

ОБЗОР РАЗРАБОТОК ТЕХНОЛОГИИ НИТРИДНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ЗАО «СВЕТЛАНА-РОСТ»

*А.Э. Бырняз, А.Л. Дудин, А.В. Найденов, С.В. Кокин, Д.М. Красовицкий, М.В. Павленко,
С.И. Петров*, И.С. Ткаченко, В.П. Чалый*

ЗАО «Светлана-РОСТ». пр. Энгельса, д. 27, 194156, Санкт-Петербург,
тел. +7(812)7021308, e-mail: petrov@semiteq.ru;

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений при разработке и создании приборов на основе нитридов металлов третьей группы являются мощные СВЧ-транзисторы. Полный цикл создания нитридного транзистора включает в себя следующие основные этапы: выбор подложки, выбор конструкции гетероструктуры, рост гетероструктуры, разработка топологии, планарные операции (создание приборной топологии), утонение приборной структуры со стороны подложки, резка на чипы и корпусирование.

В настоящем докладе представлены результаты текущих разработок на различных этапах создания нитридного транзистора. В качестве подложек были использованы все основные виды, применяемые при росте нитридов для транзисторов: сапфир, полуизолирующий SiC, темплейт AlN/SiC и полуизолирующий кремний. Кроме того, были получены определенные успехи при создании собственных темплейтов, включающих «толстые» переходные слои AlN или AlGaN на p-SiC, на которых выращены транзисторные структуры и получены транзисторы, о чем на настоящей конференции будет сделан отдельный доклад. Выбор конструкции основывается на концепции двойной гетероструктуры, позволяющей сбалансировать механические напряжения, увеличить электронное ограничение и минимизировать эффект уменьшения тока транзистора при работе в СВЧ-режиме («коллапс» тока). Концепция двойной гетероструктуры для нитридного транзистора была выбрана нами в 2003 г. и с тех пор сделаны существенные шаги по ее оптимизации, о результатах которых сообщалось на предыдущих конференциях [1]. (На настоящей конференции будет представлен отдельный доклад о влиянии конструкции эпитаксиальной структуры на свойства нитридного транзистора). Следует отметить, что указанная концепция в последние годы принята на вооружение уже целым рядом ведущих зарубежных разработчиков и производителей, таких как Picogiga, III-V labs (обе - Франция), QinetiQ (Великобритания), Linkoping University (Швеция), Fujitsu (Япония), IAF (Германия), IMEC (Бельгия) и др.

Приборная топология (мощного транзистора и широкополосного усилителя), используемая нами, была разработана ОАО «ВНИИРА» по правилам проектирования, учитывающим технологические особенности маршрута ЗАО «Светлана-Рост». Кроме того, нами были разработаны тестовые модули, включающие в себя ряд элементов для тестирования структур в статическом и СВЧ-режимах. Планарные операции, включающие нанесение и вжигание омических контактов, травление меза изоляции и нанесение затворов с проектной нормой 1 мкм, были проведены на пост-ростовом участке, имеющем 4-6 класс по Р ИСО 14644. Основное направление разработки пост-ростовой технологии на данный момент - это уменьшение ширины затвора. В настоящий момент получены затворы с шириной 0,5-1 мкм. Разработаны технологии утонения приборных гетероструктур на всех перечисленных видах подложек до толщины 50-100 мкм (что необходимо для обеспечения теплоотвода), а также резки пластин на чипы. В настоящее время ведется оптимизация теплоотвода и разработка технологии корпусирования.

В результате получены следующие рекордные для России результаты в приборах с длиной затвора 1 мкм: широкополосный усилитель в диапазоне 0,1-3,5 ГГц с выходной мощностью до 2,5 Вт на подложке AlN/SiC, а также мощный нитридный транзистор с выходной мощностью 20 Вт (в импульсном режиме) в С-диапазоне на сапфировой подложке. Транзисторы были подвергнуты комплексным испытаниям надежности в ОКБ «Планета» и выдержали испытания на безотказность в течение 1500 часов при температуре 85⁰С. Также испытания показали, что уровень бесперебойной работы для усилителей составляет не менее 150⁰С. Все ключевые конструкторско- технологические решения реализованы на базе отечественных разработок и на технологическом оборудовании российского производства.

[1] А.Н. Алексеев и др., Тезисы докладов шестой Всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия- структуры и приборы”, Санкт-Петербург 18-20 июня 2008, стр. 151

**OVERVIEW OF THE NITRIDE TRANSISTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN JSC
«SVETLANA-ROST»**

A.E.Byrnaz, A.L. Dudin, A.V. Naidenov, S.V. Kokin, D.M.Krasovitsky, M.V.Pavlenko,

S.I.Petrov, I.S. Tkachenko, V.P.Chaly*

JSC «Svetlana-Rost», p/o box 29, 194156, St. Petersburg,

phone. +7(812)7021308, e-mail: petrov@semiteq.ru;

The broad-band amplifier in band 0,1-3,5 GHz with output power of 2,5 W on AlN/SiC substrate and C-band power microwave transistor with 20 W output power (in pulse mode) on sapphire substrate were realized. Transistors demonstrate reliable work during 1500 hours at temperatures up to 150⁰C.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ НИТРИДНОГО ТРАНЗИСТОРА НА ЕГО СВОЙСТВА

А.Э. Бырняз, А.Л. Дудин, А.В. Найденов, С.В. Кокин, Д.М. Красовицкий, М.В. Павленко, С.И. Петров, И.С. Ткаченко, В.П. Чалый*

ЗАО «Светлана-РОСТ». пр. Энгельса, д. 27, 194156, Санкт-Петербург,
тел. +7(812)7021308, e-mail: petrov@semiteq.ru;

Высокомощные и высокочастотные электронные приборы на основе гетероструктур GaN/AlGaIn привлекают большое внимание в силу их потенциальных применений. Для получения приборов с высокой эффективностью требуется уменьшение слоевого сопротивления, что подразумевает выращивание гетероструктур с высокой подвижностью электронов в двумерном электронном газе (ДЭГ) при их высокой концентрации. Кроме того, для обеспечения межприборной изоляции и эффективного электронного ограничения канала, буферный слой должен обладать необходимыми изолирующими свойствами. Последнее требование успешно было нами реализовано при использовании двойной гетероструктуры. При этом было обнаружено, что проводимость буферного слоя AlGaIn с одинаковым содержанием Al может изменяться в достаточно широком диапазоне в зависимости от конструкции и условий роста на начальных этапах роста. Этот вывод можно распространить на все слои, входящие в гетероструктуру, и на слой GaN в частности. Установлено, что преднамеренно легированные слои GaN толщиной 1,5 мкм, выращенные с использованием начальных стадий, обеспечивающих высокое сопротивление, имеют небольшую проводимость n-типа, которая не определяется при помощи измерений методом Холла. Подвижность электронов в слабелегированном GaN в этом случае составляет 400-500 см²/Вс при концентрации 3-5·10¹⁶ см⁻³. Сопротивление буферного слоя AlGaIn с содержанием Al 10% позволяет достигнуть уровня утечек по мезаизоляции менее 1 мкА при приложении напряжения 50 В, что соответствует сопротивлению более 50 Мом. В случае использования начальных стадий, обеспечивающих высокую подвижность электронов в легированном GaN находится на уровне 100 см²/Вс при концентрации около 5·10¹⁵ см⁻³. Подвижность электронов в слабелегированном GaN в этом случае составляет 600-650 см²/Вс при концентрации 3-5·10¹⁶ см⁻³. Такие значения электрофизических параметров находятся в числе лучших значений, достигнутых в мире на сегодняшний день, и свидетельствуют о высоком кристаллическом совершенстве материала. Подобные значения электрофизических параметров достигаются при плотности дислокаций в материале на уровне 5·10⁸ см⁻², что подтверждается результатами просвечивающей электронной микроскопии. При этом уровень утечек по мезаизоляции буферного слоя AlGaIn с содержанием Al 10% увеличивается до нескольких десятков микроампер при приложении напряжения 50 В. Подвижность двумерного электронного газа (ДЭГ) в многослойных гетероструктурах AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn при содержании Al в верхнем барьерном слое 30%, выращенных в двух упомянутых режимах находится на уровне 1000-1250 см²/Вс и 1300-1500 см²/Вс при концентрации около 1,6 см⁻², что соответствует значениям слоевого сопротивления 310-340 Ом/ед. пл. и 270-300 Ом/ед. пл..

