

## *Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования*

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 533.924+621.382.2/3

doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-4-11

### ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ УДАЛЕНИЯ ПИРОГЕННОГО $SiO_2$ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Артем Александрович Адамов<sup>1</sup>, Алина Сергеевна Головки<sup>2</sup>,  
Алексей Алексеевич Малаханов<sup>3✉</sup>, Юлия Олеговна Васильева<sup>4</sup>,  
Алексей Викторович Павлов<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> adamsartem@gmail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5978-9797>

<sup>2</sup> alinagolovko@list.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7151-4942>

<sup>3</sup> malakhan@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2512-8206>

<sup>4</sup> yuvasileva23@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5236-4832>

<sup>5</sup> avp-24@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5406-6193>

**Аннотация.** Исследование посвящено выявлению факторов, влияющих на скорость удаления (травления) пленок пирогенного оксида кремния ( $SiO_2$ ). В качестве внешних факторов, влияющих на скорость удаления пирогенного  $SiO_2$ , выбраны основные настраиваемые параметры процессов установки реактивно-ионного плазмохимического травления. В ходе исследования изменялись: время травления, мощность, давление в камере, доля газа в газовой смеси, поток газов при сохранении давления в камере, температура внутрикамерного столика. Проанализированы результаты каждого эксперимента и выполнены необходимые расчеты. Приведены графики, наглядно поясняющие влияние на скорость того или иного внешнего фактора или его изменение. Опытным путем определен оптимальный набор параметров реактивно-ионного плазменного травления пленок пирогенного  $SiO_2$ , который можно использовать в процессе реверс-инжиниринга кристаллов полупроводниковых приборов и структур с такими оксидами. При этом удаление пирогенной окисной пленки не влияет на целостность исследуемых полупроводниковых кристаллов или структур.

**Ключевые слова:** травление, скорость удаления, пирогенный  $SiO_2$ , давление, мощность, газы, температура, установка реактивно-ионного плазмохимического травления

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы развития «Учебный дизайн-центр «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы» (соглашение от 05.03.2024 г. № 075-02-2024-1513) в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

**Для цитирования:** Адамов А.А., Головки А.С., Малаханов А.А., Васильева Ю.О., Павлов А.В. Исследование скорости удаления пирогенного  $SiO_2$  методом плазмохимического травления // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №4 (26). С. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-4-11.

Original article

Open Access Article

# INVESTIGATING THE REMOVAL RATE OF PYROGENIC $SiO_2$ BY PLASMA CHEMICAL ETCHING

Artem A. Adamov<sup>1</sup>, Alina S. Golovko<sup>2</sup>, Alexey A. Malakhanov<sup>3✉</sup>, Yulia O. Vasil'eva<sup>4</sup>, Alexey V. Pavlov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> adamsartem@gmail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5978-9797>

<sup>2</sup> alinagolovko@list.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7151-4942>

<sup>3</sup> malakhan@yandex.ru<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-2512-8206>

<sup>4</sup> yuvasileva23@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5236-4832>

<sup>5</sup> avp-24@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5406-6193>

**Abstract.** *The study is devoted to identifying factors affecting the removal rate (etching) of pyrogenic silicon oxide ( $SiO_2$ ) films. The authors select the main adjustable parameters of the reactive ion plasma-chemical etching setup as external factors affecting the removal rate of pyrogenic  $SiO_2$ . During the study, the authors change etching time, power, chamber pressure, gas proportion in the gas mixture, gas flow while maintaining the pressure in the chamber, and the temperature of the intra-chamber table. The paper analyzes the results of each experiment, makes the necessary calculations, provides with the graphs that clearly explain the effect of a particular external factor or its change on the rate. An optimal set of parameters for reactive ion plasma etching of pyrogenic  $SiO_2$  films is determined empirically, which one can use in the process of reverse engineering of semiconductor device crystals and structures with such oxides. In this case, removing the pyrogenic oxide film does not affect the integrity of the studied semiconductor crystals or structures.*

**Keywords:** etching, removal rate, pyrogenic  $SiO_2$ , pressure, power, gases, temperature, reactive ion plasma-chemical etching unit

**Funding:** The work is carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project “Training of Personnel and Scientific Foundation for the Electronic Industry” of the state program of the Russian Federation “Scientific and Technological Development of the Russian Federation” in implementing the Development Program “Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base” (agreement No. 075-02-2024-1513 of 2024 March 05) at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Bryansk State Technical University.

