

УДК 621.315.592:621.3.019.33

## **ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО, ХИМИЧЕСКОГО И ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaAs**

**Е.М. Савченко<sup>1,2,3</sup>, А.Д. Першин<sup>1,2</sup>, Л.А. Сейдман<sup>2</sup>, Д.Г. Дроздов<sup>1,3</sup>, Б.Л. Гуськов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> АО «НПП «Пульсар», 105318 Москва, Окружной проезд, д. 27;

<sup>2</sup> АО «ГЗ «Пульсар», 105318 Москва, Окружной проезд, д. 27;

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО РТУ МИРЭА, 119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78;

<sup>4</sup> АНО ВО «РОСНОУ», 105005, Москва, ул. Радио, д. 22

*Проведены эллипсометрические исследования изменений свойств приповерхностных слоёв GaAs-гетероструктур, которые подвергались последовательно трём обработкам: в кислородной плазме, в растворе соляной кислоты и термическому отжигу. Показано, что достаточно простая процедура эллипсометрических измерений позволяет следить за состоянием поверхности гетероструктур на основе арсенида галлия и за её изменениями на всех стадиях технологического процесса.*

**Ключевые слова:** гетероструктуры на основе GaAs, эллипсометрические измерения, плазмохимическая, химическая и термическая обработка поверхности, структура поверхности

**Сведения об авторах:** Савченко Евгений Матвеевич, к.т.н., savchenko@pulsarnpp.ru; Першин Александр Дмитриевич, a.pershin@pulsarnpp.ru; Сейдман Лев Александрович, к.т.н., с.н.с., seid1@yandex.ru; Дроздов Дмитрий Геннадьевич, к.т.н., drozdov\_dmitrii@pulsarnpp.ru; Гуськов Борис Леонидович

## **EFFECT OF PLASMOCHEMICAL, CHEMICAL AND THERMAL EXPOSURE ON THE ELLIPSO-METRIC PARAMETERS OF SURFACE LAYERS OF GaAs HETEROSTRUCTURES**

**E.M. Savchenko<sup>1,2,3</sup>, A.D. Pershin<sup>1,2</sup>, L.A. Seidman<sup>2</sup>, D.G. Drozdov<sup>1,3</sup>, B.L. Guskov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> – S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okrzhnoy Pr., 27

<sup>2</sup> – GZ Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okrzhnoy Pr., 27

<sup>3</sup> - Russian Technological University MIREA, 119454, Moscow, Vernadsky Ave., 78

<sup>4</sup> - Non-profit organization of higher education RosNOU, 105005, Moscow, Radio st., 22

*In this study the ellipsometric measurements of changes in the properties of the surface layers of GaAs heterostructures were carried out. Heterostructures were subjected to three consecutive treatments: oxygen plasma, hydrochloric acid solution and thermal annealing. It is shown that a fairly simple procedure of ellipsometric measurements allows to monitor the surface state of heterostructures based on gallium arsenide and its changes at all stages of the production process.*

**Keywords:** GaAs-based heterostructures, ellipsometric measurements, plasmochemical, chemical and thermal surface treatment, surface structure

**Data on authors:** Savchenko Evgeniy Matveevich, Ph.D., savchenko@pulsarnpp.ru; Pershin Aleksandr Dmitrievich, a.pershin@pulsarnpp.ru, Seidman Lev Aleksandrovich, Ph.D, senior researcher, seid1@yandex.ru; Drozdov Dmitry Gennadyevich, Ph.D., drozdov\_dmitrii@pulsarnpp.ru; Guskov Boris Leonidovich.

### Введение

Эллипсометрические измерения широко используются для контроля технологических процессов [1]. В работе [2] приведена эллипсометрическая программа, позволяющая определять параметры диэлектрических слоёв на любых металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалах. В работе [3] были определены оптические константы  $n$  и  $k$  для Al, Au, Ti, Ni для длины волны 0,6328 мкм. В данной работе эллипсометрические измерения были использованы для оценки влияния плазмохимического, химического и термического воздействия на эллипсометрические параметры приповерхностных слоёв гетероструктур на основе GaAs.

