

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

© С.Д. Полетаев¹, А.И. Любимов²

¹ Институт систем обработки изображений Российской академии наук — филиал Федерального научно-исследовательского центра „Кристаллография и фотоника“ Российской академии наук, 443001 Самара, Россия

² Научно-производственное объединение „Государственный институт прикладной оптики“, 420075 Казань, Россия

E-mail: sergpolet@gmail.com

Поступила в Редакцию 21 июня 2021 г.

В окончательной редакции 18 июля 2021 г.

Принята к публикации 13 августа 2021 г.

Теоретически и экспериментально исследовано влияние степени асимметрии расположения металлических масок на согласование нижнего электрода с высокочастотным генератором смещения при селективном реактивно-ионном травлении массивных подложек в плазмообразующих газовых смесях на основе фреона-14. Теоретически показано отсутствие влияния асимметрии расположения маски на удельную реактивную мощность. Показано, что на краю подложки, особенно с маской, возникает резкий рост плотности высокочастотного тока, доказывающий преимущественно поверхностный (торцевой) характер его протекания. Установлено влияние расположения маски на поведение плотности электрических зарядов, коррелирующее с распределением плотности высокочастотного тока в приповерхностном слое подложки. Перераспределения плотности заряда химически активных частиц плазмы на краю маски при этом обнаружено не было. В соответствии с полученными теоретическими результатами экспериментально показано, что металлические маски с соотношением длин сторон 36/0 мм снижают коэффициент отражения по мощности в пределах 5%.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, реактивно-ионное травление, индуктивно связанная плазма, контактная маска, нижний электрод, моделирование COMSOL Multiphysics.

DOI: 10.21883/FTP.2021.12.51715.9700

1. Введение

В настоящее время получили развитие технологии формирования дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с применением метода реактивно-ионного травления (РИТ) в индуктивно связанной плазме для реализации в подложке периодической рельефной структуры [1–7]. В процессе плазменного травления высокоэнергетические и реактивные частицы взаимодействуют и вступают в реакцию с поверхностными атомами на подложке. Для понимания поведения плазмы и оптимизации плазменных процессов травления все больший интерес представляет моделирование. В настоящее время разработаны и апробированы модели индуктивно связанных плазменных камер с приложенным высокочастотным (ВЧ) напряжением смещения на нижний электрод с установленной подложкой [8–11], применяемых в установках РИТ.

В ряде случаев необходимо обеспечить высокие оптические характеристики ДОЭ, например постоянство волнового фронта, и тогда для их изготовления должны использоваться относительно массивные подложки [12,13]. Однако существующие модели не рассматривают влияние габаритных характеристик подложек на согласование генератора высокой частоты (ГВЧ) с нижним электродом. В [14] путем моделирования в

программной среде COMSOL multiphysics было установлено, что увеличение площади и толщины подложки ведет к существенному увеличению удельной реактивной мощности, что в свою очередь должно означать увеличение коэффициента отражения по мощности на нижнем электроде при его работе на ГВЧ. Результаты моделирования были подтверждены экспериментально. Рост коэффициента отражения по мощности (превышающего предельное паспортное значение) приводит к резкому снижению скорости травления материала и невозможности дальнейшего проведения процесса. Для преодоления данной проблемы был разработан и успешно исследован подложкодержатель специальной конструкции.

Для создания ДОЭ обычно применяется двухстадийная технология с дополнительными металлическими масками [2,15,16]. На первом этапе микрорельеф через слой фоторезиста передается в металлическую пленку, которая становится селективной контактной маской на втором этапе передачи микрорельефа в подложку. Необходимость двухстадийного процесса обусловлена тем, что прямой перенос рельефной структуры из-за высокой скорости травления слоя фоторезиста по отношению к скорости травления материала, в котором требуется изготовить микрорельеф, может быть неосуществим. В [17] было показано, что металлические маски с лю-

