



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-57-65>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.9.047.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПОДАЧИ ОЗОНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ПРОЦЕСС УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ

ТИХОН О.И., МАДВЕЙКО С.И., БОРДУСОВ С.В., БАРАХОЕВ А.Л., КАМЛАЧ П.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 22 июня 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Работа посвящена изучению зависимости результатов обработки фоторезистивных пленок на поверхности кремниевых пластин в среде озона от условий и параметров проведения процесса. Высокий окислительный потенциал озона обосновывает возможность его применения для удаления органических пленок в условиях атмосферного давления. Эксперименты выполнялись с использованием разработанного исследовательского стенда, в котором варьировался режим и способ нагрева пластины, а также способ подачи газа к поверхности фоторезиста. В качестве экспериментальных образцов выступали кремниевые пластины со сформированным слоем фоторезистивной маскирующей пленки толщиной 1,35 мкм. Было установлено, что для обеспечения равномерности нагрева пластины по всей ее поверхности целесообразным является использование керамического инфракрасного нагревателя. При подаче озono-воздушной смеси в центр нагретого образца наблюдалось наличие остатков удаляемого фоторезиста, связанное с перепадом температуры в его приповерхностной области. Для решения данной проблемы были рассчитаны компьютерные модели температурных режимов элементов реакционного объема, которые показали, что рассеяние потока рабочего газа по поверхности кремниевой пластины позволяет значительно увеличить эффективность удаления фоторезиста, а при качественном подборе режима обработки обеспечивает полное снятие фоторезистивного материала. Полученные данные были экспериментально подтверждены путем использования сепаратора потока озono-воздушной смеси. Проведены эксперименты по исследованию влияния расстояния от поверхности пластины до места ввода рабочего газа на скорость удаления фоторезиста, показавшие, что уменьшение расстояния способствует сокращению потерь озона в результате термического разложения и, соответственно, повышению скорости удаления материала.

**Ключевые слова:** удаление фоторезиста, озон, озono-воздушная смесь, температура пластин.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Тихон О.И., Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Барахоев А.Л., Камлач П.В. Исследование влияния условий подачи озono-воздушной смеси на процесс удаления фоторезиста с поверхности кремниевой пластины. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 57-65.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF OZONE-AIR MIXTURE SUPPLY CONDITIONS ON THE PROCESS OF THE PHOTORESIST REMOVAL FROM THE SILICON WAFER SURFACE

OLEG I. TSIKHAN, SIARHEI I. MADVEIKA, SIARHEI V. BORDUSAU,  
ANDREI L. BARAKHOEV, PAVEL V. KAMLACH

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 22 June 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The study is devoted to the research of the dependence of the processing results of photoresistive films on the silicon wafers surface in an ozone environment on the conditions and parameters of the process. The high oxidizing potential of ozone justifies the possibility of its use for removing organic films under atmospheric pressure. The experiments were carried out using the developed research bench, in which the mode and method of heating, as well as the method of supplying gas to the surface of the photoresist, were varied. Silicon wafers with a formed 1,35- $\mu\text{m}$  thick masking photoresist film were used as experimental samples. It was found expedient that uniform heating of the plate over its entire surface can be achieved using a ceramic IR heater. When the ozone-air mixture was introduced into the center of the heated sample, the presence of the removed photoresist residues was observed, which was associated with a temperature drop in its surface area. To solve this problem, the computer models of the temperature regimes of the reaction volume elements were calculated. They showed that the scattering of the working gas flow over the surface of the silicon wafer would significantly increase the efficiency of photoresist removal, and with a good selection of the treatment regime it would ensure complete removal of the photoresist. The data obtained were experimentally confirmed by using an ozone-air mixture flow separator. Experiments were carried out to study the effect of the distance from the wafer surface to the working gas inlet on the photoresist removal rate. They showed that a decrease in the distance reduces the ozone loss due to thermal decomposition and, consequently, increases the material removal rate.

