

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ / TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В GAAS СВЧ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ В РЕАКТОРЕ С ICP-ИСТОЧНИКОМ

Научная статья

Шестерикова Д.А.^{1,*}, Шестериков А.Е.², Ерофеев Е.В.³

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Российская Федерация
^{2,3}АО «Микран», Томск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (darya.mokhina[at]mail.ru)

Аннотация

Настоящее исследование посвящено разработке технологического процесса плазмохимического травления сквозных отверстий СВЧ монокристаллических интегральных схем (СВЧ МИС) на основе GaAs в газовой смеси Cl_2/BCl_3 .

Данное производство обусловлено высокими экономическими затратами, в связи с этим, изначально было проведено моделирование плазмохимического травления с целью определения оптимальных параметров: мощность, подаваемая на ICP-источник ($P_{ICP} = 600$ Вт); давление рабочего газа ($p = 50$ мТорр). Затем была подобрана экспериментальным методом мощность RF-смещения, подаваемая на подложку для анизотропного травления сквозных отверстий ($P_{RF} = 30$ Вт).

В ходе работы был разработан технологический процесс плазмохимического травления сквозных отверстий с углом наклона $\alpha = 60^\circ$ с нижним диаметром $d_{min} = 30$ мкм и верхним диаметром $d_{max} = 60$ мкм на глубину травления GaAs $h = 120$ мкм с использованием ICP-источника.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, сквозное отверстие, мощность ICP-источника, давление рабочего газа, плотность ионов.

STUDY OF PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF THROUGH HOLES IN GAAS SHF MONOLITHIC INTEGRAL CIRCUITS IN A REACTOR WITH ICP SOURCE

Research article

Shesterikova D.A.^{1,*}, Shesterikov A.E.², Yerofeev Y.V.³

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation
^{2,3}JSC Mikran, Tomsk, Russian Federation

* Corresponding author (darya.mokhina[at]mail.ru)

Abstract

The present research is dedicated to the development of a technological process for plasma chemical etching of through-hole microwave monolithic integrated circuits (SHF MICs) based on GaAs in Cl_2/BCl_3 gas mixture.

Due to the high economic costs of this production, plasma chemical etching modelling was initially carried out to determine the optimal parameters: power delivered to the ICP source ($P_{ICP} = 600$ W); working gas pressure ($p = 50$ mTorr). The RF shift power applied to the substrate for anisotropic through-hole etching was then experimentally selected ($P_{RF} = 30$ W).

A technological process of plasma chemical etching of through holes with an inclination angle $\alpha = 60^\circ$ with lower diameter $d_{min} = 30$ μm and upper diameter $d_{max} = 60$ μm for GaAs etching depth $h = 120$ μm using ICP source was developed.

Keywords: plasma chemical etching, through hole, ICP source power, working gas pressure, ion density.

Введение

В современном производстве СВЧ микросхем существует тенденция увеличения степени интеграции элементов на подложке [1]. На данный момент количество элементов на одной пластине GaAs достигает порядка 10^9 элементов. В связи с этим появляются трудности разварки проводников, которые вносят паразитные емкости и индуктивности. С целью решения данной проблемы были разработаны сквозные металлизированные отверстия с обратной стороны пластины [2], [3].

Наиболее сложным процессом по созданию металлизированных отверстий будет являться плазмохимическое травление GaAs с определенным диаметром сквозных отверстий [4], [5], поэтому целью данной научной работы является разработка технологического процесса плазмохимического травления сквозных отверстий с углом наклона $\alpha = 60^\circ$ с нижним диаметром $d_{min} = 30$ мкм и верхним диаметром $d_{max} = 60$ мкм на глубину травления GaAs $h = 120$ мкм с использованием ICP-источника.

Методы и принципы исследования

Данное исследование состояло из двух этапов работы: моделирование плазмохимического травления в программном комплексе «Comsol Multiphysics» в реакторе с ICP-источником и проведение экспериментов.

Моделирование плазмохимического травления является комплексной задачей (см. рисунок 1), включающая моделирование в масштабе реактора и моделирование в масштабе структуры [6].

