

## Влияние фокусирующего магнитного поля на взаимодействие электронного потока и СВЧ-поля в релятивистском генераторе на сверхразмерном периодическом волноводе

А. И. Слепков,\* О. В. Галлямова,† А. А. Щелконогов  
 Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
 физический факультет, кафедра общей физики  
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Представлены результаты численного моделирования взаимодействия РЭП, фокусируемого постоянным МП, с полем осесимметричного периодического волновода. Выявлены области резонансного усиления сигнала и циклотронного поглощения, изучена динамика электронов в пучке и влияние параметров пучка на величину циклотронного резонанса.

PACS: 84.40.Fe, 07.57.Hm

УДК: 621.385.69

Ключевые слова: релятивистский генератор, релятивистский электронный поток, циклотронный резонанс, циклотронное поглощение.

Одним из перспективных направлений развития мощных источников когерентного электромагнитного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн является исследование и разработка генераторов с продольным взаимодействием электронного потока и электромагнитного поля периодической электродинамической системы. В таких генераторах существенную роль играет величина фокусирующего магнитного поля. В работе рассматриваются особенности формирования когерентного черенковского излучения в релятивистских генераторах на сильноточных электронных потоках при условии реализации циклотронного резонанса. Особенностью исследований является рассмотрение генераторов на сверхразмерных периодических волноводах (с отношением  $D/\lambda \sim 3 \div 5$ , где  $D$  — диаметр волновода,  $\lambda$  — длина волны генерации).

Численное моделирование проводилось с помощью многомодового метода, позволяющего описывать многоволновые механизмы взаимодействия потока и поля в генераторах на сверхразмерных периодических волноводах. Электронный поток описывался моделью крупных частиц, для анализа электромагнитных полей использовался метод Галеркина (в приближении возбуждения аксиально-симметричных полей нерегулярного волновода). В отличие от [1] при решении уравнений движения учитывалось трехмерное движение электронов в приближении модели ведущих центров.

В рассматриваемых генераторах используется электронная селекция мод, основанная на реализации взаимодействия трубчатого электронного потока с полем нижней аксиально-симметричной моды системы на частоте вблизи высокочастотной границы полосы прозрачности (вблизи частоты  $\pi$ -вида), то есть выполняется соотношение  $\frac{\omega_0}{\nu_0} d \approx \pi$ , где  $\omega_0$  — частота генерации,  $\nu_0$  — скорость электронов в потоке при заданном зна-

чении ускоряющего напряжения,  $d$  — период системы. В рассматриваемой системе электромагнитное поле может быть представлено в виде суперпозиции пространственных гармоник, и при исследовании влияния циклотронного резонанса необходимо рассматривать излучение циклотронных осцилляторов в соответствии как с нормальным, так и с аномальным эффектами Доплера. То есть, условие циклотронного резонанса соответствует эффективному взаимодействию потока и поля на частоте генерации как с обратной волной системы (нормальный эффект Доплера), так и с «+1» пространственной гармоникой (аномальный эффект Доплера). При взаимодействии вблизи  $\pi$ -вида соответствующие условия имеют вид [2]:

$$\frac{\omega_0}{\nu_0} d - \frac{\omega_c}{\nu_0} d \approx -\pi \quad (\text{возбуждение обратной волны}), \quad (1)$$

$$\frac{\omega_0}{\nu_0} d + \frac{\omega_c}{\nu_0} d \approx 3\pi \quad (\text{возбуждение «+1» пространственной гармоники}). \quad (2)$$

Здесь  $\omega_c$  — циклотронная частота, связанная с индукцией фокусирующего магнитного поля, зарядом  $e_0$  и массой  $m_0$  электрона и релятивистским фактором  $\gamma$ :

$$\omega_c = \frac{e_0 B_0}{m_0 \gamma}. \quad (3)$$

Таким образом, соотношение между частотой генерации и циклотронной частотой имеет вид:  $\omega_c \approx 2\omega_0$ .

Результаты исследований показали, что при данных условиях циклотронного резонанса в узком диапазоне изменения магнитного поля циклотронное усиление сменяется циклотронным затуханием с резким скачком на амплитудно-частотной характеристике (рис. 1а). Таким образом, области циклотронного затухания, соответствующего нормальному эффекту Доплера, и циклотронного усиления, соответствующего аномальному эффекту Доплера, разделяются. Такие зависимости выходной мощности от циклотронной частоты качественно соответствуют экспериментальным исследованиям многоволновых черенковских генераторов, описанным в [3].