**Keywords:** photoresist removal, ozone, ozone-air mixture, wafers temperature.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Tsikhan O.I., Madveika S.I., Bordusau S.V., Barakhoev A.L., Kamlach P.V. Study of the influence of ozone-air mixture supply conditions on the process of the photoresist removal from the silicon wafer surface. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 57-65.

### Введение

Развитие микроэлектроники, рост степени интеграции и масштабов выпуска интегральных микросхем (ИМС) стимулируют процессы разработки и внедрения современных и высокоэффективных методов обработки на всех этапах производства. Уменьшение характерных размеров топологии изготавливаемых ИМС значительно повышает требования к производительности и точности выполнения технологических операций, что необходимо для достижения высоких рабочих характеристик полупроводниковых устройств. В то же время актуальными становятся вопросы сокращения затрат на выпуск готовой продукции, введения комплексных мер для роста энергосбережения производственных комплексов и повышения экологичности производства согласно современным стандартам.

Технология формирования структуры ИМС содержит ряд повторяющихся операций (межоперационная очистка поверхности полупроводниковых пластин от органических загрязнений, удаление фоторезистивных маскирующих пленок), которые реализуются с использованием жидких технологических сред или вакуумно-плазменного оборудования. Процессы жидкостной химической обработки обладают высокой скоростью и селективностью, но в некоторых случаях не позволяют обеспечить необходимый уровень точности, а также

совместимость с процессами «сухой» газовой обработки. Сухие методы обработки также являются более предпочтительными в связи с большей чистотой и экологичностью процесса.

Одним из альтернативных методов удаления органических фоторезистивных маскирующих пленок и загрязнений является обработка полупроводниковых пластин с использованием озона [1]. Эффективность применения озона обоснована его способностью в газовой фазе активно реагировать с органическими молекулами и веществами. Высокий окислительный потенциал позволяет использовать озон в составе рабочих газов при обработке в условиях вакуума или атмосферного давления. Возможность обработки при атмосферном давлении значительно уменьшает затраты, связанные с эксплуатацией вакуумного оборудования, что также может способствовать сокращению времени выполнения операций.

Основными характерными химическими свойствами озона являются его способность к разложению и сильное окислительное действие. Благодаря этим свойствам и осуществляется процесс очистки и удаления фоторезиста, заключающийся в превращении обрабатываемых органических соединений в летучие вещества ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N$ ). Большинство реакций окисления органических соединений с участием озона проходят по следующему пути [2]:



Два атома кислорода выделяются в виде молекулы  $O_2$ , а один входит в состав продуктов разложения.

Генерация озона ( $O_3$ ) для формирования рабочей газовой смеси может выполняться с использованием барьерного разряда, электролиза, фотохимического способа и высокочастотного электрического поля [3]. На практике большее применение находит синтез озона в барьерном разряде. Концентрация озона в газе, в большинстве случаев, ограничивается 5–7 объемн. % [2]. Разбавленные газовые смеси озона довольно устойчивы при умеренных температурах. С ростом температуры скорость распада  $O_3$  увеличивается. Согласно [4] увеличение температуры на  $50^\circ C$  повышает степень распада  $O_3$  на 40 %, следовательно, повышение температуры вызывает снижение концентрации озона в озono-воздушной смеси.

Применительно к процессу обработки фоторезиста скорость  $R$  удаления материала  $s$  частицами вещества  $x$  может быть описана формулой [5]

$$R_{x(s)} \propto \Gamma_x e^{-1/T_s}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_x$  – поток реакционных частиц (в нашем случае озона);

$T_s$  – температура образца.

Поток частиц представляет собой свертку плотности реакционных частиц и скорости их подачи на поверхность. Увеличение плотности реакционных частиц, скорости их потока или обоих факторов приведет к росту скорости удаления материала.

На качество процесса удаления фоторезиста с поверхности кремниевой (Si) пластины в озono-воздушной смеси сильное влияние оказывает равномерность нагрева образца при подаче на его поверхность потока газа, которая может быть обеспечена несколькими способами.