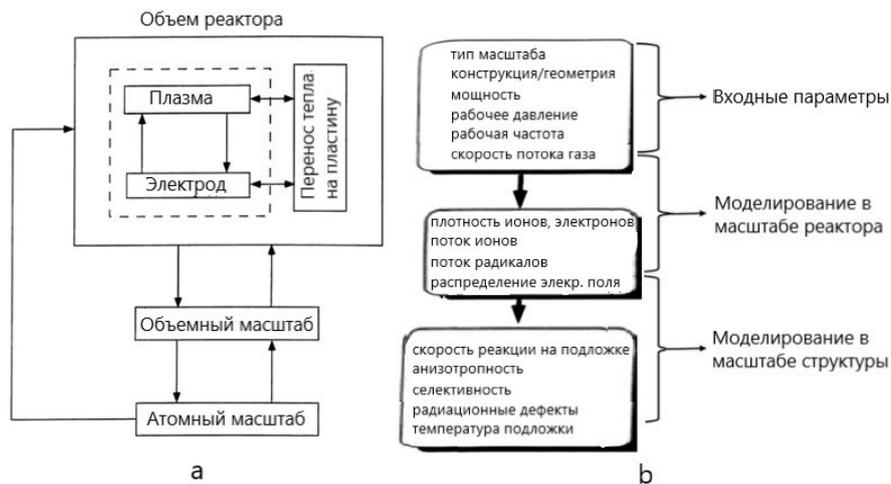


Рисунок 1 - Моделирование плазмохимического травления:

а) схема модели; б) порядок проведения расчета

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.1>

На скорость травления GaAs влияют следующие параметры установки: мощность, подаваемая на ИСР-источник ($P_{\text{ИСР}}$); мощность RF смещения (P_{RF}); давление рабочего газа (p); состав газовой смеси [7]. Кроме того, на скорость травления будет влиять количество обработанных подложек (эффект загрузки), чем меньше диаметр подложки, тем выше скорость травления [8].

Травление GaAs в основном проводится в хлор-фтористой плазме. Для изготовления сквозных отверстий могут быть использованы следующие газовых комбинаций CCl_2F_2 , $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{CCl}_4$, $\text{SiCl}_4/\text{Cl}_2$, $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$, Cl_2/Ar и Cl_2/BCl_3 .

Каждая газовая смесь имеет свои преимущества и недостатки. CCl_2F_2 привлекателен своей превосходной селективностью по отношению к металлу на лицевой стороне (Ti/Pt/Au, Cr) и отсутствием коррозии и токсичности, но скорость травления слишком низкая, и на протравленной поверхности, а также на стенках камеры происходит интенсивное образование полимеров, что приводит к плохой воспроизводимости процесса.

Для травления GaAs с использованием технологии ИСР использовалась газовая смесь Cl_2/BCl_3 для изготовления сквозных отверстий. Данная газовая смесь обладает рядом преимуществ, а именно, высокая скорость травления, высокая анизотропия и гладкая морфология поверхности GaAs [9], [10].

Основные результаты

На равномерность распределения скорости травления по площади пластины влияют два основных параметра: давление газовой смеси и мощность ИСР источника. Для подбора оптимальных параметров плазмохимического травления с точки зрения обеспечения максимальной скорости при сохранении равномерности процесса травления было проведено комплексное моделирование с диапазоном изменения давления $p = 5 - 50$ мТорр и диапазоном изменения мощности на ИСР источнике $P_{\text{ИСР}} = 100 - 1000$ Вт (см. рисунок 2).

