

# ПАССИВАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ

УДК 621.382.002

Е.В. Телеш, БГУИР, г. Минск

## Аннотация

Проведено исследование процессов пассивации полевых транзисторов с барьером Шоттки на GaAs с применением ионно-лучевого распыления мишеней из кварца, оксида алюминия и нитрида алюминия. Установлено влияние режимов распыления на ток заряженных частиц в области подложки. Изучено влияние режимов нанесения на адгезию пассивирующего слоя к GaAs. Установлено, что с ростом тока разряда происходит увеличение адгезии диэлектрического слоя. Диэлектрические слои, сформированные ИЛР, обладают адгезией, которая в 2–4 раза выше, чем у слоев, полученных низкотемпературным окислением и электронно-лучевым испарением. Проведено исследование границы раздела AlN/GaAs. Показано что, свойства границы раздела во многом определяются параметрами процесса формирования диэлектрика. Показано, что ионно-лучевое распыление диэлектрических мишеней является перспективным для формирования пассивирующих слоев для активных структур на GaAs.

## Введение

Важным резервом повышения качества микроэлектронных устройств на арсениде галлия является совершенствование таких технологических процессов, как формирование диэлектрических покрытий. Одним из главных недостатков GaAs, по сравнению с кремнием, является сложность получения качественного собственного оксида [1]. В связи с этим, наиболее приемлемым является формирование диэлектрических покрытий без использования материала подложки. В арсенид-галлиевой технологии очень важно правильно выбрать тот или иной метод нанесения диэлектрического покрытия. Это связано с тем, что GaAs является сложным полупроводником, и сильное влияние на параметры будущих приборов оказывает степень сохранения стехиометрии полупроводника. Из-за высокой летучести мышьяка процесс нанесения диэлектрика нельзя проводить при температурах выше 673...723 К. Энергия образования объемных дефектов у GaAs составляет всего

0,35–2,59 эВ. Энергия осаждаемых частиц определяет степень генерации дефектов в приповерхностном слое GaAs, параметры границы раздела, свойства диэлектрических покрытий (плотность, пористость), а также адгезию к подложке. В таблице 1 приведены данные по энергиям осаждаемых частиц для различных методов нанесения, а также энергии ионов рабочих газов при процессах диодного, магнетронного распыления и плазмохимического осаждения (ПХО).

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что только термическое испарение позволяет осаждавать диэлектрики без генерации дефектов в полупроводнике. В то же время можно отметить невысокую энергию частиц при ИЛР, что делает этот метод приемлемым для формирования пленок диэлектриков на GaAs [2, 3]. Это объясняется преимуществами ионно-лучевых систем: пространственное разделение областей генерации плазмы и области непосредственной конденсации материала, более высокая чистота пленок из-за снижения давления рабочих газов, высокая адгезия покрытий к подложкам, минимальное воздействие вторичных электронов на подложку, а, следовательно, уменьшение степени радиационных повреждений и нагрева.

Пассивирующие покрытия служат для защиты поверхности активных структур от воздействия окружающей среды. Они должны иметь высокую адгезию к GaAs и низкую плотность заряда на границе раздела с полупроводником. Задачей исследований являлось изучение влияния режимов ИЛР диэлектрических мишеней на характеристики границы раздела «диэлектрик/n-GaAs» и на параметры полевых транзисторов с барьером Шоттки.

## Основная часть

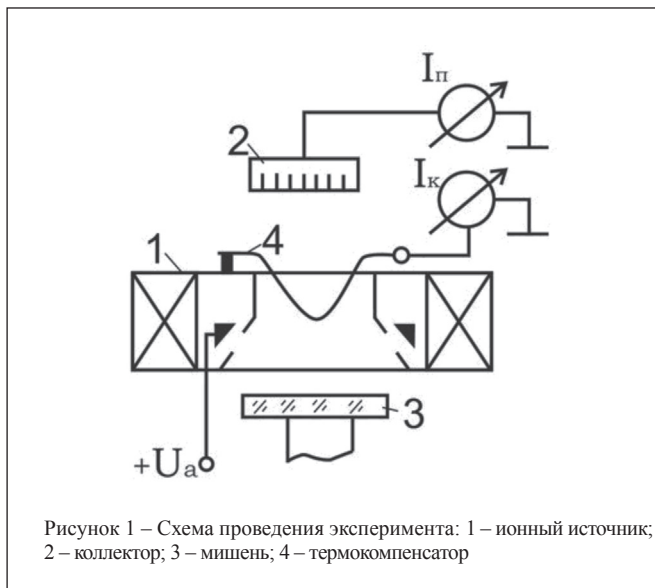
Важным условием процесса ИЛР диэлектрических мишеней является нейтрализация объемного заряда, накапливающегося на поверхности мишени и подложки. Объемный положительный заряд на мишени снижает скорость нанесения, а заряд на подложке приводит к пробое пленки диэлектрика. Эти процессы ухудшают качество диэлектрических слоев и границы раздела.

