

Влияние низкотемпературного надбарьерного слоя GaN на концентрацию электронов в гетероструктуре AlGaIn/GaN

© А.А. Андреев, Е.А. Вавилова, И.С. Езубченко,[†] М.Л. Занавескин, И.О. Майборода

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

[†] e-mail: ezivan9@gmail.com

(Поступило в Редакцию 27 декабря 2016 г.)

Было изучено влияние низкотемпературных пассивирующих слоев GaN на электрофизические характеристики двумерного электронного газа (ДЭГ) в гетероструктурах для транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ). Установлено, что тонкие слои GaN, осажденные *in situ* при температуре 550°C, не проявляют полярных свойств и не меняют концентрацию носителей в ДЭГ. При этом аналогичные слои GaN, осажденные при 830°C, снижают концентрацию носителей в ДЭГ в соответствии с теоретическими расчетами. С помощью дифракции быстрых отраженных электронов установлено, что данный эффект может быть обусловлен различием в структуре и морфологии пленок GaN, осаждаемых при различных температурах.

DOI: 10.21883/JTF.2017.08.44742.2152

На сегодняшний день транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе системы AlGaIn/GaN являются объектом интенсивных исследований благодаря перспективам их применения в мощных СВЧ устройствах [1,2]. Неизбежное наличие в гетероструктуре AlGaIn/GaN активных поверхностных состояний ограничивает возможности устройств, приводя к эффекту коллапса тока, снижению пробойного напряжения между стоком и затвором, высоким токам утечки затвора [3–5]. Эффективным способом борьбы с негативными поверхностными эффектами является формирование тонких пассивирующих слоев диэлектриков SiO₂, Al₂O₃, Si₃N₄ и других [6–9].

Привлекательным является использование в качестве пассивирующего слоя GaN. Во-первых, его формирование может происходить *in situ* без извлечения гетероструктуры в атмосферу. Во-вторых, пассивация GaN не требует проведения модификации заводского оборудования или использования дополнительных материалов при *in situ* росте пассивационных слоев. Основной проблемой при формировании GaN является снижение концентрации электронов в двумерном канале [10]. В работе [11] было показано, что надбарьерные слои (cap-layer) GaN, осажденные при температурах порядка 500°C, эффективно подавляют эффект коллапса тока. Однако ключевым вопросом остается влияние низкотемпературного GaN на концентрацию электронов, которое определяет эффективность его использования в качестве пассивирующего слоя при росте гетероструктур, особенно с тонкими барьерными слоями. В настоящей работе исследовалась зависимость концентрации электронов в двумерном электронном газе от температуры роста и толщины надбарьерного слоя GaN.

Рост гетероструктур проводился в установке аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии STE3N* фирмы SemiTEq. Гетероструктуры формировались на 50 nm

подложках эпитопированного *c*-ориентированного синтетического корунда Al₂O₃ (сапфира). Перед ростом гетероструктуры подложка подвергалась отжигу в высоком вакууме при температуре 850°C, с последующей нитридизацией поверхности сапфира в потоке аммиака 30 sccm в течение 40 min.

Для изучения влияния пассивации GaN были выращены пять аналогичных гетероструктур, отличающихся только условиями осаждения завершающего надбарьерного слоя GaN. Структуры состояли из буферного слоя AlGaIn с общей толщиной 550 nm, в котором молярная доля AlN плавно опускалась с толщиной от 100% до нуля [12]. Далее осаждался канальный слой GaN толщиной 500 nm. Барьерный слой гетероструктур состоял из спейсер-слоя AlN толщиной 1 nm и слоя Al_{0.3}Ga_{0.7}N толщиной 14 nm. Рост канального и барьерного слоев проводился при температуре 830°C. Надбарьерные слои GaN с толщинами 5 и 10 nm осаждались при температурах 550 и 830°C (образцы А, В, С и D в таблице). Также был выращен образец без надбарьерного слоя GaN (образец Е в таблице). Гетероструктуры и надбарьерные слои осаждались в потоке аммиака 200 sccm. Значения концентрации и подвижности электронов в двумерном канале были получены четырехзондовым методом Ван-дер-Пау и приведены в таблице. Морфология поверхности образцов исследовалась при помощи методов дифракции быстрых отраженных электронов (RHEED).

