

УДК 621.382

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В.С. ВОЛЧЁК, ДАО ДИНЬ ХА, И.Ю. ЛОВШЕНКО, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

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

Поступила в редакцию 30 октября 2015

Разработка сенсорных систем и исследование новых конструктивных решений, материалов и технологий для их получения является актуальной задачей. Транзистор с высокой подвижностью электронов находит все большее применение в таких системах. Выполнено приборно-технологическое моделирование характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов, изготовленных на основе AlGa_xN/GaN с использованием различных материалов подложки. Исследовано влияние процентного содержания Al и Ga в соединении Al_xGa_{1-x}N на характеристики рассматриваемого прибора.

Ключевые слова: сенсорная система, транзистор с высокой подвижностью электронов, нитрид галлия, приборно-технологическое моделирование.

Введение

В настоящее время успешно развиваются новые научные направления, связанные с созданием интегральных сенсорных устройств для различных отраслей экономики. В ряд важнейших вопросов, решаемых в рамках указанных научных направлений, входит задача разработки микро- и нанoeлектронных устройств для сенсорного контроля широкого перечня физических, химических, а также биологических параметров [1, 2]. С учетом этого проблема создания и исследования сенсорных систем, а также материалов и технологий для их получения представляется весьма актуальной.

Основой чувствительных элементов датчиков является вещество (материал), которое воспринимает входную физическую величину. В нем с помощью определенного физического явления входная величина преобразуется в сигнал, поступающий в последующую измерительную цепь. Помимо чувствительного элемента в измерительную цепь могут входить усилители, делители, фильтры, модуляторы, а также иные устройства преобразования измерительного сигнала, так как нередко нужно произвести изменения размеров или характера физической величины, прежде чем подавать ее на вход датчика. Особенно остро стоит проблема создания простых малогабаритных и легко размещаемых на объекте исследования датчиков.

Постоянное усложнение технологии изготовления и областей использования сенсорных устройств требует усовершенствования их конструктивных параметров, применения новых материалов и типов приборов. Решение данного типа задач возможно только с применением современных средств приборно-технологического проектирования технологических процессов и приборных структур микроэлектроники. При этом важно обеспечить возможность моделирования не только технологии изготовления и электрических характеристик сенсора, но и исследовать термические, механические и другие эффекты, возникающие в процессе его эксплуатации.

Перспективные материалы для полупроводниковых датчиков

В качестве основного материала для сенсорных устройств в течение нескольких десятилетий использовался кремний. Этот материал до сих пор остается привлекательным, так как хорошо отработанная технология позволяет получать сверхчистые монокристаллы кремния

больших размеров. Новыми перспективными материалами с широким спектром практических применений являются нитриды металлов третьей группы, в частности нитрид галлия. Гетероструктуры GaN 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. Высокая термическая, химическая и радиационная стойкость нитрида галлия позволяет использовать его для изготовления приборов, работающих при повышенных температурах и в неблагоприятных условиях. Высокая теплопроводность упрощает решение проблем охлаждения рабочей области, а сочетание высокой подвижности электронов и значительного поля пробоя делает его пригодным для 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 диапазона работы изготавливаемых на его основе устройств [3]. В таблице представлены основные свойства полупроводниковых материалов [4].

Электронные свойства полупроводниковых материалов

Свойство	Ед.	Материал							
		Si	GaAs	InP	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC	GaN	Алмаз
Ширина запрещенной зоны, E_g	эВ	1,12	1,42	1,34	2,4	3,26	3	3,39	5,47
Подвижность электронов, I_n	см ² /(В·с)	1500	8500	4600	1000	950	500	2000	2800
Подвижность дырок, I_p	см ² /(В·с)	600	400	150	40	120	80	200	2100
Скорость дрейфа электронов при насыщении, $vsat \times 10^7$	см/с	1,0	2,1	2,3	2,5	2,0	2,0	2,7	1,5...2
Критическое электрическое поле, E_c	МВ/см	0,025	0,4	0,5	2,0	2,2	2,5	5,0	20
Коэффициент теплопроводности, K	В/см·К	1,5	0,55	0,7	3...4	3...4	3...4	1,3	24
Диэлектрическая проницаемость, ϵ	–	11,68	12,8	12,5	9,7	10	10	9,5	5,7
C FoM	–	1	8,5	21	–	250	–	660	75000

* 3C, 4H, 6H – предлагаемые кристаллические структуры SiC материалов.

