляла 1000 Вт. Подложка размещалась на расстоянии 70 мм от плазменной зоны. Температура подложки (T) поддерживалась в диапазоне 400–500 °С посредством термостатируемого держателя. Рабочее давление в камере (P) варьировалось в диапазоне 15–20 Па и контролировалось с помощью автоматического дроссельного клапана. В качестве прекурсоров использовались моносилан (SiH_4) и азот (N_2). Соотношение потоков этих газов ($R = \frac{F(\text{SiH}_4)}{F(\text{N}_2)}$, где F – поток, см³/мин) являлось одним из ключевых варьируемых параметров.

Метод ICP-CVD был выбран ввиду наличия у него преимуществ, ключевых для задач пассивации GaN-приборов. К ним относятся возможность осаждения при повышенных давлениях, способствующая росту плотных пленок с контролируемым составом и низкой концентрацией дефектов; высокая плотность плазмы, обеспечивающая хорошую однородность покрытия на пластинах большого диаметра; относительно низкая ионная энергия, минимизирующая повреждение поверхности подложки по сравнению с методами прямого разряда (например, PECVD) [15].

Для оценки параметров диэлектрика использовались кремниевые подложки КДБ-12 диаметром 100 мм. Толщина пленки и показатель преломления (n) (на длине волны 632,8 нм) измерялись спектральным эллипсометром ЭМ-6022 (ОАО «Планар», Беларусь). Остаточные механические напряжения определялись по кривизне подложки до и после осаждения пленки с помощью хроматического датчика белого света (CWL-сенсора) на основе формулы Стоуни. Датчик калибровался по эталонным подложкам с известной кривизной. Погрешность определения напряжений не превышала 20 МПа. Изображения срезов тестовых образцов исследовались методом растровой электронной микроскопии на микроскопе S-4800 (*Hi-Tachi*, Япония). Морфология поверхности изучалась с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA Prima (*NT-MDT*, Россия).

Элементный состав пленок оценивался косвенно через корреляцию показателя преломления с данными, приведенными в работе [16] для пленок SiN_x . В ней $n \approx 2,00$ соответствует стехиометрическому составу пленки Si_3N_4 . Прямые измерения элементного состава (например, методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии) в рамках данной работы не проводились и являются предметом дальнейших исследований.

Для оценки диэлектрической прочности пленок SiN_x были изготовлены тестовые структуры металл – диэлектрик – полупроводник (далее – МДП-структуры) с площадью контактных слоев 1,6 мм² (рис. 1). Электрические характеристики измерялись с помощью анализатора силовых приборов B1505A (*Keysight Technologies*, США).

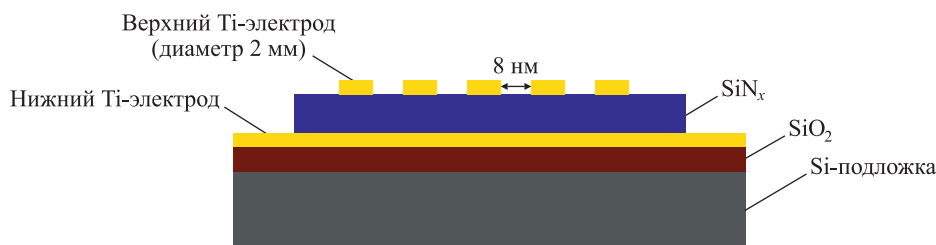


Рис. 1. Тестовая МДП-структура для измерения пробивного напряжения

Fig. 1. Metal – dielectric – semiconductor test structure for breakdown voltage measurement

Результаты и их обсуждение

Предварительные исследования, частично представленные в публикации [17], позволили установить особенности формирования пленок SiN_x методом ICP-CVD при повышенном давлении. На основе оптимизированных режимов было проведено осаждение пленок SiN_x с варьированием соотношения потоков рабочих газов SiH_4/N_2 для трех заданных комбинаций давления и температуры.

