

Матричные фотодиоды ультрафиолетового диапазона на основе гетероэпитаксиальных структур AlGa_xN , полученных молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксиями

М. В. Седнев, К. С. Журавлев, А. В. Трухачев, Н. А. Иродов, М. А. Ладугин

В работе представлены результаты измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) мезазлементов матриц формата 320×256 с шагом 30 мкм $p-i-n$ -диодов. Данные образцы сформированы ионно-лучевым травлением на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, изготовленных методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (МОС). Используются также тестовые образцы мезадиодов различных по диаметру размеров, изготовленных на основе ГЭС, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией и сформированных травлением $p+$ - и i -слоёв в высокоплотной плазме $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{N}_2$. Представлены типичные ВАХ $p-i-n$ -диодов на основе ГЭС, полученных разными методами выращивания и формирования мезы. Полученные результаты могут свидетельствовать о высокой плотности дефектов роста эпитаксиальной структуры по площади пластин, изготовленных методом МЛЭ.

Ключевые слова: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, GaN, гетероэпитаксиальные структуры, ГЭС, $p-i-n$ -фотодиод, ионно-лучевое травление, видимо-слепой поддиапазон, солнечно-слепой поддиапазон, граница поглощения.

Ссылка: Седнев М. В., Журавлев К. С., Трухачев А. В., Иродов Н. А., Ладугин М. А. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 430.

Reference: M. V. Sednev, K. S. Zhuravlev, A. V. Truhachev, N. A. Irodov, and M. A. Ladugin, Usp. Prikl. Fiz. 6 (5), 430 (2018).

Введение

Одним из перспективных направлений твердотельной фотоэлектроники является совершенствование методов создания матричных фотоприемных модулей ультрафиолетового диапазона на основе $p-i-n$ -структур твердых растворов нитридов галлия и алюминия $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [1–3].

Качество гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) (структурное совершенство слоев и разделяющих их границ, шероховатость и кривизна поверхности структур) является определяющим условием для изготовления высокоэффективных матричных фотоприемных устройств (ФПУ) [4–6]. Кривизна пластин с ГЭС может оказать существенное влияние на качество фотолитографических процессов, проводимых на пластинах диаметром 52 мм. В частности, возможно прилипание пластины к фотошаблону и размытие фотолитографического рисунка. Из-за неплоскостности фоточувствительной матрицы возникают дополнительные трудности при выполнении гибридизации со схемой считывания.

Целью работы является исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) матричных фотодиодов ультрафиолетового диапазона на основе структур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, полученных методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), а также методами эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (МОС), в интересах определения влияния распределения плотности дефектов роста эпитаксиальной структуры по площади пластины.

Седнев Михаил Васильевич¹, нач. участка, к.т.н.
Журавлев Константин Сергеевич², в.н.с., д.ф.-м.н.
Трухачев Антон Владимирович¹, инженер-технолог 2 кат.
Иродов Никита Александрович¹, вед. инженер.
Ладугин Максим Анатольевич³, нач. отдела.

¹ АО НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² ИФП СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

³ АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха».

Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1.

Статья поступила в редакцию 27 июля 2018 г.

© Седнев М. В., Журавлев К. С., Трухачев А. В., Иродов Н. А., Ладугин М. А., 2018

Постановка работы

Типичные параметры ГЭС $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, использованных в работе, представлены в таблице.

Структуры AlGaIn со стороны эпитаксиального слоя обладают выпуклостью (см. таблицу). Внутренние напряжения, возникающие в процессе роста, вызывают изгиб исходной пластины. Характерные величины отклонения от плоскостности составляют 50–70 мкм для МОС-эпитаксии и 7–45 мкм для МЛЭ. Измерения кривизны проводились на контактном профилометре, позволяющем определять шероховатость и отклонение от плоскостности с погрешностью не более 1 нм.

