

УДК 621.382

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ, МОЩНЫХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

И.Ю. ЛОВШЕНКО, В.С. ВОЛЧЕК, ДАО ДИНЬ ХА, В.Т. ХАНЬКО,
ДЖАМАЛЬ СААД А. ОМЕР*, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

**Высший институт науки и техники
Триполи, Ливия*

Поступила в редакцию 18 ноября 2017

Описаны преимущества и недостатки применения нитрида галлия (GaN) по сравнению с другими полупроводниковыми материалами микроэлектроники. Показано, что высокая термическая, химическая и радиационная стойкость GaN позволяет использовать его для изготовления приборов, работающих при повышенных температурах и в экстремальных условиях, а его высокая теплопроводность упрощает охлаждение рабочей области. Определено, что сочетание высокой подвижности электронов и значительного поля пробоя делает его пригодным для изготовления мощных высокочастотных и высокотемпературных транзисторов. Рассмотрены конструктивные решения и технологические методы формирования приборных структур на основе GaN.

Ключевые слова: нитрид галлия, технология, приборная структура, датчик, моделирование.

Введение

Перспективными материалами с широким спектром практических применений являются структуры на основе полупроводниковых нитридов. Гетероструктуры на основе нитрида галлия и его твердых растворов обладают физическими свойствами, которые обеспечивают электронным приборам на их основе оптические, мощностные и частотные характеристики, позволяющие применять их в разных областях полупроводниковой электроники [1]. Спектр применения данного материала в оптоэлектронике широк: светодиоды сине-зеленой области видимого спектра, светодиоды ближнего ультрафиолетового диапазона, источники белого света на основе системы «кристалл – люминофор», активные среды лазерных диодов и др. [2]. Структуры на основе GaN перспективны не только для использования в оптоэлектронике, но и для применения в целях разработки компонентной базы силовой и СВЧ-электроники – диодов Шоттки (ДШ) и транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ); приборов, работающих в условиях жесткой радиации.

Характеристики нитрида галлия

Высокая по сравнению с другими полупроводниковыми материалами термическая, химическая и радиационная стойкость нитрида галлия позволяет использовать его для изготовления приборов, работающих при повышенных температурах и в неблагоприятных условиях [3]. Высокая теплопроводность нитрида галлия позволяет путем его использования упрощать решение проблем охлаждения рабочей области, а сочетание высокой подвижности электронов и значительного поля пробоя делает его пригодным для применения в процессе изготовления мощных высокочастотных и высокотемпературных транзисторов. Прямой

характер межзонных переходов, большая ширина запрещенной зоны, образование твердых растворов изоморфного замещения с нитридами алюминия и индия обуславливают возможность значительного расширения спектрального диапазона работы изготавливаемых на его основе светоизлучающих и фотоприемных устройств.

Преимуществами применения GaN в микроэлектронике являются следующие.

1. Высокая удельная плотность выходной мощности (компанией Cree [4] создан полевой GaN транзистор с гетеропереходом и управляющим затвором Шоттки (ГПТШ) с затвором длиной $L_z=0,55$ мкм и шириной $W_z=246$ мкм, выходная мощность $P_{\text{вых}}$ которого в непрерывном режиме на частоте 4 ГГц составляет выше 7,9 Вт при коэффициенте усиления по мощности $K_p=14$ дБ и коэффициенте добавленной мощности $h_{add}=54,8\%$. Таким образом удельная выходная мощность прибора $P_{\text{уд.вых}}=32,2$ Вт/мм [5] почти в три раза превышает предыдущие рекордные характеристики для ГПТШ).

2. Высокая рабочая температура (транзисторы сохраняют работоспособность при температурах до 500–600 °С [6]).

3. Применения для маломощных транзисторов в диапазоне частот от 1 ГГц до 25 ГГц (минимальный фактор шума GaN-транзистора с затвором длиной 0,12 мкм составляет 0,53 дБ на частоте 8 ГГц [7, 8]).