Проведено исследование характеристик заряженных частиц на подложке при распылении кварцевой мишени. При этом варьировалось ускоряющее напряжение  $U_a$ , ток разряда  $I_p$ , ток термокомпенсатора  $I_k$ , состав рабочего газа. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 1.

Термоэлектронный компенсатор был изготовлен из вольфрамовой проволоки диаметром 0,3 мм. В качестве подложки использовался специальный датчик-коллектор, который представлял собой металлический диск диаметром 70 мм. На одной из поверхностей диска были просверлены глухие отверстия глубиной 10 мм и диаметром 3 мм. Это необходимо для предотвращения запыления металла

Таблица 1 – Энергии осаждаемых частиц и ионов

Метод нанесения	Энергия, эВ
Термическое испарение	0,05–0,2
Химическое осаждение из газовой фазы	0,1–1,0
Ионно-лучевое распыление (ИЛР)	2–4 с хвостом 20–30
Диодное распыление	10–2000
Магнетронное распыление	10–2000
Плазмохимическое осаждение (ПХО)	10–500



слоем диэлектрика. Расстояние «мишень-подложка» составляло 90 мм, «термокомпенсатор-подложка» – 60 мм. В таблице 2 приведены результаты исследований.

Без плазменного разряда в ионном источнике подложка облучается слабым ( $\leq 1,0$  мкА) потоком термоэлектронов. При отсутствии термоэлектронов подложка подвергается воздействию положительно заряженных частиц с  $I_p$  до 1,1 мА. При  $U_a = 2,0$  кВ  $I_p$  снижается до 100 мкА, а при  $U_a = 4,0$  кВ – до 150 мкА. Добавка кислорода позволила снизить  $I_p$  в 9 раз, что можно связать с эффективной ионизацией кислорода и образованием свободных электронов в разряде. При наличии компенсации происходит снижение  $I_p$ , а при  $I_k = 10$  А наблюдается небольшой ток отрицательно заряженных частиц.

Таблица 2 – Результаты исследований

№ опыта	$U_a$ , кВ	$I_p$ , мА	$I_k$ , А	$I_p$ , мкА	Газ
1	–	–	6	0	–
2	–	–	8	–0,5	–
3	–	–	9	–0,5	–
4	–	–	10	–1,0	–
5	3,0	20	–	130	Ag
6	3,0	40	–	70	Ag
7	3,0	60	–	200	Ag
8	3,0	80	–	900	Ag
9	3,0	100	–	1100	Ag
10	3,0	80	7	200	Ag
11	3,0	80	8	400	Ag
12	3,0	80		400	Ag
13	3,0	80	10	–5,0	Ag
14	2,0	80	–	100	Ag
15	4,0	80	–	150	Ag
16	3,0	80	–	100	Ag + 50%O <sub>2</sub>

Проведено исследование влияния  $U_a$ ,  $I_p$ ,  $I_k$  и температуры подложки  $T_n$  на адгезию пассивирующего слоя к арсениду галлия. В качестве подложки применялись эпитаксиальные структуры GaAs, выращенные на полупроводящей подложке i-n типа АГЭ ЕТО.035.026 ТУ. Слои из SiO<sub>2</sub> формировались ИЛР мишени из кварца. Толщина диэлектрического слоя составила около 200 нм.

Перед напылением контактных слоев осуществлялась стандартная химическая очистка поверхности GaAs. Ионная очистка проводилась непосредственно перед нанесением пассивирующего слоя. Напряжение на аноде при очистке  $U_0$  составляло 1,5 кВ, ток ионов аргона  $I_0$  – 40 мкА. Адгезия слоев P измерялась методом нормального отрыва. Результаты измерений приведены в таблице 3.