Первый способ заключается в предварительном подогреве рабочей газовой смеси перед подачей в реакционный объем. Подобный процесс теоретически может быть реализован путем применения ленточных нагревателей или нагревательных обмоток, но необходимость поддержания достаточно высокой температуры газовой смеси в условиях атмосферного давления значительно повышает энергетические затраты, а чувствительность озона к температуре [4] может приводить к потерям озono-воздушной смеси до поступления в камеру.

Другим способом является изменение метода подачи рабочего газа. В этом случае равномерность нагрева достигается путем подачи неразогретого газа сразу по всей площади обрабатываемой пластины [6]. Для этого используется специальный сепаратор, имеющий множество распределенных по его поверхности выходных отверстий. Путем строгого согласования расстояния до образца, потока газа и рабочей мощности нагревателя, сепаратор позволяет обеспечить необходимый для обработки уровень температуры.

Ключевыми контролируемыми параметрами при обработке материалов в озono-воздушной смеси, таким образом, являются концентрация озона и значения температуры в рабочем объеме [7]. Особенность, заключающаяся в разложении  $O_3$  при повышенных температурах, обосновывает необходимость локализации нагрева в области обрабатываемого

образца и контроля режимов воздействия газовой смеси на его поверхность. При этом неравномерность распределения температуры по поверхности образца может приводить к снижению скорости и качества выполнения операций. Применительно к задаче разработки технологического процесса удаления фоторезиста в озono-воздушной смеси при атмосферном давлении необходимыми являются поиск и реализация методов обеспечения постоянного значения температурного профиля и распределения газа по всей площади пластины.

### Методика проведения экспериментов

Изучение процесса обработки фоторезистивных пленок в среде озона ( $O_3$ ) проводилось с использованием разработанного исследовательского стенда, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Обработка образцов осуществлялась в объеме рабочей камеры, представляющей собой кварцевую трубу диаметром 150 мм и высотой 80 мм. В нижней части камеры располагалось устройство нагрева, на которое помещалась обрабатываемая кремниевая пластина. Верхний и нижний торцы камеры закрывались крышками. В верхней крышке имелись отверстия для подвода питания к нагревателю и ввода контактирующей с поверхностью пластины термопары, а также отверстие для закрепления штуцера, используемого для подачи рабочего газа к образцу. Эксперименты проводились в условиях атмосферного давления.

Для подогрева пластин были использованы два типа нагревателей: соединенные параллельно две кварцевые лампы КГ-220-1000-3 диаметром 11 мм и мощностью 1 кВт каждая, а также керамический инфракрасный (ИК) нагреватель мощностью 450 Вт размером 100×100 мм. Схематическое изображение рабочей камеры представлено на рис. 2. Степень нагрева обрабатываемой пластины контролировалась хромель-алюмелевой термопарой и устанавливалась величиной подаваемого напряжения. Плавная регулировка напряжения выполнялась с помощью лабораторного автотрансформатора.

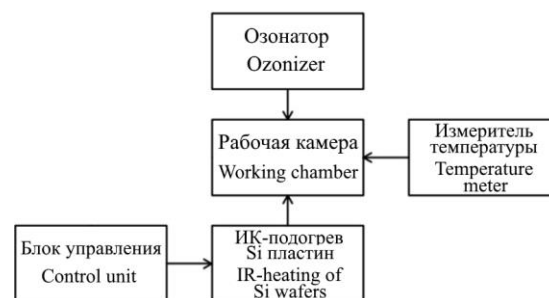


Рис. 1. Структурная схема исследовательского стенда  
Fig. 1. The structural diagram of the research bench

