

### Изменение шероховатости поверхности кремния после травления для различной высоты камеры

Высота камеры	Среднеквадратичная шероховатость $R_q$	Средняя шероховатость $R_a$
97 мм	7,091 нм	5,739 нм
79 мм	7,859 нм	5,934 нм
52 мм	11,18 нм	8,62 нм

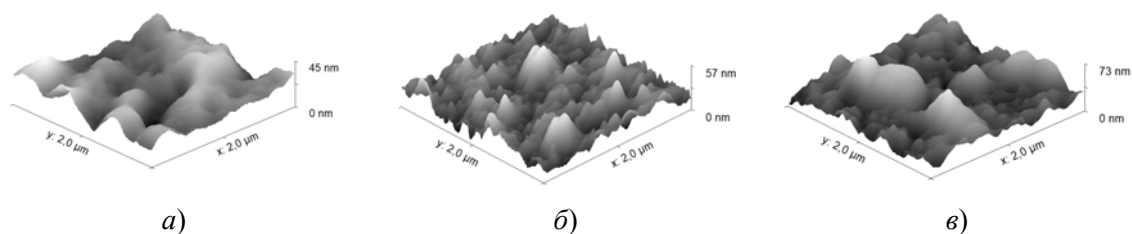


Рис. 2. Рельеф поверхности кремния после травления при высоте камеры: а – 97 мм; б – 79 мм; в – 52 мм

Значения шероховатости поверхности кремния и рельеф образцов указывают на более гладкий профиль для высоты рабочего объема плазменной камеры в 97 мм. С уменьшением высоты камеры поверхность приобретает большую зернистость, что указывает на интенсивное изотропное травление.

При данном исполнении разрядной камеры оптимально использование для процесса травления высоты рабочего плазменного объема 90–97 мм. При этом достигается скорость травления кремния в среде  $CF_4$  ~15 нм/с со среднеквадратичной шероховатостью поверхности  $R_q$  ~7 нм.

#### Литература

1. Role of chamber dimension in fluorocarbon based deposition and etching of  $SiO_2$  and its effects on gas and surface-phase chemistry / E. A. Joseph [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. A 1. – 2008. – Vol. 26. – N 3. P. 545–554. – DOI 10.1116/1.2909963 (дата обращения: 15.10.2025).
2. 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 : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14 нояб. 2024 г. – Новополоцк, 2024. – С. 142–146.
3. Лушакова, М. С. Исследование влияния давления в разрядной камере на формирование комбинированного разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, К. Н. Барковская // Физика конденсированного состояния : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 3–4 апр. 2025 г. / ГрГУ им. Я. Купалы ; ред.: Г. А. Гачко, О. А. Жарнова [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 215–216.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА В ОБЪЕМЕ СВЧ РАЗРЯДА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

О. И. Тихон, С. И. Мадвейко

Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, г. Минск

*Изучено влияние параметров работы СВЧ генератора и условий формирования СВЧ разряда в непрерывном режиме генерации электромагнитной энергии на скорости удаления фоторезиста с поверхности Si пластин. Установлено закономерное сокращение времени*

снятия материала с ростом подводимой к разряду мощности, характер зависимостей при одиночной и групповой обработке, наличие оптимального уровня рабочего давления.

**Ключевые слова:** удаление фоторезиста, непрерывный режим генерации, СВЧ разряд.

## STUDY OF THE PROCESS OF PHOTORESIST STRIPPING IN THE MICROWAVE DISCHARGE VOLUME IN A CONTINUOUS MODE OF ELECTROMAGNETIC ENERGY GENERATION

O. I. Tsikhan, S. I. Madveika

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

*This study examined the influence of microwave generator operating parameters and microwave discharge formation conditions in continuous electromagnetic energy generation mode on the rate of photoresist stripping from the surface of Si wafers. A consistent reduction in material removal time with an increase of discharge power, the nature of the stripping rates during single and group processing, and the presence of an optimal level of working pressure were established.*

**Keywords:** photoresist stripping, continuous generation mode, microwave discharge.

Эффективность и качество плазмохимической обработки полупроводниковых материалов непосредственно в объеме плазмы СВЧ разряда в значительной степени определяется режимом генерации и поддержания разряда. Одним из ключевых параметров при этом является подводимая к СВЧ разряду мощность, задаваемая схемотехническим решением СВЧ генератора.

