

05;11

## Исследование влияния неоднородности СВЧ-поля на порог мультипакторного разряда на диэлектрике

© М.А. Лобаев, О.А. Иванов, В.А. Исаев, А.Л. Вихарев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

E-mail: ioleg@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2009 г.

Представлены результаты исследования мультипакторного разряда на поверхности диэлектрика (кварца) в высокочастотном СВЧ-резонаторе, возбуждаемом на моде  $TE_{01n}$  в 3-см диапазоне длин волн. Установлено, что существенное влияние на порог разряда оказывают величина и направление поперечной силы, возникающей вблизи поверхности диэлектрика за счет градиента высокочастотного потенциала. Так, наличие силы, отталкивающей электроны от поверхности, приводит к существенному увеличению порога, а притягивающей — к его понижению. Экспериментально подтверждено, что возникновение мультипактора в неоднородных электромагнитных полях возможно и в отсутствие внешних статических полей, возвращающих эмитированные электроны к поверхности диэлектрика.

PACS: 52.80.Pi, 52.80.Vp

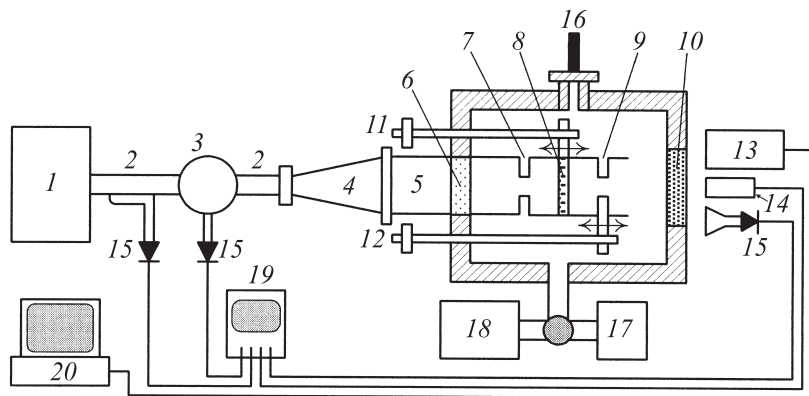
Известно, что в вакууме в микроволновых полях на поверхности диэлектрика развивается специфическая форма разряда — мультипакторный разряд (часто используются термины вторично-эмиссионный разряд или мультипактор). Механизм развития разряда связан с лавинообразным размножением числа электронов при их бомбардировке поверхности диэлектрика. Условием возникновения мультипакторного разряда является наличие внешних полей, возвращающих электроны к поверхности, и превышение электронами энергии, при которой коэффициент вторичной эмиссии диэлектрика равен единице. Развитие разряда протекает в две стадии. На первой возникает собственно мультипакторный разряд, который приводит к десорбции газа с поверхности. На второй стадии происходит СВЧ-пробой образовавшегося газового облака. Возникающая при этом плазма эффективно поглощает электро-

магнитную энергию, что приводит к разрушению поверхности диэлектрика и нарушению работы СВЧ-устройств. Поэтому изучение условий возникновения и подавления мультипакторного разряда является важной задачей при разработке выходных окон мощных СВЧ-генераторов, ускоряющих диэлектрических структур электрон-позитронных ускорителей и активных компрессоров СВЧ-импульсов [1–3].