бым практически значимым коэффициентом покрытия подложки улучшают согласование нижнего электрода с ГВЧ, снижая коэффициент отражения по мощности в пределах 15%. Тем не менее в работе не было исследовано влияние асимметрии расположения металлических масок относительно центра подложки на согласование нижнего электрода с ГВЧ. В реальных случаях топологический рисунок элемента часто бывает произвольным — например, когда на одной пластине должны быть изготовлены несколько небольших ДОЭ. При этом с целью формирования микрорельефа подложка подвергается травлению целиком. В настоящей работе исследуется влияние степени асимметрии расположения металлических масок на поверхности крупногабаритных подложек круглой формы в специальном держателе на согласование нижнего электрода с ГВЧ в установках РИТ с привлечением численного эксперимента в программной среде COMSOL Multiphysics.

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 моделировать ВЧ индукционный разряд в рабочей камере установки с ВЧ смещением, подаваемым на нижний электрод.

Вид моделируемой системы представлен на рис. 1 в [14]. Специальная катушка (индуктор) генерирует и поддерживает плазму при давлении газа 0.01–10 Па. Подложку помещают сверху на нижний электрод. Ионы ускоряются электродом и бомбардируют подложку. При химических реакциях и реакциях ионного воздействия на подложке происходит процесс травления, и десорбированные атомы откачиваются из плазменного домена.

Поскольку в настоящем случае решение задачи необходимо было получить для всей поверхности подложки, моделирование проводилось в режиме двумерной (2D) симметрии. Контактные маски имели различную степень асимметрии расположения. Размеры основных конструктивных элементов: диаметр камеры 300 мм, диаметр нижнего электрода 200 мм, индуктор с изолятором 14 × 50 мм. На рис. 1 приведена моделируемая подложка с алюминиевыми металлическими масками. Толщина

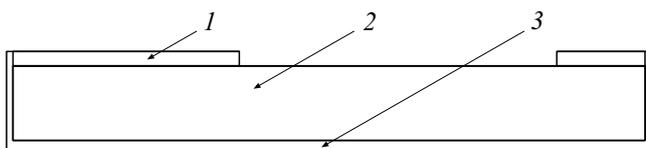


Рис. 1. Моделируемая подложка с несимметрично расположенной металлической маской, вмонтированная в подложкодержатель [14]: 1 — маска, 2 — подложка, 3 — подложкодержатель.

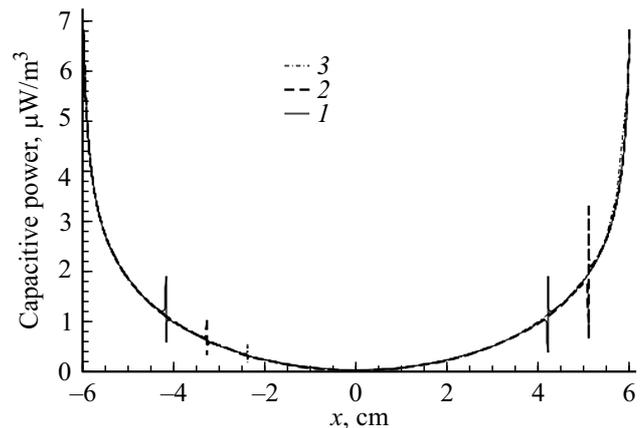


Рис. 2. Расчетное распределение удельной реактивной (на емкостной нагрузке) мощности для подложки диаметром 120 мм, толщиной 12 мм по поверхности вдоль радиальной координаты x . Соотношение длин сторон маски, мм: 1 — 18/18, 2 — 27/9, 3 — 36/0; $t = 1$ мс.

маски 40 нм. Подложкодержатель, исследованный ранее в [14], представляет собой металлический каркас, покрывающий все грани подложки, за исключением рабочей поверхности. Расчет проводился программным модулем Frequency–Transient для момента времени $t = 1$ мс, когда плазма является стационарной. Конструкция камеры и свойства доменов полностью соответствуют [14].

В результате моделирования были получены распределения удельной реактивной (на емкостной нагрузке) мощности, характеризующие коэффициент отражения по мощности для нижнего электрода, а также другие важные параметры, характеризующие физические процессы, протекающие в индуктивной плазме.

