

## Феноменологическое моделирование и экспериментальная оценка скорости плазменного травления кремния в комбинированном разряде

М.С. ЛУШАКОВА<sup>1</sup>, С.И. МАДВЕЙКО<sup>1</sup>, А.Н. КУПО<sup>2</sup>

Представлена феноменологическая модель плазменного травления монокристаллического кремния в плазме  $\text{CF}_4$  при остаточном давлении  $p = 20\text{--}100$  Па с применением комбинированного разряда при частотах: НЧ-генератора –  $33 \pm 1$  кГц и СВЧ-генератора –  $2,45 \pm 0,01$  ГГц. Проведена аппроксимация экспериментальных данных с использованием метода наименьших квадратов, в результате которой получены теоретические зависимости скорости травления от давления в рабочей камере и мощностей СВЧ и НЧ генераторов.

**Ключевые слова:** плазменное травление, монокристаллический кремний, феноменологическая модель, комбинированный разряд.

The paper presents a phenomenological model of plasma etching of monocrystalline silicon in  $\text{CF}_4$  plasma at residual pressure of  $p = 20\text{--}70$  Pa using a combined discharge at frequencies of  $33 \pm 1$  kHz for LF generator and  $2,45 \pm 0,01$  GHz for microwave generator. The approximation of experimental data using the least squares method was carried out, resulting in theoretical dependencies of the etching rate on pressure in the working chamber and the power of the microwave and low-frequency generators.

**Keywords:** plasma etching, monocrystalline silicon, phenomenological model, combined discharge.

**Введение.** В современной технологии производства приборов микро- и нанoeлектроники широкое применение находят методы, основанные на использовании направленных потоков заряженных частиц, энергия которых достаточна для реализации неравновесных физико-химических процессов на поверхности подложки. В частности, для реализации вакуумно-плазменных методов обработки и модификации материалов и структур, а также при создании тонкопленочных структур на подложке [1]–[4].

В настоящее время в производстве изделий электроники широко используется ионно-химическое травление. Для реализации высоких скоростей травления и контролируемых селективности и анизотропии используется принцип периодического изменения концентрации химически активных частиц (ХАЧ) с одновременным изменением энергии ионов плазмы [5].

Равномерность травления по всей площади обрабатываемого материала определяется однородностью диффузии реагирующих активных частиц и потоком ионов к поверхности пластины. На данный момент применяется эмпирический подход в определении оптимальных параметров, таких как мощность, давление, поток газа, для достижения достаточного уровня равномерности для определенных конструкций установок. Одним из вариантов организации направленного высококонцентрированного потока активных частиц к поверхности обрабатываемого материала является использование разрядных устройств, сочетающих в едином рабочем объеме различные способы возбуждения и поддержания плазмы, такие как низкочастотный (НЧ) или высокочастотный (ВЧ) электродные разряды для создания направленного потока частиц и сверхвысокочастотный (СВЧ) безэлектродный разряд, позволяющий существенно увеличить концентрацию травящих частиц.

Целью работы является разработка феноменологической модели, устанавливающей связь между параметрами формирования комбинированного разряда (сверхвысокочастотного и низкочастотного) и скоростью плазменного травления монокристаллического кремния, а также сопоставление полученных модельных оценок с экспериментальными данными.

**Конструкция комбинированного разрядного устройства и методика эксперимента.**

Конструкция комбинированного (СВЧ+НЧ) разрядного устройства представляет собой замкнутый в кольцо СВЧ волновод, являющийся цилиндрическим резонатором, с расположенной на его оси реакционной разрядной камерой с двумя плоскопараллельными электродами (потенциальным и заземленным), подключенными к НЧ генератору (рисунок 1) [6]–[8].

