

Теоретическое и экспериментальное исследование хаотических колебаний в электронном пучке с виртуальным катодом

Калинин Ю.А., Короновский А.А.,
Трубецков Д.И., Храмов А.Е.

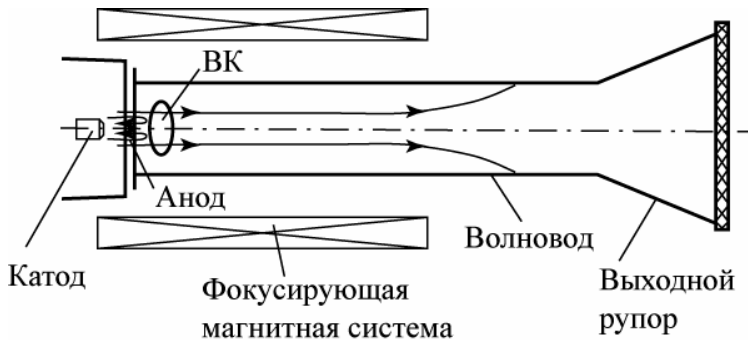
Саратовский государственный университет, Саратов, Россия
E-mail: aeh@cas.ssu.runnet.ru



Генераторы на виртуальном катоде (ВК)

- *Mahaffey R.A., Sprangle P.A., Golden J., Kapetanacos C.A.* High-power microwaves from a non-isochronous reflecting electron system, *Phys.Rev.Lett.* **39** (1977) № 13, 843.
- *Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перельгин С.Ф., Фоменко Г.П.* Генерация мощного СВЧ-излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе, *Письма в ЖТФ.* **5** (1979) № 6, 321.

Схема генератора на ВК



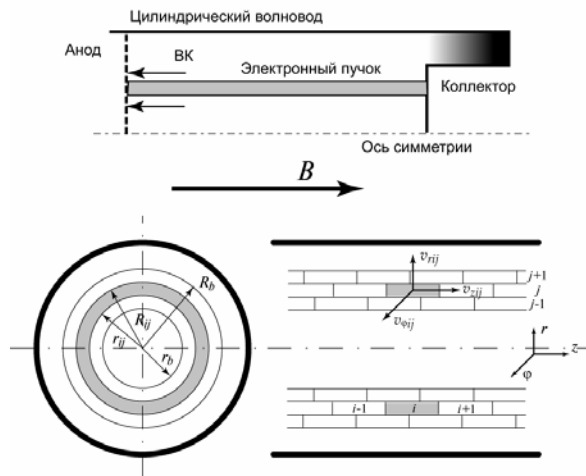
Хаотическая генерация систем с виртуальным катодом

- *Brandt H.E.* The turbutron. IEEE Trans. Plasma Sci. **13**, 6 (1985) 513.
- *Привезенцев А.П., Фоменко Г.П.* Сложная динамика потока заряженных частиц с виртуальным катодом, Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика **2**, 5 (1994) 56.
- *Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И. и др.* Генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью – виртод. Физика плазмы. **19**, 4 (1993) 530.
- *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Исследование когерентных структур в электронном пучке со сверхкритическим током с помощью вейвлетной бикогерентности. Физика плазмы. **28**, 8 (2002) 722.

Цель работы

- Теоретическое и экспериментальное исследование сложных колебаний ВК при изменении тока пучка и величины ведущего магнитного поля (МП)
- Выявление физических механизмов, приводящих к установлению широкополосной хаотической генерации систем с ВК

Теоретическая модель



Формулировка математической модели

Самосогласованная система уравнений Максвелла-Власова:

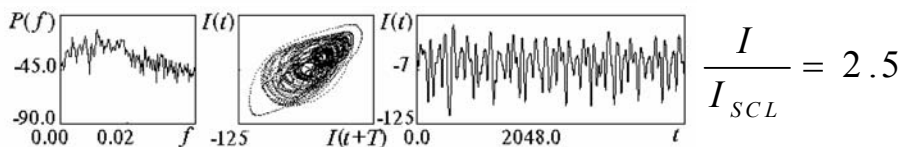
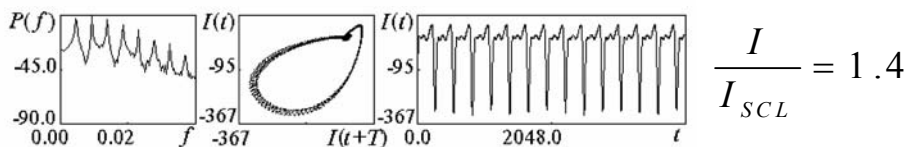
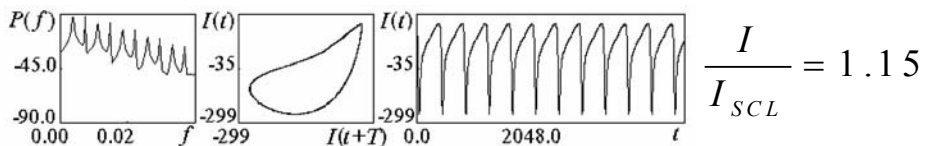
$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j},$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho, \quad \operatorname{div} \vec{H} = 0,$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + e \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{H}] \right) \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = 0,$$

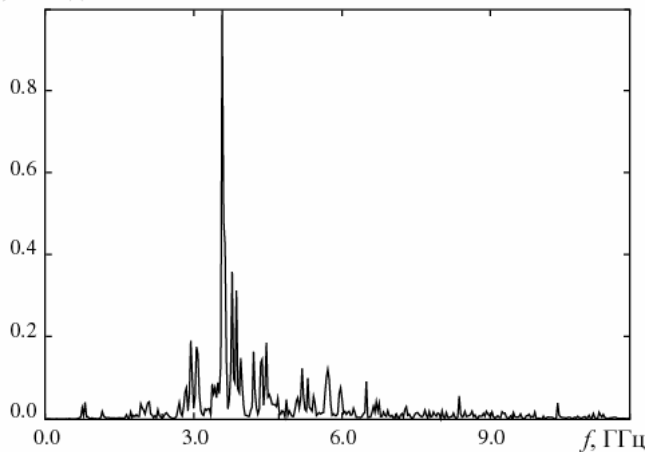
$$\rho = e \int f d\vec{p}, \quad \vec{j} = e \int f \vec{v} d\vec{p}$$

Колебания ВК при увеличении тока пучка и большом МП



Колебания ВК при изменении магнитного поля

P , отн.ед.

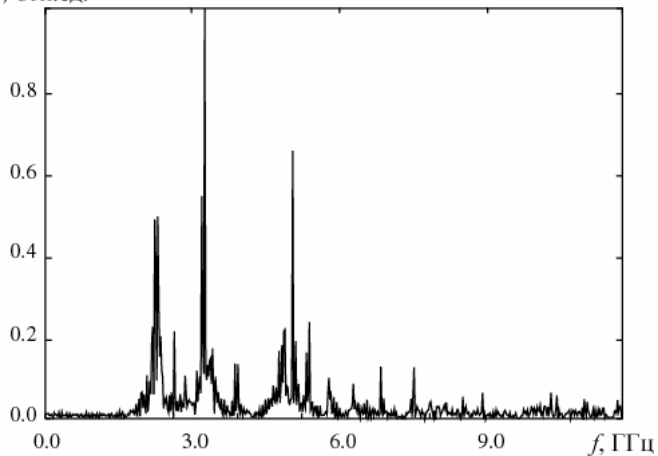


$$B = 40 \text{ кГс}$$

$$I_0 = 1.5 I_{SCL}$$

Колебания ВК при изменении магнитного поля

P , отн.ед.