Оптические свойства. На рис. 2 представлена зависимость показателя преломления пленок SiN_x от соотношения потоков газов SiH_4/N_2 для трех различных комбинаций давления и температуры. Наблюдается, что значения показателя преломления близки при $R \approx 1,43$ для всех исследованных режимов давления и температуры. Этот факт может быть связан с достижением определенного состава (близкого к стехиометрическому) пленки Si_3N_4 при данном соотношении потоков газов. Однако при дальнейшем увеличении соотношения потоков газов (повышении доли SiH_4 в газовой смеси) наблюдается выраженная зависимость показателя преломления от условий осаждения. При $P = 15,0$ Па, $T = 400$ °С показатель преломления демонстрирует снижение относительно значений, полученных при более высоких давлениях и температурах ($P = 17,5$ Па, $T = 450$ °С и $P = 20,0$ Па, $T = 500$ °С). Такой результат может быть обусловлен несколькими факторами: уменьшением плотности пленки из-за меньшей энергии частиц в плазме, приводящей к менее плотной упаковке структуры; возможным увеличением содержания водорода в пленке, связанным с неполным разложением SiH_4 при пониженной температуре, что снижает среднюю поляризуемость материала (в соответствии с законом Гладстона – Дейла) [18]. Вместе с тем для режимов $P = 17,5$ Па, $T = 450$ °С и $P = 20,0$ Па, $T = 500$ °С показатель преломления демонстрирует схожие значения во всем исследованном диапазоне соотношения потоков газов, что указывает на сходные состав и плотность пленок при более энергетически насыщенных условиях осаждения, несмотря на разницу давлений и температур.

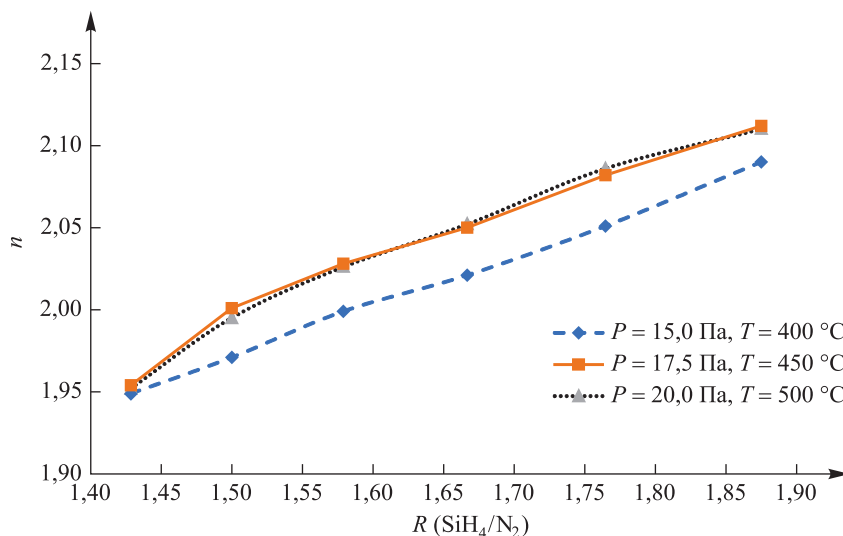


Рис. 2. Зависимость показателя преломления пленок SiN_x от соотношения потоков газов SiH_4/N_2 для трех комбинаций давления и температуры

Fig. 2. Dependence of the refractive index of SiN_x films on the gas flow ratio SiH_4/N_2 for three combinations of pressure and temperature

Остаточные механические напряжения. На рис. 3 представлена зависимость остаточных механических напряжений в пленках SiN_x от соотношения потоков газов SiH_4/N_2 для трех комбинаций давления и температуры. При $R \approx 1,43$ остаточные механические напряжения для всех режимов являются растягивающими (положительными) и составляют около 100 МПа. Такое значение остаточных механических напряжений типично для стехиометрического или близкого к нему состава пленки SiN_x . Оно часто связывается с различиями в коэффициентах термического расширения пленки и подложки при охлаждении после осаждения. При увеличении соотношения потоков газов (повышении доли кремния в газовой фазе) остаточные механические напряжения во всех случаях становятся сжимающими (отрицательными). Этот переход (и, соответственно, увеличение содержания кремния в пленке) является хорошо известным и объясняется формированием субстехиометрического SiN_x , где $x < \frac{4}{3}$ [19]. Пленки такого SiN_x