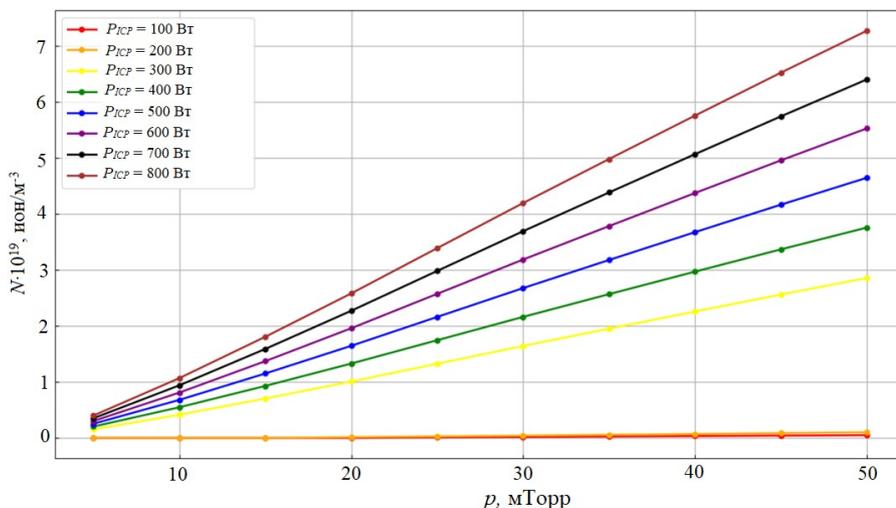


Рисунок 2 - Зависимость максимальной плотности ионов в плазме от давления газовой смеси при различной мощности ИСР источника

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.2>

Двумерная тепловая карта распределения максимальной плотности ионов в плазме представлена на рис. 3. Карта распределения разброса концентрации ионов от центра к краю пластины от давления и мощности ИСР источника представлена на рис. 4.

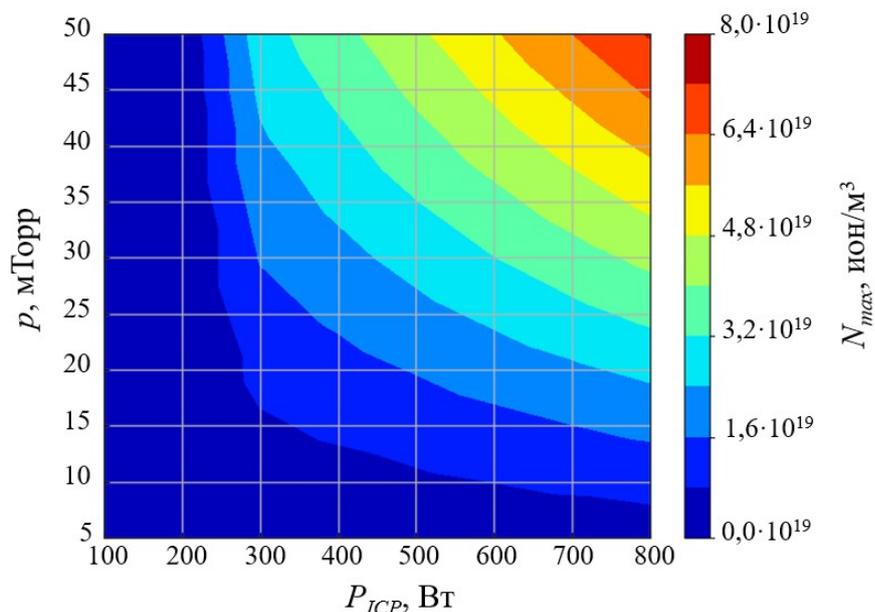


Рисунок 3 - Двумерная тепловая карта распределения максимальной плотности ионов в плазме от мощности и давления газовой смеси