Одной из ключевых операций создания фоточувствительных матриц является разделение $p-i-n$ структуры на пластине на отдельные фотодиоды по мезотехнологии методом ионно-лучевого трав-

ления до n^+ -слоя, предназначенного для электрического присоединения всех элементов, составляющих матрицу, к входному каналу БИС считывания.

Выбор метода ионно-лучевого травления обусловлен высокой химической инертностью нитридов [4]. Особенности такого метода для структур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ являются уменьшение скорости травления AlN приблизительно в 6 раз по отношению GaN от доли алюминия [5] в твердом растворе при достаточно малой толщине функциональных слоев структуры (суммарная толщина составляет $1\div 1,5$ мкм, см. таблицу).

С другой стороны, следует учитывать (при выполнении операции травления мезы) возможное отклонение при выращивании гетероэпитаксиальной структуры по толщине, указанной в сертификате на купленную пластину.

Таблица

Параметры ГЭС $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, использованных в работе

№ структуры, способ получения	Тип структуры, состав, фильтр	Толщина слоя, нм	Уровень легирования в контактных слоях: p/n	Подложка (толщина), буферные слои, диаметр	Кривизна поверхности на базе 48 мм, мкм, шероховатость, мкм
1171, МЛЭ	BC, $p^+-\text{GaN}:\text{Mg}$ $i\text{-Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$ транс 340 нм $n^+\text{Al}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{N}$ Si (290 нм)	300 300 600	$>1\times 10^{18}$ – $>5\times 10^{18}$	Сапфир (430 мкм) AlN (н.л., 350 нм) 50,8 мм	15
N1695- 2, МОС	BC, $p^+-\text{GaN}$ $p\text{-GaN}$ $i\text{-GaN}$ $n\text{-Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$	190 280 380 830	1×10^{18} 1×10^{16} н/л 4×10^{18}	Сапфир (430 мкм) AlN (н.л., 1000 нм) 50,8 мм	70 Ra- 0,008 Rz- 0,05
V-2050(2), МОС	CC, $p^+-\text{GaN}$ - $p\text{-Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$ $i\text{-Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$ $n\text{-Al}_{0,64}\text{Ga}_{0,36}\text{N}$	210 290 290 770	1×10^{18} 1×10^{16} н.л. 3×10^{18}	Сапфир (430 мкм) AlN (н.л., 150 нм) 50,8 мм	70 Ra- 0,008 Rz- 0,06
1131, МЛЭ	CC, $p^+-\text{GaN}:\text{Mg}$ $i\text{-Al}_{0,44}\text{Ga}_{0,56}\text{N}$ $n^+\text{Al}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{N}$	250 150 450	$>5\times 10^{17}$ – $>5\times 10^{18}$	Сапфир (430 мкм) AlN (н.л., 300 нм) Пропускание 50 % 260 нм 50,8 мм	10 Ra- 0,003 Rz- 0,02
1130, МЛЭ	CC, $p^+-\text{GaN}:\text{Mg}$ $i\text{-Al}_{0,44}\text{Ga}_{0,56}\text{N}$ $n^+\text{Al}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{N}$	250 150 450	$>5\times 10^{17}$ – $>5\times 10^{18}$	Сапфир (430 мкм) AlN (н.л., 300 нм) Пропускание 50 % 260 нм 50,8 мм	42,7 Ra- 0,002 Rz- 0,02
1144, МЛЭ	BC, $p^+-\text{GaN}:\text{Mg}$ $i\text{-Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$ (340 нм) $n^+\text{Al}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{N}$ Si (290 нм)	250 250 400	$>5\times 10^{17}$ – $>5\times 10^{18}$	Сапфир (430 мкм) AlN (н.л., 300 нм) 50,8 мм	20
1129, МЛЭ	CC, $p^+-\text{GaN}:\text{Mg}$ $i\text{-Al}_{0,44}\text{Ga}_{0,56}\text{N}$ $n^+\text{Al}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{N}$	250 150 450	$>5\times 10^{17}$ – $>5\times 10^{18}$	Сапфир (430 мкм) AlN (н.л., 300 нм) Пропускание 50 % 260 нм 50,8 мм	43 Ra- 0,002 Rz- 0,02

В такой ситуации предъявляются повышенные требования контроля глубины травления гетероэпитаксиальных $p-i-n$ -структур из-за возможного недотравливания или перетравливания функциональных слоев. Недотравливание верхнего контактного слоя чревато повышенной взаимосвязью элементов матрицы, а перетравливание нижнего n^+ -слоя разрушает электрическое присоединение всех элементов, составляющих матрицу, к входному каналу БИС считывания.

