

УДК 537.525.6

Мультипакторный разряд на диэлектрике при различных углах наклона электрического СВЧ-поля относительно поверхности диэлектрика

А. С. Сахаров, В. А. Иванов, М. Е. Кобышев

Проведено численное и аналитическое исследование вторично-эмиссионного электронного разряда (мультипактора) на диэлектрике в вакууме при различных углах наклона α вектора напряженности электрического СВЧ-поля относительно поверхности диэлектрика с самосогласованным учетом электрического поля объемного заряда эмитированных электронов. Рассчитана мощность, поглощаемая в разряде, и получены аналитические оценки для средней плотности тока вторичных электронов и средней энергии электронов, бомбардирующих поверхность диэлектрика, в зависимости от угла α и осцилляционной энергии электронов в СВЧ-поле. Показано, что зависимость поглощенной мощности от угла наклона внешнего СВЧ-поля имеет минимум при $\alpha \sim 20\text{--}30^\circ$.

PACS: 52.80.Pi

Ключевые слова: мультипакторный разряд, СВЧ-поле, диэлектрик, вторичные электроны.

Введение

Электрическая прочность вакуумных СВЧ-устройств с диэлектрическими окнами представляет собой актуальную проблему в различных областях науки и технологии. Диэлектрические окна широко применяются в СВЧ-генераторах, в системах наземной и космической связи, в различных технологических устройствах по созданию новых материалов, а также в системах СВЧ-нагрева плазмы в токамаках и стеллараторах. При большой интенсивности СВЧ-излучения на диэлектрических окнах и металлических элементах таких устройств могут развиваться различные типы микроволновых разрядов. Микроволновые разряды поглощают СВЧ-излучение, вызывают искажение передаваемых сигналов, а также приводят к нагреву поверхностного слоя диэлектрических окон и последующему их разрушению [1].

Важной стадией микроволнового разряда в вакууме является вторично-эмиссионный электронный микроволновый разряд (мультипактор) [2, 3], который может инициировать другие типы разрядов: филаментированный (контрагированный) мик-

роволновый разряд, плазменно-факельный микроволновый разряд и др. Мультипактор возникает в результате развития электронной лавины, вызванной вторичной электронной эмиссией (ВЭЭ) с поверхностей элементов СВЧ-устройств, бомбардируемых электронами, набравшими энергию в СВЧ-поле.

Электроны, генерируемые в мультипакторе, приводят к ионизации остаточного газа вблизи поверхности диэлектрика [4], а также к возбуждению электронной подсистемы диэлектрика с накоплением в тонком (~ 1 мкм) поверхностном слое диэлектрика дефектов в виде центров окраски и к нагреву этого слоя [5]. Большие градиенты температуры ($\geq 10^4$ К/см), возникающие в поверхностном слое на стадии мультипактора, приводят к появлению микротрещин на поверхности диэлектрика, к снижению порогов плазмообразования в СВЧ-поле и, как следствие, к СВЧ-пробою и разрушению диэлектрика [6—8]. Мультипактор, развивающийся на поверхностях диэлектрических элементов СВЧ-устройств, принято называть односторонним мультипактором (в отличие от двухстороннего мультипактора, развивающегося между металлическими стенками волновода или СВЧ-резонатора) [2, 3, 9, 10].

В классическом одностороннем мультипакторе [11] электрическое поле СВЧ-колебаний направлено вдоль поверхности диэлектрика. В этом случае эмитированные электроны возвращаются обратно на поверхность под действием возвращающей силы F_z , обусловленной положительным зарядом, остающимся на диэлектрической поверх-

Сахаров Александр Сергеевич, старший научный сотрудник.

Иванов Вячеслав Алексеевич, заведующий отделом.

Кобышев Михаил Евгеньевич, научный сотрудник.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. (499) 503-83-44. E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 20 июля 2012 г.

© Сахаров А. С., Иванов В. А., Кобышев М. Е., 2012

ности (или пондеромоторной силой, если амплитуда СВЧ-поля неоднородна вдоль нормали к поверхности [12]). Для развития разряда необходимо, чтобы осцилляционная энергия электронов в СВЧ-поле $\varepsilon_{\text{osc}} = (eE_0/\omega)^2/2m_e$ (здесь E_0 — амплитуда СВЧ-поля, e и m_e — заряд и масса электрона) превышала первую критическую энергию ε_1 , при которой коэффициент ВЭЭ δ становится равным единице.

В работе [13] была получена следующая оценка для коэффициента поглощения СВЧ-мощности односторонним мультипактором на диэлектрике

$$\kappa = W_{\text{abs}}/W_{\text{inc}} \approx 0,004 \cdot (T_e[\text{eV}])^{1/2},$$

где W_{abs} — мощность, поглощаемая в мультипакторе на единицу площади поверхности диэлектрика;

$W_{\text{inc}} = cE_0^2/8\pi$ — плотность потока энергии СВЧ-излучения, падающего на диэлектрик;

T_e — температура вторичных электронов, эмитируемых с поверхности диэлектрика;

c — скорость света в вакууме.

Согласно этой оценке, для типичных значений T_e порядка 1—2 эВ мощность, поглощаемая в мультипакторе, должна составлять около 1 % от мощности падающего излучения. Примерно такая же оценка коэффициента поглощения (~1 %) была получена в [14] при анализе эффектов, связанных с объемным зарядом эмитированных электронов в мультипакторе на поверхности диэлектрика. Несмотря на относительно малый коэффициент поглощения, абсолютная величина плотности мощности, выделяемой на поверхностях диэлектрических окон в современных мощных источниках СВЧ-излучения ($W_{\text{inc}} \sim 1 \text{ кВт/см}^2$), может оказаться вполне достаточной для того, чтобы вызвать недопустимые тепловые и механические напряжения в поверхностном слое диэлектрика, приводящие к появлению микротрещин на поверхностях окон.

