

С. А. ДЕМИДОВИЧ, А. В. МИХЕЕНКО, Ю. М. КУКУТЬ, Н. С. КОВАЛЬЧУК
**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ICP CVD ОСАЖДЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ
 НА ТОКИ УТЕЧКИ В AlGaN/GaN НЕМТ**

Исследовано влияние ICP CVD режимов на пассивацию гетероструктуры AlGaN/GaN. Кислородная обработка создает оксидный слой, снижая токи утечки. Ключевым результатом является разработка комбинированного подхода: предварительная модификация поверхности AlGaN кислородной плазмой с последующим осаждением SiON в мягком режиме ICP CVD.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе гетероструктур AlGaN/GaN являются ключевыми компонентами современной силовой и СВЧ-электроники благодаря уникальным свойствам двумерного электронного газа (2DEG): высокой подвижности носителей ($\sim 2000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) и их высокой концентрации ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$) [1]. Однако надежность и производительность этих приборов ограничены такими деградационными явлениями, как коллапс тока и высокий уровень токов утечки. Эти эффекты напрямую связаны с дефектами на поверхности AlGaN-слоя, включая неконтролируемое окисление и захват носителей заряда в поверхностные состояния [2]. Качество пассивирующего покрытия и состояние границы раздела «диэлектрик-полупроводник» критически влияют на стабильность характеристик приборов. Наличие дефектов на границе AlGaN/диэлектрик может создавать пути для туннелирования носителей, усиливая токи утечки [3].

В ходе исследований использовались тестовые AlGaN/GaN НЕМТ структуры с длиной затвора 2,0 мкм и шириной 3,8 мм, сформированные на подложках Si. Омические контакты и затворы Ni/Au создавались методом электронно-лучевого испарения и взрывной литографии. Ключевым этапом являлась предэпитаксиальная обработка: наилучшие результаты были достигнуты при обработке поверхности кислородной плазмой в течение 10 минут при давлении 40 Па, что позволило сформировать контролируемый оксидный интерфейс и снизить начальный ток утечки. Далее проводилось осаждение диэлектрических пленок методом ICP CVD в широком диапазоне параметров: мощность ICP варьировалась от 50 до 500 Вт, давление от 1 до 17 Па, а температура подложки от 120 до 400 °С. Предварительная обработка кислородной плазмой позволила снизить начальный ток утечки сток-исток в закрытом состоянии (I_{DSS}) с 5–10 мкА до 10–100 нА. Исходный режим осаждения (низкая мощность, давление 1 Па) приводил к росту токов утечки до 50–70 мкА. Введение закиси азота (N_2O) в газовую смесь. Предварительная обработка кислородной плазмой позволила снизить начальный ток утечки сток-исток в закрытом состоянии (I_{DSS}) с 5–10 мкА до 10–100 нА. Исходный режим осаждения (низкая мощность, давление 1 Па) приводил к росту токов утечки до 50–70 мкА. Введение закиси азота (N_2O) в газовую смесь для осаждения кислородсодержащего нитрида кремния (SiON) значительно улучшило ситуацию (рисунок 1).

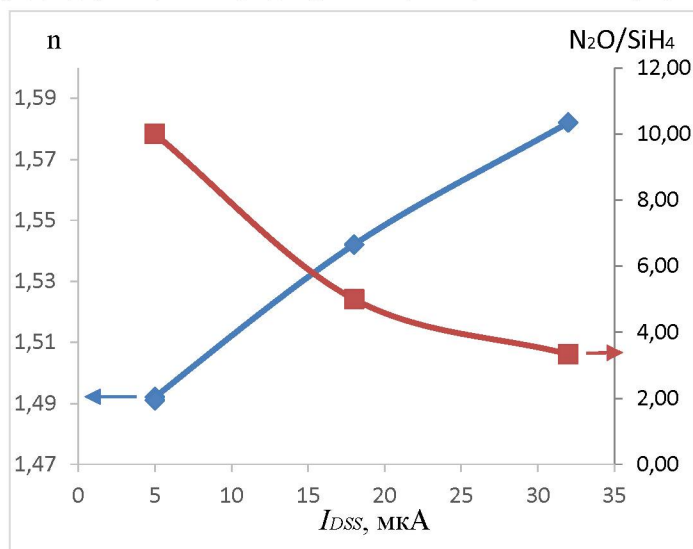


Рисунок 1 – Зависимость тока утечки сток-исток в закрытом состоянии от соотношения $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$ и показателя преломления плёнки

Детальный анализ зависимости времени стабилизации тока утечки от параметров осаждения (см. таблицу 1) выявил критическую роль не только состава газовой смеси, но и энергетических условий процесса. Исходный «мягкий» режим ($P = 1 \text{ Па}$, $ICP = 50 \text{ Вт}$, $T = 120 \text{ °С}$) приводил к длительной (до 30 суток) релаксации тока утечки до уровня 5 мкА, что свидетельствует о нестабильности границы раздела и значительной плотности по-