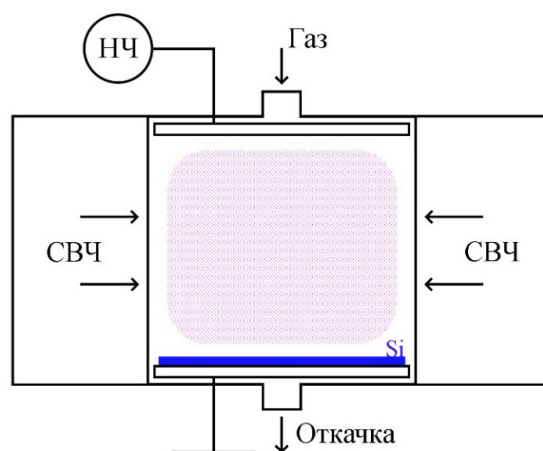


Рисунок 1 – Схема комбинированного разрядного устройства

Ввод электромагнитной энергии СВЧ диапазона в вакуумируемую рабочую область осуществляется посредством щелевых излучателей на внутренней стенке кольцевого волновода. Реакционно-разрядная камера представляет собой цилиндрическую трубу из прозрачного для СВЧ волн кварцевого стекла. В нижнем торце камеры расположен заземлённый держатель обрабатываемой Si подложки. При одновременном взаимодействии СВЧ и НЧ полей с газом пониженного давления в реакционно-разрядной камере формируется плазма самостоятельного комбинированного разряда, под действием которого в объёме камеры осуществляются процессы плазменной обработки, в частности травление монокристаллического кремния. Высота рабочей камеры при проведении экспериментов составляла 90 мм.

Действующее значение мощности СВЧ генератора  $W$  в составе комбинированной разрядной системы определялось согласно калибровочной схеме (рисунок 2). Подробно методика эксперимента описана в [9]. Исходя из полученных результатов установлено, что доля эффективного значения мощности СВЧ генератора относительно выходной мощности источника питания СВЧ генератора составляет ~25 %.

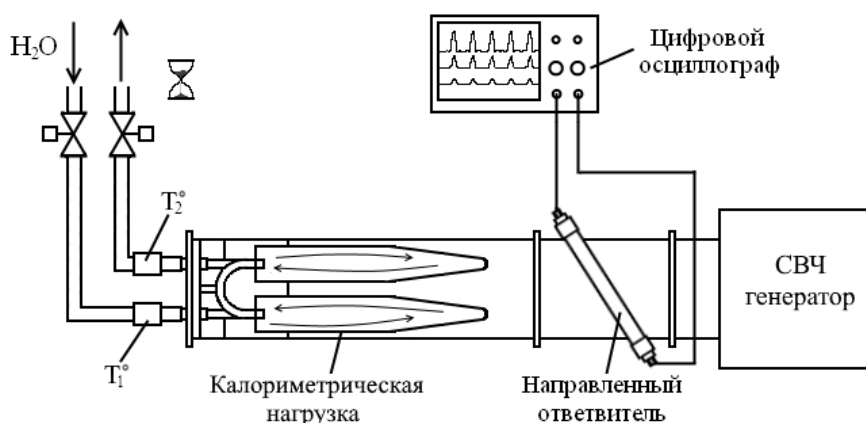


Рисунок 2 – Калибровочная схема для определения действующего значения мощности СВЧ генератора

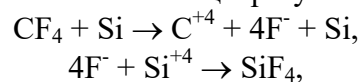
Эффективное значение вкладываемой мощности НЧ генератора в составе комбинированной разрядной системы определялось исходя из его выходной мощности с учетом потерь при генерации плазмы на нагрев, излучение и поддержание плазмы, и составляла ~15 % от выходной мощности.

В процессе обработки использовались пластины кремния с нанесенным на их поверхности рисунком металлизации. Скорость травления кремния оценивалась по глубине полученных канавок в незащищенных металлизацией местах, которая измерялась интерферометрическим методом. Измерение глубины канавки травления после обработки выполнялось в пяти независимых «точках» подложки не менее десяти раз. Результаты обрабатывались в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 при обработке результатов прямых измерений.

Экспериментальные результаты травления кремния с окнами металлизации получены при обработке в газовой плазме  $\text{CF}_4$ . Были использованы пластины с кристаллографической ориентацией 111. Рабочая частота НЧ генератора составляла  $33 \pm 1$  кГц, частота СВЧ генератора –  $2,45 \pm 0,01$  ГГц.

**Моделирование и анализ результатов.** Одним из важнейших параметров технологического процесса травления материалов является эффективное значение мощности, вкладываемой в разряд. Данный параметр оказывает воздействие на количество активных частиц в плазме, изменяя тем самым плотность плазмы, и на энергию активных частиц, что влияет на скорость и селективность травления. Изменяя мощность, можно контролировать и управлять кинетикой процесса травления, достигая оптимальных скоростей, при этом сохраняя селективность.

