

# ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА СПЕКТР КОЛЕБАНИЙ В ГЕНЕРАТОРЕ НА МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ

*А.М. Горбань, Ю.Ф. Лонин*

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",  
Харьков, Украина*

*E-mail: gorban@kipt.kharkov.ua*

Исследовано возбуждение широкополосных колебаний в генераторе на магнитоизолированной передающей линии (magnetically insulated transmission line oscillator – MILO) за счет использования периодической неоднородности эмиссии электронов с поверхности катода. Получены спектральные характеристики излучения и сравнительные оценки достижимой амплитуды напряженности поля электромагнитной волны.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Генератор на магнитоизолированной передающей линии представляет собой протяженную цилиндрически симметричную коаксиальную систему, внешний электрод которой является анодом, а внутренний – катодом. На внутренней стороне анода расположена замедляющая структура. К одному концу такой коаксиальной линии подключен источник напряжения, а другой ее конец обычно закорочен омическим сопротивлением. Если напряженность электрического поля в линии превосходит пороговое значение, происходит взрывная эмиссия электронов из поверхности катода в вакуумный промежуток. В дальнейшем, в случае достижения тока некоторого минимально необходимого значения, в линии устанавливается режим магнитной самоизоляции, при котором движение электронов представляет собой дрейф вдоль продольной оси. Такой электронный поток, взаимодействуя с полем волны замедляющей структуры, может передавать ему свою энергию.

В [1,2] исследовалась возможность эффективной генерации в таких приборах широкополосных и многочастотных СВЧ-колебаний за счет использования комбинированных замедляющих структур. Рассматривались совмещенные структуры, представляющие собой комбинацию двух регулярных гребенок с различными геометрическими параметрами. Предполагается, что первоначально в электронном потоке возбуждаются две волны плотности заряда, связанные с соответствующими замедляющими структурами. Их нелинейное взаимодействие приводит к формированию волны плотности заряда сложной структуры с широким спектром пространственных гармоник. Была показана возможность управления в широких пределах пространственной структурой волны плотности заряда и достаточно эффективной генерации многочастотных СВЧ-колебаний с шириной полосы частот приблизительно в октаву.

В настоящей работе исследована возможность возбуждения в генераторах на магнитоизолированной передающей линии широкополосных СВЧ-колебаний, используя обычную регулярную замедляющую структуру. Базовая идея состоит в том, что

можно сформировать волну плотности заряда в замагниченном электронном потоке, обеспечив периодическую неоднородность эмиссии электронов с поверхности катода. Например, вдоль поверхности катода периодически изменять порог взрывной эмиссии (свойства материала катода). Или изменять напряженность радиального электрического поля у катода, профилируя его поверхность. И в том, и в другом случае будет формироваться волна плотности, распространяющаяся вдоль системы с дрейфовой скоростью  $E_r/H_\phi$ , где  $E_r$  – напряженность радиального электрического поля, а  $H_\phi$  – напряженность азимутального магнитного поля. Взаимодействие этой волны с волной, связанной с замедляющей структурой, может обеспечить возбуждение в электронном потоке колебаний в широкой полосе частот. Отдельный вопрос – насколько эффективно при этом будет возбуждаться широкополосное электромагнитное излучение в системе с гребенчатой замедляющей структурой. По-видимому, это будет определяться установившимся разбросом дрейфовых скоростей электронов потока.

Использованный метод исследования – численное моделирование методом макрочастиц. Исследовались характеристики системы с гладким катодом. Затем, при сохранении прочих параметров, исследовалась модель, в которой поверхность катода профилировалась периодическими проточками. Полученные результаты сравнивались на предмет достижимого уширения полосы генерации и ее относительной эффективности.

## 2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Электромагнитные поля находились решением уравнений Максвелла с использованием скалярного  $\Phi$  и векторного  $\vec{A}$  потенциалов в кулоновской калибровке вектор-потенциала, как описано в [3]. В этом случае уравнения имеют вид:

$$\Delta\Phi = -4\pi\rho, \quad (1)$$

$$\Delta\vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c} \vec{j}_T, \quad (2)$$

$$\vec{j}_T \equiv \vec{j} - \nabla\xi, \quad (3)$$

где величина  $\xi$ , определяемая соотношением

$$\Delta \xi = \nabla \cdot \vec{j}, \quad (4)$$

обеспечивает калибровочное условие  $\nabla \vec{A} = 0$ . Здесь  $\rho$  и  $\vec{j}$  – плотность заряда и тока соответственно,  $c$  – скорость света. Напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей таковы:

$$\vec{H} = \nabla \times \vec{A}, \quad \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \Phi. \quad (5)$$

Как указано в [4], поля, определяемые из (1)-(5) совпадают с полями, полученными непосредственно из уравнений Максвелла. Основным достоинством использованной процедуры расчета полей, по нашему мнению, является высокая устойчивость к накоплению ошибок при продолжительных расчетах.