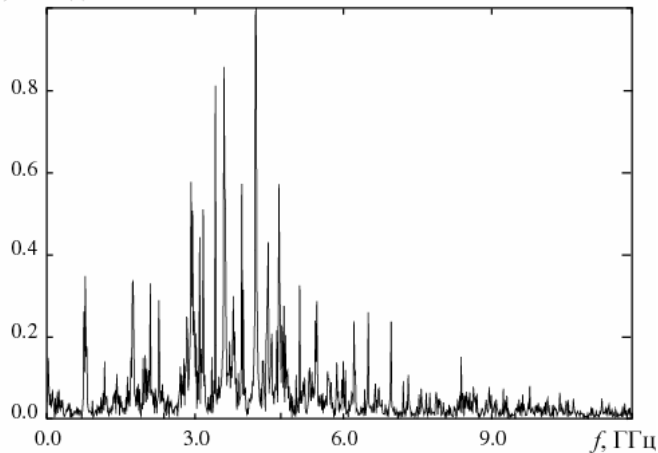


$$B = 20 \text{ кГс}$$

$$I_0 = 1.5 I_{SCL}$$

Колебания ВК при изменении магнитного поля

P , отн.ед.

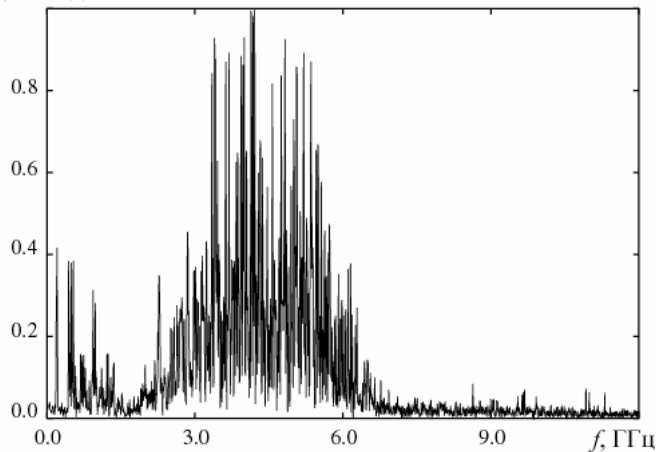


$$B = 6 \text{ кГс}$$

$$I_0 = 1.5 I_{SCL}$$

Колебания ВК при изменении магнитного поля

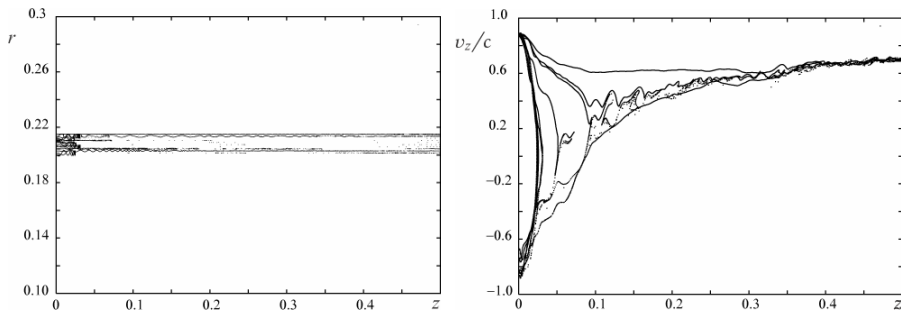
P , отн.ед.