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.3>

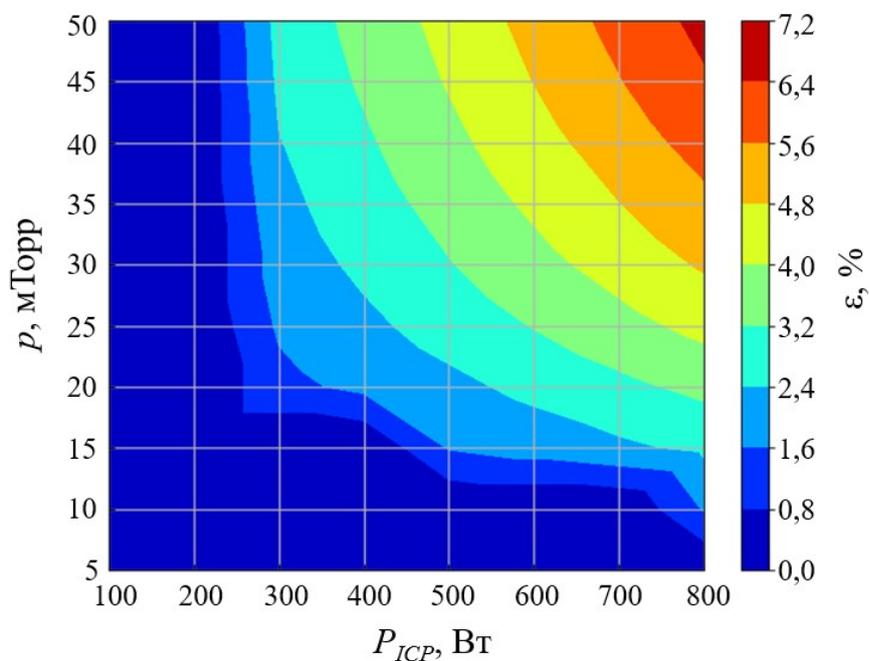


Рисунок 4 - Двумерная тепловая карта распределения разброса концентрации ионов от центра к краю пластины от давления и мощности ИСР источника

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.4>

Из полученных данных видно, что с увеличением мощности и давления газовой смеси увеличивается максимальная концентрация ионов в плазме. Распределение разброса концентрации ионов в плазме прямо пропорционально связано с распределением скорости травления по подложке, поэтому из рис. 4 максимальная мощность, которая может быть подана на ИСР источник составляет около $P_{ICP} = 600$ Вт для обеспечения разброса

скорости травления по подложке менее 5%. Давление газа при этом следует выбирать максимальным для сохранения высокой скорости травления, поэтому $p = 50$ мТорр.

Таким образом, из моделирования плазмохимического травления в масштабе реактора были найдены следующие оптимальные параметры процесса: $P_{ICP} = 600$ Вт; $p = 50$ мТорр.

Основные результаты экспериментов

В рамках экспериментальной части были взяты оптимальные параметры, полученные при моделировании процесса $P_{ICP} = 600$ Вт; $p = 50$ мТорр с частотой RF-смещения 13,56 МГц для определения рабочей мощности смещения на подложку. На рис. 5 представлены результирующие профили травления в слое GaAs при различной мощности RF-смещения.

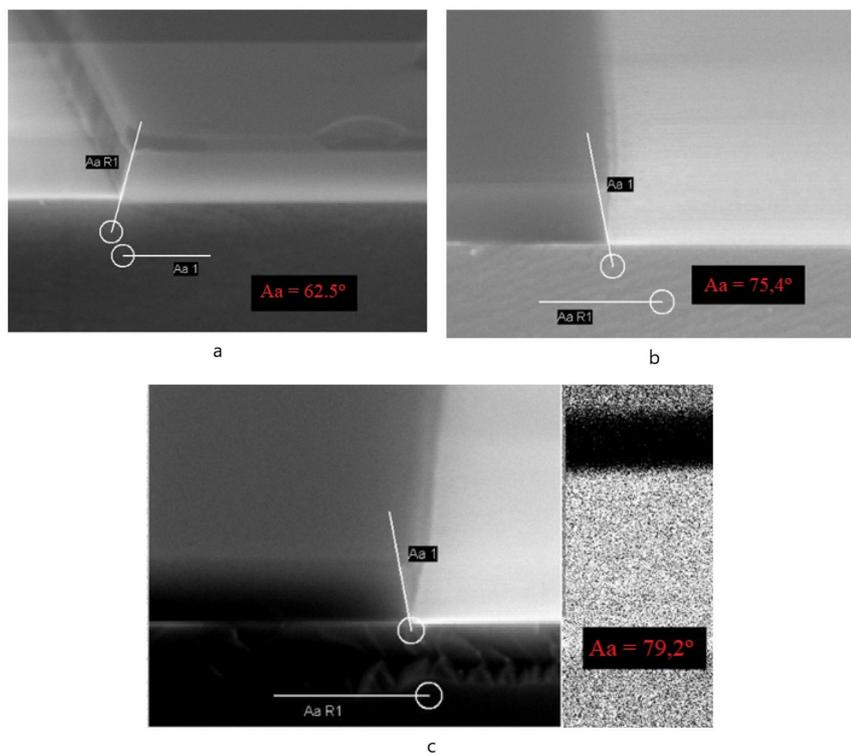


Рисунок 5 - Результирующие профили травления в слое GaAs при различной мощности RF-смещения:

a) $P_{RF} = 30$ Вт; b) $P_{RF} = 45$ Вт; c) $P_{RF} = 60$ Вт

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.5>

В таблице 1 представлены значения параметров полученных профилей от мощности RF-смещения.