Численное моделирование одностороннего мультипактора [15] методом частиц в ячейке показало, что коэффициент поглощения СВЧ-мощности слабо возрастает с увеличением интенсивности СВЧ-излучения. Так, при увеличении осцилляционной энергии электронов на два порядка (от ≈ 200 эВ до ≈ 20 кэВ) коэффициент поглощения возрастал в четыре раза (от 0,5 до 2 %). Однако причина такого возрастания в [15] не обсуждалась.

В [16, 17] была получена аналитическая формула, согласно которой при энергиях осцилляции электронов в СВЧ-поле ε_{osc} , значительно превышающих первую критическую энергию ε_1 , коэффициент поглощения СВЧ-мощности в одностороннем мультипакторе нарастает с увеличением ε_{osc} пропорционально логарифму отношения $\varepsilon_{\text{osc}}/\varepsilon_1$, что выражается в виде соотношения

$$\kappa \approx \frac{v_{Te}}{c} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \ln(\varepsilon_{\text{osc}} / \varepsilon_1). \quad (1)$$

Численное моделирование методом частиц в ячейке [17] подтвердило применимость этой формулы не только при $\varepsilon_{\text{osc}} \gg \varepsilon_1$, но также и при $\varepsilon_{\text{osc}} \sim \varepsilon_1$.

Следует отметить, что односторонний мультипактор на диэлектрике может развиваться также в случае, когда электрическая компонента СВЧ-поля направлена под углом к поверхности диэлектрика [18, 19]. Такие условия возникают на поверхностях диэлектрических вставок на стенках волноводов, а также если СВЧ-окно наклонено относительно оси микроволнового пучка. Подобная ситуация может также возникать в экспериментах по обработке кристаллических диэлектриков с помощью мультипактора в целях изменения свойств их поверхностей (например, создание поверхностного слоя лазерно-активной среды для использования в интегральных схемах, окрашивание ювелирных кристаллов и т. п.). В этом случае оптимальный режим обработки кристалла может определяться не только мощностью, вкладываемой в разряд, но также и направлением электрической компоненты СВЧ-поля. В связи с этим значительный интерес представляет исследование зависимости коэффициента поглощения мощности в мультипакторе от угла наклона СВЧ-поля относительно поверхности диэлектрика.

В данной работе проведено численное и аналитическое исследование квазистационарного мультипактора на диэлектрике при различных углах α между направлением электрической компоненты СВЧ-поля и поверхностью диэлектрика. Рассчитана мощность, поглощаемая в разряде, и получены аналитические оценки для средней плотности тока вторичных электронов и средней энергии электронов, бомбардирующих поверхность диэлектрика, в зависимости от угла α и осцилляционной энергии электронов в СВЧ-поле.

Теоретическая модель

Для численного моделирования одностороннего мультипактора на диэлектрике был разработан численный код 1D3V (одномерный в координатном пространстве и трехмерный в пространстве скоростей электронов) [17], основанный на методе частиц в ячейке. Геометрия задачи показана на рис. 1.

Решаются нерелятивистские уравнения движения модельных частиц (электронов) в электрическом поле, представляющем собой суперпозицию внешнего однородного СВЧ-поля $E_0 \sin \omega t$, направленного под углом α к поверхности диэлектрика, и поля разделения зарядов $E_\sigma = -\nabla \varphi$, направленного

вдоль оси z и представляющего собой сумму электрического поля положительного поверхностного заряда на диэлектрике и поля объемного заряда эмитированных электронов. Электростатический потенциал φ находится из одномерного уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 4\pi en_e \quad (2)$$

с граничным условием при $z = 0$:

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z \rightarrow 0} = -4\pi\sigma, \quad (3)$$

где σ — плотность поверхностного заряда на диэлектрике.

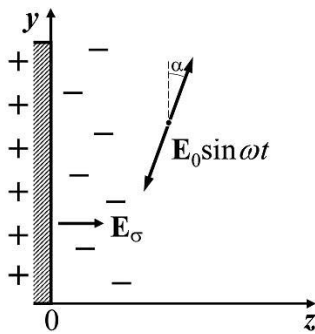


Рис. 1. Геометрия задачи:

E_0 — вектор напряженности электрического СВЧ-поля;
 E_σ — поле разделения зарядов; α — угол между направлением E_0 и поверхностью диэлектрика, расположенной в плоскости $z = 0$

Падение частицы на диэлектрик сопровождается ВЭЭ с коэффициентом размножения электронов $\delta(\varepsilon, \theta)$, являющимся заданной функцией энергии ε и угла падения θ электрона. В данной работе для описания коэффициента $\delta(\varepsilon, \theta)$ используется эмпирическая формула Вона [20] с нулевой энергией отсечки:

$$\delta(\varepsilon, \theta) = \delta_m(\theta) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m(\theta)} \exp \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m(\theta)} \right) \right)^k, \quad (4)$$

где $\delta_m(\theta) = \delta_{m0}(1 + \theta^2/2\pi)$ — максимальное значение δ при заданном угле падения θ (отсчитываемом от нормали к поверхности);

$\varepsilon_m(\theta) = \varepsilon_{m0}(1 + \theta^2/\pi)$ — энергия, соответствующая максимальному значению δ при заданном θ ;

$k = 0,62$ при $\varepsilon < \varepsilon_m(\theta)$; $k = 0,25$ при $\varepsilon > \varepsilon_m(\theta)$;

δ_{m0} — максимальное значение δ при $\theta = 0$;

ε_{m0} — энергия, соответствующая максимальному значению δ при $\theta = 0$.