Теоретическому исследованию мультипакторного разряда посвящен ряд работ [4–7]. Рассмотрение обычно проводится на основе анализа уравнений движения электронов в электромагнитных полях вблизи поверхности диэлектрика. При этом априори предполагается, что существует постоянное электрическое поле  $E_{dc}$ , обусловленное статическим зарядом и возвращающее электроны к поверхности. Расчеты показывают, что порог пробоя сильно зависит от величины начального возвращающего поля  $E_{dc0}$ , природа происхождения которого может быть различной. Например, в [7] было показано, что возникновение мультипакторного разряда на поверхности диэлектрика в сильных электромагнитных полях возможно и в отсутствие внешних статических полей, так как высокочастотное электромагнитное поле само может обеспечить возвращение эмитированных электронов к поверхности эмиссии. Экспериментальному изучению мультипакторного разряда посвящено существенно меньшее число работ [8–10]. При этом в основном исследовались пороги мультипактора, возникающего на поверхности СВЧ-окон из различных диэлектрических материалов в поле бегущей электромагнитной волны.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования мультипакторного разряда на поверхности размещенной в высокочастотном резонаторе кварцевой пластины. Эксперименты проводились при высоких значениях напряженности электрического поля  $E \geq 30$  kV/cm, соответствующих плотности потока мощности 2–3 MW/cm<sup>2</sup>. Целью исследования было изучение влияния неоднородности СВЧ-поля на порог возникновения мультипактора.

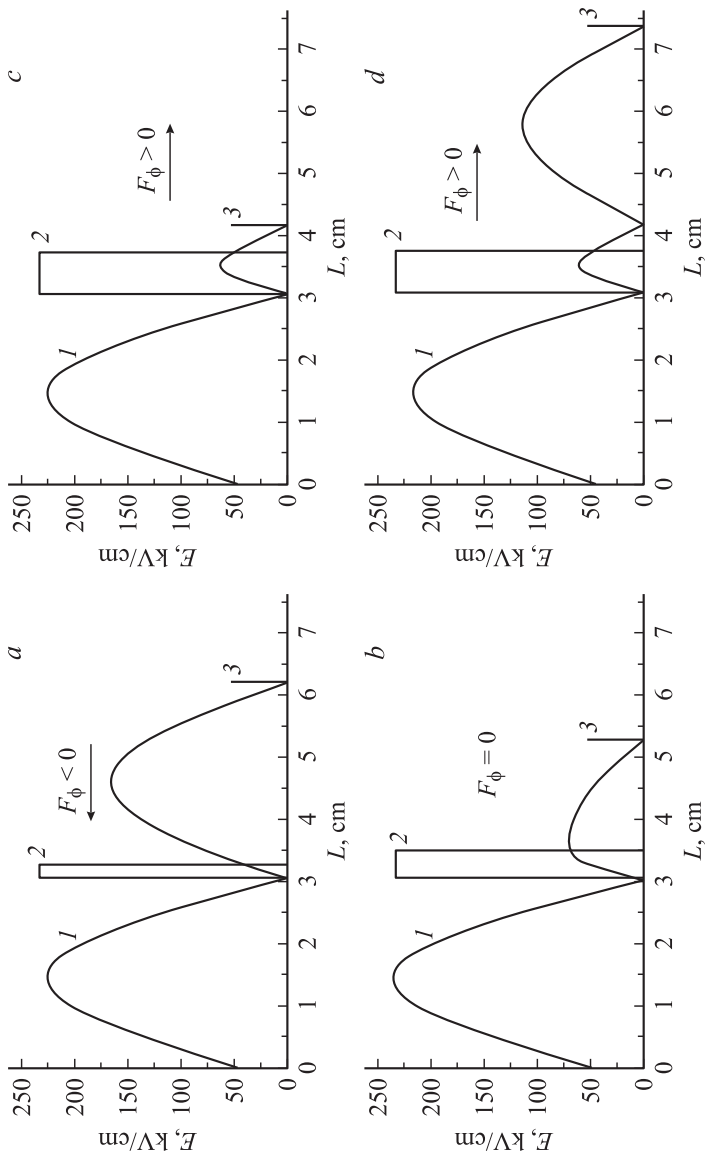
Исследование мультипакторного разряда проводилось на установке, схема которой приведена на рис. 1. Основу установки составлял резонатор, возбуждаемый на частоте 9.4 GHz (мода  $TE_{01n}$ ) и образованный цилиндрическим волноводом диаметром 45 mm, ограниченным двумя сменными диафрагмами. В одну из пучностей электрического поля стоячей волны в резонаторе помещались кварцевые пластины с различной толщиной. В эксперименте использовались полированные пластины с