Установлено, что с ростом  $I_p$  происходит увеличение адгезии диэлектрического слоя. Влияние  $U_a$  на адгезию неоднозначно. Метод ИЛР, как правило, обеспечивает отличную адгезию из-за более высокой энергии осаждаемых частиц по сравнению с термическим испарением, пиролизом и другими методами. Диэлектрические слои, сформированные ИЛР, обладают адгезией, которая в 2–4 раза выше, чем у слоев, полученных низкотемпературным окислением и электронно-лучевым испарением.

Проведено исследование границы раздела AlN/GaAs, сформированной ИЛР мишени из нитрида алюминия. Образцы для измерений представляли собой МДП-структуры на эпитаксиальных слоях n-типа с концентрацией электронов  $1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Исследовалось влияние  $U_a$  и  $I_k$  на характер вольт-фарадных характеристик (ВФХ) и на плотность поверхностных состояний  $N_{ss}$ . На рисунке 2 приведены ВФХ полученных структур. Обращает на себя внимание полное отсутствие гистерезиса ВФХ структуры, сформированной при  $U_a = 4$  кВ и  $I_k = 4,5$  А. Плотность поверхностных состояний ( $N_{ss}$ ) для этого образца составила  $3,3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Уменьшение ускоряющего напряжения до 2 кВ приводит к появлению петли гистерезиса переменного знака, что

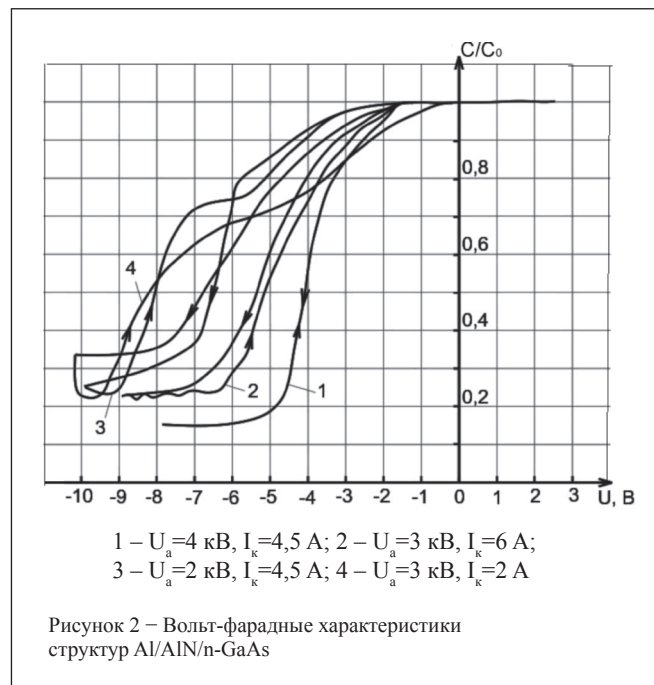
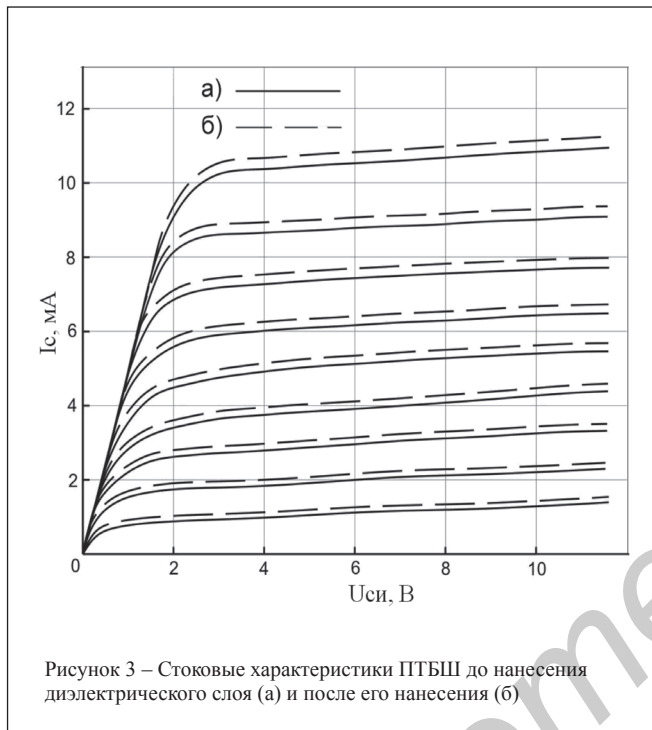


