

IAP RAS

Генерация сверхмощного когерентного микроволнового излучения на основе эффектов захвата и самосинхронизации

Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, И.В. Зотова
ИПФ РАН

Генерация сверхмощного излучения неизбежно требует использования сверхразмерных электродинамических систем. Поддержание когерентности излучения может быть достигнуто на основе эффектов самосинхронизации или эффектов захвата внешним сигналом.

План

1. Синхронизация за счет естественной дифракционной расходимости излучения при умеренном параметре Френеля.
2. Синхронизация излучения за счет организации двумерной распределенной обратной связи при больших параметрах Френеля.
3. Захват внешним сигналом для обеспечения одномодовой генерации в гиротронах на первой и второй циклотронных гармониках и когерентного суммирования излучения гиротронных комплексов

1. Синхронизация за счет естественной дифракционной расходимости излучения при умеренном параметре Френеля

$\psi = n\lambda/l_x$ - угол дифракционной расходимости моды с числом поперечных вариаций n

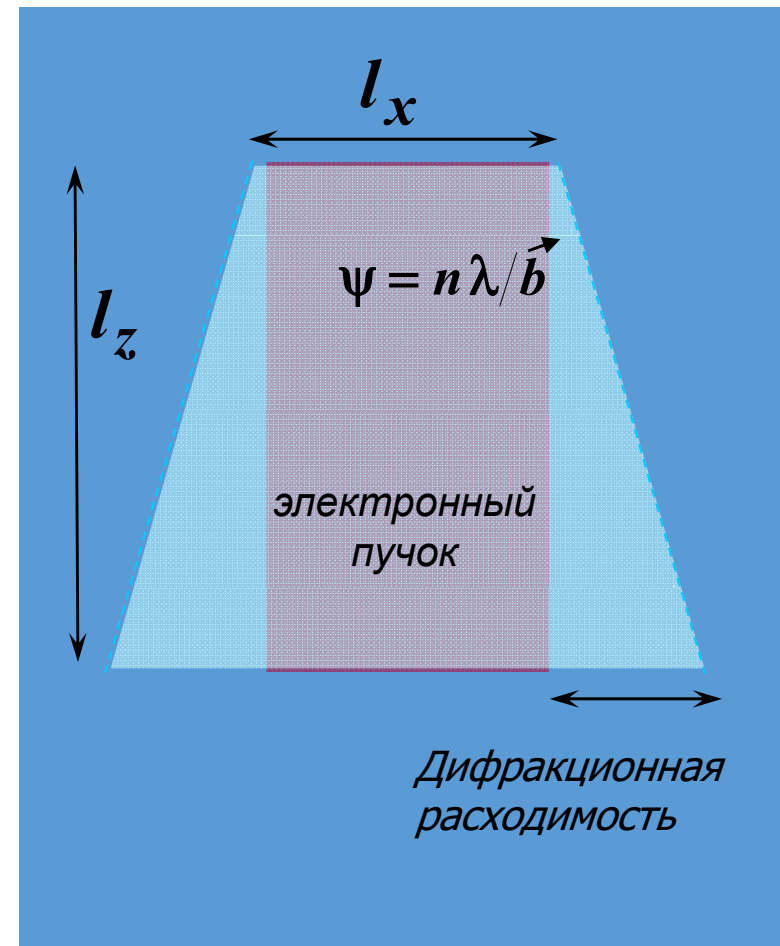
$$\Delta l_x = \psi l_z$$

Условие дифракционной селекции

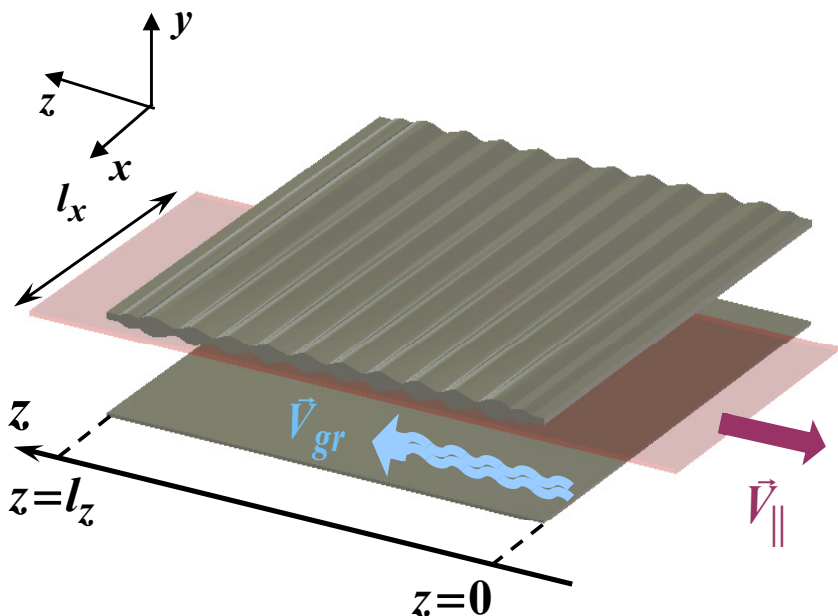
$$\Delta l_{x1} \sim l_x$$

Селекция эффективна при параметрах Френеля ~ 1

$$N_F = \frac{l_x^2}{\lambda l_z} \sim 1$$



Планарная ЛОВ с дифракционной селекцией мод



$$\vec{E} = \text{Re} \left[\vec{E}_s(y) A(z, x, t) e^{i(\omega t - hz)} \right]$$

$$i \frac{\partial^2 A}{\partial X^2} + \frac{\partial A}{\partial Z} = F(X) \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial \zeta} - \frac{\partial}{\partial Z} \right)^2 \theta = \text{Re}(A e^{i\theta})$$

$$l_z \sim \lambda \gamma^2 \Rightarrow l_x \sim \lambda \gamma$$

$$A|_{Z=0} = 0, \quad \theta|_{Z=L_Z} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \left(\frac{\partial}{\partial Z} - \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta \Big|_{Z=L_Z} = 0$$

$$\zeta = \tau + Z/\beta_{gr}$$

Излучательные граничные условия

Гинзбург, Завольский, Нусинович,
Сергеев (1986), нестационарная
теория гиротронов

$$A \left(\pm \frac{L_x}{2}, Z \right) \pm \sqrt{\frac{1}{\pi i}} \int_0^Z \frac{1}{\sqrt{Z-Z'}} \frac{\partial A(X, Z')}{\partial X} \Big|_{X=\pm \frac{L_x}{2}} dZ' = 0$$

Приближение малого сигнала: инкременты и стартовые токи собственных мод

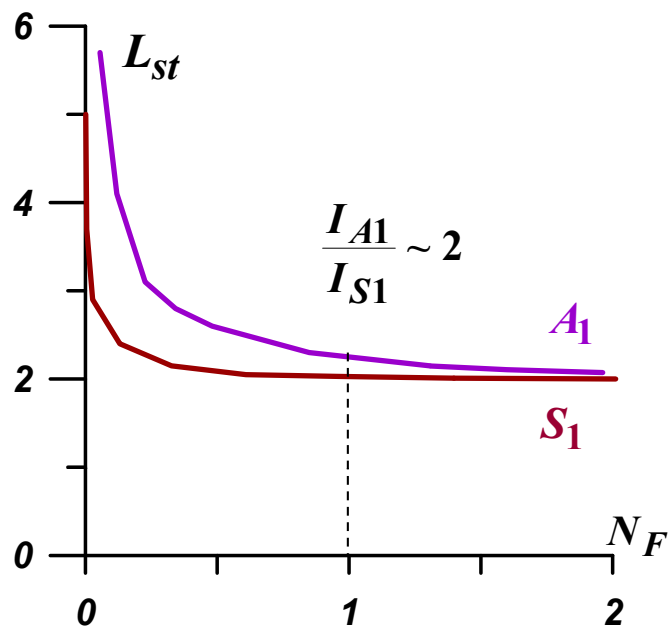
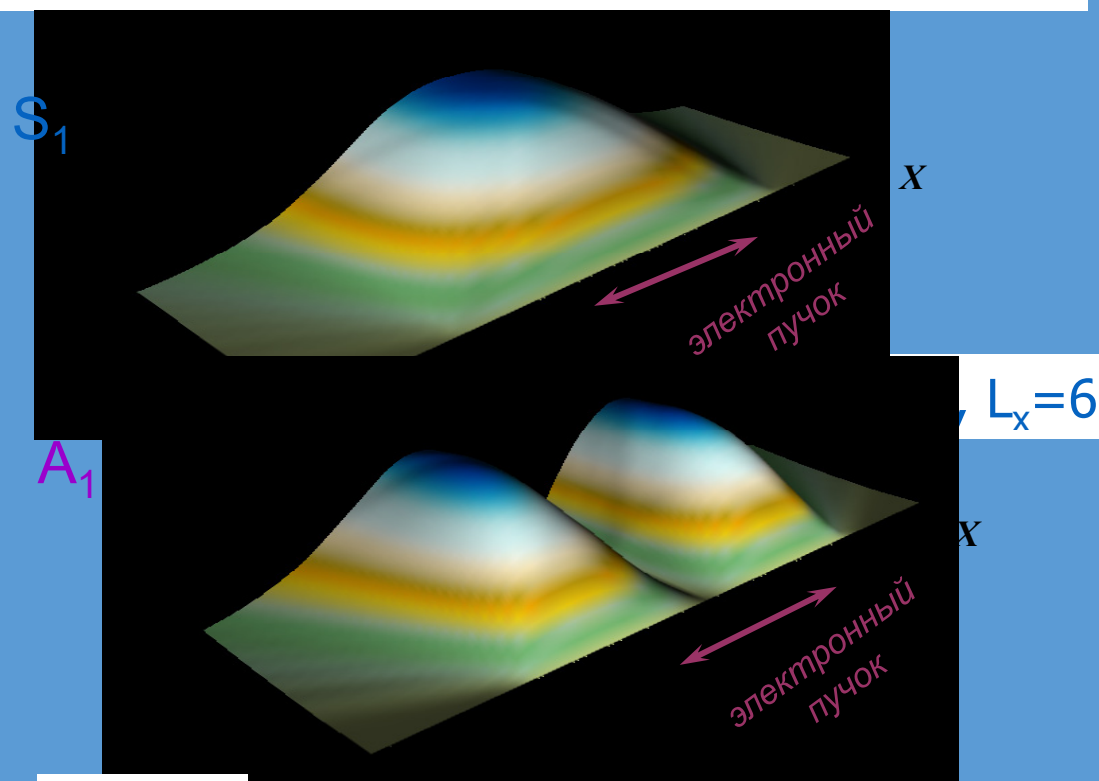
$$i \frac{\partial^2 A}{\partial X^2} + \frac{\partial A}{\partial Z} = JF(X),$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial \zeta} - \frac{\partial}{\partial Z} \right)^2 J = -iA$$

$$A|_{Z=0} = 0, \quad J|_{Z=L_z} = 0,$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial \zeta} - \frac{\partial}{\partial Z} \right) J \Big|_{Z=L_z} = 0$$

Структуры собственных мод с различным поперечным индексом:



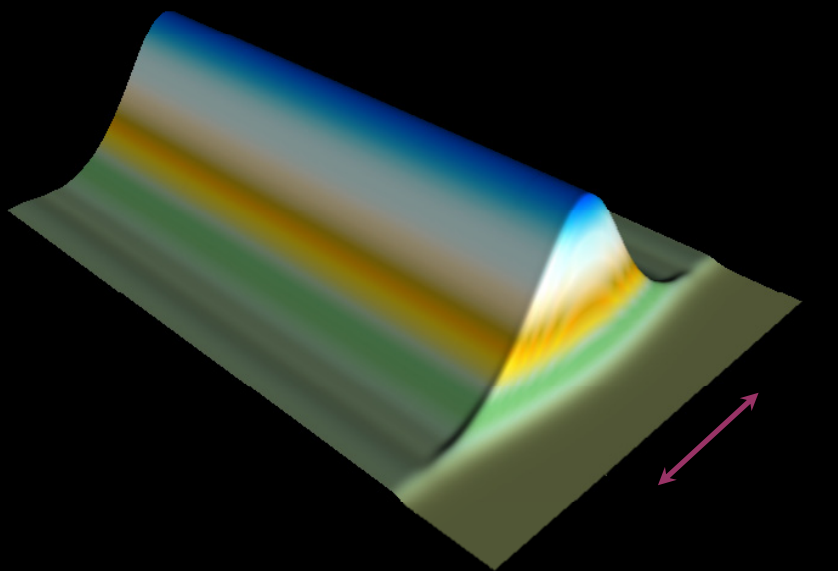
$$N_F \sim 1$$

$$\frac{L_{A1}}{L_{S1}} \sim 1.2$$

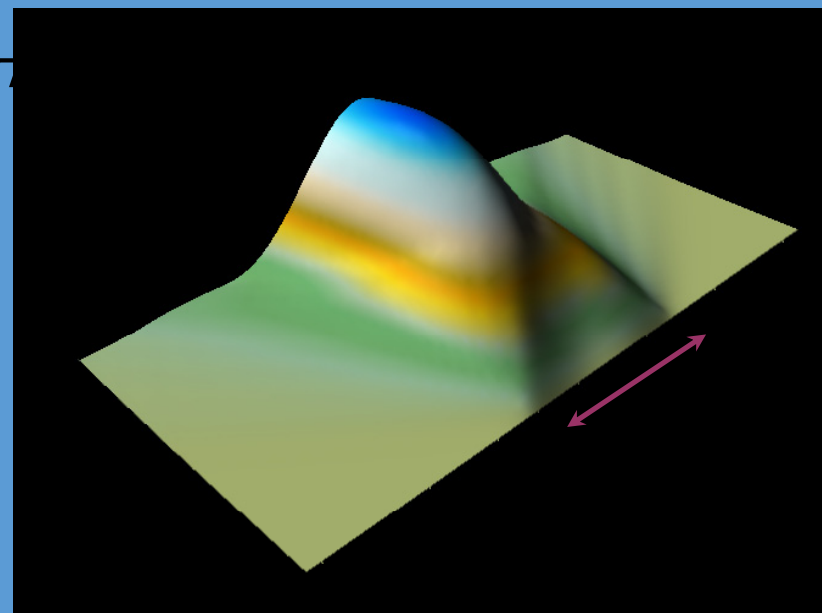
Зависимость стартовых длин для мод с различным числом попереных вариаций от параметра Френеля

Характеристики стационарного режима генерации

Эволюция поперечной структуры

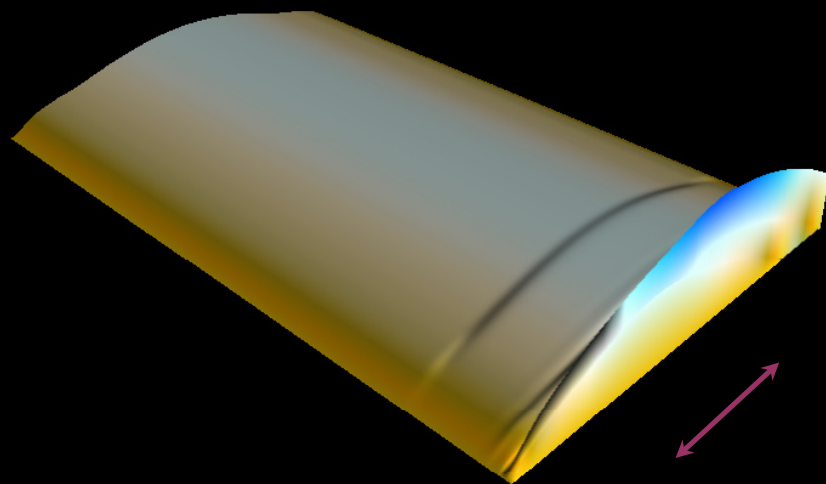


Мг

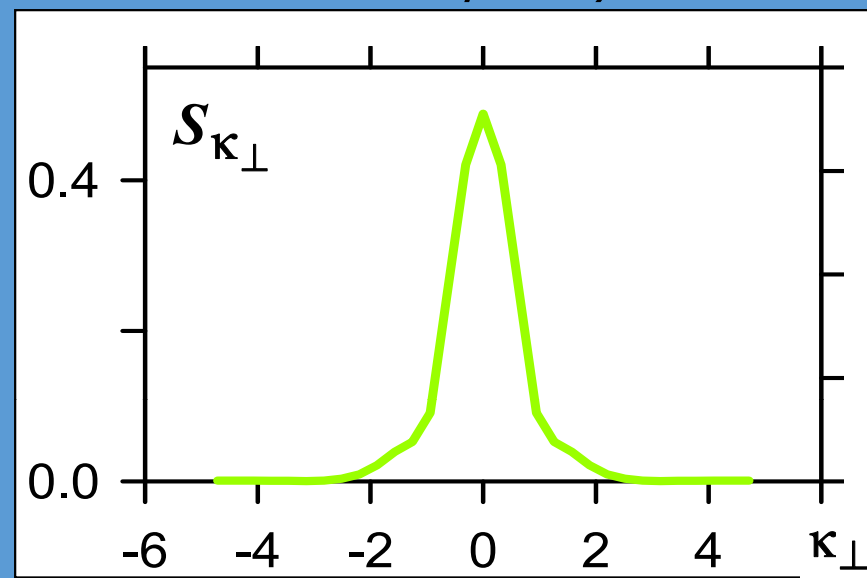


$$L_x = 6 \quad N_F \sim 1.2$$

ф



Угловой спектр излучения

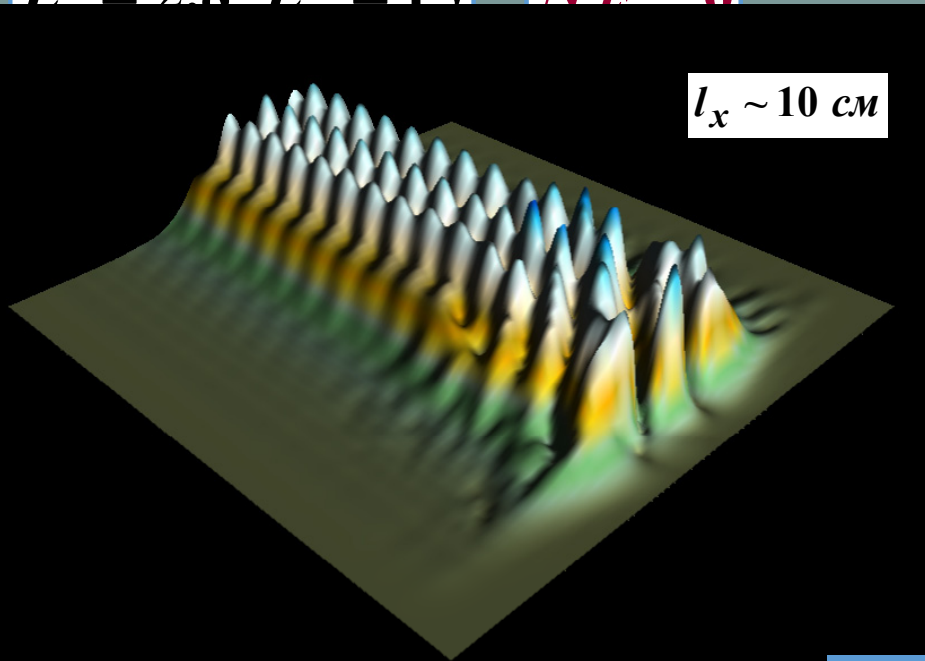


*Переход к хаотическому режиму генерации
при увеличении ширины электронного потока*

$L_z = 2.8$ $L_x = 15$

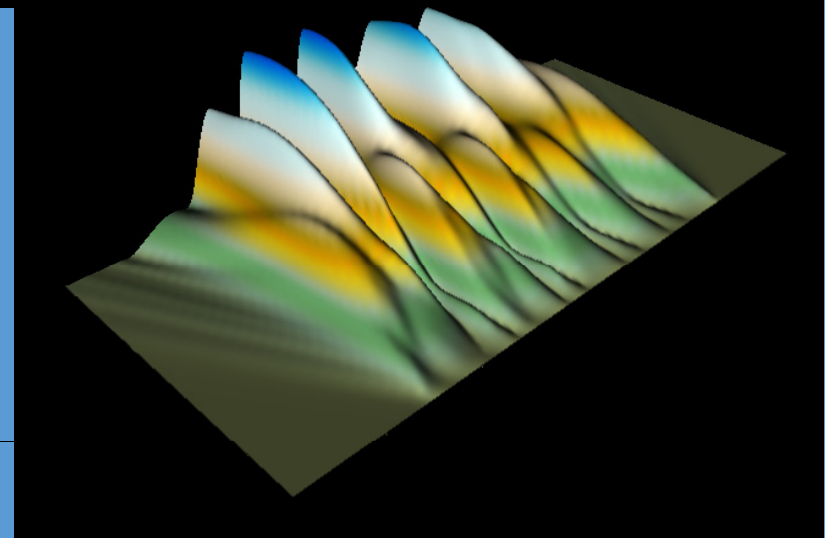
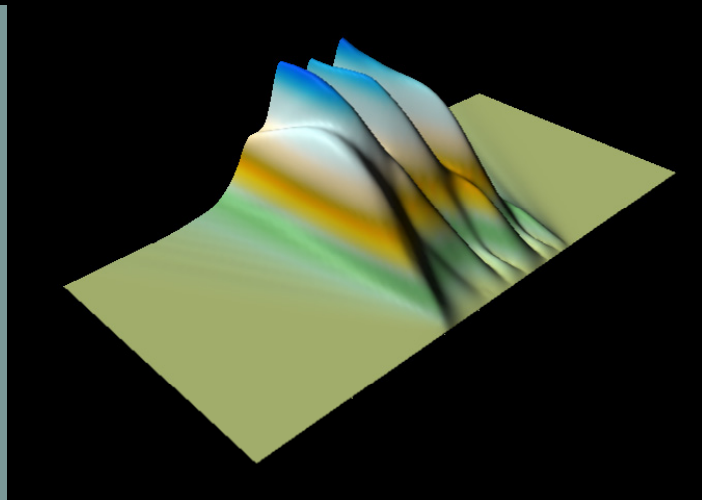
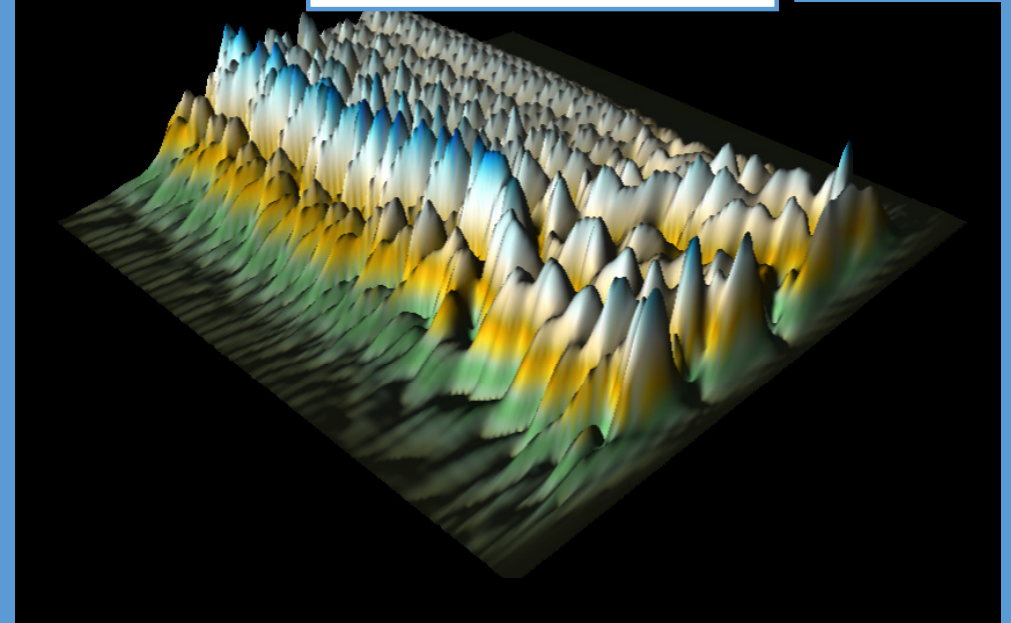
$N_F \sim 6$

$l_x \sim 10$ см



$L_z = 2.8$ $L_x = 30$

$N_F \sim 25$

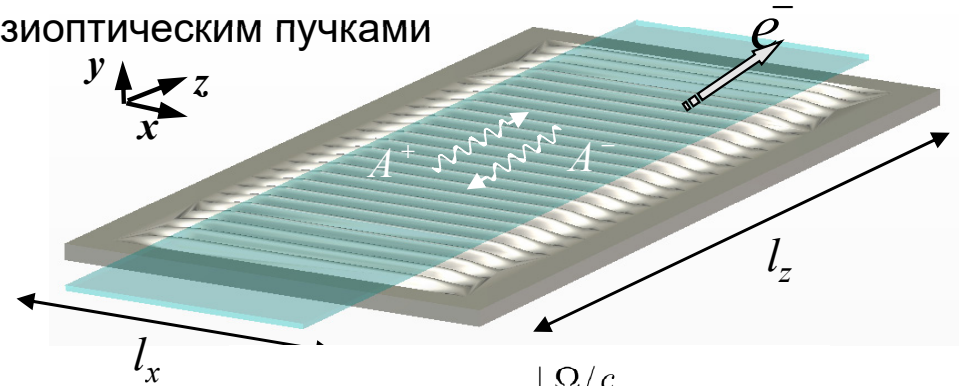


Возбуждение поверхностной волны прямолинейным электронным пучком

Поверхностная волна формируется двумя встречными квазиоптическими пучками

$$H_x = \text{Re} \left[A_+(z, x, y, t) e^{i(\omega t - kz)} + A_-(z, x, y, t) e^{i(\omega t + kz)} \right]$$

$$E_z = \frac{i}{k} \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad \text{- продольная компонента электрического поля}$$



Метод связанных волн

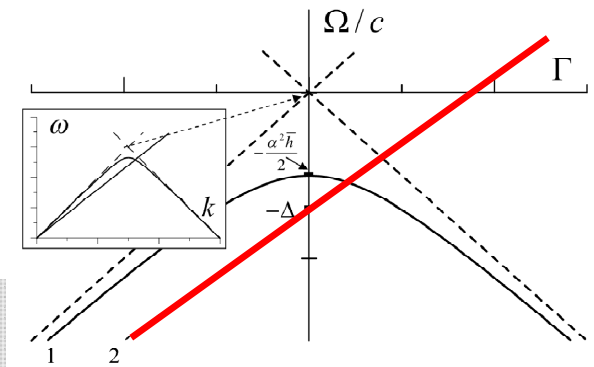
$$\frac{\partial \hat{C}_+}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{C}_+}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_+}{\partial Y^2} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_+}{\partial X^2} = i \alpha \hat{C}_- \delta(Y) - \frac{1}{B_e} \frac{\partial}{\partial Y} (F(X, Y) J),$$

$$-\frac{\partial \hat{C}_-}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{C}_-}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_-}{\partial Y^2} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_-}{\partial X^2} = i \alpha \hat{C}_+ \delta(Y),$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_0^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \text{Re} \left[\frac{\partial \hat{C}_+}{\partial Y} e^{i\theta} \right], \quad \sim E_z$$

$\theta = \omega_0 t - k(\omega_0) z$ - фаза электронов относительно попутной волны

$\hat{\Delta} = (1 - \beta_0) / G \beta_0$ - расстройка синхронизма



Граничные условия:

$$C_+|_{Z=0} = 0, \quad C_-|_{Z=L} = 0.$$

$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi),$$

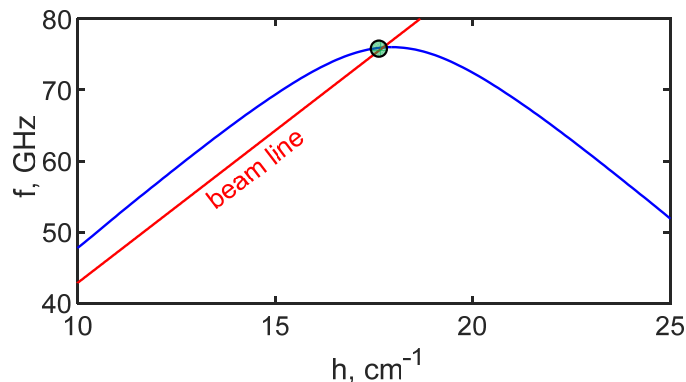
$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_0^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta \Big|_{Z=0} = \hat{\Delta}$$

$$B_e = \int_0^\infty F(Y) dY$$

$$\hat{\alpha} = \alpha \sqrt{2/G}, \quad G = \left(2\sqrt{2} \frac{eI_0}{mc^3} \frac{\mu}{\gamma} \lambda \right)^{2/3}$$

Трёхмерное PIC моделирование нелинейной динамики ГПВ 75ГГц - диапазона

Дисперсионная диаграмма
поверхностной моды



Зависимость выходной
мощности от времени

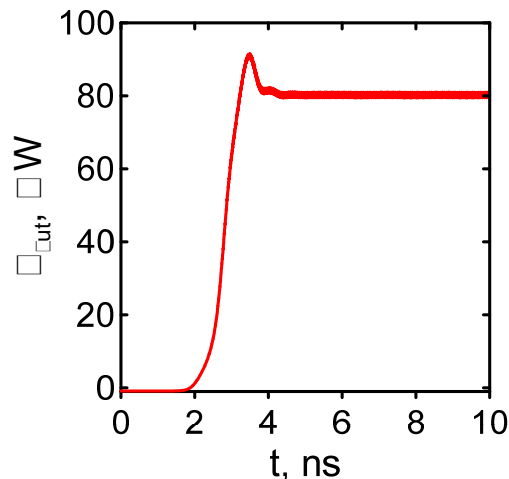


Table 1. Basic parameters of planar SWO

Interaction space geometry

grating period 1.75 mm
amplitude of sinusoidal corrugation 0.28 mm
total length of the corrugation section 50 mm