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — магнетрон, 2 — прямоугольный волновод, 3 — циркулятор, 4 — преобразователь Марье, 5 — круглый волновод, 6 — СВЧ-окно, 7 — неподвижная диафрагма, 8 — диэлектрическая пластина, 9 — подвижная диафрагма, 10 — оптически и СВЧ прозрачное окно, 11 — механизм перемещения окна, 12 — механизм перемещения диафрагмы, 13 — спектрограф, 14 — ФЭУ, 15 — СВЧ-детектор, 16 — датчик давления, 17 — форвакуумный насос, 18 — ионизационный насос, 19 — осциллограф, 20 — компьютер.

шероховатостью  $R_a = 0.1 \text{ mm}$  и толщиной:  $d_1 = 2.3 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 4.2 \text{ mm}$ ,  $d_3 = 6 \text{ mm}$ . Толщина пластин была рассчитана таким образом, чтобы при установке одной стороны пластины в узел стоячей волны на другой поверхности пластины, в зависимости от ее толщины, реализовывались случаи: 1 — возвращающей электроны пондеромоторной силы ( $d_1$ ); 2 — отсутствия силы ( $d_2$ ); 3 — отталкивающей силы ( $d_3$ ). Таким образом, условия возникновения мультипактора создавались только с одной стороны пластины с заданным направлением и величиной пондемоторной силы. Характерное продольное распределение среднеквадратичного электрического поля в резонаторе, соответствующее максимуму радиального распределения моды  $TE_{012}$  для каждой из пластин, приведено на рис. 2.

Измеренная нагруженная добротность резонатора, в зависимости от толщины исследуемой пластины и диаметра входной диафрагмы 7, составляла величину  $Q_L = (6-15) \cdot 10^3$ . Такая добротность обеспечи-



**Рис. 2.** 1 — распределение амплитуды электрического поля в максимуме моды  $TE_{01}$  вдоль оси резонатора при входной мощности 100 кВт, 2 — диэлектрическая пластина, 3 — положение диафрагмы. Толщина пластины: а — 2.3 mm; б — 4.2 mm; с — 6 mm; д — 6 mm (мода  $TE_{013}$ ).

вала высокие напряженности электрического поля на поверхности диэлектрика даже при низком уровне мощности СВЧ-генератора. Резонатор помещался в вакуумную камеру, откачиваемую до давления  $p \approx 10^{-6}$  Торг. Расстояние между диафрагмами (длина резонатора) и положение диэлектрической пластины в резонаторе могли изменяться извне с помощью специальных юстировочных устройств 11, 12 (рис. 1). Наблюдение за разрядом осуществлялось через окно 10 в торце вакуумной камеры. Импульсы СВЧ-излучения мощностью до 250 кВт и длительностью  $\tau = 2-6 \mu\text{s}$  через преобразователь Марье, формирующий моду  $TE_{01}$  круглого волновода, подавались на вход резонатора через безотражательное вакуумное окно б. В эксперименте регистрировались падающая, отраженная от резонатора СВЧ-мощность, а также мощность, прошедшая через резонатор.

Мультипакторный разряд возникал при превышении некоторой пороговой мощности и регистрировался по изменению формы сигналов прошедшей и отраженной СВЧ-мощности. Возникновение разряда приводило к выходу резонатора из резонанса и резкому возрастанию отраженного и падению прошедшего сигналов. Характерное время развития разряда, определяемое по длительности фронтов этих сигналов, не превышало 100–150 ns. Величина электрического поля  $E_b$  на поверхности диэлектрика в момент возникновения разряда определялась по измеренной СВЧ-мощности с учетом структуры поля в резонаторе, рассчитанной методом FDTD [11] (рис. 2).