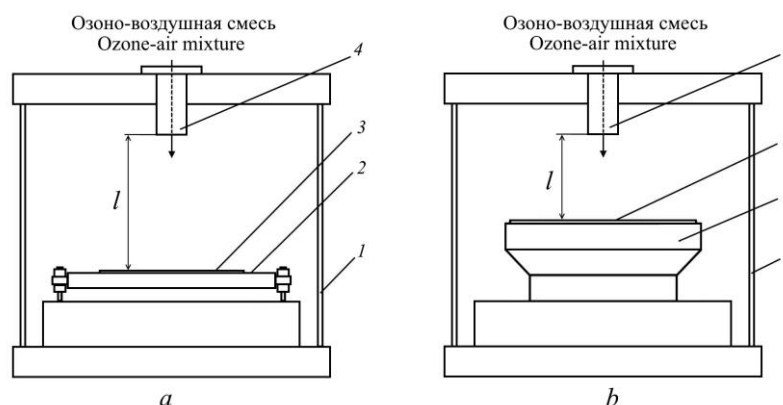


Рис. 2. Схема рабочей камеры для удаления фоторезистивной пленки в условиях атмосферного давления с использованием: галогенных ламп (а); керамического ИК-нагревателя (б)

1 – кварцевая труба; 2 – нагреватель; 3 – Si пластина; 4 – штуцер напуска озono-воздушной смеси

Fig. 2. Drawing of a working chamber for photoresist film removal at atmospheric pressure using:  
halogen lamps (a); ceramic IR heater (b)

1 – quartz tube; 2 – heater; 3 – Si wafer; 4 – ozone-air inlet fitting

Перед проведением экспериментов было изучено влияние типа используемого нагревателя на характер разогрева исследуемой пластины со слоем фоторезиста. Использование кварцевых галогенных ламп продемонстрировало неравномерность нагрева, проявляющуюся в изменении цвета фоторезистивного покрытия преимущественно в центральной области пластины. Это объясняется разницей в геометрических размерах нагревателя и пластины, а значит, большим нагревом зоны, непосредственно находящейся в контакте с лампами. Данный результат указал на необходимость использования нагревателя с большей площадью контакта с объектом обработки. Проведенное в аналогичных условиях исследование характера нагрева пластины керамическим ИК нагревателем показало отсутствие зоны с характерно отличными цветами фоторезистивного покрытия, что говорит о повышении равномерности нагрева пластины по всей ее площади. В связи с этим для проведения экспериментов был выбран керамический 450 Вт ИК нагреватель. Однако недостатком подобного типа нагревателя является инерционность нагрева, проявляющаяся в относительно медленном изменении рабочей температуры при подстройке величины подаваемого напряжения, что требует более длительной процедуры подбора режима работы устройства.

Получение озона осуществлялось с помощью генератора «ОЗОН-10». Генератор предназначен для получения озона из осушенного кислорода или воздуха в высоковольтном электрическом разряде. Блок синтеза озона в генераторе представляет собой горизонтальный аппарат типа кожухотрубчатого теплообменника с тремя газоразрядными элементами с барьером на высокопотенциальном электроде. Величина концентрации генерируемого  $O_3$  и производительность устройства определяются значением задаваемого тока питания повышенной частоты и расходом газа, которые устанавливались с помощью органов управления генератором. Для подачи газовой смеси в рабочий объем исследовательского стенда использовался безмасляный компрессор, подключаемый к входу озонатора.

В качестве экспериментальных образцов служили кремниевые пластины диаметром 100 мм. На поверхности пластин имелся сформированный в стандартных для промышленности условиях (нанесение, сушка, экспонирование, задубливание) слой фоторезистивной маскирующей пленки марки S1813G2SP15 толщиной 1,35 мкм.

Для анализа полученных экспериментальных данных и объяснения наблюдаемых эффектов использовалась построенная и рассчитанная компьютерная модель распределения температуры в реакционном объеме. В модели были заданы следующие параметры: диаметр камеры – 140 мм, высота – 50 мм; диаметр пластины – 100 мм; расстояние от отверстия ввода газа до пластины – 7 мм. Пластина в объеме камеры располагалась на условной модели керамического ИК нагревателя. Газ подавался через *Inlet* в верхнем торце камеры.

