_____ ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 533.9.072

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ РАЗРЯДА В ПЛАЗМЕ ПРИ РЕАКТИВНО-ИОННОМ ТРАВЛЕНИИ МАССИВНЫХ ПОДЛОЖЕК НА СОГЛАСОВАНИЕ НИЖНЕГО ЭЛЕКТРОДА С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ СМЕЩЕНИЯ

© 2022 г. С. Д. Полетаев*

Институт систем обработки изображений РАН — филиал "Федерального научно-исследовательского центра "Кристаллография и фотоника" РАН", Самара, 443001 Россия

> **E-mail: sergpolet@gmail.com* Поступила в редакцию 03.12.2021 г. После доработки 29.12.2021 г. Принята к публикации 10.01.2022 г.

Теоретически и экспериментально исследовано влияние мощности разряда в плазме при реактивно-ионном травлении массивных подложек на согласование нижнего электрода с высокочастотным генератором смещения в плазмообразующих газовых смесях на основе фреонов. Теоретически обнаружен эффект влияния мощности разряда на активную составляющую импеданса плазмы. Экспериментально установлено, что увеличение мощности разряда в среде элегаза приводит к монотонному снижению коэффициента отражения по мощности (вплоть до паспортного значения установки травления) для нижнего электрода с загруженной массивной подложкой без специального держателя. Обнаружено, что добавка аргона к элегазу с концентрацией не более 15% приводит к дополнительному снижению коэффициента отражения при более низкой мощности разряда.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, реактивно-ионное травление, индуктивно связанная плазма, моделирование COMSOL

DOI: 10.31857/S0544126922030103

1. ВВЕДЕНИЕ

Для формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов (ДОЭ) все чаще применяется метод реактивно-ионного травления (РИТ) в индуктивно связанной плазме [1-3]. РИТ является эффективным процессом для формирования микрорельефа с высокой селективностью, точным и контролируемым размером практически при любой частоте штрихов. Плазма тлеющего разряда генерируется мощным радиочастотным полем индуктора в среде активного газа, находящегося при давлении порядка 10⁻¹ Ра. На нижний электрод с установленной подложкой подается ВЧ напряжение смещения, благодаря чему подложка приобретает электрический потенциал, ускоряющий травление вследствие бомбардировки поверхности ионами плазмы. Баланс химического и атомного распыления определяет конечный эффект травления, что зависит от материала и методики (концентрации газа, мощности разряда, температуры подложки). В настоящее время разработаны и апробированы модели индуктивно связанных плазменных камер [4, 5], что позволяет производить оценку влияния методик травления на характеристики плазмы и оптимизировать плазменные процессы.

Для достижения высоких оптических характеристик ДОЭ, например, постоянства волнового фронта необходимо применять подложки большой толщины и площади [6]. Однако ранее нами был экспериментально обнаружен эффект ухудшения согласования генератора высокой частоты (ГВЧ) с нижним электродом в процессе РИТ крупногабаритных подложек, что выражается в росте коэффициента отражения по мощности выше предельного значения для установки [7]. Это приводит к затуханию ионной составляющей процесса и, как следствие, резкому снижению скорости травления. Моделирование показало, что увеличение площади и толщины подложки ведет к существенному увеличению удельной реактивной мощности, особенно на краю подложки. чем и обусловлен данный эффект. Данная проблема была решена путем применения специального держателя подложек. Однако в некоторых случаях целесообразно отказаться от его применения, что может быть обусловлено конструктивными особенностями установки, формой подложки, стремлением сделать технологический процесс травления более простым. Вместе с тем известно, что при травлении стандартных кремниевых подложек существенное влияние на согласование ГВЧ с нижним электродом оказывают условия процесса, в частности, мощность разряда в плазме, давление и состав газа в рабочей камере установки. Режим травления, обусловленный набором параметров процесса, может определять соотношение активной и реактивной составляющих нагрузки, представленной системой нижний электрод—подложка. Изменение характера нагрузки приводит к изменению коэффициента отражения по мощности, что определяет качество согласования нижнего электрода с источником питания.

Цель настоящей работы заключается в оценке влияния мощности разряда в плазме на согласование ГВЧ с нижним электродом в процессе РИТ массивных подложек без специального держателя. Численное моделирование и эксперименты показали возможность дальнейшей оптимизации процесса травления в среде элегаза (SF₆).