Для понимания механизма возникновения мультипакторного разряда и определения величины порогового поля важным является выяснение природы силы, возвращающей электроны на поверхность диэлектрика. Известно, что в неоднородном СВЧ-поле на электрон действует усредненная пондеромоторная сила [12], пропорциональная градиенту электрического поля:

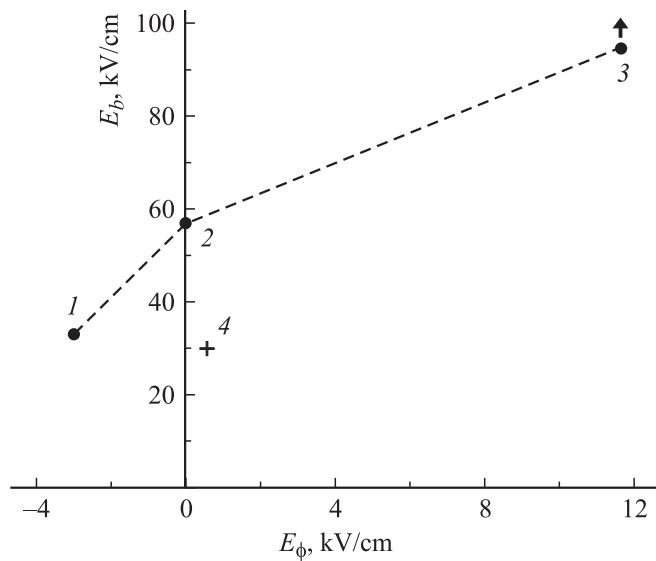
$$F_\phi = \frac{e^2}{4m\omega^2} \nabla |E|^2,$$

где  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона,  $\omega$  — частота излучения. На начальной стадии развития разряда эта сила, в зависимости от знака градиента, может либо возвращать эмитированные электроны к поверхности, либо отталкивать их. Впервые экспериментальные исследования влияния неоднородности СВЧ-поля на мультипактор были предприняты в работе [8]. Диэлектрическая пластина из LiF помещалась в вакуумированный, прямоугольный волновод, закороченный с одного

конца. Импульс СВЧ-излучения на частоте 3 GHz возбуждал в волноводе стоячую волну на моде  $TE_{10}$ . Смещая пластину относительно пучности стоячей волны, можно было изменять величину и направление силы, возвращающей электроны на поверхность. Однако обнаружить влияние пондеромоторной силы на порог возникновения мультипактора в этом эксперименте не удалось. Возможно, это было связано с низким значением градиента высокочастотного потенциала, который, согласно нашим оценкам, не превышал  $E_\phi = E_\phi/e = 100$  V/cm. Кроме того, мода  $TE_{10}$  не очень удобна для исследования разряда из-за наличия нормальной составляющей электрического поля на поверхности волновода, которая может приводить к дополнительной эмиссии электронов со стенки, тем самым затрудняя интерпретацию полученных результатов. Наши же эксперименты проводились в высокочастотном резонаторе в условиях, когда градиент высокочастотного потенциала вблизи поверхности диэлектрика мог изменяться в широких пределах 0.8–12 kV/cm. Кроме того, мы использовали моду  $TE_{01}$  круглого волновода, электрическое поле которой не имеет нормальной составляющей на его стенке и параллельно поверхности диэлектрика.

Полученная в экспериментах зависимость порога возникновения мультипакторного разряда от градиента высокочастотного  $E_\phi$  потенциала для различных пластин приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что пондеромоторная сила, направленная к поверхности диэлектрика, приводит к понижению порога пробоя, а направленная от поверхности — к его повышению. При этом порог пробоя для пластины  $d_3$  не был достигнут и точка 3 на рис. 3 соответствует максимальному полю, которое мог обеспечить генератор СВЧ-излучения. Повышение порога связано с тем, что в данном случае основная часть электронов, эмитированных с поверхности диэлектрика, выталкивалась пондеромоторной силой на стенки резонатора и не участвовала в формировании электронной лавины, развивающейся за счет вторичной эмиссии. Таким образом, можно утверждать, что наличие градиента высокочастотного потенциала, в зависимости от структуры СВЧ-поля вблизи поверхности диэлектрика, может как стимулировать, так и подавлять развитие мультипактора. При этом для возникновения разряда в неоднородном СВЧ-поле нет необходимости привлекать гипотезу о существовании начальных статических полей на поверхности образца.