Для комплексного учета возможностей полупроводникового материала были предложены специальные критерии качества – «figure of merit», которые рассчитывались исходя из основных физико-химических параметров полупроводника. Для силовых полупроводниковых приборов основным таким критерием является C FoM (англ. Combined Figure of Merit) – коэффициент качества материала по отношению к кремнию для мощности и частоты. Как видно из таблицы, лучшими значениями C FoM обладают алмаз, нитрид галлия и карбид кремния. Несмотря на последние успехи [3], основными препятствиями на пути широкого внедрения приборов силовой электроники на основе алмаза являются проблемы получение высококачественного исходного материала и эпитаксиальных пленок, их высокая стоимость, сложность и дороговизна технологических процессов осаждения.

Исследуемая структура

На сегодняшний день известно множество конструкций различных сенсорных устройств на основе GaN [5–8]. Большинство из них в своей основе построены на базе транзистора с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ, англ. HEMT). В таком транзисторе для формирования проводящего канала используется контакт двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. Этот класс приборов очень перспективен для использования в химических и биологических сенсорах, обладающих высокой чувствительностью и позволяющих проводить анализ в режиме реального времени.

Для создания гетероперехода подбирается комбинация материалов с близкими по соответствующим значениям параметрами кристаллической решетки и коэффициентом термического расширения. Распространенной парой полупроводников, удовлетворяющей данным требованиям, являются GaAs и AlGaAs, а также GaN и AlGaN (рис. 1, а).

Основным элементом AlGaN/GaN-ТВПЭ является область двумерного электронного газа (ДЭГ, англ. 2DEG), которая формируется между барьерным слоем $Al_xGa_{1-x}N$ и нелегированным канальным слоем GaN. Ширина запрещенной зоны у $Al_xGa_{1-x}N$ выше, чем у

GaN, что приводит к расположению границы зоны проводимости GaN в области гетероперехода ниже уровня Ферми – образуется потенциальная яма (рис. 1, б). Так как в монокристаллическом нелегированном GaN отсутствуют центры рассеяния, подвижность электронов проводимости в нем оказывается очень высокой – на уровне до $2000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при комнатной температуре. Таким образом, в канальном слое GaN непосредственно под гетеропереходом формируется чрезвычайно тонкий слой с высокой плотностью и подвижностью свободных электронов.

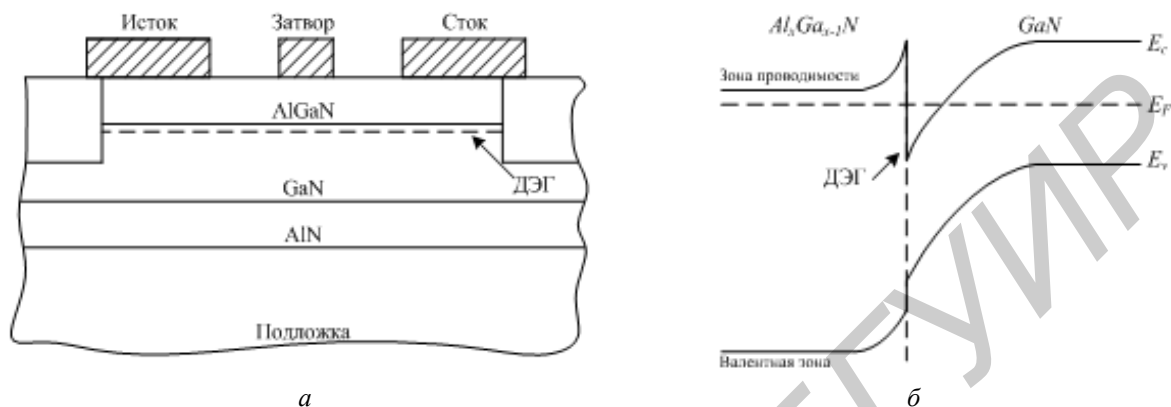


Рис. 1. Типичная структура GaN ТВИЭ (а) и потенциальная яма в области гетероперехода (б)

Верхняя часть барьерного слоя образует с металлом затвора барьер Шоттки, который управляет проводимостью канала. Для минимизации влияния поверхностных состояний на транзистор поверх барьерного слоя осаждается пассивирующий слой, например, Si_3N_4 .