Для определения скорости удаления фоторезиста с поверхности пластины  $v_{уд}$  с помощью электронных лабораторных весов измерялась масса образца до и после обработки в озono-воздушной смеси и вычислялась масса удаленного в единицу времени фоторезиста.

Задача исследования заключалась в определении условий и параметров, обеспечивающих качественный результат удаления фоторезиста с поверхности кремниевой пластины. Исследовалось влияние способа нагрева и метода подачи рабочего газа на процесс обработки материала, а также зависимость скорости удаления фоторезистивной пленки от расстояния  $l$  между кремниевой пластиной и местом ввода озono-воздушной смеси.

### Результаты и их обсуждение

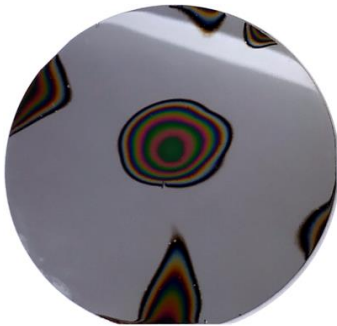
Установочные эксперименты показали, что условия и способ подачи озono-воздушной смеси к поверхности кремниевой пластины в существенной степени влияют как на скорость, так и на равномерность удаления фоторезистивной пленки. В качестве примера этому на рис. 3 показан результат обработки пластины с фоторезистом при централизованной подаче озono-воздушной смеси из одного отверстия.

Обрабатываемая пластина с фоторезистивной пленкой располагалась на поверхности нагревателя, штуцер подачи озono-воздушной смеси устанавливался на расстоянии 1 см над центром пластины. Пластина обрабатывалась в течение 7 мин после нагрева до температуры 250 °С. При больших значениях температуры происходит термическое

разрушение структуры фоторезиста, что в условиях производства повышает вероятность повреждения уже подготовленных полупроводниковых структур; меньшая величина температуры не позволяет осуществить процесс снятия фоторезистивной пленки в среде озона.

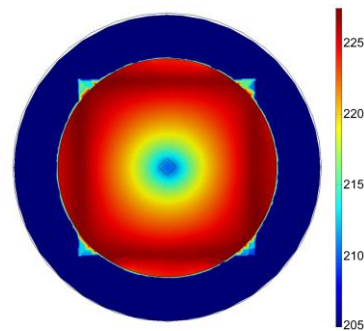
Из результата эксперимента (рис. 3) видно, что на поверхности пластины после обработки сохранились области с неудаленным фоторезистом, занимающие порядка 15 % площади. Наиболее характерная зона располагается в центре пластины на участке под штуцером подачи озono-воздушной смеси. Наблюдаемый эффект уменьшения количества удаляемого материала предположительно связан со снижением температуры данного участка пластины по причине подачи неразогретого рабочего газа. Экспериментальные данные были проанализированы при помощи компьютерной модели, построенной со следующими условиями: диаметр отверстия ввода газа – 8 мм, скорость потока –  $U_0 = 10$  м/с. Результат моделирования представлен на рис. 4.

Из представленного на рис. 4 изображения видно, что подача газа в середину пластины перпендикулярно ей ведет к уменьшению температуры в центре на величину около 20 °С.



**Рис. 3.** Результат обработки пластины с фоторезистом при подаче озono-воздушной смеси по центру пластины

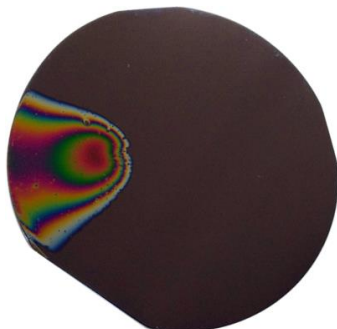
**Fig. 3.** The result of processing of wafer with photoresist when an ozone-air mixture is supplied in the center of the wafer