Картина дифракции для образцов А, В и Е имела одинаковый вид (рис. 1, а) и состояла из острых линейных рефлексов, что говорит о гладкой поверхности и монокристаллической структуре полученных пленок. Для низкотемпературных пленок GaN на образцах С и D картина дифракции состояла из отдельных точечных рефлексов (рис. 1, б). Подобная картина дифракции указывает на то, что низкотемпературные надбарьерные слои GaN состояли из кристаллитов малого объема.

Параметры образцов и результаты электрофизических измерений

Образец	Температура слоя надбарьерного слоя GaN, °C	Толщина надбарьерного слоя GaN, nm	Концентрация носителей в двумерном канале, 10^{13} cm ⁻²	Подвижность, cm ² /V · s
A	830	5	$0.7 \cdot 10^{13}$	1400
B	830	10	$0.6 \cdot 10^{13}$	1517
C	550	5	$1.08 \cdot 10^{13}$	1636
D	550	10	$1.08 \cdot 10^{13}$	1654
E	—	—	$1.1 \cdot 10^{13}$	1506

Значения концентрации носителей заряда в ДЭГ для полученных образцов представлены на графике (рис. 2)

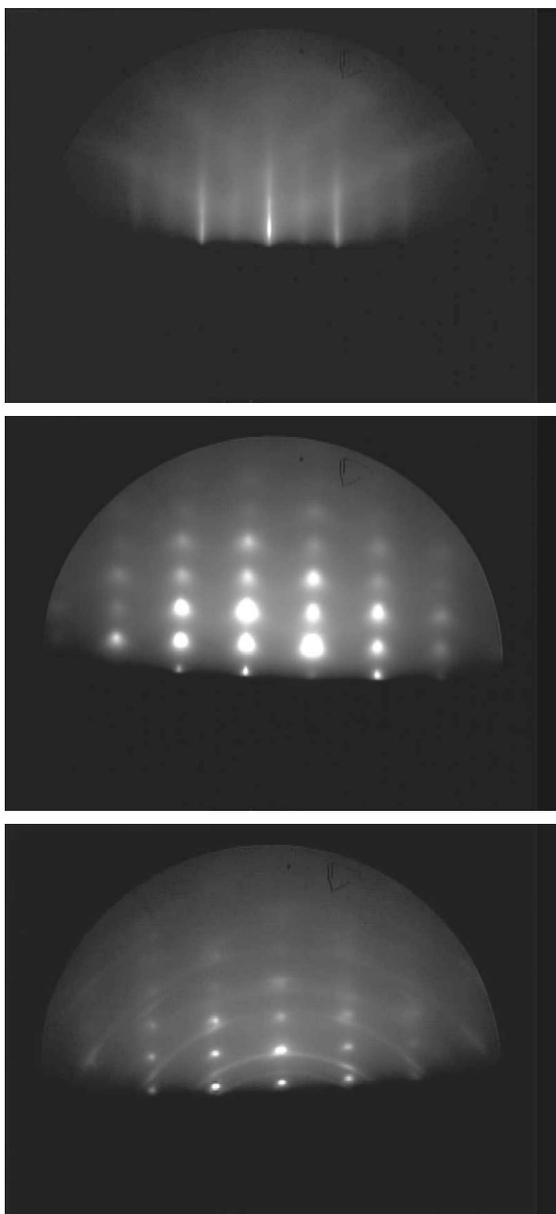


Рис. 1. Дифракция: *a* — высокотемпературный слой GaN, 10 nm; *b* — низкотемпературный слой GaN, 10 nm; *c* — низкотемпературный слой GaN толщиной 200 nm.

в зависимости от толщины надбарьерного слоя GaN. Так же на графике представлены расчетные значения концентрации электронов в проводящем канале, полученные с помощью программного комплекса 1D Poisson Solver [13]. При расчетах значение поверхностного потенциала гетероструктуры было задано так, чтобы расчетные значения концентрации электронов в ДЭГ модельной гетероструктуры, аналогичной образцу E без надбарьерного слоя, совпадали с экспериментальным значением концентрации для образца E. Поскольку высота барьера имеет различную величину для GaN и AlGaIn, в расчетную модель структуры без надбарьерного слоя был добавлен виртуальный слой GaN толщиной 0.2 nm, влияние которого на концентрацию носителей в ДЭГ пренебрежимо мало.