4. Возможность создания гибридных и монокристаллических микросхем на GaN-транзисторах [9].

5. Низкое по сравнению с традиционными транзисторами сопротивление во включенном состоянии (снижение потребления энергии) [10].

6. Удешевление GaN-приборов за счет применения высокоомных подложек Si (111). Главная трудность при использовании кремниевых подложек – получение в ходе эпитаксии качественного переходного слоя GaN-Si (111). Она обусловлена сильным различием коэффициента теплового расширения и параметров решетки этих двух материалов.

7. Высокая радиационная стойкость приборов [11].

Несмотря на наличие большого количества положительных свойств, приборные структуры на основе GaN имеют и ряд недостатков, основными из которых являются следующие.

1. Высокие требования к обеспечению эффективного теплоотвода от активной структуры.

2. Необходимость выращивания эпитаксиальных структур GaN на подложках, отличающихся по параметрам кристаллической решетки и тепловому расширению. Это обусловлено невозможностью реализации высокоомной подложки GaN (существенных успехов в решении данной задачи добились компании Ammono [12] и «Тринитри» [13]).

Для транзисторов существенной проблемой GaN-технологии является нестабильность тока стока I_c при увеличении напряжения стока V_c (например, резкое падение тока стока при достижении определенных значений V_c – эффект «коллапс»). Кроме того, обнаружилось ухудшение параметров приборов на высокой частоте, даже если они имели хорошие статические характеристики (эффект «дисперсия крутизны») и несоответствие в импульсном режиме выходного сигнала входному при изменении его значения (эффект «задержки затворного сигнала»). Все эти эффекты нестабильности связаны с дефектами материала (ловушечными центрами захвата), как на поверхности в области затвор-сток и затвор-исток, так и в объеме буферного GaN-слоя [14]. Предложены способы борьбы с ловушечными центрами на поверхности – пассивация поверхности готовых транзисторных структур тонкой диэлектрической пленкой SiN_x с определенным зарядом, связывающим поверхностные ловушечные состояния (уровень энергии ловушек $E_l=1,8$ эВ) [15].

Технология

Эпитаксиальные структуры GaN на подложках из сапфира, SiC, Si (111) выращиваются методами осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (англ. MOCVD), молекулярно-лучевой эпитаксии (англ. MBE) и хлоридно-гидридной эпитаксии (англ. HVPE). Несмотря на положительные результаты, достигнутые к настоящему времени, технология формирования исходных эпитаксиальных структур AlGaN/GaN на подложках сапфира, SiC и Si (111) методами гетероэпитаксии еще далека от совершенства. Структуры, выращенные

методами MOCVD, MBE и HVPE, имеют большую плотность дефектов (от 10^6 до 10^9 см⁻²). Присутствие дефектов сказывается на долговременной работе, особенно в условиях высоких напряжений и повышенных температур. Более 30 компаний в мире являются производителями GaN-подложек, основные из которых – Imec, Epigan, Novagan, Azzurro, Dowa, Nttat, Powdec, Кума, Translucent, Dow Corning.

Гетероэпитаксия приводит к возникновению механических напряжений, вследствие рассогласования постоянных решеток. Различие температурных коэффициентов расширения подложки и слоя приводит к возникновению напряжения при охлаждении структуры до комнатной температуры, что может привести к ее изгибу или растрескиванию структуры.

С точки зрения коммерческого применения, наиболее перспективным вариантом является случай, когда в качестве подложки используется кремний. Одним из методов, пригодных для выращивания подложек нитрида галлия на кремниевой подложке, является метод хлорид-гидридной газофазной эпитаксии (ХГЭ) [16]. На сегодняшний день этот метод является единственным промышленно реализованным. Технологией получения подложек нитрида галлия владеют лишь несколько компаний. Традиционные режимы технологической операции не гарантируют проведение качественной ХГЭ на подложках из кремния, т.к. не способны предотвратить процесс химической реакции между галлием и кремнием при температурах выше 1170 К, вызванный диффузией кремния в растущий слой. В [17] показано, что использование затравочных слоев позволяет существенно снизить эффекты рассогласования в системе GaN/Si. При толщинах наращиваемого GaN 0,3 мкм были получены эпитаксиальные слои, не содержащие трещин. Значительный интерес представляет гибридная технология, объединяющая в себе стандартную кремниевую и GaN-технологии [17].