Изготовление образцов

Мезаэлементы $p-i-n$ -диодов изготовлены на основе гетероэпитаксиальных структур $Al_xGa_{1-x}N$, полученных следующими методами эпитаксии: молекулярно-лучевой и с использованием металлоорганических соединений.

Разделение элементов матриц формата 320×256 с шагом 30 мкм осуществлялось ионно-лучевым травлением через маску фоторезиста в потоке ионов аргона, создаваемого источником Кауфмана, в вакуумной установке. Для определения необходимой глубины травления использовались методы контактной профилометрии и ультрафиолетовой спектрофотометрии, что позволило определить положение n -слоя и достаточную глубину травления образца. Погрешность толщин функциональных слоев гетероэпитаксиальных структур, указанных в сертификатах производителей, не превышала 28 %. Определены скорости ионно-лучевого травления слоев $Al_xGa_{1-x}N$ с различным составом.

Тестовые образцы мезадиодов (различных по диаметру размеров) на основе ГЭС, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией, изготавливали травлением p^+ - и i -слоев в высокоплотной плазме в среде $BCl_3/Ar/N_2$. Расположение тестовых элементов в мультиплицируемой ячейке представлено на рис. 1, шаг между центрами фотодиодов составляет 500 мкм.

Формирование контактов осуществлялось напылением металлов никель–золото к p -области и титан–алюминий–никель–золото к n -области с последующим отжигом при 650 °С в среде азота [8].

Размеры
200
150
125
100
75
50 мкм
Шаг
500 мкм

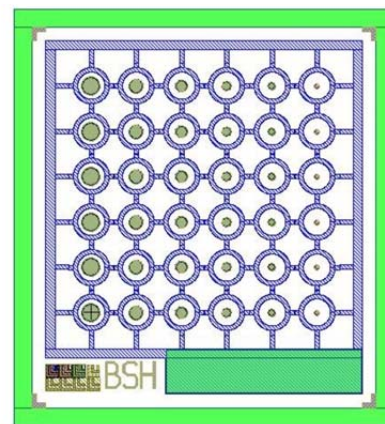
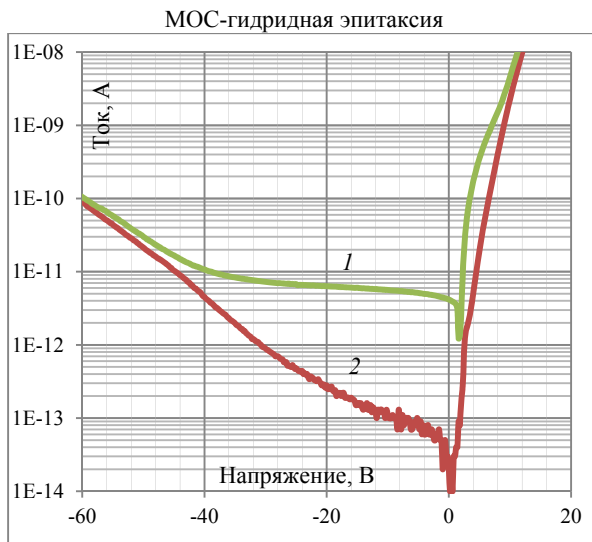


Рис. 1. Фрагмент фотошаблона для изготовления тестовых фотодиодов с разными диаметрами чувствительных элементов.