В соответствии с механизмом плазменного травления, будем полагать, что средняя кинетическая энергия  $\langle E_k \rangle$  химически-активных частиц в результате диссоциации  $\text{CF}_4$ :



пропорциональна суммарной мощности генераторов с учётом энергозатрат каждого из них, задаваемого с помощью коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\langle E_k \rangle = (\alpha \cdot W_{\text{НЧ}} + \beta \cdot W_{\text{СВЧ}}) \cdot \tau = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{n}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – безразмерные коэффициенты пропорциональности, определяемые эмпирически;  $n$  – концентрация ХАЧ,  $1/\text{см}^3$ ;  $\tau$  – время работы генератора, с.

Кроме того, средняя длина свободного пробега ионов (с учётом, что концентрации анионов и катионов отличаются в четыре раза) может быть определена по формуле [10]:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot n}, \quad (2)$$

где  $d$  – эффективный диаметр сферы взаимодействия ХАЧ («диаметр молекулы»), нм.

При расчёте эффективного диаметра взаимодействия  $d$  учитываются только основные химически активные частицы – атомарный фтор (F) и углерод (C). Молекулы исходного газа  $\text{CF}_4$  и продукты реакции  $\text{SiF}_4$  не включены в модель, поскольку их концентрация в зоне активного травления значительно ниже концентрации активных частиц, а их учёт изменяет значение  $d$  не более чем на 10 %, что находится в пределах погрешности экспериментальных данных. Таким образом, в рамках феноменологической модели предложенное упрощение является допустимым.

Поскольку для углерода (C) параметр  $d_1 = 0,70$  нм, а для фтора (F) –  $d_2 = 0,73$  нм, то будем полагать, что [11]:  $d = 0,2 \cdot d_1 + 0,8 \cdot d_2$

Выражение (2) с учётом (1) можно записать:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\sqrt{2} \cdot (\alpha \cdot W_{\text{НЧ}} + \beta \cdot W_{\text{СВЧ}}) \cdot \tau}{3 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot P}, \quad (3)$$

Скорость травления Si в среде  $\text{CF}_4$  определяется двумя противодействующими процессами. С одной стороны, она растёт по мере увеличения средней кинетической энергии активных частиц, которая пропорциональна суммарной мощности газоразрядной плазмы с учётом эмпирических коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ . С другой стороны, скорость травления зависит от давления в разрядной камере: при низких давлениях скорость ограничена малой концентрацией химически активных частиц, а при высоких давлениях возрастает вероятность столкновений ионов, так как уменьшается длина их свободного пробега, что также снижает скорость травления. Таким образом, зависимость скорости от давления имеет максимум, что подтверждается экспериментальными данными.

Средняя длина свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  служит в модели ключевым параметром, связывающим давление и мощность со скоростью травления. Как было указано выше, уменьшение  $\langle \lambda \rangle$  при росте давления увеличивает частоту столкновений, что снижает поток активных частиц на подложку. Именно эта вероятность, зависящая от  $\langle \lambda \rangle$  через распределение (4), определяет кинетику травления в предлагаемой феноменологической модели.

$$f(\lambda) = \frac{dn}{n} = \frac{4}{\sqrt{\pi} \cdot \langle \lambda \rangle^3} \cdot \lambda^2 \exp\left(-\left(\frac{\lambda}{\langle \lambda \rangle}\right)^2\right) d\lambda, \quad (4)$$

Как известно, функция распределения  $f(\lambda)$  представляет собой относительную долю частиц, обладающих длиной свободного пробега в интервале от  $\lambda - d\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ . Скорость травления пропорциональна вероятности формирования новых анион-катионных пар в результате столкновения нейтральных атомов. Эту вероятность можно определить как значение интеграла функции (4) вблизи длины волны 0,0612 м, что соответствует половине длины стоячей волны в резонаторе при указанной ранее частоте СВЧ колебаний.

Для оценки скорости травления необходимо знать долю частиц, способных преодолеть расстояние, равное половине длины стоячей волны в резонаторе (0,0612 м), без столкновения. Вероятность такого события  $P(\lambda \geq 0,0612)$  определяется интегрированием функции распределения (4) в малой окрестности указанного значения. На рисунке 3 представлена зависимость этой вероятности от давления в рабочей камере.