Во всех случаях формирование кристалла осуществляется только за счет сухого (плазмохимического) травления. При этом используются источники плазмы с высокой плотностью ионов, таких как электронно-циклотронный резонанс и индукционная плазма, в которых высокий поток ионов обеспечивает высокую эффективность разрыва связей GaN. Для легирования GaN примесями *n*- и *p*-типа используется имплантация ионов Si⁺ и Mg⁺ с последующим высокотемпературным отжигом при температуре выше 1320 К [18, 19].

Конструктивные решения

На данный момент в мире реализованы различные типы нитрид-галиевых СВЧ-транзисторов, подтверждающие перспективность этого класса приборов. Создание гетеропереходных полевых транзисторов с затвором Шоттки на AlGaN/GaN – одно из главных направлений СВЧ-полупроводниковой электроники. Основной элемент такой структуры – область двумерного газа в квантовом колодце, расположенная непосредственно под гетеропереходом. Подвижность в этой области составляет 2000 см²/Вс, а концентрация носителей 10^{13} см⁻². Структура ГПТШ представлена на рис. 1. Буферный слой улучшает параметры двумерного электронного газа, препятствует переходу его электронов на поверхностные состояния и объемные дефекты. Созданные конструкции ГПТШ позволяют получить выходную мощность более 8 Вт на частоте 4 ГГц [20].

На рис. 2 представлена приборная структура GaN-ТВПЭ, описанная в [21]. Типовая конструкция ТВПЭ на основе GaN лежит в основе многих перспективных химико-биологических сенсоров, датчиков давления и т.п. Светоизлучающий диод (СИД, англ. LED) на основе GaN представлен на рис. 3. Существует несколько разновидностей конструкции светодиодного чипа. Для светодиодов на основе классических соединений A_{III}B_V, таких как GaAs и InP, типичным в конструкции чипа является наличие контактных площадок на поверхности структуры. Вывод света также осуществляется через поверхность, поскольку подложка непрозрачна для излучения, генерируемого в активной области структуры. Такая конструкция чипа называется *face-up* или чип с излучением через поверхность. В настоящее время абсолютное большинство коммерческих светодиодных кристаллов на основе GaN выращивается на подложках монокристаллического сапфира. Наличие прозрачной для излучения и непроводящей подложки способствует использованию *flip-chip* конструкции светодиодного кристалла, в которой обе контактные площадки находятся на одной стороне структуры, а генерируемый свет выводится с противоположной стороны через прозрачную сапфировую подложку. Несомненным

достоинством является возможность монтажа чипа на плате-носителе без контактных проводников, что перспективно для массового производства.