Канальный слой выращивается на толстой высокоомной подложке. Основное назначение этого слоя – электрическая изоляция активных структур на кристалле друг от друга. В качестве подложки вместо GaN часто используют другие материалы. Так, эпитаксиальные структуры GaN на подложках из сапфира, SiC, Si (111) выращиваются методами осаждения из парогазовой фазы металлоорганических соединений, молекулярно-лучевой эпитаксии и хлоридно-гидридной эпитаксии. Несмотря на впечатляющие 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 [9]. Структуры имеют большую плотность дефектов ($10^6\text{--}10^9 \text{ см}^{-2}$).

Результаты

Моделирование приборной структуры ТВИЭ на основе GaN, а также расчет электрических характеристик прибора осуществлялось в программном комплексе компании Silvaco [10]. Сформированная транзисторная структура на основе гетероперехода AlGaN/GaN представлена на рис. 2. Структура состоит из толстого ($1,475 \text{ мкм}$) нелегированного слоя GaN, который играет роль подложки, тонкого (25 нм) барьерного слоя $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ и пассивирующего слоя Si_3N_4 . Длина области ДЭГ составляет 9 мкм .

На рис. 3, а представлена зависимость тока стока I_c от напряжения на затворе U_3 (сток-затворная характеристика) при напряжении на стоке $U_c = 1 \text{ В}$. На рис. 3, б представлена зависимость тока стока I_c от напряжения на стоке U_c (сток-стоковая характеристика) при напряжении на затворе $U_3 = 1 \text{ В}$.

Для анализируемой приборной структуры пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$ составило $-6,4 \text{ В}$, ток стока при отсутствии напряжения на затворе – $0,3 \text{ мА}$ (при $U_c = 1 \text{ В}$).

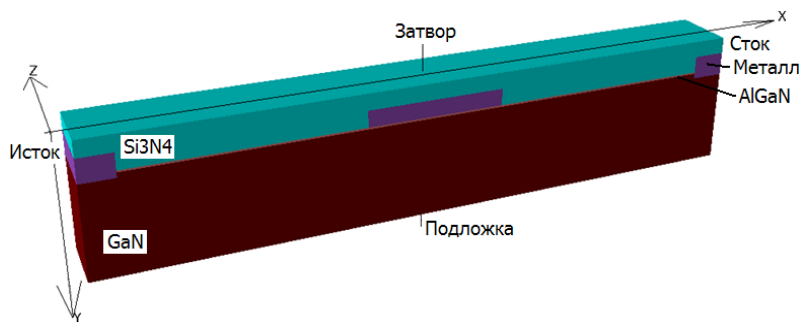
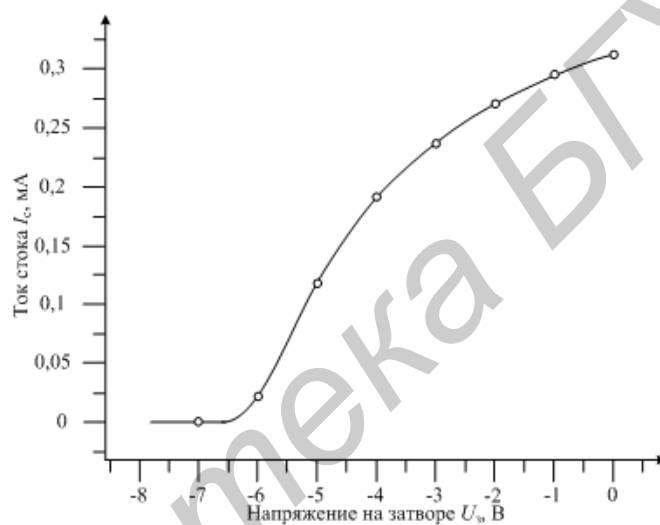
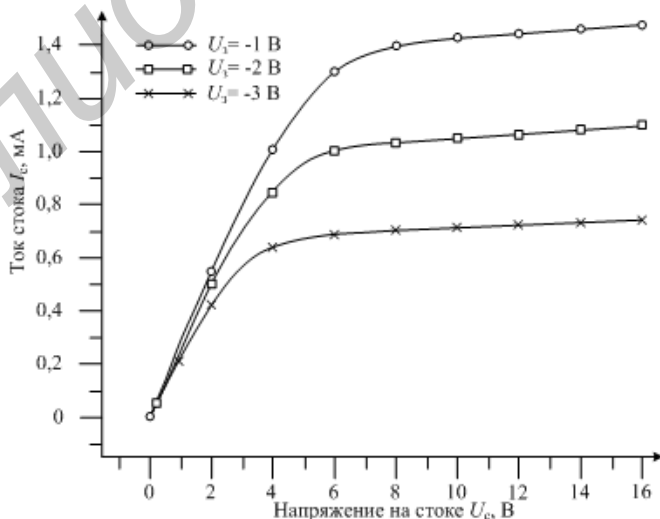