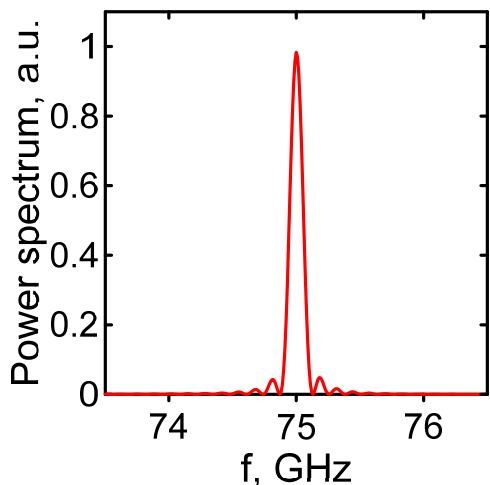
SINUKEI accelerator parameters

guiding magnetic field 3T
accelerating voltage 650 – 700 kV
operating electron current 1 kA
beam cross-section in the interaction space 0.3 × 20 mm²

Calculated parameters

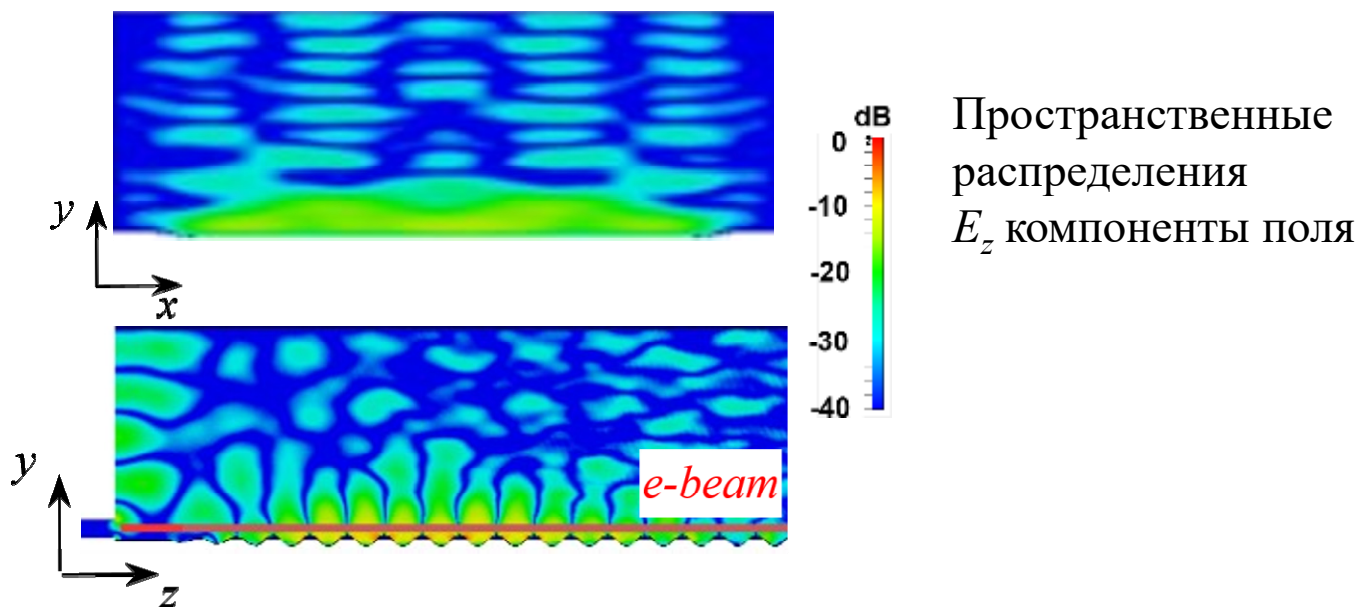
oscillation frequency 75 GHz, output power ~ 80 MW
ohmic losses < 5 %

Спектр излучения



Параметр
сверхразмерности

$$l_x / \lambda \approx 5$$



Пространственные
распределения
 E_z компоненты поля

Пространственная структура компоненты поля H_x в стационарном одномодовом режиме генерации в плоскости (x, z)

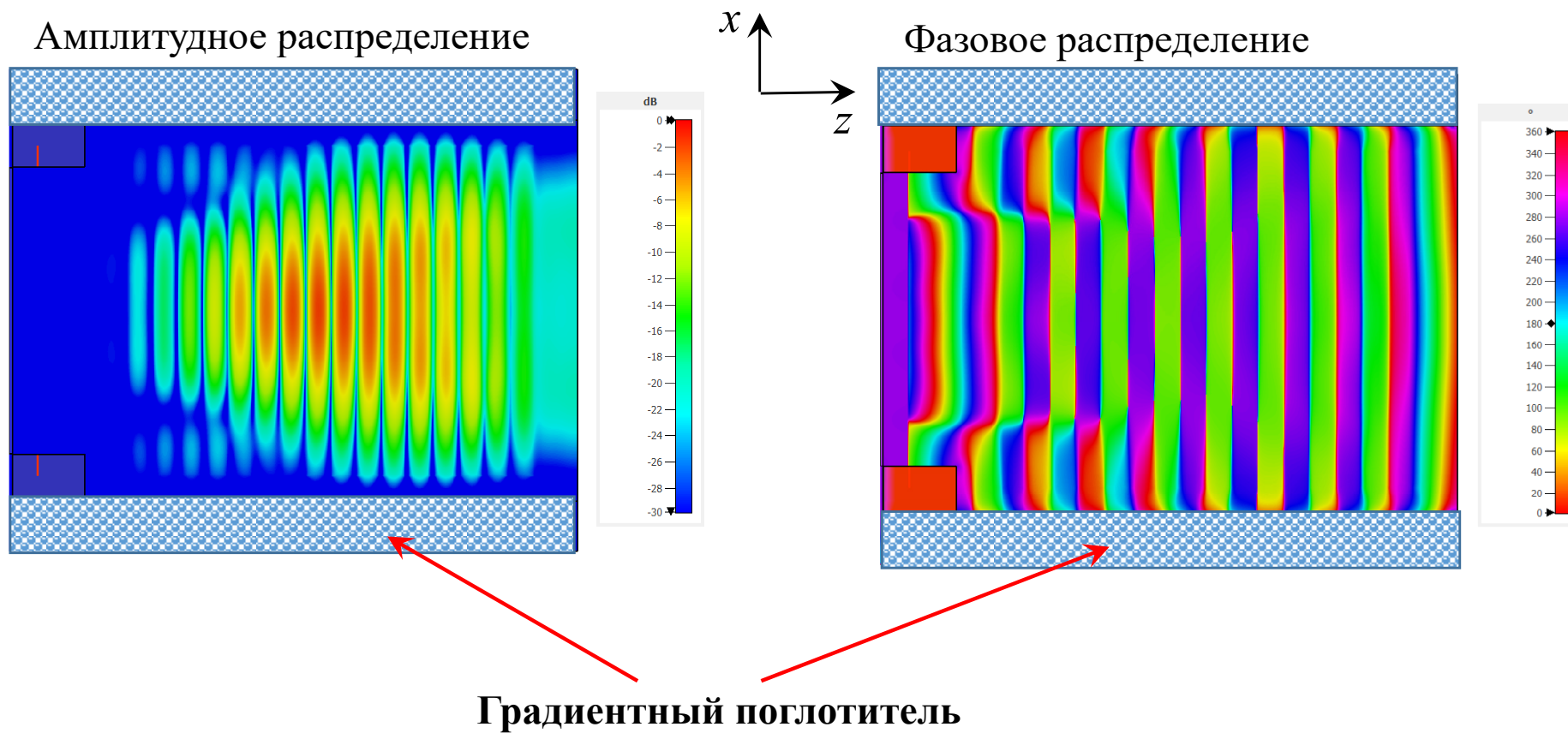
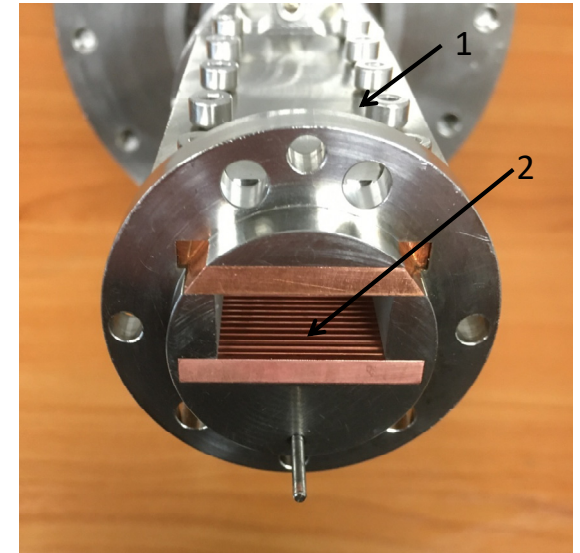
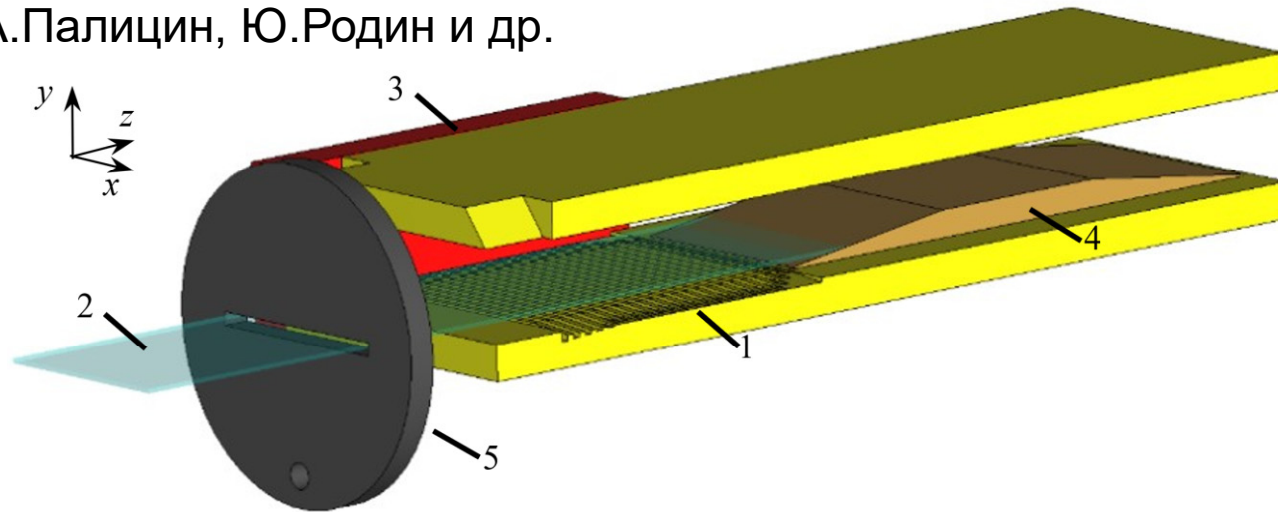


Схема генератора поверхностной волны планарной геометрии с дифракционной селекцией мод

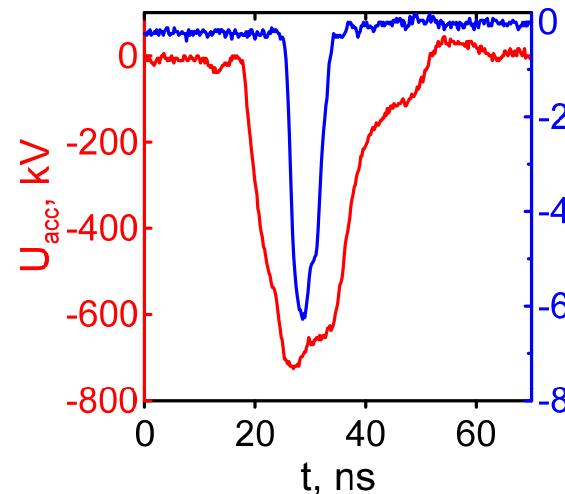
А.Палицин, Ю.Родин и др.



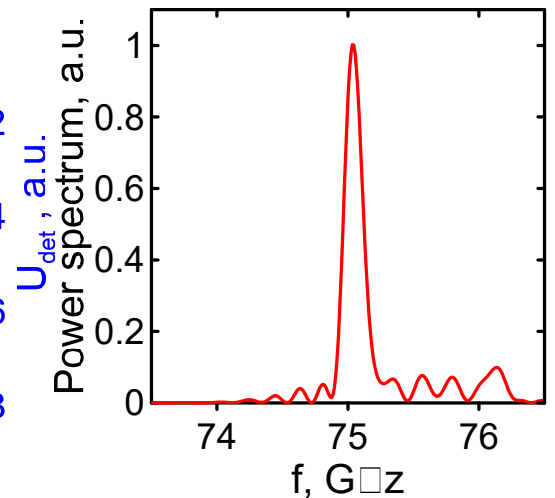
- 1: замедляющая система
- 2: прямолинейный релятивистский электронный пучок
- 3: градиентный поглотитель
- 4: коллектор
- 5: катодная диафрагма

$P=20\text{МВт}$

Осциллограммы катодного напряжения (красная кривая) и импульса выходного излучения (синяя кривая)

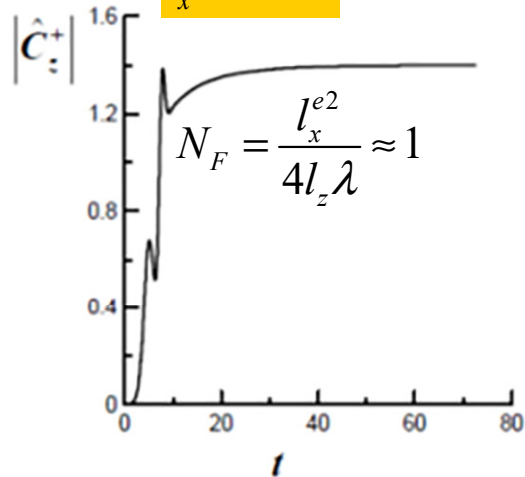


Спектр излучения

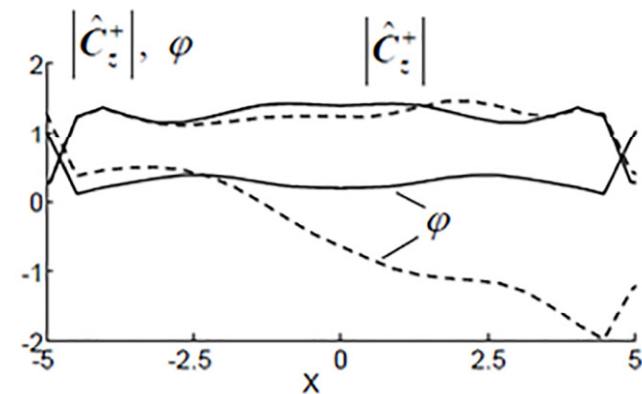
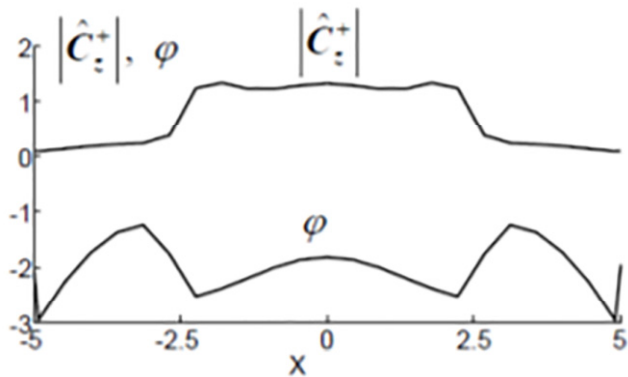
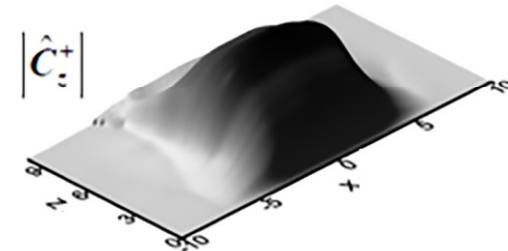
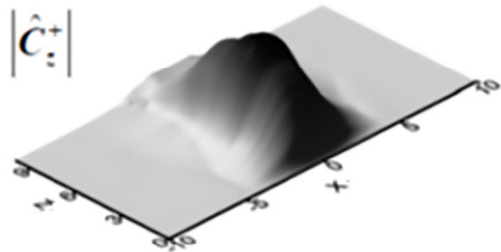
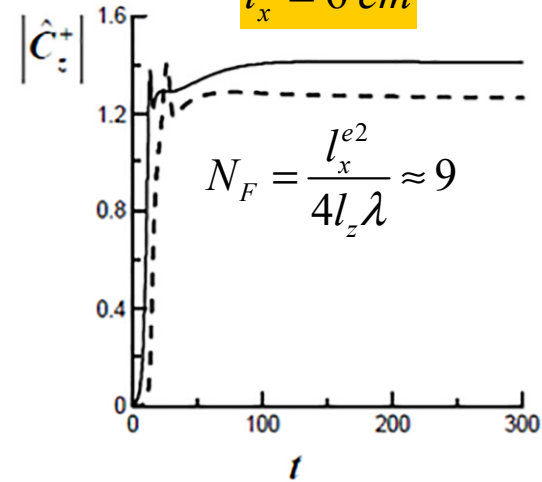


Возникновение мультистабильности режимов при увеличении ширины ГПВ

$l_x^e = 2 \text{ cm}$



$l_x^e = 6 \text{ cm}$

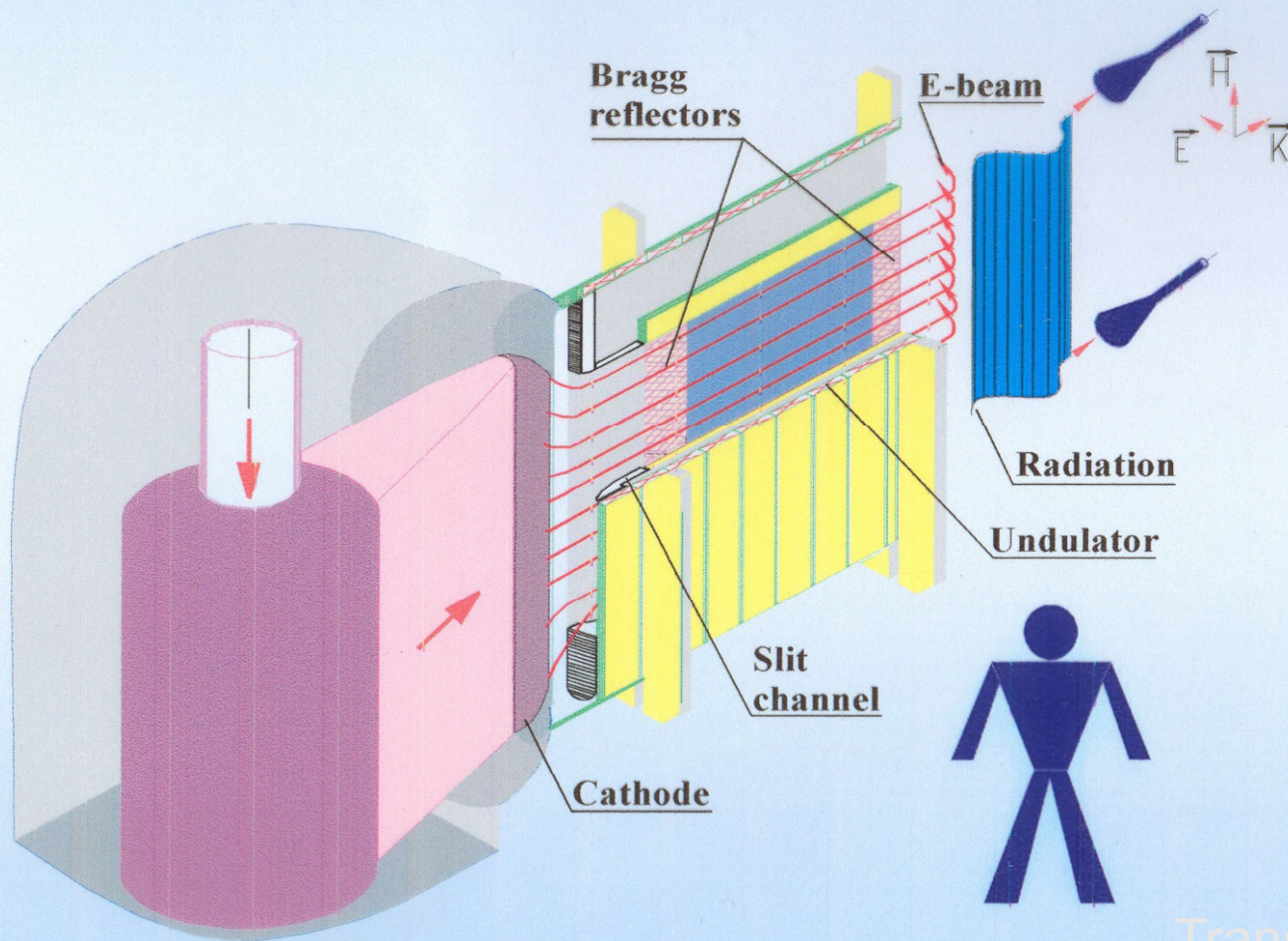


Возбуждение мод с различным числом вариаций поля по координате x

2. Синхронизация излучения за
счет организации двумерной
распределенной обратной связи
при больших параметрах
Френеля

PROJECT OF FULL-SCALE PLANAR FEM BASED ON THE U-2 ACCELERATOR

A.V. Arzhannikov, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk



Beam parameters:

$$E_e = 1 \text{ MeV}$$

$$I_b = 50 \text{ kA}$$

$$\tau_b = 8 \text{ } \mu\text{s}$$

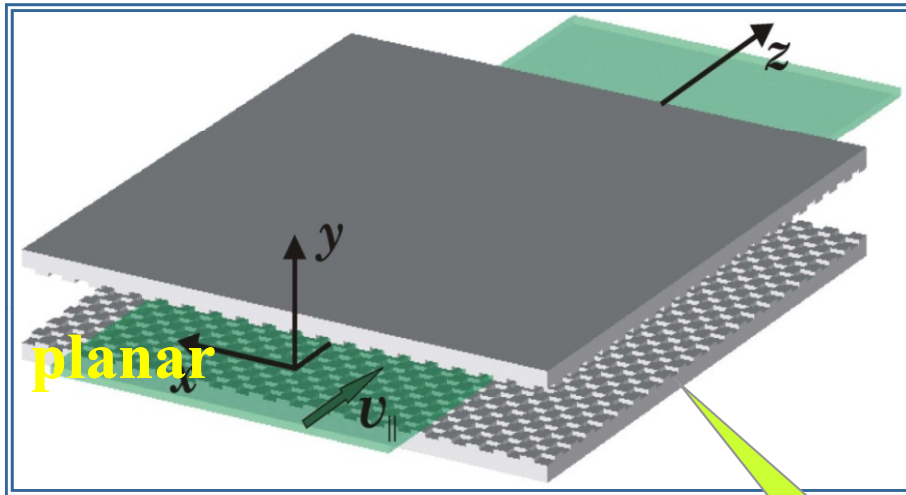
$$Q_b = 0.4 \text{ MJ}$$

Transverse size is about 1.5m

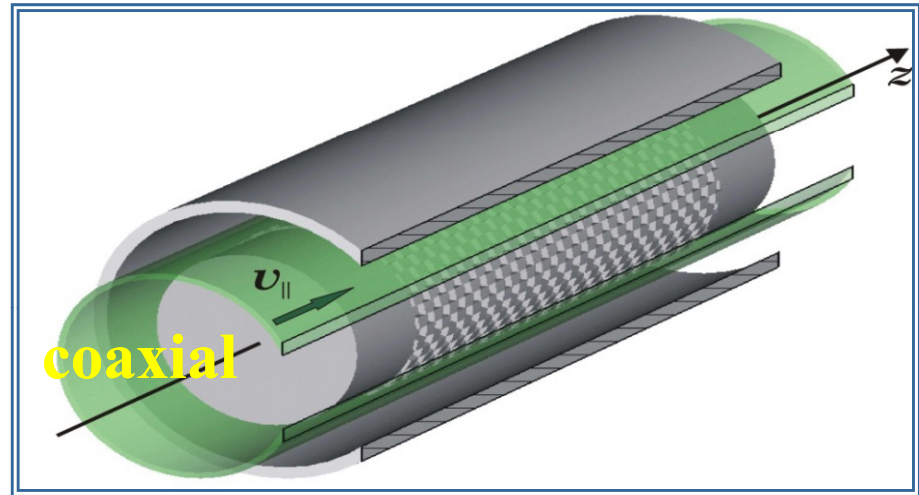
Using planar and coaxial 2D Bragg structures for synchronization of radiation of powerful sheet and hollow electron beam.

Concept of 2D distributed feedback.

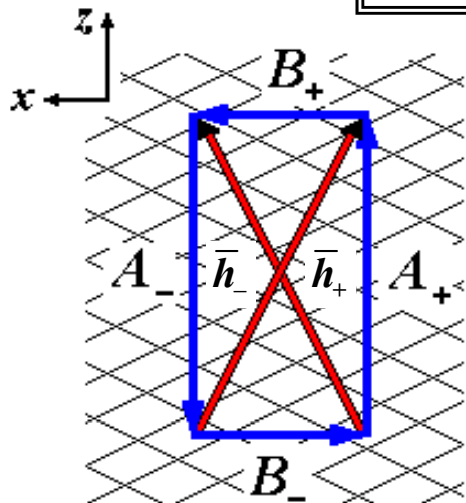
Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. // *Opt.Comm.* 1993. V.96. N4-6. P.254;



BINP, Novosibirsk



U. of Strathclyde, Glasgow



*Double-periodical
corrugation of
sidewalls*

$$a_1 \left[\cos(\bar{h}x - \bar{h}z) + \cos(\bar{h}x + \bar{h}z) \right]$$

Coupled wave model of planar 2D Bragg resonator

$$a = a_1 \left[\cos(\bar{h}x - \bar{h}z) + \cos(\bar{h}x + \bar{h}z) \right] - \text{corrugation profile}$$

a_1 – depth of corrugation

$$\text{Cavity field: } \vec{E} = \text{Re} \left[\vec{E}_p(y) \left(A_+ e^{-i\bar{h}z} + A_- e^{i\bar{h}z} + B_+ e^{-i\bar{h}z} + B_- e^{i\bar{h}z} \right) e^{i\omega t} \right]$$

$$\begin{cases} A_{\pm}(x, z) \\ B_{\pm}(x, z) \end{cases} - \text{slow functions}$$

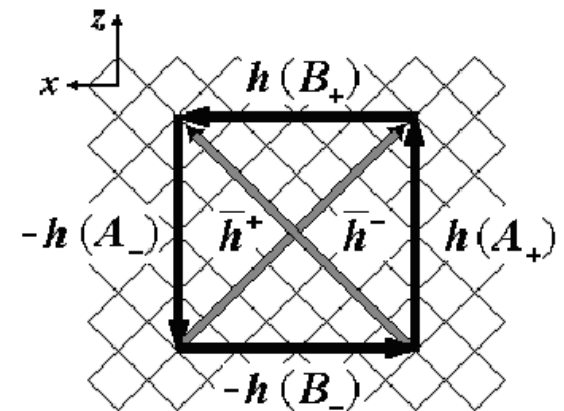
$$\bar{h}_{\pm} = \frac{2\pi}{d} - \text{projections of translational}$$

grating vectors, $\bar{h} = \bar{h}_{\pm} / \sqrt{2}$,

d – corrugation period,

\vec{h} – wave vectors of partial waves

Diagram illustrating the scattering of the partial waves on the 2D Bragg grating:



Bragg resonance condition: $h \approx \bar{h}$

The coupled-wave equations (geometrical-optical approximation):

$$\frac{\partial A_+}{\partial z} + i\delta A_+ + i\alpha (B_+ + B_-) = 0 \quad \frac{\partial A_-}{\partial z} - i\delta A_- - i\alpha (B_+ + B_-) = 0$$

$$\frac{\partial B_+}{\partial x} + i\delta B_+ + i\alpha (A_+ + A_-) = 0 \quad \frac{\partial B_-}{\partial x} - i\delta B_- - i\alpha (A_+ + A_-) = 0$$

$$A_{\pm} = A_{\pm} e^{\pm i\delta z}, \quad B_{\pm} = B_{\pm} e^{\pm i\delta z}$$

$\delta = \bar{h} - h$ – frequency mismatch from the Bragg resonance

$\bar{\omega} = \bar{h} c$ – Bragg frequency

α – coupling coefficient:

$\alpha = a_1 \bar{h} / 8a_0$ – for scattering TEM \leftrightarrow TEM waves of planar waveguide