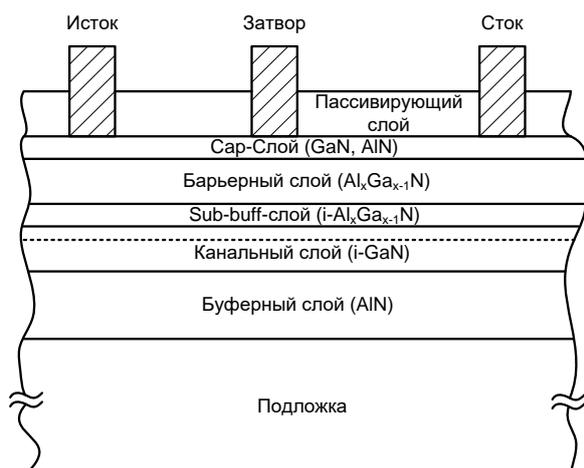


Рис. 1. Типовая структура GaN-ГПТШ

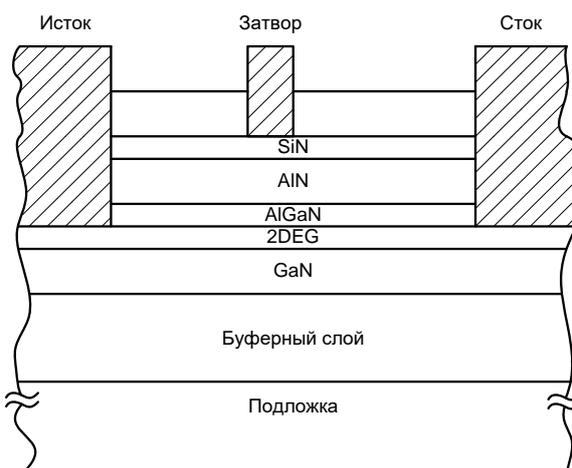


Рис. 2. GaN-ТВПЭ с изолированным затвором

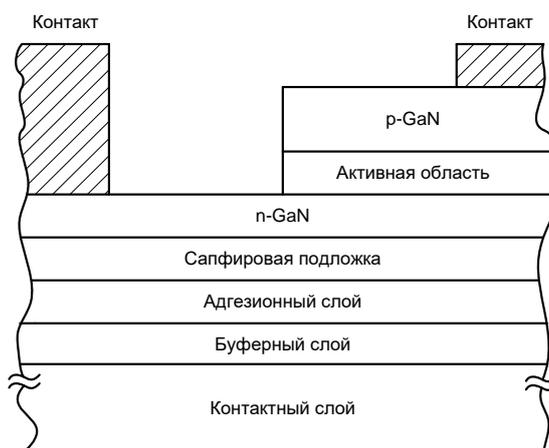


Рис. 3. GaN-СИД

В условиях эксплуатации светодиодов при повышенных токах особое значение приобретает обеспечение эффективного отвода тепла от кристалла. По этому параметру flip-chip кристаллы существенно превосходят face-up кристаллы, в которых сапфировая подложка, отделяющая кристалл от теплоотвода, имеет низкую теплопроводность и препятствует эффективному теплопереносу [22].

Так как GaN является достаточно перспективным полупроводниковым материалом с точки зрения создания радиационно-стойкой СВЧ элементной базы для использования в военной и космической технике, его применяют при изготовлении различных датчиков: УФ-излучения (рис. 4), датчик ИК-излучения и датчик ионизирующего излучения (ИИ) [23]. Повышенная устойчивость к ионизирующему излучению делают GaN перспективным материалом для создания длительно работающих солнечных батарей космических аппаратов. На рис. 5 в качестве примера представлена приборная структура ячейки и преобразователь солнечной батареи.