Рис. 2. Сформированная транзисторная структура на основе гетероперехода AlGaN/GaN

Проведено исследование влияния на электрические характеристики прибора материала подложки. В качестве материалов подложки использовались кремний Si с ориентацией (111) и карбид кремния SiC. Для частичной компенсации несоответствия решеток Si и GaN осуществляется осаждение промежуточного слоя AlN толщиной 20 нм. Толщина моделируемой области кремниевой и сапфировой подложки составляла 13 мкм.



a



б

Рис. 3. Сток-затворная (a) и сток-стоковая (б) характеристики GaN ТВПЭ

На рис. 4 представлены сток-затворные и сток-стоковые характеристики для трех вариантов подложки. Результаты моделирования показывают, что при использовании

в качестве материала подложки сапфира Al_2O_3 электрические характеристики транзистора отклоняются не более чем на 3,9 %. Так, пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$ остается практически одинаковым ($U_{\text{пор}} = -6,57$ В для Al_2O_3 -подложки, $U_{\text{пор}} = -6,53$ В для GaN-подложки). Отклонение тока стока I_c становится ощутимым только при значениях напряжения на стоке U_c больше 6 В ($I_c = 1,54$ мА для Al_2O_3 -подложки, $I_c = 1,48$ мА для GaN-подложки при $U_c = 16$ В).

В то же время при использовании кремниевой подложки значение порогового напряжения снижается по модулю на 2,76 % ($U_{\text{пор}} = -6,53$ В для GaN-подложки, $U_{\text{пор}} = -6,35$ В для Si-подложки), а также наблюдается уменьшение величины тока стока I_c на 0,1 мА (напряжение на стоке $U_c = 10$ В), что составляет 7 % от значения величины тока стока I_c для структуры с подложкой из нитрида галлия ($I_c = 1,43$ мА для GaN-подложки, $I_c = 1,33$ мА для кремниевой подложки при напряжении на стоке $U_c = 10$ В и затворе $U_s = 1$ В).