Fresnel parameter :

$$\frac{l_x^2}{l_z \lambda} \gg 1$$

$$\frac{l_z^2}{l_x \lambda} \gg 1$$

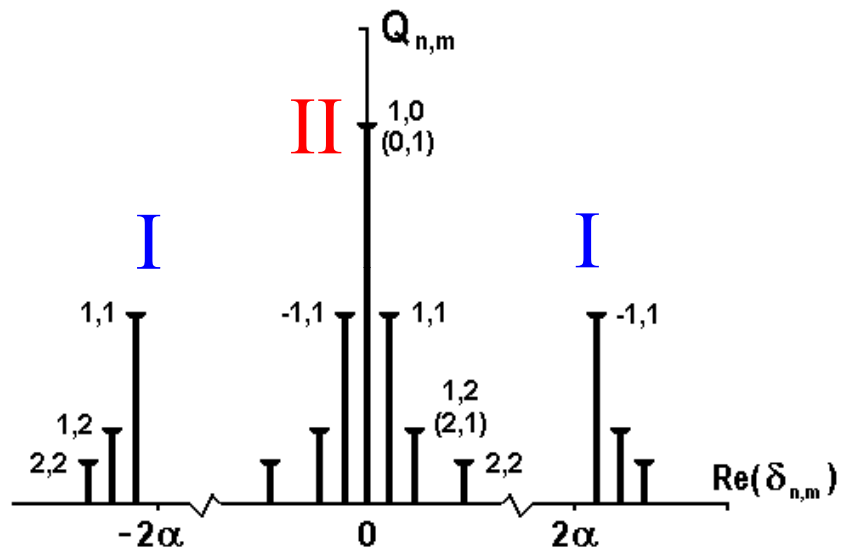
Diffraction is neglected

Boundary conditions:

$$\left. \begin{array}{l} \text{e.m. energy fluxes from outside} \\ \text{and edge reflections are absent} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A_+(x, -l_z/2) = 0 \quad A_-(x, l_z/2) = 0 \\ B_+(-l_x/2, z) = 0 \quad B_-(l_x/2, z) = 0 \end{array} \right\}$$

Frequencies and Q-factors of 2D Bragg resonant modes

The analytical solution in the case: $\alpha L_{x,z} \gg 1$

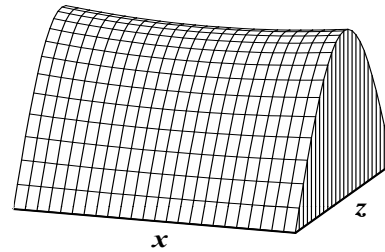


$$\delta_{m,n}^{(II)} = \pm \frac{\pi^2 mn}{2\alpha l_z l_x} + i \frac{\pi^2}{2\alpha^2 l_z l_x} \left(\frac{n^2}{l_z} + \frac{m^2}{l_x} \right)$$

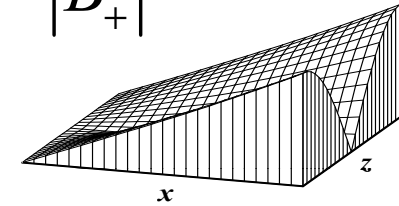
$$\delta_{m,n}^{(I)} = \pm \left[2\alpha + \frac{\pi^2}{4\alpha} \left(\frac{n^2}{l_z^2} + \frac{m^2}{l_x^2} \right) \right] + i \frac{\pi^2}{2\alpha^2} \left(\frac{n^2}{l_z^3} + \frac{m^2}{l_x^3} \right)$$

Modes located near the Bragg frequency:

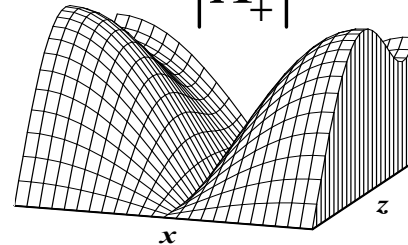
$|A_+|$ (1,0):



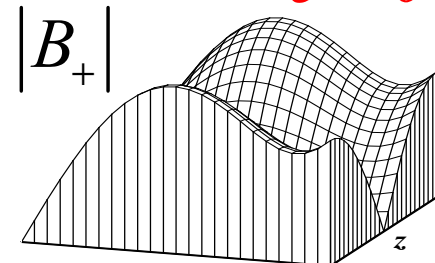
$|B_+|$ $\delta \approx 0$



$|A_+|$ (1,1):

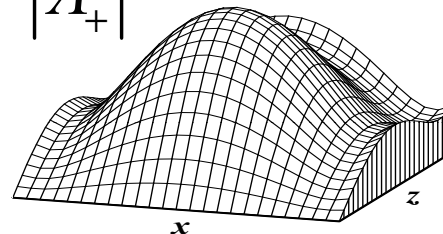


$|B_+|$ $\delta \approx 0$

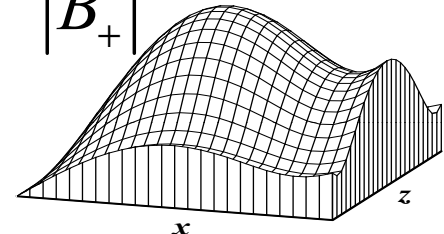


Modes located near the edge of the Bragg reflection band (1,1):

$|A_+|$



$|B_+|$

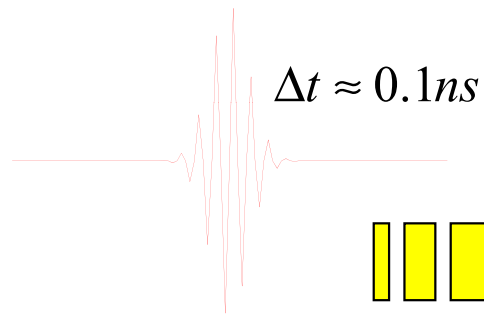


$\delta \approx 2\alpha$

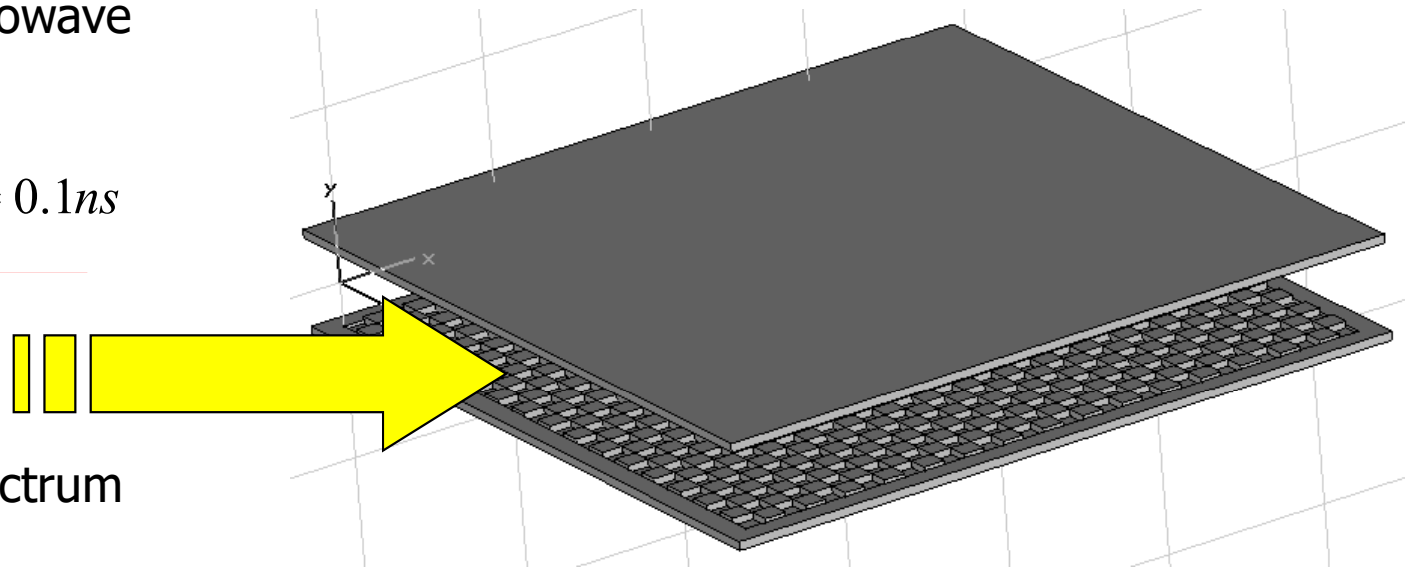
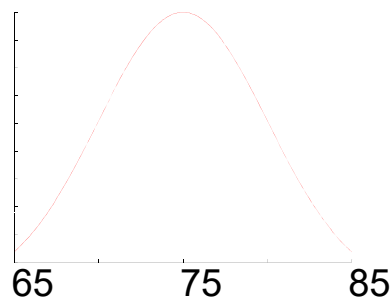
Demonstration of high selectivity 2D Bragg resonator in 3D simulations (excitation of resonator by short microwave pulse)

3D code “CST Microwave Studio”

Short incident microwave pulse



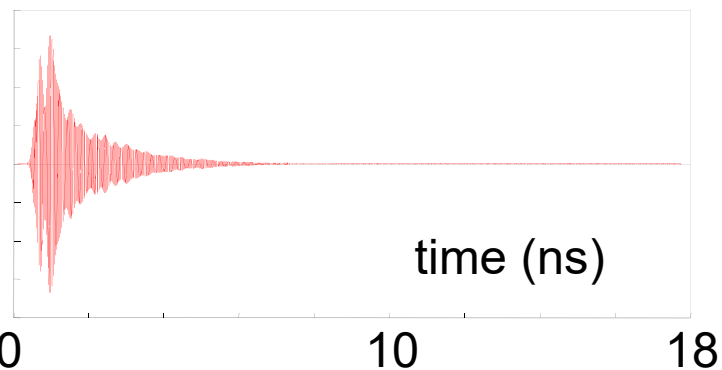
Incident pulse spectrum



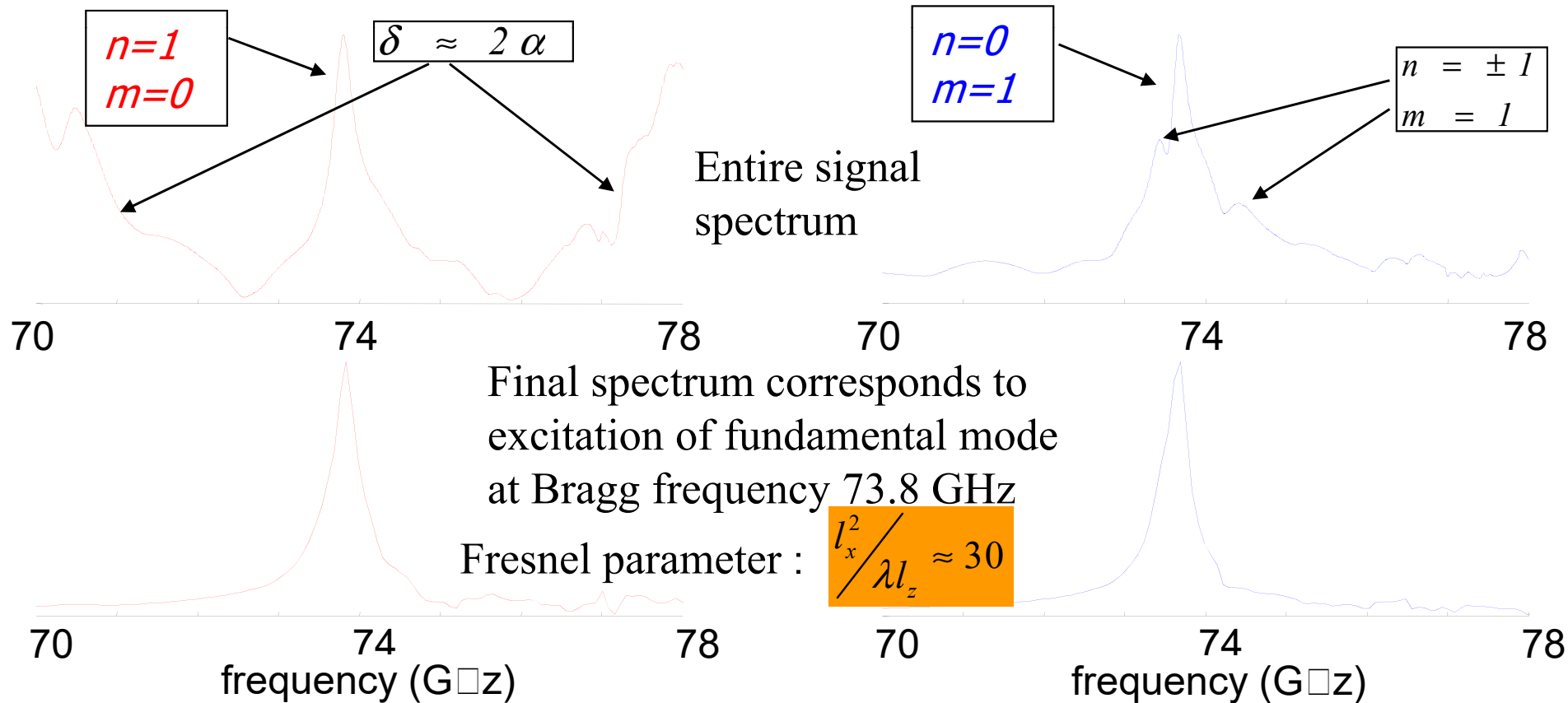
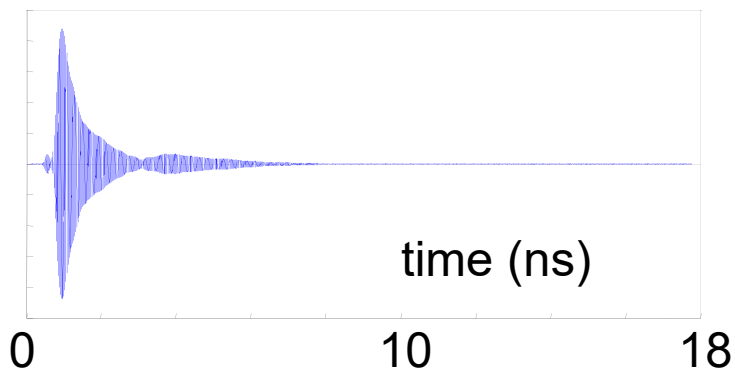
- Symmetrical transverse distribution of the incident wave beam
- Asymmetrical transverse distribution of the incident wave beam

3D simulation of fundamental mode excitation

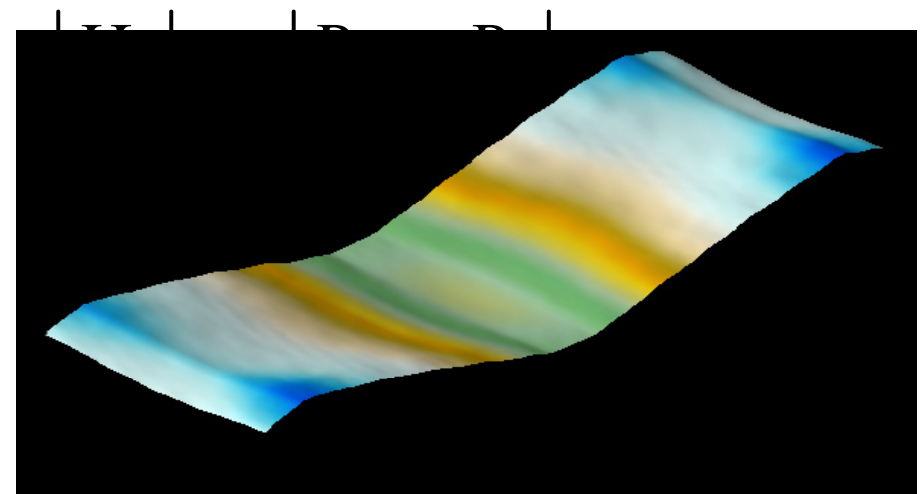
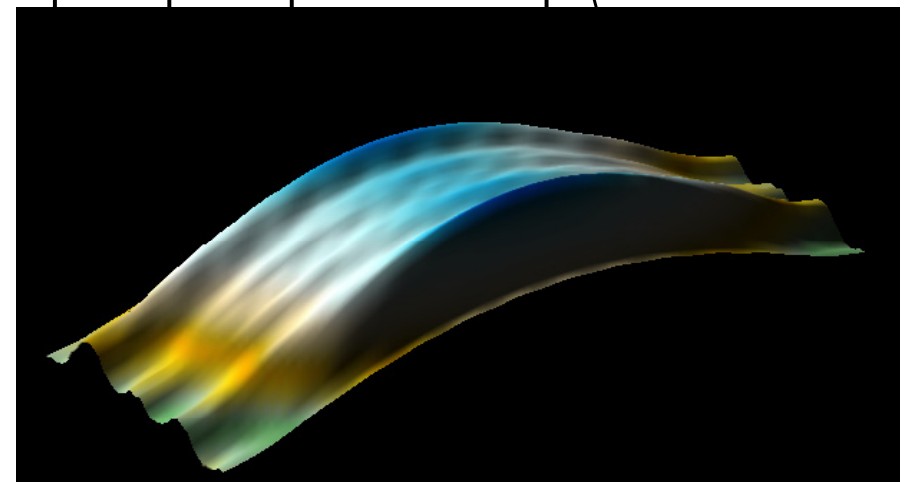
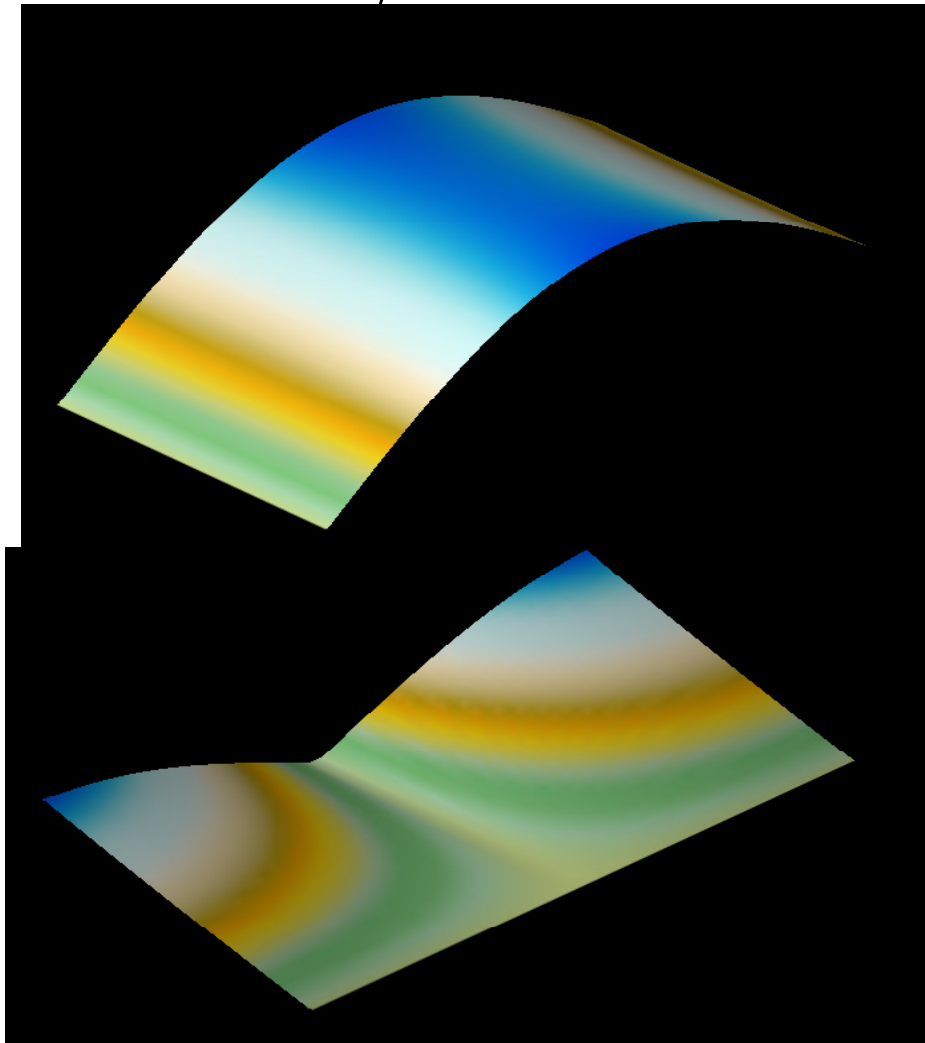
Symmetrical incident wave beam



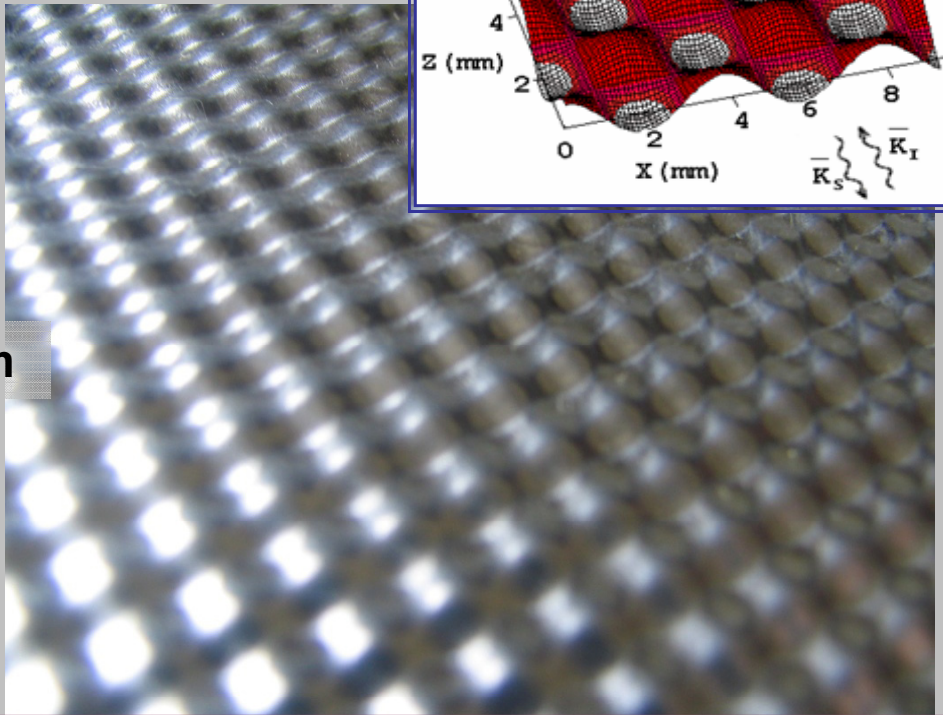
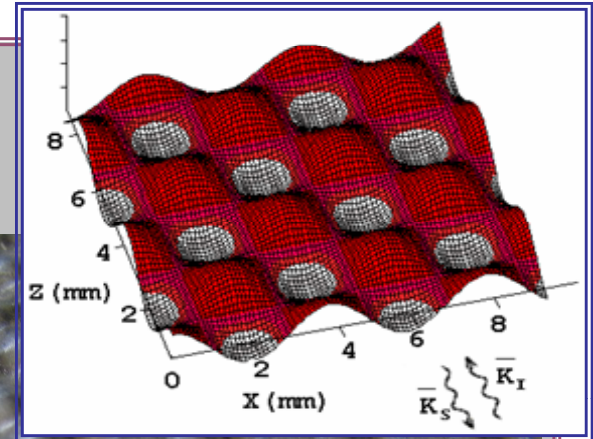
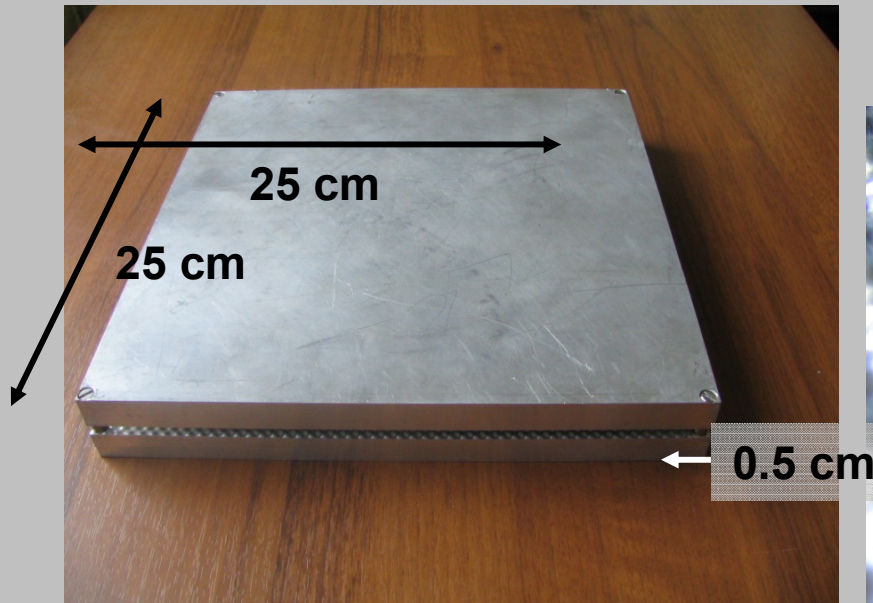
Asymmetrical incident wave beam



Partial waves structure of fundamental mode in geometrical-optical approximation and 3D simulations



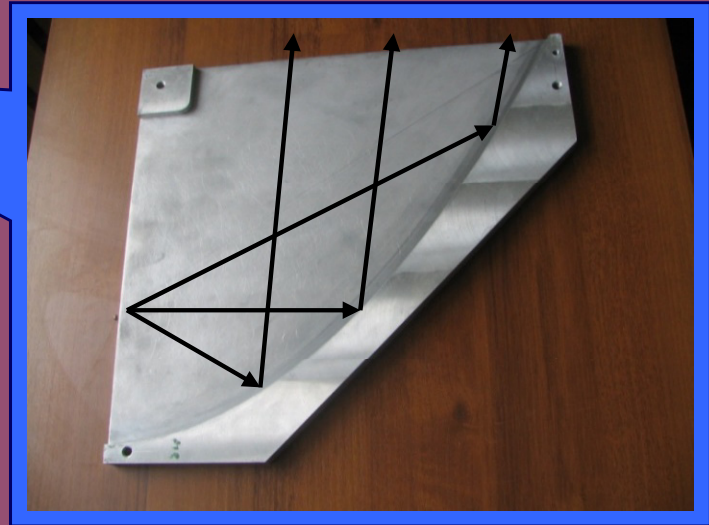
Planar 2D Bragg structure with 2D *sin* corrugation - - photonic crystals??



planar resonator (FZK)

2D *sin* corrugation
depth 0.06 cm
period $d_z = d_x = 0.5$ cm ($f \sim 60$ GHz)

