

Вторично-электронный разряд в прямоугольном волноводе вывода энергии мощных ЭВП СВЧ

Представлены результаты исследования вторично-электронного разряда в прямоугольном волноводе вывода энергии мощных электровакуумных приборов СВЧ в присутствии магнитных полей рассеяния фокусирующей системы.

Ключевые слова: вторично-электронный разряд, прямоугольный волновод, волна H_{10} , статическое магнитное поле

При работе мощных электровакуумных приборов СВЧ порой наблюдается повышенный нагрев медного волновода, соединяющего выходной резонатор прибора с окном вывода энергии. Можно предположить, что причиной этого нагрева является вторично-электронный разряд (ВЭР), возникающий при передаче высоких уровней мощности. Разряд в волноводах описан в ряде работ [1,2], причем их основной целью было исследование условий возникновения ВЭР в электродинамических системах ускорителей элементарных частиц с учетом особенностей технологии и функционирования этих устройств. Ниже представлены некоторые результаты исследований условий возникновения ВЭР в поле бегущей волны H_{10} прямоугольного волновода вывода энергии мощных ЭВП СВЧ.

Для определения траекторий электронов, стартующих из разных точек поверхности волновода, решалась система уравнений движения электронов в присутствии полей рассеяния (B_x, B_y, B_z) фокусирующей магнитной системы прибора:

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{e}{m} \left[\left(B_z - \frac{\pi E_0}{a\omega} \cos \frac{\pi x}{a} \cos(\omega t - \beta z) \right) \times \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right]; \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{e}{m} \left[\left(\frac{\pi E_0}{a\omega} \cos \frac{\pi x}{a} \cos(\omega t - \beta z) - B_z \right) \times \frac{dx}{dt} - E_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin(\omega t - \beta z) + \right. \\ &\quad \left. + \left(B_x + \frac{\beta E_0}{\omega} \sin \frac{\pi x}{a} \sin(\omega t - \beta z) \right) \times \frac{dz}{dt} \right]; \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= \frac{e}{m} \left[B_y \times \frac{dx}{dt} - \left(B_x + \frac{\beta E_0}{\omega} \sin \frac{\pi x}{a} \sin(\omega t - \beta z) \right) \times \frac{dy}{dt} \right],\end{aligned}$$

где E_0 – амплитуда электрического поля в E -плоскости прямоугольного волновода, ω – круговая частота, a – ширина волновода, β – постоянная распространения волны H_{10} в волноводе, z – продольная координата. Записанные уравнения учитывают взаимодействие электрона с электрическим и магнитным полями волны H_{10} . Магнитное поле волны с учетом уравнений Максвелла выражено через электрическое СВЧ поле. Для решения уравнений использовалась схема «3/8» метода Рунге-Кутты 4-го порядка, позволяющая минимизировать как погрешность вычислений, так и затраты времени на проведение расчетов. С помощью программы, реализованной в среде Visual C#, было исследовано движение электронов на частоте 3 ГГц в диапазоне мощностей 10 кВт÷100 МВт внутри мед-

ного волновода сечением 72×34 мм, отожженного в процессе откачки прибора при температуре 550°C (максимальная величина коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) меди равна 1,45 [3]).

Моделирование ВЭР производилось на основе метода Монте-Карло с учетом всех видов электронов (включая упруго отраженные) [4], а также косинусоидального распределения электронов по направлениям вылета. Возможность существования ВЭР определялась величиной эффективного КВЭЭ $\langle\sigma\rangle$, представляющего собой отношение суммы всех вторичных электронов к сумме всех первичных по прошествии времени, необходимого для «выстраивания» процесса ВЭР безотносительно к изначально навязанным условиям запуска затравочных электронов. Разряд возможен, если $\langle\sigma\rangle > 1$. Для удобства анализа траекторий электронов запуск затравочных электронов производился с широких стенок в плоскости ХУ поперечного сечения волновода.

Расчет показал невозможность возникновения ВЭР в прямоугольном медном волноводе, находящемся вне зоны действия поля фокусирующих магнитов. Эффективный КВЭЭ в интервале мощностей $P=(100\div 1000)$ кВт не превысил величины 0,84 (рис.1а).