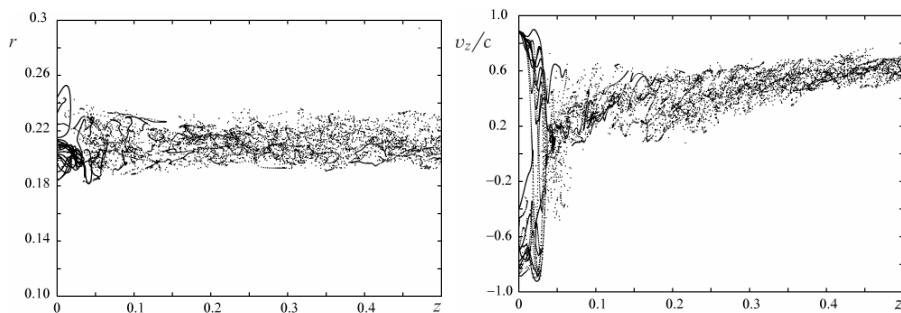
$$B = 0$$

$$I_0 = 1.5 I_{SCL}$$

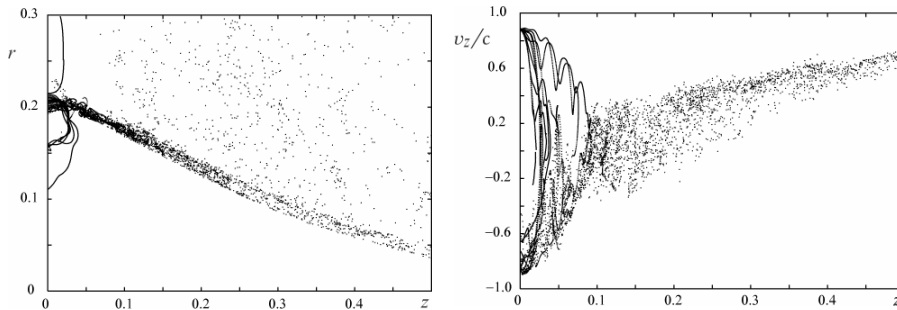
Конфигурационные портреты пучка при величине магнитного поля $B = 40$ кГс



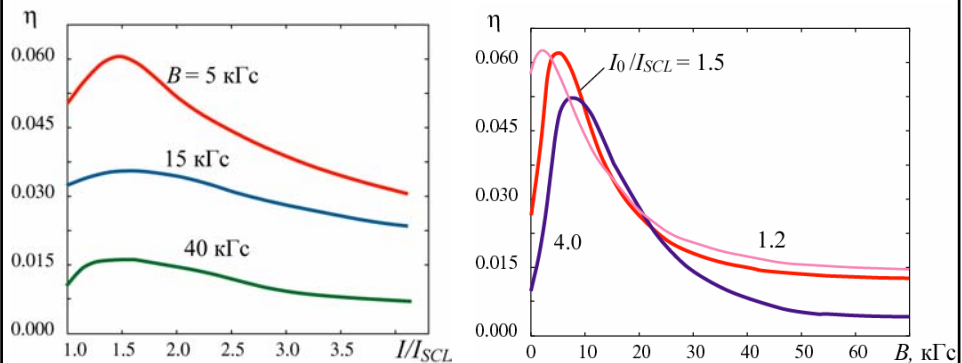
Конфигурационные портреты пучка при величине магнитного поля $B = 6$ кГс



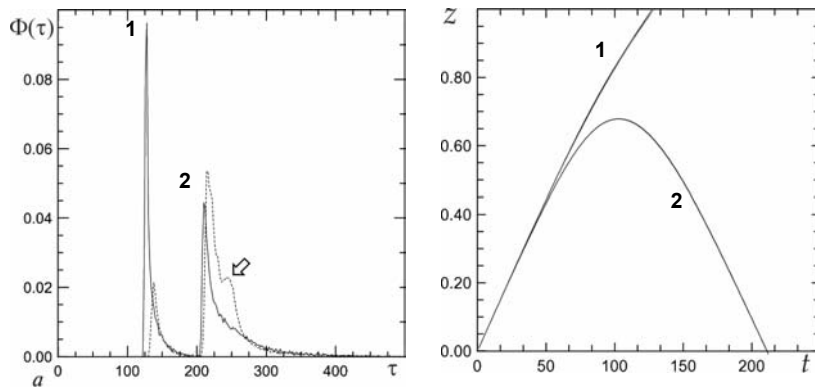
Конфигурационные портреты пучка при величине магнитного поля $B = 0$



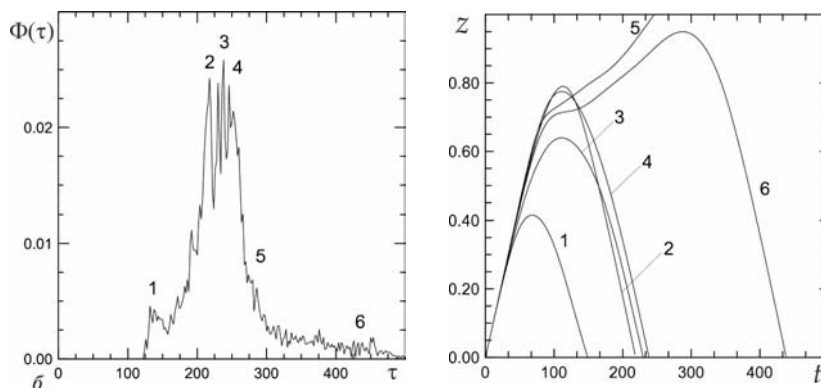
КПД взаимодействия пучка с электромагнитным полем