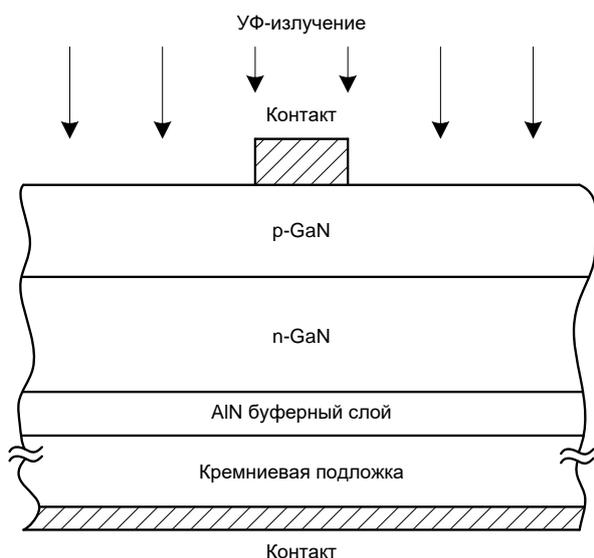


Рис. 4. Датчик УФ-излучения

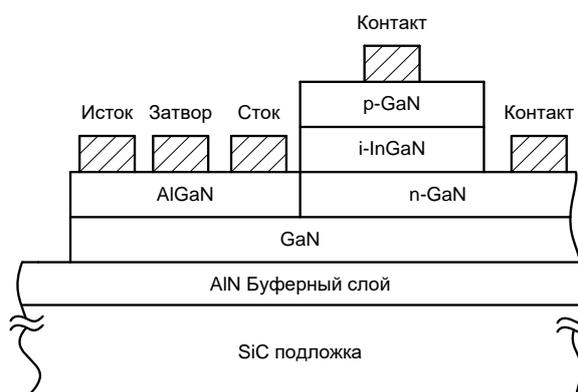


Рис. 5. Преобразователь солнечной батареи

Компьютерное моделирование приборных структур на основе Ga

Для создания перспективных приборов и устройств необходимо использовать современные системы проектирования, в частности, системы приборно-технологического моделирования. Такие системы позволяют численно оценивать влияние различных конструктивных и технологических решений на параметры разрабатываемых устройств, что существенно уменьшает затраты на проведение экспериментов.

Большинство современных САПР приборно-технологического моделирования были созданы, в первую очередь, для расчета приборов на основе кремниевой технологии. Модели, которые используются для расчета кремниевых приборов, прошли отработку и позволяют с высокой степенью точности рассчитывать статические и динамические характеристики. При переходе к широкозонным материалам, в частности, GaN, использовать данные модели невозможно. В последнее время разработано большое число моделей для расчета приборов на основе указанных материалов.

В программном комплексе компании Silvaco существует модуль Blaze, который позволяет имитировать устройства, изготовленные с использованием современных материалов. Он включает в себя библиотеку двойных, тройных и четверных полупроводниковых соединений, Blaze имеет встроенные модели для градуированных и резких гетеропереходов и имитирует бинарные структуры, такие как ПТШ, HEMTs и HBTs. Все измеримые DC, AC и переходные характеристики устройства могут быть получены в результате моделирования. В рассчитываемые характеристики DC входят пороговое напряжение, коэффициент усиления, токи утечки, напряжение и ток пробоя и т.д. В [24–30] представлены результаты моделирования приборных структур на основе GaN.

Благодарности

Представленные результаты получены в рамках выполнения задания 3.1.02 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» и 1.8.05 ГПНИ «Информатика, космос и безопасность».

Заключение

Проведенный анализ и полученные ранее результаты показывают, что по сравнению с другими полупроводниками нитрид галлия (GaN) обладает объективными преимуществами для применения в качестве базового материала при изготовлении силовых, высокочастотных и оптоэлектронных приборов.

Высокая термическая, химическая и радиационная стойкость GaN позволяет использовать его для формирования структур, работающих при повышенных температурах и в экстремальных условиях, а высокая теплопроводность упрощает охлаждение рабочей области; сочетание высокой подвижности электронов и значительного поля пробоя делает его пригодным для изготовления мощных высокочастотных и высокотемпературных транзисторов.

TECHNOLOGICAL AND CONSTRUCTIVE SOLUTIONS FOR HIGH-FREQUENCY, POWERFUL AND OPTOELECTRONIC DEVICES BASED ON GALLIUM NITRIDE

I.Yu. LOVSHENKO, V.S. VOLCHECK, V.T. KHANKO,
DAO DINH HA, JAMAL SAAD, V.R. STEMPISTKY

Abstract

Advantages and disadvantages of gallium nitride (GaN) usage in comparison with other microelectronics semiconductor materials are described. It is shown that high thermal, chemical and radiation resistance of GaN makes possible to use it for the manufacture of devices operating at elevated temperatures and under extreme conditions, and high thermal conductivity simplifies the cooling of the working region. It is determined that combination of high mobility of electrons and a significant breakdown field makes it suitable for the manufacture of high-power high-frequency and high-temperature transistors. The design solutions and technological methods for the formation of based on GaN devices are proposed.

