

Слой Si₃N₄ для *in situ* пассивации транзисторных структур на основе GaN

© П.А. Юнин^{†*}, Ю.Н. Дроздов⁺, М.Н. Дроздов⁺, С.А. Королев⁺, А.И. Охапкин⁺,
О.И. Хрыкин⁺, В.И. Шашкин⁺

⁺ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

^{*} Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Описывается метод *in situ* пассивации структур на основе GaN слоем нитрида кремния в ростовой камере установки металлоорганической газофазной эпитаксии. Исследуются структурные и электрофизические свойства полученных слоев. Проводится сравнение пассивации транзисторных структур нитридом кремния *in situ* и *ex situ* в установке электронно-лучевого распыления. Показано, что *ex situ* пассивация не меняет исходную концентрацию и подвижность носителей в канале. Пассивация *in situ* позволяет защищать поверхность структуры от неконтролируемых изменений при завершении роста и извлечении в атмосферу. Также в пассивированной *in situ* структуре происходит увеличение концентрации и уменьшение подвижности носителей. Этот эффект необходимо учитывать при изготовлении пассивированных транзисторных структур на основе GaN.

1. Введение

Структуры с рабочими слоями нитридов элементов III группы привлекают огромный интерес из-за возможности создания на их основе мощных радиационно- и термостойких приборов для микроволновой электроники [1,2]. Однако технология изготовления приборов до конца не сформировалась из-за относительной новизны поставленной задачи. Существует ряд принципиальных проблем, ограничивающих качество и характеристики изготавливаемых приборных структур. Основной проблемой является низкое кристаллическое качество структур на основе GaN, вызванное пока еще малой доступностью подложек для гомоэпитаксии и большим несоответствием параметров решеток у подходящих для гетероэпитаксии GaN материалов [1]. В связи с низким структурным качеством слоев GaN возникает ряд сопутствующих проблем, которые не позволяют реализовать потенциально высокие электрические характеристики приборов на базе нитрида галлия [2]. В приборах на основе GaN могут возникать большие токи утечки, связанные с дефектной структурой слоев [2–6]. Известен эффект падения тока стока (drain-current collapse effect) и уменьшения выходной мощности транзисторов при работе на больших частотах, связанный с захватом электронов на поверхностных состояниях в рабочих слоях [7–10].

Решением проблемы больших обратных токов утечки и эффекта падения тока стока в структурах на основе GaN может стать нанесение тонких изолирующих слоев диэлектрика на поверхность рабочих слоев [7,8,11–15]. При этом роль изолирующих и одновременно пассивирующих и защитных слоев могут играть пленки Si₃N₄, SiO₂, SiON [12,14], выращенные методом PECVD

(plasma enhanced chemical vapor deposition). Также используются комбинации слоев разных диэлектриков: Al₂O₃/Si₃N₄ [8], HfO₂ и Ga₂O₃/SiO₂ [11]. Возможны такие методы нанесения этих покрытий, как распыление Si электронным пучком в атмосфере азота, *in situ* окисление металлических слоев для получения Al₂O₃ [7] или *in situ* нанесение Si₃N₄ методом LPCVD (low pressure chemical vapor deposition) [15]. При этом работы, посвященные исследованию влияния пассивирующих слоев, свидетельствуют о возможности подавления эффекта падения тока стока и существенного уменьшения токов утечки [7,8,12–14].

Ультратонкие слои диэлектриков могут быть также использованы для снижения плотности дислокаций в слоях GaN путем использования метода эпитаксии ELOG (epitaxial lateral overgrowth) [16]. Использование масок из Si₃N₄ позволяет существенно уменьшать плотность дислокаций в слоях GaN при латеральном разрастании малодефектных областей. Использование метода ELOG требует наличия технологии нанесения слоев Si₃N₄ *in situ* в установке роста структур на основе GaN. Кроме того, *in situ* пассивация структур непосредственно в камере роста без извлечения структуры в атмосферу кажется более перспективной по сравнению с наиболее распространенными методами нанесения диэлектрических слоев *ex situ*. Однако метод *in situ* нанесения слоев диэлектриков мало распространен из-за трудности модификации коммерческих установок роста структур на основе GaN. В литературе недостаточно внимания уделено исследованию влияния ростовых параметров на структурные, химические и морфологические свойства пленок нитрида кремния, не установлена их связь с электрофизическими параметрами получаемых слоев и их влиянием на характеристики приборных структур. Установление физической связи между условиями роста и совокупностью структурных и электрофи-