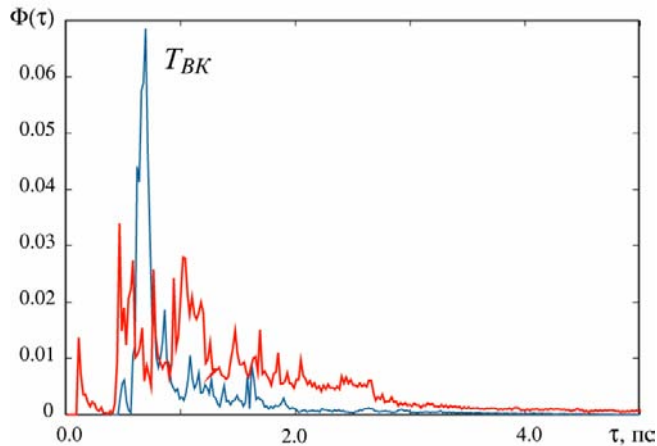


Функции распределения заряженных частиц по временам жизни и характерные траектории заряженных частиц при малом токе пучка и большом магнитном поле (движение пучка близко к одномерному)



Функции распределения заряженных частиц по временам жизни и характерные траектории заряженных частиц при большом токе пучка и большом магнитном поле (движение пучка близко к одномерному)





Функции распределения $\Phi(\tau)$ заряженных частиц по временам жизни в пространстве взаимодействия при величине магнитного поля $B = 40$ кГс (близкая к одночастотной генерация) и $B = 4$ кГс (развитая хаотическая генерация)

Когерентные структуры по Карунену-Лоэву

$$\int K(\zeta, \zeta^*) \Psi(\zeta^*) d\zeta^* = \lambda \Psi(\zeta)$$

«Продольные» структуры:

$$K(z, z^*) = \left\langle \left\langle \rho(z, r, t) \rho(z^*, r, t) \right\rangle_r \right\rangle_t$$

«Поперечные» структуры:

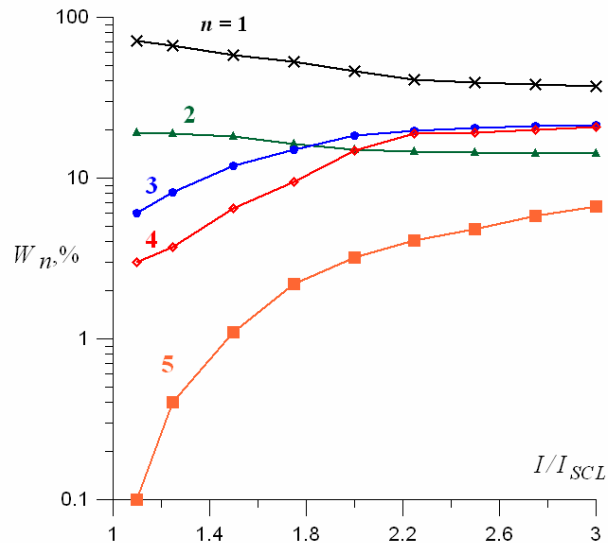
$$K(r, r^*) = \left\langle \left\langle \rho(z, r, t) \rho(z, r^*, t) \right\rangle_z \right\rangle_t$$

Энергия (в % от общей колебательной энергии), заключенная в i -ой КЛ-моде Ψ_i :