В качестве способа повышения энергозатрат в СВЧ разряд рассматривается не только увеличение номинального уровня подводимой мощности, но и обеспечение непрерывного режима генерации. Отличием данного режима от стандартного способа формирования электромагнитного излучения СВЧ магнетроном, работающим по схеме однополупериодного выпрямления, является отсутствие интервала между плазменными импульсами [1].

Целью исследования являлось изучение влияния электрических режимов работы СВЧ генератора при непрерывном формировании разряда и условий обработки на скорости удаления фоторезистивного материала с поверхности Si подложек.

Удаление сформированного слоя позитивного фоторезиста DSAM-3020 выполнялось в реакционно-разрядном объеме СВЧ установки резонаторного типа [2]. Плазмообразующая среда – O<sub>2</sub>, рабочие давления – 100 и 200 Па. Одиночная и группа из трех кремниевых пластин диаметром 100 мм, в обоих случаях, располагались в центре рабочего объема параллельно потоку газа. Оценка скорости удаления материала выполнялась по изменению уровня интенсивности спектральных линий атомарного кислорода.

По результатам экспериментов наблюдается закономерный рост скорости снятия пленки фоторезиста с поверхности одиночной кремниевой пластины, при увеличении потребляемой СВЧ генератором мощности (рис. 1). Изменение значения мощности от 1880 до 4020 Вт при рабочем давлении 100 Па показало сокращение времени, необходимого на обработку, на 20 %, при 200 Па для удаления фоторезиста понадобилось в 2,5 раза меньше времени.

Изменение давления с 100 до 200 Па при уровне мощности в 4020 Вт привело к увеличению скорости полного снятия фоторезиста с поверхности подложки в 2 раза. Скорость удаления фоторезиста составила более 80 нм/с. Влияние параметра давле-

ния на низких уровнях используемой мощности минимально, что вероятно связано с задержкой возбуждения разряда при давлении 100 Па, приводящей к прямому разогреву пластины СВЧ энергией. Это компенсирует низкую эффективность плазмохимического воздействия при неоптимальном уровне давления.

При групповой обработке кремниевых пластин повышение потребляемой СВЧ генератором мощности демонстрирует равномерный рост скорости удаления фоторезистивного материала с рабочей поверхности пластин (рис. 2). Двукратное увеличение подводимой к разряду мощности приводит к сокращению времени полного снятия материала с подложек в среднем на 50 %. При изменении показателя рабочего давления с 100 до 200 Па характер зависимости практически не изменяется. Значение давления в реакционно-разрядной камере в 200 Па демонстрирует большую эффективность взаимодействия плазменного разряда с поверхностью обрабатываемых образцов, что выражается в росте скорости удаления фоторезиста на 30–40 % во всем рассматриваемом диапазоне рабочих мощностей СВЧ генератора.

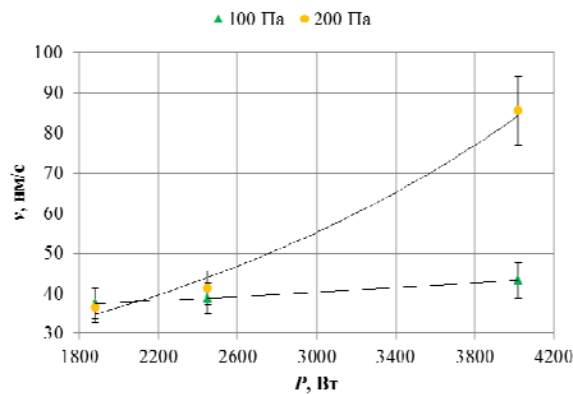


Рис. 1. Зависимость скорости удаления фоторезиста с поверхности одиночной Si пластины в  $O_2$  плазме, от величины потребляемой СВЧ генератором мощности при различном рабочем давлении