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численный эксперимент проводился в программной среде COMSOL Multiphysics v.5.2. К проекту были подключены программные модули Inductive coupled plasma и AC/DC Electric current. Данные модули позволяют симулировать ВЧ индукционный разряд в рабочей камере установки с одновременной подачей ВЧ смещения на нижний электрод.

Моделируемая система представлена на рис. 1 в [7]. Катушка (индуктор) генерирует и поддерживает плазму при давлении газа 0.01—10 Па. Подложка круглой формы размером 120 × 15 мм размещается на нижнем электроде. На нижний электрод подается ВЧ напряжение смещения частотой 13.56 МГц. При химических реакциях и реакциях ионного воздействия на подложке происходит процесс травления, и десорбированные атомы откачиваются из плазменного домена.

Моделирование проводилось в режиме 2D symmetry для двух различных значений мощности разряда, отличающихся кратно. Размеры основных конструктивных элементов: диаметр камеры 300 мм, диаметр нижнего электрода 200 мм, индуктор с изолятором 140 × 50 мм. Расчет проводился программным модулем Frequency-Transient для момента времени 1 мс, когда режим плазмы можно считать стационарным. Конструкция камеры и свойства доменов полностью соответствуют [7].

В результате моделирования были получены распределения удельной реактивной (на емкостной нагрузке) мощности и плотности разрядного тока. Отклонения в поведении графиков при изменении режимов травления теоретически должны означать влияние последних на импеданс плазмы и коэффициент отражения по мощности.

На рис. 1*а* показаны расчетные распределения удельной реактивной мощности вдоль поверхности подложки без держателя при различных значениях мощности разряда. Из рисунка видно, что увеличение мощности разряда в плазме с 400 до 1600 Вт приводит лишь к несущественному снижению удельной реактивной мощности при x > 5.2 см, достигая максимальной разницы в точке x = 5.8 см. Такое поведение графиков должно означать отсутствие существенного влияния мощности разряда на реактивную составляющую импеданса плазмы.

На рис. 16 показаны расчетные распределения плотности разрядного тока для мощности разряда 400 и 1600 Вт. Графики имеют одинаковый вид. Однако рост мощности разряда приводит к росту плотности разрядного тока приблизительно на 30% в каждой точке. Плотность разрядного тока соответствует комплексному току, протекающему через нижний электрод, и на фоне незначительного снижения удельной реактивной мощности рост плотности разрядного тока может быть вызван снижением активной составляющей импеданса плазмы.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты [7] показали, что с элегазом достигается наименьший коэффициент отражения по мощности (около 45%) в условиях загрузки массивной подложки без специального держателя. Это значение в 1.5 раза меньше, чем для CF_4 . Поэтому для элегаза представляется перспективным исследовать возможность дополнительной оптимизации процесса травления массивных подложек путем вариации мощности разряда в соответствии с результатами моделирования.

Новый эксперимент проводился для подложек круглой формы размером 120 × 15 мм на установке РИТ Caroline PE15 [8], обеспечивающей независимую регулировку ВЧ мощности разряда и смешения на нижнем электроде. В табл. 1 представлены результаты, показывающие влияние мощности разряда в диапазоне 300-550 Вт на коэффициент отражения по мощности для нижнего электрода с различной добавкой аргона и мощностью ВЧ напряжения на нижнем электроде 50 и 100 Вт. Расход SF₆ 1.0 л/ч. Видно, что при 50 Вт во всех трех случаях увеличение мощности разряда приводит к быстрому снижению данного параметра с 20-30 до 4%. Добавка аргона приводит к снижению коэффициента отражения при 300 Вт с 30 до 20%, что соответствует паспортному диапазону. При мощности разряда 400 Вт согласование в чистом элегазе немного лучше, чем с добавкой аргона.

При мощности ВЧ напряжения на нижнем электроде 100 Вт, в целом, согласование намного хуже, чем при 50 Вт. Однако увеличение мощности раз-



Рис. 1. Расчетное распределение удельной реактивной (на емкостной нагрузке) мощности (*a*) и плотности тока через нижний электрод (δ) для подложки диаметром 120 мм и толщиной 15 мм, расположенной на нижнем электроде по поверхности вдоль радиуса при различных значениях мощности разряда; *t* = 1 мс.