**Рис. 4.** Результат моделирования нагрева поверхности кремниевой пластины при подаче газа по центру пластины

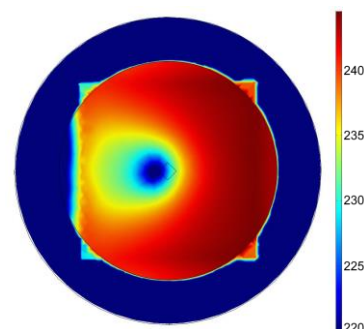
**Fig. 4.** The simulation result of the silicon wafer surface heating when gas is supplied in the center of the wafer

Для анализа качественного совпадения данных моделирования и реально наблюдаемых результатов обработки был проведен эксперимент, при котором штуцер подачи озono-воздушной смеси был установлен на расстоянии 1 см от поверхности пластины под небольшим углом к ней. Пластина обрабатывалась в течение 7 мин после нагрева до температуры 250°С. Результат обработки представлен на рис. 5. Также была рассчитана модель с аналогичной описанной ранее конфигурацией, но со смещенным в направлении оси  $x$  на 60° потоком газа с  $U_0 = 25$  м/с. Результат моделирования представлен на рис. 6.



**Рис. 5.** Результат обработки пластины с фоторезистом при подаче озono-воздушной смеси под углом к поверхности пластины

**Fig. 5.** The result of processing of wafer with photoresist when an ozone-air mixture is supplied at an angle to the wafer's surface



**Рис. 6.** Результат моделирования нагрева поверхности кремниевой пластины при подаче газа под углом 60° к ее плоскости

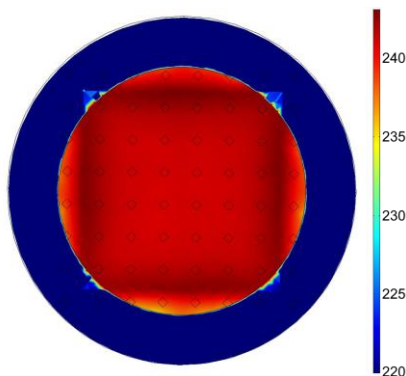
**Fig. 6.** The simulation result of the silicon wafer surface heating when gas is supplied at an angle of 60° to its plane

На данном изображении показан эффект, аналогичный предыдущей модели. Область на поверхности пластины, смещенная относительно центра из-за изменения направления потока газа, характеризуется меньшим значением поверхностной температуры. Наибольшая разница температур составляет около 25 °С. Данные результаты подтверждают предположение о том, что причиной не полного удаления фоторезиста при обработке разогретой пластины озono-воздушной смесью могут являться перепады температуры на ее поверхности.

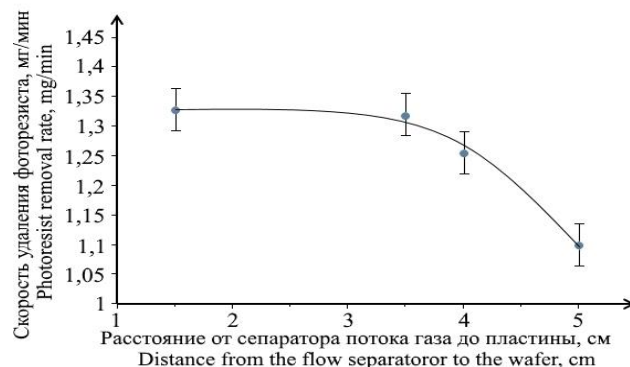
Для проверки эффекта влияния на температуру поверхности кремниевой пластины распределенной подачи потока газовой смеси с применением сепаратора была построена компьютерная модель, в которой вместо одного отверстия диаметром 8 мм над поверхностью пластины имелся массив 8×8 отверстий диаметром 4 мм на расстоянии 13 мм друг от друга. Данные отверстия выступали в качестве *Inlet* для подачи газа со скоростью потока  $U_0 = 2,4$  м/с. Результат моделирования, представленный на рис. 7, демонстрирует практически равномерное распределение температуры по всей площади 100 мм пластины. Неравномерность, не превышающая 5 °С, наблюдается за пределами и на границе условной модели ИК нагревателя.