В настоящее время эта формула широко используется для теоретического анализа и численных расчетов мультипакторов на металлах и диэлектриках [9, 11, 13—15, 19, 21].

Эмитированным частицам присваиваются значения скоростей с плотностями вероятности, соот-

ветствующими тепловому (полуМаксвелловскому с $v_{z0} > 0$) распределению по скоростям: $f(v_0) \sim \exp \times (-v_0^2 / 2v_{Te}^2)$.

Отражение электронов от поверхности в данной работе не учитывается.

Частицы, попавшие на правую границу расчетной области ($z = z_{\max}$), зеркально отражаются.

Для инициации мультипактора в начальный момент времени $t = 0$ с поверхности диэлектрика инжектируется некоторое количество затравочных частиц. Следует отметить, что количество затравочных частиц влияет лишь на время развития мультипактора и не влияет на параметры установившегося (квазистационарного) мультипактора, рассматриваемого в данной работе. Максимальное число модельных частиц в данных расчетах составляло $\sim 10^6$.

"Параллельный" мультипактор

Наиболее подробно в литературе рассмотрен случай, когда внешнее электрическое СВЧ-поле направлено параллельно поверхности диэлектрика ($\alpha = 0$) [11, 13—15, 17, 21]. Далее мультипактор, развивающийся в этих условиях на поверхности диэлектрика, будем называть "параллельным" мультипактором. Такая геометрия разряда типична для мультипакторов, возбуждаемых на выходных окнах гиротронов и входных окнах систем ввода СВЧ-мощности в вакуумные камеры установок с магнитным удержанием плазмы.

В данном разделе вкратце изложены основные результаты, полученные в [17] при теоретическом исследовании квазистационарного параллельного мультипактора на поверхности диэлектрика в предположении, что коэффициент ВЭЭ описывается формулой (4).

В одномерном параллельном мультипакторе движение эмитированных электронов вдоль поверхности диэлектрика (по оси y) обусловлено внешним СВЧ-полем, а их движение по нормали к поверхности (по оси z) и последующее возвращение на поверхность определяются электростатическим полем заряда на поверхности диэлектрика и слоя объемного заряда эмитированных электронов.

При осцилляционных энергиях электронов в СВЧ-поле, превышающих первую критическую энергию ε_1 , среднее число вторичных электронов, выбитых за период колебаний поля с поверхности диэлектрика, больше числа падающих электронов, в результате чего процесс размножения электронов приобретает лавинообразный характер. Развитие лавины сопровождается формированием элек-

тронного слоя вблизи поверхности диэлектрика, в то время как сама поверхность заряжается положительно. По мере того, как положительный заряд на диэлектрике растет, время, через которое эмитированные электроны возвращаются обратно на поверхность, уменьшается, и, соответственно, уменьшается энергия, набираемая электронами в СВЧ-поле за время пролета. В итоге электронная лавина постепенно замедляется и затем выходит на насыщение.

В режиме насыщения среднее значение величины δ за период осцилляции СВЧ-поля равняется 1, что соответствует энергии падающих электронов порядка ϵ_1 . Если осцилляционная энергия много больше первой критической энергии ($\epsilon_{osc} \gg \epsilon_1$), то время пролета электрона Δt в установившемся (квазистационарном) мультипакторе должно быть много меньше, чем ω^{-1} , иначе эмитированные электроны успеют набрать энергию, большую, чем ϵ_1 , и количество электронов в слое будет продолжать расти. Это означает, что при $\epsilon_{osc} \gg \epsilon_1$ внешнее поле практически не изменяется за время пролета вторичных электронов. В этом случае можно использовать так называемое приближение "постоянного поля", при котором характеристики мультипактора определяются мгновенным значением $E_y(t)$, т. е. зависят от времени, как от параметра.

Анализ структуры мультипактора в этом приближении показал [17], что максимальная плотность электронов в слое объемного заряда на поверхности диэлектрика зависит от времени как $n_{e0}(t) \approx 0,7E_y^2(t)/\epsilon_1$. Соответственно, средняя плотность потока электронов с поверхности равна

$$\langle n_e v_z \rangle \approx \frac{\langle n_{e0} \rangle v_{Te}}{\sqrt{2\pi}} \approx \frac{0,35 E_0^2}{\sqrt{2\pi} \epsilon_1} v_{Te} \approx 3,5 \frac{\epsilon_{osc}}{\epsilon_1} n_{cr} v_{Te}, \quad (5)$$

где $n_{cr} = m\omega^2/4\pi e^2$ — критическая плотность электронов для внешнего СВЧ-поля.

Характерное значение нормальной компоненты электрического поля в параллельном мультипакторе по порядку величины равно

$$E_z \sim \sqrt{\frac{T_e}{\epsilon_1}} E_0. \quad (6)$$

Объемный заряд электронов сконцентрирован в очень тонком слое, толщина которого также осциллирует во времени (уменьшаясь в максимумах $E_y^2(t)$ и увеличиваясь в минимумах) и по порядку величины равна $(v_{Te}/\omega)(\epsilon_1/\epsilon_{osc})^{1/2}$. При температуре вторичных электронов $T_e \sim 1$ эВ и частоте внешнего поля $f_0 = \omega/2\pi$ порядка нескольких ГГц эта толщина составляет сотые доли миллиметра.