\*E-mail: slepkov@phys.msu.ru

†E-mail: gallyamova@physics.msu.ru

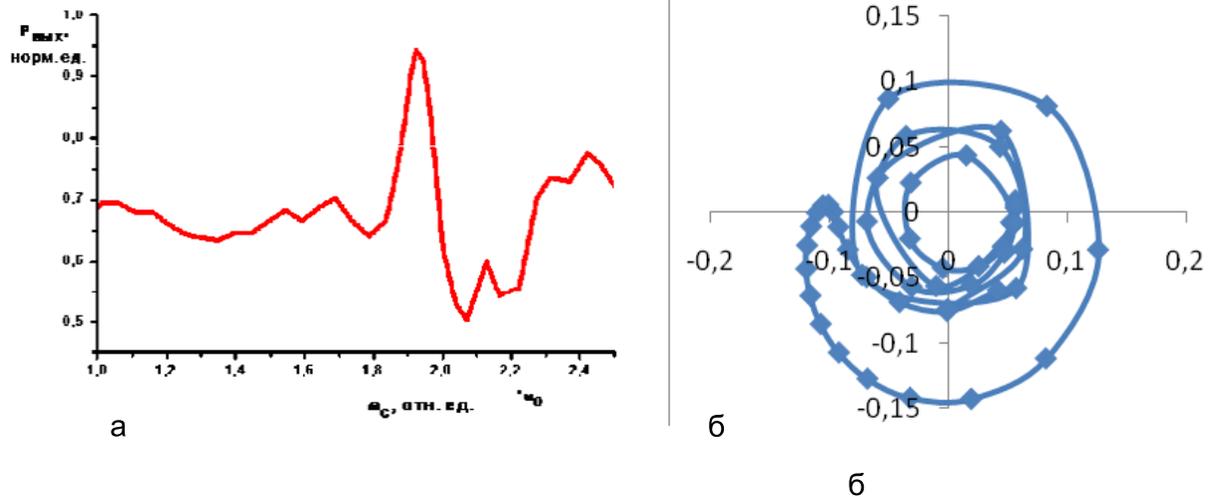


Рис. 1: а — Участок резонансно-частотной характеристики сверхразмерной структуры в области частот  $\pi$ -вида колебаний. Видна резкая граница между циклотронным усилением и циклотронным поглощением. б — Вид распределения электронов в пучке на выходе из структуры с образованием фазового сгустка электронов. Показана величина (в см) отклонения частиц от положения ведущего центра.

В подтверждение теории обнаружено смещение резонансной циклотронной частоты в область высоких частот при увеличении ускоряющего напряжения. Полученная зависимость мощности излучения на выходе системы от циклотронной частоты хорошо согласуется с теоретическими предположениями.

О динамике электронов в пучке на частоте циклотронного резонанса можно было судить по виду их траекторий в режиме самосогласованного взаимодей-

ствия. Типичный вид такой траектории электронов на выходе из системы (в последних двух периодах структуры) с образованием фазового сгустка, обеспечивающего эффективную передачу энергии от потока электронов СВЧ-полю, представлен на рис. 1б.

Вид траекторий частиц в волноведущей системе позволяет заключить, что в условиях циклотронного резонанса происходит фазовая группировка электронов, типичная для gyroприборов.

- [1] Слепков А.И. Известия АН. Сер. Физ. **67**, № 12. С. 1678.  
 [2] Канавец В.И. и др. Излучение мощных электронных потоков в резонансных замедляющих системах. (М.: Изд. Моск.Ун-та. 1993). 207 с.

- [3] Бугаев С.П. и др. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы. (Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние, 1991). 296 с.

## Effect of focusing magnetic field on the interaction between the relativistic electron beam and the microwave field in relativistic overmoded periodic waveguide-based generator

A. I. Slepko<sup>a</sup>, O. V. Gallyamova<sup>b</sup>, A. I. Schelkonogov

Department of General Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>slepko@phys.msu.ru, <sup>b</sup>gallyamova@physics.msu.ru

The results of numerical simulation of the interaction between the relativistic electron beam focused by constant magnetic field and the field of an axisymmetric overmoded periodic waveguide are reported. Cyclotron resonant signal amplification and cyclotron absorption ranges were revealed, the dynamics of beam electrons was studied, as well as the role of beam parameters that affect the cyclotron resonance.

PACS: 84.40.Fe, 07.57.Hm

Keywords: relativistic generator, relativistic electron beam, cyclotron resonance, cyclotron absorption.

Received 27.07.2015.

**Сведения об авторах**

1. Слепков Александр Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-30-38, e-mail: slepkov@phys.msu.ru.
2. Галлямова Ольга Валерьевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-30-38, e-mail: gallyamova@physics.msu.ru.
3. Шелконогов Александр Игоревич — выпускник; тел.: (495) 939-30-38, aisx@me.com.