имеют тенденцию к образованию более плотной, сжатой структуры из-за внедрения избыточных атомов кремния в решетку или изменения характера межатомных связей. Видно, что интенсивность сжимающих остаточных механических напряжений существенно зависит от давления осаждения. Значения $|\sigma|$ в области сжимающих остаточных механических напряжений при $P = 20,0$ Па существенно ниже, чем при $P = 15,0$ Па и $P = 17,5$ Па. Разница составляет более 150 МПа при $R = 1,88$ (см. рис. 3). Снижение абсолютного значения сжимающих остаточных механических напряжений при самом высоком давлении

($P = 20,0$ Па) может быть следствием увеличения плотности ионной бомбардировки, способствующей релаксации напряжений за счет перестройки структуры; изменения микроструктуры пленки (например, уменьшения размера зерен или увеличения аморфности); возможного небольшого снижения содержания кремния в пленке при том же соотношении потоков газов из-за особенностей плазмохимии при повышенном давлении [20]. Остаточные механические напряжения при $P = 15,0$ Па и $P = 17,5$ Па имеют схожие значения в диапазоне $R = 1,43$ – $1,67$, однако они начинают заметно различаться в области наибольшего содержания кремния ($R = 1,76$ – $1,88$), где влияние температуры осаждения ($T = 400$ °С против $T = 450$ °С) на кинетику поверхностных процессов и подвижность атомов при формировании пленки становится более выраженным.

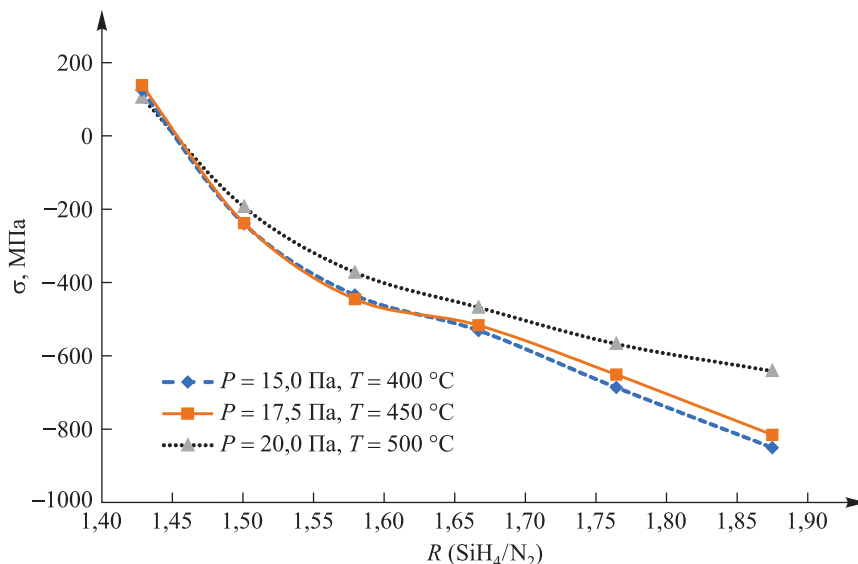


Рис. 3. Зависимость остаточных механических напряжений в пленках SiN_x от соотношения потоков газов SiH_4/N_2 для трех комбинаций давления и температуры

Fig. 3. Dependence of residual mechanical stress in SiN_x films on the gas flow ratio SiH_4/N_2 for three combinations of pressure and temperature

Электрические свойства. Для оценки диэлектрической прочности пленок SiN_x были изготовлены и исследованы МДП-структуры с пленкой SiN_x толщиной около 1500 нм (рис. 4), осажденные при выбранных давлениях и соотношениях потоков газов SiH_4/N_2 .

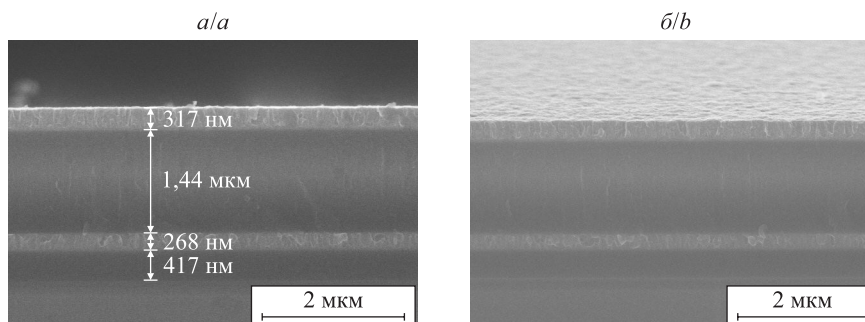


Рис. 4. Изображение среза тестовой МДП-структуры, исследованной методом растровой электронной микроскопии под разными углами (а, б)