Для экспериментальной проверки результатов моделирования пластины с фоторезистивной пленкой помещались на поверхность нагревателя, на расстоянии 1 см над образцом располагался сепаратор потока газа, температура нагрева составляла 250 °С. По результатам эксперимента установлено, что разделение потока газа позволило полностью очистить обрабатываемые пластины от имеющегося фоторезистивного покрытия.

При увеличении расстояния  $l$  от места подачи озono-воздушной смеси до поверхности кремниевой пластины характер расположения остатков фоторезистивной пленки существенно не изменялся, в то время как скорость ее удаления уменьшалась. На рис. 8 представлены результаты экспериментов, проведенные при следующих условиях: температура пластины в процессе обработки – 250 °С, время обработки – 8 мин.



**Рис. 7.** Результат моделирования нагрева поверхности кремниевой пластины при подаче газа через массив отверстий  
**Fig. 7.** The result of simulation of heating the surface of a silicon wafer when gas is supplied through an array of holes



**Рис. 8.** Зависимость скорости удаления фоторезиста от расстояния  $l$  от сепаратора потока газа до пластины  
**Fig. 8.** The dependence of the photoresist removal rate on the distance  $l$  from the flow separator to the wafer

Уменьшение расстояния  $l$  позволяет потоку озono-воздушной смеси быстрее достигать поверхности разогретой пластины. Это способствует сокращению потерь озона в результате термического разложения в приповерхностном слое до взаимодействия кислорода с молекулами фоторезиста и увеличению объема концентрированного рабочего газа в области обработки экспериментального образца, что приводит к росту скорости удаления материала. Но, как показали эксперименты, при этом существенную роль начинает играть охлаждение поверхности пластины, что приводит к существенной неравномерности скорости удаления материала и наличию остатков фоторезистивной пленки на поверхности пластины.

## Заклучение

Одним из основных факторов процесса удаления фоторезиста в озono-воздушной смеси является рабочая температура обрабатываемого образца, которая зависит как от характеристик

нагревателя, так и от режимов и условий подвода к поверхности пластин газовой смеси. Неравномерность распределения температуры по площади поверхности кремниевой пластины приводит к появлению характерных областей, удаление материала с которых происходит со значительно меньшей скоростью. Решение данной проблемы обеспечивается равномерным распределением потока рабочего газа одновременно по всей пластине, что при качественном согласовании скорости потока, расстояния от места ввода в камеру до образца и температуры нагрева, компенсирующей охлаждение пластины, позволяет полностью удалять слой фоторезистивной пленки. Для этого необходимо использовать специальные сепараторы, через которые прогоняется озono-воздушная смесь.

Метод удаления фоторезиста с применением озона при условии его качественной реализации может показать высокую эффективность при использовании в составе технологического процесса изготовления изделий электронной техники. Низкий уровень повреждений образца, относительная простота реализации при интеграции в существующие технологические маршруты изготовления изделий электронной техники делает этот метод непрецизионной обработки полупроводниковых пластин привлекательным для дальнейшей разработки и промышленного применения.