В экспериментах исследовалось также влияние на порог мультипактора знакопеременной в пространстве пондеромоторной силы. Такая



**Рис. 3.** Зависимость порога мультипакторного разряда от градиента высокочастотного потенциала: 1 — кварцевая пластина толщиной  $d_1 = 2.3$  мм, 2 —  $d_2 = 4.2$  мм, 3 —  $d_3 = 6$  мм, 4 — порог пробоя для случая знакопеременной в пространстве пондеромоторной силы.

ситуация часто возникает при наличии отражения от установленного в вакуумном тракте СВЧ-приборов диэлектрического окна и реализации в окрестности последнего частично стоячей волны. В эксперименте для этого к продольной структуре поля (рис. 2, *c*), путем удлинения резонатора, была добавлена еще одна вариация поля (рис. 2, *d*). При этом непосредственно на поверхности кварца пондеромоторная сила, как и раньше, была направлена от поверхности, а в соседней пучности ее направление менялось на противоположное. Эксперименты показали, что такая структура поля приводит к снижению порога возникновения мультипактора (точка 4, рис. 3). Действительно, как показывают расчеты, в этом случае вблизи узла СВЧ-поля формируется сложная потенциальная яма для электронов. Образование этой ямы обусловлено продольной и радиальной неоднородностью электрического поля  $TE_{013}$  волны. В результате электроны, эмитированные с поверхности, не

уходят на стенку резонатора, а попадают в потенциальную яму и после многократных отражений, под воздействием высокочастотного потенциала, могут возвратиться на поверхность диэлектрика, участвуя в ее бомбардировке. Поэтому при образовании перед диэлектрическим окном стоячей волны снижение амплитуды СВЧ-поля на его поверхности даже при наличии отрицательного градиента высокочастотного потенциала может и не приводить к увеличению электрической прочности окна.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что электропрочность и пропускная способность выходных окон мощных вакуумных СВЧ-приборов сильно зависит от характера неоднородности высокочастотного поля вблизи поверхности диэлектрика.

## Список литературы

- [1] *Preinst D.H.* // IRE Trans. ED. 1961. V. 8. P. 243.
- [2] *Power J.G., Gay W., Gold S.H.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 164801-1.
- [3] *Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Ivanov O.A.* et al. // Phys. Rev. Special Topics-Accelerators and Beams (to be published).
- [4] *Kishek R.A., Lau Y.Y.* // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. P. 193.
- [5] *Ang L.K., Lau Y.Y., Kishek R.A., Gilgenbach R.M.* // IEEE Transactions on plasma science. 1998. V. 26. N 3. P. 290.
- [6] *Sazontov A., Semenov V., Буянова М.* et al. // Phys. of Plasma. 2005. V. 12. P. 093501.
- [7] *Буянова М.Н., Нечаев В.Е., Семенов В.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. В. 10–11. С. 988.
- [8] *Гришин Л.В., Дорофеев А.А., Косый И.А.* и др. // Труды ФИАН. 1977. Т. 92. С. 82.
- [9] *Matsumoto H.* // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. 1999. V. 2. P. 1124.
- [10] *Neuber A., Dickens J., Hemmert D.* et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1998. V. 26. P. 296.
- [11] *Taflove A.* Advances in computational electrodynamics. The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston, London, Artech House, 1998. 724 p.
- [12] *Гапонов А.В., Миллер М.А.* // ЖЭТФ. 1958. Т. 7. С. 168.