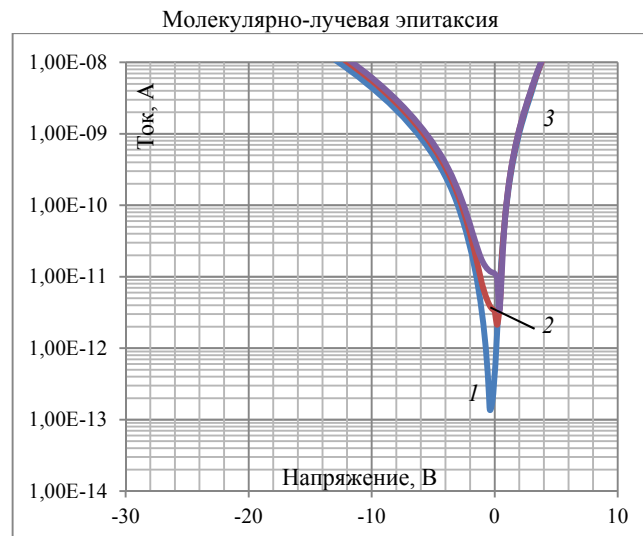
Экспериментальные результаты

Типичные ВАХ $p-i-n$ -диодов для видимо-слепого (ВС) и солнечно-слепого (СС) ультрафиолетового диапазонов спектра, выполненных на основе ГЭС $Al_xGa_{1-x}N$, полученных разными методами выращивания, представлены на рис. 2. При небольших, менее вольт, напряжениях обратного смещения темновые токи фотодиодов, изготовленных на основе ГЭС МЛЭ и МОС, имеют близкие значения. Однако с увеличением обратного смещения в пределах нескольких вольт темновые токи фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур $Al_xGa_{1-x}N$, изготовленных методом МЛЭ, возрастают почти экспоненциально (рис. 1, б, г) и значительно превышают токи $p-i-n$ -диодов, полученных на основе ГЭС, изготовленных эпитаксией из МОС, для которых темновые токи изменяются незначительно и не превышают 100 фемтоампер с ростом напряжения до 5 вольт (рис. 2, а, в).

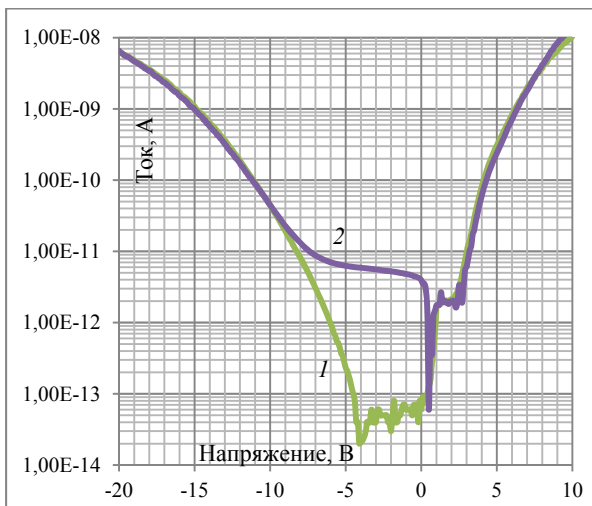
В то же время фотоэлектрическое преобразование диодов, изготовленных на основе МЛЭ и МОС эпитаксии и освещаемых заданным потоком лазерного излучателя, можно считать близким по значению (как это видно из рис. 1, а и 1, б для видимо-слепых, 1, в и 1, г для солнечно-слепых) и монотонно возрастает с увеличением обратного смещения (до тех пор, пока значительно превышает уровень темнового тока).