В [16, 17] в приближении постоянного поля было получено следующее аналитическое выра-

жение для средней мощности, поглощаемой на единицу поверхности диэлектрика в параллельном мультипакторе:

$$\langle W_{abs} \rangle = \frac{v_{Te}}{c} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \ln(\epsilon_{osc}/\epsilon_1) \left(c \frac{E_0^2}{8\pi} \right), \quad (7)$$

где $v_{Te} = (T_e/m_e)^{1/2}$ — тепловая скорость вторичных электронов.

Далее (в том числе и в случае, когда СВЧ-поле направлено под углом к поверхности), отношение

$$\kappa \equiv \langle W_{abs} \rangle / (cE_0^2/8\pi) \quad (8)$$

будем называть коэффициентом поглощения СВЧ-мощности на поверхности диэлектрика. Из (7) и (8) следует, что коэффициент поглощения СВЧ-мощности в параллельном мультипакторе описывается приведенной выше формулой (1), т. е. при больших осцилляционных энергиях ($\epsilon_{osc} \gg \epsilon_1$) коэффициент поглощения возрастает пропорционально логарифму падающей СВЧ-мощности.

На рис. 2 (из работы [17]) приведены зависимости κ от осцилляционной энергии электронов ϵ_{osc} в параллельном мультипакторе для различных диэлектрических материалов (монокристаллические хлорид натрия NaCl, фторид лития LiF и кварц SiO₂), рассчитанные с помощью численного моделирования с помощью 1D3V-кода в предположении, что коэффициент ВЭЭ описывается формулой (3), а температура вторичных электронов равна $T_e = 2$ эВ. Видно, что результаты моделирования удовлетворительно согласуются с приближенной аналитической зависимостью (1) не только в области $\epsilon_{osc} \gg \epsilon_1$, но также и при $\epsilon_{osc} \sim \epsilon_1$.

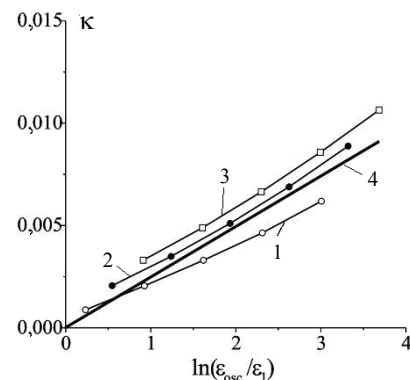


Рис. 2. Зависимости коэффициента поглощения κ от логарифма отношения осцилляционной энергии электронов ϵ_{osc} к первой критической энергии ϵ_1 в параллельном мультипакторе для различных диэлектрических кристаллов [17]: 1 — SiO₂ ($\epsilon_{m0} = 400$ эВ, $\epsilon_{m0} = 2,4$, $\epsilon_1 = 39,6$ эВ); 2 — LiF ($\epsilon_{m0} = 1000$ эВ, $\epsilon_{m0} = 7,5$, $\epsilon_1 = 14,5$ эВ); 3 — NaCl ($\epsilon_{m0} = 1200$ эВ, $\epsilon_{m0} = 10,5$, $\epsilon_1 = 10,0$ эВ); 4 — аналитическая зависимость (1).

Температура вторичных электронов $T_e = 2$ эВ

"Перпендикулярный" мультипактор

Рассмотрим теперь случай "перпендикулярного" мультипактора, при котором внешнее СВЧ-поле

направлено по нормали к поверхности диэлектрика ($\alpha = 90^\circ$). Разряд такого типа может возникать на диэлектрических вставках на стенках волновода, а также в процессе обработки диэлектрических кристаллов с помощью мультипактора в целях изменения свойств их поверхностей. В качестве примера рассмотрим перпендикулярный мультипактор, развивающийся на поверхности кристалла LiF ($\delta_{m0} = 7,5$, $\epsilon_{m0} = 1000$ эВ, $\epsilon_1 = 14,5$ эВ).

На рис. 3 приведены полученные в результате численного моделирования зависимости коэффициента поглощения СВЧ-мощности от $\ln(\epsilon_{osc}/\epsilon_1)$ для параллельного (кривая 1) и перпендикулярного (кривая 2) мультипакторов на поверхности кристалла LiF. На рисунке жирной линией также показана вышеприведенная аналитическая зависимость (1).

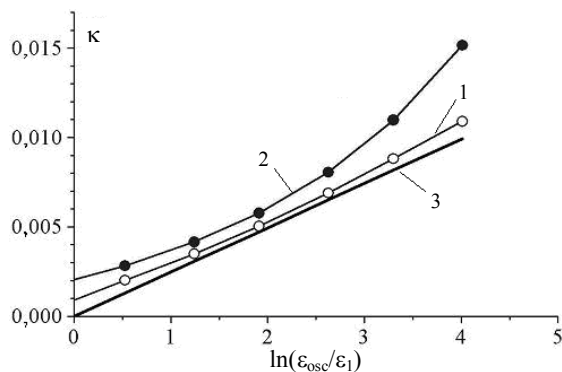


Рис. 3. Зависимости коэффициента поглощения мощности от $\ln(\epsilon_{osc}/\epsilon_1)$ для параллельного (кривая 1) и перпендикулярного (кривая 2) мультипакторов на поверхности кристалла LiF. Кривая 3 — аналитическая зависимость (1). Температура вторичных электронов $T_e = 2$ эВ

Как видно из рис. 3, коэффициент поглощения СВЧ-мощности в перпендикулярном мультипакторе возрастает с увеличением осцилляционной энергии электронов, однако лишь ненамного превышает коэффициент поглощения в параллельном мультипакторе.