В современной технологии производства полупроводниковых приборов, использующей технологию «взрывной» фотолитографии, перед нанесением металлизации для улучшения свойств контакта проводят очистку поверхности полупроводника в окнах маски от остатков резиста (органики) и окислов. С целью удаления остатков резиста за счёт их превращения в летучие углекислый газ и водяной пар сначала поверхность подложек обрабатывают в кислородной плазме. Почти всегда такая обработка применяется для подложек из GaN [4] и очень редко из GaAs [5]. Чтобы разобраться в причинах такой непопулярности, было проведено небольшое исследование, целью которого стало определение влияния на свойства поверхности автоэпитаксиальных слоёв арсенида галлия таких обработок, как обработка в кислородной плазме, в растворе кислоты и термообработка. Их влияние оценивалось с помощью эллипсометрических

исследований поверхности – современного удобного способа исследований [1-3]. Этот вопрос интересен также и потому, что работы по эллипсометрическим исследованиям поверхности автоэпитаксиальных слоёв арсенида галлия, подвергнутых различным обработкам, исключительно малочисленны.

### Методика эксперимента

В качестве экспериментальных образцов использовалась типичная гетероструктура для НЕМТ на подложке GaAs (рис. 1), в которой  $x = 0,28$  и степень легирования верхнего слоя кремнием была  $1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Такие гетероструктуры широко используются в настоящее время в производстве дискретных полупроводниковых приборов и СВЧ ИС [6-10].

|        |  |
|--------|--|
| 8,8 нм | $n^+$ -GaAs  |
| 35 нм  | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$                |
|        | $\delta\text{-Si}: 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ |
| 35 нм  | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$                |
| 860 нм | GaAs (буфер 2)                                       |
|        | CP 20 периодов                                       |
| 240 нм | AlAs 60A/GaAs 60A                                    |
| 40 нм  | GaAs (буфер 1)                                       |
|        | (100) GaAs подложка                                  |

Рис. 1

Гетероструктура для НЕМТ на подложке GaAs, использованная в экспериментах

Образцы пластин арсенида галлия с гетероструктурой для НЕМТ (рис. 1) подвергались последовательно трём обработкам: в кислородной плазме, в растворе соляной кислоты и термическому отжигу.

В кислородной плазме обработку образцов проводили в установке фирмы Diener electronic NANO с конденсаторным возбуждением ВЧ (13,65 МГц). Мощность разряда была 150 Вт. Кроме этого, использовалась аналогичная обработка, но на другой установке: в установке плазмохимической очистки Glen YES-G500. В ней для создания плазмы в кислороде применялась двухэлектродная диодная система, к которой подавали среднечастотные (СЧ) импульсы частотой 40 кГц, мощностью 450 Вт, напряжением 253 В и током 1,68 А. Давление кислорода поддерживали 20 Па (150 mTorr) при потоке 19 мВт (11 sccm).

Длительность обработки была выбрана такой, чтобы удалить все органические остатки резиста в окнах резистивной маски, не повредив саму маску. Было принято, что толщина слоя остатков не превышает 5 нм. Для его удаления длительность обработки составляла в случае ВЧ плазмы 60 с, а в случае СЧ плазмы 30 с. В экспериментах использовали длительность обработки в ВЧ плазме 30, 60 и 120 с, в СЧ плазме – 30 с.

Непосредственно перед загрузкой в вакуумную камеру напылительной установки для удаления окислов с поверхности подложки обычно её обрабатывают в растворе кислоты, растворяющем окислы на поверхности полупроводника. В нашей работе после обработки в кислородной плазме образцы обрабатывались в растворе HCl : H<sub>2</sub>O (1 : 1 по объёму) в течение 2 минут. Последняя обработка – отжиг образцов в азоте при атмосферном давлении в течение 2 минут при 380 °С (это один из популярных режимов термообработки омических контактов к арсениду галлия [11]).