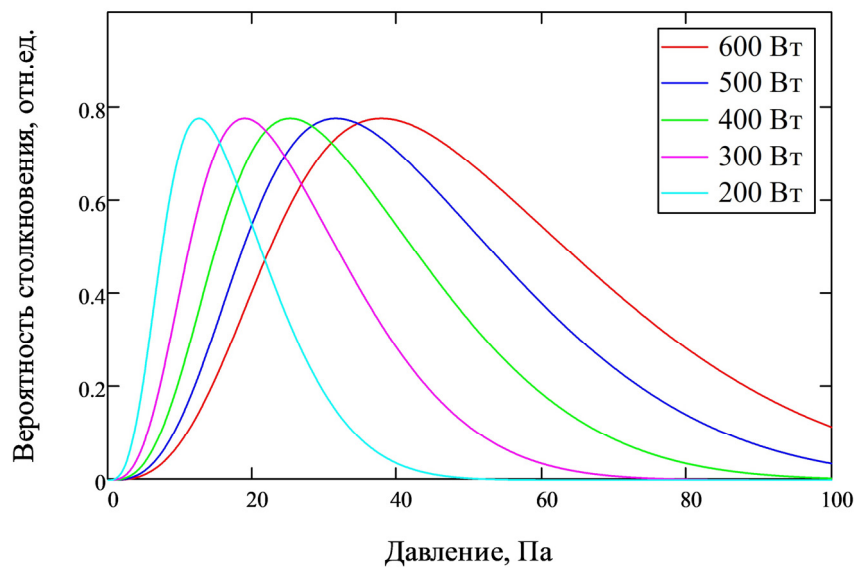


Рисунок 3 – Зависимость вероятности столкновения  $P(\lambda \geq 0,0612)$ , определяющей частоту образования ХАЧ, от давления в рабочей камере при различных значениях эффективной суммарной мощности плазмы

На рисунке 4 изображена зависимость вероятности столкновения от эффективной мощности генераторов при различных давлениях в рабочей камере. Обе теоретические зависимости в общих аспектах согласуются с известными экспериментальными данными [6]–[8], но для оценки фактических значений скорости травления требуется расчёт дополнительных эмпирических коэффициентов (формула (1)), связанных с различным энерговыделением СВЧ и НЧ генераторов.

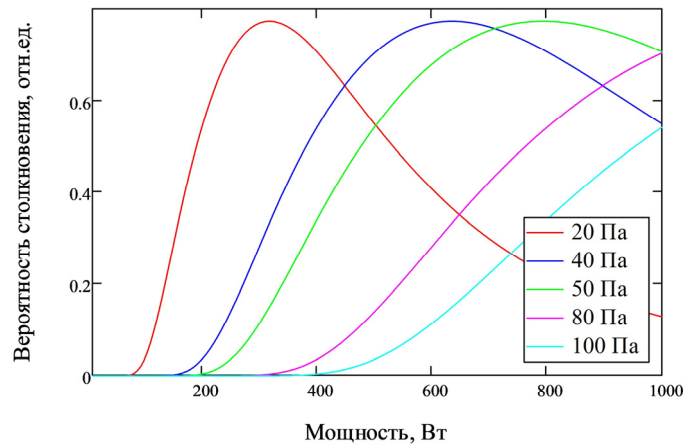


Рисунок 4 – Зависимость вероятности столкновения  $P(\lambda \geq 0,0612)$ , определяющей частоту образования ХАЧ, от эффективной суммарной мощности генераторов при различных давлениях в рабочей камере

Поиск эмпирических коэффициентов базировался на результатах экспериментальных исследований травления кремниевых пластин в реакционно-разрядной камере при различных давлениях в плазме комбинированного разряда. Также экспериментально оценивалось влияние изменения мощности плазмы комбинированного разряда. Оба цикла экспериментов проводились в течение 30 секунд.

Величины скорости травления кремниевых пластин для различных давлений в реакционно-разрядной камере в плазме комбинированного разряда сведены в таблицу 1. В исследованном диапазоне давлений от 20 до 100 Па скорости травления кремния варьировались от 0,5 нм/с до 34 нм/с. При этом оптимальным давлением для проведения процесса травления со скоростью травления кремния 30–32 нм/с является диапазон 50–70 Па.

Таблица 1 – Значения скорости травления  $v (\pm 5 \%)$  Si в зависимости от давления в реакционно-разрядной камере в плазме комбинированного разряда ( $W_{СВЧ} = 378$  Вт,  $W_{НЧ} = 85$  Вт,  $\tau = 30$  с).

$p$ , Па	20	30	40	45	50	60	70	80	90	100
$v$ , нм/с	0,5	8,5	15,8	23,0	28,6	34,1	31,7	26,0	22,9	21,3

Кроме того, экспериментально получены величины скорости травления кристаллического кремния в тетрахлорметане в зависимости от мощностей СВЧ и НЧ генераторов (таблица 2). Мощностные характеристики СВЧ и НЧ составляющих комбинированного разряда варьировались в следующих пределах: мощность НЧ генератора – 40–85 Вт, мощность СВЧ генератора 194–385 Вт.