Тем не менее, по своей структуре перпендикулярный мультипактор принципиально отличается от параллельного мультипактора и, по существу, представляет собой совершенно иной тип разряда. На рис. 4 приведены фазовые плоскости электронов (z, v_z) в перпендикулярном мультипакторе на поверхности кристалла LiF при $f_0 = 1,95$ ГГц и $\epsilon_{osc} = 200$ эВ $\gg \epsilon_1$ для различных моментов времени в течение одного периода колебаний внешнего поля ($-\pi \leq \omega t < \pi$). Из рисунка видно, что электроны периодически инжектируются с поверхности диэлектрика и далее распространяются в виде струй на фазовой плоскости. Большая часть инжектируемых электронов возвращается на поверхность в течение одного периода колебаний, а остальные успевают совершить несколько колебаний

и удаляются от поверхности на расстояния порядка нескольких миллиметров, что в сотни раз превышает характерную толщину электронного слоя в случае параллельного мультипактора.

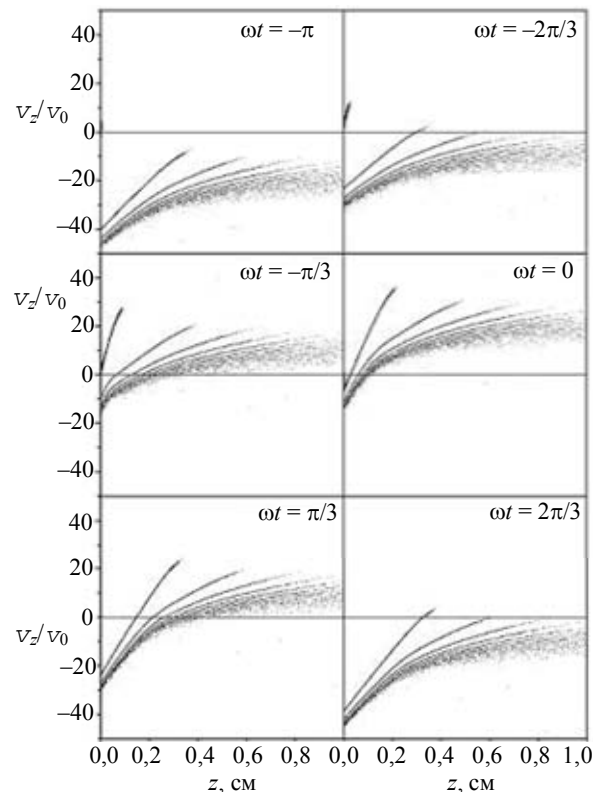


Рис. 4. Фазовые плоскости электронов (z, v_z) в перпендикулярном мультипакторе на поверхности кристалла LiF при $f_0 = 1,95$ ГГц и $\epsilon_{osc} = 200$ эВ $\gg \epsilon_1$ для различных моментов времени в течение одного периода колебаний внешнего поля ($-\pi \leq \omega t < \pi$). Скорость v_z нормирована на величину $v_0 = 4,19 \cdot 10^7$ см/с, соответствующую тепловой скорости электронов при температуре 1 эВ

Энергию, поглощаемую в перпендикулярном мультипакторе, можно оценить следующим образом. Пусть электроны периодически инжектируются в разряд в фазе ускоряющего внешнего поля ($E_{z,ext} < 0$) и далее распространяются в виде постепенно размывающегося слоя, содержащего N электронов на единицу поверхности. При этом между слоем и поверхностью диэлектрика возникает поле разделения зарядов $E_\sigma = 4\pi eN$, тормозящее электроны и возвращающее их на поверхность. Для того чтобы основная масса электронов возвращалась на поверхность в среднем через один период колебаний внешнего поля, необходимо, чтобы $E_\sigma \sim E_{z,ext} \sim E_0$. Отсюда получаем, что $N \sim E_0/4\pi e$. Тогда средний за период поток электронов на поверхность равен $\langle n_e v_z \rangle \sim N/T \sim \sim E_0/4\pi eT \sim n_{cr} v_{osc}$ (где $T = 2\pi/\omega$ — период внешнего поля). Так как электроны возвращаются на поверхность с энергией порядка ϵ_{osc} (при этом лишь часть из них попадает на поверхность в фазе,

благоприятной для вылета вторичных электронов), то средний поток энергии на поверхность по порядку величины составляет $\langle W_{\text{abs}} \rangle = \langle n_e v_z \rangle \epsilon_{\text{osc}} \sim n_{\text{cr}} v_{\text{osc}} \epsilon_{\text{osc}} \sim (v_{\text{osc}}/c)(cE_0^2/8\pi)$, и соответственно, коэффициент поглощения равен (см. (8))

$$\kappa = \beta \frac{v_{\text{osc}}}{c}, \quad (9)$$

где $v_{\text{osc}} = eE_0/m\omega$ — осцилляционная скорость электронов в СВЧ-поле, а β — коэффициент пропорциональности порядка единицы.

На рис. 5 представлены те же коэффициенты поглощения, что и на рис. 3, но теперь в зависимости от v_{osc}/c . Из рисунка видно, что, в соответствии с предыдущей оценкой, коэффициент поглощения κ в перпендикулярном мультипакторе с хорошей точностью пропорционален осцилляционной скорости. В данном случае коэффициент пропорциональности β в формуле (9) приблизительно равен 0,3.