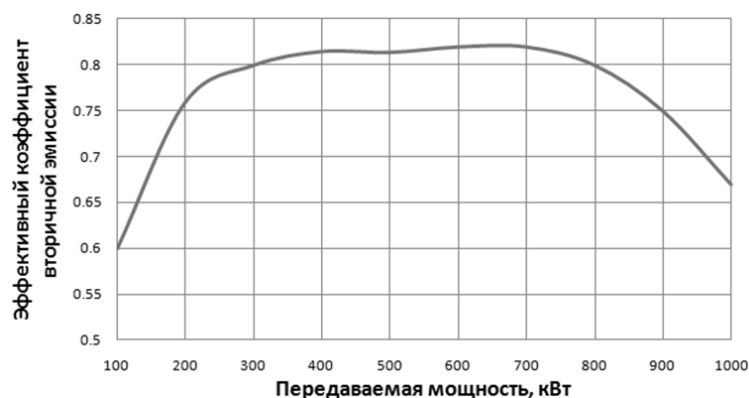


Рисунок 1

Помимо высокочастотного электромагнитного поля на траектории электронов также могут влиять внешние магнитные статические поля, создаваемые фокусирующей системой прибора. В работе было исследовано влияние таких полей в зависимости от взаимного расположения выходного резонатора 1 и прямоугольного волновода 2 (рис. 2).

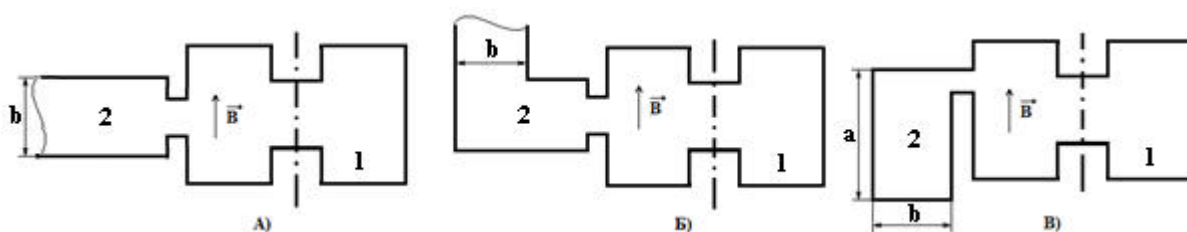


Рисунок 2

Был проведен ряд расчетов, учитывающих влияние внешнего поперечного магнитного поля, совпадающего по направлению с высокочастотным электрическим полем (рис. 2А), на траектории электронов в прямоугольном волноводе (рис.3). Расчеты проводились для величины передаваемой мощности $P=600$ кВт.