Таблица 2 – Значения скорости травления  $v (\pm 5 \%)$  Si в зависимости от мощности плазмы в реакционно-разрядной камере комбинированного разряда ( $p = 60$  Па,  $\tau = 30$  с, расход газа 6 л/ч).

Мощность НЧ-генератора ( $W_{НЧ}$ ) 40 Вт					
$W_{СВЧ}$ , Вт	194	233	270	331	385
$v$ , нм/с	7,7	14,9	10,3	21,7	19,8
Мощность НЧ-генератора ( $W_{НЧ}$ ) 65 Вт					
$W_{СВЧ}$ , Вт	194	233	270	331	385
$v$ , нм/с	13,3	17,4	25,3	31,4	30,0
Мощность НЧ-генератора ( $W_{НЧ}$ ) 85 Вт					
$W_{СВЧ}$ , Вт	194	233	270	331	385
$v$ , нм/с	26,1	32,9	34,0	35,7	31,3

Данные, представленные в таблицах 1 и 2, можно сопоставить с вероятностью столкновения путём расчёта эмпирических коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , и нормировочного множителя  $\gamma$ , позволяющего соотнести в виде прямо пропорциональной зависимости вероятность образования ионных пар и скорость травления. Для этого используем классический метод наименьших квадратов [10].

$$\sum_i \left( v_i - \gamma \cdot \int_{\lambda-d\lambda}^{\lambda+d\lambda} f(\alpha, \beta, W_{НЧ}, W_{СВЧ}, P, \lambda) d\lambda \right)^2 \rightarrow \min,$$

где  $\gamma$  – эмпирический коэффициент пропорциональности между скоростью травления и вероятностью образования новых катион-анионных пар в плазме комбинированного разряда.

В предлагаемой феноменологической модели скорость травления монокристаллического кремния  $v$  полагается пропорциональной вероятности столкновения, определяющей частоту образования ХАЧ. Эта вероятность рассчитывается как интеграл от функции распределения (4) в интервале длин свободного пробега, вблизи половины длины стоячей волны в резонаторе (0,0612 м). Размерный коэффициент пропорциональности  $\gamma$  (м/с) связывает безразмерную вероятность с линейной скоростью удаления материала.

На рисунках 5 и 6 представлены результаты аппроксимации, которые соответствуют значениям  $\alpha = 1,316 \cdot 10^{-21}$  отн.ед.,  $\beta = 6,496 \cdot 10^{-21}$  отн.ед. и  $\gamma = 80,245$  м/с при значении  $d\lambda = 0,013$  м. Экспериментальные значения скорости травления, для удобства представлены в нм/с, что не влияет на форму зависимостей и их сопоставление с моделью.

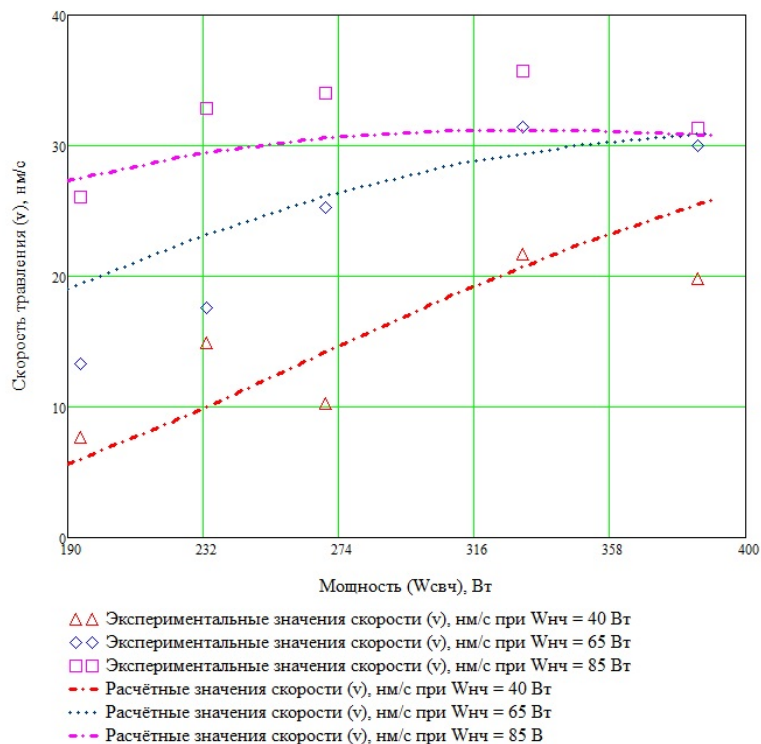


Рисунок 5 – Аппроксимации экспериментальной зависимости скорости травления кремния от мощностей СВЧ и НЧ генераторов