**For citation:** Adamov A.A., Golovko A.S., Malakhanov A.A., Vasil'eva Yu.O., Pavlov A.V. Investigating the Removal Rate of Pyrogenic  $SiO_2$  by Plasma Chemical Etching. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 4 (26). pp. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2024-4-4-11.

## Введение

Плазмохимическое травление – технология послойного удаления материала с поверхности исследуемого образца (полупроводниковой пластины или других объектов). Реактивно-ионное плазмохимическое травление основано на химическом взаимодействии материала подложки с ионами, которые поступают из плазмы (газового разряда).

Исследованию процессов травления окисных пленок и других материалов посвящено достаточно много работ как отечественных, так и зарубежных исследователей [1 – 10], включая патенты, в которых описываются конструктивные варианты установок для локального плазмохимического травления подложек, используемых в производстве БИС, СБИС [5]; травление окислов алюминия [6]; обработки длинномерных изделий [7]. В работах [8 – 10] анализируются влияние различных факторов на скорость процесса плазмохимического травления.

Травление, в том числе плазмохимическое, применяется в процессе производства и изготовления электронной компонентной базы (ЭКБ), а также в операциях реверс-инжиниринга ЭКБ. В данной работе исследование скорости удаления пирогенного окисла  $SiO_2$  проводилось на установке MD FA100E-RIE [11], предназначенной для травления диэлектриков: поликремния,  $SiO_2$  (оксида кремния),  $Si_3N_4$  (нитрида кремния), других материалов. Также эту установку можно использовать для извлечения кристалла интегральных микросхем (ИМС) из корпуса путем удаления излишков компаунда, покрывающего полупроводниковый кристалл, и для автоматизации выполнения задач по удалению диэлектрических пленок по настроенным режимам («рецептам») травления.

## Цель и задача

Целью работы является определение параметров установки ПХТ, изменение которых оказывает наибольшее влияние на скорость травления пирогенного окисла, а также подбор оптимальных режимов работы («рецептов») для травления пирогенного  $SiO_2$ .

Задача работы – получение экспериментальных зависимостей скорости травления от настраиваемых параметров установки, таких как: время травления; мощность плазмы; давление в камере, на которое влияет открытие заслонки; расход газов; состав газовой смеси; температура внутрикамерного столика.

Для решения задачи последовательно изменялся один параметр из возможных в пределах допустимых значений и отслеживался получившийся результат.

## Решение задачи и исследование

Проведение эксперимента потребовало подготовительных этапов: измерение исходной толщины пирогенного  $SiO_2$  на пластине и разделение ее на фрагменты.

Для разделения кремниевой пластины с пирогенным  $SiO_2$  на фрагменты применялся упрощенный метод скрайбирования [12], суть которого заключается в нанесении риска иглой из корунда (параллельно или перпендикулярно базовому срезу пластины) и последующем надавливании на пластину, вследствие чего она разламывается. Таким образом для проведения экспериментов в работе обеспечивается применение испытываемых образцов с идентичными исходными характеристиками.

Замеры толщины слоя окисла проводились с помощью интерферометра LEITZ MPV-SP Film Thickness Measuring System. Первоначальная толщина слоя окисла составляла 403 нм, а результатом травления является уменьшение этого параметра. Данные об изменении толщины окисла применялись в расчетах скорости травления.

В ходе эксперимента после запуска процесса травления регистрировались данные о давлении в камере. При значительных отклонениях давления от значений, рекомендованных производителем, производилась корректировка режима посредством изменения степени открытия заслонки.

В табл. 1 представлены данные о проведенных опытах: показатели заданных режимов травления и результаты замеров толщины окисла и давления в камере. Для решения задачи изменение параметров проводилось поэтапно и только по одному параметру относительно показателей стартового процесса в пределах допустимых значений для установки ПХТ. Тем самым сформированы группы экспериментов, соответствующие каждому параметру.

Параметры, изменяемые в ходе исследования:

- время выполнения процесса травления;
- мощность источника плазмы;
- степень открытия заслонки (перекрытие процессной камеры от источника плазмы);
- расход газов – соотношение доли активных газов (аргон, кислород, хладон) в объеме смеси для процесса травления;
- температура столика для образца.