После каждой обработки проводились эллипсометрические измерения свойств поверхности образцов на эллипсометре L1165300 фирмы Gartner с длиной волны лазера 632,8 нм.

### *Результаты эксперимента*

Полученные результаты измерений свойств поверхности образцов после различных обработок сведены в табл. 1. Экспериментальные результаты эллипсометрических измерений свойств поверхности всех образцов показали, что угол  $\Psi$  практически не изменялся или уменьшался незначительно – всего на 0,06-0,24 градуса. Существенно более чувствительным к воздействию обработок оказался угол  $\Delta$  (рис. 2).

После очистки образцов в кислородной плазме угол  $\Delta$  уменьшился, причём его изменения тем сильнее, чем больше была доза обработки в ВЧ плазме (рис. 2). Особенно существенные изменения произошли после обработки в СЧ плазме: угол  $\Delta$  снизился на 4 градуса до 172,43, достигнув наименьшей величины (табл. 1).

Результаты таких же измерений после обработки 2 мин в растворе 1:1 соляной кислоты таковы: угол  $\Delta$  продолжил уменьшаться (рис. 2). Исключение составил образец, обработанный в СЧ плазме, у которого, наоборот, этот угол вырос с 172,43 до 174,5 град.

Те же измерения на всех образцах после их отжига 2 мин при 380 °С в азоте показали, что угол  $\Delta$  существенно увеличился, приблизившись к своему первоначальному значению.

Таблица 1

**Результаты эллипсометрических измерений свойств поверхности образцов, углов  $\Psi$  и  $\Delta$ , после различных обработок**

| № образца | Обработка                         | $\Psi$ | $\Delta$ |
|-----------|-----------------------------------|--------|----------|
| 1         | Исходный образец                  | 10,69  | 176,9    |
|           | Травление в растворе HCl          | 10,55  | 174,8    |
|           | После отжига                      | 10,83  | 177,8    |
| 2         | После ВЧ кислородной плазмы 30 с  | 10,622 | 176,296  |
|           | Травление в растворе HCl          | 10,4   | 173,8    |
|           | После отжига                      | 10,88  | 176,456  |
| 3         | После ВЧ кислородной плазмы 60 с  | 10,72  | 175,83   |
|           | Травление в растворе HCl          | 10,5   | 173,1    |
|           | После отжига                      | 10,85  | 177,7    |
| 4         | После ВЧ кислородной плазмы 120 с | 10,66  | 175,54   |
|           | Травление в растворе HCl          | 10,6   | 170,8    |
|           | После отжига                      | 10,78  | 177,55   |
| 5         | После СЧ кислородной плазмы 30 с  | 10,6   | 172,43   |
|           | Травление в растворе HCl          | 10,4   | 174,5    |
|           | После отжига                      | 10,57  | 178,22   |