В [14] моделирование проводилось нами для подложки диаметром 120 мм и толщиной 15 мм, размещенной на нижнем электроде. Тем не менее в настоящей работе для подложки данного размера и металлической маски, занимающей > 30% диаметра подложки, в симметричном режиме получить решение оказалось невозможным в силу нарастающей дивергенции в процессе расчета. Поэтому численный эксперимент проводился для подложек размером 120 × 12 мм и с металлической маской, занимающей 30% диаметра подложки, что позволило получить устойчивый результат.

На рис. 2 показана расчетная зависимость удельной реактивной мощности от отношения длин маски, обуславливающего асимметрию, для случая с подложкодержателем. В данном случае смещение маски относительно центра подложки не приводит к каким-либо необычным эффектам. Лишь в краевой части маски наблюдается скачок удельной реактивной мощности с амплитудой, увеличивающейся к краю подложки, что ранее нами уже отмечалось. Дополнительного прироста значений на краю подложки с изменением соотношения длин сторон маски не наблюдается.

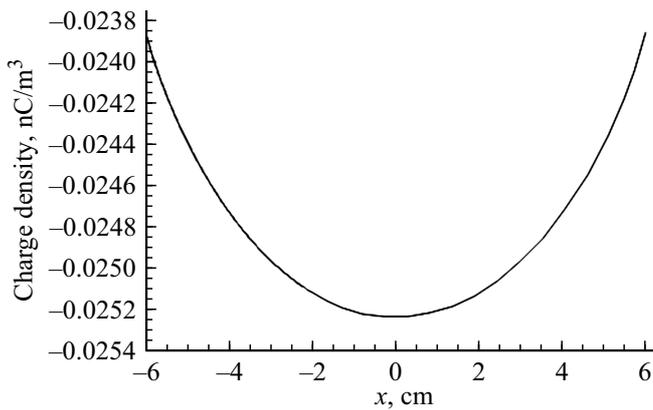


Рис. 3. Расчетное распределение плотности заряда ХАЧ плазмы у поверхности подложки для маски с соотношением длин сторон 36/0 мм; $t = 1$ мс.

В работе [17] нами было выдвинуто предположение, что скачок удельной реактивной мощности на краю маски и его зависимость от расстояния до края подложки связаны с поверхностным характером протекания ВЧ тока через подложку и нижний электрод, вызывающим перераспределение концентрации частиц плазмы в ограниченном пространстве. Эта гипотеза была выдвинута в связи с тем, что на основании численного эксперимента для подложек меньшего размера было выявлено несущественное влияние коронного эффекта как другой возможной причины. Последняя причина тем более маловероятна, что коронный эффект обычно проявляет себя при высоком давлении газа. Для оценки выдвинутой гипотезы были проведены дополнительные исследования. На рис. 3 представлено расчетное распределение плотности заряда (Q_p) химически активных частиц (ХАЧ) плазмы у поверхности подложки с крайней асимметрией расположения маски. Левая часть кривой относительно координаты $x = 0$ соответствует участку с маской, правая часть — участку без маски. Из рисунка видно, что плотность заряда ХАЧ меняется симметрично от 0.0252 в центре до 0.0238 нКл/м³ на краю подложки, не испытывая каких-либо отклонений на границе маски. Это означает, что плотность заряда ХАЧ не зависит от наличия металлической маски, не является причиной данного эффекта и может в определенной мере объяснить происходящее только на краю подложки. Скачок значений удельной реактивной мощности может быть также вызван резким изменением значений комплексной нагрузки на границе маска–подложка, обусловленным возникновением дополнительных индуктивных составляющих и резонансных контуров, имеющих место в длинных линиях с несогласованной и частично согласованной нагрузкой [18]. Для дальнейшего поиска ответа на данный вопрос были проведены дополнительные исследования.