В качестве стартового процесса заданы параметры в соответствии с рекомендациями производителя для установки ПХТ (эксперимент 1). Далее проведена оценка зависимости скорости травления от времени выполнения процесса: для эксперимента № 2 задан режим, аналогичный стартовому процессу, но с удвоенной длительностью. Толщина слоя уменьшилась на величину почти в два раза большую по сравнению с результатом первого эксперимента, т.е. при изменении времени травления скорость практически не изменяется. Это говорит о стабильности процесса и возможности его применения для травления диэлектрических слоев в ИМС.

## Данные экспериментов

*Experimental data*

№ эксперимента	Заданный режим травления						Результат		
	Время (с)	Мощность (Вт)	Открытие заслонки (%)	Расход газа (см <sup>3</sup> )			Температура столика (°C)	Давление в камере (Pa)	Толщина слоя SiO <sub>2</sub> после травления (нм)
				Ar	O <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub>			
1	120	150	25	25	0	150	20	8,1	286
2	240	150	25	25	0	150	20	8,1	174
3	120	100	25	25	0	150	20	8,1	325
4	120	200	25	25	0	150	20	8,1	251
5	120	250	25	25	0	150	20	8,1	222
6	120	150	15	25	0	150	20	14,1	249
7	120	150	20	25	0	150	20	12,1	262
8	120	150	30	25	0	150	20	5,1	302
9	120	150	26*	50	0	150	20	8,1	293
10	120	150	27*	75	0	150	20	8,1	297
11	120	150	29*	100	0	200	20	8,1	291
12	120	150	25	25	10	150	20	8,1	284
13	120	150	25	25	20	150	20	8,1	282
14	120	150	25	25	0	150	15	8,1	283
15	120	150	25	25	0	150	25	8,1	291
16	120	250	15	25	0	150	20	14,1	68
17	120	250	15	25	0	200	20	16,1	134
18	120	250	12	25	0	200	20	23,1	166
19	120	250	10	25	0	200	20	101,1	215
20	120	250	15	25	0	150	20	14,1	142
21	120	250	15	25	0	150	20	14,1	155
22	120	200	20	25	0	150	20	12,1	224
23	120	200	20	25	0	150	20	12,1	232
24	120	200	20	25	0	150	20	12,1	215

Скорость травления рассчитывалась из соотношения изменения толщины пленки оксида в течение процесса ко времени процесса:

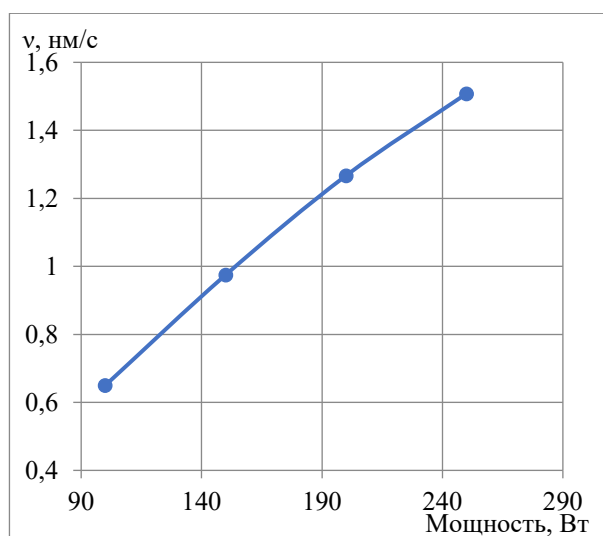
$$v = \frac{d_0 - d}{t}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость травления;  $d_0$  – исходная начальная толщина слоя оксида;  $d$  – толщина слоя оксида после травления;  $t$  – время выполнения процесса травления.

Расчет скорости травления в экспериментах 3 – 5 показывает, что при увеличении мощности источника скорость травления возрастает. График зависимости скорости травления от мощности источника представлен на рис. 1.