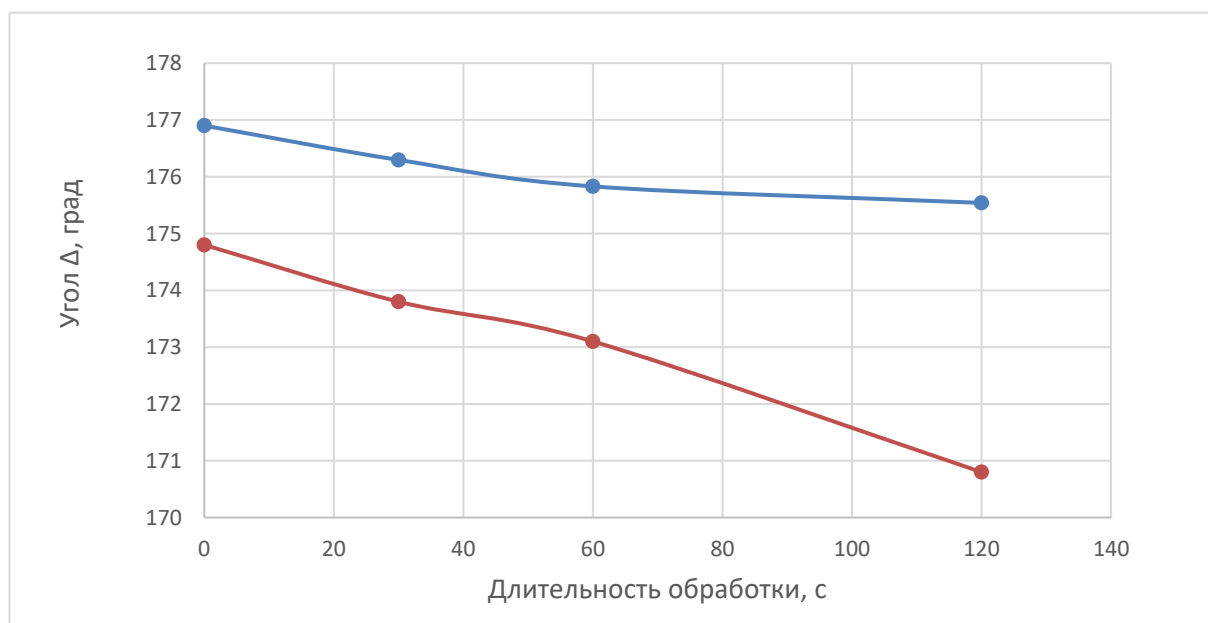


Рис. 2

Величина эллипсометрического угла  $\Delta$  в зависимости от длительности обработки в кислородной ВЧ плазме. Верхняя кривая – непосредственно после обработки в плазме, нижняя – после последующей обработки тех же образцов в растворе кислоты

### Обсуждение полученных результатов

После всех плазменных обработок снижение угла  $\Delta$  (рис. 2) связано с тем, что обработка в кислородной плазме не только удаляет остатки органики с поверхности полупроводника за счёт химической реакции с ней активных частиц кислорода, но и сопровождается ионной бомбардировкой поверхности полупроводника. Дело в том, что поскольку эпитаксиальные слои GaAs выращивались на диэлектрических подложках, то их поверхность в плазме из-за наличия энергичных электронов приобретала плавающий отрицательный потенциал (потенциал автосмещения). Поэтому положительные ионы кислорода, ускоряясь к поверхности подложки, приобретают энергию, определяемую величиной этого плавающего потенциала.

При бомбардировке поверхности подложки ионами кислорода одновременно могут протекать несколько процессов: а) выбивание отдельных атомов, приводящее к отклонению от стехиометрии поверхностного слоя из-за различия коэффициентов распыления галлия и мышьяка;

б) послойное травление полупроводника, идущее одновременно с удалением поверхностных органических загрязнений; в) создание различного типа структурных дефектов в кристаллической решётке полупроводника (дефекты смещения); г) окисление на поверхности элементов: галлия, мышьяка и алюминия. Соотношение скоростей этих процессов между собой и степень их влияния на конечную структуру поверхности полупроводника зависит от энергии и потока бомбардирующих ионов.

В работе [12] изучали структурные эффекты смещения, которые представляют собой смещения атомов из своего нормального положения в кристаллической решётке полупроводника, происходящие вследствие передачи атому некоторой энергии при облучении. Пороговая энергия смещения ( $E_d$ ) определяется как минимальная энергия, которую необходимо приложить к атому, чтобы переместить его из нормального положения. Расчётные значения  $E_d$  для различных полупроводниковых материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Величина пороговой энергии  $E_d$  смещения у различных полупроводников [12]

| Полупроводник | GaAs | Si   | C-SiC | Алмаз | GaN | H-SiC |
|---------------|------|------|-------|-------|-----|-------|
| $E_d$ , эВ    | 9    | 12,8 | 37    | 80    | 145 | 153   |

Пороговая энергия является фундаментальным показателем стойкости полупроводниковых материалов к воздействию бомбардировки ионами. Этим авторы [12] объяснили, что GaN является одним из

наиболее стойких полупроводников к воздействию ионной бомбардировки, а арсенид галлия – один из наименее стойких полупроводников. Поэтому и результаты обработки GaAs в кислородной плазме

выражены значительно сильнее. Этим объясняется то, что в подавляющем большинстве случаев такая обработка очень редко применяется для подложек из GaAs [5].

