

## **Влияние металлических масок на согласование нижнего электрода с высокочастотным генератором смещения при реактивно-ионном травлении массивных подложек**

*С. Д. Полетаев<sup>1</sup>, А. И. Любимов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

<sup>2</sup> АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Теоретически и экспериментально исследовано влияние металлических масок на согласование нижнего электрода с высокочастотным генератором смещения при селективном реактивно-ионном травлении через маску массивных подложек во фреоне-14. Показано, что маски с покрытием подложек выше 30%, приводят к росту реактивной составляющей мощности на расстояниях от центра, близких к радиусу подложки. Установлено отсутствие зависимости удельной реактивной мощности от толщины и типа металла масок. Экспериментально показано, что маски с любым практически значимым коэффициентом покрытия подложки, соединённые с нижним электродом через подложкодержатель, улучшают согласование, снижая коэффициент отражения по мощности.

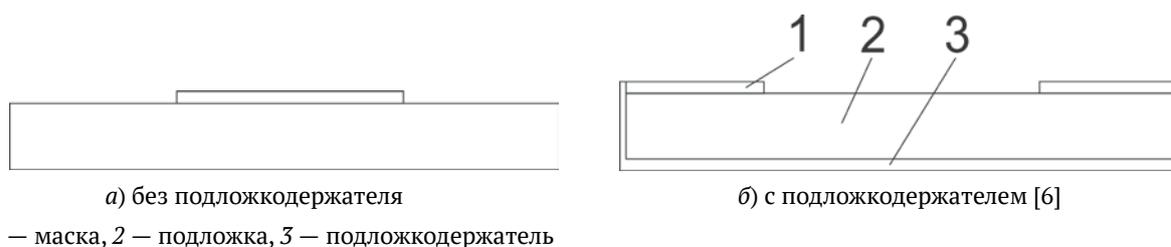
*Ключевые слова:* оптика, голография, дифракционные оптические элементы, реактивно-ионное травление, импеданс.

*Цитирование:* Полетаев, С. Д. Влияние металлических масок на согласование нижнего электрода с высокочастотным генератором смещения при реактивно-ионном травлении массивных подложек / С. Д. Полетаев, А. И. Любимов // НОЛОЕХРО 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 251–256.

### **Введение**

В настоящее время получили развитие технологии формирования дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с применением метода реактивно-ионного травления (РИТ) путем переноса в подложку периодической рельефной структуры, создаваемой в слоях различных фоторезистов [1, 2]. Обычно для этого используются дополнительные металлические маски [3, 4], так как прямой процесс переноса рельефной структуры из-за высокой скорости травления слоя фоторезиста по отношению к скорости травления материала, в котором требуется изготовить микрорельеф, может быть не осуществим.

В ряде случаев необходимо обеспечить высокие оптические характеристики ДОЭ, например, постоянство волнового фронта, и, тогда для их изготовления должны использоваться относительно массивные подложки [5]. Однако при увеличении габаритных размеров подложки, в том числе ее толщины, возникает проблема согласования генератора высокой частоты (ГВЧ) с нижним электродом установки РИТ [6], что выражается в резком увеличении коэффициента отражения по мощности (превышающего предельное паспортное значение) для ГВЧ, соединённого с нижним электродом. Это приводит к резкому снижению скорости



1 — маска, 2 — подложка, 3 — подложкодержатель

**Рис. 1.** Варианты моделируемых подложек с металлической маской;

травления и невозможности дальнейшего проведения процесса. С целью поиска способов устранения этой проблемы в [6] был успешно исследован и испытан подложкодержатель специальной конструкции. Тем не менее, в работе не было рассмотрено влияние металлических масок на согласование нижнего электрода с ГВЧ.

В настоящей работе исследуется влияние металлических масок на поверхности крупногабаритных подложек круглой формы на согласование нижнего электрода с ГВЧ в установках РИТ с привлечением численного эксперимента в программной среде Comsol multiphysics.