На рис. 4 представлены зависимости плотности тока J на поверхности подложки с крайней асимметрией

расположения маски. В области подложки, где маска отсутствует (правая часть кривой), плотность тока остается почти неизменной вплоть до $x = 50$ мм, на самом краю подложки начинает возрастать, достигая -1500 кА/см², что в ~ 3 раза выше, чем в точке $x = 0$. На границе с маской значение плотности тока претерпевает скачок с амплитудой -2000 кА/см². Далее J растет, достигая -3000 кА/см² на краю подложки, что является доказательством гипотезы о связи роста удельной реактивной мощности на краю подложки с поверхностным характером протекания тока. В целом на краю подложки с маской плотность тока в ~ 2 раза выше, чем на противоположном краю, что может быть обусловлено увеличением тока проводимости за счет металлической маски.

На рис. 5 приведены расчетные распределения пространственной плотности электрических зарядов в поверхностном слое подложки. При симметричном расположении маски (кривая 1) пространственная плотность электрических зарядов изменяется симметрично. На гра-

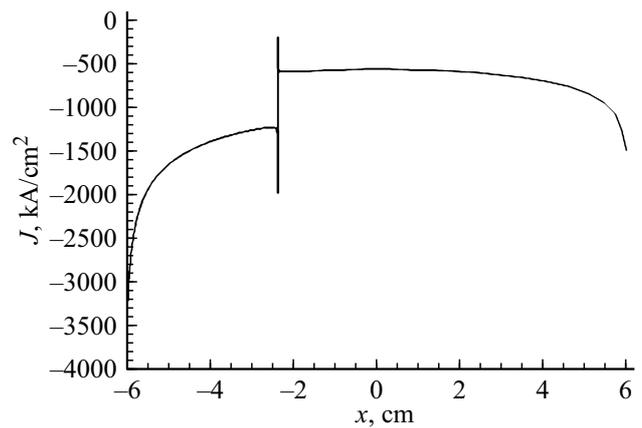


Рис. 4. Расчетное распределение плотности тока J у поверхности подложки для маски с соотношением длин сторон 36/0 мм; $t = 1$ мс.

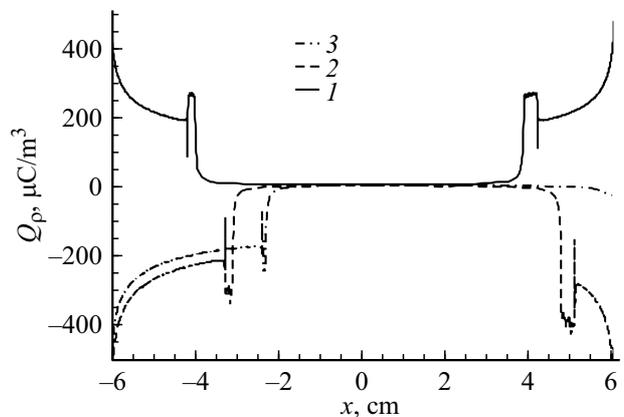


Рис. 5. Расчетные распределения пространственной плотности электрических зарядов в поверхностном слое подложки. Соотношение длин сторон маски, мм: 1 — 18/18, 2 — 27/9, 3 — 36/0; $t = 1$ мс.

Коэффициенты отражения по мощности, полученные на нижнем электроде для установки РИТ Caroline PE15 с различными газами для подложкодержателя с алюминиевой маской и без маски

Подложка	$P_{\text{refl}}/P_{\text{inc}}, \%$			
	CHF ₃ /Ar	CF ₄ /Ar	SF ₆ /Ar	Ar
С симметричной маской	30	24	18	19
С асимметричной маской	28	22	17	18

Примечание. Мощность индуктора 400 Вт, расход аргона 0.6 л/ч, расход фреонов 1.0 л/ч, толщина маски 40 нм.

нице с маской наблюдается резкий рост с последующим резким снижением пространственной плотности электрических зарядов амплитудой ~ 100 мкКл/м³, а затем такой же стремительный рост до 450 мкКл/м³ на краях подложки. Примечательно, что в области нахождения металлической маски плотность электрических зарядов на 2 порядка выше, чем в области без маски.