Далее рассмотрено влияние барьерного слоя AlGaIn на свойства тестовых транзисторов. Установлено, что изменение содержания Al в барьерном слое от 25% до 40% (а в случае квантоворазмерной толщины слоя GaN 5 нм до 50%) приводит к изменению слоевого сопротивления от 420-480 до 220-230 Ом/ед. пл. Изменение профиля легирования барьерного слоя с содержанием Al 25% позволяет уменьшить слоевое сопротивление, однако оно остается на уровне больше, чем для 30% барьерного слоя. Уменьшение слоевого сопротивления приводит к увеличению тока насыщения, однако увеличение содержания Al в барьерном слое выше 30% затрудняет получение омических контактов и требует дополнительной оптимизации режимов термического отжига. Представлены результаты получения барьерных слоев с «сар»-слоем GaN и барьерных слоев, состоящих из сверхрешетки AlN/GaN. В тестовом транзисторе на основе многослойной гетероструктуры со сверхрешеткой AlN/GaN со средним составом 50% в барьерном слое получены параметры соизмеримые со стандартными структурами, при этом крутизна возрастает более чем в полтора раза за счет возможности уменьшения толщины барьерного слоя при сохранении уровня слоевого сопротивления.

IMPACT OF EPITAXIAL STRUCTURE DESIGN FOR NITRIDE TRANSISTOR ON ITS PROPERTIES

A.E.Byrnaz, A.L. Dudin, A.V. Naidenov, S.V. Kokin, D.M.Krasovitsky, M.V.Pavlenko, S.I.Petrov, I.S. Tkachenko, V.P.Chaly*

JSC «Svetlana-Rost», p/o box 29, 194156, St. Petersburg,
phone. +7(812)7021308, e-mail: petrov@semiteq.ru;

It is found that initial growth regimes and design of AlN/AlGaN/GaN/AlGaN multilayer heterostructure can change its conductivity in wide range from semi-insulator to conducting material. It is used for design of different type's structures: transistor heterostructure with highly insulating buffer or heterostructure in which good conductivity is needed. Furthermore different barrier layers are considered. It is shown that 2DEG sheet resistance can be changed in range from 220 to 480 Ohm/sq. by variation of Al content in barrier layer and its construction. Also, transconductance is increased by more than 50 % using superlattice AlN/GaN in barrier layer.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕМПЛЕЙТОВ $\text{AlN}(\text{AlGaN})/\text{n-SiC}$ И ТРАНЗИСТОРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА НИХ МЕТОДОМ МЛЭ

А.Э. Бырняз, А.Л. Дудин, А.В. Найденов, С.В. Кокин, Д.М. Красовицкий, М.В. Павленко, С.И. Петров, И.С. Ткаченко, В.П. Чалый*

ЗАО «Светлана-РОСТ». пр. Энгельса, д. 27, 194156, Санкт-Петербург,
тел. +7(812)7021308, e-mail: petrov@semiteq.ru;

Одной из основных проблем в производстве мощных нитридных СВЧ-транзисторов, является теплоотвод от приборов, рассеиваемая мощность которых составляет десятки Ватт. Среди использовавшихся до последнего времени подложек для роста нитридных гетероструктур наилучшие, по соотношению рабочих частот и мощностей, результаты достигаются на подложках полупрозрачного SiC. Их основными недостатками является высокая стоимость и торговые ограничения по ряду параметров, обусловленные практически монопольным положением на рынке основных производителей. Альтернативным представляется подход, предложенный в 2004 г. японской компанией Fujitsu (Япония), основанный на использовании относительно толстых переходных изолирующих слоев AlN на более дешевых подложках SiC n-типа проводимости, используемых в мире для производства светодиодов на основе GaN. В настоящее время темплейты AlN/SiC уже производятся рядом фирм. Ранее нами были продемонстрированы результаты по получению статических параметров в транзисторах на таких подложках [1]. Кроме того, на настоящей конференции в докладе о нитридных транзисторах сообщается о получении широкополосного усилителя с длиной зазора 1 мкм, работающего на частоте до 3,5 ГГц с выходной мощностью 2,5 Вт на подложке AlN/SiC.

В настоящем докладе приводятся предварительные данные о разработке технологии выращивания «толстых» изолирующих переходных слоев AlN (до 5 мкм) и AlGaN (до 10 мкм), методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Режимы роста обрабатывались на сапфире и затем переносились на подложки n-SiC, при этом из-за различия постоянных решеток и КТР сапфира и карбида кремния требовалась дополнительная оптимизация конструкции переходных слоев.

Одной из основных проблем при получении качественных слоев AlN является обеспечение высокой (более 1000⁰С) температуры роста. В настоящей работе гетероструктуры были выращены на установке STE3N2 (Semiteq), специализированной для аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии нитридов III группы. Уникальными особенностями данной установки является расширенный диапазон температур подложки (до 1200⁰С) и отношений V/III. На подложках сапфира были получены слои AlN толщиной до 5 мкм. Далее, на этих слоях были выращены транзисторные гетероструктуры и сформированы тестовые транзисторы, параметры которых находятся на уровне транзисторов на стандартных структурах. Слои AlN толщиной 5 мкм были выращены также и на подложках n-SiC. Электрофизические параметры гетероструктур на таких подложках соответствуют уровню гетероструктур на стандартных подложках. О результатах измерения параметров тестовых транзисторов на таких подложках будет доложено дополнительно.

Также был использован и альтернативный вариант, подразумевающий менее экстремальные режимы роста с использованием «толстых» изолирующих слоев AlGaN. Ток насыщения и крутизна тестовых транзисторов на подложках n-SiC с использованием переходных слоев AlGaN находятся на уровне аналогичных параметров на подложках полупрозрачного SiC и AlN/SiC. Пробойные напряжения несколько уступают транзисторам на стандартных подложках (более 80 В) и составляют 30-50 В, что может быть связано с более высоким уровнем утечек по буферному слою. В настоящее время производится оптимизация состава и конструкции слоя AlGaN для увеличения сопротивления буферного слоя.

[1] А.Н. Алексеев и др., Тезисы докладов шестой Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия- структуры и приборы», Санкт-Петербург 18-20 июня 2008, стр. 151

**DEVELOPMENT OF GROWTH TECHNOLOGY OF AlN(AlGaN)/n-SiC TEMPLATES AND
TRANSISTOR HETROSTRUCTURES ON IT USING MBE**

*A.E.Byrnaz, A.L. Dudin, A.V. Naidenov, S.V. Kokin, D.M.Krasovitsky, M.V.Pavlenko,
S.I.Petrov*, I.S. Tkachenko, V.P.Chaly*

JSC «Svetlana-Rost», p/o box 29, 194156, St. Petersburg,
phone. +7(812)7021308, e-mail: petrov@semiteq.ru;

«Thick» AlN (up to 5 mkm) and AlGaN (up to 10 mkm) layers were grown on n-SiC to obtain templates for nitride transistor growth. Electrophysical parameters of transistor heterostructures on such templates correspond to level of heterostructures on standard substrates. Breakdown voltages of test transistors on heterostructures with «thick» AlGaN layer are quite lower than on standard substrates. It is may be due to higher level of buffer leakage. Now composition and design of buffer layer is optimized to increase its resistance.

InAlN/GaN и (AlN/GaN)/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

А.В. Сахаров, В.В. Лундин, А.Е. Николаев, Е.Е. Заварин,
М.А. Сеницын, М.А. Язовкина, А.Ф. Цацульников*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
194021, ул. Политехническая 26, С-Петербург, Россия, *val@beam.ioffe.rssi.ru

В последние годы полевые транзисторы с высокой подвижностью носителей в канале (HEMT) на основе гетероструктур InAlGaN являются объектом многочисленных исследований и уже становятся коммерчески доступными [1,2]. Большие значения ширины запрещенной зоны, насыщенной скорости электронов, напряженная пробова хорошая теплопроводность и температурная стойкость позволяют создавать мощных высокочастотных транзисторов с параметрами, превосходящими достижимые в других материальных системах (III-As, Si).