Keywords: gallium nitride, technology, device structure, sensor, modeling.

Список литературы

1. *Jayant Baliga B.* Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Springer, 2008.
2. *Туркин А.Н.* // Компоненты и технологии. 2011. №5.
3. *Ансельм А.И.* Введение в теорию полупроводников. М., 1978.
4. LED Lighting, LED Technology, SiC & GaN Power, RF Solutions | Cree. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cree.com>.
5. *Wu Y.-F., Saxler A., Moore M. et al.* // IEEE Electron Devices Lett. 2004. №11(25). P. 117–119.
6. *Daumiller I., Kirchner C., Kamp M. et al.* // IEEE Electron Device Lett. 1999. №9. P. 440–450.
7. *Lu W., Kumar V., Piner E.L., Adesida I.* // IEEE Trans. Elec. Devices. 2003. №4(50). P. 1069–1074.
8. *Adesida I., Lu W., Kumar V.* // 6 Int. Conf. on Solid_State and IC Technology Proc. 2001. P. 1163–1168.
9. *Palmour J.W. et al.* // IEDM. 2001. P. 385–391.
10. *Kuzuhara M., Miyamoto H., Ando Y. et al.* // Phys. Stat. Sol. 2003. №1(200). P. 161–167.
11. *Данилин В.Н., Докучаев Ю.П., Жукова Т.А. и др.* // Обзоры по электронной технике. Сер.1. СВЧ-техника. 2001. Вып. 1.
12. Ammono. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ammono.com>.
13. Технологическая компания «Тринитри». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.trinitri.ru>.
14. *Binari S.C., Klein P.B., Kazior T.E.* // Proceedings of the IEEE. 2002. №6(90). P. 1048–1058.
15. *Lee J.S., Kim J.W., Lee J.H. et al.* // Electron. Lett. 2003. №9(39). P. 750–752.
16. *Мынбаева М.Г., Головатенко А.А., Печников А.И. и др.* // Физика и техника полупроводников. 2014. №11(48). С. 1573–1577.
17. *Chung J.W., Ryu K., Lu B. et al.* // Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference 2010 (ESSDERC). 2010. P. 52–56.
18. *Taking S.* // Glasgow Theses Service, 2012. P. 175.
19. *Ануфриев Л.П., Бордусов С.В. и др.* Технология изделий интегральной электроники Минск, 2009.
20. *Щука А.А.* Нанoeлектроника. М., 2012.
21. *Parikh P., Mishra U., Wu Y.* // United States Patent. 2007. №7. P. 230–284.
22. *Марков Л.К. и др.* // Физика и техника полупроводников. 2013. №3(47). С. 386–391.
23. *Громов Д.В., Матвеев Ю.А., Назарова Г.Н.* // Институт экстремальной прикладной электроники НИЯУ «МИФИ». Москва, 2012.
24. *Волчэк В.С. и др.* // Докл. БГУИР. 2015. №7(93). С. 99–105.

25. Волчѣк В.С., Дао Динь Ха, Ловиенко И.Ю. и др. // Докл. БГУИР. 2015. № 7(93). С. 99–105.
26. Волчѣк В.С., Стемпицкий В.Р. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2016). 2016. С. 1600–1606.
27. Volchek V., Dao Dinh Ha, Stempitsky V. et al. // 2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). 2016. P. 264–267.
28. Волчѣк В.С., Стемпицкий В.Р. // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. 2017. С. 122–123.
29. Волчѣк В.С., Стемпицкий В.Р. // Современные проблемы радиоэлектроники. 2017. С. 500–503.
30. Volcheck V.S., Stempitsky V.R. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 917.