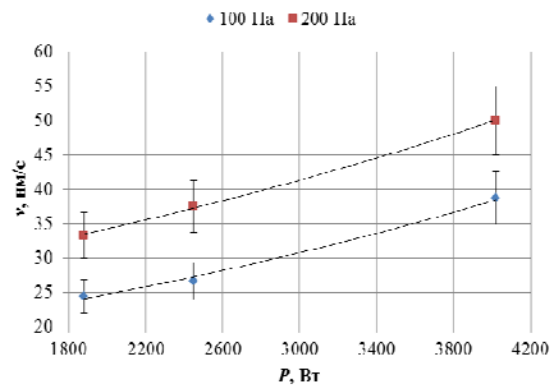


Рис. 2. Зависимость скорости удаления фоторезиста с поверхности группы Si пластин в  $O_2$  плазме, от величины потребляемой СВЧ генератором мощности при различном рабочем давлении

Полученные результаты указывают на большую эффективность возбуждения разряда и взаимодействия активных плазменных частиц при высоком значении давления в рамках реализованной конструкции СВЧ плазменной установки. Уменьшение скорости обработки при групповой загрузке реакционно-разрядного объема вероятно связано с поглощением кремнием части подводимой энергии, как в начальный момент возбуждения плазменного разряда, так и в процессе обработки. Экспериментальная апробация способа формирования и поддержания СВЧ разряда в непрерывном режиме генерации продемонстрировала его высокую эффективность при различных условиях обработки полупроводниковых материалов, что может представлять интерес при реализации операций изготовления изделий электронной техники.

#### Литература

1. Барковская, К. Н. Исследование процесса плазмообразования при непрерывном режиме генерации энергии в СВЧ плазмохимической системе / К. Н. Барковская, О. И. Тихон // Физика конденсированного состояния : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 3–4 апр. 2025 г. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: Г. А. Гачко [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 213–215.

2. Tsikhan, O. I. Study of Pulsed and Continuous Modes of Microwave Discharge Plasma Generation on a Resonator-Type Plasmatron / O. I. Tsikhan, S. I. Madveika, S. V. Bordusau // High Temperature Material Processes. – 2021. – Vol. 25, № 2. – P. 65–75.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ЗОНЫ ОТ УТЕЧКИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ВИБРОАКУСТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ

М. И. Прокошин, И. А. Врублевский

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск*

*Рассмотрена методика и результаты экспериментальной оценки эффективности системы активной защиты речевой информации от утечки по виброакустическому каналу. Обоснована актуальность задачи, проанализированы существующие методы защиты информации. Описан порядок проведения измерений с использованием специализированного комплекса «Шум-ЗМА» в реальном помещении. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.*

**Ключевые слова:** защищаемое помещение, активная защита, экспериментальная оценка.

### EXPERIMENTAL EVALUATION OF AN ACTIVE PROTECTION SYSTEM FOR A CONTROLLED ZONE AGAINST SPEECH INFORMATION LEAKAGE THROUGH A VIBROACOUSTIC CHANNEL

M. I. Prokoshin, I. A. Vrubleuski

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

*This paper discusses the methodology and results of an experimental evaluation of the effectiveness of an active protection system against speech information leakage via a vibroacoustic channel. The relevance of the task is substantiated, and existing methods of information protection are analyzed. The procedure for conducting measurements using the specialized “Shum-3MA” complex in a real room is described. A comparison of calculated and experimental data is provided.*

**Keywords:** secure room, active protection, experimental evaluation.

Речевая информация остается одним из наиболее распространенных и значимых видов информации, несущей конфиденциальные данные. В то же время она имеет большие риски для несанкционированного перехвата через различные технические каналы. Поэтому актуальность защиты речевой информации в современном информационном пространстве постоянно возрастает. Среди различных технических каналов особое внимание уделяется виброакустическому каналу утечки информации, поскольку его реализация зачастую не требует сложного дорогостоящего оборудования и может быть осуществлена с использованием относительно простых средств, таких как стетоскопы, контактные микрофоны или лазерные сканеры, что заметно облегчает работу злоумышленнику. Следует отметить, что недостаточная осведомленность о возможных угрозах и отсутствие адекватных мер защиты способны привести к серьезным последствиям, включая компрометацию коммерческой тайны, персональных данных или иной чувствительной информации. Поэтому разработка и экспериментальная оценка систем активной защиты, способных эффективно противодействовать утечке речевой информации по виброакустическому ка-