Fig. 4. Cross-section images of a test MIS structure examined by scanning electron microscopy at different angles (a, b)

Среднее значение пробивного напряжения и стандартное отклонение рассчитывались по результатам измерений не менее чем в восьми точках на каждой структуре, за исключением выбросов. Для каждого из трех давлений осаждения был выбран свой диапазон соотношений потоков газов, чтобы охватить выявленную при анализе рис. 3 область перехода растягивающих остаточных механических напряжений в сжимающие. Это позволило исследовать влияние типа и величины остаточных механических напряжений на диэлектрическую прочность (см. таблицу).

Значения пробивного напряжения для пленок SiN_x, измеренные на МДП-структурах
Breakdown voltage values for SiN_x films measured on metal – dielectric – semiconductor structures

Р, Па	R (SiN _x /N ₂)	V _{br} , В															Статистические показатели		
		Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5	Образец 6	Образец 7	Образец 8	Образец 9	Образец 10	Образец 11	Образец 12	Образец 13	Образец 14	Образец 15	min	max	AVG
15,0	1,88	610	615	620	610	610	530	630	620	—	—	—	—	—	—	—	610	620	614
	1,76	710	720	720	710	740	500	730	740	—	—	—	—	—	—	—	710	740	722
	1,67	780	790	590	720	690	810	610	780	560	720	640	560	830	620	770	590	790	701
	1,58	730	640	920	660	890	530	580	520	670	810	920	480	330	950	550	520	920	682
	1,50	710	690	580	490	530	720	740	480	530	790	770	270	420	560	430	430	740	587
17,5	1,76	620	620	630	560	630	640	650	660	640	—	—	—	—	—	—	620	650	633
	1,67	150	700	680	650	670	720	700	660	680	670	—	—	—	—	—	650	700	676
	1,58	740	350	820	760	770	490	620	840	570	780	590	720	780	800	640	570	800	706
	1,50	450	470	540	520	940	900	940	750	810	550	750	500	520	820	320	470	900	648
	1,43	810	760	810	805	570	810	695	745	825	690	—	—	—	—	—	690	810	766
20,0	1,67	590	600	580	580	570	610	600	590	590	480	—	—	—	—	—	570	600	588
	1,58	690	700	710	710	450	740	720	700	560	630	—	—	—	—	—	560	720	678
	1,50	710	770	670	710	740	820	820	810	490	810	—	—	—	—	—	670	820	755
	1,47	1040	1020	1000	640	860	810	550	1020	980	—	—	—	—	—	—	640	1020	904
	1,43	460	780	800	970	490	710	810	320	720	660	—	—	—	—	—	460	810	679

Примечания: 1. Используемые обозначения: min – минимальное значение пробивного напряжения; max – максимальное значение пробивного напряжения; AVG – среднее значение пробивного напряжения. 2. Зеленым цветом выделены максимальные значения выбросов, красным цветом – минимальные значения выбросов.

Для наглядного сравнения на рис. 5 представлена зависимость пробивного напряжения от соотношения потоков газов для различных давлений осаждения. Наибольшее среднее значение пробивного напряжения ($V_{br} = 904$ В) было достигнуто для пленки, осажденной при $P = 20,0$ Па и $R = 1,47$. Важно отметить, что именно этим условиям осаждения соответствуют остаточные механические напряжения, близкие к нулю (см. рис. 3). Это наблюдение согласуется с общепринятой точкой зрения, согласно которой минимальные внутренние напряжения способствуют повышению диэлектрической прочности тонких пленок [21]. Наличие значительных растягивающих или сжимающих остаточных механических напряжений может приводить к образованию микротрещин, дефектов упаковки или локальных областей повышенной проводимости, которые выступают в качестве центров пробоя при приложении высокого электрического поля. Таким образом, комбинация $P = 20,0$ Па и $R = 1,47$ обеспечивает формирование пленки SiN_x с оптимальным балансом состава, плотности и минимальных внутренних напряжений, что и обуславливает ее максимальную электрическую прочность.