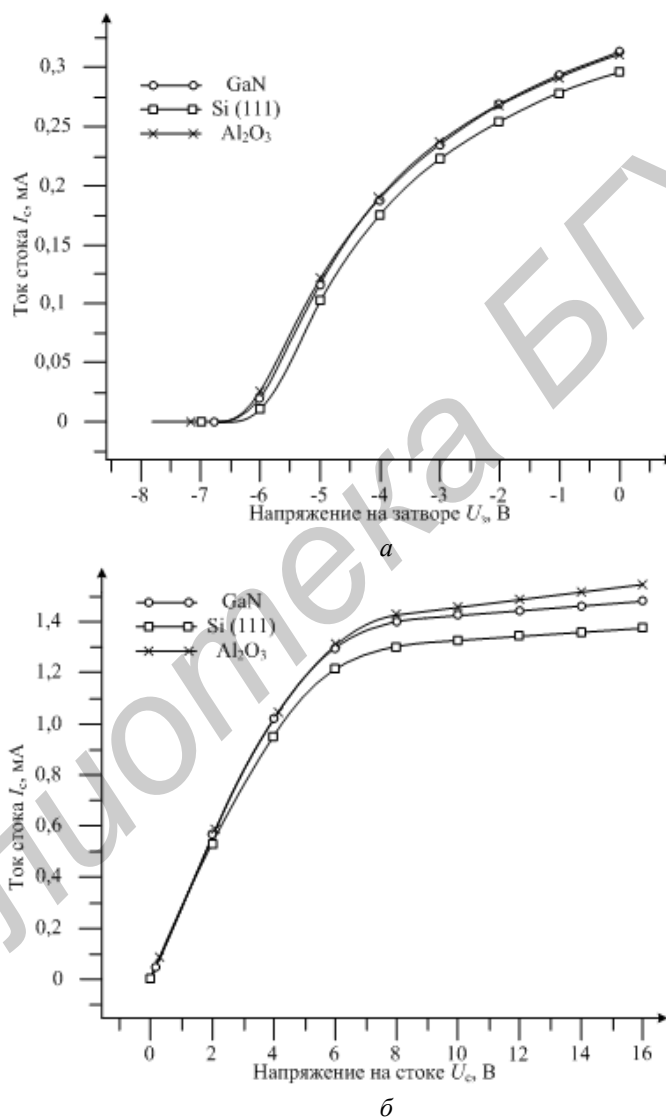


Рис. 4. Сток-затворная (а) и сток-стоковая (б) характеристики GaN ТВПЭ, сформированного на различных подложках

Значительный интерес представляет изучение влияния относительного содержания Al и Ga в соединении $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ на электрические характеристики прибора.

Изменяя содержание алюминия в кристаллической решетке $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в широком диапазоне составов ($0 \leq x \leq 1$), можно управлять основным фундаментальным параметром твердых растворов – шириной запрещенной зоны E_g в диапазоне от 3,4 эВ (GaN) до 6,2 эВ (AlN).

На рис. 5 показаны сток-затворные и сток-стоковые характеристики транзистора при различных относительных составах соединения AlGaIn . Из зависимостей тока стока I_c

от напряжения на затворе U_3 , представленных на рис. 5, а, видно, что уменьшение процентного содержания Al и увеличение Ga в соединении AlGa_xN приводит к существенному сдвигу порогового напряжения в положительном направлении. Так, при уменьшении процентного содержания Al в соединении Al_xGa_{1-x}N до значения $x = 0,27$, величина порогового напряжения $U_{пор}$ по модулю уменьшается на 12,56 % ($U_{пор} = -6,53$ В для содержания Al $x = 0,3$, $U_{пор} = -5,71$ В для $x = 0,27$). При дальнейшем уменьшении величины процентного содержания Al до значения $x = 0,25$ величина порогового напряжения $U_{пор}$ принимает значение $U_{пор} = -5,17$ В, что составляет 9,46 %.

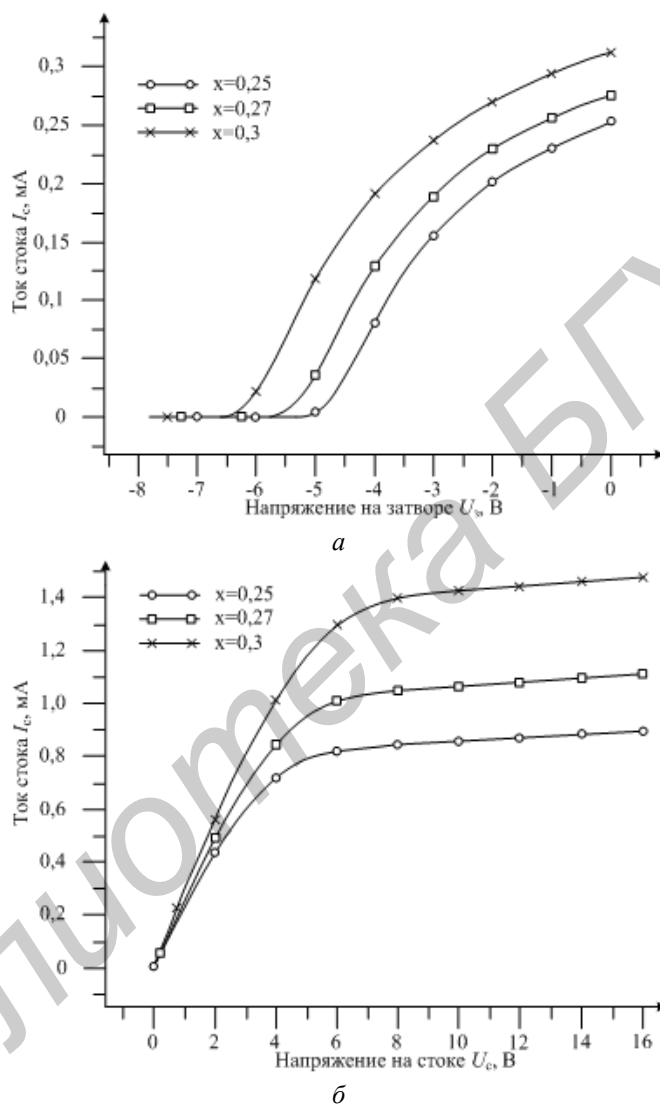


Рис. 5. Сток-затворная (а) и сток-стоковая (б) характеристики GaN ТВПЭ при различных относительных составах соединения AlGa_xN