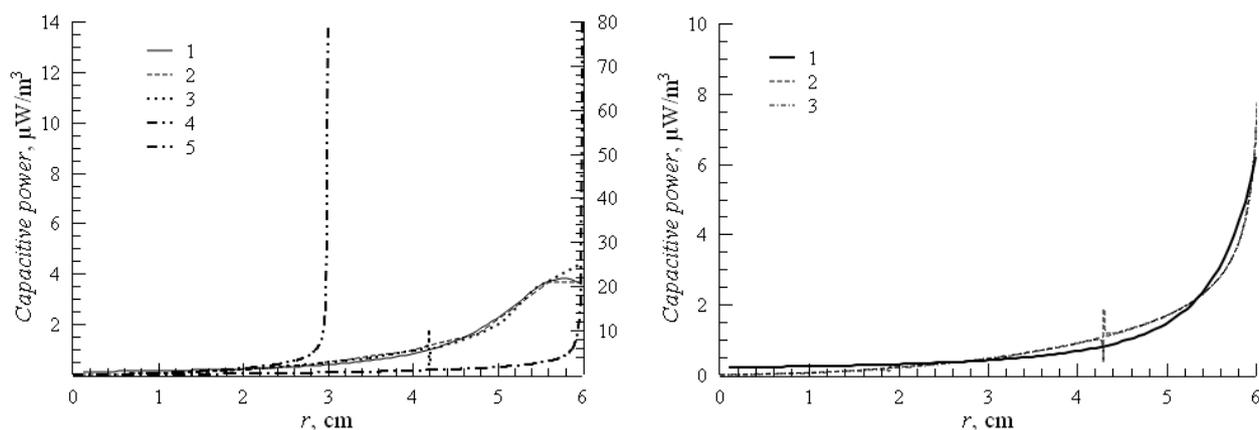
### 1. Постановка задачи для моделирования

В [6] подробно рассматриваются все параметры, необходимые для проведения численного эксперимента. Поэтому ниже будут представлены лишь их основные особенности.

Для моделирования была выбрана программная среда COMSOL Multiphysics v. 5.2 с подключением в проект модулей Inductive coupled plasma и AC/DC Electric current, позволяющими симулировать ВЧ индукционный разряд в камере установки с ВЧ смещением, подаваемым на нижний электрод.

Моделирование проводилось в режиме 2D symmetry, поскольку конструкция вакуумной камеры симметрична. Размеры основных конструктивных элементов: диаметр камеры 30 см, диаметр нижнего электрода 20 см, индуктор с изолятором 14×5 см. На рис. 1 приведен вид моделируемых подложек с различным геометрическим рисунком масок, выполненных из алюминия. Подложка размещается на нижнем электроде и имеет размеры 12×1,5 см. Расчёт проводился программным модулем Frequency-Transient в интервале  $10^{-8}$ – $10^{-3}$  с для 21 значений времени, распределенных равномерно. Временной интервал определялся, исходя из установления стационарного режима плазмы.

В результате моделирования были получены распределения удельной реактивной (на ёмкостной нагрузке) мощности, характеризующие коэффициент отражения по мощности для нижнего электрода.

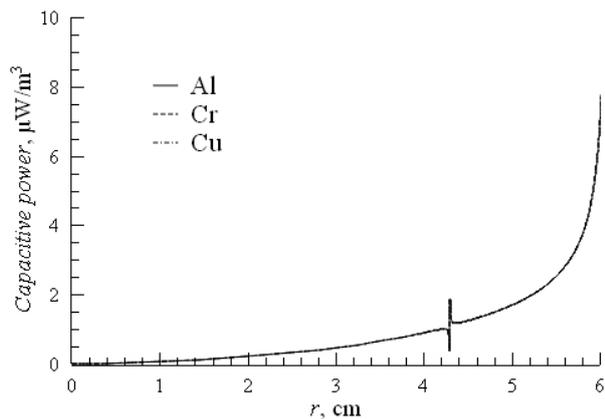


а) подложка расположена на нижнем электроде      б) подложка расположена в подложкодержателе [6]  
 1 – Относительная площадь маски 0%, 2 – 30%, 3 – 70%, 4 – 100%,  
 5 – 100% для подложки размером  $6 \times 1,5$  см;

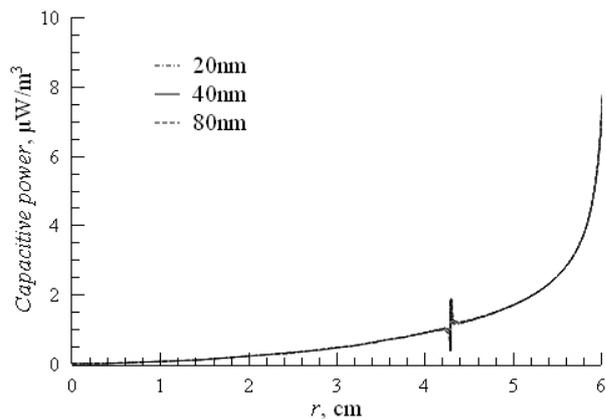
**Рис. 2.** Расчётное распределение удельной реактивной (на ёмкостной нагрузке) мощности для подложки размером  $12 \times 1,5$  см по поверхности вдоль радиуса,  $t = 1$  мс