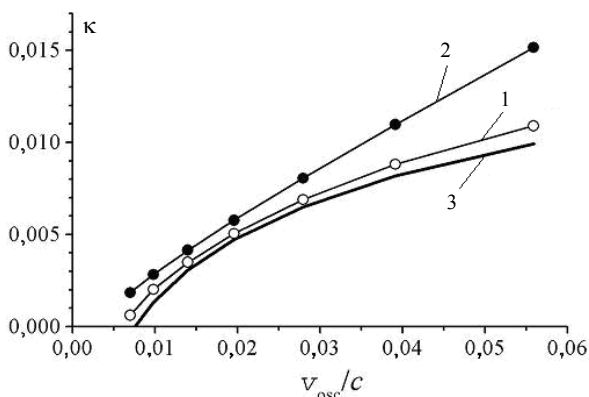


Рис. 5. Зависимости коэффициента поглощения мощности от осцилляционной скорости электронов v_{osc} для параллельного (кривая 1) и перпендикулярного (кривая 2) мультипакторов на поверхности кристалла LiF. Кривая 3 — аналитическая зависимость (1). Температура вторичных электронов $T_e = 2$ эВ

Принципиальная разница между перпендикулярным и параллельным мультипактором наглядно иллюстрируется на рис. 6 и 7. На рис. 6 показаны зависимости средней плотности потока $\langle n_e v_z \rangle$ (средней плотности тока $\langle j_z \rangle$) вторичных электронов от осцилляционной энергии электронов в СВЧ-поле для параллельного (кривая 1) и перпендикулярного (кривая 2) мультипактора на поверхности кристалла LiF. Видно, что, в соответствии с формулой (5), средняя плотность потока электронов на поверхность в параллельном мультипакторе пропорциональна осцилляционной энергии электронов. В перпендикулярном мультипакторе плотность потока значительно ниже и пропорциональна осцилляционной скорости. Наоборот, из рис. 7 видно, что средняя энергия электронов

$\langle \epsilon_{\text{inc}} \rangle$, падающих на поверхность диэлектрика, в перпендикулярном мультипакторе значительно выше, чем в параллельном мультипакторе, и возрастает линейно с ростом ϵ_{osc} , в то время как в параллельном мультипакторе $\langle \epsilon_{\text{inc}} \rangle$ очень медленно (логарифмически) растет с увеличением ϵ_{osc} . Интересно отметить, что при этом значения средней мощности $\langle W_{\text{abs}} \rangle = \langle n_e v_z \rangle \langle \epsilon_{\text{inc}} \rangle$, поглощаемой на единицу поверхности, и, соответственно, коэффициента поглощения (8) оказываются близкими друг к другу в обоих типах разрядов (см. рис. 3).

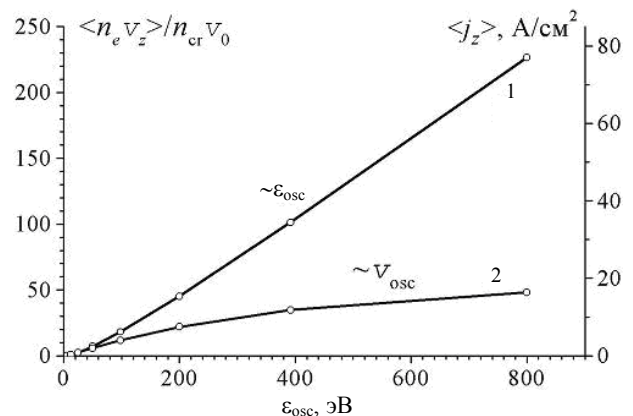


Рис. 6. Зависимости средней плотности потока $\langle n_e v_z \rangle$ (средней плотности тока $\langle j_z \rangle$) вторичных электронов от осцилляционной энергии электронов в СВЧ-поле для параллельного (кривая 1) и перпендикулярного (кривая 2) мультипакторов на поверхности кристалла LiF

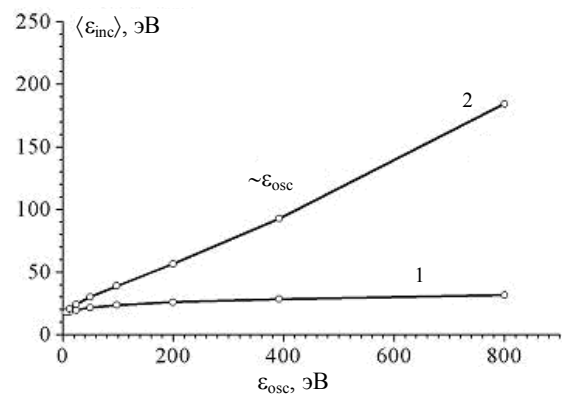


Рис. 7. Зависимости средней энергии электронов $\langle \epsilon_{\text{inc}} \rangle$, падающих на поверхность диэлектрика, от осцилляционной энергии электронов в СВЧ-поле для параллельного (кривая 1) и перпендикулярного (кривая 2) мультипакторов на поверхности кристалла LiF

Эти свойства перпендикулярного и параллельного мультипакторов могут быть использованы при выборе режимов СВЧ-обработки кристаллических диэлектриков в целях изменения свойств их поверхностей.

"Наклонный" мультипактор

Рассмотрим теперь "наклонный" мультипактор, развивающийся при углах наклона электрического

СВЧ-поля к поверхности диэлектрика $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. В этом случае амплитуда нормальной компоненты СВЧ-поля $E_{z,ext}$ равна $E_0 \sin \alpha$.

При достаточно малых углах наклона, таких, что $\sin \alpha < (T_e/\epsilon_1)^{1/2}$, структура разряда остается близкой к структуре параллельного мультипактора, поскольку нормальная компонента СВЧ-поля $E_{z,ext}$ в этом случае мала, по сравнению с характерным значением E_z в параллельном мультипакторе (см. (6)). Соответственно, при малых углах наклона коэффициент поглощения κ в наклонном мультипакторе близок к коэффициенту поглощения (1) в параллельном мультипакторе.