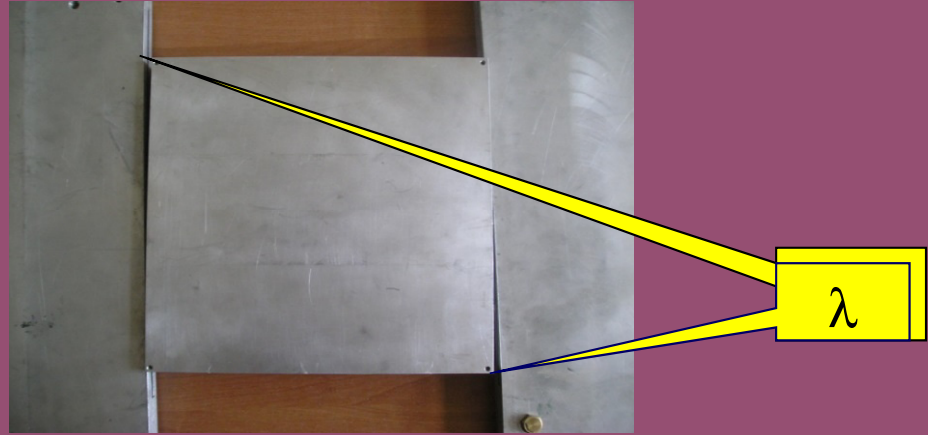
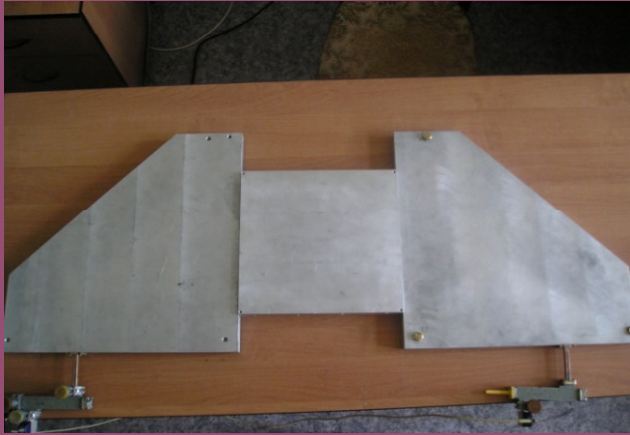
“Cold” tests of 2D Bragg structure



measurement of transmission

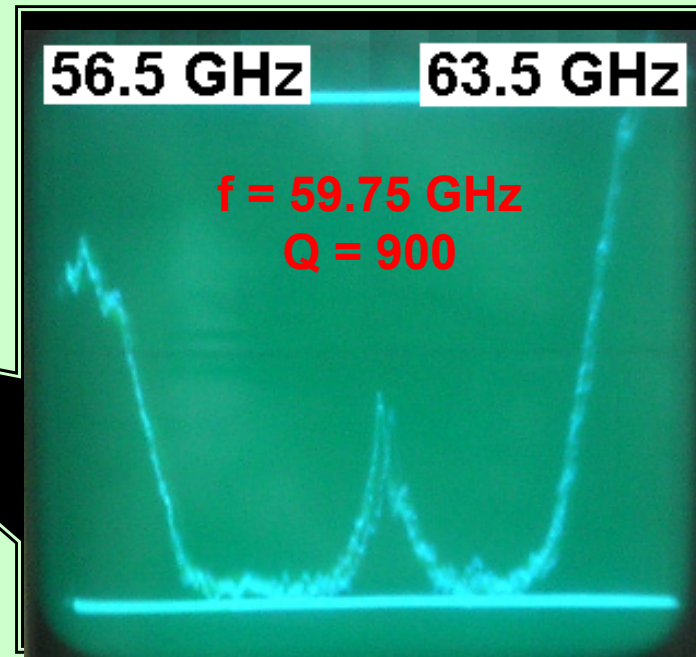
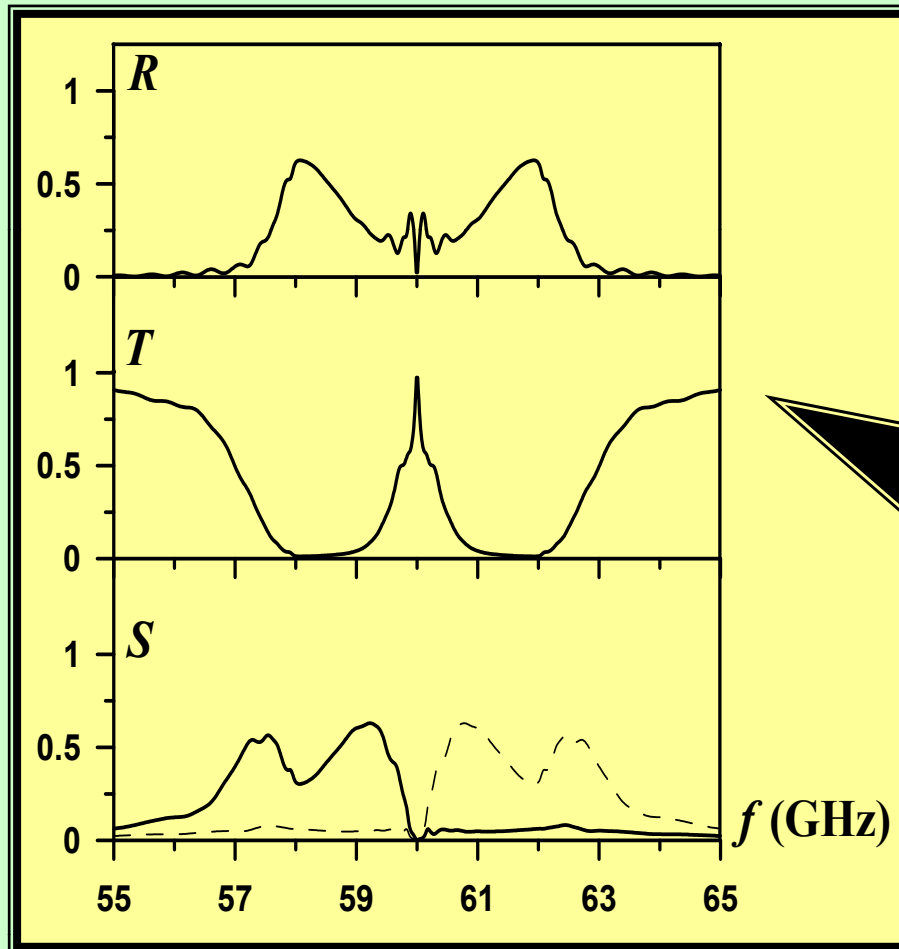
normal incidence

inclined incidence



Results of “cold” measurements

inclined incidence of wave-beam



Time-domain model of planar FEM with 2D distributed feedback

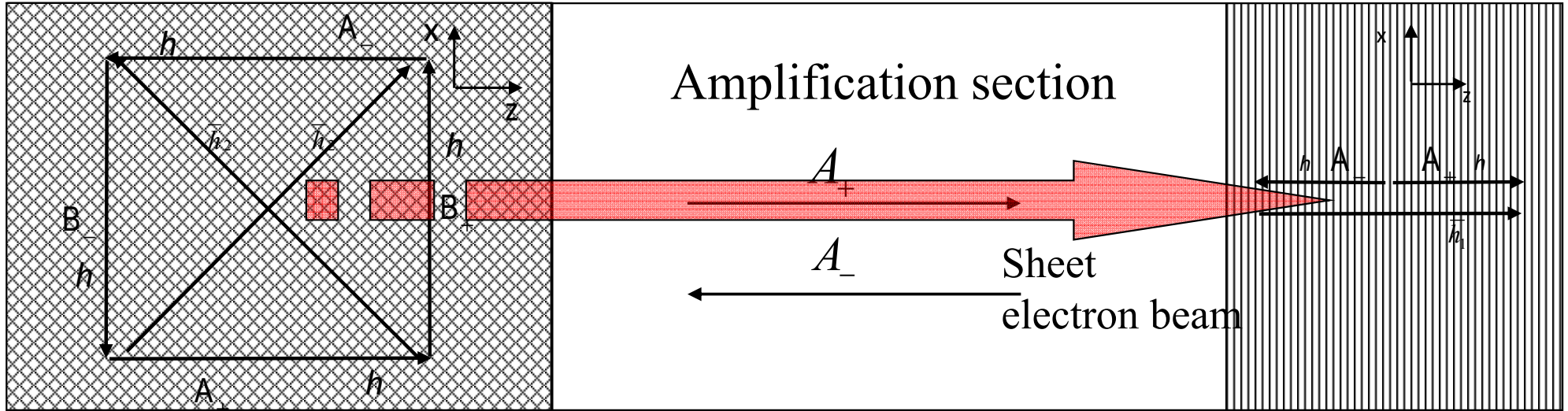


Diagram illustrating coupling of partial waves in 2D and 1D Bragg structures :

$A_+(z, x, t), B_+(z, x, t)$ – the partial waves amplitudes

2D Bragg reflector $\vec{E} = \vec{E}_0 \text{Re} \left\{ \left[A_+ e^{-ihz} + A_- e^{ihz} + B_+ e^{-ihz} + B_- e^{ihz} \right] \cdot e^{i\bar{\omega}t} \right\}$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \cdot A_+ + i\alpha_{2D} (B_+ + B_-) = J$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} - \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \cdot A_- + i\alpha_{2D} (B_+ + B_-) = 0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial X} \pm \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \cdot B_{\pm} + i\alpha_{2D} (A_+ + A_-) = 0$$

Boundary conditions for 2D Bragg structure

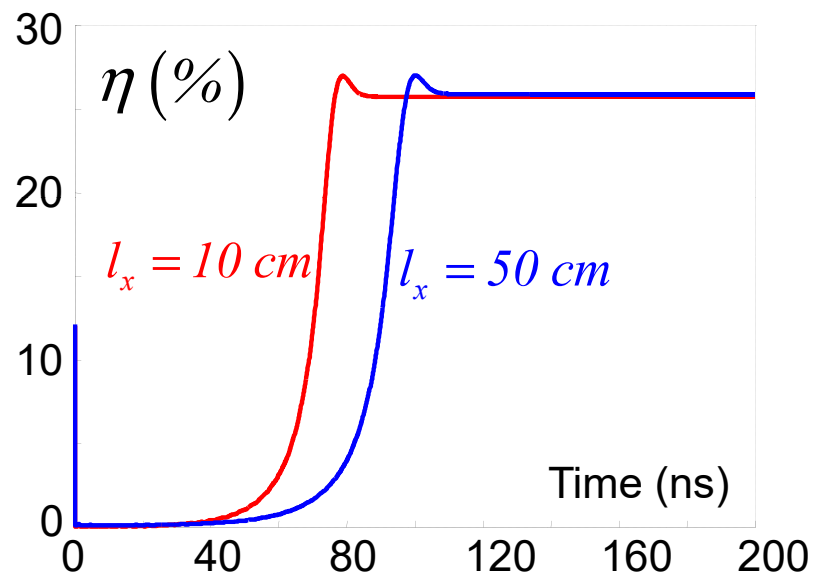
$$A_+ \Big|_{Z=0} = 0,$$

$$B_{\pm} \Big|_{X=0, L_x} = 0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_0^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \text{Re} \left[A_+ e^{i\theta} \right],$$

Simulation of nonlinear dynamics of planar FEM with hybrid Bragg resonator

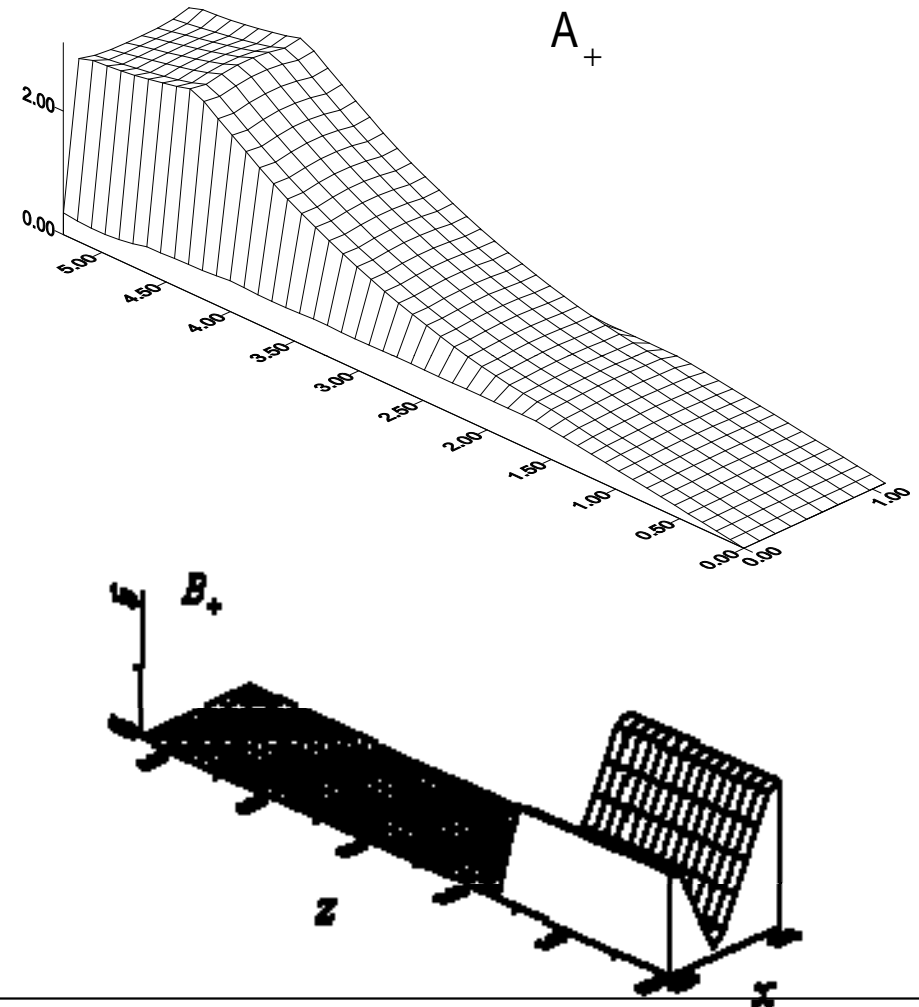
Setting on steady-state generation regime



Scaling:

$$\hat{\alpha}_{2D}^2 L_x = \text{const}$$

Spatial profile of partial waves in steady-state generation regime

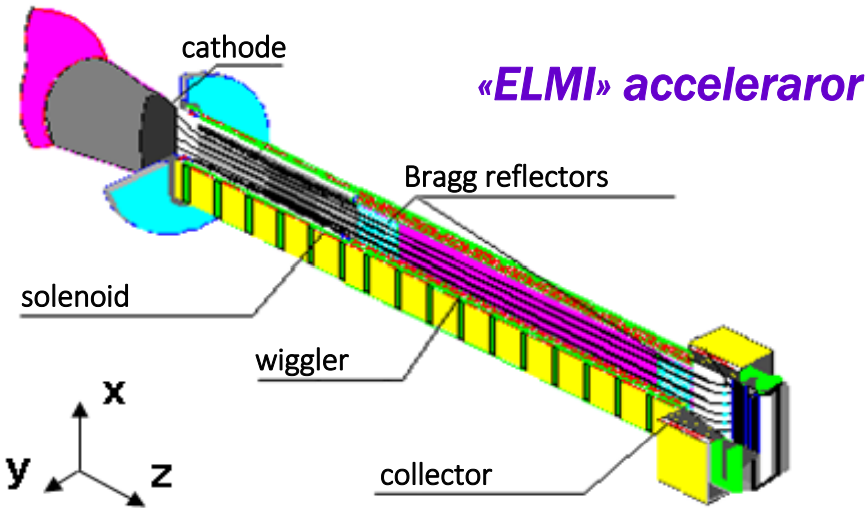


Parameters of BINP FEM:

$$L_{2D}=18\text{cm}, L_0=32\text{cm}, L_{1D}=18\text{cm}, L_x=10\text{cm}, \alpha_{2D}=\alpha_{1D}=0.07\text{cm}^{-1}, C=0.006$$

High power planar 75GHz FEM with 2D distributed feedback BINP (Novosibirsk)

Phys. Rev. Lett, 2017



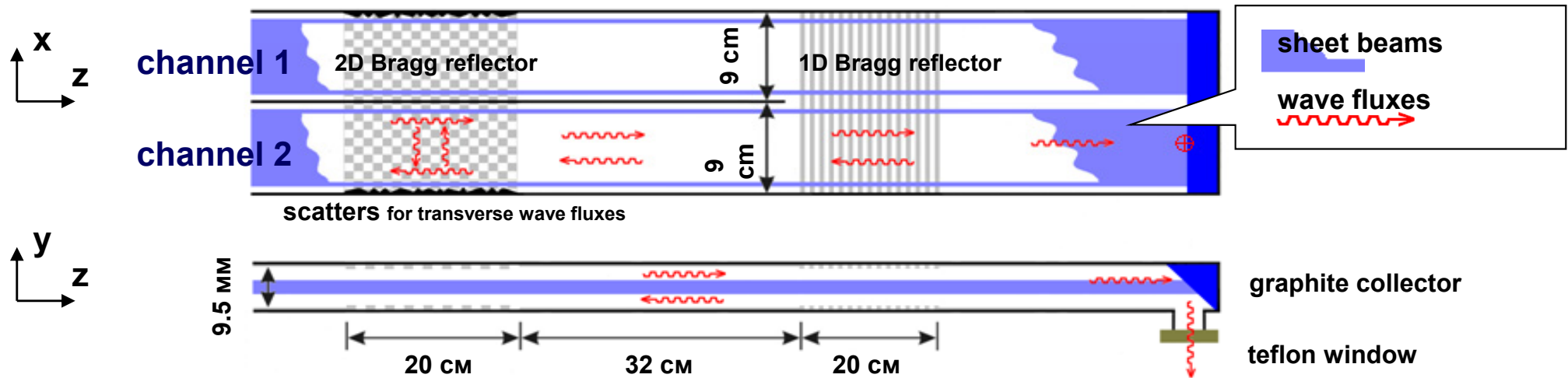
beam energy 0.8 - 0.9 MeV
pulse duration ~ 5 μ s

beam current ~ 150 - 200 A/cm
(total current ~ 1 - 1.5 kA)
transverse size 0.4 cm x 7 cm

wiggler period 4 cm
wiggler field ~ 0.1 T
guide field ~ 1.2 T (~ 1.7 H_{res})

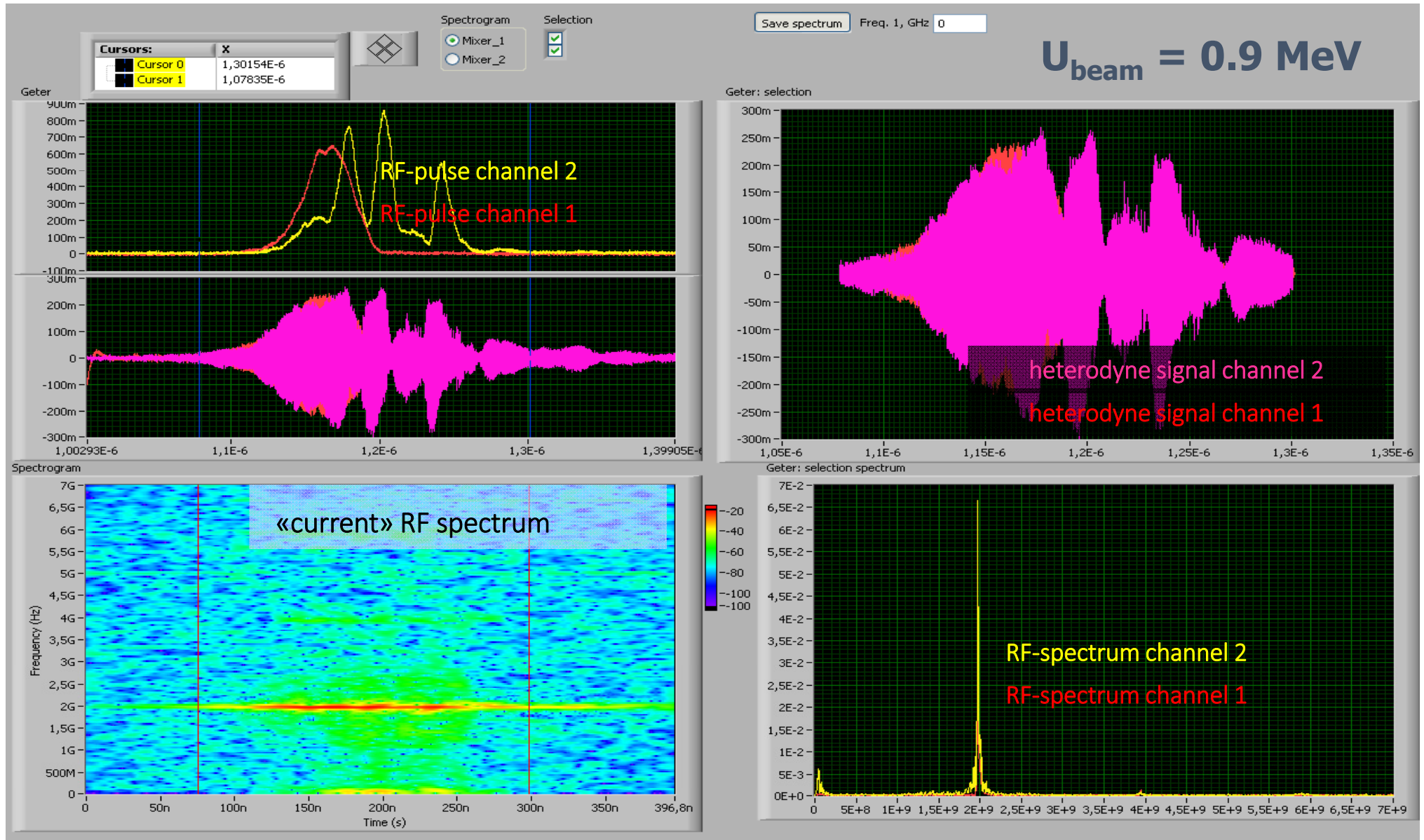
in each channel

Two parallel oscillation channel driven by two parallel sheet beams

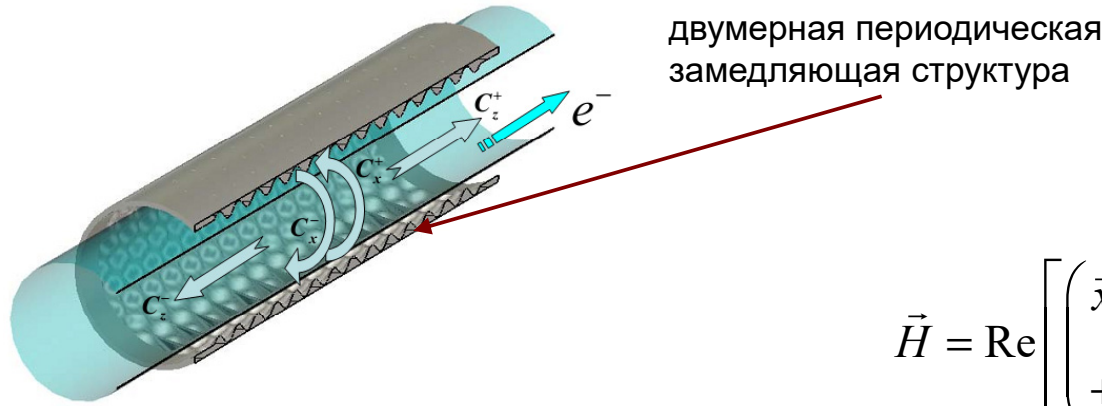


High power planar 75GHz FEM with 2D distributed feedback

single-mode oscillation regime



Генераторы поверхностной волны цилиндрической геометрии с двумерно-периодическими структурами



двумерная периодическая замедляющая структура

$$a = \frac{a_{2D}}{4} \left[\cos(\bar{M}\varphi - \bar{h}_z z) + \cos(\bar{M}\varphi + \bar{h}_z z) \right]$$

$$\vec{H} = \text{Re} \left[\left(\vec{x}_0 \left(C_z^+(x, z, y, t) e^{-i\bar{h}_z z} + C_z^-(x, z, y, t) e^{i\bar{h}_z z} \right) + \vec{z}_0 \left(C_x^+(x, z, y, t) e^{-i\bar{h}_x x} + C_x^-(x, z, y, t) e^{i\bar{h}_x x} \right) \right) e^{i\omega t} \right]$$

Самосогласованная система уравнений генератора поверхностной волны:

$$\frac{\partial \hat{C}_z^+}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{C}_z^+}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_z^+}{\partial Y^2} = i \hat{\alpha}_{2D} (\hat{C}_x^+ + \hat{C}_x^-) \delta(Y) - \frac{1}{B_e} \frac{\partial}{\partial Y} (JF(Y))$$

Циклические граничные условия по азимутальной координате X

$$-\frac{\partial \hat{C}_z^-}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{C}_z^-}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_z^-}{\partial Y^2} = i \hat{\alpha}_{2D} (\hat{C}_x^+ + \hat{C}_x^-) \delta(Y)$$

$$C_{z,x}^\pm(x + l_x, z, y, t) = C_{z,x}^\pm(x, z, y, t)$$

$$\pm \frac{\partial \hat{C}_x^\pm}{\partial X} + \frac{\partial \hat{C}_x^\pm}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_x^\pm}{\partial Y^2} = i \hat{\alpha}_{2D} (\hat{C}_z^+ + \hat{C}_z^-) \delta(Y)$$

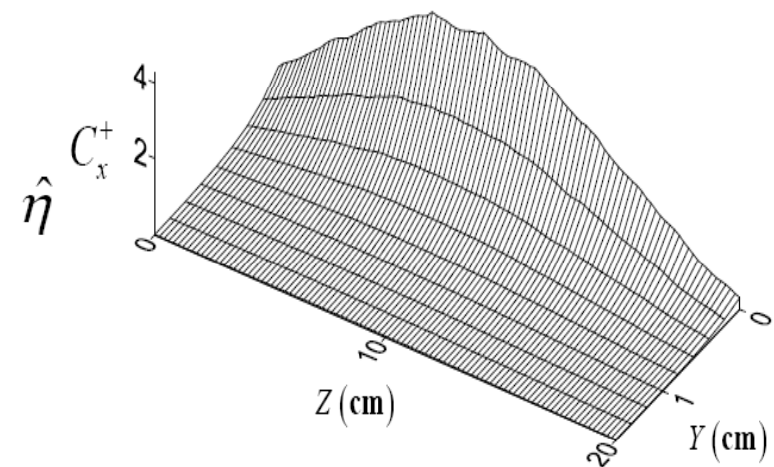
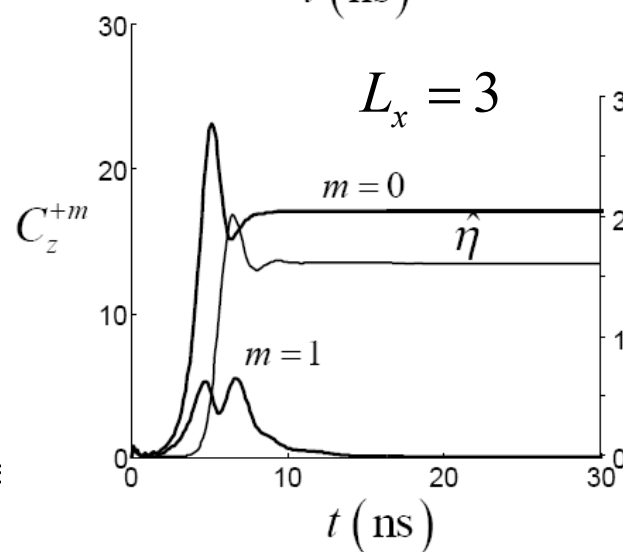
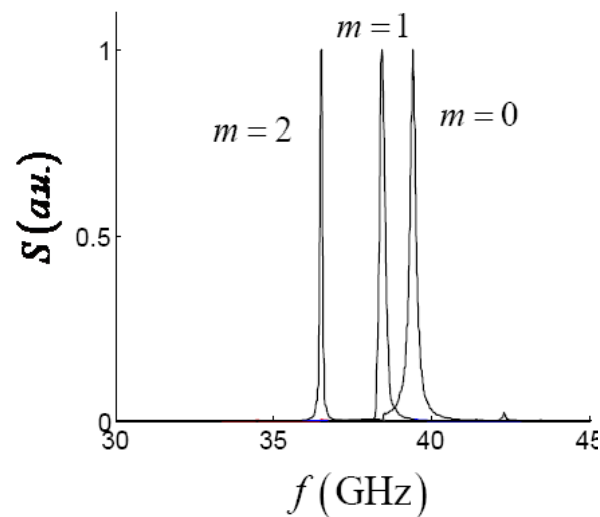
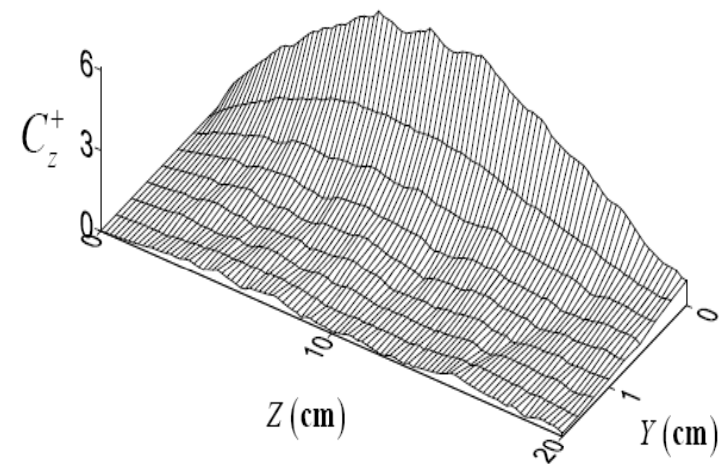
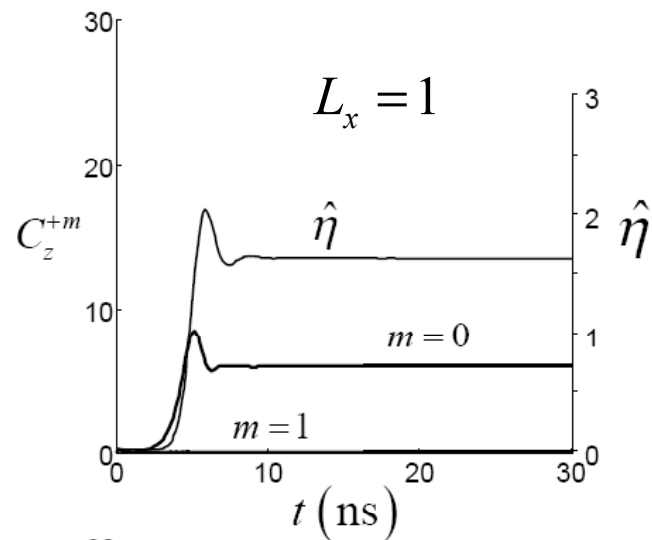
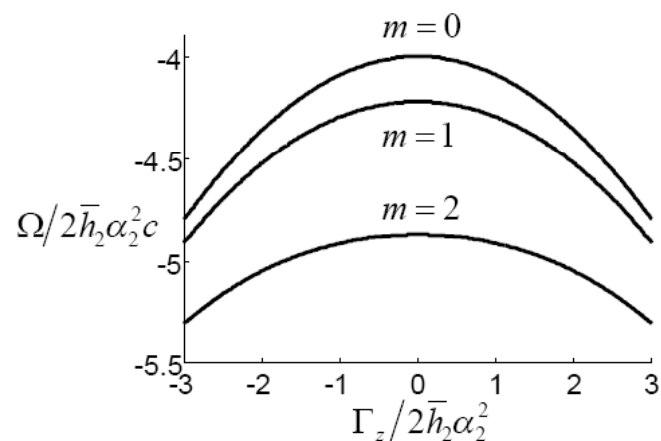
$$C_{z,x}^\pm(x, z, y, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{z,x}^{\pm m}(z, y, t) e^{2\pi i m x / l_x}$$

$$\hat{C}_z^+ \Big|_{Z=0} = 0, \hat{C}_z^- \Big|_{Z=L_z} = 0$$

Уравнения движения электронов:

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_0^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \text{Re} \left[\frac{\partial \hat{C}_z^+}{\partial Y} e^{i\theta} \right], J = 1/\pi \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0.$$

Моделирование цилиндрического генератора поверхностной волны с двумерно-периодическими структурами в рамках квазиоптической теории

