

УДК 533.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ НА ЛОКАЛЬНУЮ ХИМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ПЛАЗМЫ СВЧ-РАЗРЯДА**д-р техн. наук С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО****(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)**

Исследуются скорости СВЧ-плазмохимического удаления фоторезистивных пленок с поверхности кремниевых пластин в зависимости от формы и частоты следования импульсов выходных сигналов анодного напряжения и тока источника вторичного электропитания СВЧ-магнетрона, построенного на базе высоковольтного трансформатора, работающего в режиме насыщения. Рассматривается влияние различного количества объектов обработки, расположенных в объеме разрядной камеры, на скорость плазмохимического удаления фоторезистивных пленок с поверхности кремниевых пластин. Установлена возможность стабильной и устойчивой работы низкодобротного СВЧ-магнетрона непрерывного действия (типа М-105, М-112) на плазменную нагрузку с упрощенными схемами питания выпрямленным нефильтрованным напряжением с частотой следования электрических импульсов 50 и 100 Гц. Определена более высокая (в 1,3 раза) эффективность применения для целей СВЧ-плазмохимической обработки полупроводниковых пластин 100-герцовой схемы питания СВЧ-магнетрона с умножением анодного напряжения по сравнению с 50-герцовой при одинаковых величинах потребляемой источниками питания электрической мощности. Установлен эффект влияния на скорость процесса плазменного удаления фоторезистивных пленок с поверхности полупроводниковых пластин задержки начала плазмообразования по отношению к началу генерации магнетроном СВЧ-мощности.

Введение. В процессе проведения экспериментов по удалению фоторезиста с поверхности кремниевых пластин при групповой обработке установлен специфический характер проявления эффекта «загрузки». Это является следствием как частичного поглощения поступающей в область СВЧ-резонатора мощности электромагнитной волны материалом с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь (кремний), так и изменением добротности резонатора. Поэтому по мере увеличения количества обрабатываемых в камере плазмотрона полупроводниковых пластин необходимо увеличивать мощность подводимого СВЧ-излучения. Поскольку СВЧ-магнетроны средней мощности технологического назначения имеют максимальную мощность порядка 0,8...1,5 кВт, возникает необходимость поиска стимулирующих воздействий на процесс групповой СВЧ-плазмохимической обработки материалов.

Методика эксперимента. Применительно к задаче исследования влияния режимов плазмообразования на локальную химическую активность СВЧ-плазмы экспериментально проводилось изучение процесса удаления фоторезистивного защитного покрытия ФП-15 толщиной 1,5 мкм, нанесенного на кремниевые (Si) пластины диаметром 76 мм. Технологические параметры процесса удаления фоторезистивных пленок с поверхности подложек изучались при питании магнетрона анодным током с частотой импульсов 50 и 100 Гц.

При проведении экспериментов питание магнетрона осуществлялось от источника вторичного электропитания на базе высоковольтного трансформатора, работающего в режиме насыщения. Отличительными характеристиками при организации процесса обработки являлись особенности схмотехнического построения выходного высоковольтного выпрямительного каскада источника питания [1]:

1) источник питания собран по схеме выпрямления с удвоением напряжения с использованием в своем составе трансформатора, работающего в режиме насыщения, что позволяло получить форму импульса анодного напряжения, близкую к прямоугольной форме при величине потребляемой установкой мощности 1300 и 1650 Вт;

2) источник питания магнетрона собран по схеме двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения с использованием в своем составе трансформатора, работающего в режиме насыщения, что позволило получить форму анодного напряжения, близкую к постоянной. Такие схмотехнические решения обеспечивали работу магнетрона в режиме формирования амплитудно-модулированного СВЧ-излучения с частотой следования пачек импульсов 50 и 100 Гц.

Процесс удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин контролировался с использованием спектрометра по интенсивности линии кислорода с длиной волны 777,76 нм. Эксперименты по удалению фоторезиста проводились в атмосфере воздуха и O₂.