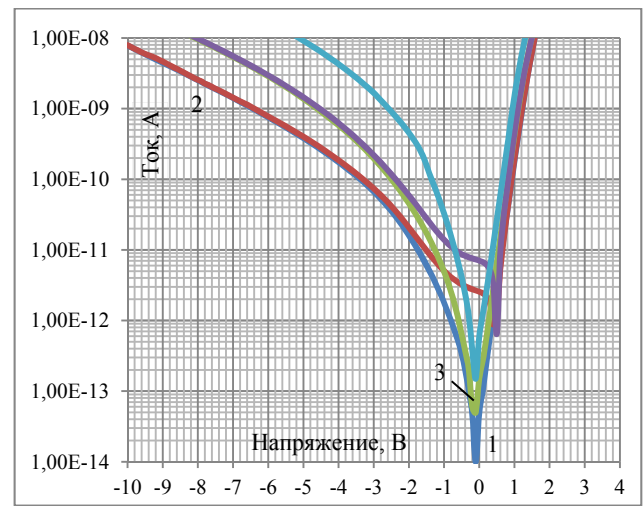
а) V-1965-BC, элемент матрицы 320×256 с шагом 30 мкм. Кр. 1 – 2.общ-пикс, темн.; кр. 2 – 2.общ-пикс, фото, 5В, 315 нм



б) 1171-BC, элемент матрицы 320×256 с шагом 30 мкм. Кр. 1 – темн5_1; кр. 2 – фото5_1, 280 нм, 10 В; кр. 3 – фото5_2, 315 нм, 5 В



в) V-2052-CC, элемент матрицы 320×256 с шагом 30 мкм. Кр. 1 – темн5_2; кр. 2 – фото5_2, 280 нм, 10 В



з) 1135-CC, тестовые элементы с размером 50, 100 и 200 мкм в диаметре и наименьшими темновыми токами. Кр. 1 – 50, темн; кр. 2 – 50, фото 270 нм, 10 В, снизу; кр. 3 – 100, темн

Рис. 2. Типичные ВАХ $p-i-n$ -диодов на основе ГЭС, полученных разными методами выращивания.

На рис. 3 представлен массив данных темновых токов тестовых фотодиодов (разных диаметров: 50, 75, 100, 120, 150, 200 мкм), сформированных травлением p - и i -слоёв в высокоплотной плазме $BCl_3/Ag/N_2$. Темновые токи измерены при обратном напряжении смещения -3 вольта. Анализ этих данных показывает, что темновой ток фотодиодов одного размера неодинаков и отличается в несколько раз.

Изменение минимальных и максимальных темновых токов (из массива данных, представленных на рис. 3) фотодиодов разных диаметров, представлено на рис. 4 (ряд 1). Как видно из этого рисунка, результаты измерения темнового тока лучших элементов с увеличением диаметра фотодиода аппроксимируются с хорошей точностью

полиномом второй степени, что позволяет сделать вывод о преимущественном протекании тока не по периметру а по площади $p-n$ -перехода. Медианные значения наименьших токов (ряд 2, рис. 4) также аппроксимируются полиномом второй степени, но с меньшей сходимостью. На тренд медианных значений наибольших токов (ряд 3, рис. 4) значительное влияние оказывает линейная зависимость от диаметра, вклад которой более чем на порядок выше по сравнению с трендом медианных значений наименьших токов.

Суммарный ток в случае больших значений увеличивается, возможно, за счет протекания по микродефектам (по проколам), расположенными на периметре $p-n$ -перехода.

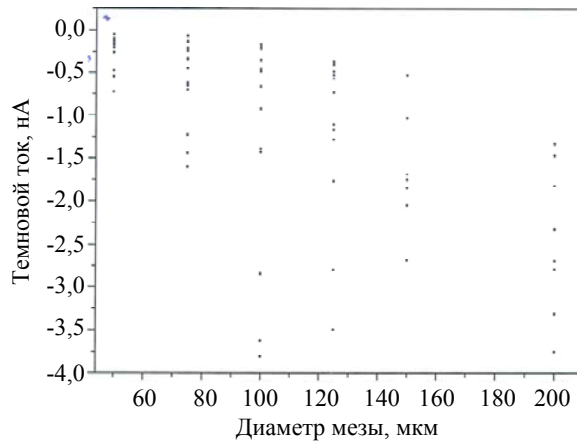


Рис. 3. Темновые токи тестовых фотодиодов разных диаметров, измеренных при обратном напряжении смещения -3 вольта.