Изначально, HEMT-структура представляла собой одиночный гетеропереход GaN/AlGaN в которой на интерфейсе за счет пьезоэлектрических полей формировался двумерный электронный канал. Позднее было показано, что использование тонкого слоя AlN на интерфейсе позволяет существенно подавить рассеяние носителей (что приводит к увеличению подвижности) и немного поднять концентрацию в канале. К сожалению, в таких структурах существует принципиальное ограничение, связанное с несогласованием параметров решеток GaN и AlGaN, не позволяющее увеличить концентрацию электронов в двумерном газе выше некоторого предела.

Одним из вариантов увеличения концентрации электронов является использование двухстороннего электронного ограничения, что, как было показано позволяет получить концентрацию электронов $2-3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ [3]. В данной работе рассматриваются альтернативные методы создания структур с двумерным электронным газом с высокой концентрацией носителей, в частности использование сверхрешеток AlN/GaN или слоев InAlN вместо твердого раствора AlGaN.

Исследования структуры выращивались на подложках сапфира и методом газофазной эпитаксии разложением металорганических соединений (ГФЭ МОС) при пониженном давлении. Для роста использовалась модифицированная установка Epiqip VP 50-RP или полупромышленная установка Aixtron AIX2000HT с индуктивно нагреваемым графитовым подложкодержателем. Рост на подложках сапфира производился с использованием специально разработанной методики позволяющей получить буферные слои нитрида галлия с высоким удельным сопротивлением [4].

В качестве базовой была принята ранее разработанная структура GaN/AlN/AlGaN [3] демонстрировавшая концентрацию $\sim 1,2-1,5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при подвижности $>1000 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$ при комнатной температуре. На первом этапе однородный слой AlGaN был заменен на сверхрешетку AlN/GaN с той же суммарной толщиной и средним составом (образец SL1), кремнием легировался только GaN. Стоит отметить что в ГФЭ МОС, в отличие от МПЭ рост сверхрешеток сопряжен с дополнительными трудностями связанными с возможной эрозией интерфейсов при переходе от роста GaN к росту AlN. Данная проблема была успешно нами решена путем оптимизации условий роста [4]. Как видно из рисунка 1(а) удалось достичь хорошего совпадения среднего содержания Al и электрофизические параметры структуры также не изменились.

Таблица 1 Электрофизические параметры, измеренные при 300 К для различных структур

	$\langle \text{Al} \rangle$, %	Подвижность, $\text{см}^2/\text{В} \times \text{с}$	Концентрация, см^{-2}	Проводимость, $(\text{Ом} \times \text{см})^{-1}$
GaN/AlN/AlGaN	27	1050-1100	$1,5 \times 10^{13}$	26-28
GaN/AlN/SL1	26	1060-1100	$1,5 \times 10^{13}$	27-28
GaN/AlN/SL2	39	1010-1040	$2,0 \times 10^{13}$	32-34
GaN/AlN/SL3	58	400-440	$2,4 \times 10^{13}$	16-17

Из сопоставления данных рис. 1(а) и (б) можно рассчитать толщины слоев GaN и AlN в сверхрешетке SL1; они составили 1,5 и 0,5 нм, соответственно. На следующих этапах толщина слоя GaN в сверхрешетке уменьшалась до 0,75 (SL2) и 0,375 нм (SL3) при сохранении толщины слоя AlN и соответствующем увеличении числа периодов для сохранения общей толщины сверхрешетки. Как видно из рисунка 1(б), средний состав точно отслеживает изменение толщины слоя GaN, при этом в последнем образце по данным рентгеновской дифракции формирование сверхрешетки уже не обнаруживается, также для данного образца наблюдается резкое падение подвижности носителей (таб 1). Несмотря на то что аналогичные структуры были выращены МПЭ [5,6], по нашим данным это первая демонстрация возможности роста короткопериодных сверхрешеток GaN/AlN методом ГФЭ МОС.

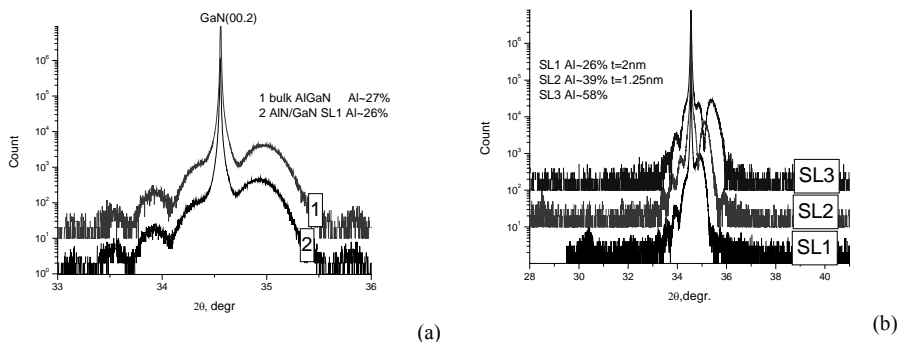


Рис.1 (а) кривые рентгеновской дифракции для структур со слоем AlGaN (1) и AlN/GaN SL1 (2) (б) кривые рентгеновской дифракции для сверхрешеточных структур с различной толщиной GaN

Тройное соединение InAlN представляет большой интерес для создания HEMT-транзисторов [7], так как позволяет снять ограничения связанные с рассогласованием параметров решетки GaN и барьерного слоя в структуре. Теоретические расчеты показывают возможность получения очень высоких (до $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$) концентраций носителей в канале на интерфейсе GaN/InAlN.

Нами был выращен ряд структур с нелегированным барьерным слоем InAlN. Для сравнения были выращены структуры со слоем AlGaN аналогичной толщины и содержанием AlN~35%. К сожалению, структура GaN/InAlN демонстрирует крайне низкую подвижность носителей, что видимо связано с недостаточным качеством материала. Использование более сложной структуры GaN/AlN/AlInN позволило получить разумные значения подвижности (таб.2), хотя очевидно, что они могут быть значительно улучшены дальнейшей оптимизацией качества материал и дизайна структур.

Таблица 2 Электрофизические параметры, измеренные при 300 К для различных структур

	Подвижность, $\text{см}^2/\text{В} \times \text{с}$	Концентрация, см^{-2}	Проводимость, $(\text{Ом} \times \text{см})^{-1}$
GaN/u-AlGaN	1400-1500	8.8×10^{12}	19-20
GaN/AlN/u-AlGaN	1400-1500	1.1×10^{13}	24-25
GaN/u-AlInN	100-125	2.6×10^{13}	4-5
GaN/AlN/u-AlInN	650-710	2.8×10^{13}	30-32

[1] www.compoundsemiconductor.net/articles/news/7/12/12/1

[2] <http://www.cree.com/products/sic.asp>

[3] А.В.Сахаров и др. тезисы 5-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», 46, Москва 2007

[4] В.В.Лундин и др., данный сборник[5] [SPSL-MBE] K. Furuta, N. Nakamura, X.Q. Shen, M. Shimizu, T. Kitamura, K. Nakamura, H. Okumura Journ. Cryst. Growth, V 301-302, (2007), Pages 437-441

[6] Y. Kawakami, A. Nakajima, X. Q. Shen, G. Piao, M. Shimizu, H. Okumura, Appl. Phys. Lett. **90**, 242112 (2007)

[7] J. Liberis, I. Matulioniene, A. Matulionis, E. Sermuksnis, J. Xie, J. H. Leach, H. Morkoç Phys.Stat. Sol.(a) 206(7) 1385 (2009)

InAlN/GaN AND (AlN/GaN)/GaN HETEROSTRUCTURES WITH 2-D ELECTRON GAS

A.V.Sakharov, W.V.lundin, A.E. Nikolaev, E.E.Zavarin,
M.A.Sinitin, M.A. Yagovkina, A.F.Tsatsulnikov*

Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Politekhnikeskaya 26, St. Petersburg, Russia, *val@beam.ioffe.ru

InGaIN heterostructures for HEMT applications with different design were grown by MOCVD on sapphires wafers. It was shown that replacement of AlGaN barrier layer to (AlN/GaN) short-period superlattice or InAlN allows to sufficiently increase carriers concentration in a 2-D electron gas. Further ways of structure optimization are discussed.

КВАЗИМОНОЛИТНЫЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ СВЧ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaIn/GaN

***Б.В.Калинин*^{1*}, *В.Г.Гук*¹, *В.П.Чалый*², *А.Н.Пихтин*³.**

¹ филиал ОАО «ВНИИРА»«ВНИИРА-Навигатор». Санкт-Петербург, Малый пр., д.88А
тел:+7(812)3551689, email:boris.kalinin@gmail.com

² ЗАО «Светлана-Рост», Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д.29

³ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д.5

В последние годы наметился значительный прогресс в области технологии СВЧ устройств на основе гетероструктур GaN/AlGaIn. В настоящее время разрабатывается большое количество устройств на базе GaN HEMT технологии с использованием различных подложек: SiC, сапфир, Si. Применяются различные методы изготовления пассивных элементов: МДМ конденсаторов, резисторов, индуктивностей, адаптированные к этим подложкам. Существуют различные усилители мощности [1], выполненные по технологии GaN HEMT в гибридно-микроролосковом исполнении [2] и на кристалле [3]. Использование этой технологии для изготовления усилителей мощности на подложках SiC позволяет в полной мере реализовать преимущества GaN HEMT, обладающего большими пробивными напряжениями (100-130В) и высокой плотностью токов (1-1,2А/мм) благодаря высокой теплопроводности SiC. В настоящей работе представлен широкополосный СВЧ усилитель мощности, изготовленный по квазимонолитной технологии, с полосой 0,03÷3,5ГГц, выходной мощностью 2,5 Вт и габаритными размерами 10x12x5 мм.

Усилитель выполнен по 3-х каскадной схеме с отрицательными обратными связями и общими истоками. Он состоит из кристалла GaN HEMT, содержащего активную часть усилителя и подложки, на которой изготовлены пассивные элементы. Гетероструктуры GaN-AlGaIn изготовлены методами молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках SiC диаметром 3". Транзисторы изготовлены методом оптической фотолитографии. Длина затвора равнялась 1 мкм. Транзисторы представляют собой многостыревую структуру с длиной одного стьюра 150 мкм. Ширина транзисторов составила 300, 600 и 900 мкм в первом, втором и третьем каскадах соответственно. Напряжение насыщения при $V_{зи}=0В$ равно 5В, напряжение пробоя $V_{bd}\geq 40В$, что обеспечивает постоянное рабочее напряжение не менее 17В. Использование пассивации Si_3N_4 позволило избежать низкочастотных дисперсионных эффектов. Для улучшения теплоотвода от каналов транзисторов пластина была утоньшена до 40мкм методом механической полировки и затем металлизирована с обратной стороны.

Для изготовления микроролосковых линий и резисторов пассивной части была применена однослойная тонкоплёночная технология на поликоре. В качестве разделительных конденсаторов были использованы навесные МДМ структуры с пробивными напряжениями 200В. Для увеличения максимальной плотности токов микроролосковки были покрыты гальваническим золотом. В центре подложки, содержащей пассивную часть, было сделано прямоугольное отверстие для монтажа кристалла с транзисторами на субоснование, покрытое гальваническим золотом. Кристалл с транзисторами монтировался на теплопроводящий эпоксидный клей Diemat. Истоки транзисторов разварены на субоснование, а затворы и стоки к подложке содержащей пассивные элементы (рис.1). Измерения S-параметров GaN HEMT для проведения расчётов проводились на транзисторе входного каскада с шириной затвора 300мкм, который был изготовлен специально под СВЧ зонды.

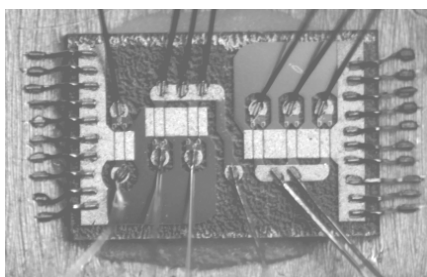


Fig. 1 Chip with three transistors different wide



Fig. 2 Ultra wideband amplifier with bias circuit

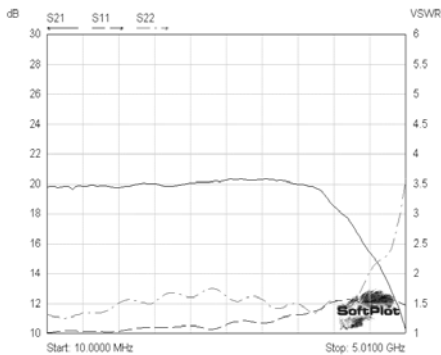


Fig. 3 Experimental gain and VSWR of ultra wideband amplifier

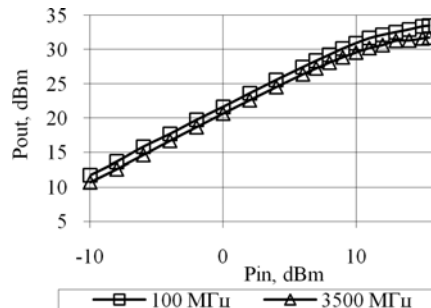


Fig. 4 Measured output power of ultra wideband amplifier

Параметры транзистора были измерены при различных напряжениях на стоке и на затворе в непрерывном режиме непосредственно на пластине. Затем были определены параметры малосигнальной эквивалентной схемы HEMT транзистора [4]. На основании малосигнальной модели была синтезирована принципиальная схема усилителя. Также на основании малосигнальной модели и вольтамперных характеристик транзистора были рассчитаны рабочие режимы транзисторов.

Для подачи питания на усилитель были изготовлены специальные цепи смещения, рассчитанные на два поддиапазона, т.к. изготовить цепи смещения для всего диапазона достаточно сложная задача. Для увеличения максимальной выходной мощности усилителя в цепях питания была применена индуктивная нагрузка. Усилитель с цепями питания представлен на рис.2.

Экспериментальные малосигнальные характеристики усилителя приведены на рис.3. Коэффициент передачи составил 20дБ во всём диапазоне, КСВ входа и выхода не более 2. На рис.4 приведены амплитудные характеристики усилителя. Все измерения проводились при напряжении питания $V_p=17В$ и токе усилителя $I_p=580мА$, при этом ток последнего каскада составлял 350мА.

- [1] А.А. Кишинский. *Тез. 19-ой конференции КрyМуKo* (Украина, 2009) с. 11.
- [2] S. Azam, R. Jonsson, Q. Wahab. *Proc. of the 38th European Microwave Conference* (Amsterdam, The Netherlands, 2008) p.444
- [3] F. van Raay, R. Quay, etc. *Proc 13th GAAS Symposium*(Paris, France 2005) p.373
- [4] G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore, E. Playez *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.36, №7, p.1151 (1988)
- [5] Ali Mohamed Darwish, Andrew J. Bayba, H. Alfred Hung *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.52, №11, p.2611 (2004)

QUASI-MONOLITHIC ULTRA WIDEBAND MICROWAVE POWER AMPLIFIER ON HETEROSTRUCTURES AlGaIn/GaN

B.V.Kalinin^{1,*}, V.G.Guk¹, V.P.Chaly², A.N.Pikhtin³

⁽¹⁾ «VNIIRA-Navigator», Saint-Petersburg, Maliy pr., h.88A phone:7(812)3551689, email: boris.kalinin@gmail.com

⁽²⁾ «Svetlana-Rost», Saint-Petersburg, pr. Engels, h.29

⁽³⁾ SPb ETU «LETI», Saint-Petersburg, prof. Popova str., h.5

A quasi-monolithic UWB microwave power amplifier was realised using quasi-monolithic technology. It consist of two parts: a chip with three transistors with different gate wide: 300, 600, 900mkm, and substrate with passive circuits. Chip size is 1,4x0,9 mm (Fig.1). Total MMIC size is 10x12mm (Fig.2). Gain is approximately 20dB from 30 MHz to 3,5 GHz. $P_{1dB} = 34dBm$ at 100 MHz and 30dBm at 3,5 GHz.

СВЧ ТРАНЗИСТОРЫ НА ГЕТЕРОСИСТЕМЕ AlGaIn/GaN С УДЕЛЬНОЙ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 3 Вт/ММ

*Ю.А. Матвеев, Д.В. Амелин, Е.Н. Енюшкина, А.Л. Кузнецов, Е.Н. Овчаренко, А.П. Лисицкий, А.Ю. Павлов, А.А. Трофимов, Н.В. Цацурк **

Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН. Нагорный проезд, д. 7, корп. 8/0, 117105, Москва, тел.: +7(499) 123-74-66, e-mail: kolq@mail.ru

В последние годы проявляется возрастающий интерес к СВЧ- транзисторам и монолитным интегральным схемам (МИС) на широкозонной гетеросистеме AlGaIn/GaN. Большая ширина запрещенной зоны E_g ($E_g=3,47\text{эВ}$ для GaN и $6,2\text{эВ}$ для AlN [1]) и, соответственно, большие напряжения пробоя ($U^{BD}>100\text{В}$), высокая плотность электронов $n_{e1}>10^{13}\text{см}^{-2}$, обусловленная спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией, и высокая скорость электронов, делают эту гетеросистему чрезвычайно перспективной для мощных СВЧ- приборов.