[†] E-mail: yunin@ipmras.ru

зических свойств получаемого покрытия принципиально необходимо для контролируемого и воспроизводимого получения диэлектрических покрытий нитрида кремния с заданными параметрами. В данной работе описывается реализация метода пассивации структур на основе GaN тонкими слоями нитрида кремния *in situ* в установке газовой фазной эпитаксии соединений III–N. Проводится исследование свойств пассивирующих слоев и структур с пассивацией. Сравняются подходы с пассивацией транзисторных структур на основе GaN нитридом кремния *in situ* и постростовым нанесением нитрида кремния методом электронно-лучевого распыления.

2. Методика эксперимента

Для роста слоев нитрида кремния использовалась оригинальная установка эпитаксии MOCVD (metalloorganic chemical vapour deposition) соединений широкозонных нитридов [17]. Рост проводился в вертикальном кварцевом реакторе с индукционным нагревом подложкодержателя до температур 1050°C при давлении 75 Торр. Источниками Ga, Al и N служили триметилгаллий, триметилалюминий и аммиак соответственно. Для осаждения нитрида кремния использовалась смесь 3.8% SiH₄ и H₂. Использование тех же источников веществ, что и при росте легированных слоев III-нитридов, — аммиака и силана — позволяет реализовать *in situ* осаждение нитрида кремния. В ходе работы был выращен ряд тестовых слоев Si₃N₄ на подложках кремния и сапфира. Структурные свойства полученных слоев нитрида кремния исследовались аналитическими методами: рентгеновская дифрактометрия (XRD) и малоугловая рентгеновская рефлектометрия (XRR) на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Discover, атомно-силовая микроскопия (AFM) на установке CMM-2000, вторично-ионная масс-спектрометрия (SIMS) на установке TOF.SIMS-5. Также были проведены исследования электрофизических характеристик слоев Si₃N₄ различной толщины. Для пленок, выращенных на проводящих подложках, измерялись вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) для определения параметров диэлектрика. Для сравнения со слоями нитрида кремния, полученными в реакторе MOCVD, пленки нитрида кремния были выращены также и методом электронно-лучевого распыления на установке Amod 206. Для транзисторных структур на основе GaN без пассивации, с *in situ* и *ex situ* пассивацией проводились измерения концентрации и подвижности электронов в канале методом Холла–Ван-дер-Пау.

3. Результаты и обсуждение

Рост тестовых пленок нитрида кремния осуществлялся на монокристаллических подложках Si и Al₂O₃ в диапазоне температур 800–1050°C. Рентгеновская дифрактометрия не показала наличия пиков кристаллических фаз, что говорит об аморфности полученных пленок.

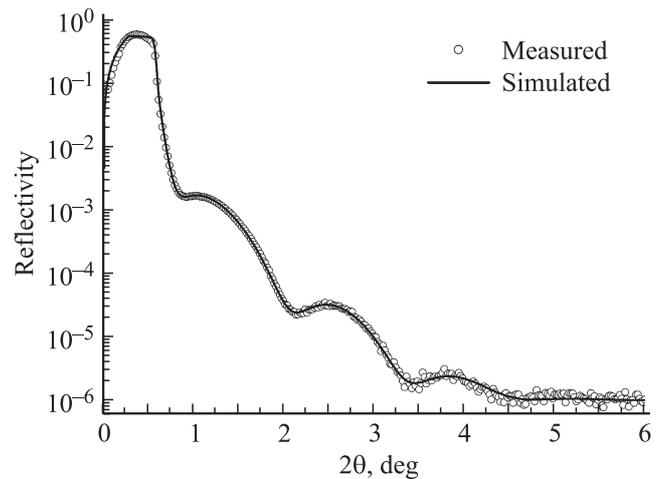


Рис. 1. Кривая малоугловой рефлектометрии для тестового слоя нитрида кремния на сапфировой подложке. Точки — экспериментальные данные, линия — расчет по модели. Параметры модели приведены в тексте.