Результаты и их обсуждение. Известно, что при взаимодействии кислородной плазмы с фоторезистом последний в результате ряда превращений переходит в газообразные продукты CO, CO₂, H₂O и др. [2], которые повышают давление в реакционной камере и снижают скорость удаления фоторезиста. При повышении давления относительно p_{opt} снижение скорости удаления можно объяснить уменьшением энер-

гии электронов в результате повышения частоты столкновения частиц в объеме разряда, что выражается в снижении степени диссоциации молекул кислорода. С давлением газа однозначно связан и расход газа, так как при неизменной скорости откачки с повышением расхода газа увеличивается давление в реакторе, и наоборот. В случае если при одном и том же давлении имеется возможность изменения расхода газа, то и этот параметр имеет свое оптимальное значение (максимум), которое обусловлено временем контакта плазмы с пленкой фоторезиста и явлениями «застоя» отработанных газообразных фракций.

На рисунке 1 и рисунке 2 представлены результаты исследования влияния давления в разрядной камере СВЧ-плазмотрона на скорость удаления фоторезиста с поверхности двух кремниевых пластин в воздухе (рис. 1) и O_2 (рис. 2) при использовании в источнике питания магнетрона различных схем выпрямления анодного высоковольтного напряжения [3].

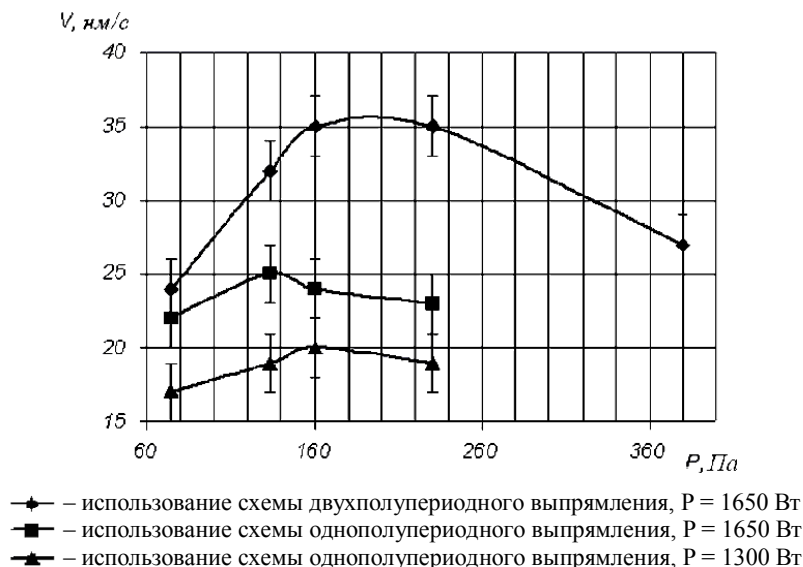


Рис. 1. Влияние величины давления воздуха в разрядной области на скорость удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин для различных источников питания СВЧ-магнетрона



Рис. 2. Влияние величины давления O_2 в разрядной области на скорость удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин для различных источников питания СВЧ-магнетрона

При использовании в источнике питания в качестве выходного каскада схемы однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения для давлений выше 230 Па наблюдалась неустойчивость разряда.

В таблице 1 приведены обобщенные данные по удалению фоторезиста с поверхности двух кремниевых пластин в атмосфере воздуха и O_2 при давлении в разрядной камере 133 Па [4]. Более высокие скорости протекания процесса плазменного удаления фоторезистивных пленок в разряде O_2 по сравнению с

обработкой в плазме воздуха являются характерными и для обработки в других типах разряда [5 – 7] по причине более высокой концентрации в кислородной плазме химически активных по отношению к органическим молекулярным соединениям частиц.