Целью данной работы является создания транзисторов на гетеросистеме AlGaIn/GaN, обладающих одновременно высокой выходной мощностью (высокими выходными токами и высоким напряжением пробоя) и высокими частотными характеристиками (большой крутизной вольтамперной характеристики и малой ёмкостью).

Для создания макетов образцов СВЧ транзисторов был разработан комплект фотошаблонов. Комплект содержит набор секционированных транзисторов с различной шириной затвора с числом секций от 2 до 10. Суммарная ширина затвора: $2\times 50\text{ мкм}$, $2\times 100\text{ мкм}$, $2\times 200\text{ мкм}$, $4\times 60\text{ мкм}$, $6\times 100\text{ мкм}$, $4\times 150\text{ мкм}$, $6\times 40\text{ мкм}$, $10\times 75\text{ мкм}$ и $10\times 120\text{ мкм}$. Расстояние сток-исток составляет $3,5\text{ мкм}$. Широкий набор ширин транзисторов W_g предназначен для нахождения оптимальной топологии для заданного диапазона частот.

В процессе выполнения работы были отработаны, исследованы и выделены особенности основных технологических операций изготовления AlGaIn/GaN транзисторов. Основные технологические операции изготовления AlGaIn/GaN транзисторов следующие: формирование «мезы» изоляции, использование ионно-лучевого травления для получения глубины «мезы» изоляции порядка 1000 \AA ; формирование омических контактов к AlGaIn/GaN, напыление в вакууме системы металлизации Ti/Al/Ni/Au ($25/150/40/150\text{ нм}$) с последующей термообработкой, быстрый термический отжиг при температуре $820\text{ }^\circ\text{C}$ в течении 20 сек, получаемые значения сопротивления омического контакта порядка $0,4\text{--}0,5\text{ Ом}\cdot\text{мм}$; формирование затвора Шоттки, формируется либо с помощью фотолитографии (длина затвора $0,5\text{ мкм}$), либо электронно-лучевой литографией (длина затвора $0,17\text{--}0,25\text{ мкм}$) с последующей операцией напыления в вакууме системы металлизации Ni/Au ($40/300\text{ нм}$); пассивация, нанесения диэлектрика Si_3N_4 с последующим плазмохимическим травлением; формирование электрических межсоединений, формируется методом «взрывной» фотолитографии с напыление в вакууме Ti/Au ($80/500\text{ нм}$); механическая обработка (утонение до 150 мкм) и посадка на теплоотвод.

По описанному выше маршруту были изготовлены образцы, после утонения, из-за отсутствия возможности посадки в корпус, транзисторы были посажены на теплоотвод, после чего были проведены измерения статических и динамических параметров прибора.

Выходные вольт-амперные I_d - U_d - характеристики исследуемых транзисторов измерялись зондовым методом непосредственно на рабочих пластинах, до и после пассивации поверхности слоем Si_3N_4 . Установлено, что пассивация приводит к улучшению I_d - U_d - характеристик. В связи с этим, в дальнейшем были исследованы только пассивированные транзисторы. Однако, проявление эффекта саморазогрева, и связанной с ним деградации тока в канале I_d , не позволило провести в статическом режиме корректные измерения I_d - U_d - характеристики в достаточно широком диапазоне токов I_d (до 700 мА/мм) и напряжений U_d (до 50 В). Для уменьшения саморазогрева транзисторов при больших токах I_d и напряжениях U_d была разработана методика импульсных измерений, в которой длительность импульсов $\tau_{\text{имп}}$ варьировалась от 2 мкс до десятков мс при скважности от 15 до 150. На рис. 1 показаны ВАХ, снятые в импульсном и непрерывном режимах на одном и том же транзисторе. Из-за возможностей используемого генератора импульсов, диапазон импульсных измерений был ограничен напряжениями до $U_d=50\text{ В}$. На рис. 1 приведены результаты измерений импульсных I_d - U_d характеристик с $\tau_{\text{имп}}=2\text{ мкс}$ для транзистора с длиной затвора $L_g=0,25\text{ мкм}$ и шириной $W_g=2\times 50\text{ мкм}$. Ток стока (I_d^{max}), измеренный при 0 В на затворе в импульсном режиме составил 800 мА/мм , а в непрерывном режиме 600 мА/мм . Из рис. 1 следует, что максимальная удельная крутизна составляет 240 мС/мм . Напряжение пробоя составляет около 115 В .

$$g_m^{\max} = \frac{1}{W_g} \cdot \frac{dI_d}{dU_g}$$

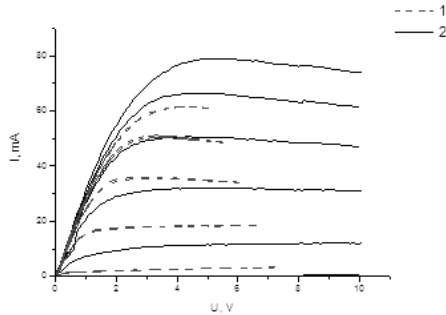


Рис. 1. Выходные ВАХ транзистора с суммарной шириной затвора 100 мкм при отрицательном смещении на затворе от -5 до 0 В, кривая 1 - непрерывный режим, кривая 2 - импульсный режим ($\tau_{\text{имп}}=2$ мкс, пауза 100 мс);

Исследование СВЧ характеристик транзисторов проводилось с помощью анализа данных, полученных при измерении S-параметров транзисторов с помощью прецизионного векторного анализатора E8361A фирмы Agilent Technologies в диапазоне частот 10 МГц-67 ГГц. S-параметры измерялись в достаточно широких диапазонах токов I_d от 50 до 250 мА/мм и напряжений U_d до 20 В. По результатам измерений коэффициента усиления по току и коэффициента усиления по мощности: для транзистора с длиной затвора 0,2 мкм и $W_g=2 \times 50$ мкм получили следующие значения $f_t=45$ ГГц, $f_{\text{max}}=100$ ГГц. При этом величина выходной мощности транзисторов на частоте 8 ГГц достигала 3 Вт/мм.

Следует добавить, что достоинством технологии коротко-канальных суб 0,25 мкм AlGaIn/GaN – HEMT- транзисторов является удачное сочетание достаточно высокой предельной частоты усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц с большим пробивным напряжением транзистора U_d^{BD} до 115 В и высокой плотностью тока стока до 800 мА/мм. Это позволяет создавать на их основе высокоэффективные усилители мощности не только см- диапазона, но и более высокочастотного мм-диапазона.

[1] Takash Jnour, T.Nakajama, Y.Ando et.al, “Polarization Engineering on Buffer Layer in GaN – based Heterojunction FET’s”, IEEE Transactions on Electron Devices, vol.55, N2, p.p.483-488 (2008).

MICROWAVE TRANSISTORS AT HETEROSYSTEM AlGaIn/GaN WITH SPECIFIC OUTPUT POWER 3 WATT/MM

Yu. Matveev, D. Amelin, E. Enyushkina, A. Kuznetsov, E. Ovcharenko, A. Lisitskii, A. Pavlov, A. Trofimov, N. Shchavruk

Institute of UHF Semiconductor Electronics, RAS, Nagorny proezd, 7, 117105, Moscow,
phone. +7(499)123-74-66, e-mail: kolq@mail.ru

Recently increasing interest is shown to microwave transistors and monolithic integrated circuits at high-energy- gap heterosystem AlGaIn/GaN. The purpose of this work is the development of transistors at heterosystem AlGaIn/GaN, possessing at the same time high output capacity and high frequency characteristics. To decrease self-heating of transistors at heavy currents I_d and voltages U_d a method of pulse measurements were developed, in which pulse duration $\tau_{\text{имп}}$ varied from 2 microseconds to several tens of microseconds at on-line time ration 15 to 150. The following values of current-amplification factor and power amplification factor were got: for transistor with gate length 0.2 micrometer and $W_g=2 \times 50$ micrometer $f_t=45$ ГГц, $f_{\text{max}}=100$ G Hertz. At the same time output power of transistor at frequency 8 GHz achieved 3 Watt/mm.