Разницу в результатах обработок с использованием двух различных кислородных плазм можно объяснить следующим образом. Отличием ВЧ плазмы в диодной системе является сравнительно низкая энергия ионов кислорода в плазме (10-30 эВ) [4]. Это не мешает очистке поверхности полупроводника за счёт химического взаимодействия их с органикой, но значительно снижает ударное воздействие на кристаллическую решётку. В диодной СЧ плазме из-за высокой величины энергии отрицательных ионов кислорода (примерно 250 эВ) идёт более сильная бомбардировка ионами кислорода поверхности кристалла. Это приводит к более ощутимым изменениям свойств поверхности подложки по сравнению с обработкой в ВЧ плазме. Это различие результатов обработки в разных установках необходимо учитывать при сравнении технологий, используемых в отдельных лабораториях.

Уменьшение величины угла  $\Delta$  после обработки в кислородной плазме можно было бы попытаться объяснить тем, что это толщина окисла растёт с ростом длительности обработки в кислородной плазме. Однако при плазменной обработке не нагретой подложки существенный слой окисла не может образоваться, так как отсутствует диффузия атомов кислорода внутрь, а атомов галлия, мышьяка или алюминия к поверхности [13]. Поэтому уменьшение угла  $\Delta$  связано с влиянием образовавшегося тонкого нарушенного слоя арсенида галлия у поверхности образца,

степень разупорядоченности и толщина которого растут с ростом дозы обработки или энергии ионов.

Толщину нарушенного слоя можно оценить по результатам работ [14, 15], где определили, что глубина имплантации частиц кислорода в металлы из плазмы составляет несколько нанометров: 5,5 нм при распылении алюминия и 7 нм при распылении кремния в смеси аргона и кислорода. Можно предположить, что эти оценки примерно справедливы и для арсенида галлия. Таким образом, на самом деле именно в таком тонком слое имеют место превращения, вызывающие снижение угла  $\Delta$ .

Используемая для удаления окислов обработка в растворе кислоты образцов, подвергшихся и не подвергшихся обработке в кислородной ВЧ плазме, также привела к уменьшению угла  $\Delta$  (рис. 2). Это можно трактовать как имеющее место при химическом травлении дальнейшее значительное увеличение беспорядка в структуре арсенида галлия около поверхности за счёт селективности растворения составляющих его элементов (Ga, As, Al, O), что привело к дальнейшему увеличению количества дефектов около поверхности, которые поглощают или рассеивают излучение лазера.

В отличие от всех остальных образцов только в образце, подвергшемся обработке в СЧ плазме, угол  $\Delta$  после химической обработки вырос. Наиболее вероятно, что у такого образца, имеющего самые сильные нарушения структуры приповерхностных слоёв, в растворе кислоты химически более интенсивно растворяются наиболее нарушенные верхние слои, что в результате приводит к росту упорядоченности структуры у поверхности подложки.

После отжига всех образцов, не прошедших обработку в плазме и прошедших её, с последующей их обработкой в растворе кислоты величины углов  $\Delta$  возросли и практически приблизились к первоначальному значению для исходной подложки (176,9 град), что говорит о восстановлении правильной кристаллической структуры поверхностных слоёв полупроводника. Это объясняется достаточно высокой скоростью диффузии атомов галлия, мышьяка и алюминия при температуре 380 °С, благодаря чему уменьшается количество дефектов структуры, рассеивающих и поглощающих излучение лазера.