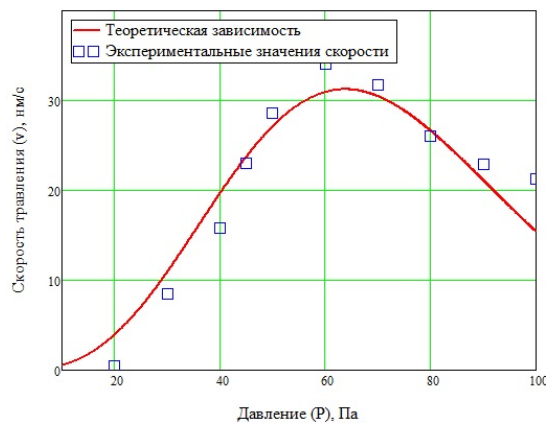


Рисунок 6 – Аппроксимации экспериментальной зависимости скорости травления кремния от давления в реакционной камере

Полученные теоретические зависимости соответствуют экспериментальным данным в пределах погрешности, не превышающей 13 %. Такое незначительное расхождение можно объяснить особенностями проведения экспериментальных исследований: изменение размеров резонирующего объёма, различным эффективным расходом газовой смеси, т. е. концентрацией частиц, а также неизбежными погрешностями прямых измерений.

**Заключение.** Представленная феноменологическая модель позволяет оценить влияние основных параметров процесса плазменного травления кристаллического кремния в тетрахлорметане, таких как давление в рабочей камере (20–100 Па), мощности НЧ и СВЧ составляющих плазмы комбинированного разряда в камере, и режимов её генерации на скорость указанного процесса. Результаты работы могут быть востребованы в ряде технологий современной микроэлектроники.

## Литература

1. Емельянов, В. В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов // Весці НАН Беларусі. Сер.: Фіз.-тэхн. навукі. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 170–176
2. Технологические процессы осаждения и травления в технологии изготовления ИМС и МЭМС : учеб.-метод. пособ. / Д. А. Котов, Ю. А. Родионов, А. А. Ясюнас [и др.]. – Минск : БГУИР, 2020. – 68 с.
3. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях : учеб. пособ. / В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Молчанов ; под ред. С. П. Тимошенко. – М., 2010. – 283 с.
4. Кудря, В. П. Применение технологии пучков быстрых нейтральных частиц в микро- и микроэлектронике / В. П. Кудря, Ю. П. Майшев // Микроэлектроника – 2018. – Т. 47, № 5. – С. 51–63.
5. Технологии субмикронных структур микроэлектроники / А. П. Достанко, С. В. Бордусов, Д. А. Голосов [и др.] ; под ред. А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2018. – 270 с.
6. Лушакова, М. С. Исследование влияния конструктивных характеристик плазменной камеры на режимы возбуждения СВЧ разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // Приборостроение-2022 : матер. 15-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 16–18 ноября 2022 г. / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 287–289.
7. Тихон, О. И. Исследование влияния электрических параметров импульсного источника питания СВЧ магнетрона на режимы генерации плазмы СВЧ разряда / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 42–47.
8. Лушакова, М. С. Исследование влияния режимов работы СВЧ и НЧ генераторов на возбуждение плазмы комбинированного разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики [Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14 ноября 2024 г. / ПГУ. – Новополоцк, 2025. – С. 169–173.
9. Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн / И. Ф. Бурак, А. В. Гусинский, Г. А. Шаров [и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2018. – 328 с.
10. Шершнева, Е. Б. Основы молекулярно-кинетической теории : практич. пособ. / Е. Б. Шершнева, А. Н. Купо, С. А. Лукашевич ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2022. – 31 с.
11. Емельянов, В. А. Методы обработки результатов измерений в лаборатории физпрактикума : учеб. пособ. / В. А. Емельянов, Д. Г. Лин, В. Ф. Шолох. – Минск : Бестпринт, 1997. – 90 с.

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

<sup>2</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 13.04.2026