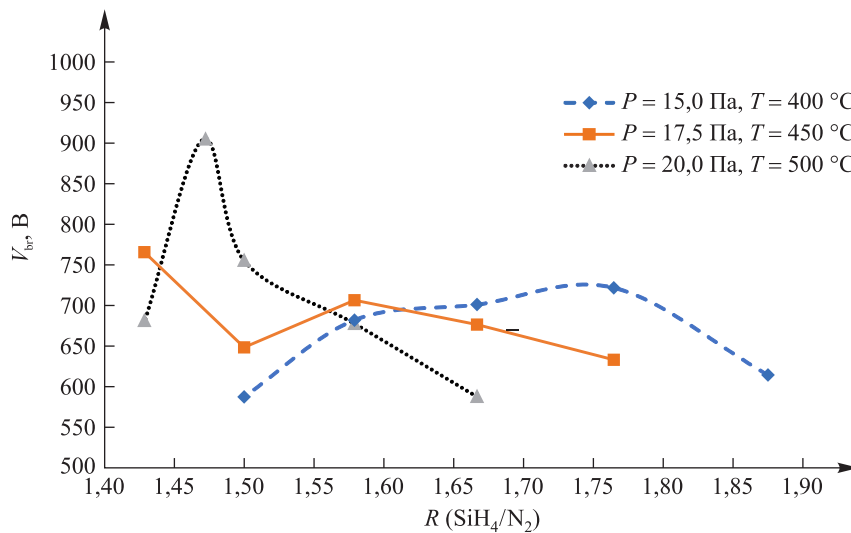


Рис. 5. Зависимость пробивного напряжения для пленок SiN_x от соотношения потоков газов SiH_4/N_2 для трех комбинаций давления и температуры

Fig. 5. Dependence of breakdown voltage for SiN_x films on the gas flow ratio SiH_4/N_2 for three combinations of pressure and temperature

Морфология поверхности диэлектрической пленки SiN_x , нанесенной на кремниевую подложку, была исследована методом атомно-силовой микроскопии. На рис. 6 видно, что на поверхности пленки отсутствуют какие-либо заметные неровности. Средняя шероховатость поверхности на площади 10×10 мкм² составила 0,26 нм при толщине пленки 100 нм, что является довольно хорошим результатом.

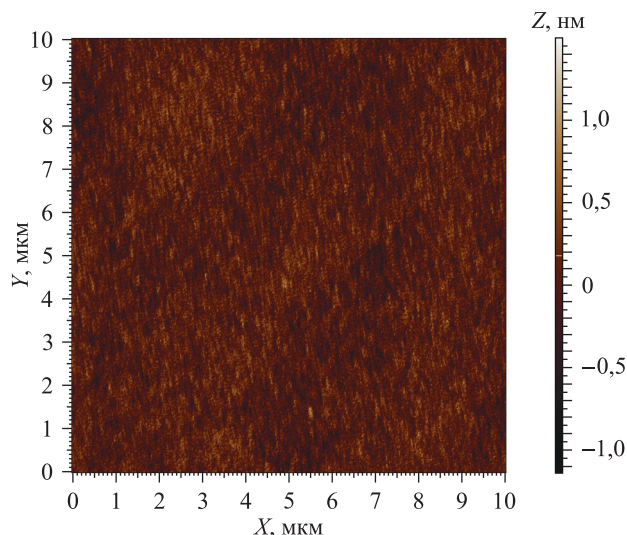


Рис. 6. Снимок поверхности пленки SiN_x , полученный с помощью атомно-силовой микроскопии

Fig. 6. Image of the SiN_x film surface obtained using atomic force microscopy

Следует учитывать, что при получении пробивного напряжения были использованы тестовые образцы с площадью верхнего электрода около $3,14 \text{ мм}^2$. На рабочих структурах данная площадь на несколько порядков ниже. Следовательно, она будет иметь значительно более высокую диэлектрическую прочность при других равных условиях (толщина диэлектрика, его состав, технология изготовления). Причина этого различия состоит не в самом механизме пробоя, а в статистической природе дефектов в диэлектрике. Чем больше площадь электрода, тем выше вероятность того, что под ним окажется критический дефект, который приведет к пробоем при относительно низком напряжении. Это явление описывается статистикой Вейбулла [22]. Полученный режим осаждения ($P = 20,0 \text{ Па}$, $R = 1,47$) был опробован при изготовлении нормально открытого (*d-mod*) НЕМТ. При суммарной толщине межслойного диэлектрика 750 нм на некоторых транзисторах пробой наступал примерно при 920 В (данное значение соответствует напряженности электрического поля $>12 \text{ МВ/см}$). Полученное значение пробивного напряжения является конкурентоспособным результатом. Например, в работе [5] для пленок SiN_x , полученных методом PECVD, сообщается о пробивной напряженности $>8 \text{ МВ/см}$. Авторы исследования [13] для пленок, осажденных методом LPCVD, достигли значений пробивной напряженности около $7\text{--}8 \text{ МВ/см}$.