Исследования поверхности тонких (~ 5 нм) тестовых слоев нитрида кремния на сапфире методами AFM и оптической интерференционной микроскопии показали, что при *in situ* росте в реакторе MOCVD формируется сплошная гладкая однородная пленка без волнистости с мелкомасштабной шероховатостью на уровне 0.3 нм. Характерная кривая малоугловой рефлектометрии для слоя нитрида кремния, полученного на сапфировой подложке, приведена на рис. 1. Определение таких параметров слоя, как толщина, плотность и шероховатость, выполнялось методом подгонки рассчитанной кривой под результаты измерений в программном комплексе DIFFRAC.Leptos 7.04. Из рис. 1 видно, что модель с одним однородным слоем очень хорошо описывает экспериментальные данные. Для данного образца были получены значения толщины слоя $h = (6.5 \pm 0.5)$ нм, среднеквадратичной шероховатости $\sigma = (0.5 \pm 0.2)$ нм и плотности $\rho = (2.9 \pm 0.3)$ г/см³ (атабличное значение плотности для аморфного Si₃N₄ составляет 3.1 г/см³). Небольшие различия в значениях шероховатости, измеренной методами XRR и AFM, объясняются различными площадью анализа и диапазоном пространственных частот для этих методов. Элементный состав пленок контролировался методом SIMS. Профили распределения основных элементов по глубине для тестовой пленки нитрида кремния на сапфире приведены на рис. 2. Послойный SIMS-анализ подтверждает формирование слоя нитрида кремния с достаточно резкими передним и задним интерфейсами. Видно, что слоя толщиной 6 нм достаточно для предотвращения диффузии кислорода с поверхности образца к пассивированному интерфейсу. Измерения ВФХ и ВАХ для пленки, выращенной на проводящей подложке, позволили определить характеристики диэлектрика: удельное сопротивление $\rho = 3 \cdot 10^{12}$ Ом · см, поле пробоя $E_{br} = 0.7 \cdot 10^7$ В/см,

статическая диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 7.2$. Эти значения соответствуют табличным [18] для аморфного нитрида кремния Si_3N_4 . Таким образом, была отработана методика получения гладких однородных диэлектрических пленок нитрида кремния из газовой фазы в реакторе MOCVD эпитаксии структур на основе GaN. Стоит отметить, что отработанная методика нанесения слоев нитрида кремния технологией CVD может быть использована не только для *in situ* пассивации структур на основе GaN, но и применена для уже *ex situ* пассивации полупроводниковых структур на основе Si и GaAs.

После отработки технологических аспектов получения слоев нитрида кремния в реакторе MOCVD, были проведены эксперименты по *in situ* пассивации транзисторных структур на основе GaN. Данные SIMS и XRR подтвердили формирование на поверхности транзисторных структур $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ тонких сплошных пленок нитрида кремния со свойствами, аналогичными свойствам тестовых слоев. Одной из известных проблем эпитаксии нитрида галлия методом MOCVD является образование в некоторых условиях капель галлия на поверхности структуры из остаточной атмосферы при завершении процесса роста [19]. Было обнаружено, что *in situ* пассивация защищает поверхность рабочего слоя AlGaIn в транзисторной структуре от неконтролируемых изменений, происходящих в процессе завершения роста и остывания в установке и извлечения структуры в атмосферу. Для пассивированных структур образование капель галлия происходит уже поверх слоя нитрида кремния, что существенно облегчает задачу по очистке от них поверхности структуры. Таким образом, *in situ* пассивация позволяет уменьшить разброс характеристик структур и контролируемо получать структуры с заданными свойствами. Для дальнейшего исследования влияния пассивации на свойства транзисторных струк-

Электрофизические характеристики транзисторных структур с пассивацией *in situ*, *ex situ* и без пассивации

Образец	Поверхностное сопротивление, Ом/□	Подвижность, $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$	Концентрация электронов, 10^{13} cm^{-2}
# 1	570	1100	0.9
# 2, <i>in situ</i> SiN	560	600	2.0
# 1, <i>ex situ</i> SiN	510	1100	1.0