Таблица 1 - Значения параметров полученных профилей от мощности RF-смещения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.6>

№	P_{RF} , Вт	α , град	$V_{тр}$, нм/мин	S
1	30	62,5	65,53	1,814
2	45	75,4	78,25	1,267
3	60	79,2	84,8	1,122

Из таблицы 1 видно, что с ростом подаваемой RF-мощности увеличивается угол наклона боковых стенок и скорость травления GaAs. При этом селективность травления GaAs к слою маски уменьшается. Исходя из технических требований к углу наклона боковых стенок в $\alpha = 60^\circ$, наиболее подходящим является режим №1. Таким образом, оптимальная мощность RF-смещения равна $P_{RF} = 30$ Вт.

На рис. 6 представлен профиль травления отверстий в подложке GaAs при оптимальных параметрах.

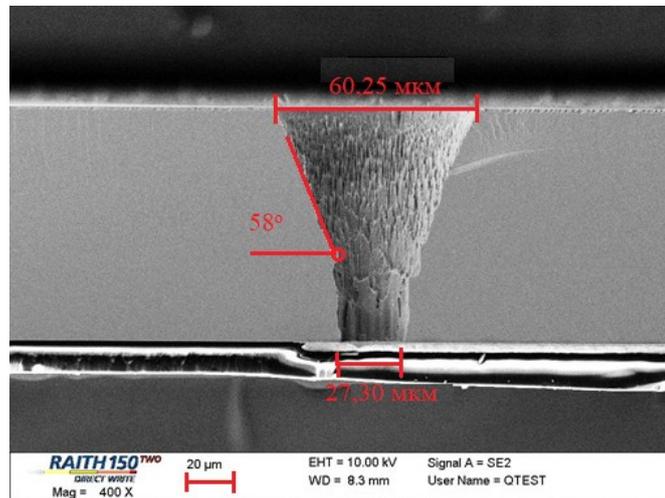


Рисунок 6 - Профиль травления отверстий в подложке GaAs при оптимальных параметрах процесса травления
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.7>

Из рис. 6 видно, что размер отверстия в верхней плоскости составляет $d_{max} = 60,25$ мкм, в нижней плоскости – $d_{min} = 27,30$ мкм, а угол наклона боковых стенок равен $\alpha = 58^\circ$. Таким образом, полученные результаты соответствуют требованиям технического задания.

Заключение

В ходе работы был разработан технологический процесс плазмохимического травления сквозных отверстий с углом наклона $\alpha = 60^\circ$ с нижним диаметром $d_{min} = 30$ мкм и верхним диаметром $d_{max} = 60$ мкм на глубину травления GaAs $h = 120$ мкм с использованием ИСР-источника.

Из результатов моделирования плазмохимического травления в масштабе реактора было получено, что с увеличением мощности и давления газовой смеси увеличивается максимальная концентрация ионов в плазме. Распределение разброса концентрации ионов в плазме прямо пропорционально связано с распределением скорости травления подложки. Максимальная мощность, которая может быть подана на ИСР источник, для обеспечения разброса скорости травления по подложке менее 5 % составляла около $P_{ИСР} = 600$ Вт. Давление газа при этом было выбрано максимальным $p = 50$ мТорр для сохранения высокой скорости травления.

На основе рассчитанных оптимальных параметров процесса плазмохимического травления было выполнено экспериментальное получение сквозных отверстий в GaAs. В результате размер отверстия в верхней плоскости составил $d_{max} = 60,25$ мкм, в нижней плоскости – $d_{min} = 27,30$ мкм, а угол наклона боковых стенок $\alpha = 58^\circ$. Таким образом, полученные результаты соответствуют требованиям технического задания.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.8>

Funding

This research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project FEWM 2024-0004.