Таким образом, разработанный режим ICP-CVD позволяет получать пленки с высокой диэлектрической прочностью, сопоставимой с лучшими мировыми результатами, и минимальными остаточными механическими напряжениями.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Показатель преломления пленок SiN_x сходится примерно к $2,00$ при соотношении потоков газов SiH_4/N_2 , равном $1,43$, независимо от давления и температуры, что соответствует стехиометрическому составу пленки Si_3N_4 . Отклонение от этого значения соотношения потоков газов приводит к зависимости оптических свойств от режимов осаждения.
2. Остаточные механические напряжения трансформируются из растягивающих ($\sigma \approx 100 \text{ МПа}$ при $R \approx 1,43$) в сжимающие при увеличении соотношения потоков газов. Минимальные абсолютные значения остаточных механических напряжений достигнуты при $P = 20,0 \text{ Па}$ благодаря релаксации микронапряжений в условиях интенсивной ионной бомбардировки.
3. Максимальная диэлектрическая прочность ($V_{\text{br}} = 904 \text{ В}$) зафиксирована для пленок, осажденных при $P = 20,0 \text{ Па}$ и $R = 1,47$. Этот режим обеспечивает близкие к нулю остаточные механические напряжения, минимизирующие дефектность и риск пробоя.
4. Подбор параметров синтеза методом ICP-CVD ($P = 20,0 \text{ Па}$, $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$, $R = 1,47$) позволяет получать пассивирующие слои SiN_x , сочетающие высокую электрическую прочность с минимальным вкладом в деформацию пластин, что критично для повышения выхода годных высоковольтных GaN-транзисторов.

Библиографические ссылки

1. Zhang X, Wei X, Zhang P, Zhang H, Zhang L, Deng X, et al. Low threshold voltage shift in AlGaIn/GaN MIS-HEMTs on Si substrate using SiN_x/SiON as composite gate dielectric. *Electronics*. 2022;11(6):895. DOI: 10.3390/electronics11060895.
2. Fu H, Fu K, Yang C, Liu H, Hatch KA, Peri P, et al. Selective area regrowth and doping for vertical gallium nitride power devices: materials challenges and recent progress. *Materials Today*. 2021;49:296–323. DOI: 10.1016/j.mattod.2021.04.011.
3. Amano H, Baines Y, Beam E, Borga M, Bouchet T, Chalker PR, et al. The 2018 GaN power electronics roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018;51(16):163001. DOI: 10.1088/1361-6463/aaaf9d.
4. Chen KJ, Häberlen O, Lidow A, Tsai CL, Ueda T, Uenoto Y, et al. GaN-on-Si power technology: devices and applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2017;64(3):779–795. DOI: 10.1109/TED.2017.2657579.
5. Moser M, Pradhan M, Alomari M, Heuken M, Schmitt Th, Kallfass I, et al. PECVD SiN_x passivation with more than 8 MV/cm breakdown strength for GaN-on-Si wafer stress management. *Power Electronic Devices and Components*. 2023;4:100032. DOI: 10.1016/j.pedc.2022.100032.
6. Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H, Jimbo T, Sano Y. Surface passivation effects on AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors with SiO_2 , Si_3N_4 , and silicon oxynitride. *Applied Physics Letters*. 2004;84(4):613–615. DOI: 10.1063/1.1642276.
7. Oh S, Jang H-S, Choi C-J, Cho J. Effects of surface passivation dielectrics on carrier transport in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors. *AIP Advances*. 2018;8(4):045116. DOI: 10.1063/1.5027634.
8. Chevtchenko SA, Reshchikov MA, Fan Q, Ni X, Moon YT, Baski AA, et al. Study of SiN_x and SiO_2 passivation of GaN surfaces. *Journal of Applied Physics*. 2007;101(11):113709. DOI: 10.1063/1.2740324.
9. Zhang Z, Li W, Fu K, Yu G, Zhang X, Zhao Y. AlGaIn/GaN MIS-HEMTs of very-low V_{th} hysteresis and current collapse with *in situ* pre-deposition plasma nitridation and LPCVD- Si_3N_4 gate insulator. *IEEE Electron Device Letters*. 2017;38(2):236–239. DOI: 10.1109/LED.2016.2636136.
10. Sun Z, Huang H, Wang R, Sun N, Tao P, Ren Y, et al. Improving performances of enhancement-mode AlGaIn/GaN MIS-HEMTs on 6-inch Si substrate utilizing $\text{SiON}/\text{Al}_2\text{O}_3$ stack dielectrics. *IEEE Electron Device Letters*. 2020;41(1):135–138. DOI: 10.1109/LED.2019.2957376.