тур было отобрано два образца с близкими параметрами: # 1 без пассивации и # 2 с *in situ* пассивацией слоем нитрида кремния толщиной 15 нм. Рентгенодифракционные оценки плотности дислокаций в слоях GaN для выбранных структур, выполненные по методике [20], показали что плотность дислокаций в структурах одинакова. Для сравнения *in situ* и *ex situ* пассивации на часть изначально непассивированного образца # 1 *ex situ* был нанесен слой нитрида кремния толщиной 15 нм на установке электронно-лучевого распыления Amod 206. Методом Холла-Ван-дер-Пау было измерено поверхностное сопротивление канала, подвижность и концентрация электронов в канале для этих трех структур. Полученные данные приведены в таблице. Было обнаружено, что постростовая пассивация не влияет на исходные свойства структуры, но может служить в качестве защиты интерфейса от дальнейшей деградации при отжиге или травлении.

Измерения показывают, что в пассивированных *in situ* структурах увеличивается концентрация электронов в канале, но при этом уменьшается подвижность. Этот эффект наблюдался и другими группами, реализовавшими методику *in situ* пассивации транзисторных структур нитридом кремния в реакторе MOCVD [15]. В литературе предлагаются различные объяснения эффекта. Увеличение концентрации носителей в канале связывают с уменьшением концентрации поверхностных состояний и захвата на них носителей [15] или же дополнительным легированием за счет диффузии кремния из пассивирующего слоя в рабочий слой AlGaIn [21]. Одним из вариантов объяснения также является влияние механических напряжений, вызванных слоем нитрида кремния, на деформацию и пьезоэлектрическое поле в рабочем слое AlGaIn [15]. Для установления причин необходимы более подробные исследования, включающие измерение концентрации поверхностных состояний, исследование диффузии кремния в транзисторных структурах методом SIMS и анализ механических напряжений в слоях AlGaIn рентгенодифракционным методом.

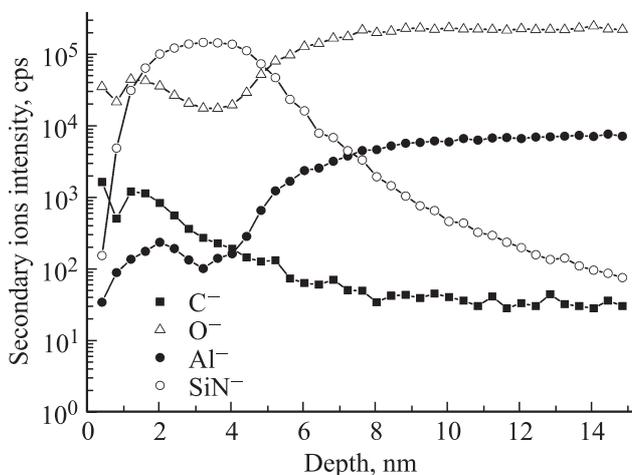


Рис. 2. Профили распределения по глубине основных элементов в структуре со слоем нитрида кремния на сапфировой подложке, полученные методом послыонного анализа на установке вторично-ионной масс-спектрометрии.

4. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в реакторе MOCVD, предназначенном для выращивания

структур на основе GaN, удается получать гладкие одно-родные диэлектрические слои нитрида кремния. Для роста достаточно источников веществ, используемых при получении III–N структур — силана и аммиака. Важнейшие структурные и электрофизические параметры полученных слоев соответствуют табличным значениям для аморфного Si₃N₄. Путем варьирования температуры и потоков газов удается управлять скоростью роста пленок и воспроизводимо получать диэлектрические слои с заданными характеристиками. Обнаружено, что *in situ* пассивация защищает поверхность рабочего слоя AlGaN от неконтролируемых изменений при завершении роста в установке и извлечении структуры в атмосферу. Постростовая пассивация не меняет исходных свойств структуры и может служить в качестве защиты интерфейса от дальнейшей деградации при отжиге или травлении. Измерения показывают, что в пассивированных *in situ* структурах увеличивается концентрация электронов в канале, но при этом уменьшается подвижность. Этот эффект необходимо учитывать в дальнейшем при изготовлении пассивированных транзисторных структур.

Работа поддержана Министерством образования и науки России (проект RFMEFI60714X0071), грантом РФФИ № 14-02-31046 и программами президиума РАН. Исследования выполнены на оборудовании ЦКП ИФМ РАН.