Как видно из графика, для высокотемпературных слоев GaN наблюдается снижение концентрации носителей в ДЭГ с увеличением толщины слоя GaN. При этом экспериментальные точки находятся в хорошем согласии с результатами численных расчетов концентрации. Так же из графика видно, что надбарьерные слои GaN, осажденные при температуре 550°C, не оказывают влияния на концентрацию носителей в ДЭГ.

Рассмотрим механизм влияния надбарьерного слоя GaN на концентрацию электронов в ДЭГ. На рис. 3, *a* показана зонная диаграмма гетероперехода

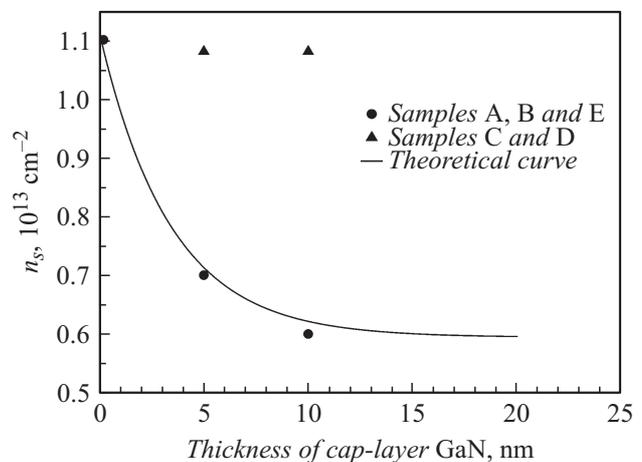


Рис. 2. Зависимость концентрации электронов в двумерном канале от толщины надбарьерного слоя GaN.

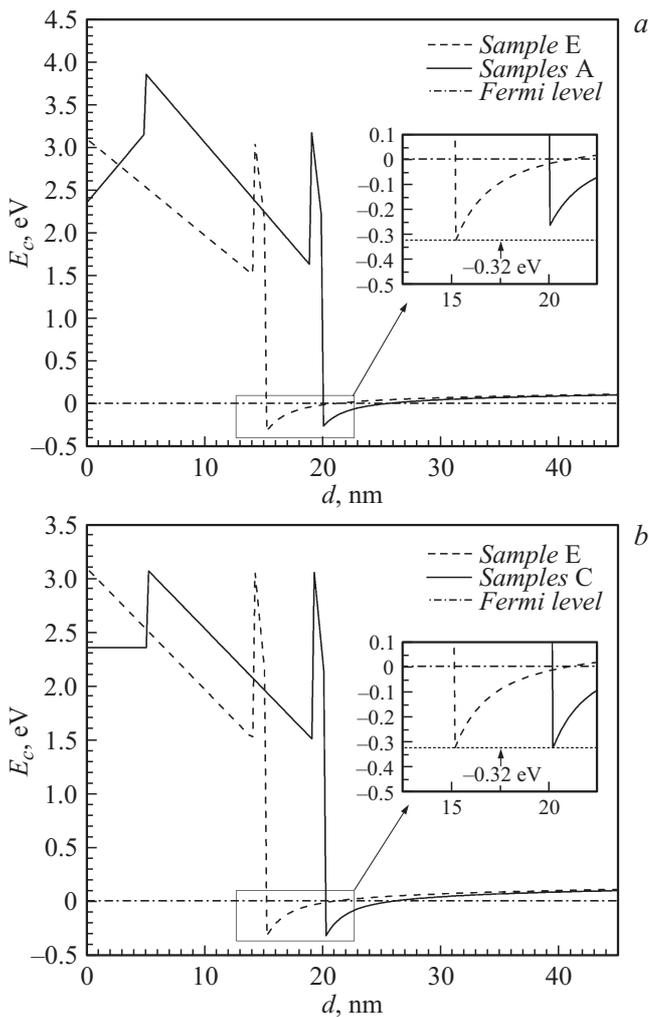


Рис. 3. *a* — зонная диаграмма дна зоны проводимости для образцов А (сплошная линия) и Е (штриховая линия); *b* — зонная диаграмма дна зоны проводимости для образцов С (сплошная линия) и Е (штриховая линия). Пунктирная линия — дно квантовой ямы для образца Е.