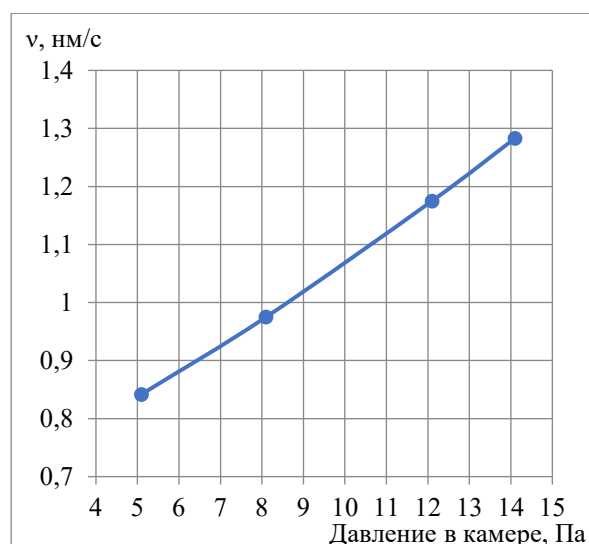
В ходе экспериментов 6 – 8 исследуемым параметром было давление в камере, которое зависело от того, насколько открыта заслонка для перекрытия процессной камеры от источника плазмы. Выявлено, что давление в камере в меньшей степени изменяет скорость травления, чем при увеличении мощности источника (рис. 2).

Следующим исследуемым параметром является расход газов. В экспериментах 9 – 13 менялось соотношение доли аргона и хладона [Ar:CF<sub>4</sub>] в смеси. При этом в процессах 12 и 13 было исследовано изменение скорости травления при добавлении кислорода в смесь Ar:CF<sub>4</sub>. Для чистоты эксперимента в данных опытах корректировалось значение степени открытия заслонки (установление значения давления в камере, соответствующего стартовому процессу).



**Рис. 1. Зависимость скорости травления от мощности**

*Fig. 1. Dependence of etching rate on power*

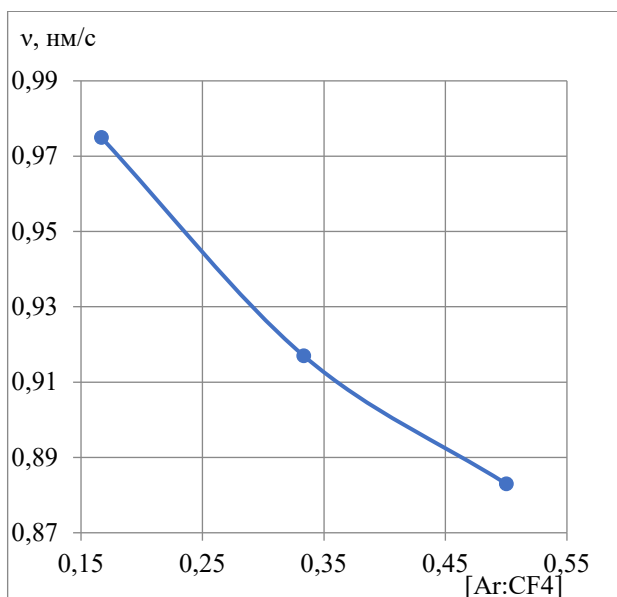


**Рис. 2. Зависимость скорости травления от давления в камере**

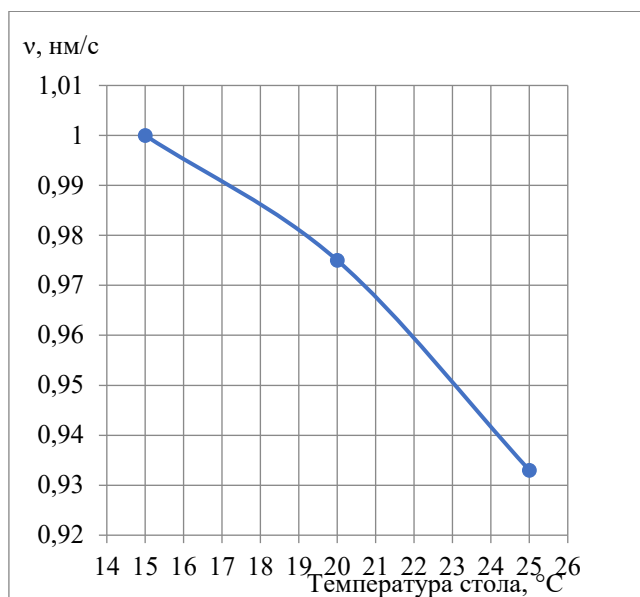
*Fig. 2. Dependence of the etching rate on the pressure in the chamber*

В результате опытов 9 – 13 выявлено, что уменьшение доли хладона относительно доли аргона в газовой смеси снижает скорость травления (рис. 3), при этом добавление кислорода в смесь  $Ar:CF_4$  оказывает иное влияние на скорость травления: по сравнению с результатом стартового процесса скорость травления возрастает, однако дальнейшее увеличение доли кислорода дает прирост скорости всего на 0,7 %.