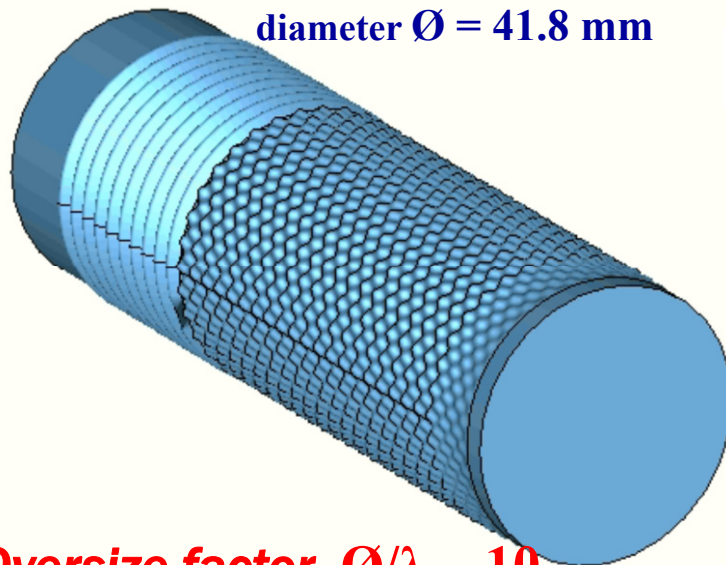


$$\hat{\alpha}_2 = 2.2, \quad \hat{\Delta} \approx 8, \quad L_z = 1.5, \quad B_e = 0.1$$

75GHz cylindrical surface wave oscillator with 2D slow-wave structure

based on the «Sinus-6» accelerator 500 keV / 5 kA / 25 ns

Н.Песков, Вл. Заславский, Э. Абубакиров. М. Проявин



Over-size factor $\varnothing/\lambda \sim 10$
perimeter $\sim 32\lambda$

2D slow-wave structure

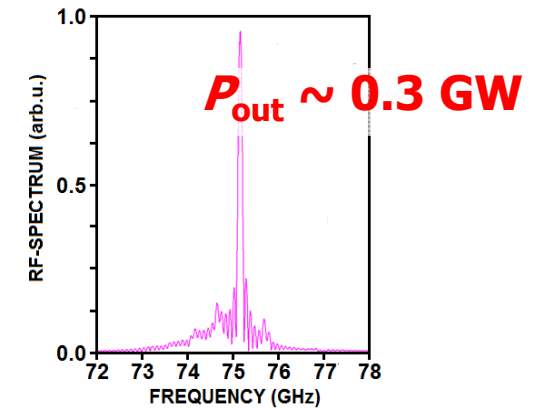
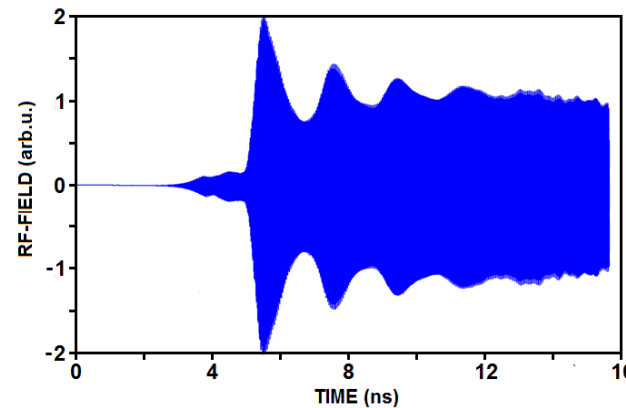
corrugation period 3.6 mm
corrugation depth 1.1 mm
number of azimuthal turns 32

Bragg-type cathod

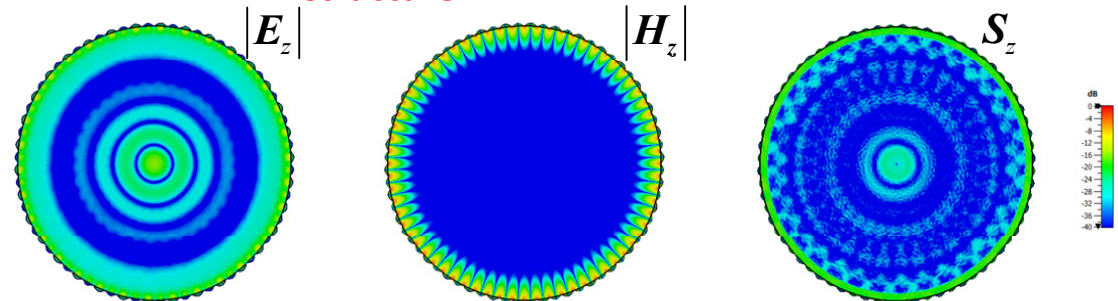
reflector

corrugation period 1.75 mm
corrugation depth 1 mm

3D simulations (code CST)



Establishment of narrow-band oscillation with azimuthally-symmetrical output structure

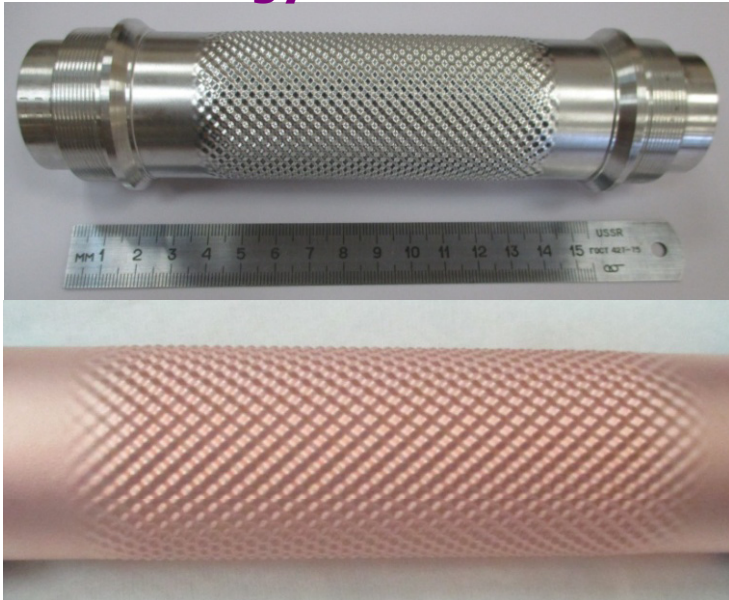


transverse RF-field structure in the stationary generation regime

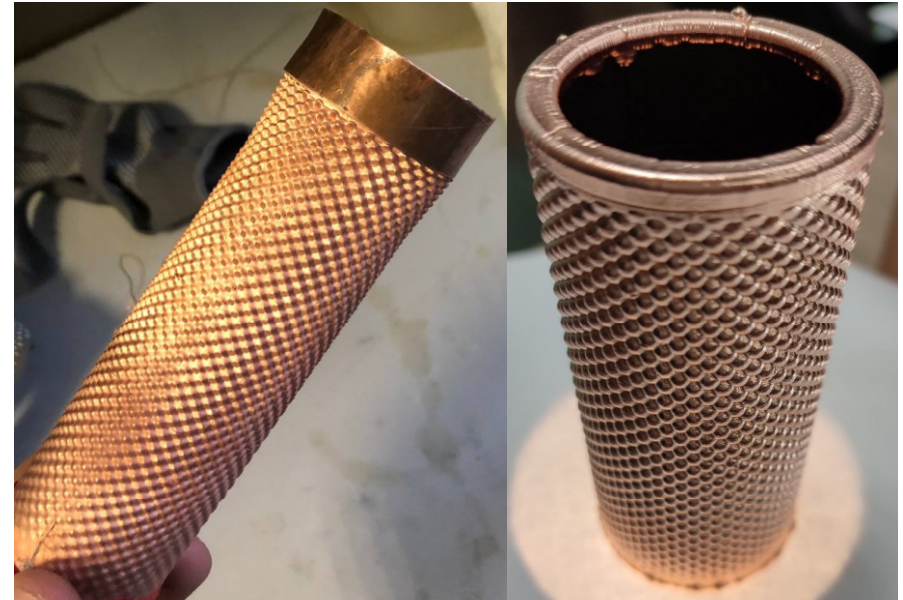
W-band cylindrical 2D slow-wave structure

Override factor $\text{Ø}/\lambda \sim 10$ perimeter $\sim 32\lambda$

conventional machining
technology



novel additive technology

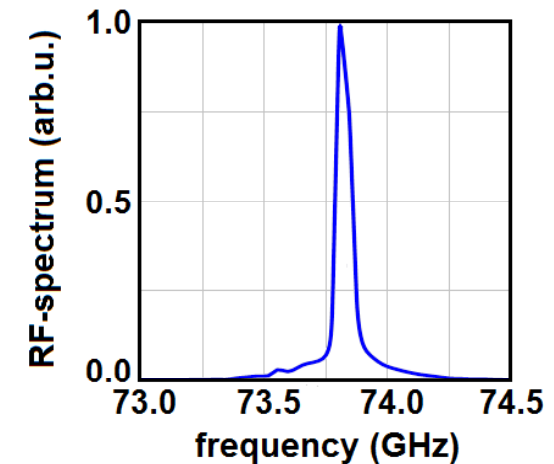
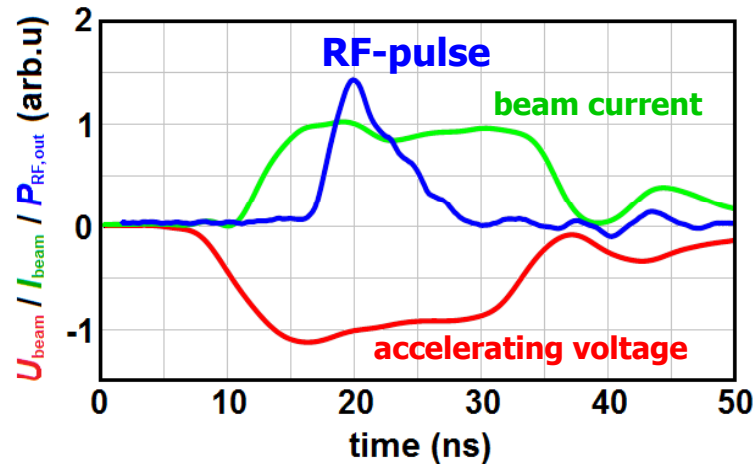


Results of proof-of-principal experiments at W-band based on «Sunus-6» (IAP RAS) 0.5 MeV / 5 kA / 25 ns

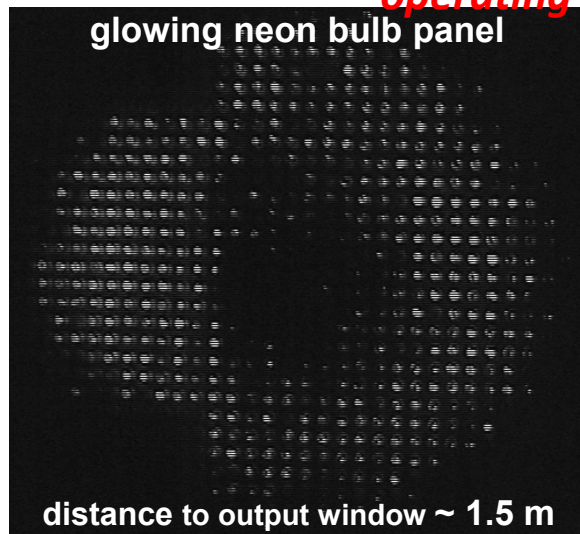
guide field ~ 1.4 T

$\varnothing_{\text{beam}} \sim 40$ mm

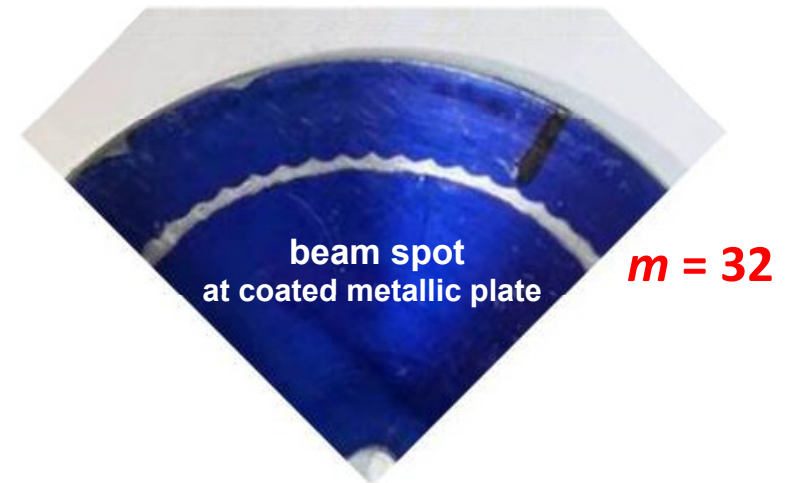
$P_{\text{out}} \sim 0.2$ GW



*Excitation of designed symmetric $m=0$
operating mode*

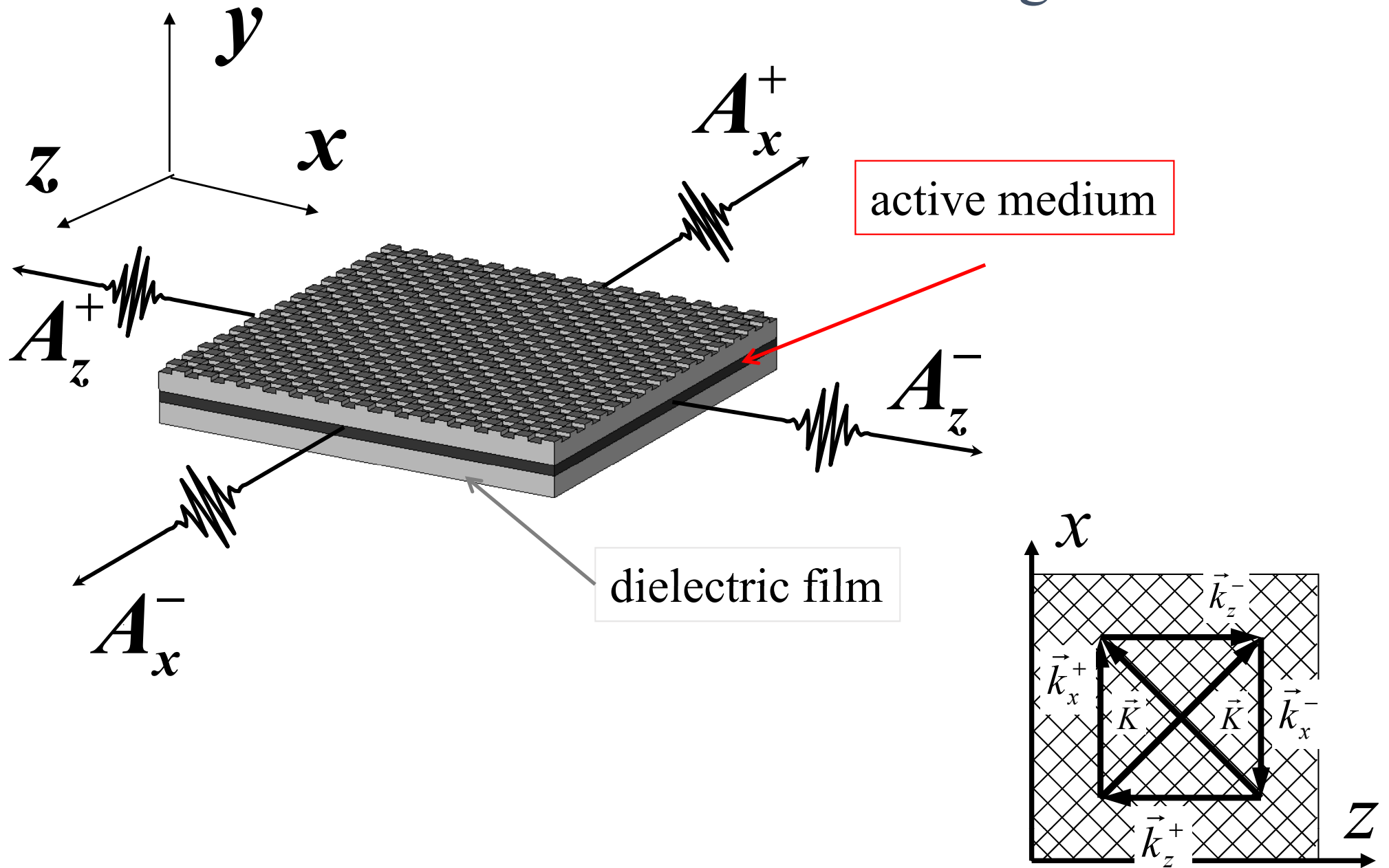


combination of symmetrical $TM_{0,n}$ - modes



*Azimuthal modulation in the beam
in the process of wave/e-beam interaction*

Optical lasers with 2D Bragg structure formed by dielectric film with chessboard corrugated surface



Maxwell –Bloch equations

Balance approximation

$$T_2 \ll T_c$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mp \frac{\partial A_{z\pm}}{\partial Z} + \frac{\partial A_{z\pm}}{\partial t} + i\alpha(A_{x+} + A_{x-}) = j_{z\pm} \\ \mp \frac{\partial A_{x\pm}}{\partial X} + \frac{\partial A_{x\pm}}{\partial t} + i\alpha(A_{z+} + A_{z-}) = 0 \\ j_{z+} = \beta T_2 (2A_{z+}\rho_0 + A_{z-}\rho_{2z}) \\ j_{z-} = \beta T_2 (2A_{z-}\hat{\rho}_0 + A_{z+}\rho_{2z}^*) \\ \frac{\partial \rho_0}{\partial t} + \frac{(\rho_0 - 1)}{T_1} = -(A_{z+}j_{z+}^* + A_{z-}j_{z-}^*) \\ \frac{\partial \rho_{2z}}{\partial t} + \frac{\rho_{2z}}{T_1} = -(A_{z+}j_{z-}^* + A_{z-}j_{z+}^*) \end{array} \right.$$

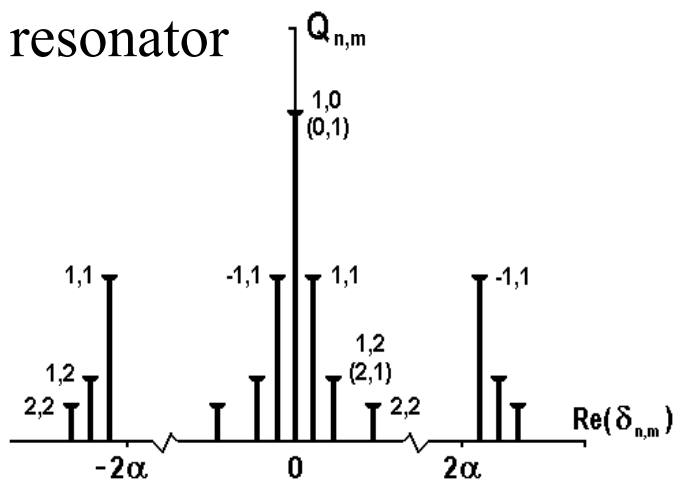
Initial and boundary conditions

$$\begin{array}{lll} A_{z,x+} \Big|_{z,x=0} = 0 & \rho_0 \Big|_{t=0} = 0 & \rho_{2x} \Big|_{t=0} = 0 \\ A_{z,x-} \Big|_{z,x=L_{z,x}} = 0 & \rho_{2z} \Big|_{t=0} = 0 & \rho_{z+x} \Big|_{t=0} = 0 \\ \hat{A}_{z,x\pm} \Big|_{t=0} = a_0 e^{i\varphi(x,z)} & & \rho_{z-x} \Big|_{t=0} = 0 \end{array}$$

$\varphi(X, Z)$ -random function

$T_{1,2}$ - relaxation constants

Eigenmodes of 2D Bragg resonator



$$L_z = 2L_x$$

Threshold conditions

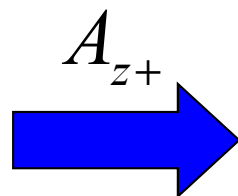
$$\text{Im}(\delta_{mn}) = 2\beta T_2$$

Decrement of eigenmodes

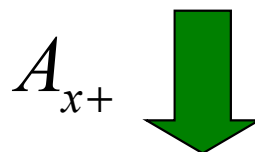
gain

Radiation synchronization and establishment steady-state regime:

Partial wave profile



Partial wave profile



Radiation power

$$A_{z+} \text{ ————}$$

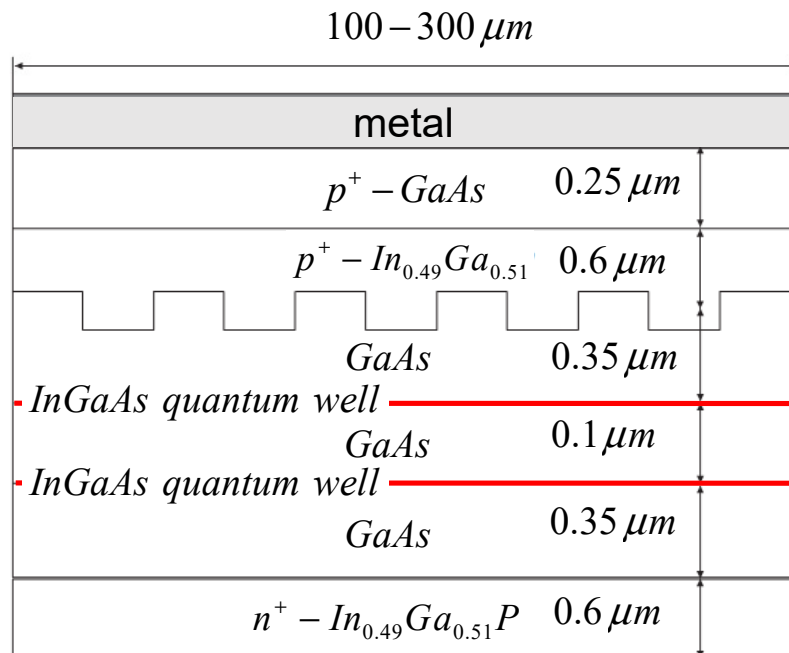
$$A_{x+} \text{ ————}$$



Development of a quantum well laser with 2D distributed feedback

heterostructure with incorporated 2D Bragg resonator:

Institute of Applied Physics RAS
 Institute for Physics of Microstructures RAS
 Institute for Physics and Technology (N. N. Vavilov)



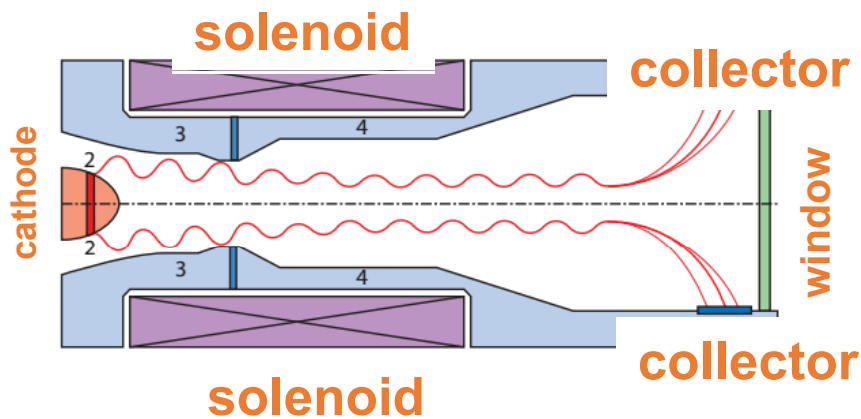
$n^+ - GaAs$ substrate

Wavelength	1 μm
Length and width of the corrugated area (L_z и L_x)	2mm, 0.5mm
Refractive indices (GaAs, $In_{0.49}Ga_{0.51}P$)	3.24, 3.51
Corrugation depth	35 nm
Linear gain	15 cm^{-1}
Carrier density	$3 \cdot 10^{11} cm^{-2}$
Carrier lifetime without radiation	$3 \cdot 10^{-10} s$
Output power	1 Вт

V.Ya.Aleshkin, B.N.Zvankov et. al.
Leaky-wave semiconductor laser with improved energetic characteristics and supernarrow directional pattern
 Quantum Electron. 2010 40 (10), 855857.

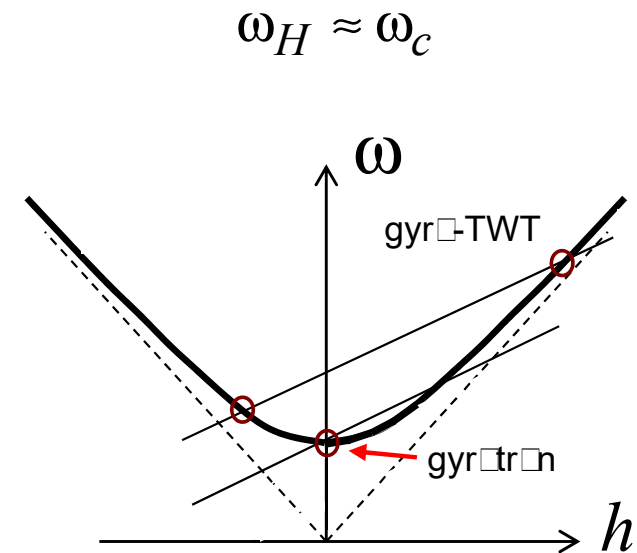
3. Захват внешним сигналом для обеспечения одномодовой генерации в мощных гиротронах и когерентного суммирования излучения гиротронных комплексов

Gyrotron scheme



Gyrotron advantages

1. Low sensitivity to velocity spread
2. High mode selection in longitudinal and transverse indices
3. High efficiency

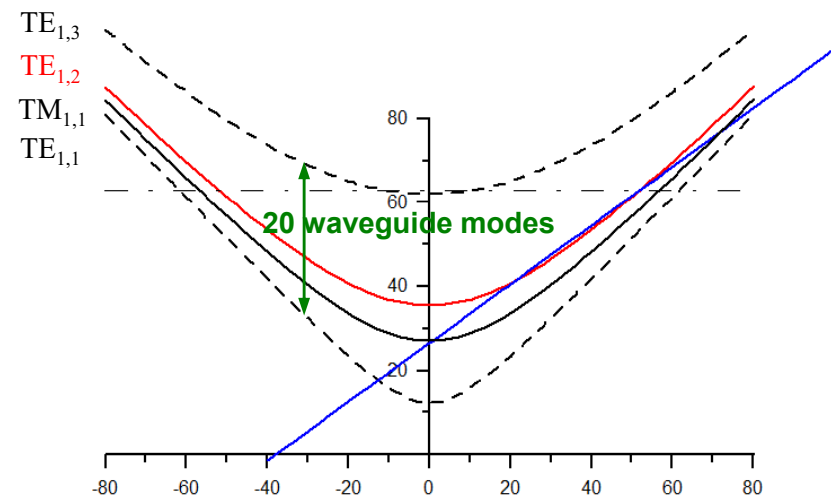
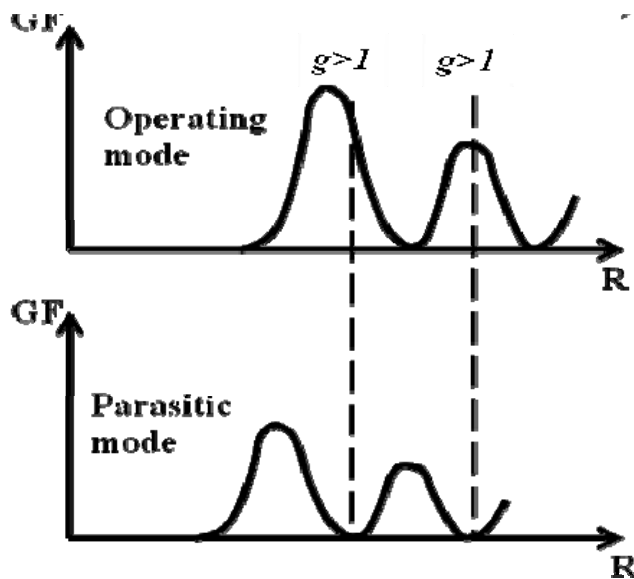
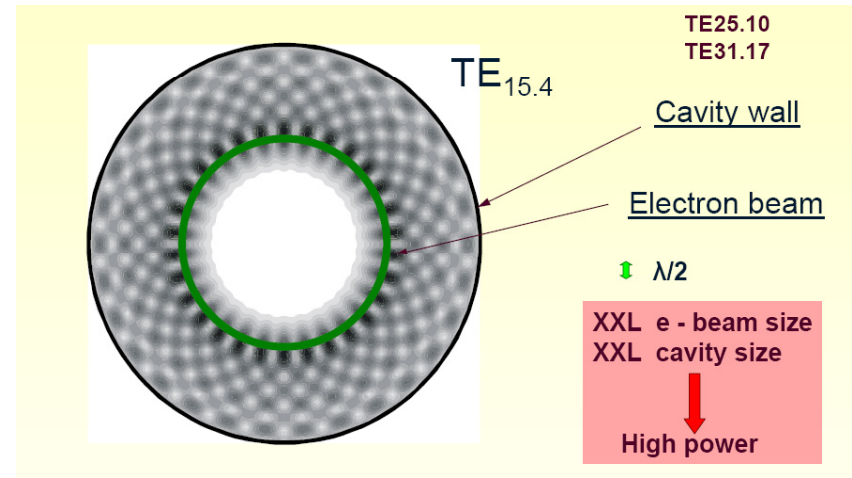


Электронная селекция по поперечному индексу за счет выбора радиуса инжекции электронного пучка и расстройки циклотронного резонанса