### Список литературы

1. Huynh C.K., Mitchener J.C. Plasma versus ozone photoresist ashing: Temperature effects on process-induced mobile ion contamination. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991;9(2):353-356. DOI: 10.1116/1.585574.
2. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. *Физическая химия озона*. Москва: Изд-во МГУ; 1998.
3. Разумовский С.Д., Заиков Г.Е. *Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механизм)*. Москва: «Наука»; 1974.
4. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Самойлович В.Г. *Озонирование в процессах очистки воды*. Москва: ДеЛи принт, 2007.
5. West A., Schans M., Xu C., Cooke M., Wagenaars E. Fast, downstream removal of photoresist using reactive oxygen species from the effluent of an atmospheric pressure plasma Jet. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016;25:02LT01. DOI: 10.1088/0963-0252/25/2/02LT01.
6. Miura T., Kekura M., Horibe H., Yamamoto M. Photo-resist Removal using Highly Concentrated Ozone Gas – Removal Characteristics of Various Resists: *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2008;21(2):311-316. DOI: 10.2494/photopolymer.21.311.
7. Gardner W.L., Baddorf A.P., Holber W.M. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1997;15(3):1409-1412. DOI: 10.1116/1.580551.

### References

1. Huynh C.K., Mitchener J.C. Plasma versus ozone photoresist ashing: Temperature effects on process-induced mobile ion contamination. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991;9(2):353-356. DOI: 10.1116/1.585574.
2. Lunin V.V., Popovich M.P., Tkachenko S.N. [*Physical chemistry of ozone*]. Moscow: Publ. MSU; 1998. (in Russ.)
3. Razumovskij S.D., Zaikov G.E. [*Ozone and its reactions with organic compounds (kinetics and mechanism)*]. Moscow: «Nauka»; 1974. (in Russ.)
4. Draginskij V.L., Alekseeva L.P., Samojlovich V.G. [*Ozonation in water treatment processes*]. Moscow: DeLi print, 2007. (in Russ.)
5. West A., Schans M., Xu C., Cooke M., Wagenaars E. Fast, downstream removal of photoresist using reactive oxygen species from the effluent of an atmospheric pressure plasma Jet. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016;25:02LT01. DOI: 10.1088/0963-0252/25/2/02LT01.
6. Miura T., Kekura M., Horibe H., Yamamoto M. Photo-resist Removal using Highly Concentrated Ozone Gas - Removal Characteristics of Various Resists: *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2008;21(2):311-316. DOI: 10.2494/photopolymer.21.311.
7. Gardner W.L., Baddorf A.P., Holber W.M. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1997;15(3):1409-1412. DOI: 10.1116/1.580551.



### Вклад авторов

Тихон О.И. осуществил подготовку и проведение экспериментов, выполнил анализ полученных результатов, оформил рукопись статьи.

Мадвейко С.И. является научным руководителем, поставил цели и задачи исследования

Бордусов С.В. осуществил технический контроль за проведением исследований, участвовал в обобщении и интерпретации результатов, оказал помощь в подготовке текста статьи для опубликования.

Барахоев А.Л. принял участие в проведении экспериментов, оказал помощь в проведении компьютерного моделирования.

Камлач П.В. принял участие в проведении экспериментов, оказал помощь в проведении компьютерного моделирования.

### Authors' contribution

Tsikhan O.I. prepared and conducted experiments, analyzed the results, and completed the manuscript of the article.

Madveika S.I. acted as the scientific adviser and set the goals and objectives of the study.

Bordusau S.V. carried out technical monitoring of the research, participated in summarizing and interpretation of the experimental data, assisted in the preparation of the text of the article for publication.

Barakhoev A.L. took part in conducting of experiments, assisted in computer modeling.

Kamlach P.V. took part in conducting of experiments, assisted in computer modeling.

### Сведения об авторах

Тихон О.И., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мадвейко С.И., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бордусов С.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Барахоев А.Л., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Камлач П.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Tsikhan O.I., PG Student of the Electronic Technology and Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Madveika S.I., PhD, Associate Professor, Head of the Electronic Technology and Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bordusau S.V., D.Sci., Professor of the Electronic Technology and Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Barakhoev A.L., PG Student of the Electronic Technology and Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kamlach P.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Electronic Technology and Engineering department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-85-82;  
e-mail: kritgar@bsuir.by  
Тихон Олег Игоревич

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293-85-82;  
e-mail: kritgar@bsuir.by  
Tsikhan Oleg Igorevich