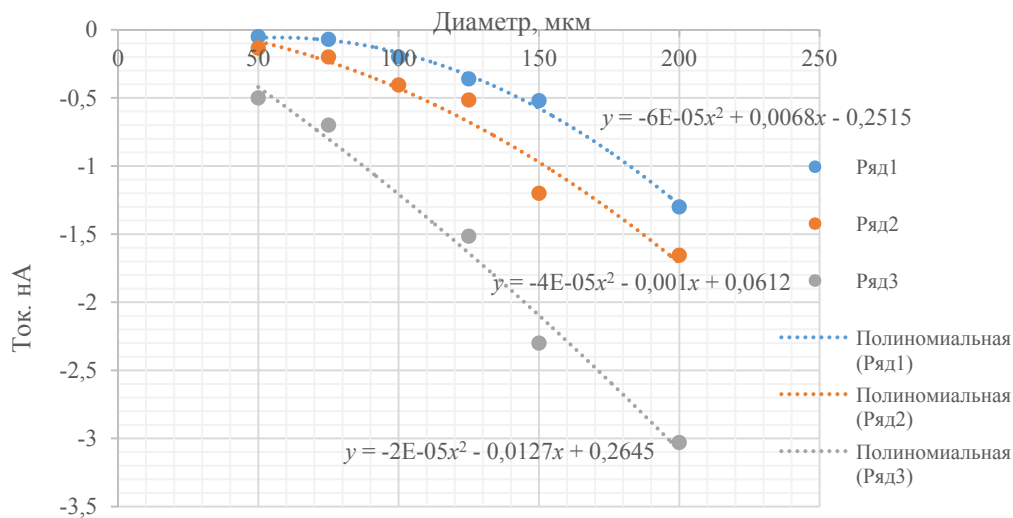


Рис. 4. Изменение минимальных и максимальных темновых токов с увеличением диаметра фотодиодов (из массива данных, представленных на рис. 3). Ряд 1 – минимальные, ряд 2 и ряд 3 – медианные значения минимальных и максимальных темновых токов соответственно.

Обсуждение

Важнейшими параметрами фотоприемников, определяющими пороговую чувствительность, являются источники шума. Для матричных ФПУ шумы возникают, в том числе, из-за неоднородности фотоэлектрических характеристик отдельных элементов. Одним из таких источников считается темновой ток фотодиода. Чем меньше темновой ток, тем выше пороговые возможности обнаружения слабых потоков излучения.

При работе матрицы в фотодиодном режиме на каждом элементе устанавливают рабочее напряжение смещения, при котором достигаются лучшие отношения фототока к шумовому току. Быстрое изменение темнового тока с увеличением или уменьшением напряжения смещения создает дополнительные трудности по стабилизации рабочей точки каждого элемента матрицы, что в итоге приводит к ухудшению пороговой чувствитель-

ности матричного фотоприемного устройства (МФПУ). Поэтому крутизна изменения темнового тока с напряжением смещения и неодинаковость (дисперсия) её по матрице являются важными параметрами, определяемыми из ВАХ фотодиодов.

Как было показано выше, крутизна изменения темнового тока элементов матриц, изготовленных на основе ГЭС, выращенных методом МЛЭ, катастрофически (на несколько порядков) больше, чем в матрицах на слоях, полученных эпитаксией из МОС (см. рис. 1, а, б, в, г). Формально это является следствием значительного отклонения от идеальной зависимости обратного тока $p-i-n$ -диода. Причин, по которым реализуются избыточные токи, несколько. Перечислим основные варианты:

1. Повышенная над расчетной концентрация легирующей примеси в функциональных слоях.
2. Отклонения от расчетной толщины функциональных слоев.

3. Структурное несовершенство функциональных слоев.

4. Несовершенство границ между функциональными слоями.

5. Состояние поверхности на границе $p-i-n$ -областей мезаэлементов.