## 2. Результаты моделирования

На рис. 2а показано расчётное распределение удельной реактивной мощности вдоль поверхности для подложек с масками, соответствующими рис. 1а. Графику 4 соответствует правая шкала. Из рисунка видно, что для подложек с покрытием маской до 30% поверхности графики выглядят одинаково. Лишь график 3 (коэффициент заполнения подложки маской 70%) при  $r > 5,5$  см показывает некоторый рост мощности, достигающий приблизительно 15% на краю подложки по сравнению с графиками 1 и 2. Также графики 2 и 3 показывают небольшой симметричный скачок реактивной мощности на краю маски, амплитуда которого зависит от координаты края. Для подложки со 100% заполнением маски до  $r = 5,8$  см график идёт идентично остальным, однако, на самом краю подложки наблюдается многократный рост реактивной мощности. Для ответа на вопрос, обусловлено ли это коронным эффектом на металлическом крае, было проведено моделирование для подложки размером  $6 \times 1,5$  см (график 5). Величина коронного эффекта при уменьшении радиуса подложки не должна существенно зависеть от размера подложки. Видно, что на самом краю удельная реактивная мощность для графика 5 достигает  $14 \text{ мкВт/м}^3$ , что почти в 6 раз меньше, чем для графика 4. Это означает, что подложка размером  $6 \times 1,5$  см должна вносить значительно меньшую реактивную составляющую и оказывать меньшее влияние на коэффициент отражения по мощности, а величина коронного эффекта не должна быть существенной. Вероятная причина столь сильного влияния металлической маски на удельную реактивную мощность на краю подложки заключается в характере воздействия ВЧ потенциала нижнего электрода на поведение химически активных частиц плазмы. В этом случае маску можно рассматривать, как сверхкороткий проводник большого сечения. Сечением такого проводника является её поверхность. Из электротехники известно, что ВЧ ток протекает в поверхностном слое проводника (скин-слой). Плотность тока в скин-слое будет максимальной. В результате на краю подложки наблюдается повышенная



**Рис. 3.** Влияние типа металла масок на удельную реактивную мощность ( $t = 1$  мс)



**Рис. 4.** Влияние толщины алюминиевой маски на удельную реактивную мощность ( $t = 1$  мс)

концентрация заряженных частиц без значительного увеличения степени ионизации плазмы, как это имеет место быть при коронном эффекте. При этом важно отметить, что в случае применения подложкодержателя [6] характер протекания ВЧ тока будет другим. Здесь сечение проводника будет располагаться по толщине плёнки.

Этой же причиной может быть объяснён разрыв кривых, наблюдаемый на границе подложки и маски. Провал графика правее границы может свидетельствовать о перераспределении заряженных частиц плазмы в ограниченном пространстве таким образом, что на краю маски будет наблюдаться их повышенная концентрация. Поскольку ёмкость монотонно убывает от края к центру подложки, о чём свидетельствуют графики, то величина всплеска также будет убывать при перемещении границы маска-подложка в этом направлении.

На рис. 2б показана расчётная зависимость удельной реактивной мощности от коэффициента заполнения подложки маской для случая с подложкодержателем [6]. Моделирование проводилось для варианта расположения маски, соответствующего рис. 1б. Из рисунка видно, что графики, соответствующие 30% и 70% заполнению, идут идентично. График 1, соответствующий случаю без маски в интервале  $r$  от 3 до 5,4 см идёт немного ниже графиков 2 и 3, а при  $r > 5,4$  см немного выше (в пределах 5%). На самом краю удельная реактивная мощность для подложек с масками приблизительно на 20% больше, чем для подложек без маски. Для данного случая неоднозначное поведение графика 1 не позволяет произвести оценку влияния маски на коэффициент отражения по мощности.

Вместе с тем графики 2 и 3 показывают на порядок меньшие значения удельной реактивной мощности на краю подложки по сравнению со случаем без специального подложкодержателя (график 4, рис. 2а), что должно приводить к меньшим значениям коэффициента отражения по мощности.