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.31.8>

Список литературы / References

- Hutcheson G.D. Moore's law, lithography, and how optics drive the semiconductor industry / G.D. Hutcheson // Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IX. — SPIE, 2018. — Vol. 10583. — P. 1058303.
- Данилина Т.И. Современные технологии микро- и нанозлектроники : учебное пособие / Т.И. Данилина, И.А. Чистоедова. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2020. — С. 340.
- Свистова Т.В. Основы микроэлектроники / Т.В. Свистова. — Воронеж : ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». — 2017. — С. 147.
- Chen F.F. Lecture Notes on Principles of Plasma Processing / F.F. Chen, J.P. Chang. — Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.
- Chang C.Y. ULSI Technology / C.Y. Chang, S.M. Sze // McGraw-Hill International Editions. — Singapore, 1996.
- Economou D.J. Modeling and simulation of plasma etching reactors for microelectronics / D.J. Economou // Thin Solid Films. — 2000. — Vol. 365. — № 2. — P. 348–367.

7. Лукин В.А. Формирование сквозных металлизированных отверстий в арсенид-галлиевых СВЧ монолитных интегральных схемах / В.А. Лукин // Дни науки и инноваций НовГУ. — 2020. — С. 179–187.
8. Donnelly V.M. Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow / V.M. Donnelly, A. Kornblit // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. — 2013. — Vol. 31. — № 5. — P. 050825.
9. Rawal D.S. A Reproducible High Etch Rate ICP Process for Etching of Via-Hole Grounds in 200µm Thick GaAs MMICs / D.S. Rawal [et al.] // JSTS: Journal of Semiconductor Technology and Science. — 2008. — Vol. 8. — № 3. — P. 244–250.
10. Берлин Е.В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е.В. Берлин, Л.А. Сейдман. — М. : Техносфера, 2010. — С. 527.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Hutcheson G.D. Moore's law, lithography, and how optics drive the semiconductor industry / G.D. Hutcheson // Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IX. — SPIE, 2018. — Vol. 10583. — P. 1058303.
2. Danilina T.I. Sovremennye tehnologii mikro- i nanoelektroniki [Modern technologies of micro- and nanoelectronics] : a textbook / T.I. Danilina, I.A. Chistoedova. — Tomsk : Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2020. — P. 340. [in Russian]
3. Svistova T.V. Osnovy mikroelektroniki [Fundamentals of microelectronics] / T.V. Svistova. — Voronezh : Voronezh State Technical University. — 2017. — P. 147. [in Russian]
4. Chen F.F. Lecture Notes on Principles of Plasma Processing / F.F. Chen, J.P. Chang. — Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.
5. Chang C.Y. ULSI Technology / C.Y. Chang, S.M. Sze // McGraw-Hill International Editions. — Singapore, 1996.
6. Economou D.J. Modeling and simulation of plasma etching reactors for microelectronics / D.J. Economou // Thin Solid Films. — 2000. — Vol. 365. — № 2. — P. 348–367.
7. Lukin V.A. Formirovanie skvoznih metallizirovannyh otverstij v arsenid-gallievyh SVCh monolitnyh integral'nyh shemah [Formation of through metallized holes in gallium arsenide microwave monolithic integrated circuits] / V.A. Lukin // Dni nauki i innovacij NovGU [Days of Science and Innovation NovSU]. — 2020. — P. 179–187. [in Russian]
8. Donnelly V.M. Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow / V.M. Donnelly, A. Kornblit // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. — 2013. — Vol. 31. — № 5. — P. 050825.
9. Rawal D.S. A Reproducible High Etch Rate ICP Process for Etching of Via-Hole Grounds in 200µm Thick GaAs MMICs / D.S. Rawal [et al.] // JSTS: Journal of Semiconductor Technology and Science. — 2008. — Vol. 8. — № 3. — P. 244–250.
10. Berlin E.V. Ionno-plazmennye processy v tonkopenochnoj tehnologii [Ion-plasma processes in thin-film technology] / E.V. Berlin, L.A. Seidman. — М. : Technosphere, 2010. — P. 527. [in Russian]