В наших исследованиях матрицы $p-i-n$ -диодов на основе ГЭС МЛЭ и МОС были изготовлены, в том числе, по одинаковому технологическому маршруту. Поэтому наблюдаемое различие в поведении темнового тока при обратном смещении очень трудно объяснить состоянием поверхности после изготовления мезаэлементов.

По нашим оценкам, отклонения от расчетной толщины функциональных слоев не превышают 30 % и создают определенные трудности при травлении мезы, но не обеспечивают условий преобладания туннельных токов при небольших напряжениях смещения на широкозонном материале.

Предположение о повышенной над расчетной концентрацией легирующей примеси в обедненном слое маловероятно.

В общем виде, суммарное значение темнового тока $I_{\text{сум. темн.}}$ для фотодиода можно представить следующим аналитическим выражением:

$$I_{\text{сум. темн.}} = (I_0 + I_s) \times S + I_p \times P, \quad (1)$$

где I_0 – темновой ток через единицу площади идеального диода; I_s – избыточный темновой ток через единицу площади реального диода; I_p – избыточный темновой ток через единицу длины периметра реального диода; S, P – площадь и длина периметра диода соответственно.

Для круглого фотодиода выражение (1) можно представить в таком виде:

$$I_{\text{сум. темн.}} = (I_0 + I_s) \times D^2 / 4 + I_p \times D. \quad (2)$$

Из этого следует, что в случае преобладания избыточного темнового тока через площадь реального диода будет наблюдаться квадратичная зависимость от диаметра для $I_{\text{сум. темн.}}$.

Структурным несовершенством функциональных слоев и несовершенством границ между функциональными слоями, равномерно распределенными по площади пластины, можно объяснить возрастание темнового тока с увеличением площади фотодиода, что коррелирует с полученными нами зависимостями наименьших темновых токов диодов разных диаметров на основе ГЭС МЛЭ.

С другой стороны, увеличение влияния линейной зависимости от диаметра на тренд медианных значений наибольших токов (ряд 3, рис. 4) может свидетельствовать о втором виде дефектов в ГЭС МЛЭ или другом механизме протекания тока по микродефектам (проколам), расположенными на периметре $p-n$ -перехода.



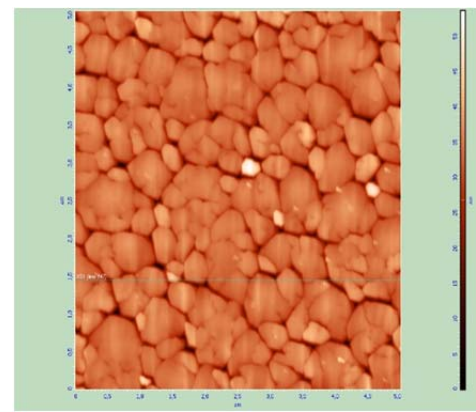
а

Пластина V-2053. Эпитаксия МОС. Область 150×200 мкм в темном поле микроскопа



б

Пластина 1131. Эпитаксия МЛЭ. Область 150×200 мкм в темном поле микроскопа



в

Эпитаксия МЛЭ. область (5×5 мкм). Атомно-силовой микроскоп

Рис. 5. Фотографии фрагментов типичных поверхностей пластин с ГЭС, выращенных эпитаксией из МОС и МЛЭ.

На рис. 5, а, б представлены фотографии в темном поле микроскопа фрагментов (150×200 мкм) поверхности пластин с ГЭС, выращенных эпитаксией из МОС и МЛЭ. На обеих пластинах видны относительно крупные дефекты с линейными размерами 3–15 мкм. Плотность распределения этих

дефектов более чем на порядок выше у ГЭС МЛЭ. Разрешающая способность микроскопа и видекамеры не позволяют показать микрокристаллическую структуру пленок из МОС. В то же время на фото поверхности слоев МЛЭ (рис. 5, б) видна мелкозернистая структура контактного (верхнего в

ГЭС) слоя p -GaN, которую более наглядно показывает изображение в атомно-силовом микроскопе (рис. 5, в). Отклонения от плоскости, отображенной темными участками фото, достигают 50 нм на наиболее светлых участках при среднем значении 30–35 нм, что сравнимо с толщинами функциональных слоев.