11. Kim H-S, Han S-W, Jang W-H, Cho C-H, Seo K-S, Oh J, et al. Normally-off GaN-on-Si MISFET using PECVD SiON gate dielectric. *IEEE Electron Device Letters*. 2017;38(8):1090–1093. DOI: 10.1109/LED.2017.2720719.
12. Dutta G, DasGupta N, DasGupta A. Effect of sputtered- Al_2O_3 layer thickness on the threshold voltage of III-nitride MIS-HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2016;63(4):1450–1458. DOI: 10.1109/TED.2016.2529428.
13. Zhang Z, Yu G, Zhang X, Deng X, Li S, Fan Y, et al. Studies on high-voltage GaN-on-Si MIS-HEMTs using LPCVD Si_3N_4 as gate dielectric and passivation layer. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2016;63(2):731–738. DOI: 10.1109/TED.2015.2510445.
14. Rzin M, Guillet B, Mechin L, Gamarra P, Lacam C, Medjdoub F, et al. Impact of the *in situ* SiN thickness on low-frequency noise in MOVPE InAlGa/GaN HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2019;66(12):5080–5083. DOI: 10.1109/TED.2019.2945296.
15. Frischmuth T, Schneider M, Maurer D, Grille Th, Schmid U. Inductively-coupled plasma-enhanced chemical vapour deposition of hydrogenated amorphous silicon carbide thin films for MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016;247:647–655. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.042.
16. Li C, Li M, Shi J, Huang H, Li Z. Evaluation and characterization of high-uniformity SiN_x thin film with controllable refractive index by home-made cat-CVD based on orthogonal experiments. *Molecules*. 2025;30(5):1091. DOI: 10.3390/molecules30051091.
17. Демидович СА, Юник АД. Особенности нанесения пленок SiN_x методом ICP-CVD области повышенного давления. В: Лихачевский ДВ, редактор. *Электронные системы и технологии. Материалы 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР; 22–26 апреля 2024 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; 2024. с. 254–257.
18. Tan DTH, Ooi KJA, Ng DKT. Nonlinear optics on silicon-rich nitride – a high nonlinear figure of merit CMOS platform [invited]. *Photonics Research*. 2018;6(5):50–66. DOI: 10.1364/prj.6.000b50.
19. Sinha AK, Hess DW. Residual stress in plasma-deposited silicon nitride films. *Applied Physics Letters*. 1982;41(11):1047–1049. DOI: 10.1063/1.93385.
20. Abadias G, Chason E, Keckes J, Sebastiani M, Thompson GB, Barthel E, et al. Review article: stress in thin films and coatings: current status, challenges, and prospects. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2018;36(2):020801.
21. Bersuker G, Vandelli L. Challenges and directions for the electrical reliability of advanced CMOS technologies. *Microelectronic Engineering*. 2013;109:197–201.
22. Shama MS, Alharthi AS, Almulhim FA, Gemeay AM, Meraou MA, Mustafa MS, et al. Modified generalized Weibull distribution: theory and applications. *Scientific Reports*. 2023;13:12828. DOI: 10.1038/s41598-023-38942-9.

Получена 18.08.2025 / исправлена 21.11.2025 / принята 21.11.2025.
Received 18.08.2025 / revised 21.11.2025 / accepted 21.11.2025.