Поскольку завершающий отжиг в азоте в течение 2 минут при 380 °С возвращает оптические свойства поверхности арсенида галлия практически к первоначальному, то такая поверхность полупроводника, очищенная от органических остатков и окислов, благоприятна для формирования на них контактов, что особенно важно для невжигаемых контактов. Поэтому очистка в кислородной плазме может использоваться в технологии приборов и на основе GaAs, если влияние указанных обработок и их режимов на свойства поверхности полупроводника перед осаждением на них контактной металлизации будет учитываться при построении технологического процесса формирования контактов.

### **Заключение**

Проведено эллипсометрическое исследование изменений оптических свойств приповерхностных слоёв гетероструктур для НЕМТ на основе GaAs, которые подвергались последовательно трём обработ-

кам: в кислородной плазме, в растворе соляной кислоты и термическому отжигу. Показано, что достаточно простая процедура эллипсометрических измерений позволяет следить за состоянием структуры поверхности арсенида галлия и за её изменениями на всех стадиях технологического процесса.

Установлено, что обработка в кислородной плазме вносит существенную разупорядоченность в структуру тонких приповерхностных слоёв GaAs. Эффект от обработки в кислородной плазме растёт вместе с дозой обработки или энергией ионов. Поэтому эффект зависит и от способа возбуждения плазмы: СЧ плазма оказывает существенно более сильное воздействие, чем ВЧ плазма. Можно заключить, что обработка в ВЧ плазме существенно предпочтительней при подготовке полупроводника к формированию контактов.

Обработка в растворе соляной кислоты тоже меняет свойства приповерхностных слоёв арсенида галлия из-за селективного растворения элементов в приповерхностном слое.

Завершающий отжиг 2 минуты в азоте при 380 °С возвращает оптические свойства поверхности арсенида галлия практически к первоначальным. Такая поверхность полупроводника с восстановленными свойствами, но очищенная от остатков органики и окислов, благоприятна для формирования на ней контактов, что особенно важно для невжигаемых контактов. Поэтому очистка в кислородной плазме может использоваться в технологии приборов и на основе GaAs, при этом влияние режимов обработок должно учитываться

при построении технологического процесса формирования контактов.

### Литература

1. Груздов, В.В. Входной и технологический контроль материалов и структур твердотельной электроники: лабораторные работы / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – Москва: Техносфера, 2017. – 97 с. – ISBN: 978-5-94836-471-1. – Текст: непосредственный.
2. Эллипсометрический контроль толщины металлических плёнок / Б.Л. Гуськов, Ю.А. Концевой. – Текст: непосредственный // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – № 2. – С. 81-82.
3. Усовершенствование эллипсометрических методов контроля полупроводниковой технологии / Ю.А. Концевой, Ю.И. Завадский, Б.Л. Гуськов. – Текст: непосредственный // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2007. – № 2. – С. 35-40.
4. Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения: монография / Е.В. Берлин, В.Ю. Григорьев, Л.А. Сейдман. – Москва: Техносфера, 2018. – 461 с. – 300 экз. – ISBN 978-5-94836-519-0. – Текст: непосредственный.
5. Influence of Nickel layer thickness on the magnetic properties and contact resistance of AuGe/Ni/Au Ohmic contacts to GaAs/AlGaAs heterostructures / T. S. Abhilash, Ch. Ravi Kumar, G. Rajaram // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – vol. 42. – №12. – p.5104. DOI:10.1088/0022-3727/42/12/125104
6. СВЧ МИС усилителя мощности с диапазоном рабочих частот 2,6-3,4 ГГц и выходной мощностью до 5 Вт / Е.М. Савченко, А.Д. Першин, А.С. Будяков, А.А. Пронин. – Текст: непосредственный // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 26-29.
7. Результаты проектирования и исследования СВЧ МИС аттенуаторов с фиксированным коэффициентом ослабления / Е.М. Савченко, М.В. Гладких, А.Д. Першин, А.А. Пронин. – Текст: непосредственный // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 30-33.
8. Особенности применения СВЧ усилителей средней мощности в импульсном режиме работы / Е.М. Савченко, А.А. Пронин, А.Д. Першин, А.Ю. Кузьмин // Материалы международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения «INTERMATIC-2018». Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – 2018. – С. 803-806. – Текст: непосредственный.
9. Результаты разработки СВЧ МИС усилителей малой и средней мощности / Е.М. Савченко, А.Д. Першин, А.С. Будяков, К.И. Фондеркин // Материалы XII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – 2013. – С. 78-81. – Текст: непосредственный.
10. Пассивные СВЧ аттенуаторы фиксированного номинала на основе кремния и арсенида галлия / Е.М. Савченко,