Список литературы

- [1] P. Ruterana, G. Nouet. Phys. Status Solidi B, **227**, 177 (2001).
- [2] S.J. Pearton, J.C. Zolper, R.J. Shul, F. Ren. J. Appl. Phys., **86**, 1 (1999).
- [3] K. Sarpatwari, S.E. Mohney, O.O. Awadelkarim. J. Appl. Phys., **109**, 014 510 (2011).
- [4] E.J. Miller, E.T. Yu, P. Waltereit, J.S. Speck. Appl. Phys. Lett., **84**, 535 (2004).
- [5] J.Kotani, T.Hashizume, H.Hasegawa. J. Vac. Sci. Technol. B, **22**, 2179 (2004).
- [6] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. ФТП, **41**, 1281 (2007).
- [7] T. Hashizume, S. Ootomo, H. Hasegawa. Appl. Phys. Lett., **83**, 2952 (2003).
- [8] C.X. Wang, N. Maeda, M. Hiroki, T. Tawara, T. Makimoto, T. Kobayashi, T. Enoki. J. Electron. Mater., **34** (4), 361 (2004).
- [9] S. Faramehr, K. Kalna, P. Igić. Semicond. Sci. Technol., **29**, 025 007 (2014).
- [10] S.C. Binari, P.B. Klein, T.E. Kazior. Proc. IEEE, **90** (6), 1048 (2007).
- [11] W. Lu, V. Kumar, R. Schwindt, E. Piner, I. Adesida. Solid-State Electron., **46**, 1441 (2002).
- [12] S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa, T. Jimbo. Appl. Phys. Lett., **84** (4), 613 (2004).
- [13] R. Wang, Y. Cai, C.-W. Tang, K.M. Lau, K.J. Chen. IEEE Electron. Dev. Lett., **27** (10), 793 (2006).
- [14] C. Bae, C. Krug, G. Lucovsky, A. Chakraborty, U. Mishra. J. Appl. Phys., **96** (5), 2674 (2004).
- [15] J. Derluyn, S. Boeykens, K. Cheng, R. Vandersmissen, J. Das, W. Ruythooren, S. Degroote, M.R. Leys, M. Germain, G. Borghs. J. Appl. Phys., **98**, 054 501 (2005).
- [16] Ok-Hyun Nam, M.D. Bremser, T.S. Zheleva, R.F. Davis. Appl. Phys. Lett., **71**, 2638 (1997).
- [17] О.И. Хрыкин, А.В. Бутин, Д.М. Гапонова, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, В.И. Шашкин. ФТП, **39**, 21 (2005).
- [18] S. Wolf, R. Tauber. *Silicon Processing for the VLSI Era* (Sunset Beach, Lattice Press, 1986).
- [19] C. Adelman, J. Brault, G. Mula, D. Daudin, L. Lymperakis, J. Neugebauer. Phys. Rev. B, **67**, 165 419 (2003).
- [20] M.A. Moram, M.E. Vickers. Rep. Prog. Phys., **72**, 036 502 (2009).
- [21] R. Vetry, N.Q. Zhang, S. Keller, U.K. Mishra. IEEE Trans. Electron Dev., **48**, 560 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Si₃N₄ layers for *in situ* passivation of GaN-based HEMT structures

P.A. Yunin^{+,*}, Yu.N. Drozdov^{+,*}, M.N. Drozdov^{+,*}, S.A. Korolyov⁺, A.I. Okhapkin^{+,*}, O.I. Khrykin⁺, V.I. Shashkin⁺

+ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

* Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The paper describes a method for *in situ* passivation of GaN-based structures with silicon nitride directly in the MOCVD reactor. The structural and electrical properties of the layers are investigated. A comparison of *in situ* and postgrowth passivation of transistor structures with *e*-beam evaporated silicon nitride is made. It is shown that *ex situ* passivation does not change the initial carrier concentration and mobility. *In situ* passivation protects structure surface from uncontrolled degradation through growth finalization and exposition to the atmosphere. It is found that *in situ* passivated structure shows increase of the carriers concentration and decrease of their mobility. This effect should be taken into account for manufacturing passivated GaN-based transistor structures.