Последним исследуемым параметром являлась температура столика для образцов. В экспериментах 14 и 15 температура столика для образцов изменялась в допустимых для установки ПХТ пределах. В результате данных опытов выявлено значительно меньшее влияние на скорость травления пирогенного окисла по сравнению с результатами предыдущих опытов (рис. 4): с изменением температуры столика в пределах допустимых значений изменение скорости травления измеряется сотыми долями нм/с, тогда как на графиках 1 – 3 заметно изменение скорости с шагом в дес ятых долях нм/с.



**Рис. 3. Зависимость скорости травления от соотношения доли аргона и хладона в смеси**  
*Fig. 3. Dependence of the etching rate on the ratio of the proportion of argon and freon in the mixture*



**Рис. 4. Зависимость скорости травления от температуры стола**  
*Fig. 4. Dependence of etching rate on table temperature*

На основе проведенных исследований выведен режим работы установки для получения наибольшей скорости травления пирогенного окисла (эксперименты № 16 и 17). Дополнительно в 18 и 19 экспериментах изменялась степень открытия заслонки.

Наибольшая скорость травления наблюдается в 16-м эксперименте. Исходя из результатов 1 – 15 процессов, предполагается, что эксперименты 17 – 19 должны обладать большей скоростью травления в сравнении с 16-м, однако наблюдается обратная тенденция. Результаты расчета скорости травления по формуле (1): в шестнадцатом процессе скорость равна 2,792 нм/с, в семнадцатом – 2,250 нм/с, в восемнадцатом эксперименте было найдено среднее значение скорости – 1,975 нм/с, в девятнадцатом – 1,475 нм/с.

Кроме того, в результате экспериментов 18 и 19 наблюдается неравномерность травления: на поверхности наблюдаются характерные цветовые переходы (рис. 5). Следовательно, применение режимов травления с характеристиками, заданными в экспериментах 18 и 19, недопустимо для процессов производства ЭКБ. Повторение шестнадцатого процесса в экспериментах 20 и 21 дает разброс значения скорости травления в среднем более 10 %, что говорит о его нестабильности. Это может быть связано либо с высокой мощностью, либо с сильным закрытием заслонки.

Для проведения экспериментов 22 – 24 задан режим с корректировкой мощности и закрытия заслонки.

Расчет скорости травления по формуле (1) показывает достаточно стабильный процесс (разброс скорости составляет не более 5 %), при этом достигается максимальная скорость травления пирогенного окисла в допустимых режимах работы установки без проявления разрушений кремниевой подложки.

В ходе работы проведено исследование влияния изменения параметров режима травления в установке ПХТ MD FA100E-RIE и определен оптимальный режим ее работы для травления пирогенного  $SiO_2$  с параметрами:

- время выполнения процесса травления 120 с;
- мощность источника плазмы 200 Вт;
- степень открытия заслонки 20 %;
- расход газов: аргон  $25 \text{ см}^3 \text{ Ar}$ , хладон  $150 \text{ см}^3$ ;
- температура столика для образца  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Заключение

Рассмотренные в работе эксперименты направлены на исследование скорости травления пирогенного  $SiO_2$ , а именно факторов, которые оказывают на нее влияние. Исследование позволило установить, что такие параметры, как время травления, поток газов при сохранении давления в камере, добавка кислорода в смесь  $Ar:CF_4$  и изменение температуры стола практически не оказывают влияния на скорость травления.

Уменьшение доли аргона в газовой смеси  $Ar:CF_4$  снижает скорость травления.

Выявлены факторы, позволяющие существенно увеличить скорость травления: мощность источника плазмы и давление в камере.

В ходе проведения экспериментов опытным путем были определены параметры процесса, который характеризуется наибольшей скоростью травления пирогенного  $SiO_2$  и не оказывает разрушающего влияния на кремниевую подложку. Такой режим работы установки MD FA100E-RIE можно использовать при вскрытии кристаллов, у которых роль защиты играет пирогенный  $SiO_2$ .