При $\sin \alpha > (T_e/\epsilon_1)^{1/2}$ слой объемного электронного заряда вблизи поверхности диэлектрика разрушается, и структура разряда становится подобной структуре перпендикулярного мультипактора. При этом, однако, движение электронов по оси z определяется величиной $E_{z,ext} = E_0 \sin \alpha$, а не $E_{z,ext} = E_0$, как в случае чисто перпендикулярного мультипактора. Оценивая, как это было сделано в предыдущем разделе, количество электронов, эмитируемых за период колебаний СВЧ-поля с единицы поверхности диэлектрика, получаем $N \sim E_0 \sin \alpha / 4\pi e$. Отсюда для средней мощности, поглощаемой на единицу поверхности диэлектрика, имеем $\langle W_{abs} \rangle \sim (v_{osc} / c) \sin \alpha (cE_0^2 / 8\pi)$, т. е. коэффициент поглощения равен

$$\kappa = \beta \sin \alpha \frac{v_{osc}}{c}, \quad (10)$$

где β — коэффициент пропорциональности порядка единицы (см. (9)).

На рис. 8 показаны зависимости коэффициента поглощения κ от угла α для мультипактора на поверхности кристалла LiF при различных осцилляционных энергиях электронов в СВЧ-поле. Из рисунка видно, что коэффициент поглощения спадает с уменьшением α согласно формуле (10). В соответствии с вышеприведенной оценкой коэффициент поглощения достигает минимума при $\sin \alpha \approx (T_e/\epsilon_1)^{1/2} \approx 0,37$ и затем нарастает до значения, определяемого формулой (1) для параллельного мультипактора.

На рис. 9 и 10 приведены аналогичные зависимости для мультипакторов на поверхностях NaCl и SiO₂. Видно, что угловые зависимости κ для этих материалов также имеют минимумы при углах, приблизительно соответствующих $\sin \alpha = (T_e/\epsilon_1)^{1/2}$. Резкий спад коэффициента поглощения при больших осцилляционных энергиях электронов в перпендикулярном мультипакторе на поверхности кварца SiO₂ (см. рис. 10, $\epsilon_{osc} = 800$ эВ) связан с тем, что при таких осцилляционных энергиях значительная часть электронов возвращается на поверхность диэлектрика с энергиями, значительно пре-

вышающими энергию $\epsilon_{m0} = 200$ эВ, соответствующую максимуму коэффициента ВЭЭ для SiO₂. В результате, эффективность ВЭЭ существенно уменьшается.

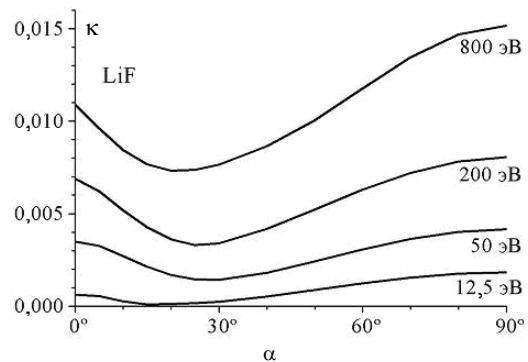


Рис. 8. Зависимости коэффициента поглощения κ от угла α для мультипактора на поверхности кристалла LiF ($\epsilon_{m0} = 1000$ эВ, $\epsilon_{m0} = 7,5$, $\epsilon_1 = 14,5$ эВ) при различных осцилляционных энергиях электронов в СВЧ-поле. Температура вторичных электронов $T_e = 2$ эВ

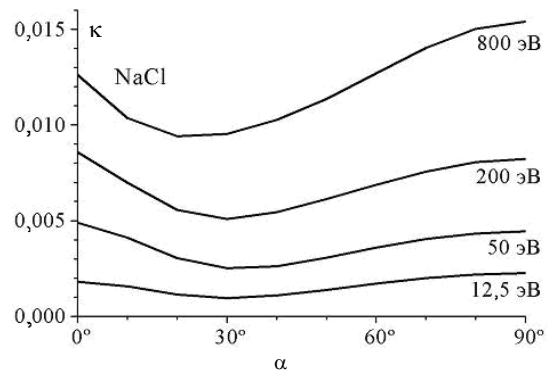


Рис. 9. Зависимости коэффициента поглощения κ от угла α для мультипактора на поверхности кристалла NaCl ($\epsilon_{m0} = 1200$ эВ, $\epsilon_{m0} = 10,5$, $\epsilon_1 = 10,0$ эВ)

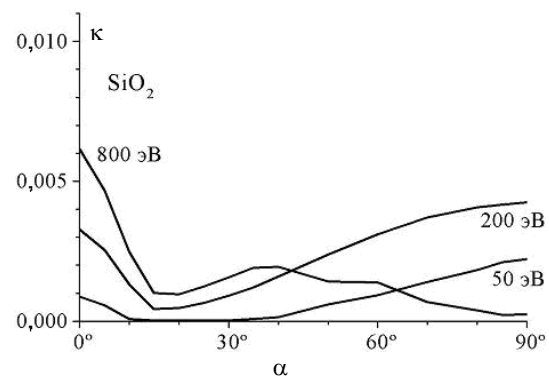


Рис. 10. Зависимости коэффициента поглощения κ от угла α для мультипактора на поверхности кварца (SiO₂) ($\epsilon_{m0} = 400$ эВ, $\epsilon_{m0} = 2,4$, $\epsilon_1 = 39,6$ эВ)

Наличие минимума в угловой зависимости коэффициента поглощения при $\alpha \sim 20\text{--}30^\circ$ указывает на то, что мощность, выделяемая на поверхностях входных/выходных СВЧ-окон в результате развития на них мультипакторов, может быть заметно уменьшена за счет их наклонной установки относительно оси микроволнового пучка.