- М.В. Гладких, А.Д. Першин, А.А. Пронин. – Текст: непосредственный // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2013. – Т. 13. – № 3. – С. 41-44.
11. Формирование омических контактов в транзисторе с высокой подвижностью электронов с метаморфным гетеропереходом на основе арсенида галлия (обзор) / Н.И. Каргин, А.Л. Кузнецов, Л.А. Сейдман, Н.А. Чашкин, С.А. Шостаченко. – Текст: непосредственный // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2014. – № 1 (232). – С. 72-81.
  12. Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики гетероструктурных полевых транзисторов на нитриде галлия / Д.В. Громов, Ю.А. Матвеев, Г.Н. Назарова // - МЭС-2012. Россия, Москва, октябрь 2012. ИППМ РАН, С.1-6. – Текст: непосредственный.
  13. Losurdo M., Capezzuto P., Bruno G. In situ ellipsometric monitoring of GaAs surface modifications during plasma processing: chemistry and kinetics. *Thin Solid Films*, 1998, vol.313-314, pp.501-505. DOI:org/10.1016/S0040-6090(97)00872-9
  14. Abe Y., Shinya K., Chiba Y., Kawamura M., Sasaki K. Time-dependent variation of the target mode in reactive sputtering of Al–O<sub>2</sub> system. *Vacuum*, 2010, vol. 84, pp.1365–1367.
  15. Abe Y. Takisawa T., Kaw'amura M., and Sasaki K. Target-surface compound layers formed by reactive sputtering of Si target in Ar+O<sub>2</sub> and Ar+N<sub>2</sub> mixed gases. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(10A), pp. 6778-6781.
- ### References
1. Gruzdov V.V., Kolkovskiy Yu.V., Kontsevoy Yu.A. *Vhodnoy i tekhnologicheskiy kontrol' materialov i struktur tverdotel'noy elektroniki: laboratorniye raboty* [Incoming and process inspection of materials and structures of solid-state electronics: laboratory work], Moscow, Tekhnosfera, 2017, 97 p. ISBN: 978-5-94836-471-1
  2. Guskov B.L., Kontsevoy Yu.A. Ellipsometricheskiiy kontrol' tolshchiny metallicheskikh plenok [Ellipsometric control of metallic films thickness]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2011, no.2, pp.81-82.
  3. Kontsevoy Yu.A., Zavadskiy Yu.I., Guskov B.L., Uovershenstvovaniye ellipsometricheskikh metodov kontrolya poluprovodnikovoy tekhnologii [Improvement of ellipsometric methods of control for semiconductor technology]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2007, no.2, pp.35-40.
  4. Berlin E.V., Grigoryev V.Yu., Seydman L.A., Induktivnye istochniki vysokoplotnoy plazmy i ikh tekhnologicheskiye primeneniya [Inductive sources of high-density plasma and their technological applications]. Moscow, Tekhnosfera, 2018, 461 p. ISBN 978-5-94836-519-0
  5. Abhilash T. S., Ravi Kumar Ch., Rajaram G. Influence of Nickel layer thickness on the magnetic properties and contact resistance of AuGe/Ni/Au Ohmic contacts to GaAs/AlGaAs heterostructures. *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2009. – vol.42. – no.12. – p.5104. DOI:10.1088/0022-3727/42/12/125104