Значения плотностей зарядов и токов ( $\rho$  и  $\vec{j}$ ) вычислялись способом взвешивания по площадям (метод СИС) на равномерной прямоугольной сетке. Действующая на частицу сила определялась по обращенной процедуре взвешивания для сеточных значений полей.

Для частиц решались релятивистские уравнения движения в переменных координата – импульс ( $\vec{r}$  и  $\vec{p}$ ). Эмиссия частиц с катода происходила на каждом временном шаге в точках, где напряженность поперечной составляющей поля  $\vec{E}$  превосходила заданное значение. При достижении любой границы области частица поглощалась.

В предположении аксиальной симметрии системы в цилиндрических координатах  $r, \varphi, z$  существуют две компоненты электрического  $E_r, E_z$  и одна  $H_\varphi$  магнитного поля. Соответственно фазовое пространство частицы описывается координатами  $r, z, p_r$  и  $p_z$ . Таким образом, модель имеет размерность  $2d2v$ . Расчетная область может иметь границу произвольной формы.

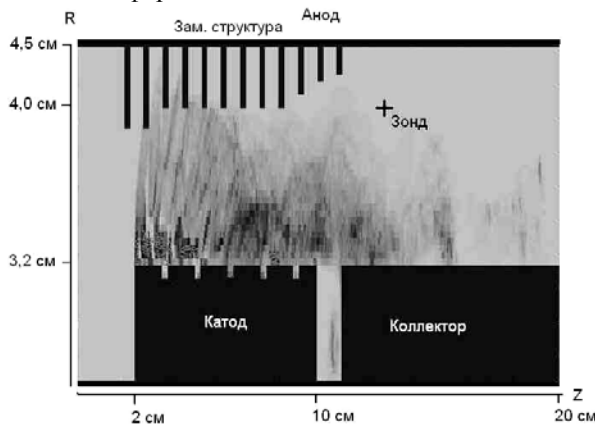


Рис.1. Схема модели генератора

Общая схема исследуемой модели генератора представлена (без сохранения масштаба) на Рис.1. По структуре и геометрическим параметрам она близка к описанной в [5]. В правой части системы расположен слой поглотителя электромагнитного излучения толщиной 4 см. Таким образом имитировался вывод электромагнитной волны. В первом варианте поверхность катода гладкая, во втором – профилированная, как показано на рисунке. Вся наружная поверхность катода является эмиттером.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Далее приводятся результаты расчетов для таких параметров системы: наружный радиус катода 3,2 см, наружный радиус замедляющей структуры 4,5 см, внутренний радиус гребней структуры составляет 3,8 см для первых двух (чокеров), 4,0 см – для семи следующих и 4,1 см, 4,2 см, 4,3 см – для трех последних гребней. Период гребенки 0,8 см. Глубина проточек на катоде составляет 0,08 см, ширина – 0,2 см. Расстояние между ними – 1,08 см.

Приложенное напряжение 400 кВ, полный ток в системе составлял от 50 до 100 кА.

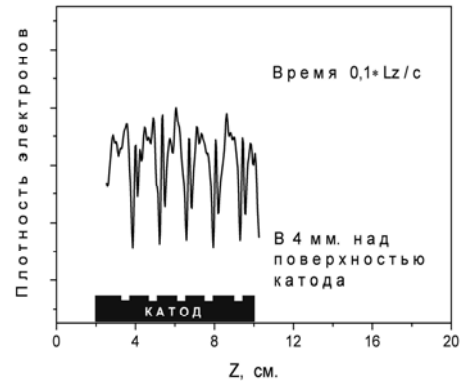


Рис.2. Профиль плотности электронов вблизи поверхности катода в начальный момент времени

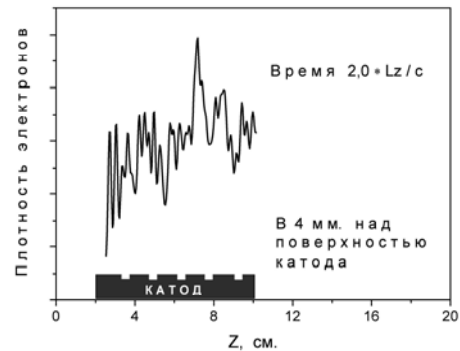


Рис.3. Профиль плотности электронов у поверхности катода в режиме широкополосной генерации

Профилирование катода приводило к периодической пространственной неравномерности интенсивности взрывной эмиссии электронов и, как следствие, к периодической неоднородности плотности заряда вблизи поверхности катода, как показано на Рис.2. График соответствует начальной стадии работы генератора, когда влиянием поля электромагнитной волны на электронный поток можно пренебречь.