Результаты экспериментов

Схематическое решение выходного высоковольтного каскада источника питания СВЧ-магнетрона	Потребляемая мощность, Вт	Интенсивность спектральной линии кислорода ($\lambda = 777,76$ нм), отн. ед.	Скорость удаления фоторезиста в среде, нм/с	
			воздух	кислород
Однополупериодное выпрямление	1300	2150	19 ± 2	27 ± 2
	1650	1800	25 ± 2	34 ± 2
Двухполупериодное выпрямление	1650	100	32 ± 2	42 ± 2

Анализ данных таблицы 1 показал, что технологическим фактором, влияющим на скорость удаления фоторезиста, служит мощность СВЧ-колебаний, подводимых к разряду. Величина вкладываемой в разряд мощности как основной энергетический параметр активно влияет на условия в плазме. С изменением мощности изменяются электрофизические характеристики плазмы, что сказывается как на абсолютных, так и на относительных скоростях травления материалов. Так же как и для ВЧ-разряда, рост мощности приводит к ускорению процесса, что обусловлено повышением степени ионизации и температуры частиц плазмы.

Установлено, что максимальная скорость удаления фоторезиста в проведенных экспериментах достигается при использовании источника питания СВЧ-магнетрона, построенного по схеме двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения, и составляет величину порядка 40...44 нм/с. Это можно объяснить тем, что при одинаковой потребляемой электрической мощности в случае 100-герцовой частоты следования пачек СВЧ-импульсов скорости процессов выше, а вероятность гибели электронов и нейтрализации химически активных плазменных частиц ниже, чем для 50-герцовой частоты.

При данных электрических параметрах источника питания также изменяются физические характеристики плазмы и создаются условия, при которых не вся вкладываемая в разряд СВЧ-мощность затрачивается на поддержание СВЧ-разряда, а часть ее расходуется на разогрев кремниевой пластины и, следовательно, фоторезиста, что приводит к увеличению скорости удаления.

Экспериментально установлено, что в случае запаздывания момента возбуждения СВЧ-разряда в разрядной камере по отношению к началу генерирования СВЧ-магнетронного электромагнитного излучения на 4...5 секунды при питании его по схеме двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения скорость удаления фоторезиста возрастает до 60 нм/с. Предполагается, что при таких условиях СВЧ-плазменной обработки высокая скорость удаления фоторезиста обусловлена тем, что мощность СВЧ-электромагнитной волны на этапе бесплазменной обработки поглощается материалом пластин кремния, имеющим высокое значение тангенса угла диэлектрических потерь, что приводит к интенсивному разогреву как самих пластин, так и фоторезистивной пленки.

Как показали эксперименты, увеличение мощности потребляемой установкой с 1300 до 1650 Вт при использовании источника питания СВЧ-магнетрона, собранного по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения при оптимальном давлении для плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин $P = 133$ Па, ведет к повышению скорости удаления на величину, пропорциональную коэффициенту увеличения мощности (в данном случае $k = 1,3$).

Данные экспериментов по обработке одиночных пластин и партий пластин показали на высокую воспроизводимость результатов обработки в кислородной плазме СВЧ-разряда при поддержании одинаковых технологических условий проведения процесса. Разброс времени обработки не превышал 5 %.

Использование схемы двухполупериодного выпрямления с удвоением анодного напряжения СВЧ-магнетрона приводит к увеличению скорости удаления фоторезиста в 1,3 раза по сравнению с использованием схемы однополупериодного выпрямления при одинаковых отбираемых из питающей из энергосети мощностях.

На рисунке 3 представлен график изменения скорости удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин диаметром 76 мм при обработке одновременно в камере от 1 до 9 пластин при питании магнетрона по схеме одно- и двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения с использованием в составе источника трансформатора, работающего в режиме насыщения. Рабочий газ – воздух.

Скорость удаления фоторезиста снижается с увеличением обрабатываемых образцов в камере плазмотрона, что видно из рисунка 3. Это можно объяснить также проявлением эффекта «загрузки». При взаимодействии группы пластин с плазмой существенным фактором является площадь, занимаемая пла-

стинами относительно объема реактора (его поперечного сечения и длины). Ранее установлено [1; 8], что увеличение числа пластин в реакторе снижает скорость удаления фоторезиста, это обнаружено и в наших экспериментах (рис. 3). При этом «загрузочная кривая» для СВЧ-плазмохимической обработки имеет такой же вид, как и для ВЧ-объемных систем [9], что позволяет сделать следующий вывод: в обоих случаях действует сходный механизм деструкции органических соединений, состоящий в разложении сложных молекулярных соединений в процессе взаимодействия с активированным кислородом на CO , CO_2 , H_2O .