Коэффициент связи

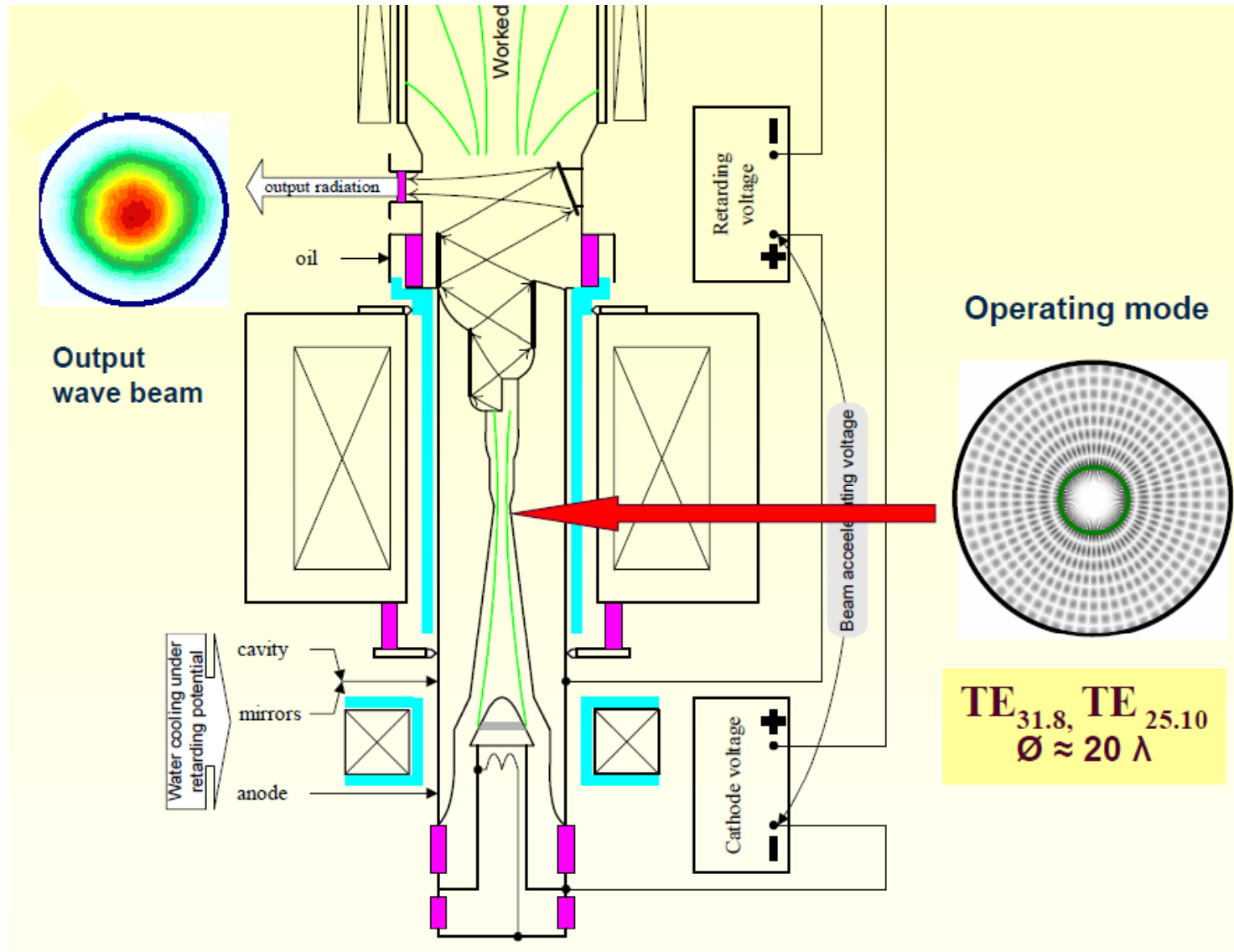
$$G_{mn} = \frac{J_{m-1}^2(v_{mn} R_b / R)}{(v_{mn} - m^2) J_m^2(v_{mn})}$$

R_b - радиус инжекции



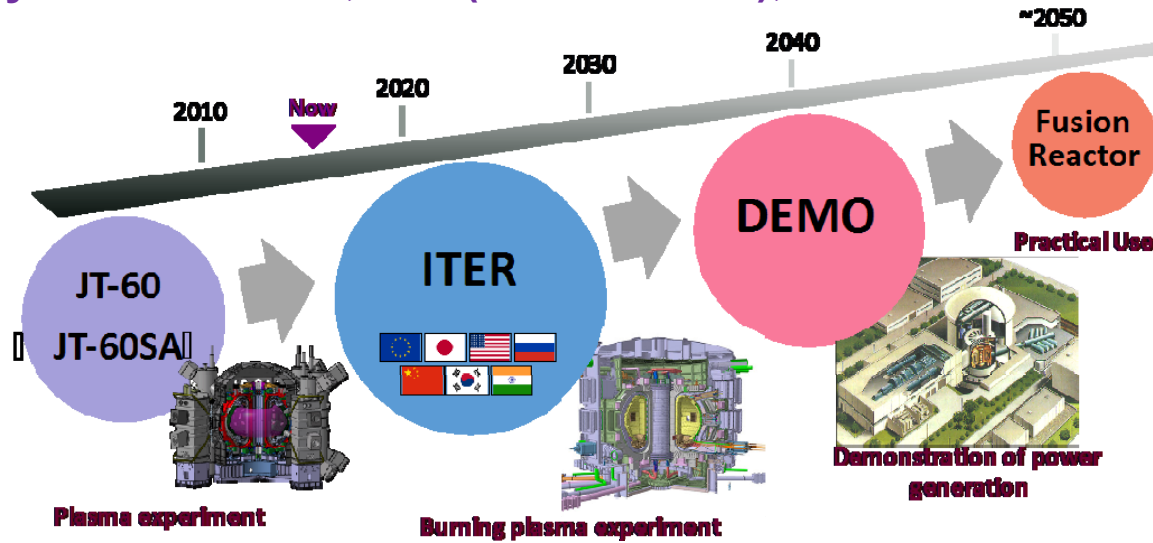
Гиротроны для нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза :

1 MW, CW, 170 GHz



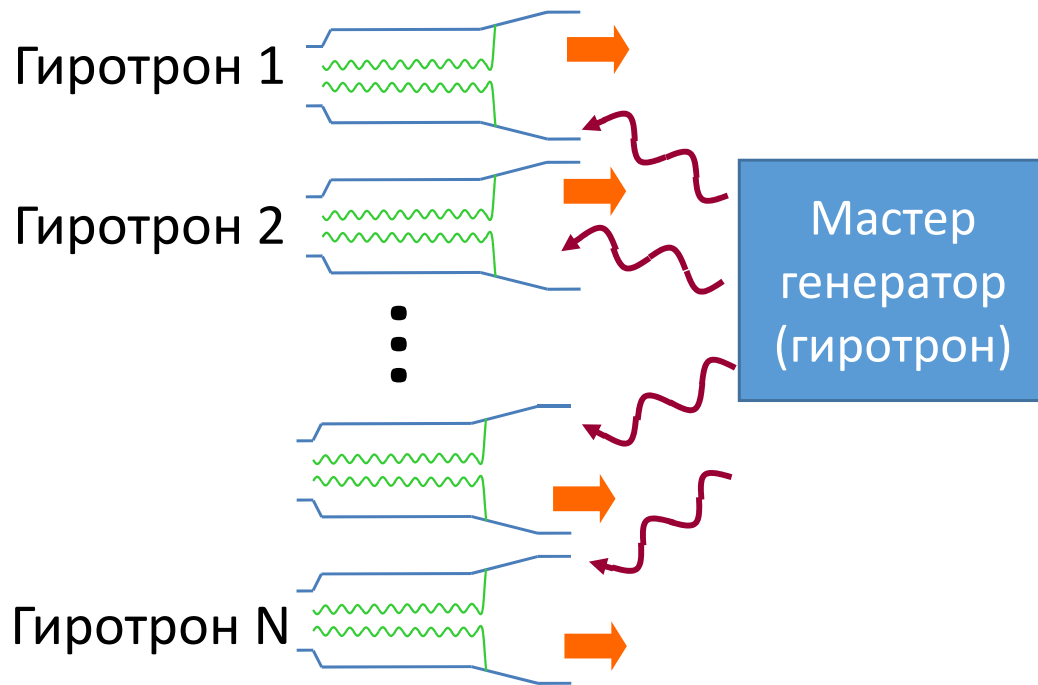
Plasma heating, ITER

Gyrotrons: 1 MW, CW (110-170 GHz), mode TE_{31,8}



**Современные тенденции:
существенное повышение
мощности и частоты
гиротронов**

Захват колебаний мощных гиротронов внешним сигналом

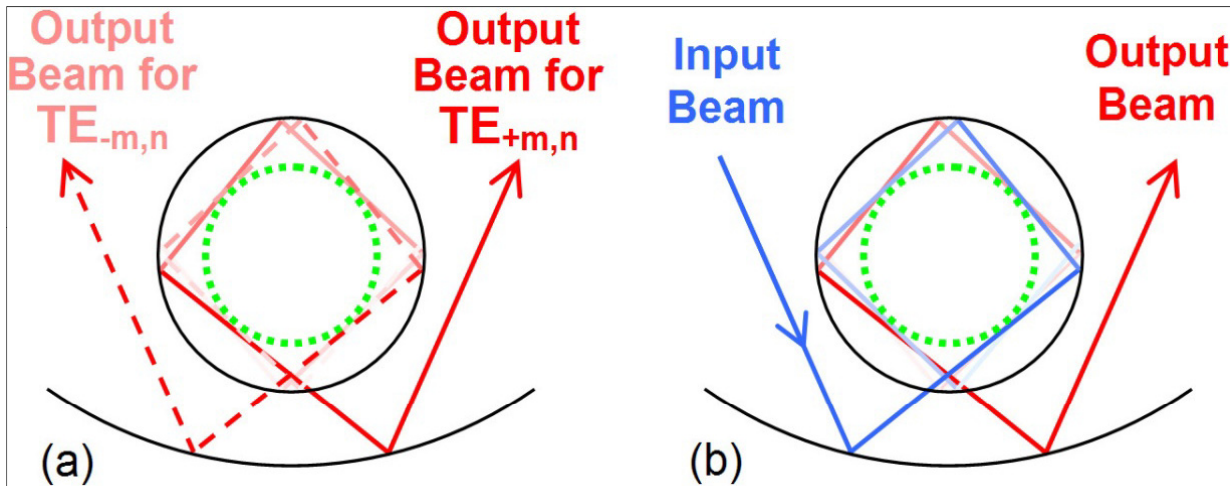


Цели:

1. Повышение мощности и КПД, а также стабильности частоты генерации.
2. Создание систем когерентных мегаваттных гиротронов.
3. Селективное возбуждение высоких мод на второй циклотронной гармонике.

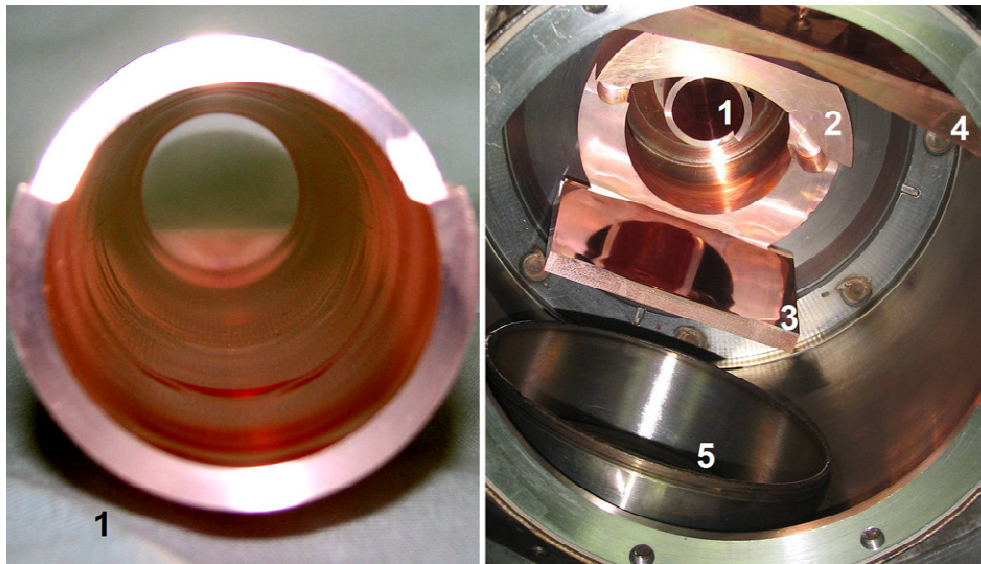
Ввод сигнала в резонатор гиротрона

Денисов Г.Г.

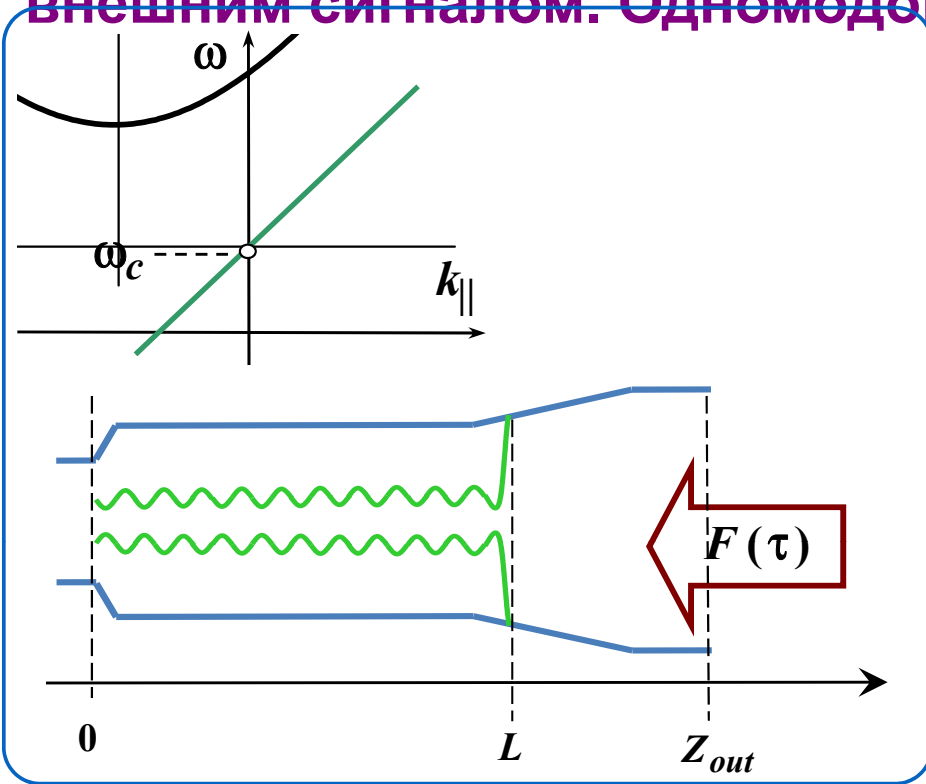


Два режима работы
НОВОГО
КВАЗИОПТИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ:

- a) Преобразование мод
обоих вращений в
параксиальные пучки
- b) Ввод сигнала в
резонатор гиротрона



Нестационарная самосогласованная модель гиротрона с захватом внешним сигналом. Одномодовое приближение



$$\vec{E} = \text{Re}[A(z, t)\vec{E}_s(\vec{r}_\perp)\exp(i\omega_c t)]$$

$$i\frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + i\delta(Z)a = \frac{I}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\theta_0$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + ip(\Delta - 1 + |p|^2) = -a$$

$$\tau = \frac{\omega_c \beta_{\perp 0}^4 t}{8\beta_{\parallel 0}^2}$$

$$a = \frac{eAJ_{m-1}(\omega_c R_0/c)}{m\omega_c c \beta_{\perp 0}^3 \gamma_0}$$

$$I = 16 \frac{eI_b}{mc^3} \frac{\beta_{\parallel 0}}{\beta_{\perp 0}^6 \gamma_0} \frac{J_{m-1}^2(R_0 \omega_c/c)}{J_m^2(v_n)(v_n^2 - m^2)}$$

$$Z = \frac{\pi \beta_{\perp 0}^2 z}{\beta_{\parallel 0} \lambda}$$

$$p = \frac{p_x + ip_y}{p_{\perp 0}} e^{-i\omega_c t + i(m-1)\phi}$$

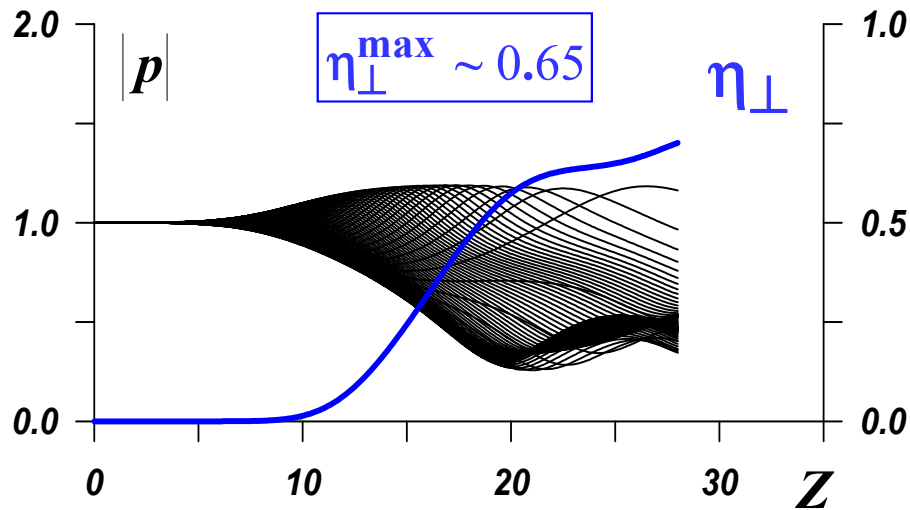
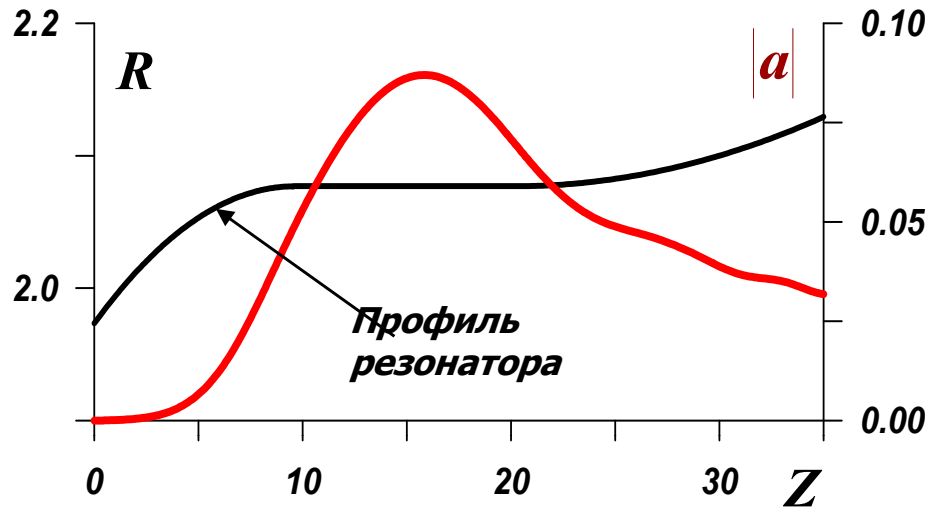
$$\Delta = 2(\omega_H - \omega_c)/\omega_c \beta_{\perp 0}^2$$

Модифицированное
граничное условие

$$a(Z_{out}, \tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a(Z_{out}, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 2F(\tau)$$

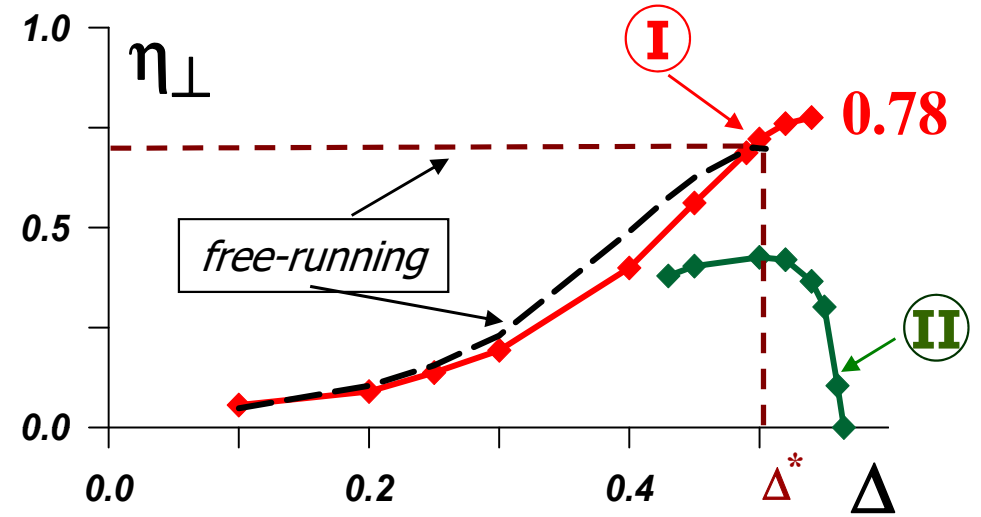
Результаты моделирования для 170 ГГц/1 МВт гиротрона

Режим свободной генерации



$$\eta_{\perp} = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |p|^2 d\theta_0 \quad \text{- поперечный КПД}$$

Подача внешнего сигнала (5% по мощности)



$$\Delta = 2(\omega_H - \omega_c) / \omega_c \beta_{\perp 0}^2 \quad \text{- отстройка гирочастоты от критической}$$

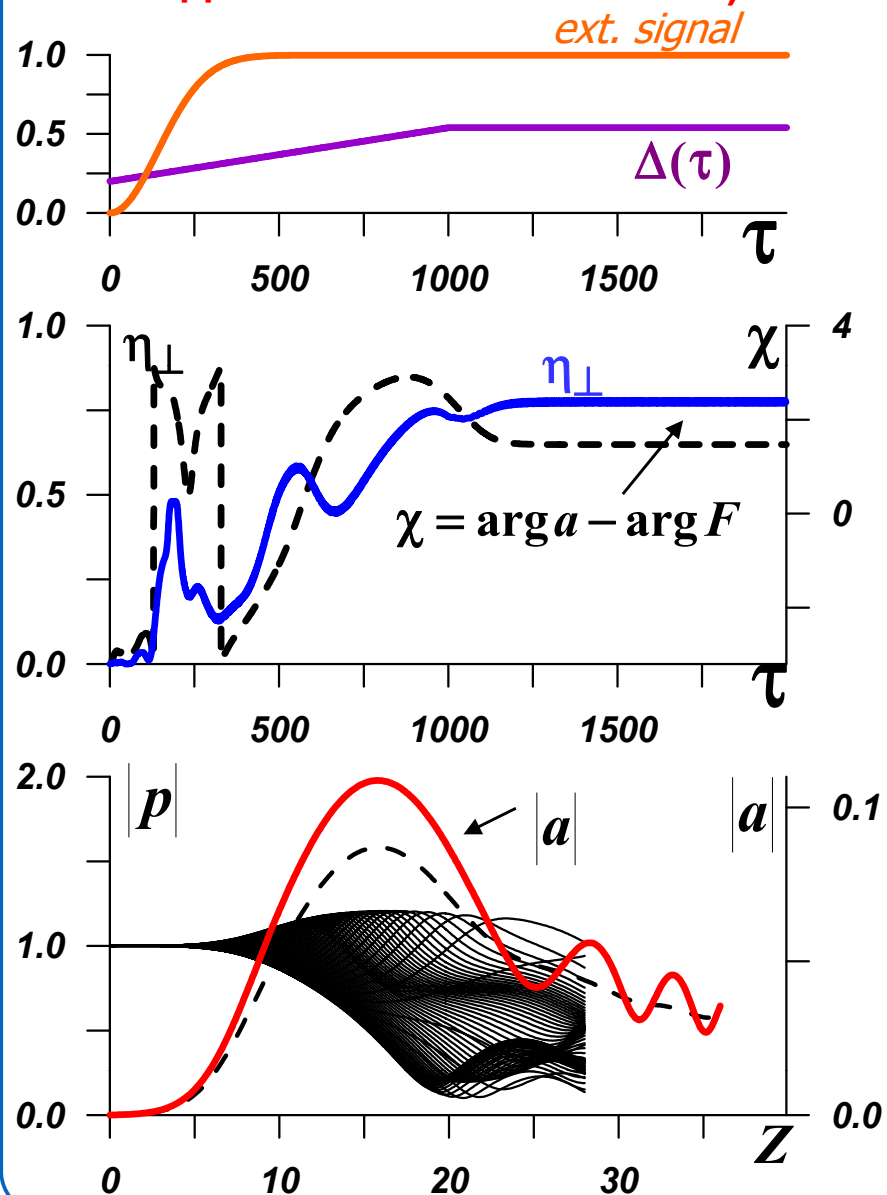
I - Режим захвата

II - Регенеративное усиление

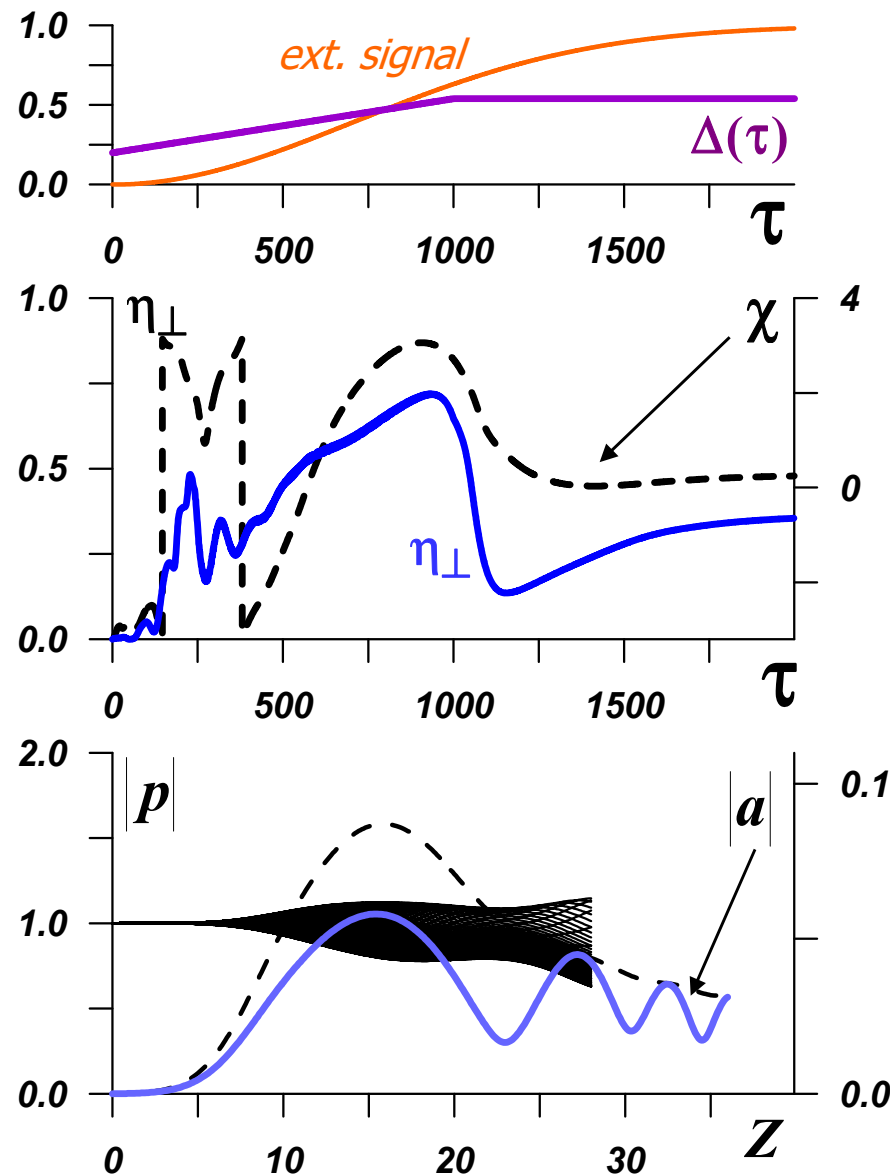
- Повышение КПД генерации при захвате
- Расширение области генерации

Зависимость режима генерации от сценария включения гиротрона

Режим захвата (опережающая подача внешнего сигнала)



Регенеративное усиление (запаздывающий внешний сигнал)



Конкуренция «мод шепчущей» галереи с эквидистантным спектром.

$$TE_{m,n} \quad m \gg n$$

$$\vec{E} = \text{Re} \left[A(z, \varphi, t) \vec{E}_{\perp}(r) e^{i(\bar{\omega}_c t - m_0 \varphi)} \right]$$

m_0 - азимутальный индекс рабочей моды

$$\xi = \left(\beta_{\perp 0}^4 / 8\beta_{\parallel 0}^2 \right) m_0 \varphi$$

производная по азимутальной координате

$$i \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \xi} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + i\epsilon(Z)a = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\theta_0,$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + ip(\Delta - 1 + |p|^2) = -a,$$

Разложение в ряд Фурье с учетом периодичности по азимутальной координате

$$a(\xi + L_{\phi}) = a(\xi)$$

$$a(Z, \xi, \tau) = \sum_q a_q(Z, \tau) e^{i\delta_q \xi}, \quad \delta_q = \frac{2\pi q}{L_{\phi}}$$

$$L_{\phi} = 2\pi m_0 \left(\beta_{\perp 0}^4 / 8\beta_{\parallel 0}^2 \right)$$

- нормализованный периметр волновода

$$q = m - m_0$$

Конкуренция «мод шепчущей» галереи с эквидистантным спектром.

$$i \frac{\partial^2 a_q}{\partial Z^2} + i\delta_q a_q + \frac{\partial a_q}{\partial \tau} + i\varepsilon(Z)a_q = \frac{I_0}{2\pi L_\varphi} \int_0^{L_\varphi} \int_0^{2\pi} p e^{-i\delta_q \xi} d\theta_0 d\xi,$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + ip(\Delta - 1 + |p|^2) = - \sum_q a_q(Z, \tau) e^{i\delta_q \xi}.$$