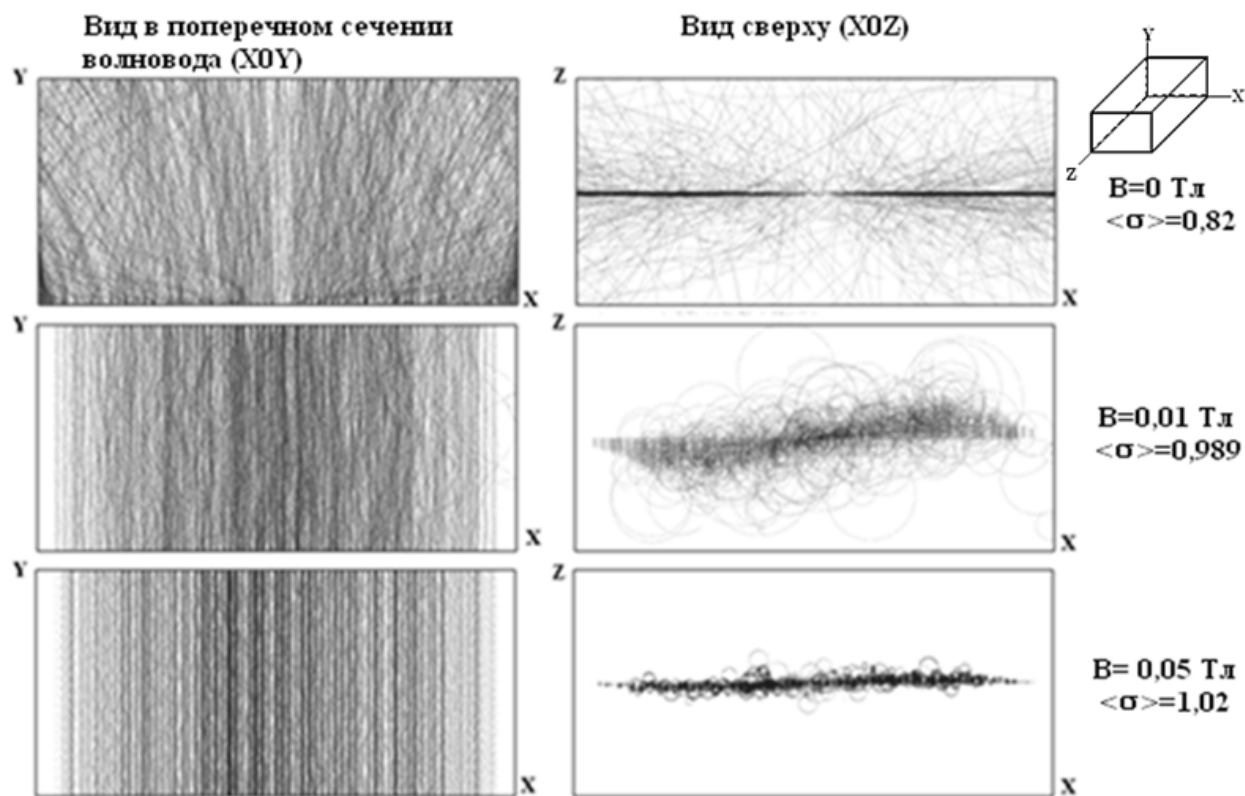


Рисунок 3

Согласно результатам расчета при величине магнитной индукции более 0,03 Тл в медном волноводе оказывается возможным возникновение двухповерхностного полифазного ВЭР [5] в интервале мощностей от 200 кВт до 50 МВт (рис.4) (для сравнения: амплитуда магнитной индукции переменного электромагнитного поля составляет 0.003 Тл при передаваемой мощности 1 МВт). Это связано с тем, что по мере увеличения статического магнитного поля электроны все меньше отклоняются к боковым стенкам волновода в область слабых электрических полей и потери электронов из разряда уменьшаются.



Рисунок 4

Расчет траекторий движения электронов для магнитного поля 0,053 Тл, направленного вдоль прямоугольного волновода (рис. 2Б) представлен на рис.5а. Указанная величина магнитной индукции соответствует циклотронной частоте, равной половине частоты СВЧ поля, при которой могут выполняться условия существования одноповерхностного резонансного ВЭР. Под действием постоянного продольного магнитного поля частицы дрейфуют в направлении одной из боковых стенок. В интервале мощностей от 200 кВт до 700 кВт эффективный КВЭЭ превышает единицу (рис. 5б), однако постоянный отток

электронов в область слабых электрических полей должен бы был затруднить возникновение разряда. В то же время число последовательных актов умножения электронов за счет соударения с широкой стенкой волновода достигает 20-30. При наличии затравочных электронов это делает возможным существование индуцированного ВЭР. Наиболее вероятной причиной появления затравочных электронов может быть фотоэффект, обусловленный сильным рентгеновским излучением из коллектора и предколлектора прибора [6]. Следует также отметить, что параллельный оси прибора отрезок волновода находится в спадающем магнитном поле, так как в приборах О-типа поле в области коллектора приближается к нулю. Поэтому, если фокусирующее магнитное поле превышает величину, необходимую для возникновения разряда, то всегда найдется сечение волновода, в котором условия для размножения электронов окажутся выполненными.

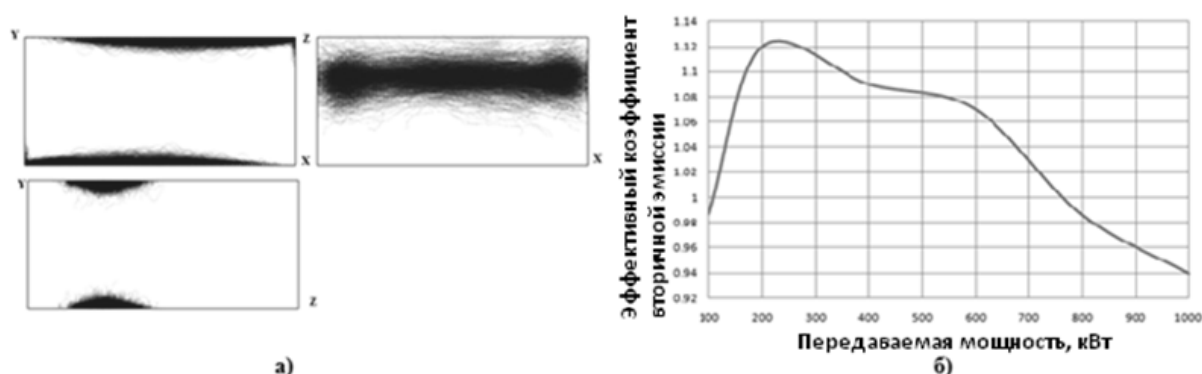


Рисунок 5

Для конфигурации, показанной на рис. 2В, при той же величине постоянного магнитного поля условия существования ВЭР выполняются в широком диапазоне мощностей от 50 кВт до 50 МВт (рис. 6).