На рис. 3 и 4 показано влияние типа металла масок и толщины алюминиевой маски на удельную реактивную мощность. Видно, что все графики на обоих рисунках идут идентично. Это означает отсутствие влияния данных параметров на коэффициент отражения по мощно-

**Табл. 1.** Коэффициенты отражения по мощности, полученные на нижнем электроде для установки РИТ Caroline PE15 с различными газами для подложкодержателя с алюминиевой маской и без маски. Мощность индуктора 400 Вт, расход аргона в смеси с фреонами 0,6 л/ч, расход фреонов 1,0 л/ч, толщина маски 40 нм

Среда		CHF <sub>3</sub> /Ar	CF <sub>4</sub> /Ar	SF <sub>6</sub> /Ar	Ar
Коэффициент отражения по мощности	Подложка без маски	32%	25%	18%	19%
	Подложка с маской	26%	21%	16%	16%

сти. Такой результат можно объяснить высокой электропроводностью металлов, что эффективно устраняет накопление заряженных частиц на поверхности подложки. При этом отличия электропроводности для различных металлов несущественно влияют на данный процесс.

### 3. Эксперимент

В табл. 1 представлены результаты эксперимента, показывающие влияние алюминиевой маски с 70% покрытием массивной подложки на согласование ГВЧ с нижним электродом в установке РИТ Caroline PE15 [7] в различных плазмообразующих средах. Согласование оценивалось по коэффициенту отражения падающей на электрод ВЧ мощности от ГВЧ. Подложка размером 12×1,5 см устанавливалась в подложкодержатель и помещалась на нижний электрод, имеющий круглую форму диаметром 20 см. Расход аргона и фреонов задавался в соответствии с результатами, полученными в [6]. Ободок подложкодержателя устанавливался таким образом, чтобы его выступ находился на поверхности подложки, подвергаемой воздействию плазмы. Это обеспечивает электрический контакт маски с держателем. Для повышения надёжности и равномерности контакта между выступом ободка и маской дополнительно прокладывалась фольга. Из таблицы видно, что обеспечение электрического контакта маски с нижним электродом приводит к заметному улучшению согласования. В этом случае снижение коэффициента отражения по мощности составляет в большинстве случаев до 15%, а для CHF<sub>3</sub> — около 20%. Такой результат показывает возможность дополнительного согласования нижнего электрода с ГВЧ в установках РИТ в процессе формирования оптического микро рельефа через металлические маски.

### Заключение

В работе представлены теоретические и экспериментальные результаты по влиянию металлических масок на РИТ массивных подложек в плазмообразующих газовых смесях на основе различных фреонов.

С учётом [6] можно заключить, что снижение коэффициента отражения по мощности и соответствующее улучшение согласования нижнего электрода с ГВЧ в процессе РИТ массивных подложек возможно путём применения подложкодержателя специальной конструкции, как без добавки, так и с добавкой аргона, в зависимости от типа плазмообразующего фреона. При этом металлические маски дополнительно снижают коэффициент отражения по мощности на 10–20%.

Применение описанных конструкций и методик РИТ позволяет изготавливать дифракционные элементы на массивных подложках, применимых для работы в составе схем с лазерами высокой мощности видимого и УФ диапазонов.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках госзадания «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007-ГЗ/43363/26) и договора о НИР №08/2017 (заказчик НПО «Государственный институт прикладной оптики»).

### Список источников

- [1] **Волков, А. В.** Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине / А. В. Волков, Н. Л. Казанский, О. Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. — 1998. — № 18. — С. 130–133.
- [2] **Rangelow, I. W.** [Reactive ion etching for high aspect ratio silicon micromachining](#) / I. W. Rangelow // Surface and Coatings Technology. — 1997. — Vol. 97. — № 1–3. — P. 140–150.
- [3] **Milenin, A. P.** [The soi planar photonic crystal fabrication: patterning of CR using Cl<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> plasma etching](#) / A. P. Milenin, C. Jamois, R. B. Wehrspohn, M. Reiche // Microelectronic Engineering. — 2005. — Vol. 77. — № 2. — P. 139–143.
- [4] **Veiko, V. P.** [Laser-induced local oxidation of thin metal films: physical fundamentals and applications](#) / V. P. Veiko, A. G. Poleshchuk // Springer Series In Materials Science. — 2014. — Vol. 195. — P. 149–171.
- [5] **Kazanskiy, N. L.** [Fabricating and testing diffractive optical elements focusing into a ring and into a twin-spot](#) / N. L. Kazanskiy, G. V. Uspleniev, A. V. Volkov // Proceedings of SPIE. — 2000. — Vol. 4316. — P. 193–199.
- [6] **Полетаев, С. Д.** [Особенности согласования нижнего электрода с высокочастотным генератором смещения при реактивно-ионном травлении массивных подложек](#) / С. Д. Полетаев, А. И. Любимов // Журнал технической физики. — 2021. — Том 91. — № 4. — С. 657–663.
- [7] **Берлин, Е.** Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. Берлин, С. Двинин, Л. Сейдман. — М. : Техносфера, 2007. — 172 с.