ряда и добавки аргона также приводит к снижению коэффициента отражения. Так в чистом элегазе параметр входит в пределы паспортного значения при мощности разряда 550 Вт, с расходом аргона 0.2 л/ч при 500 Вт, с расходом аргона 0.3 л/ч при 450 Вт.

В табл. 2 представлены значения коэффициента отражения по мощности, полученные с различным содержанием аргона в плазмообразующей смеси при мощности разряда 400 Вт. Видно, что увеличение расхода аргона приводит к снижению коэффициента отражения по мощности до минимального значения 32% при расходе аргона 0.6 л/ч. Дальнейшее увеличение расхода аргона не приводит к уменьшению параметра. Полученное наилучшее значение в 32% превышает предельное паспортное значение для установки (25%). Данные табл. 1 показывают, что с ростом мощности разряда согласование улучшается. Однако на согласование также влияет отношение мощности разряда к мощности на нижнем электроде. Это отношение уменьшается с добавлением аргона. Улучшение согласования может быть вызвано пропорциональным усилением степени ионизации газа с ростом мощности разряда. В установках РИТ параметры плазмы, влияющие на режим работы нижнего электрода, задаются мощностью на индукторе. Выражение для плотности разрядного тока ВЧ плазмы имеет вид:

$$j = -env(1 - 2A/L) + i\omega V/4\pi L, \qquad (1)$$

где n — концетрация электронов, v — скорость направленного колебательного движения электронов, A — амплитуда колебания электронов, L —

Р, Вт	300	350	400	450	500	550		
Мощность на нижнем электроде 50 Вт								
$P_{ m o}/P_{ m \pi}$, без добавки аргона, %	30	16	4	4	4	4		
$P_{\rm o}/P_{\rm m}, Q({\rm Ar}) = 0.2 {\rm m/r}, \%$	22	12	8	4	4	4		
$P_{\rm o}/P_{\rm m}, Q({\rm Ar}) = 0.3 {\rm m/r}, \%$	20	10	6	4	4	4		
Мощность на нижнем электроде 100 Вт								
$P_{ m o}/P_{ m n}$, без добавки аргона, %	100	72	49	35	28	14		
$P_{\rm o}/P_{\rm fr}, Q({\rm Ar}) = 0.2 {\rm m/r}, \%$	91	61	47	28	20	17		
$P_{o}/P_{\pi}, Q(Ar) = 0.3 \pi/4, \%$	80	53	39	24	17	14		

Таблица 1. Коэффициенты отражения по мощности, полученные для нижнего электрода установки РИТ Caroline PE15 в смеси элегаза с аргоном при различной мощности разряда

межэлектродное расстояние, V – напряжение на электроде.

Первое слагаемое в формуле (1) представляет собой плотность тока электронов (тока проводимости) и отражает активную составляющую импеданса плазмы. Второе – ток смещения (реактивный ток, отражающий реактивный компонент импеданса), появляющийся, как следствие несовершенства проволяших свойств плазмы. Увеличение степени ионизации газа приводит к увеличению плотности тока электронов и, как следствие, к активной составляющей импеданса, приближающейся к сопротивлению линии передачи ВЧ мощности, что улучшает согласование. Согласно простейшей модели ВЧ плазмы [9] электронный газ ВЧ плазмы колеблется относительно средней точки, что приводит к образованию слоев нескомпенсированного положительного заряда, которые практически не проводят ток. Реактивный ток вызван тем, что ионы не успевают реагировать на изменение заряда на электроде, который поступает из внешней цепи под действием ЭДС источника питания. Ток проводимости, текущий в плазме, последовательно замыкается на электрод токами смещения. Согласно все той же формуле (1) рост концентрации электронов не влияет на ток смещения, т.е. реактивная составляющая импеданса остается неиз-

Таблица 2. Коэффициенты отражения по мощности, полученные для нижнего электрода установки РИТ Caroline PE15 в условиях элегаза в смеси с аргоном и массивной подложки без держателя. Мощность индуктора 400 Вт

<i>Q</i> (SF ₆), л/ч	<i>Q</i> (Ar), л/ч	$P_{0}/P_{\Pi}, \%$
	0	49
	0.3	38
1.0	0.6	32
	0.9	32
	1.2	34
	•	•