Advantage of shortchannel technology 0.25 micrometer AlGaIn/GaN – HEMT is successful combination of high cutoff amplification of power fmax up to 100 G Hertz with a high discharge voltage of transistor U_d^{BD} up to 115V and high current sink density up to 800 mA/mm.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИТРИДА ГАЛЛИЯ В КАЧЕСТВЕ ДЕТЕКТОРА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ И α -ЧАСТИЦ

А.Я. Поляков^{1,2}, Н.Б. Смирнов¹, А.В. Говорков¹, И.М. Газизов¹, В.М. Залётин¹, Е.А. Кожухова¹, А.В. Марков¹, Н.Г. Коллин³, А.В. Корулин², Д.И. Меркурисов², В.М. Бойко², S.J. Pearton³, I.-H. Lee⁴

¹ОАО «Гиредмет», Б. Толмачёвский пер. д5А, 119017 г. Москва, тел.: +7(495)9518086, e-mail: aypolyakov@gmail.com

²ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», г. Обнинск, Калужская область, 249033, Киевское шоссе 109 км., e-mail: ngkolin48@mail.ru.

³Department of Materials Science and Engineering, University of Florida, Gainesville, FL 32611 USA

⁴School of Advanced Materials Engineering and Research Center for Advanced Materials Development, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

Серьёзное улучшение структурного совершенства и чистоты эпитаксиальных слоёв нитрида галлия, достигнутое в последнее время, позволяет рассматривать применение этого материала в новых областях, не связанных с коротковолновыми лазерами и светодиодами и с мощными СВЧ транзисторами, где нитриды уже прочно занимают важное место. Одной из таких возможных областей является использование диодов из нитрида галлия в качестве радиационных детекторов. Конечно, трудно ожидать, что нитрид галлия вытеснит классические детекторные материалы - кремний, германий, арсенид галлия - в качестве радиационного детектора общего назначения. Однако большая ширина запрещённой зоны и очень прочная химическая связь в нитридах третьей группы создают преимущества в некоторых частных приложениях, таких как детектирование α -частиц в задачах, где требуется весьма высокая радиационная стойкость, или детектирование и дозиметрия тепловых нейтронов в каналах ядерных реакторов, где температура канала нередко заметно превышает комнатную температуру. Энергия α -частиц, представляющая интерес для изучения ядерных реакций, составляет несколько МэВ. Возможность детектирования нейтронов связана с их конверсией в α -частицы с энергией 1.5 МэВ при взаимодействии с покрытием из ¹⁰B. Таким образом, задача детектирования нейтронов также сводится к задаче детектирования α -частиц, причём пробег детектируемых частиц в нитриде галлия составляет несколько микрон, так что при концентрации остаточных доноров порядка 10^{15} см⁻³ возможно добиться, чтобы область пространственного заряда диода перекрывала область пробега частиц и получить близкую к 100% эффективность собирания индуцированного ими заряда. В данном докладе мы приводим результаты предварительных исследований электрических характеристик детекторных структур, изготовленных на нитриде галлия, и даём оценки эффективности собирания заряда, индуцированного α -частицами в GaN.

Были изучены два типа материалов: толстые (3.2 микрона) нелегированные слои, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии, а также толстые (12 микрон) нелегированные слои, полученные методом селективного заравнивания (ELOG). Диоды Шоттки были изготовлены напылением никеля в вакууме. Измерялись вольтамперные и вольтфарадные характеристики диодов при различных температурах, спектры глубоких ловушек методом РСГУ, спектры α -частиц от изотопных источников ²³⁹Pu (энергия α -частиц 5157 кэВ, пробег около 11 микрон) и ¹⁴⁸Gd (энергия α -частиц 3183 кэВ, пробег около 5 микрон).

Было показано, что в нелегированных МОС-гидридных слоях концентрация остаточных доноров меньше 10^{15} см⁻³ в области глубины до 3 микрон от поверхности, а в интерфейсном слое толщиной около 0.3 микрон превышает 10^{16} см⁻³. Таким образом, толщина слоя ОПЗ диодов Шоттки могла быть распространена практически на всю толщину плёнки при умеренных приложенных обратных смещениях. Обратный ток диодов Шоттки был очень мал, около 10^{-12} А при -3В при комнатной температуре. Он сильно зависел от приложенного смещения, но слабо зависел от температуры, так что даже при 400К обратный ток при -3В всё ещё был меньше 1 нА. В спектрах глубоких центров преобладали электронные ловушки с энергией активации 0.25 эВ и 0.6 эВ, концентрация которых была очень малой, 1×10^{13} см⁻³ для первых и 4×10^{13} см⁻³ для вторых.

В образцах ELOG концентрация доноров составляла 2×10^{14} см⁻³ на первых 4 микронах и далее постепенно росла в глубину образца. Обратный ток слабо зависел от напряжения и при больших напряжениях свыше -10В был заметно ниже, чем для МОС-гидридных образцов (ток мене 0.1 нА). В то же время, температурная зависимость обратного тока имела энергию активации около 0.8 эВ, соответствующую высоте барьера Шоттки, так что обратный ток при 400К был уже близок к 10^{-7} А при -5В и был слишком велик для надёжной регистрации спектров α -частиц. В спектрах РСГУ преобладали электронные ловушки с энергией активации 0.25 эВ, 0.6 эВ, 0.86 эВ, суммарная

концентрация которых не превышала $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Наблюдаемое более идеальное поведение диодов Шоттки, приготовленных на материале ELOG, несомненно, связано с меньшей плотностью дислокаций и менее выраженным вкладом туннельных процессов, чем в MOC-гидридных образцах. Однако более слабая температурная зависимость обратного тока в последних является преимуществом и позволяет измерять спектры α -частиц и при температуре гораздо выше комнатной.

Таким образом, использованные в работе материалы имели достаточно низкую концентрацию остаточных доноров, чтобы обеспечить распространение ОПЗ диодов Шоттки на толщины, сопоставимые с пробегом α -частиц, а достигаемые уровни обратных токов достаточно низки, чтобы регистрируемый сигнал не потонул в шумах. Экспериментальные измерения спектров α -частиц показали, что для обоих типов материалов при регистрации 3-Мэвных и 5-Мэвных частиц собираемый заряд соответствует теоретически ожидаемому при данном смещении на диоде, исходя из расчётной величины потерь энергии на ионизацию и известной толщины ОПЗ. Это свидетельствует о практически 100-процентной эффективности собирания заряда. Поскольку при детектировании нейтронов основную роль играет эффективность регистрации 1.5-Мэвных α -частиц, проведённые предварительные исследования подтверждают и перспективность использования нитрида галлия и для детектирования тепловых нейтронов.

Работа выполнялась при поддержке гранта МНТЦ №3870.

PRELIMINARY STUDIES OF GaN AS A DETECTOR OF α -PARTICLES AND THERMAL NEUTRONS

A.Y. Polyakov^{1}, N.B. Smirnov¹, A.V. Govorkov¹, I.L. Gazizov¹, V.M. Zalyetin¹, E.A. Kozhukhova¹, A.V. Markov¹, N.G. Kolin², A.V. Korulin², D.I. Merkurisov², V.M. Boiko², S.J. Pearton³, I-H. Lee⁴*

¹ Institute of Rare Metals, B. Tolmachevsky, 5, 119017, Moscow; phone: +7(495)9518086, e-mail: aypolyakov@gmail.com

² Karpov Institute of Physical Chemistry, Obnins, Kaluga region, 249033, Kiev Highway, 109th km, e-mail: ngkolin48@mail.ru

³ Department of Materials Science and Engineering, University of Florida, Gainesville, FL 32611 USA

⁴ School of Advanced Materials Engineering and Research Center for Advanced Materials Development, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

Properties of GaN as a detector of α -particles and thermal neutrons were preliminarily studied. Two types of detectors built on thick undoped MOCVD and ELOG films were investigated. The detectors were Ni Schottky diodes. The concentration of residual donors in both types of materials was shown to be below 10^{15} cm^{-3} , the density of deep traps was in the low 10^{13} cm^{-3} range. For MOCVD films the reverse current was around 10^{-12} A at -3 V at room temperature and showed relatively strong voltage dependence and relatively weak temperature dependence which indicated a pronounced influence of tunneling. The behavior of the ELOG detectors was more ideal, with a weak voltage dependence and a strongly temperature activated reverse current, with the activation energy close to the Schottky barrier height. This difference in behavior obviously comes from a much lower dislocation density in ELOG GaN. However, the more pronounced tunneling in the MOCVD material facilitates a better operation at elevated temperatures as a rather unexpected benefit. Measurements of α -particles spectra were performed for the ^{239}Pu (energy 5157 keV, range close to 11 micron) and ^{148}Gd (energy 3183 keV, range close to 5 micron) showed the collection efficiency close to 100%. These preliminary results show a good promise for GaN as an α -particle or thermal neutrons detector. The work was supported by a grant from ICTS (grant #3870).