6. Savchenko E.M., Pershin A.D., Budyakov A.S., Pronin A.A. SVCH MIS usiliteleya moshchnosti s diapazonom rabochikh chastot 2,6-3,4 GGts i vykhodnoy moshchnost`yu do 5 Vt [Power amplifier MMIC with operating range 2,6-3,4 GHz and output power up to 5 W]. *Fundamental`niye problemi radioelektonnogo priborostroyeniya*, 2014, vol.14, no.4, pp.26-29.
7. Savchenko E.M., Gladkikh M.V., Pershin A.D., Pronin A.A. Rezultaty proektirovaniya i issledovaniya SVCH MIS attenuatorov s fiksitivannym koeffitsientom oslableniya [Results of design and testing of attenuator MMICs with fixed attenuation factor]. *Fundamental`niye problemi radioelektonnogo priborostroyeniya*, 2014, vol.14, no.4, pp.30-33.
8. Savchenko E.M., Pronin A.A., Pershin A.D., Kuzmin A.Yu. Osobennosti primeneniya SVCH usiliteley sredney moshchnosti v impulsnom rezhime raboty [Features of using medium power microwave amplifiers in pulsed operation mode]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Fundamental`niye problem radioelektronnogo priborostroyeniya INTERMATIC-2018*. Ed. A.S. Sigov, 2018, pp.803-806.
9. Savchenko E.M., Pershin A.D., Budyakov A.S., Fonderkin K.I. Rezultaty razrabotki SVCH MIS usiliteley maloy i sredney moshchnosti [Results of the development of low and medium power amplifier MMICs]. *Materialy XII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Tverdotel`naya elektronika. Slozniye funktsional`niye bloki REA*, 2013, pp.78-81.
10. Savchenko E.M., Gladkikh M.V., Pershin A.D., Pronin A.A. Passivniye SVCH attenuatory fiksirovannogo nominal na osnove kremniya i arsenide galliya [Passive fixed microwave attenuators based on silicon and gallium arsenide]. *Fundamental`niye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya*, 2013, vol.13, no.3, pp.41-44.
11. Kargin N.I., Kuznetsov A.L., Seydman L.A., Chashkin N.A., Shostachenko S.A., Formirovaniye omicheskikh kontaktov v tranzistore s vysokoy podvizhnost`yu elektronov s metamorfnym geteroperekhodom na osnove arsenide galliya [Formation of ohmic contacts in a high electron mobility transistor with metamorphic heterojunction based on gallium arsenide]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2014, no.1(232), pp.72-81.
12. Gromov D.V., Matveev Yu.A., Nazarova G.N., Issledovaniye vliyaniya ioniziruyushchukh uzlucheniya na kharakteristiki geterostrukturnykh polevykh tranzistorov na nitride galliya [Study of the effects of ionizing radiation on the performance of heterostructure field-effect transistors based on gallium nitride]. *MES-2012*, Moscow, Institut problem proektirovaniya v mikroelektronike Rossiyskoy akademii nauk, pp.1-6.
13. Losurdo M., Capezzuto P., Bruno G. In situ ellipsometric monitoring of GaAs surface modifications during plasma processing: chemistry and kinetics. *Thin Solid Films*, 1998, vol.313-314, pp.501-505. DOI:org/10.1016/S0040-6090(97)00872-9

14. Abe Y., Shinya K., Chiba Y., Kawamura M., Sasaki K. Time-dependent variation of the target mode in reactive sputtering of Al–O<sub>2</sub> system. *Vacuum*, 2010, vol.84, pp.1365–1367.
15. Abe Y. Takisawa T., Kaw'amura M., and Sasaki K. Target-surface compound layers formed by reactive sputtering of Si target in Ar+O<sub>2</sub> and Ar+N<sub>2</sub> mixed gases. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(10A), pp.6778-6781.