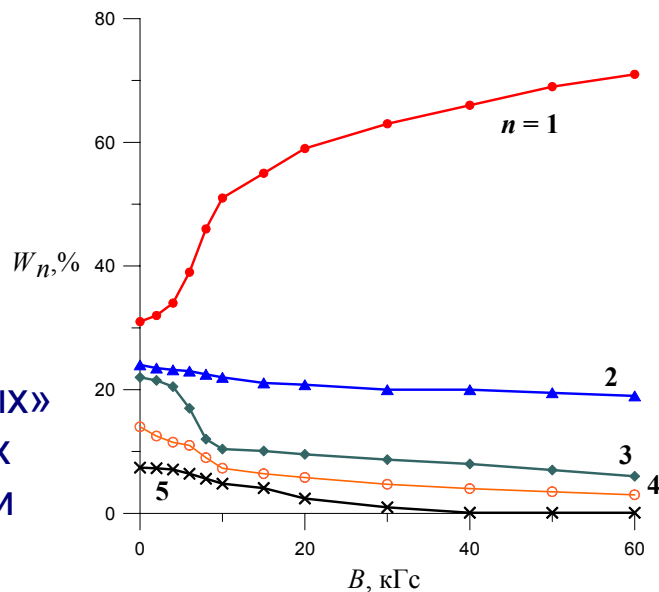
$$W_n = \frac{\lambda_n}{\sum_i \lambda_i} \times 100\%$$

Когерентные структуры при больших величинах магнитного поля

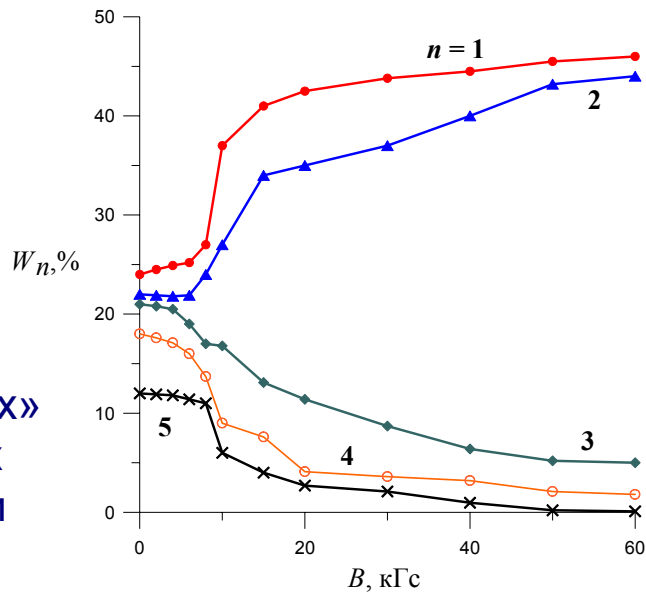
Энергия когерентных структур при увеличении тока пучка



Энергия «продольных» когерентных структур при изменении магнитного поля

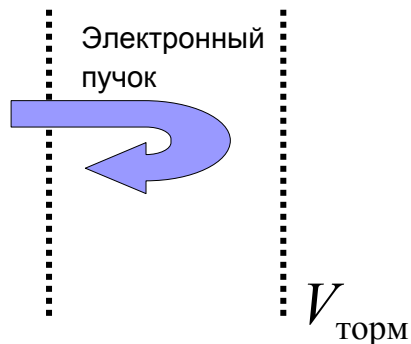


Энергия
«поперечных»
когерентных
структур при
изменении
магнитного поля



Экспериментальное исследование шумоподобных колебаний в пучке со сверхкритическим первеансом