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ AlGaN ДЛЯ МПМ-ДЕТЕКТОРОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА

С.В.Аверин^{1}, П.И.Кузнецов¹, В.А.Житов¹, Н.В.Алкеев¹, А.А.Дорофеев², Н.Б.Гладышева²*
¹Фрязинский филиал Института Радиотехники и электроники РАН, 141190, Фрязино, Московская обл., пл.акад. Введенского 1. тел: 495 5269192, e-mail: sva278@ire216.msk.su
² Федеральное государственное унитарное предприятие «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд 27. e-mail: mail6@pulsarnpp.ru

Твердые растворы на основе GaN являются перспективными полупроводниковыми материалами для создания фотодетекторов ультрафиолетового участка спектра. Подбором состава твердого раствора граничная длина волн AlGaN детектора может меняться в диапазоне 200-365нм. Это позволяет создавать селективно-чувствительные солнечно-слепые фотодетекторные структуры. Фотодиодные структуры на основе выпрямляющих контактов в системе металл-полупроводник–металл (МПМ) являются наиболее перспективными для создания таких детекторов. Они не требуют выращивания полупроводниковых слоев с р-типом легирования, могут быть изготовлены с использованием групповых методов технологии, в то же время емкость МПМ-диодных структур при равной площади составляет ¼ емкости PIN-диода.

В настоящей работе описывается технология МПМ-диодов для «солнечно-слепого» селективного детектирования и представляются результаты их экспериментальных исследований. Гетероструктуры (Рис.1) выращивались на Al₂O₃ (0001) подложках методом MOCVD при давлении 40-60 мбар. Вначале при температуре 1050⁰ выращивался буферный слой AlN толщиной 110 нм. Ранее мы показали, что использование буферного слоя позволяет выращивать эпитаксиальные слои AlGaN с уменьшенной плотностью дефектов [1]. Этот слой одновременно является и фильтрующим. Его роль заключается в том, чтобы отсеять влияние излучения с длиной волны < 200 нм на отклик детектора. Фотопроводящий активный слой Al_{0,6}Ga_{0,4}N отделен от фильтрующего слоя тонким изолирующим слоем Al_{0,8}Ga_{0,2}N толщиной 50 нм. Скорость роста этих слоев AlGaN составляла 0.8Å/с, их толщина контролировалась in situ рефлектометрией. Мольное содержание Al определялось по спектрам фотолюминесценции и пропускания, Рис. 2. На выращенных таким образом гетероструктурах были изготовлены МПМ-диоды, Рис.1,3.

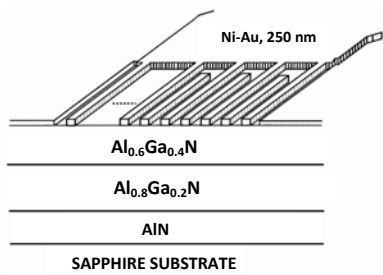


Fig.1 Cross section through the heterostructure layer sequence

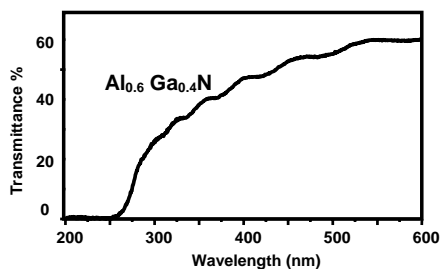


Fig.2 Optical transmission through the sample

МПМ-фотодетектор представляет собой планарное устройство, состоящее из двух пар встречно-штыревых контактов, сформированных на поверхности активного слоя Al_{0,6}Ga_{0,4}N (Рис.1). Для наших образцов гребенчатые контакты МПМ-диодов были изготовлены методами фотолитографии при осаждении и последующем lift-off Ni и Au. Ширина встречно-штыревых контактов и расстояние между ними были равны 2 мкм, активная площадь диода составляла 90х90 мкм². На Рис. 3 представлено изображение поверхности МПМ-диодной структуры выполненное на атомно-силовом микроскопе.

Исследование спектральных характеристик AlGaN МПМ фотодетекторов показало, что при освещении со стороны подложки структуры имеют высокую чувствительность в области спектра с энергиями, превышающими ширину запрещенной зоны активного слоя Al_{0,6}Ga_{0,4}N (λ=250 нм) и обеспечивают незначительный отклик при меньших энергиях. В области длин волн < 200 нм отклик детектора почти полностью подавлен за счет поглощения в фильтрующем слое AlN.

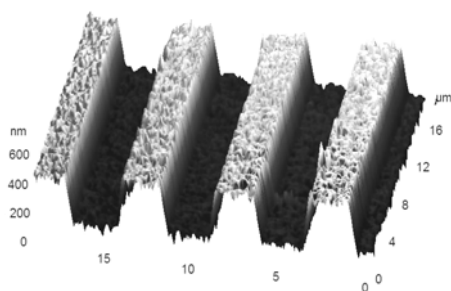


Fig.3 Three dimensional view of MSM-diode on AFM.

Вольт-амперные характеристики были измерены при комнатной температуре и показывали очень низкую величину темнового тока. Для встречно-штыревых Шоттки барьерных контактов из Ni-Au величина темнового тока составляет 10 пА при смещении 40В. Эти величины существенно ниже, чем приведенные в работе [2] 72 пА при 10В для МПМ-контактов на $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ гетеробарьерных слоях. Известно, что темновой ток зависит от параметров барьера Шоттки и в значительной степени определяет чувствительность фотодетектора. Низкое значение темнового тока также подтверждает высокое качество выращенных AlGaIn эпитаксиальных слоев. Темновой ток исследуемых диодов описывается в рамках термоэлектронной эмиссии. Используя метод определения высоты барьера и коэффициента идеальности для МПМ-диодов [3], мы получили высоту барьера 1.1 эВ для системы контактов Ni-Au-AlGaIn что находится в хорошем соответствии с данными работы [4] для Ni-Au контактов к $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$. Коэффициент идеальности контактов находился в пределах 1.1-1.2, что свидетельствует о высоком качестве исследуемых Шоттки барьеров в МПМ-встречно-штыревой контактной системе.

- [1] С.В. Аверин, П.И. Кузнецов, В.А. Житов, Л.Ю. Захаров, Г.Г. Якушева, Тез.докладов 6 Всероссийской конф. «Полупроводники 2005» (Москва, Звенигород, 18-23 Сентября 2005) с.281.
 [2] In.-S. Seo, In.-H.Lee, Y.-J.Park, Ch.-R. Lee. J.Crystal Growth, **252**, (1-3), 51 (2003).
 [3] S.V.Averin, Y.C.Chan, Y.L.Lam. Appl. Phys. Lett., **77**, 274 (2000).
 [4] Y.K. Su, et al. Solid-State Electr., **49**, 459 (2005).

ULTRAVIOLET MSM-PHOTODETECTORS ON AlGaIn HETEROSTRUCTURES

S.V.Averin^{1}, P.I.Kuznetsov¹, V.A.Zhitov¹, N.V.Alkeev¹, A.A. Dorofeev², N.B.Gladisheva²*

¹Fryazino branch of the Institution of Russian Academy of Sciences, Kotelnikov FIRE RAS, Vvedenskii 1, 141190, Fryazino, Moscow region, phone: 495 5269192, e-mail: sva278@ire216.msk.su;

²Federal State Unitary Enterprise "Pulsar", Moscow, Russia, e-mail: mail6@pulsarnpp.ru

We report on the growth, fabrication and characterization of solar-blind selectively sensitive MSM-heterophotodiodes. AlGaIn heterostructures were grown on sapphire substrates by low pressure MOCVD (40-60mBar), Fig.1. MSM-detector consists of two fork-shaped contacts oppositely laying on the AlGaIn surface, Fig.1, 3. The finger gaps were 2 μm and active square area was equal to 90x90 μm². Fig.3 shows the surface AFM-view of the MSDM-detector. I-V curves display very low dark current of 10 pA at the bias 40V. Directly on the MSM-diode structure we have measured a Schottky barrier height and junction ideality coefficient [3]. The ideality coefficient is in the range of 1.1-1.2 demonstrating a good quality of the Schottky barriers in AlGaAs MSM-interdigital contact system. The spectral responsivity demonstrates the ability of this detector for solar-blind applications.