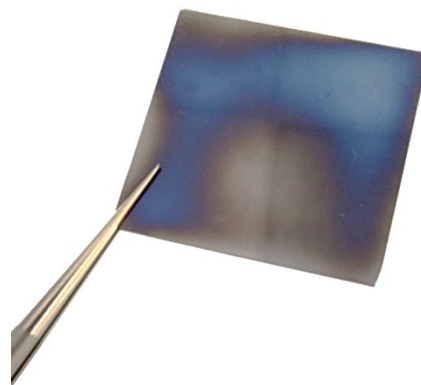


Рис. 5. Результат эксперимента №19  
*Fig. 5. Result of experiment №19*

## Список источников:

1. Зима В.Н., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.А. Плазмохимическое травление пленок диоксида кремния // Техника радиосвязи. – 2019. – № 3(42). – С. 99-106.
2. Исследование процесса плазмохимического травления пленок  $SiO_2$  / Т.А. Исмаилов, П.Р. Захарова, Б.А. Шангереева, А.Р. Шахмаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2014. – № 4(35). – С. 56-62.
3. Симонов О. Использование микроволновой плазмы для удаления фоторезиста при групповой обработке полупроводниковых пластин // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2017. – № 2(162). – С. 180-184.
4. Золотухин Д.Б., Тюнков А.В., Юшков Ю.Г. О возможности ионного травления, инициированного электронным пучком // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 13-й Международной конференции, Минск, 30 сентября – 03 2019 года / Редколлегия: В.В. Углов [и др.]. – Минск: Белорусский государственный университет, 2019. – С. 533-535.
5. Патент №2451114 Российская Федерация, МПК C23F 1/08 (2006.01) Устройство для локального плазмохимического травления подложек: № 2010127723: заявл. 05.07.2010: опубл. 20.05.2012 / Абрамов В.А., Аксенова Л.А., Климов А.В., Рубинштейн В.М., Сергиенко А.И., Цукерман А.А., Черных В.К.; заявитель Научно-исследовательский институт полупроводникового машиностроения. – 12 с.
6. Патент №17626 Российская Федерация, МПК H01J 37/32 (2006.01) Установка локального ионного травления диэлектрических поверхностей: № 2016142843: заявл. 31.10.2016: опубл. 03.0.2017 / Бурдовитин В.А., Окс Е.М., Тюнков А.В., Баджамапов З.А.; заявитель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – 9 с.
7. Патент №76918 Российская Федерация, МПК C23C 14/00 (2006.01) Вакуумная ионно-плазменная установка: № 2008117861: заявл. 04.05.2008: опубл. 10.10.2008 / Смыслов А.М., Смылова М.К., Дыбленко Ю.М., Мингажев А.Д., Годовская Г.В., Исанбердин А.Н., Дыбленко М.Ю.; заявитель Научно-производственное предприятие «Уралавиаспестехнология». – 28 с.
8. Волков А.В., Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Расчет скорости плазмохимического травления кварца // Компьютерная оптика. – 2001. – № 21. – С. 121-125.
9. Костин И.Ю. Зависимость скорости травления плазмохимического нитрида кремния от параметров осаждения диэлектрических пленок // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 3-2. – С. 120-123.
10. Шаныгин В.Я., Яфаров Р.К. Влияние энергии ионов на скорость и качество СВЧ плазмохимического травления пластин кремния // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7, № 3. – С. 218-220.
11. Реактивное ионное травление URL: <http://www.sanhelion.xyz/products/17810804.html> (дата обращения: 20.09.2024 г.)