Таблица 3 – Результаты исследования адгезии слоя из SiO<sub>2</sub> от режимов нанесения

№	U <sub>a</sub> , кВ	I <sub>p</sub> , мА	I <sub>k</sub> , А	U <sub>o</sub> , кВ	I <sub>o</sub> , мкА	T <sub>n</sub> , К	P, МПа
1	3,0	60	9,5	1,5	30	343	2,1
2	3,0	100	9,5	–	–	348	2,9
3	2,0	60	9,5	–	–	343	2,4
4	4,0	60	9,5	–	–	348	2,2
5	3,0	100	–	–	–	313	2,4



может быть связано с перезарядкой состояний на границе раздела. Диэлектрический слой, сформированный при таких условиях, обладает невысоким качеством, о чем свидетельствует вид характеристики в области инверсии. Плотность состояний N<sub>ss</sub> составляла 4,6·10<sup>12</sup>см<sup>-2</sup>.

Аналогичные результаты были получены и для МДП-структур, сформированных при U<sub>a</sub> = 3 кВ и I<sub>k</sub> = 2,5 А, т.е. при низкой степени компенсации. В этом случае наблюдается еще более выраженный гистерезис переменного знака и значительные токи утечки в области инверсии. Расчеты показали, что N<sub>ss</sub> для таких образцов были около 5,7·10<sup>12</sup>см<sup>-2</sup>. Структуры, полученные при U<sub>a</sub> = 3 кВ и I<sub>k</sub> = 6 А, имели незначительный гистерезис и N<sub>ss</sub> = 5,3·10<sup>12</sup>см<sup>-2</sup>.

Таким образом, свойства границы раздела во многом определяются параметрами процесса формирования диэлектрического слоя. При высоких энергиях расплывающих ионов и эффективной компенсации заряда на мишени можно формировать границу раздела с низким значением концентрации поверхностных состояний и со стабильным зарядом в диэлектрике.

В связи с этим, является перспективным использование ионно-лучевого распыления для формирования пассивирующих слоев для активных структур на GaAs. Одним из показателей пригодности технологического процесса

Таблица 4 – Влияние процесса пассивации на характеристики ПТБ

Материал покрытия	Режимы напыления			Характеристики ПТБШ до пассивации			Характеристики ПТБШ после пассивации			Метод нанесения пассивации
	U <sub>a</sub> , кВ	I <sub>p</sub> , мА	I <sub>k</sub> , А	I <sub>c</sub> , мА	U <sub>си</sub> , В	I <sub>y</sub> , нА	I <sub>c</sub> , мА	U <sub>си</sub> , В	I <sub>y</sub> , нА	
SiO <sub>2</sub>	3,0	80	4,8	9,5	2,0	0	10,5	1,5	5	ИЛР
SiO <sub>2</sub>	2,5	75	4,5	12	2,5	7	13	2,0	50	ИЛР
SiO <sub>2</sub>	3,0	100	4,8	12	2,0	20	12,5	2,0	50	ИЛР
AlN	2,0	75	4,5	10	2,0	20	10	2,0	10	ИЛР
AlN	4,0	75	4,5	10	1,5	20	10	1,8	20	ИЛР
AlN	3,0	75	2,5	10	4,0	20	10	4,0	25	ИЛР
AlN	3,0	75	6,0	12	2,0	5	10	2,0	10	ИЛР
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0	75	4,5	12	2,0	15	11	2,0	20	ИЛР
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0	75	4,5	10	2,0	15	10	2,0	25	ИЛР
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	14	2,0	20	14	2,0	40	ЭЛИ
SiO <sub>2</sub>	–	–	–	11	3,5	15	10	3,5	100	НТО

пассивации является степень его воздействия на характеристики сформированных до этого активных элементов интегральных схем.