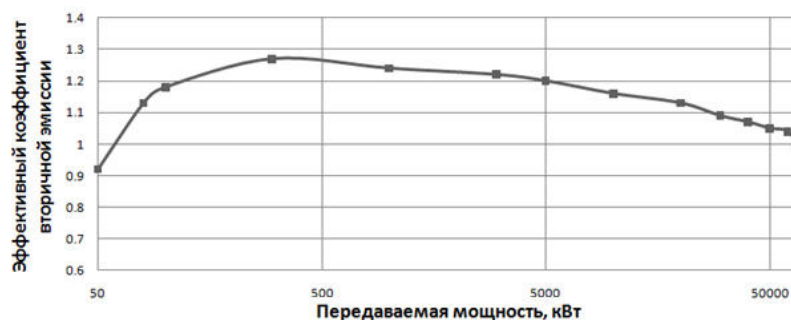


Рисунок 6

При мощности в несколько сотен кВт разряд сосредоточен преимущественно в центральной части волновода (рис. 7). С увеличением мощности область разряда начинает смещаться к боковым стенкам, т.к. при соударении в центральной части электроны имеют энергию, превышающую второй критический потенциал меди. При уровнях передаваемой мощности в несколько десятков МВт, одноповерхностный ВЭР переходит в область между боковой и широкой стенками волновода.

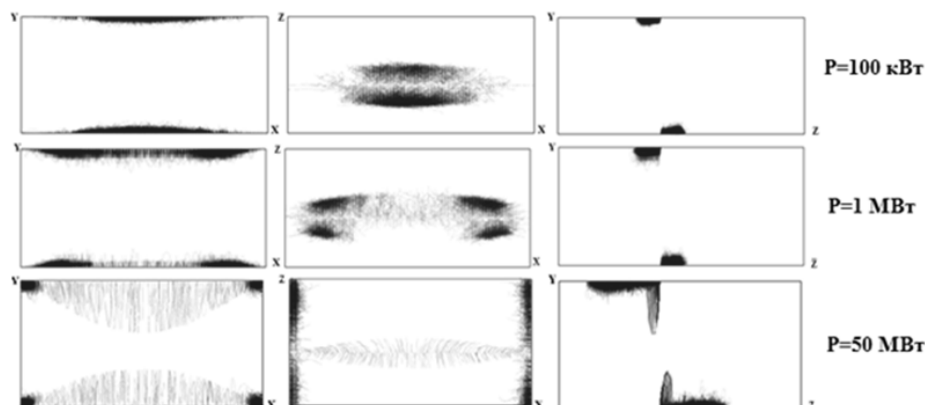


Рисунок 7

Как показали проведенные исследования, поле фокусирующих магнитов в ЭВП СВЧ является фактором, способствующим возникновению ВЭР в волноводе вывода энергии. Наиболее опасными являются магнитное поле, направленное перпендикулярно узким стенкам волновода, приводящее к возникновению резонансного разряда, а также поле, перпендикулярное широким стенкам, способствующее появлению полифазного ВЭР в широком диапазоне передаваемых мощностей. Возникновение разряда приводит к росту потерь в выводе энергии и нагреву волновода, а также к возможному напылению меди на поверхность диэлектрической перегородки и выходу прибора из строя. Подобные явления наблюдались экспериментально, но не находили объяснения. Полученные результаты говорят о необходимости более тщательного подхода к разработке выходных устройств мощных ЭВП СВЧ и выработки способов предотвращения вторично-электронного разряда в волноводах выводов энергии.

Библиографический список

1. Gusarova M.A. Evolution of 3D Simulation Multipactoring Code MultP / M.A. Gusarova, V.I. Kaminskii, L.V. Kravchuk, S.V. Kutsaev, M.V. Lalayan, S.G. Tarasov, N.P. Sobenin // – Problems of Atomic Science and Technology. – 2008. – №3. – Series: Nuclear Physics Investigations (49). – pp. 123-126.
2. Geng R.L. Exploring Multipacting Characteristics of a Rectangular Waveguide / R.L. Geng, H.S. Padamsee // – Proc. of PAC 1999. – New York, USA. – pp. 429-431.
3. Кулов С.К. Комплексное исследование вторичной электронной эмиссии меди и разработка пленочных антидинаatronных покрытий на медной подложке : дис...канд. техн. наук. – Москва, МЭИ, 1967.
4. Прокофьев Б.В. Численное моделирование тангенциального вторично-электронного СВЧ разряда / Б.В. Прокофьев // – Электронная техника. – Сер.1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып.11(323). – С.29-34.
5. Гришин.Л.В.. Исследование вторично-эмиссионного СВЧ-разряда при больших углах пролета электронов. / Л.В. Гришин, А.А. Дорофеев, И.А. Косый, Г.С. Лукьянчиков, М.М. Савченко // – Труды физического института им П.Н. Лебедева. – 1977. – Т. 92. – С. 82-131.
6. Krien F. Electron Wind in Strong Wave Guide Fields / F. Krien // – IEEE Trans. on Nuclear Science. – Vol. NS-32. – No. 5. – October 1985. – pp. 2912-2914.