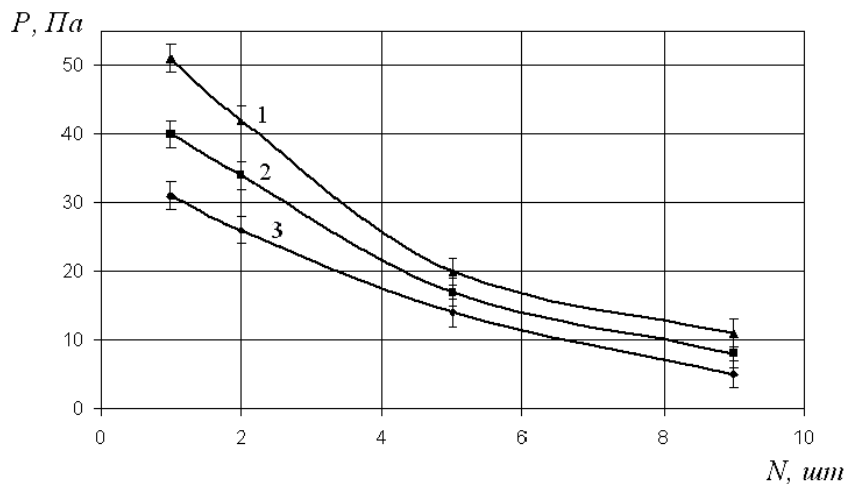


Рис. 3. Зависимость скорости удаления фоторезиста от количества пластин (1...9 шт.) в камере плазмотрона:

- 1 – использование схемы двухполупериодного выпрямления, $P = 1650$ Вт;
- 2 – использование схемы однополупериодного выпрямления, $P = 1650$ Вт;
- 3 – использование схемы однополупериодного выпрямления, $P = 1300$ Вт

Изучение характера удаления фоторезиста при различном расположении пластин относительно газового потока показало, что процесс обработки происходит быстрее и более равномерно при продольном (по отношению к газовому потоку) размещении пластин. Это говорит о том, что организация движения газового потока в зоне обработки пластин играет для СВЧ-разряда также существенную роль.

Закключение. В результате проведенного исследования установлена возможность стабильной и устойчивой работы низкочастотного СВЧ-магнетрона непрерывного действия (типа М-105, М-112) на плазменную нагрузку с изменяющимися параметрами и в условиях отсутствия в волноводном тракте устройств защиты от отраженной СВЧ-мощности с упрощенными схемами питания выпрямленным нефльтрованным напряжением. При питании СВЧ-магнетрона анодным током с частотой следования импульсов 50 и 100 Гц состав и интенсивность активных частиц и продуктов реакций в плазменном объеме существенно не изменяются.

Установлены закономерности влияния давления плазмообразующего газа, величины подводимой к разряду СВЧ-мощности, частоты следования электрических импульсов источника питания СВЧ-магнетрона, количества одновременно обрабатываемых кремниевых пластин на скорость удаления фоторезиста с их поверхности в объеме СВЧ-разряда в атмосфере кислорода и воздуха, возбуждаемого в плазмотронах резонаторного типа с частичным заполнением плазмой резонирующего объема. Установлена более высокая (в 1,3 раза) эффективность применения для целей СВЧ-плазмохимической обработки полупроводниковых пластин 100-герцовой схемы питания СВЧ-магнетрона с умножением анодного напряжения по сравнению с 50-герцовой при одинаковых величинах потребляемой источниками питания электрической мощности.