При этом ток стока I_c снижается при уменьшении содержания Al (в диапазоне $0,25 \leq x \leq 0,3$). Так при напряжении на затворе $U_3 = 1$ В и стоке $U_c = 10$ В ток стока I_c при процентном содержании Al $x = 0,27$ равен $I_c = 1,07$ мА, что составляет 25,17 % от значения при содержании Al $x = 0,3$ ($I_c = 1,43$ мА). При дальнейшем уменьшении содержания Al ($x = 0,25$) ток стока I_c уменьшается на 19,6 % ($I_c = 0,86$ мА).

Закключение

Выполнено приборно-технологическое моделирование характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов, изготовленных на основе AlGa_xN/GaN с использованием различных материалов подложки. Результаты моделирования показывают, что при

использовании в качестве материала подложки сапфира Al_2O_3 , электрические характеристики транзистора отклоняются не более чем на 3,9 % (при значениях напряжения на стоке $U_c > 6$ В). Использование кремниевой подложки приводит к снижению по модулю значения порогового напряжения на 2,76 % (со значения $U_{\text{пор}} = -6,53$ В для GaN-подложки до $U_{\text{пор}} = -6,35$ В для Si-подложки), а также к уменьшению величины тока стока I_c на 0,1 мА (напряжение на стоке $U_c = 10$ В), что составляет 7 %.

Исследовано влияние процентного содержания Al и Ga в соединении $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{N}$. Уменьшение процентного содержания Al и увеличение Ga в соединении $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{N}$ приводит к существенному сдвигу порогового напряжения в положительном направлении (20,8 % при изменении содержания Al от $x = 0,3$ до $x = 0,25$). При этом ток стока I_c снижается на 39,9 % ($I_c = 1,43$ мА при $x = 0,3$ и $I_c = 0,86$ мА при $x = 0,25$) при напряжении на затворе $U_3 = 1$ В и стоке $U_c = 10$ В.

Исследования выполняются при финансовой поддержке государственных программ научных исследований «Информатика и космос» (задание 1.06) и «Электроника и фотоника» (задание 1.1.16).

CONSTRUCTION AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WIDE BANDGAP SEMICONDUCTORS SENSORS

V.S. VOLCHEK, DAO DINH HA, I.Yu. LOVSHENKO, V.R. STEMPIITSKY

Abstract

The development and research of new constructive solutions, materials and technologies for sensor systems production is an actual problem. The transistor with high electron mobility (HEMT) is increasingly being used in such systems. The device-technological simulation of the characteristics of HEMT, based on AlGaN / GaN using different substrate materials has implemented. The influence of the percentage of Al and Ga in combination $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{N}$ on the characteristics of considered unit has studied.

Список литературы

1. Наука за рубежом. Ежемесячное обозрение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.issras.ru/global_science_review. – Дата доступа: 30.10.2015.
2. Мейджерс Дж. К. М. Интеллектуальные сенсорные системы. М., 2011.
3. Васильев А., Данилин В., Жукова Т. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. №4. С. 68–76.
4. Колотун О. // CHIP NEWS Украина. 2013. № 2 (122). С. 2–6.
5. Nariaki Ikeda, Jiang Li, Sadahiro Kato u.a. // Furukawa Review. 2006. № 29. P. 1–6.
6. Jeong-Sun Moon, Nicholas Prokopuk, Kyung-Ah Son. GaN-based sensor nodes for in situ detection of gas / Patent US 7,403,113 B2.
7. Vitushinsky R. Electrochemical sensor comprising a 2-dimensional electron gas layer (2DEG) and method for electrochemical sensing using such electrochemical sensor / Patent EP 2 479 563 B1.
8. Vinod Kumar Khanna // Frontiers in Sensors (FS). 2013. N3
9. Taking S., MacFarlane D., Wasige E. // Hindawi Publishing Corporation Active and Passive Electronic Components Volume. 2011. Article ID 821305.
10. Victory Process User's Manual User's Manual. Device simulation software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: victoryprocess_users.pdf. – Дата доступа: 30.10.2015.