Заключение

Линейная зависимость темнового тока от площади лучших фотодиодов тестовых диодов различных по диаметру размеров, изготовленных на основе ГЭС, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией и сформированных травлением p - и i -слоев в высокоплотной плазме $\text{VCl}_3/\text{Ar}/\text{N}_2$, позволяет сделать вывод, что темновой ток определяется структурным несовершенством гетероэпитаксиальных слоев, формирующих p - n -переход. Полученные результаты могут свидетельствовать о высокой плотности дефектов роста эпитаксиальной структуры по площади пластины.

Выражаем благодарность доктору физико-математических наук К. О. Болтарю за участие в обсуждении результатов и за высказывание критических замечаний при написании этой публикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1043.
2. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Седнев М. В. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 488.
3. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Сало В. В., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 54.
4. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Сало В. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 627.
5. Болтарь К. О., Таубкин И. И., Седнев М. В., Чинарева И. В., Лопухин А. А., Смирнов Д. В., Мармалюк А. А., Мазалов А. В., Сабитов Д. Р., Курешов В. А., Падалица А. А. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 74.
6. Шаронов Ю. П., Макарова Э. А., Седнев М. В., Ладугин М. А., Яроцкая И. В. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 83.
7. Болтарь К. О., Седнев М. В., Смирнов Д. В., Иродов Н. А. Способ травления меза-элементов на основе эпитаксиальных p - i - n -структур GaN/AlGaIn. Заявка № 2014147928 от 27.12.2014.

PACS: 85.60 Gz

Focal plane arrays of the UV photodiodes based on the AlGaIn heteroepitaxial structures obtained by molecular-beam epitaxy and epitaxy using organometallic compounds

M. V. Sednev¹, K. S. Zhuravlev², A. V. Truhachev¹, N. A. Irodov¹, and M. A. Ladugin³

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Rzhanov Institute of Semiconductor Physics
13 Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia

³ Polyus Research Institute, JSC
3 Vvedenskogo str., Moscow, 117342, Russia

Received July 27, 2018

Quality of the heteroepitaxial structures (layers and boundaries dividing them structural accomplishment; heteroepitaxial structures surface roughness and curvative) is the main requirement for high-performance FPAs production. The results of the 320×256 FPAs had 30 μm pixel pitch p - i - n -diodes mesa-elements current-voltage characteristics measurements are discussed in this article. The 320×256 FPAs had the 30 μm pixel pitch. Mesa-elements were obtained by ion-beam etching from the AlGaIn heteroepitaxial structures produced by molecular-beam epitaxy and epitaxy using organometallic compounds. The results of the different size mesa diodes test samples based on heteroepitaxial structures obtained by molecular-beam epitaxy and produced by the p + and i -layers etching in

the high-density plasma. Typical current-voltage characteristics of heteroepitaxial structures based diodes obtained by different methods of mesa growing and formation are presented in the article.

Keywords: AlGa_N, Ga_N, heteroepitaxial structures, *p-i-n*-photodiodes, solar-blind, visible-blind.

REFERENCES

1. T. V. Blank and Yu. A. Goldberg, Semiconductors **37**, 1043 (2003).
2. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, and M. V. Sednev, Usp. Prikl. Fiz. **1** (4), 488 (2013).
3. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, V. V. Salo, and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 6, 54 (2013).
4. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, V. V. Salo, Usp. Prikl. Fiz. **2** (6), 627 (2014).
5. K. O. Boltar, I. I. Taubkin, M. V. Sednev, et al., Prikl. Fiz., No. 6, 74 (2013).
6. Yu. P. Sharonov, E. A. Makarova, M. V. Sednev, et al., Prikl. Fiz., No. 6, 83 (2016).
7. K. O. Boltar, M. V. Sednev, D. V. Smirnov, and N. A. Irodov, RF Invention Application No. 2014147928, December 27, 2014.