Выводы

1. Проведено аналитическое и численное исследование мультипактора на поверхности диэлектрика при различных ориентациях СВЧ-поля относительно поверхности с использованием эмпирической формулы Вона для коэффициента вторичной электронной эмиссии [20].

2. Показано, что структура параллельного мультипактора существенно отличается от структуры перпендикулярного мультипактора. Параллельный мультипактор сконцентрирован в узком слое вблизи диэлектрика с толщиной порядка v_{Te}/ω (≤ 30 мкм для $f_0 \approx 2$ ГГц), в то время как перпендикулярный мультипактор занимает область с толщиной порядка нескольких амплитуд осцилляций электронов в СВЧ-поле $a_0 = v_{osc}/\omega$ (≥ 1 мм для $f_0 \approx 2$ ГГц и $\epsilon_{osc} \sim 100$ —1000 эВ).

3. Получена следующая функциональная зависимость поглощенной СВЧ-мощности в наклонном мультипакторе при углах наклона внешнего СВЧ-поля $\sin\alpha > (T_e/\epsilon_1)^{1/2}$:

$$\langle W_{abs} \rangle \sim \frac{v_{osc}}{c} \sin\alpha \left(c \frac{E_0^2}{8\pi} \right).$$

При $\alpha \ll (T_e/\epsilon_1)^{1/2}$ коэффициент поглощения описывается полученной ранее формулой (7) для параллельного мультипактора [17].

4. Показано, что зависимость коэффициента поглощения от угла наклона внешнего СВЧ-поля имеет минимум при $\alpha \sim 20$ —30°.

Полученные результаты могут быть использованы для минимизации СВЧ-мощности, выделяемой на поверхностях диэлектрических окон при развитии на них мультипакторных разрядов, а также при выборе оптимальных режимов обработки кристаллических диэлектриков потоками электронов, генерируемых в таких разрядах.

Работа выполнена частично
по Программе РАН 12П "Фундаментальные
процессы в высокотемпературной плазме"

*с магнитной термоизоляции" и частично
в рамках проекта РФФИ 11-08-00263-а.*

Литература

1. Strong Microwaves: Sources and Applications. Ed. by A. G. Litvak, Institute of Applied Physics RAS: Nizhny Novgorod, 2009.
2. Vaughan J. R. M. // IEEE Trans. Electron Devices. 1988. V. 35. P. 1172.
3. Kishek R. A., Lau Y. Y., Ang L. K. et al. // Phys. Plasmas. 1998. V. 5. P. 2120.
4. Kim H. C., Verboncoeur J. P. // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 123506.
5. Батанов Г. М., Иванов В. А., Коньжев М. Е., Летунов А. А. // Письма ЖЭТФ. 1997. Т. 66. С. 163.
6. Батанов Г. М., Иванов В. А., Коньжев М. Е. // Там же. 1994. Т. 59. С. 655.
7. Ivanov V. A., Konyzhev M. E. / Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Ed. by A. Ohl. Institute for Low-Temperature Plasma: Greifswald, 2003. P. 247.
8. Ivanov V. A., Sakharov A. S., Konyzhev M. E. / Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Ed. by M. Kando, M. Nagatsu. Shizuoka University: Hamamatsu, 2010. P. 34.
9. Semenov V. E., Rakova E. I., Anderson D. et al. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 033501.
10. Kossyi I. A., Lukyanichikov G. S., Semenov V. E. et al. // J. Phys. D. 2008. V. 41. P. 065203.
11. Kishek R. A., Lau Y. Y. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. P. 193.
12. Буянова М. Н., Нечаев В. Е., Семенов В. Е. // Известия вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. С. 988.
13. Ang L.-K., Lau Y. Y., Kishek R. A., Gilgenbach R. M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. P. 290.
14. Valfells A., Verboncoeur J. P., Lau Y. Y. // Ibid. 2000. V. 28. P. 529.
15. Kim H. C., Verboncoeur J. P. // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 123504.
16. Иванов В. А., Сахаров А. С., Коньжев М. Е. / Тезисы докладов XXXVII Междунар. Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2010. P. 246; http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVII/Lt/en/MI-Sakharov_e.doc
17. Сахаров А. С., Иванов В. А., Тарбеева Ю. А., Коньжев М. Е. // Прикладная физика, 2011. № 6. С. 111.
18. Гришин Л. В., Дорофеев А. А., Косый И. А. и др. // Труды ФИАН. 1997. Т. 92. С. 82.
19. Valfells A., Ang L. K., Lau Y. Y., Gilgenbach R. M. // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 750.
20. Vaughan J. R. M. // IEEE Trans. Electron Devices. 1989. V. 36. P. 1963.
21. Sazontov A., Semenov V., Buyanova M. et al. // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 093501.

Multipactor discharge on a dielectric for different inclination angles of the microwave field with respect to the dielectric surface

A. S. Sakharov, V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev
Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Multipactor discharge on a dielectric is studied numerically and analytically for different inclination angles α of the microwave electric field with respect to the dielectric surface. The power

absorbed in the discharge is calculated, and analytic estimates for the average current density of secondary electrons and the average energy of electrons bombarding the dielectric surface are obtained as functions of the angle α and the electron oscillation energy in the microwave field. It is found that the dependence of the absorbed power on the inclination angle of the external microwave field has a minimum at angles of $\alpha \sim 20\text{--}30^\circ$.

PACS: 52.80.Pi

Keywords: multipactor discharge, microwave field, dielectric, secondary electrons.

Bibliography — 21 references.

Received July 20, 2012