В дальнейшем поле замедляющей структуры усложняет картину, однако влияние профилирования катода на плотность заряда сохраняется. На Рис.3 представлен профиль плотности заряда, соответствующий моменту времени  $2 \cdot L_z / c$ , где  $L_z$  – длина системы. Видно, что в результате взаимодействия двух волн плотности заряда установился профиль электронной плотности сложной структуры. Спектр пространственных гармоник этой суммарной волны плотности представлен на Рис.4.

Ввиду сильной дисперсии гребенчатой замедляющей структуры эффективное возбуждение электромагнитной волны в широкой полосе частот, тем

не менее, возможно только в случае достаточно большого разброса скоростей (шира скоростей) дрейфа электронов в скрещенных полях.

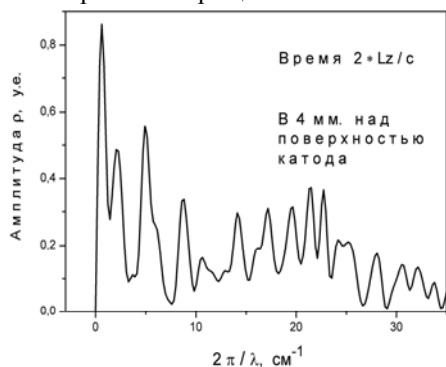


Рис.4. Амплитуда пространственных гармоник волны плотности заряда

На Рис.5 представлен фазовый портрет электронов, движущихся в слое, ограниченном поперечными координатами в диапазоне от 3,5 до 3,9 см. Для исключения размытия по скоростям за счет циклотронного вращения произведено усреднение на временном интервале в  $0,03 \cdot L_z/c$ . Как видно из рисунка, отношение максимальной скорости дрейфа к минимальной составляет  $\approx 2,2$ . Этот факт позволяет надеяться, что значительная часть электронного потока может находиться в синхронизме с соответствующими гармониками электромагнитной волны.

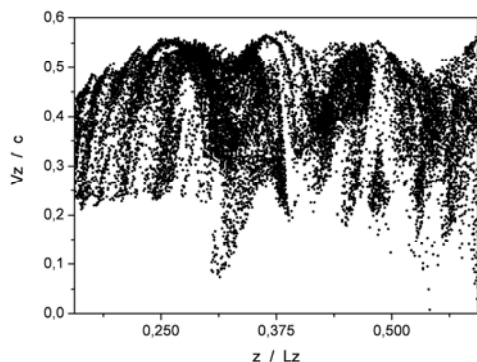


Рис.5. Фазовая плоскость  $Z - V_z$  электронного потока в слое  $3,5 < R < 3,9$  см

Измерение амплитуды электромагнитного поля выполнялось точечным зондом, положение которого на Рис.1 отмечено крестиком. Полученные спектры амплитуд продольного электрического поля  $E_z$  для генератора с гладким (верхний график) и профилированным (нижний график) катодами представлены на Рис.6. Аналогично на Рис.7. представлены спектры аксиального магнитного поля  $H_\phi$ . Видно, что профилирование поверхности катода и, как следствие, интенсивности электронной эмиссии приводит к существенному расширению полосы генерации системы.

Для приведенных на Рис.6 примеров отношение квадратов амплитуд поля  $E_z$  для системы с профилированным катодом к системе с гладким катодом в полосе частот 5...20 ГГц составляет около 0,4.

Для магнитного поля  $H_\phi$  на Рис.7 соответствующий показатель равен 0,5. Таким образом, зондовые измерения дают при переходе к широкополосному режиму генерации снижение мощности примерно

вдвое. Следует заметить, что никакой оптимизации параметров системы, направленной на повышение относительной эффективности генерации, в данной работе не выполнялось.

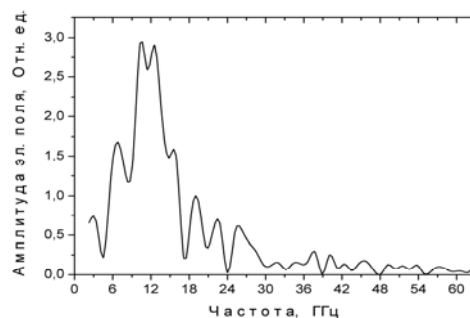
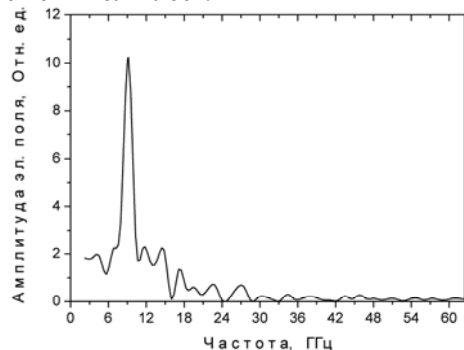