AlGaN/AlN/GaN с надбарьерным слоем GaN и без него. За счет эффекта спонтанной поляризации в монокристаллических слоях GaN присутствуют встроенные электростатические поля, что приводит к снижению концентрации носителей в ДЭГ за счет уменьшения глубины квантовой ямы. Из результатов, полученных для образцов С и D, следует, что низкотемпературные надбарьерные слои GaN не влияют на концентрацию носителей в ДЭГ, т.е. не проявляют поляризационных свойств, в отличие от горячих слоев GaN на образцах А и В (рис. 3, *b*). Таким образом, пленки GaN, выращенные при разных температурах, не только имеют различную морфологию, но и проявляют различные поляризационные свойства.

Для получения дополнительной информации о морфологии низкотемпературных слоев при температуре 550°C была выращена пленка GaN толщиной 200 nm

(условия роста аналогичны образцам С и D). При наблюдение RHEED в процессе роста низкотемпературного слоя GaN по характерной дифракционной картине в виде колец Дебая было обнаружено наличие поликристаллической фазы (рис. 1, *c*). Поликристаллическая структура могла бы объяснить ее неполярные свойства низкотемпературных слоев GaN взаимной компенсацией разнонаправленных дипольных моментов отдельных кристаллитов, однако на картине дифракции также наблюдались интенсивные дифракционные максимумы, соответствующие *c*-ориентированным кристаллитам GaN. Можно заключить, что неполярные свойства слоев низкотемпературных слоев GaN, вероятно, связаны с особенностями их кристаллической структуры, но механизм подавления поляризационных свойств пока что не ясен и требует дальнейших исследований. Вместе с тем неполярный характер низкотемпературных слоев GaN в сочетании с продемонстрированной другими исследователями способностью подавлять эффект коллапса тока [11] делает их привлекательными в качестве защитных пассивирующих слоев для нитридных НЕМТ-структур.

Таким образом, в настоящей работе было проведено исследование низкотемпературных и высокотемпературных надбарьерных слоев GaN и сравнение их влияния на концентрацию электронов в ДЭГ гетероструктур для НЕМТ. В результате установлено, что низкотемпературные слои GaN, выращенные при 550°C, не проявляют полярных свойств в отличие от слоев, выращенных при 830°C, что, по-видимому, обусловлено различием в структуре пленок, выращенных при разной температуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.607.21.0116 от 14.10.2015, RFMEFI60715X0116).

Список литературы

- [1] Nanjo T, Imai A, Suzuki Y, Abe Y, Oishi T, Suita M, Yagyu E, Tokuda Y // IEEE Trans. Electr. Dev. 2013. Vol. 60. N 3. P. 1046.
- [2] Chung J.W. et al. // IEEE Electr. Dev. Lett. 2010. Vol. 31. N 3. P. 195.
- [3] Vetury R, Zhang N.Q, Keller S, Mishra U.K. // IEEE Trans. Electr. Dev. 2001. Vol. 48. N 3. P. 560.
- [4] Ohno Y, Nakao T, Kishimoto S, Maezawa K, Mizutani T // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. N 12. P. 2184.
- [5] Tan W.S., Houston P.A., Parbrook P.J., Wood D.A., Hill G., Whitehouse C.R. // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 80. N 17. P. 3207.
- [6] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H, Jimbo T, Sano Y // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. P. 613.
- [7] Wang C., Cho S.-J., Kim N.-Y. // Microelectronic Engineer. 2013. Vol. 109. P. 24.
- [8] Kim D.H., Kumar V, Chen G, Dabiran A.M., Wowchak A.M., Osinsky A, Adesida I // Electron. Lett. 2007. Vol. 43. N 2. P. 127.
- [9] Sheng Z., Ke W., Le Y., Guo-Guo L., Sen H., Xin-Hua W., Lei P., Ying-Kui Z., Yan-Kui L., Xiao-Hua M., Bing S., Xin-Yu L. // Chin. Phys. B. 2015. Vol. 24. N 11. P. 117307.

- [10] *Ambacher O., Foutz B., Smart J., Shealy J.R., Weimann N.G., Chu K., Murphy M., Sierakowski A.J., Schaff W.J., Eastman L.F., Dimitrov R., Mitchell A., Stutzmann M.* // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. P. 334.
- [11] *Waki E., Deguchi T., Nakagawa A., Egawa T.* // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. P. 103507.
- [12] *Андреев А.А., Грищенко Ю.В., Езубченко И.С., Занавескин М.Л., Майборода И.О., Рудик М.А., Федоров Ю.В.* // Журнал радиоэлектроники. 2015. Т. 1.
- [13] *G. Snider* // <http://www3.nd.edu/gsnider>