Исследовалось влияние параметров процесса ИЛР на такие характеристики полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТБШ), как ток стока  $I_{sc}$ , напряжение насыщения стоквых характеристик  $U_{сн}$ , а также на ток утечки затвора  $I_y$  при  $U_{обp} = 10$  В. Результаты исследований представлены на рисунке 3 и в таблице 4. Для сравнения приведены результаты измерений характеристик ПТБШ после нанесения слоев  $SiO_2$  низкотемпературным окислением (НТО) и  $Al_2O_3$ , полученных электронно-лучевым испарением (ЭЛИ). Изменение характеристик ПТБШ после ИЛР оказалось незначительным, практически тем же, как и при использовании электронно-лучевого испарения. Результаты измерений показывают, что в диэлектрической пленке накапливается, в основном, положительный заряд, приводящий к обогащению приповерхностной области полупроводника и, как следствие, к возрастанию токов насыщения и утечки. Резкое увеличение токов утечки ПТБШ, пассивированных пленкой  $SiO_2$ , нанесенной методом НТО, можно объяснить деградацией затвора из Ti/Au при высоких температурах (623–923 К) [4].

Таким образом, ИЛР диэлектрических мишеней является приемлемым процессом для формирования качественных пассивирующих слоев.

#### Заключение

Таким образом, результаты исследований показывают, что использование ИЛР диэлектрических мишеней позволяет сформировать пассивирующие покрытия для ПТБШ на GaAs с высокой адгезией и низкой степенью воздействия на их стоквые характеристики.

#### Литература:

1. Коротченков, Г.С. Барьеры Шоттки, собственные окислы и МОП структуры на арсениде галлия / Г.С. Коротченков, И.П. Молодян. – Кишинев, Штиинца. 1984. – 115 с.: ил.
2. Телеш, Е.В. Формирование покрытий ионно-лучевым распылением диэлектрических мишеней / Е.В. Телеш, Н.К. Касинский, В.С. Томаль // Вестник ПГУ. Серия физическая. – 2012. – №4. – С. 121–127.
3. Интегрированные технологии микро- и наноструктурированных слоев: монография / А.П. Достанко [и др.] ; под ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко, д.т.н., профессора В.Л. Ланина. – Минск : Бестпринт, 2013. – 189 с. : ил.
4. Стриха, В.И. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике / В.И. Стриха, Е.В. Бузанева // М. : Радио и связь. – 1987. – 256 с.: ил.

#### Abstract

Research of processes of passivation field transistors with Schottky barrier on GaAs with application of ion-beam sputtering of targets from quartz, aluminium oxide and aluminium nitride is carried out. Influence of deposition modes on a current of the charged particles in the field of a substrate is established. Influence of deposition modes on adhesion passivation layer to GaAs is studied. It is established, that to growth of a charge current there is an increase in adhesion of a dielectric layer. The dielectric layers generated IBS, possess adhesion, which in 2-4 times above, than at the layers received low temperature oxidation and electron beam evaporation. Research of border of section AlN/GaAs is carried out. It is shown that, properties of border of section in many respects are defined by parameters of process of dielectric formation. It is shown, that ion-beam sputtering of dielectric targets is perspective for passivation layers formation for active structures on GaAs.

Поступила в редакцию 12.06.2015 г.

## НОВОСТИ

# КАК МОДУЛИ ПИТАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ УПРОЩАЮТ РАЗРАБОТКУ СИСТЕМ ПИТАНИЯ

DC/DC-модули питания компании Maxim Integrated обеспечивают создание более миниатюрных эффективных, совместимых по выводам решений, позволяющих сократить затраты и ускорить вывод конечной продукции на рынок.

Новый информационно-технический документ компании Maxim Integrated Products, Inc. (NASDAQ: MXIM) посвящен новому поколению гибких, простых в использовании модулей питания, которые упрощают разработку систем питания. Готовые модули питания позволяют разработчикам систем ускорить вывод конечной продукции на рынок и решить проблемы нехватки места на печатной плате.

В документе «Модули питания нового поколения дополнительно упрощают разработку систем питания» рассказывается, как высокоэффективные модули питания интегрируют в себе все ключевые компоненты,

необходимые для реализации миниатюрного решения для питания типа «система в корпусе» (SiP). С помощью новых DC/DC-модулей питания компании Maxim заказчики смогут объединить пассивные компенсационные компоненты для стабилизатора напряжения, создав единое, миниатюрное решение для питания в корпусе ИС.

#### О компании Maxim Integrated

Компания Maxim Integrated – лидер в области интеграции аналоговых устройств. Разрабатывая широкий спектр решений – от мобильных до промышленных, – компания делает аналоговые устройства все более компактными, интеллектуальными и энергоэффективными. Для получения более подробной информации обращайтесь на сайт <http://www.maximintegrated.com>.

[goo.gl](http://goo.gl)