верхностных состояний. Повышение температуры и давления само по себе ухудшало характеристики, однако синхронное увеличение всех трех параметров (ICP, T, P) позволило принципиально изменить ситуацию. При достижении режима P = 14 Па, ICP = 300 Вт, T = 300 °C наблюдалось не только снижение I_{DSS} до рекордных 50–100 нА, но и сокращение времени стабилизации параметров до 1–2 суток. Это указывает на формирование более плотной и качественной пленки SiON с оптимальным стехиометрическим составом, что подтверждается стабилизацией показателя преломления на уровне 1,49 при соотношении $N_2O/SiH_4=10$.

Таблица 1 – Время стабилизации тока утечки в зависимости от параметров процесса осаждения (ICP; T, °C; P, Па) при одинаковом соотношении газов

Время после процесса, сутки	Параметры осаждения пленки – рабочее давление (P), Па; мощность плазмы (ICP), Вт; температура подложкодержателя (T), °C						
	P=1, ICP=50, T=120	P=5, ICP=100, T=200	P=6,8, ICP=150, T=200	P=14, ICP=300, T=300	P=17, ICP=400, T=300	P=17, ICP=400, T=400	P=17, ICP=500, T=400
	I_{DSS} , А						
0	6,00E-05	1,60E-05	4,20E-06	1,50E-06	6,70E-05	9,50E-05	7,30E-06
1				8,40E-08			
2			6,00E-07	8,40E-08	6,30E-05	6,20E-05	6,40E-05
4	8,80E-05		6,00E-07				
5		2,30E-05			2,30E-06	4,80E-06	3,20E-06
8					2,30E-06	4,80E-06	3,20E-06
14	2,50E-05						
15		3,00E-06					
18		3,00E-06					
28	5,00E-06						
30	5,00E-06						

Важно отметить, что дальнейшее форсирование режима (ICP>400 Вт) приводило к обратному эффекту – росту токов утечки до 60–90 мкА и увеличению времени стабилизации до 5–8 суток, что связано с плазменным повреждением приповерхностной области AlGaIn. Полученные в оптимальном режиме пленки SiON продемонстрировали высокое качество: конформность покрытия ступеней составила ~70 % (толщина на боковой стенке 34 нм при исходной толщине 50 нм), а среднеквадратичная шероховатость поверхности R_a не превышала 0,3 нм. Апробация разработанной технологии на мощных НЕМТ с шириной затвора 16 мм подтвердила ее эффективность – значение I_{DSS} не превысило 2 мкА, что полностью удовлетворяет требованиям к современным силовым и СВЧ-компонентам.

Таким образом, комбинированный подход, включающий предварительную кислородную обработку и последующее осаждение SiON в оптимизированном «мягком» режиме ICP CVD, является высокоэффективным методом подавления токов утечки и повышения долговременной стабильности AlGaIn/GaN НЕМТ. Полученные результаты создают основу для дальнейшей оптимизации технологии применительно к задачам массового производства и разработки приборов нового поколения.

Список литературы

1. Investigation of the Fabrication Processes of AlGaIn/AlN/GaN HEMTs with in SITU Si₃N₄ Passivation / K. N. Tomosh [et al.] // Semiconductors. – 2016. – Vol. 50, No 10. – P. 1416–1420.
2. Surface Electrical Characterization of Defect Related Inhomogeneities of AlGaIn/GaN/Si Heterostructures Using Scanning Capacitance Microscopy / A. Szyszka [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2019. – Vol. 94. – P. 57–63. – DOI: 10.1016/j.mssp.2019.01.043.
3. Pre-Passivation Plasma Surface Treatment Effects on Critical Device Electrical Parameters of AlGaIn/GaN HEMTs / D. J. Meyer, J. R. Flemish, J. M. Redwing // CS MANTECH. – 2008. – P. 261–264.

The influence of ICP CVD regimes on the passivation of the AlGaIn/GaN heterostructure has been investigated. Oxygen treatment creates an oxide layer, reducing leakage currents. The key result is the development of a combined approach: preliminary modification of the AlGaIn surface with oxygen plasma followed by the deposition of SiON in a low-damage ICP CVD regime.

Демидович Сергей Александрович, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Республика Беларусь, sdemidovich@integral.by.

Михеенко Александр Викторович, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Республика Беларусь, micheenkoalek@gmail.com.

Кукуть Юрий Михайлович, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Республика Беларусь, ykukut@integral.by.

Научный руководитель – *Ковальчук Наталья Станиславовна*, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора – главный инженер, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Республика Беларусь, nkovalchuk@integral.by.