Рис.6. Амплитудный спектр продольного электрического поля  $E_z$  в случае гладкого (вверху) и профилированного (внизу) катода

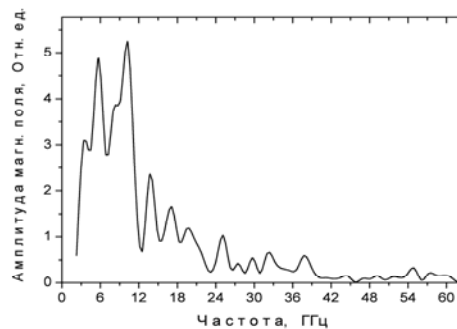
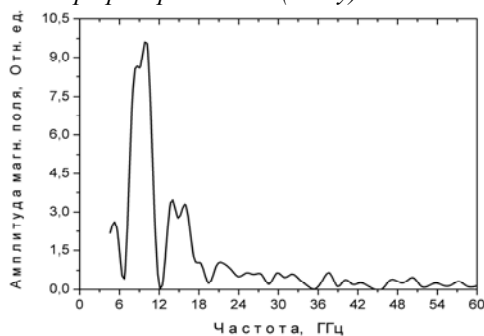


Рис.7. Амплитудный спектр аксиального магнитного поля  $H_\phi$  в случае гладкого (вверху) и профилированного (внизу) катода

В данной работе не рассматривалось возможное влияние возникающей у поверхности катода плазмы на его эмиссионные свойства, но, вероятно, перекрытие плазмой катодных проточек может изменять профиль электронной плотности. Этот вопрос, очевидно, требует дальнейшего исследования.

Тем не менее, полученные результаты позволяют рассматривать периодическое профилирование поверхности катода как один из возможных способов

генерации в таких приборах широкополосных и многочастотных СВЧ-колебаний.

Так же важно и то, что для достижения максимальной эффективности узкополосной генерации в приборах на магнитоизолированной передающей линии необходимо обращать внимание на обеспечение стабильности параметров эмиссии электронов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.М. Горбань, Ю.Ф. Лонин. Нелинейные режимы генератора на магнитоизолированной передающей линии с комбинированной замедляющей структурой // *ВАНТ. Серия "Ядерно-физические исследования"* (49), 2008, №3, с.139-141.
2. А.М. Горбань, Ю.Ф. Лонин. Пространственные характеристики волны плотности заряда в неоднородных магнитоизолированных передающих линиях // *ВАНТ. Серия "Плазменная электроника и новые методы ускорения"*(6). 2008, №4, с.11-13.
3. R.L. Morse, C.W. Nielson. Numerical simulation of the Weibel instability in one and two dimensions // *Phys. Fluids*. 1971, 14, p.830-840.
4. Ч. Бэдсел, А. Ленгдон. *Физика плазмы и численное моделирование*. М.: «Энергоатомиздат», 1989, с.452.
5. Jin-Chuan Ju, Yu-Wei Fan, Hui-Huang Zhong, and Ting Shu. An improved X-band magnetically insulated transmission line oscillator // *Physics of Plasmas* (16). 2009, №7, 073103, p.4.

*Статья поступила в редакцию 07.06.2010 г.*

#### INFLUENCE OF PERIODIC HETEROGENEITY OF ELECTRONS EMISSION ON THE SPECTRUM OF OSCILLATIONS IN THE MAGNETICALLY INSULATED TRANSMISSION LINE OSCILLATOR

*A.M. Gorban, Yu.F. Lonin*

Excitation of broadband oscillations in the magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) is investigated due to use of periodic heterogeneity of electrons emission from a cathode surface. Spectral characteristics of radiation and comparative estimations of achievable intensity of an electromagnetic wave field are received.

#### ВПЛИВ ПЕРІОДИЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕМІСІЇ ЕЛЕКТРОНІВ НА СПЕКТР КОЛИВАНЬ В ГЕНЕРАТОРІ НА МАГНІТОІЗОЛЬОВАНИЙ ПЕРЕДАЮЧІЙ ЛІНІЇ

*A.M. Gorban, Yu.F. Lonin*

Досліджене збудження широкосмугових коливань в генераторі на магнітоізолюваній передаючій лінії (magnetically insulated transmission line oscillator – MILO) за рахунок використання періодичної неоднорідності емісії електронів з поверхні катоду. Отримано спектральні характеристики випромінювання та порівняльні оцінки досяжної амплітуди напруженості поля електромагнітної хвилі.