При увеличении количества одновременно обрабатываемых в камере плазмотрона кремниевых пластин обнаружено специфическое проявление эффекта «загрузки» камеры, что является следствием как эффекта частичного поглощения поступающей в область СВЧ-резонатора мощности электромагнитной волны материалом с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь (кремний), так и изменения добротности резонатора и условиями согласования разрядной области с волноводным трактом, что приводит к снижению эффективности проведения процессов СВЧ-плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин. Этот эффект наряду с эффектом проникновения СВЧ-поля в объем зоны разряда необходимо учитывать при организации процессов СВЧ-плазмохимической обработки и анализе результатов обработки материалов и структур, подверженных воздействию СВЧ-энергии.

Выяснено, что повышение количества кремниевых пластин может приводить к проявлению сильной нестабильности разряда и даже к погасанию.

Установлен эффект влияния на скорость процесса плазменного удаления фоторезистивных пленок с поверхности полупроводниковых пластин задержки начала плазмообразования по отношению к началу генерации магнетроном СВЧ-мощности. Это может быть объяснено поглощением мощности СВЧ-электромагнитной волны материалом пластин кремния в период отсутствия плазмы, в результате чего происходит их интенсивный разогрев, который значительно активизирует последующий этап плазмохимической обработки материала на их поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордусов, С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С.В. Бордусов; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. Масс-спектрометрический анализ процесса удаления фоторезиста в плазме кислорода / Б.Л. Толстых [и др.] // Электронная техника. Сер. 7. Технологии, организация производства и оборудование. – 1978. – Вып. 1(86). – С. 39 – 43.
3. Bordusau, S.V. Investigation the influence of magnetron power supply characteristics on chemical activity of microwave plasma / S.V. Bordusau, S.I. Madveika // Proc. of the XIXth Int. Symp., Brno, Czech Republic, September 5 – 9, 2011 / Brno University of Technology. – Brno, 2011. – P. 125 – 128.
4. Бордусов, С.В. Влияние электрических характеристик источника питания СВЧ-магнетрона на процесс плазменного удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин / С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2011): материалы 21-й междунар. Крымской конф., 12 – 16 сентября 2011 г. – Севастополь: Вебер, 2011. – С. 986 – 987.
5. Данилин, Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / Б.С. Данилин, В.Ю. Киреев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
6. Райзер, Ю.П. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Применение / Ю.П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яценко. – М.: Наука, 1995. – 320 с.
7. Плазменные процессы в производстве электронной техники: в 3 т. / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А.П. Достанко. – Минск: ФУАинформ, 2001. – Т. 3. – 244 с.
8. Спектральный индикатор контроля процесса удаления фоторезиста в кислородной плазме / В.М. Долгополов [и др.] // Электронная техника. Сер. 7. Технол., организ. произв. и оборуд. – 1982. – Вып. 5(114). – С. 27 – 30.
9. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии: моногр. / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А.П. Достанко и Н.К. Толочко. – Минск: Бестпринт, 2005. – 682 с.

Поступила 18.01.2012

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELECTRICAL MODES OF PLASMA FORMATION ON THE TOPICAL CHEMICAL ACTIVITY OF MICROWAVE PLASMA

S. BODRUSOV, S. MADVEDKO

The results of investigation of the microwave plasmachemical etching rate of photoresist films from the surface of silicon plates in the depending on of the form and frequency of the electrical pulses of the output signals (anode voltage and anode current of the microwave magnetron) of the power source, which constructed on the basis of operating in the saturation regime the high voltage transformer, are presented. The influence of different amounts of located in the volume of the discharge chamber semiconductor plates on the rate of plasmachemical etching of photoresist films from the surface of silicon plates are investigated. The possibility of stable and sustainable operation of the microwave magnetron (types M-105 or M-112) with the plasma load when using simplified power sources circuit with rectified unfiltered high voltage when the frequency of electrical pulses are 50 and 100 Hz is established. It was found the more effective (up to 1.3 times) microwave plasmachemical processing of semiconductor plates when the frequency of the electrical voltage pulses of the microwave magnetron power supply was 100 Hz in compare to 50 Hz for the same values of consumed electric power. It was established that the rate of the plasmachemical etching of photoresist films from the surface of semiconductor plates depends on the delay of the beginning of plasma formation in relation to the beginning of the magnetron generation of the microwave power.