Модифицированное граничное условие с внешним сигналом для рабочей моды

$$a_0(L, \tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a_0(L, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 2F(\tau) e^{i\Omega\tau} \quad q = 0 \quad (m = m_0)$$

Стандартное (излучательное) граничное условие для конкурирующих мод

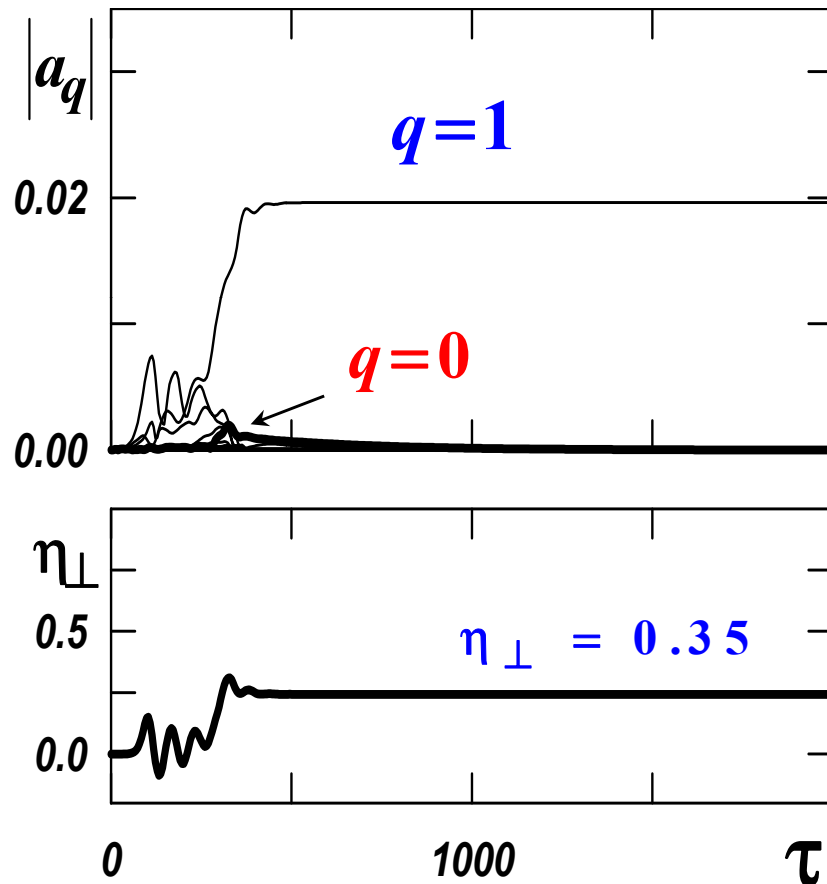
$$a_q(L, \tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{e^{-i\delta_q(\tau - \tau')}}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a_q(L, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 0, \quad q \neq 0$$

Результаты моделирования

$$L_\phi = 10$$

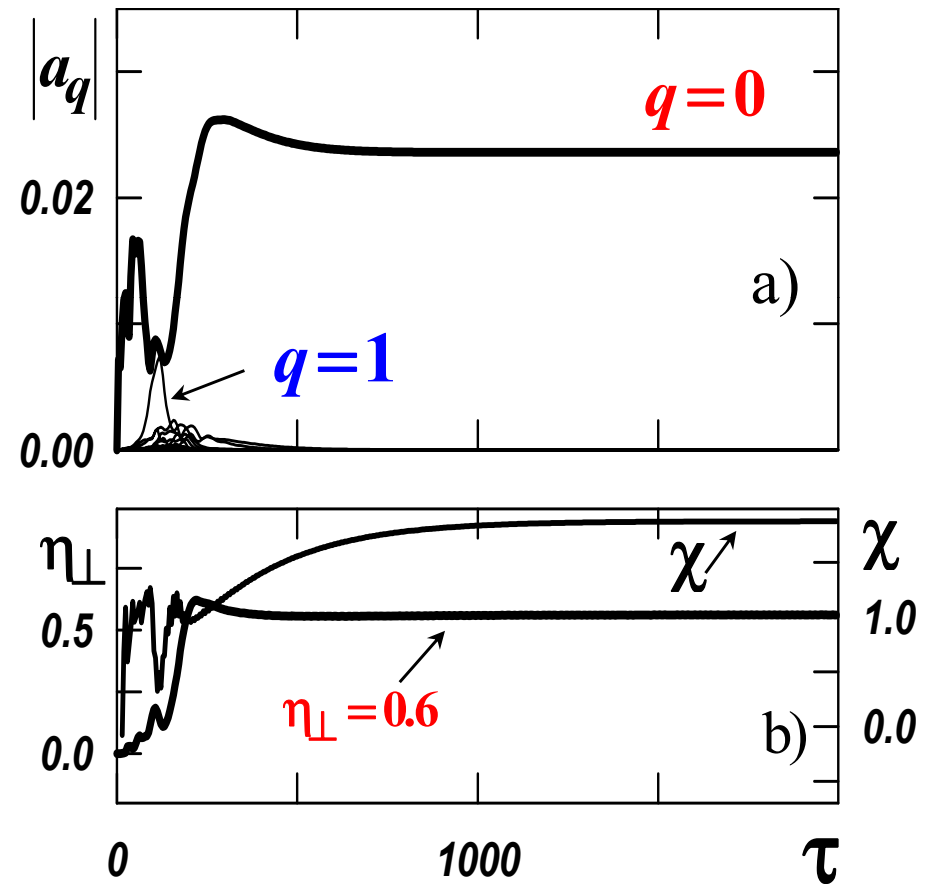
$\Delta = 0.5$ - оптимальная по КПД расстройка для рабочей моды

Режим свободной генерации



В конкуренции побеждает паразитная мода.
Генерация с низким КПД.

Режим захвата
(внешний сигнала 5% по мощности)



В конкуренции побеждает рабочая мода.
Генерация с высоким КПД.

Нестационарные уравнения гиротрона с конкуренцией НЕЭКВИДИСТАНТНЫХ МОД

$$i \frac{\partial^2 a_n}{\partial Z^2} + s_n \frac{\partial a_n}{\partial \tau} + (i \varepsilon_n(Z) + i \Delta_n(\tau) + \sigma_n) a_n = i \frac{I_n}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} p^{s_n} e^{i(m_n - s_n)\varphi} d\theta_0 d\varphi,$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + i \frac{\alpha_{\perp}^2}{\alpha_{\square}} p (|p|^2 - 1) = i \sum_n a_n (p^*)^{s_n - 1} e^{-i(m_n - s_n)\varphi}.$$

$$\tau = \frac{\bar{\beta}_{\perp}^4}{8\bar{\beta}_{\parallel}^2} \bar{\omega}_H t, \quad Z = \frac{\bar{\beta}_{\perp}^2}{2\bar{\beta}_{\parallel}} \frac{\bar{\omega}_H}{c} z, \quad a_n = \frac{eA_n}{mc\bar{\omega}_H} \frac{s_n^{s_n}}{2^{s_n-1} s_n!} \frac{\bar{\beta}_{\perp}^{s_n-4}}{\bar{\gamma}}, \quad \bar{I}_n = 64 \frac{e\bar{I}_b}{mc^3} \frac{\bar{\beta}_{\parallel} \bar{\beta}_{\perp}^{2(s_n-4)}}{\bar{\gamma}} s_n^3 \left(\frac{s_n^{s_n}}{2^{s_n} s_n!} \right)^2 \frac{J_{m_n-s_n}^2(\bar{\omega}_n^c R_b/c)}{(\mathbf{v}_n^2 - m_n^2) J_{m_n}^2(\mathbf{v}_n)}$$

$$\Delta_n(\tau) = 8\bar{\beta}_{\parallel}^2 s_n^2 \left(s_n \omega_H(\tau) - \bar{\omega}_n^c \right) / \bar{\omega}_n^c \bar{\beta}_{\perp}^4$$

- Расстройка циклотронного резонанса, описывающая сценарий включения гиротрона при изменении ускоряющего напряжения

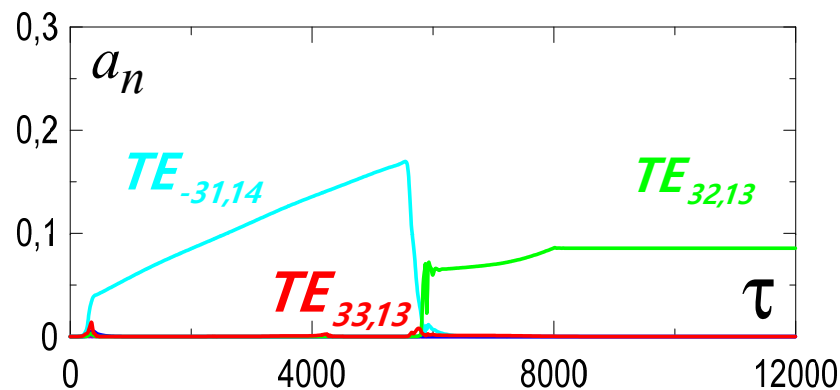
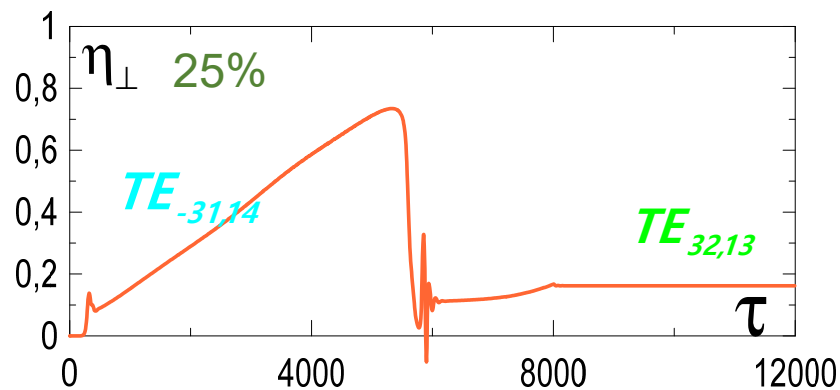
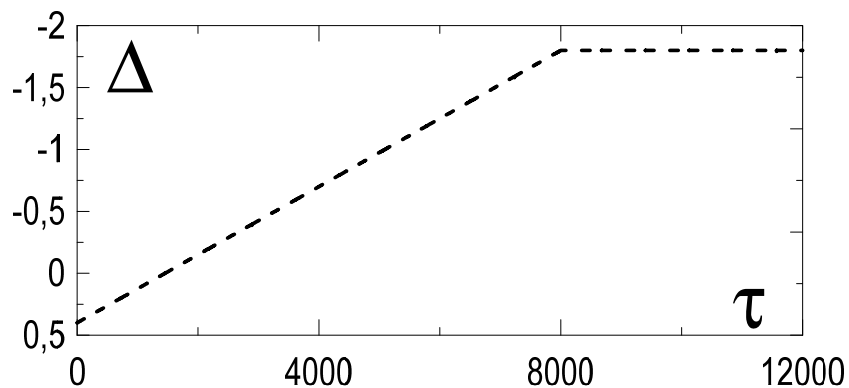
$$\varepsilon_n(Z) = 8\bar{\beta}_{\parallel}^2 s_n^2 \left(\bar{\omega}_n^c - \omega_n^c(Z) \right) / \bar{\omega}_n^c \bar{\beta}_{\perp}^4$$

- профиль резонатора

Результаты моделирования для 230ГГц/1 МВт гиротрона (DE □ O).

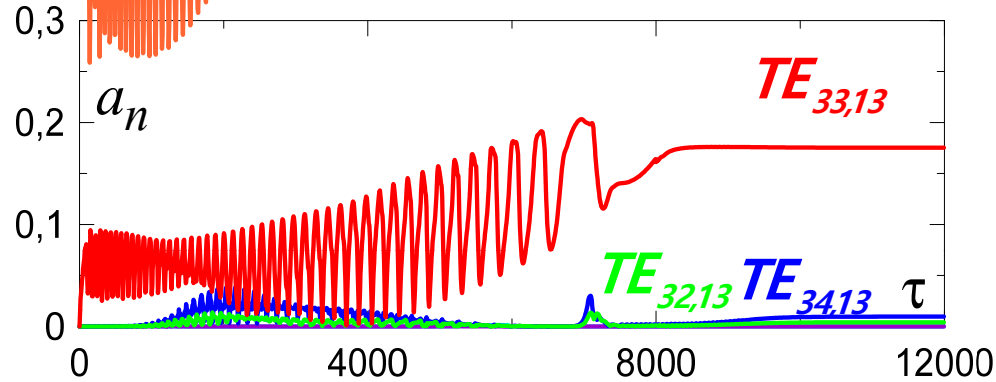
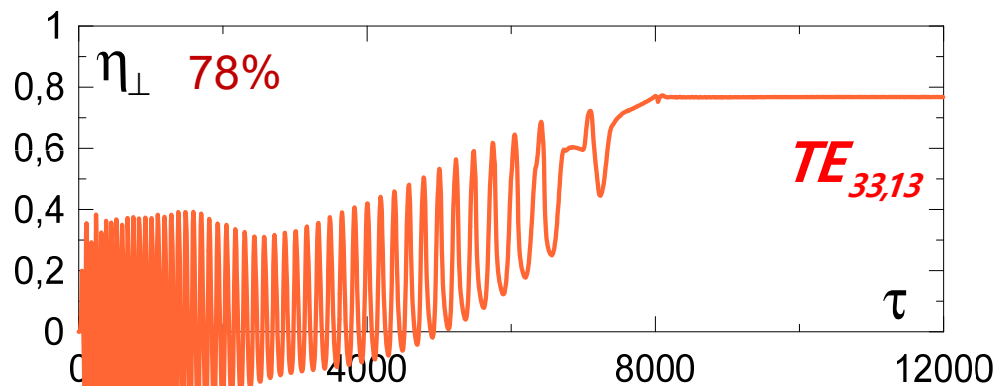
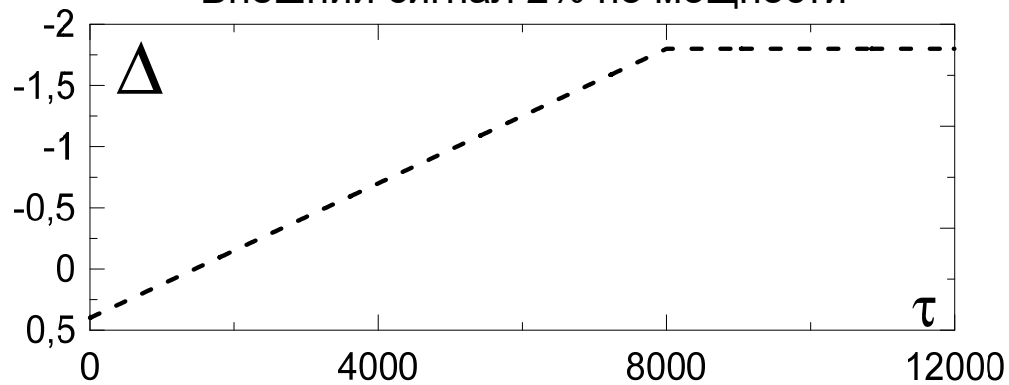
Рабочая мода TE_{33,13} (первая циклотронная гармоника)

Свободная конкуренция мод



Режим захвата (полоса 30 МГц)

Внешний сигнал 2% по мощности



Захват гиротрона на 2й циклотронной гармонике

Генерация на 2й циклотронной гармонике

Пропорциональное снижение магнитного поля на заданной частоте, либо повышение частоты при заданном магнитном поле

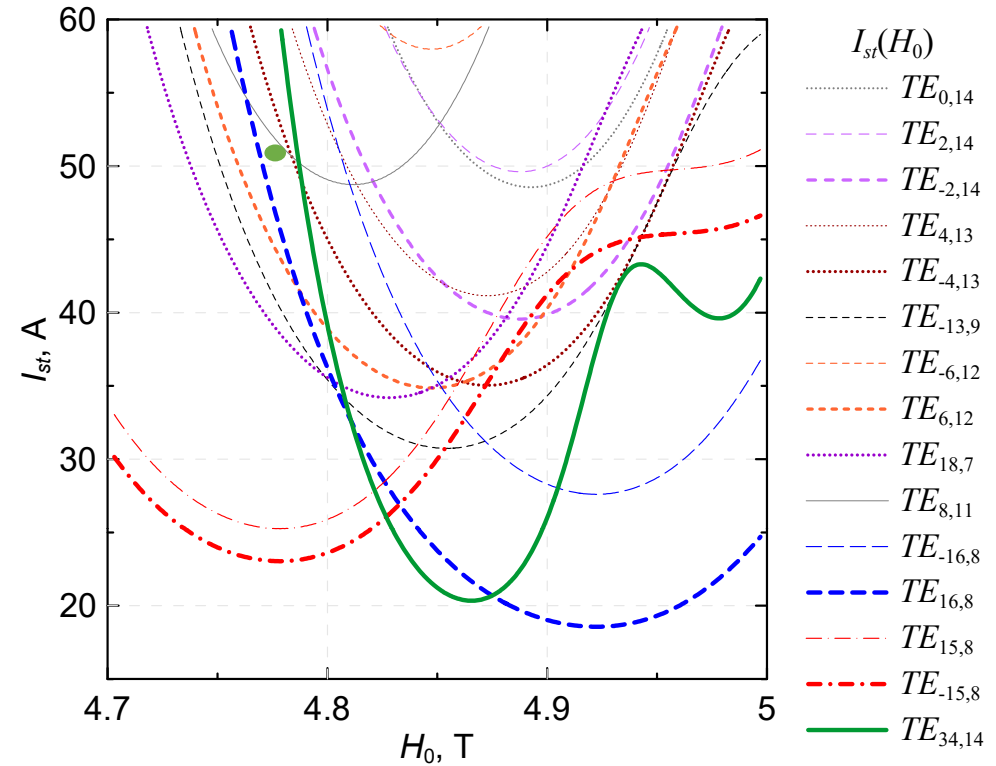
Основная проблема достижения высокой мощности – сильная конкуренция с модами на основном циклотронном резонансе при увеличении тока пучка и номера рабочей моды

T. Saito, et al, Phys. Plasmas 19, 063106 (2012) 83 kW at 389 GHz, TE_{17,2}

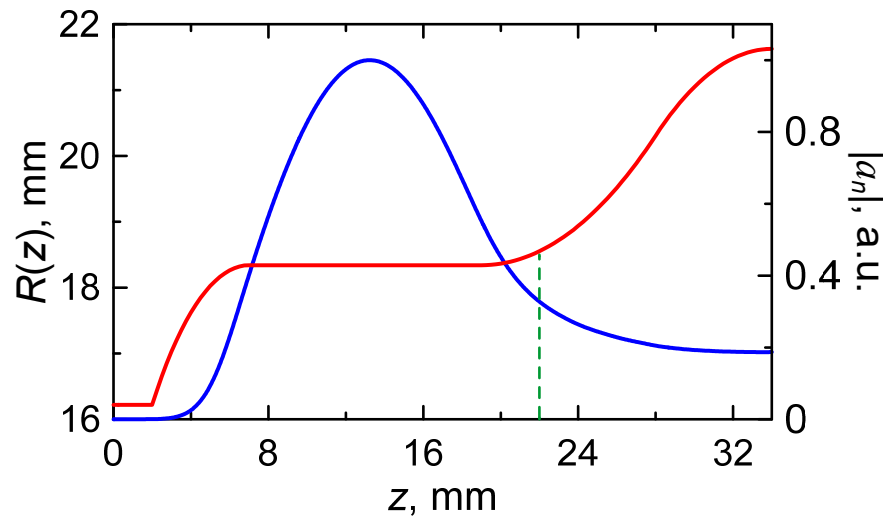
Возможное решение: захват внешним сигналом на рабочей моде, который подавляет паразитные моды на фронте включения.

Результаты расчетов для МВт гиротрона с частотой 230 ГГц на второй циклотронной гармонике

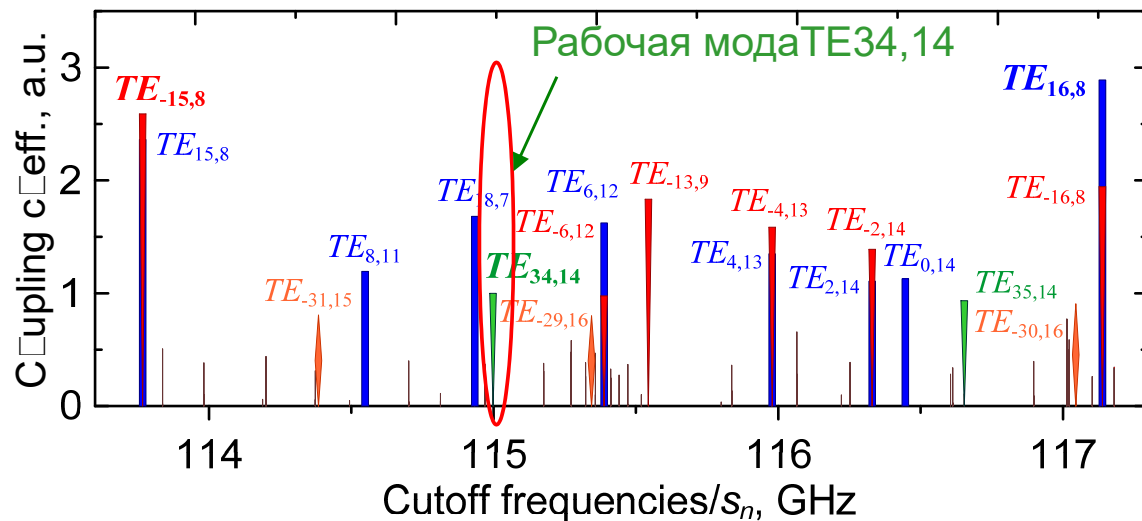
Зоны генерации



Профиль резонатора



Спектр конкурирующих мод

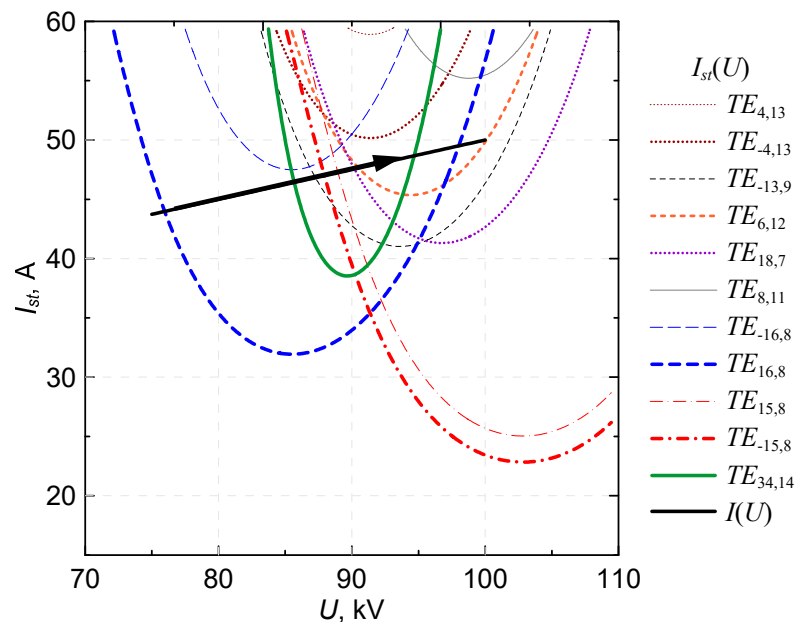


□ □des' Q-fact□ □

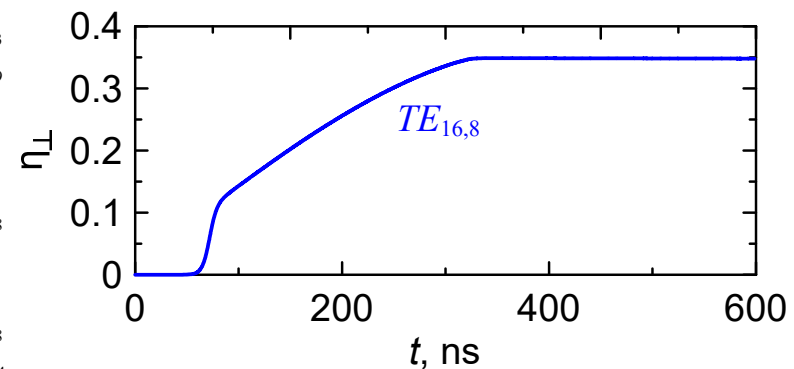
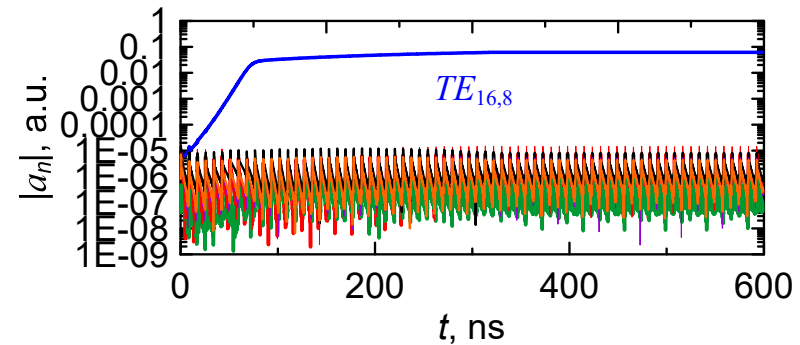
$TE_{\pm 15,8} \sim 590$, $TE_{\pm 16,8} \sim 620$,
 $TE_{34,14} \sim 2400$, $TE_{18,7} \sim 600$

Режим свободной генерации: возбуждение паразитной моды на основном циклотронном резонансе

Start-up scenario
voltage variation 75-100 kV;
magnetic field of 4.76 T;
operating current 50 A



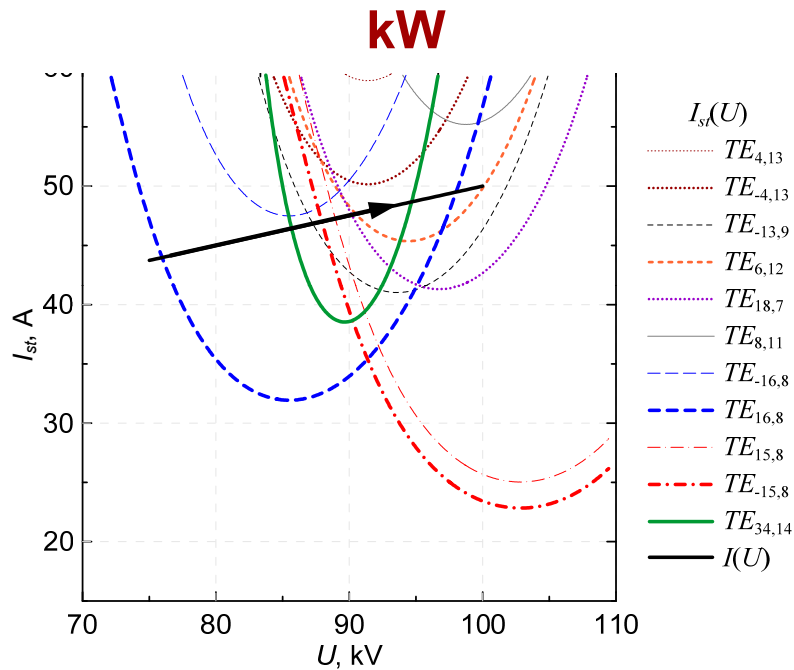
Setting-on the steady-state regime



Total efficiency 22%
Output power 1.1 MW

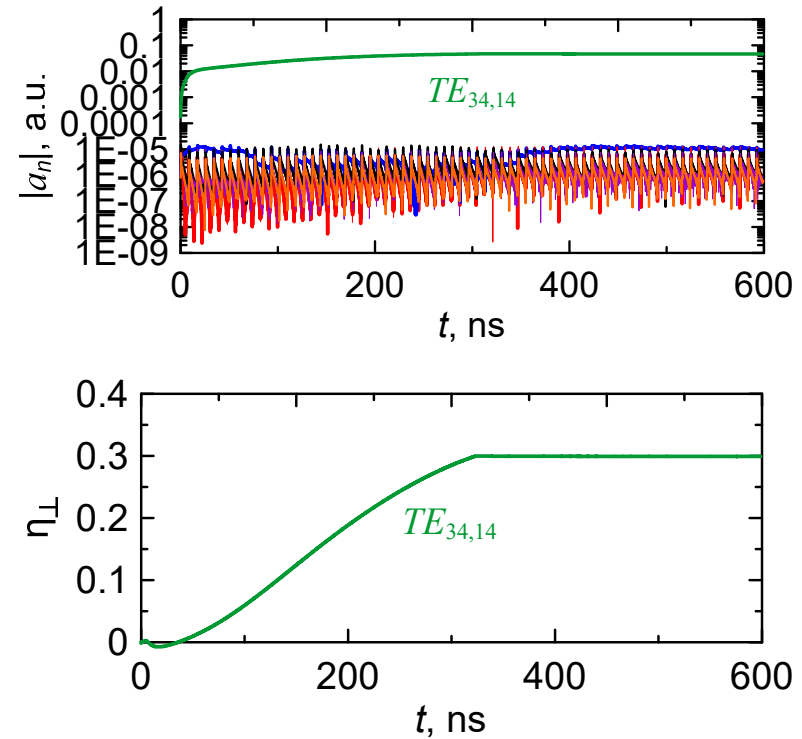
Режим захвата: генерация на второй циклотронной гармонике.