При частичной асимметрии маски (кривая 2) кардинально меняется картина происходящего. В этом случае полярность зарядов меняется. При этом, несмотря на смещение маски в правой части, плотность зарядов не меняется до границы с маской, оставаясь близкой к нулю. Однако всплеск на границе с маской превышает таковой с противоположной стороны на $\sim 10\%$. На краях подложки значения плотности зарядов достигают 500 мкКл/м³, что на 10% больше по сравнению со случаем с симметричным расположением маски.

Распределение плотности электрических зарядов с крайним расположением маски принципиально не отличается от варианта с частичным смещением (кривая 3). Однако в области, где маска отсутствует, значение параметра постоянно и составляет 10 мкКл/м³, лишь на краю подложки достигая 25 мкКл/м³.

Приведенные данные показывают резкий рост плотности электрических зарядов в области маски, коррелирующий с поведением плотности ВЧ тока.

3. Эксперимент

Для проверки полученных теоретических результатов были проведены эксперименты с целью оценки влияния алюминиевой маски с соотношением длин сторон 36/0 мм на согласование ГВЧ с нижним электродом. Эксперимент проводился на установке РИТ Caroline PE15 [19] в плазмообразующих средах на основе фреонов. Маска была получена магнетронным способом. Согласование оценивалось по коэффициенту отражения ($P_{\text{refl}}/P_{\text{inc}}$) падающей на электрод ВЧ мощности от ГВЧ. Подложка диаметром 120 мм и толщиной 15 мм устанавливалась в подложкодержатель и помещалась на нижний электрод, имеющий круглую форму диаметром 200 мм. Расход аргона и фреонов задавался в соответствии с

результатами, полученными в [14]. Ободок подложкодержателя устанавливался таким образом, чтобы его выступ находился на поверхности подложки, подвергаемой воздействию плазмы. Это обеспечивает электрический контакт маски с держателем. Для повышения надежности и равномерности контакта между выступом ободка и маской дополнительно прокладывалась фольга. Результаты эксперимента представлены в таблице. Из таблицы видно, что маска снижает коэффициент отражения по мощности, хотя и незначительно (в пределах 5%). При идентичности кривых на рис. 2 полученный экспериментальный результат можно объяснить снижением амплитуды всплеска удельной реактивной мощности на границе маски при перемещении в край подложки.

4. Заключение

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

Обнаруженный рост плотности ВЧ тока на краю подложки может быть обусловлен увеличением тока проводимости за счет металлической маски. Сочетание этого эффекта со скачком значения на границе подложка–маска в принципе доказывает выдвинутую ранее идею о поверхностном (торцевом) протекании тока и ее связи с данным явлением. Об этом же свидетельствуют данные о распределении плотности электрических зарядов в приповерхностном слое подложки, коррелирующие с поведением плотности ВЧ тока. Вместе с тем теоретически обнаружен интересный эффект смены полярности электрических зарядов при появлении асимметрии расположения металлической маски. При этом перераспределения плотности заряда ХАЧ плазмы на краю маски обнаружено не было. Таким образом, эффект скачкообразного изменения значения удельной реактивной мощности на границе подложка–маска, по всей видимости, не затрагивает плазму и связан со спецификой прохождения электрического тока через подложку и нижний электрод.