## References:

1. Zima V.N., Kuznetsov A.N., Kuznetsova S.A. Plasma-Chemical Etching of Silicon Dioxide Films. Radio Communication Technology. 2019;3(42): 99-106.
2. Ismailov T.A., Zakharova P.R., Shangereeva B.A., Shakhmaeva A.R. Research Process Plasma Etching  $SiO_2$  Membrane. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2014;4(35):56-62.
3. Simonov O. The Use of Microwave Plasma to Remove Photoresist During Group Processing of Semiconductor Wafers. Electronics: Science, Technology, Business. 2017;2(162):180-184.
4. Zolotukhin D.B., Tyunkov A.V., Yushkov Yu.G. On the Possibility of Ion Etching Initiated by an Electron Beam. In: Uglov V.V., et al, editors. Proceedings of the 13th International Conference on Interaction of Radiation With a Solid Body; 2019 Sep 30 – Oct 03; Minsk: Belarusian State University: 2019. p. 533-535.
5. Abramov V.A., Aksenova L.A., Klimov A.V., Rubinstein V.M., Sergienko A.I., et al. Device for Local Plasma-Chemical Etching of Substrates. Patent RF, no. 2451114. Research Institute of Semiconductor Engineering; 2012.
6. Burdovitsin V.A., Oks E.M., Tyunkov A.V., Bajamapov Z.A. Installation for Local Ion Etching of Dielectric Surfaces. Patent RF, no. 17626. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; 2017.
7. Smyslov A.M., Smyslova M.K., Dyblenko Yu.M., Mingazhev A.D., Godovskaya G.V., et al. Vacuum Ion-Plasma Installation. Patent RF, no. 76918. Research and Production Enterprise Uralaviaspetstekhnologiya; 2008.
8. Volkov A.V., Kazansky N.L., Kolpakov V.A. Calculation of the Rate of Plasma-Chemical Etching of Quartz. Computer Optics. 2001;21:121-125.
9. Kostin I.Yu. Dependence of the Etching Rate of Plasma-Chemical Silicon Nitride on the Parameters of the Dielectric Film Deposition. Modern Trends in the Development of Science and Technology. 2016; 3-2:120-123.
10. Shanygin V.Ya., Yafarov R.K. Influence of Ion Energy on the Speed and Quality of Microwave Plasma-Chemical Etching of Silicon Wafers. Nonlinear World. 2009;7(3):218-220.
11. Reactive Ion Etching [Internet] [cited 2024 Sep 20]. Available from: <http://www.sanhelion.xyz/products/17810804.html>

12. Гурова Ю.В. Разделение кристаллических пластин методом скрайбирования // International scientific review of the technical sciences, mathematics and Computer science : Collection of scientific articles. XI international correspondence scientific specialized conference, Boston, 10–11 июня 2019 года / Editor: Emma Morgan. – Boston: Problems of science, 2019. – С. 20-33.

12. Gurova Yu.V. Separation of Crystalline Plates by Scribing. In: Morgan E, editor. Proceedings of the 21st International Correspondence Scientific Specialized Conference on International Scientific Review of the Technical Sciences, Mathematics and Computer Science; 2019 Jun 10-11; Boston: Problems of Science: 2019. p. 20-33.

### **Информация об авторах:**

#### **Адамов Артем Александрович**

инженер учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс инжиниринг электронной компонентной базы», студент-магистрант Брянского государственного технического университета

#### **Головко Алина Сергеевна**

стажер учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс инжиниринг электронной компонентной базы», студент Брянского государственного технического университета

#### **Малаханов Алексей Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент, руководитель учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы», заведующий кафедрой «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета

#### **Васильева Юлия Олеговна**

ведущий инженер учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс инжиниринг электронной компонентной базы»

#### **Павлов Алексей Викторович**

инженер 2 категории сектора экспериментальных и теоретических исследований научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии»

### **Information about the authors:**

#### **Adamov Artem Aleksandrovich**

Engineer of the Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base, Master's student of Bryansk State Technical University

#### **Golovko Alina Sergeevna**

Intern of the Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base, student of Bryansk State Technical University

#### **Malakhanov Alexey Alekseevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base, Head of the Department of Electronic, Radio-Electronic and Electrical Systems of Bryansk State Technical University

#### **Vasil'eva Yuliya Olegovna**

Leading engineer of the Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base

#### **Pavlov Alexey Viktorovich**

Engineer of the 2nd category of the Experimental and Theoretical Studies Sector of the Research and Educational Design Centre Power Electronics and Integrated Technologies

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 09.08.2024; одобрена после рецензирования 25.09.2024; принята к публикации 03.10.2024.**

**The article was submitted 09.08.2024; approved after reviewing 25.09.2024; accepted for publication 03.10.2024.**

**Рецензент – Хандожко В.А. кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет**

**Reviewer – Khandozhko V.A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.**