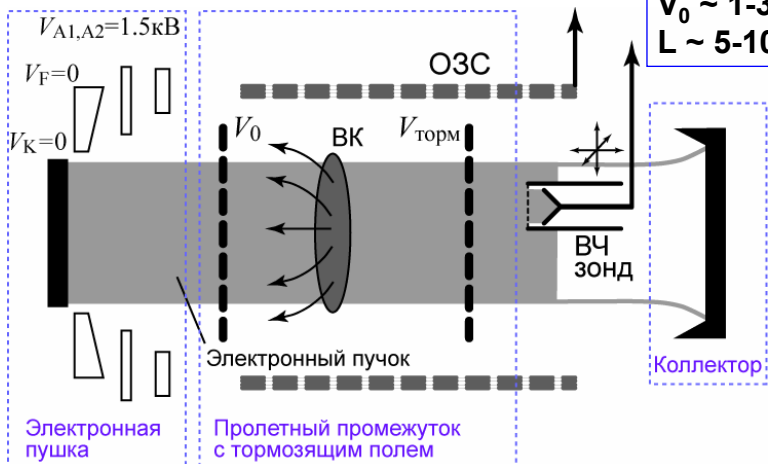
Система с интенсивным нерелятивистским пучком со сверхкритическим первеансом, который создается путем торможения электронов



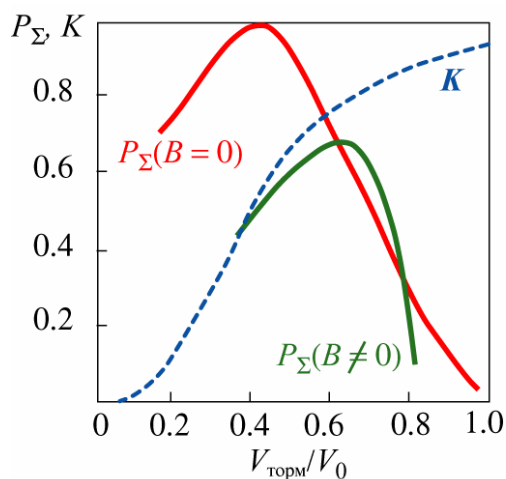
$$p = I/U^{3/2} > p_{\text{кр}}$$

Схема экспериментальной установки

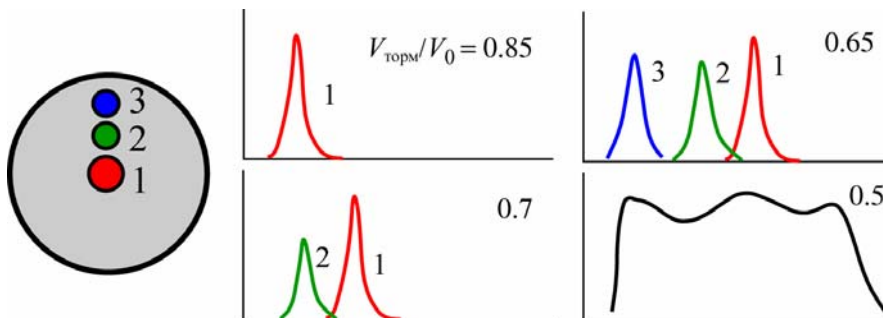
$I \sim 0,1-0,3 \text{ A}$
 $\mu r \sim 2-3 \text{ мкА/В}^{3/2}$
 $V_0 \sim 1-3 \text{ кВ}$
 $L \sim 5-10 \text{ мм}$



Зависимость
 нормированной
 интегральной мощности
 колебаний (P_{Σ}) и
 токопрохождения
 через диод (K) от
 тормозящего
 потенциала второй
 сетки диодного
 промежутка

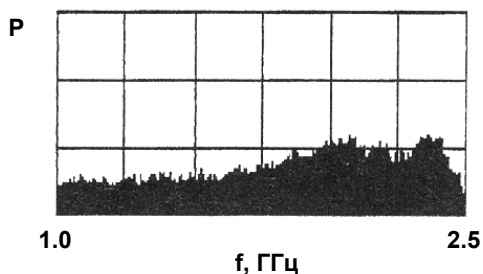


Развитие хаотической генерации



Качественные спектры колебаний, снятые с ВЧ зонда, при различных первеансах (различных тормозящих напряжениях на второй сетке) в различных точках электронного пучка