Расчеты показали, что поведение распределения удельной реактивной мощности не зависит от степени асимметрии расположения маски, за исключением амплитуды всплеска на границе с подложкой. Тем не менее эксперименты показали, что металлические маски с соотношением длин сторон 36/0 мм снижают коэффициент отражения по мощности в пределах 5%, что в принципе укладывается в представленные теоретические результаты (рис. 2). Поэтому в случаях травления массивных подложек с произвольным топологическим рисунком можно ожидать дополнительного незначительного улучшения согласования нижнего электрода с ГВЧ по сравнению с симметрично расположенными масками.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.L. Flamm, V.M. Donnelly. VLSI Electron. Microstructure Sci., **8**, 190 (1985).
- [2] S.B. Odinkov, G.R. Sagatelyan, M.S. Kovalev, K.N. Bugorkov. J. Opt. Technol., **86** (5), 317 (2019). DOI: 10.1364/JOT.86.000317.
- [3] V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov. Opt. Laser Technol., **39** (6), 1234 (2007). DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004
- [4] N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov. *Optical materials: Microstructuring surfaces with off-electrode plasma* (CRC Press, 2017). DOI: 10.1201/b21918.
- [5] *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*, ed. by Victor A. Soifer (John Wiley & Sons, Inc., 2002).
- [6] V. Korolkov, D. Belousov. *Int. Conf. Information Technol. and Nanotechnol. (ITNT)*, (2020) p. 1. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253171
- [7] Н.М. Лебедева, Т.П. Самсонова, Н.Д. Ильинская, С.И. Трошков, П.А. Иванов. ЖТФ, **90** (6), 997 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49289.12-20 [N.M. Lebedeva, T.P. Samsonova, N.D. Il'inskaya, S.I. Troshkov, P.A. Ivanov. JTF, **65** (6), 957 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220060195]
- [8] B. Zhang, X. Zhang. Vacuum, **174**, 109215 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109215>
- [9] C. Jia, J. Linhong, Z. Yu, S. Yixiang. J. Semicond., **31** (3), 032004 (2010). DOI: 10.1088/1674-4926/31/3/032004
- [10] T. Xiao, D. Ni. Chem. Eng. Res. Des., **164**, 113 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.013>
- [11] A.O. Brezmes, C. Breitkopf. Vacuum, **109**, 52 (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.06.012>
- [12] П.А. Носов, А.Ф. Ширанков, Р.С. Третьяков, А.Г. Григорьянц, А.Я. Ставертий. Изв. вузов. Приборостроение, **59** (12), 1028 (2016). DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-12-1028-1033.
- [13] N.L. Kazanskiy, G.V. Uspleniev, A.V. Volkov. Proc. SPIE, **4316**, 193 (2000). DOI: 10.1117/12.407678
- [14] С.Д. Полетаев, А.И. Любимов. ЖТФ, **91** (4), 657 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.04.50630.271-20 [S.D. Poletayev, A.I. Lyubimov. JTF, **66** (4), 639 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221040150]
- [15] E.T. Lim, J.S. Ryu, C.W. Chung. Thin Sol. Films, **665**, 1 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.08.046>
- [16] M.A. Butt, S.N. Khonina N.L. Kazanskiy. Computer Optics, **43** (6), 1079 (2019). DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1079-1083
- [17] С.Д. Полетаев, А.И. Любимов. Письма ЖТФ, **47** (11), 44 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.11.51008.18717
- [18] И.Е. Ефимов, Г.А. Останькович. *Радиочастотные линии передачи* (М., Связь, 1977).
- [19] Е. Берлин, С. Двинин, Л. Сейдман. *Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок* (М., Техносфера, 2007).

Редактор Л.В. Шаронова

Influence of asymmetry of metal mask arrangement on matching of the lower electrode with a high-frequency displacement generator during reactive-ion etching of massive substrates

S.D. Poletayev¹, A.I. Lyubimov²

¹ Institute of Image Processing Systems, Branch of Federal Scientific Research Center Crystallography and Photonics, 443001 Samara, Russia

² State Institute of Applied Optics, 420075 Kazan, Russia

Abstract The effect of asymmetry degree in the arrangement of metal masks on the matching of the lower electrode with a high-frequency displacement generator during selective reactive-ion etching of massive substrates in plasma-forming gas mixtures based on freon-14 is studied theoretically and experimentally. Theoretically, the absence of influence of the asymmetry of mask location on the specific reactive power is shown. It is shown that at the substrate edge, especially with a mask, there is a sharp increase in the RF current density, which proves mainly the surface (end) nature of its flow. The influence of the mask location on the electric charge density behavior, which correlates with the RF current density distribution in the near-surface layer of the substrate, is established. No redistribution of the charge density of the chemically active plasma particles at the edge of the mask was detected. In accordance with the theoretical results obtained, it is experimentally shown that metal masks with a side length ratio of 36/0 mm reduce the power reflection coefficient within 5%.