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 51 № 3 2022

менной. Это согласиется и с результатами моделирования, согласно которым увеличение мощности разряда не приводит к существенному изменению реактивной составляющей (рис. 1а). А согласование, улучшается, по-видимому, только за счет снижения активной составляющей импеданса, что косвенно подтверждается ростом плотности разрядного тока (рис. 1 δ). Вместе с тем, ухудшение согласования с уменьшением соотношения мощностей разряда и нижнего электрода находится в соответствии со вторым слагаемым формулы (1). Реактивный ток не выражается напрямую через микроскопические параметры плазмы (включая концентрацию электронов), а пропорционально зависит от величины напряжения (мощности) на электроде и его частоты. Поэтому увеличение мощности на нижнем электроде с 50 до 100 Вт приводит к увеличению реактивной составляющей импеданса и ухудшению согласования нижнего электрода с ГВЧ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены теоретические и экспериментальные результаты, характеризующие влияние мощности разряда в плазме в процессе РИТ на согласование ГВЧ с нижним электродом для массивных подложек в плазмообразующих газовых смесях на основе фреонов.

Моделирование показало, что мощность разряда оказывает влияние на удельную реактивную мощность. Экспериментальные исследования, проведенные на установке Caroline PE15 в среде элегаза для массивных подложек без специального держателя, показали снижение коэффициента отражения по мощности с увеличением мощности разряда. Добавка аргона в небольшой концентрации существенно усиливает данный эффект. Однако достижение паспортного значения коэффициентом отражения возможно лишь при отношении мощности разряда к мощности на нижнем электроде не менее, чем 4.5 : 1. Эффект улучшения согласования с ростом мощности разряда, по всей видимости, связан с пропорциональным усилением степени ионизации газа и соответствующим снижением активной составляющей импеданса плазмы, которая приближается к сопротивлению линии передачи ВЧ мощности. При этом реактивная составляющая импеданса не изменяется. Полученные экспериментальные данные вполне соответствуют результатам моделирования. Увеличение мощности разряда в среде элегаза и несущественная (5–15%) добавка аргона позволяют оптимизировать процесс РИТ при формировании микрорельефа элементов дифракционной оптики на массивных подложках без специального держателя.

Работа выполнена в рамках госзадания "Кристаллография и фотоника" РАН (соглашение № 007-ГЗ/43363/26).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Maduro L., Boer C., Zuiddam M., Memisevic E., Conesa-Boj S. Molybdenum nanopillar arrays: Fabrication and engineering // Physica E Low Dimens. Syst. Nanostruct. 2021. V. 134. P. 114903. https://doi.org/10.1016/j.physe.2021.114903
- Huff M. Recent Advances in Reactive Ion Etching and Applications of High-Aspect-Ratio Microfabrication // Micromachines. 2021. V. 12. № 8. P. 991. https://doi.org/10.3390/mi12080991

- 3. *Ekinci H., Jahed N.M.S., Soltani M., Cui. B.* The Role of Oxygen on Anisotropy in Chromium Oxide Hard Mask Etching for Sub-Micron Fabrication // IEEE Trans. Nanotechnol. 2021. V. 20. № 33. P. 33–38. https://doi.org/10.1109/TNANO.2020.3038737
- Denpoh K. Simulation of ion energy and angular distribution functions using Monte Carlo method coupled with multidimensional radio frequency sheath model developed utilizing COMSOL Multiphysics // Jpn. J. Appl. Phys. 2014. V. 53. P. 080304. https://doi.org/10.7567/JJAP.53.080304
- Ikkurthi V.R., Matyash K., Meichsner J., Melzer A., Schneider R. Simulation of ion energy distributions in Ar/CH₄ of discharges with ion extraction // Jpn. J. Appl. Phys. 2009. V. 18 P. 035003. https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/3/035003
- Kazanskiy N.L., Uspleniev G.V., Volkov A.V. Fabricating and testing diffractive optical elements focusing into a ring and into a twin-spot // Proc. of SPIE. 2000. V. 4316. P. 193–199. https://doi.org/10.1117/12.407678
- Полетаев С.Д., Любимов А.И. Особенности согласования нижнего электрода с высокочастотным генератором смещения при реактивно-ионном травлении массивных подложек // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 4. 657.

https://doi.org/10.21883/JTF.2021.04.50630.271-20

- Берлин Е., Двинин С., Сейдман Л. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. М.: Техносфера, 2007. 176 с.
- 9. *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.* Высокочастотный емкостный разряд. М.: Наука, 1995. 320 с.