ПЛАНАРНЫЙ ВАКУУМНО–ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ФОТОПРЁМНИК С ПОЛУПРОЗРАЧНЫМ ФОТОКАТОДОМ p-GaN(Cs,O)/AlN/c-Al₂O₃

В.В. Бакин¹, С.Н. Косолюбов¹, Г.Э. Шайблер¹, А.С. Терехов^{1,},
В.Н. Жмерик², А.М. Мизеров², С.В. Иванов²*

¹ ИФП СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, 630090, Новосибирск,
+7 (383)3308508, e-mail: terek@thermo.isp.nsc.ru;

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, 194021, Санкт-Петербург

Планарные вакуумно – полупроводниковые фотоприёмники позволяют создавать устройства, сочетающие субнаносекундное временное разрешение с возможностью регистрации изображений телевизионного формата в режиме счёта одиночных фотонов. Такие устройства необходимы в научных, в том числе в медико-биологических исследованиях, в системах контроля загрязнений окружающей среды, в системах безопасности. Для решения некоторых из перечисленных задач необходимы быстродействующие кординатно – чувствительные фотоприёмные устройства с однофотонной чувствительностью в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Создание таких устройств с требуемым уровнем технических характеристик невозможно без создания нового поколения полупрозрачных фотокатодов с эффективным отрицательным электронным средством (ОЭС) на основе полупроводниковых соединений AlGaN. В данной работе сообщается о создании и исследовании характеристик полупрозрачного УФ-фотокатода с ОЭС на основе Al₂O₃/AlN/p-GaN(Cs,O).

Гетероструктура AlN/GaN:Mg была выращена на подложке c-Al₂O₃ с диаметром 50.8 мм методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией (МПЭ ПА) на установке Compact21T (Riber CA) [1]. Буферный слой AlN толщиной 1100 нм выращивался со скоростью роста ~400 нм/ч при температуре подложки T_S=800°C. В процессе роста с помощью снижения мощности азотного источника осуществлялся переход от азотообогащенных к Al-обогащенным стехиометрическим условиям с отношением потоков Al/N~0.75 и 1.05, соответственно, что сопровождалось переходом от трехмерного к двумерному механизму роста. Активный слой GaN:Mg толщиной ~70 нм выращивался при T_S=650°C и Ga/N~1.1, а поток магния из твердотельного источника соответствовал значению, использовавшемуся нами для получения в слоях GaN:Mg толщиной ~200 нм концентрации дырок 2·10¹⁸ см⁻³ при концентрации [Mg]=1.6·10²⁰ см⁻³ [2]. Скорость роста и морфология слоев контролировались с помощью оптической рефлектометрии и наблюдения за картинами дифракции отраженных быстрых электронов, соответственно.

Для изготовления фотокатода из исходной гетероэпитаксиальной структуры вырезался диск диаметром ~22 мм. С помощью диффузионной сварки этот диск соединялся с дополнительным диском из лейкосапфира специальной формы, обеспечивающей возможность его сочленения с титано-керамическим корпусом фотоприёмника. Рабочий диаметр фотокатода равнялся ~18 мм. Методики приготвления атомарно-чистой поверхности GaN и её активирования цезием и кислородом до состояния эффективного отрицательного электронного средства, описаны в [2, 3]. Финишные операции обработки поверхности активного слоя фотокатода проводились в одной из камер многокамерной технологической установки с базовым давлением ~10⁻⁹ Па, предназначенной для изготовления планарных фотоэлектронных приборов с полупроводниковыми фотокатодами. После завершения активирования, с помощью магнитного манипулятора фотокатод переносился в камеру герметизации, где герметично соединялся с предварительно обезгаженным титано-керамическим корпусом планарного фотоэлектронного прибора. Расстояние между эмитирующей поверхностью фотокатода и поверхностью анода равнялось ~0.15 мм. С помощью магнитных манипуляторов и вакуумного шлюза изготовленный фотоприёмник извлекался из технологической установки для изучения его характеристик. Фотография готового фотоприёмника показана на рис. 1.

Прежде всего была измерена спектральная зависимость квантовой эффективности фотокатода. Форма этой зависимости, приведённой на рисунке 2, с резким порогом при энергии фотона, совпадающей с шириной запрещённой зоны GaN, свидетельствует о наличии на поверхности фотокатода состояния ОЭС. Максимальное значение квантовой эффективности составляет 0.14 при длине волны падающего излучения 230 нм. Также были измерены: диапазон линейности фототока, темновой ток и ряд других характеристик фотокатода. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования молекулярно-лучевой эпитаксии нитридов металлов третьей группы с плазменным источником азота для выращивания фотокатодных гетероструктур на основе соединений AlGaN. Кроме этого, сравнение достигнутых результатов с известными [4, 5] свидетельствует, что уровень отечественных технологий в данной области несущественно уступает лучшему зарубежному уровню.

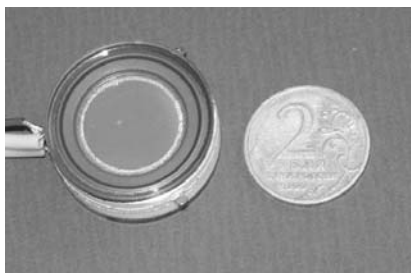


Рис. 1 Планарный вакуумно – полупроводниковый фотопрёмник с полупрозрачным p-GaN(Cs,O) фотокатодом

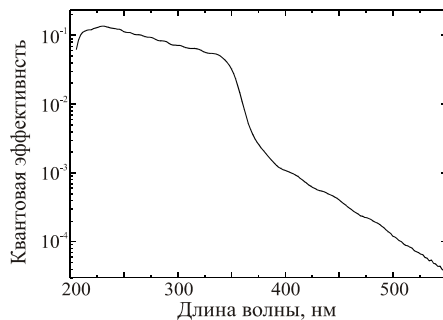


Рис. 2 Спектр квантовой эффективности полупрозрачного p-GaN(Cs,O) фотокатода.

- [1] H.S.Kim et al., U.S. Patent 5, 557,167.
 [2] T.A. Komissarova et al., Phys. Status Solidi C 6, S466-S469 (2009).
 [3] О.Е. Терещенко и др., ФТТ, т.46, с. 1881 (2004).
 [4] А.А. Пахневич и др., Письма в ЖЭТФ, т.79, вып. 10, с. 592-596(2004).
 [5] I. Mizuno et al., Proc. of SPIE, v. 6945, p. 69451N (2008).
 [6] G.W. Glesener et al., Proc. of SPIE, v. 7339, p. 73390S (2009).

PLANAR VACUUM-SEMICONDUCTOR PHOTODETECTOR WITH SEMITRANSPARANCE PHOTOCATHODE p-GaN(Cs,O)/AlN/C-Al₂O₃

V.V. Bakin¹, S.N. Kosolobov¹, H.E. Scheibler¹, A.S. Terekhov^{1},
 V.N. Jmerik², A.M. Mizerov², S.V. Ivanov²*

¹ ISP SB RAS, Lavrenteva av. 13, 630090, Novosibirsk,
 +7 (383)3308508, e-mail: terek@thermo.isp.nsc.ru;

² Ioffe Physical Technical Institute, Politekhnikeskaya str. 26, 194021, Sankt-Petersburg

The planar vacuum-semiconductor photodetector with semitransparence p-GaN(Cs,O) photocathode was made on the basis of Al₂O₃/AlN/GaN:Mg heterostructure. The heterostructure was grown by molecular beam epitaxy with plasma activation. Thickness of AlN layer was equal to 1100 nm and thickness of p-GaN:Mg layer was equal to 70 nm. Quantum efficiency spectrum (fig. 2) has abrupt threshold at the photon energy coincide with band gap of GaN, which means that photocathode surface has negative electron affinity state. Maximum value of quantum efficiency 0.14 was observed at wavelength equal to 230 nm.