Спектральные характеристики развитой хаотической генерации

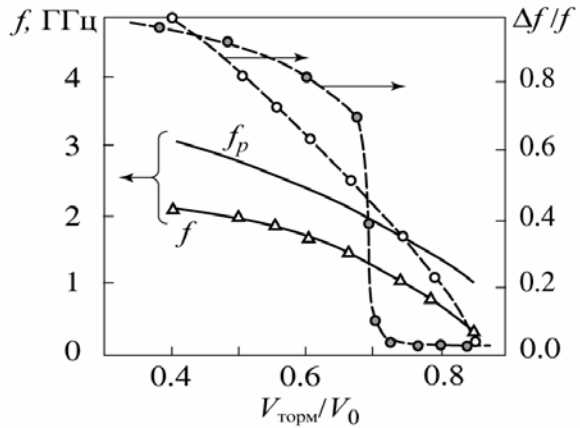


Типичный спектр мощности широкополосных шумоподобных генерируемых СВЧ-колебаний в диапазоне 1-2.5 ГГц, снятый с отрезка замедляющей системы

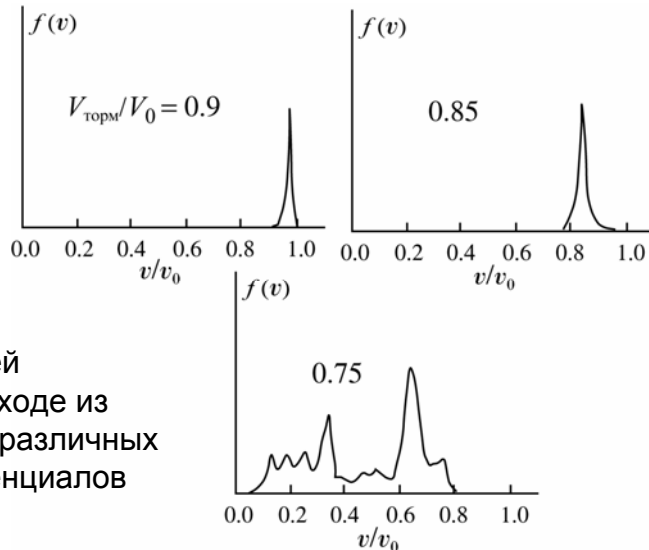
Зависимости
ширины полосы
частот и базовой
частоты генерации
от потенциала сеток

На рисунке также
представлена
теоретическая
зависимость плазменной
частоты от потенциала
сеток

$$\omega_p^2 = \frac{\sqrt{\eta}}{\sqrt{2\varepsilon_0\pi}} \frac{pV}{r^2}$$



Спектры скоростей
электронов на выходе из
второй сетки для различных
отражающих потенциалов

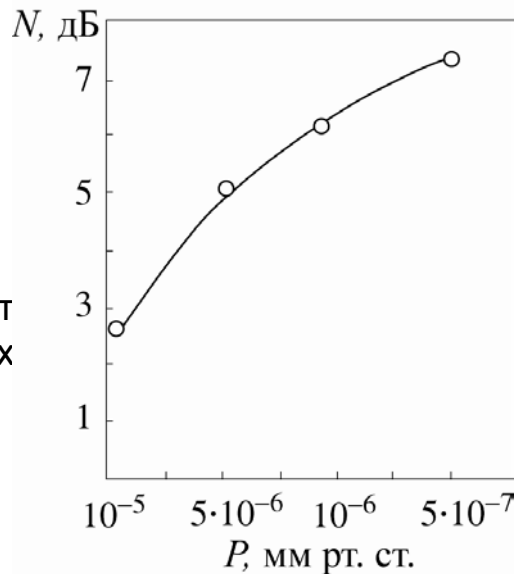


Влияние положительных ионов

Величина
изрезанности

$$N = P_{\max} / P_{\min}$$

спектра колебаний от
давления остаточных
газов



Выводы

- При увеличении превышения током (первеансом) электронного пучка критического значения или уменьшении ведущего магнитного поля наблюдается хаотизация колебаний в пучке с ВК
- Усложнение динамики электронного пучка с ВК определяется формированием и взаимодействием пространственных структур
- Механизм генерации широкополосных шумоподобных колебаний с помощью ВК может быть использован для создания генераторов хаоса с широкой полосой и слабой изрезанностью спектра среднего и большого уровня мощности