External signal power is of **50**



Ohmic loads don't
exceed²
2.5 kW/cm

Setting-on the steady-state regime



Total efficiency **~20%**
Output power **~1 MW**

ВЫВОДЫ

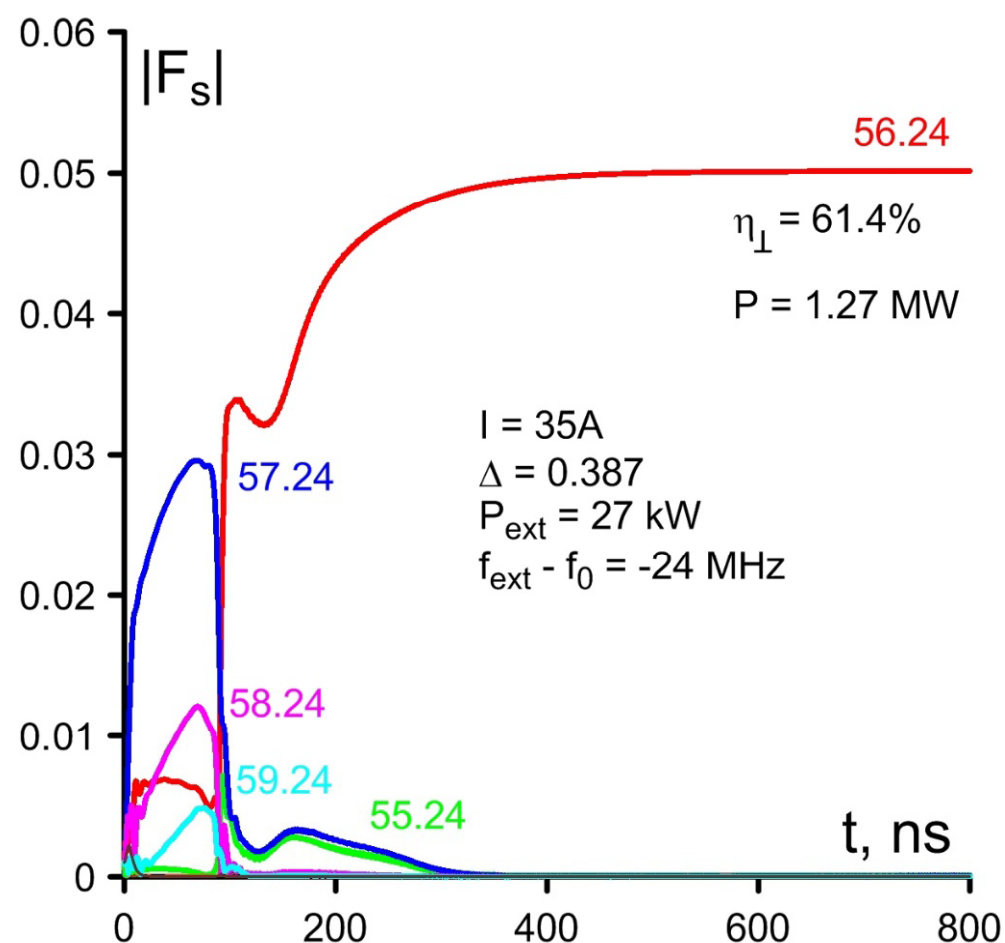
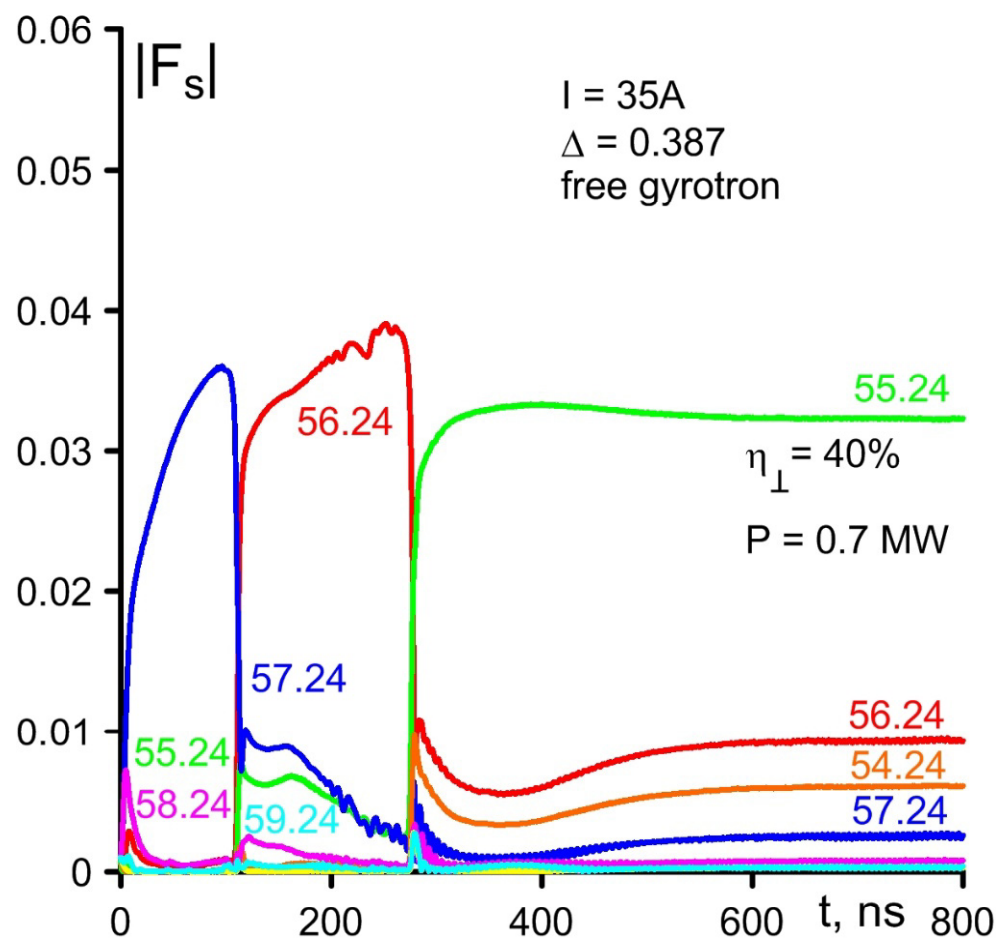
- В мощных генераторах с предельно сверхразмерными многомодовыми электродинамическими системами путем внутренней или внешней синхронизации могут быть получены простые одномодовые одночастотные автоколебательные режимы
- Теоретический анализ указанных режимов требует построения многомерных пространственно-временных, в т.ч. квазиоптических моделей.
- К настоящему времени имеется достаточно большое число экспериментальных подтверждений развиваемых подходов и ведутся дальнейшие исследования.

- Спасибо за внимание.
- Авторы признательны А.С.Сергееву, Н.Ю. Пескову, АМ. Малкину, В.Ю Заславскому и Ю.В Новожиловой, внесших существенный вклад в тематику доклада
- Четверг
 - *Ю.В.Новожилова*, СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ДВУХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ ОТРАЖЕНИЕМ ОТ ВНЕШНЕГО ВЫСОКОДОБРОТНОГО РЕЗОНАТОРА

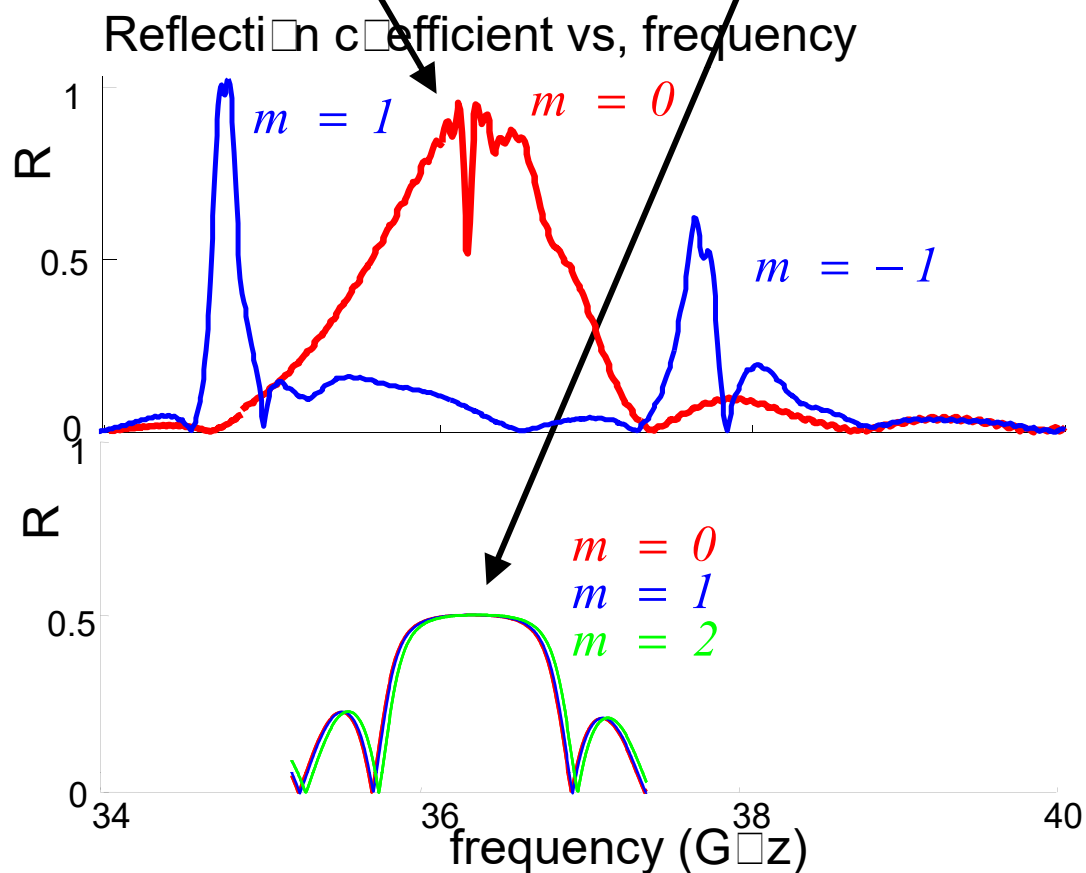
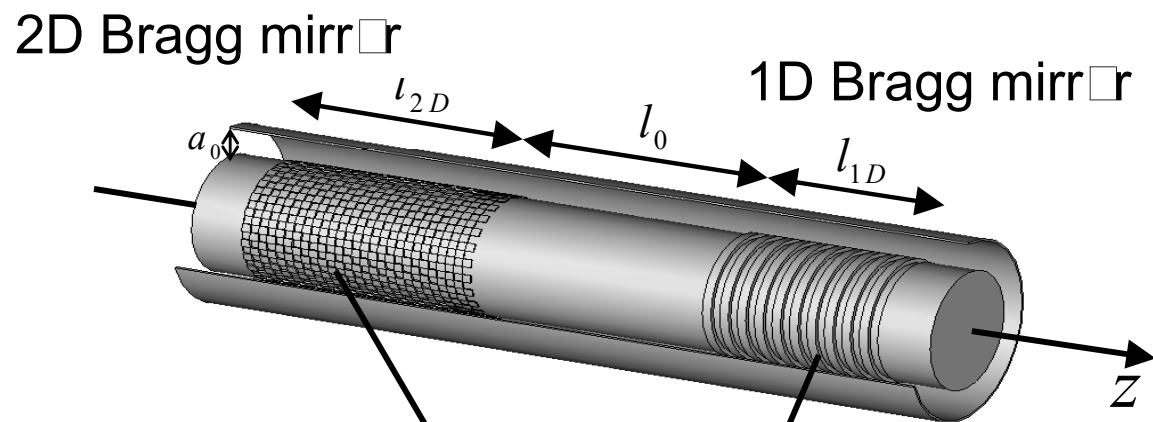
Захват гиротрона на основном циклотронном резонансе

Гиротрон 345 ГГц:

слева – без внешнего сигнала, справа – 27 кВт внешний сигнал обеспечивает работу гиротрона с модой TE_{56.24} и мощностью 1.27 МВт.



Coaxial FEM with hybrid resonator consisting of upstream 2D Bragg and downstream 1D Bragg mirrors

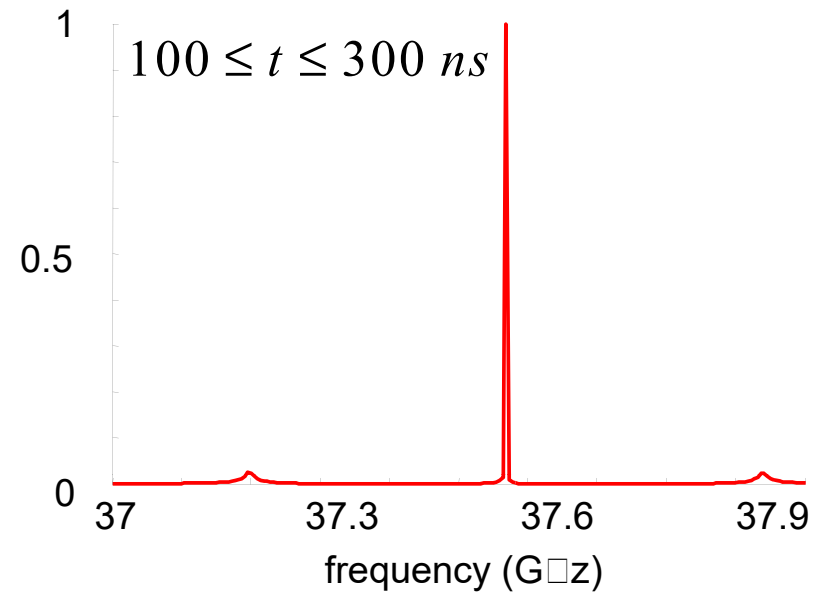
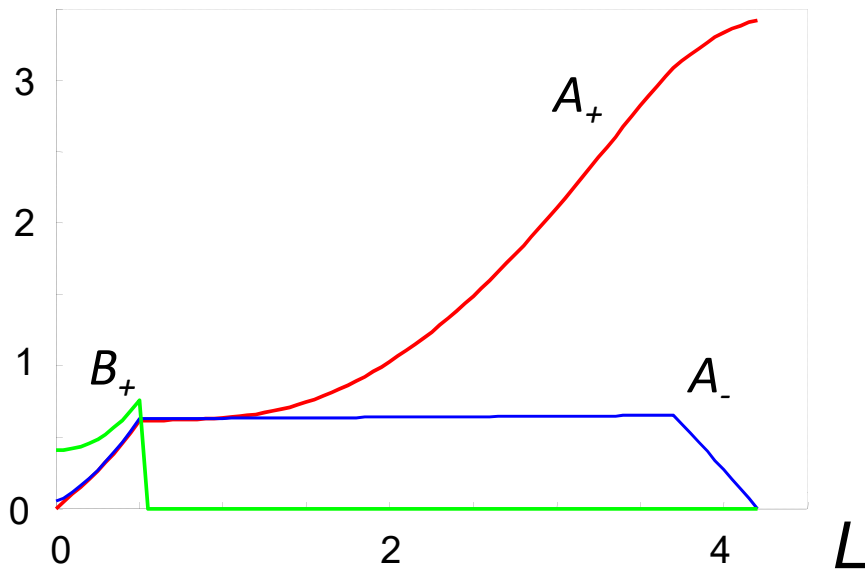
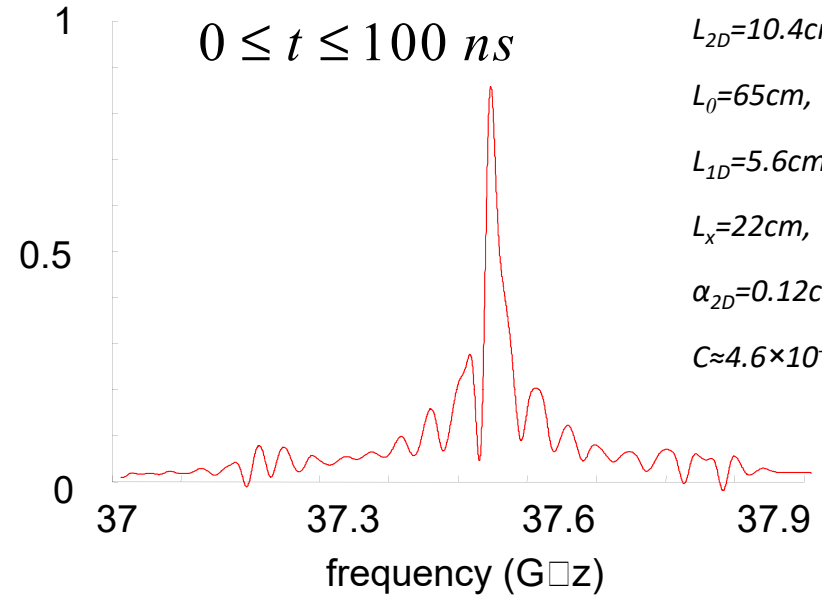
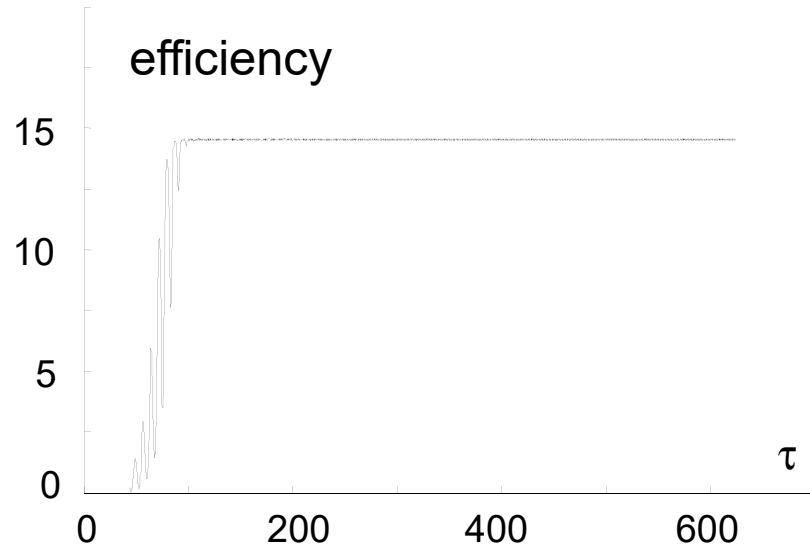


Azimuthal mode selection can be explained by the fact that overlapping of reflection zone takes place only for fundamental symmetric mode: $m=0$

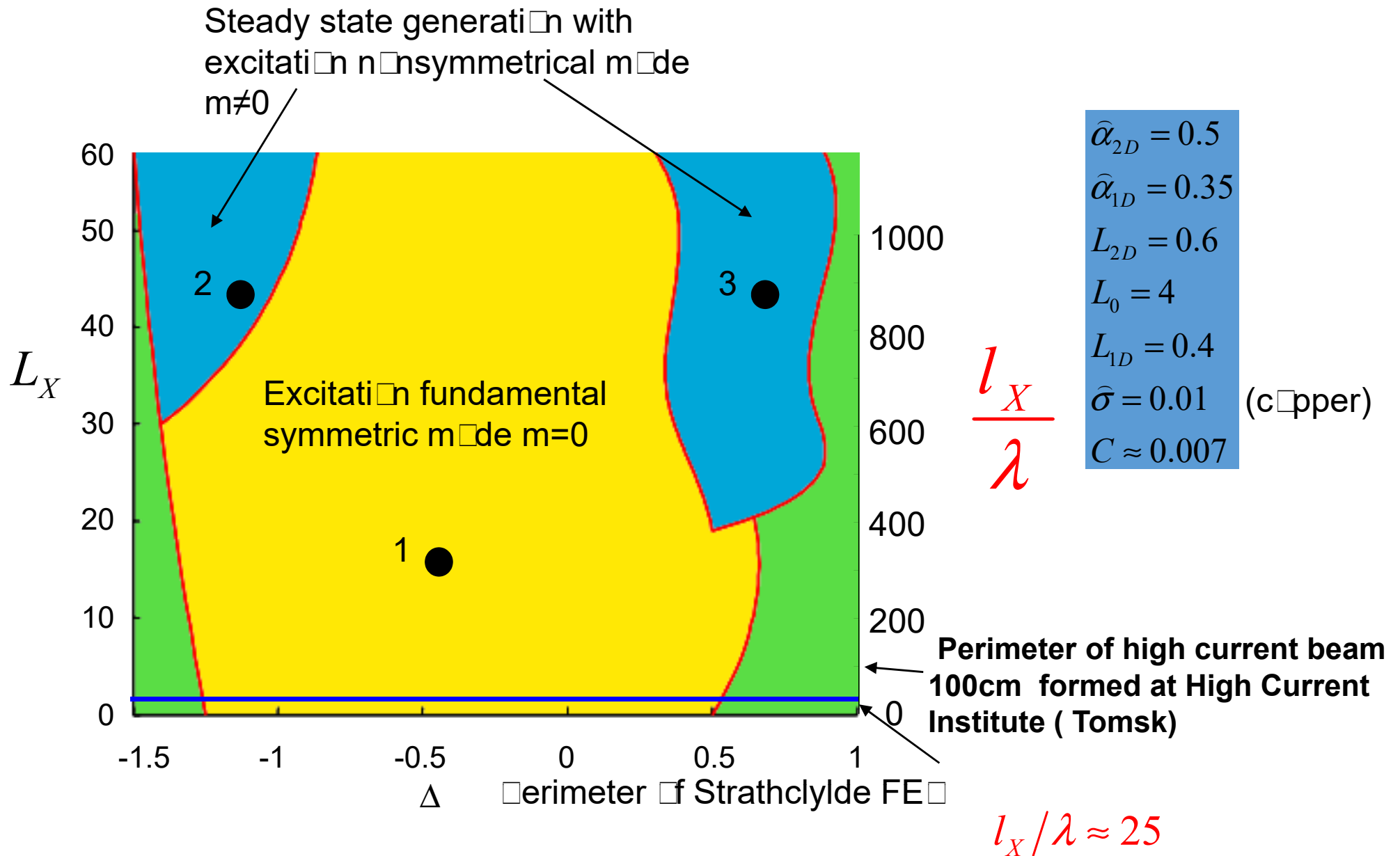
Nonlinear modeling of mode selection in 37 GHz FE with hybrid Bragg resonator

Parameters:

$L_{2D}=10.4\text{cm}$,
 $L_0=65\text{cm}$,
 $L_{1D}=5.6\text{cm}$,
 $L_x=22\text{cm}$,
 $\alpha_{2D}=0.12\text{cm}^{-1}$
 $C\approx 4.6\times 10^{-3}$



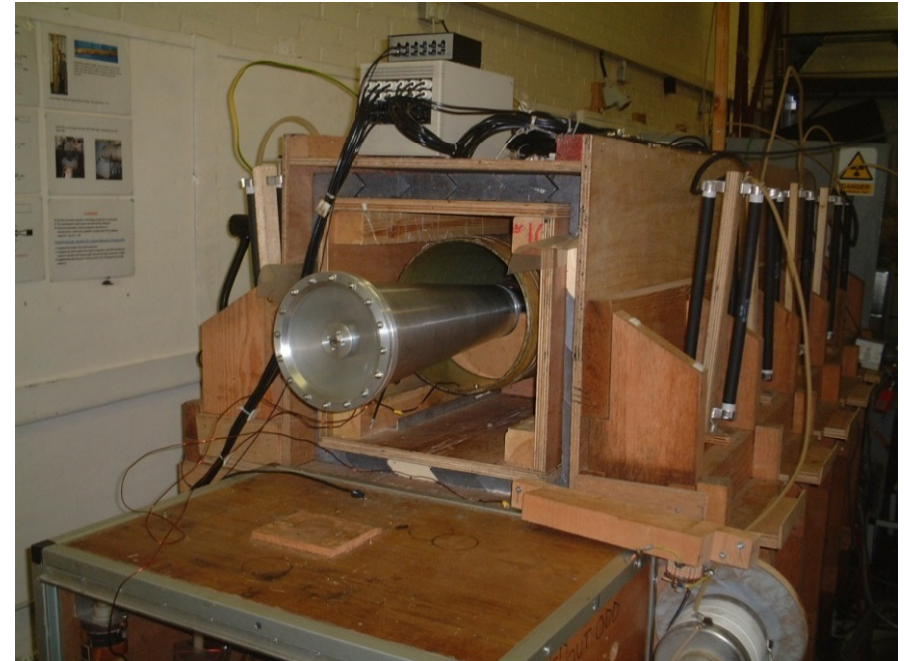
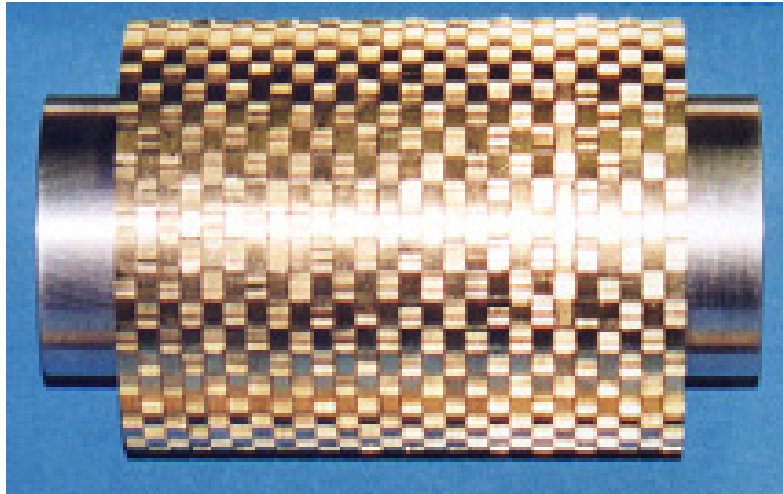
Zones of stationary generation regimes corresponding to excitation of modes with different number of azimuthal variation m



Experimental studies of co-axial 37 GHz FEM with 2D distributed feedback

Department of Physics, University of Strathclyde

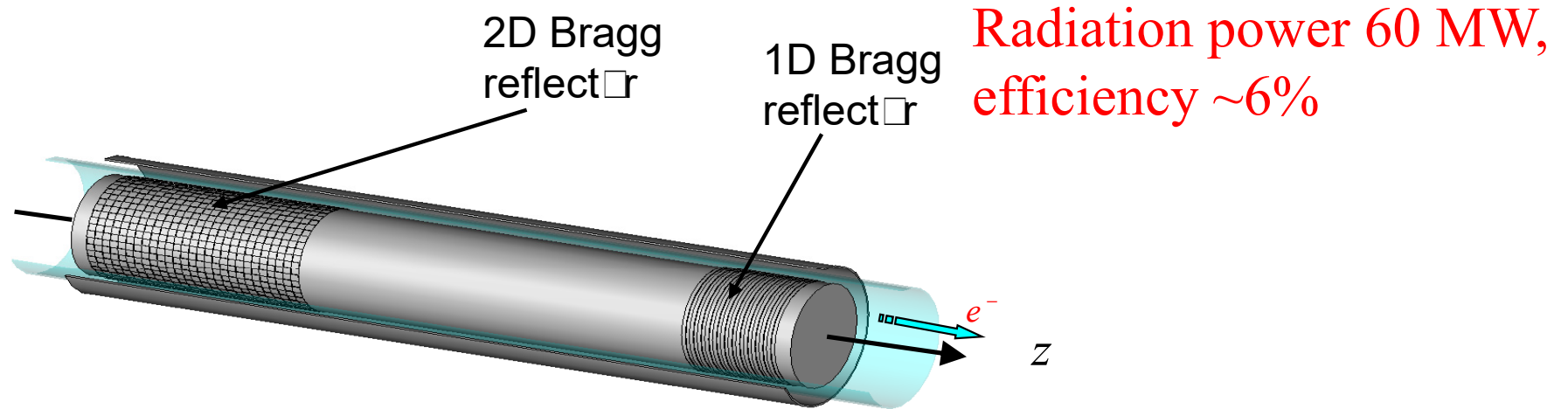
Co-axial 2D Bragg structure



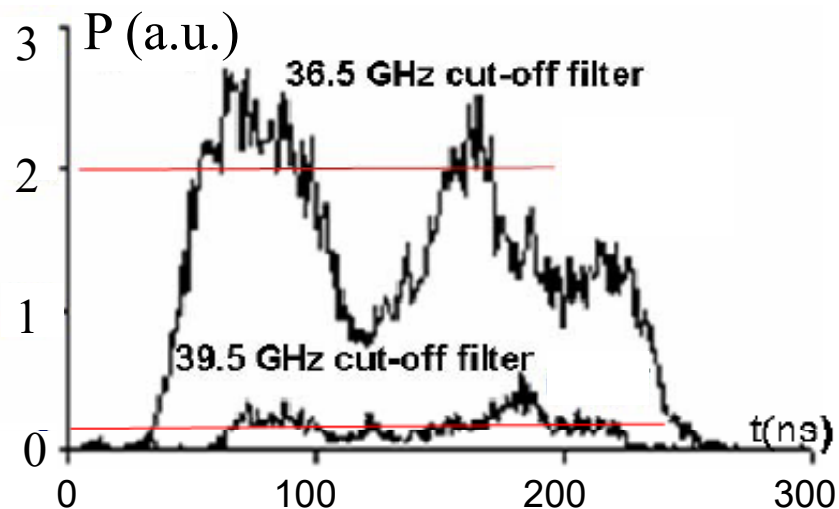
Resonator *perimeter* $l_x = 25\lambda$

beam energy 0.5 MeV
beam current 0.5 - 1 kA
pulse duration 250 ns
beam diameter 7 cm

37 GHz FEM Experiments with Hybrid Bragg Resonator



Spectrum measurements by cut-off filters demonstrate azimuthal mode selection



Heterodyne diagnostic of radiation spectrum demonstrates azimuthal and longitudinal mode selection

