



ГЕНЕРАЦИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ И ИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ: СОЛИТОНЫ И АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ

И.В. Зотова, Н.С. Гинзбург

Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Н.М. Рыскин

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

ПЕРЕНОС В МИКРОВОЛНОВУЮ ЭЛЕКТРОНИКУ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

- Сверхизлучение Дике
- Усиление и компрессия импульсов света в инвертированных средах
- Самоиндуцированная прозрачность в неинвертированных средах

$$T_{e.m.} \ll T_{1,2}$$

- Эффект пассивной синхронизации мод в лазерах с насыщающимся поглотителем

ПЕРЕНОС В МИКРОВОЛНОВУЮ ЭЛЕКТРОНИКУ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

-Сверхизлучение Дике

$$T_{e.m.} \ll T_{1,2}$$

-Усиление и компрессия импульсов света в инвертированных средах

Автомодельные решения

-Самоиндуцированная прозрачность в неинвертированных средах

SIT-солитоны

-Эффект пассивной синхронизации мод в лазерах с насыщающимся поглотителем

Диссипативные солитоны

ПЕРЕНОС В МИКРОВОЛНОВУЮ ЭЛЕКТРОНИКУ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

-Сверхизлучение Дике

-Усиление и компрессия импульсов света в инвертированных средах

-Самоиндуцированная прозрачность в неинвертированных средах

-Эффект пассивной синхронизации мод в лазерах с насыщающимся поглотителем

$$T_{e.m.} \ll T_{1,2}$$

Большинство лазерных сред характеризуется быстрой фазовой релаксацией $T_{e.m.} > T_2$

Электронные пучки

1. Могут формировать нелинейные активные и пассивные среды

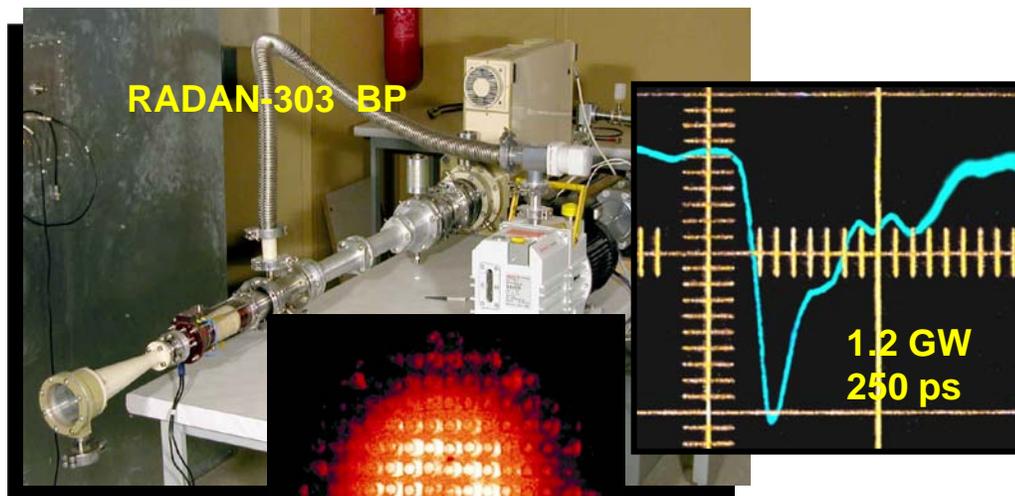
2. Принципиально движущиеся среды

3. Большие времена фазовой релаксации

Фазовая релаксация определяется временем пролета через пространство взаимодействия

$$T_{e.m.} < T_2 = L/V_{||}$$

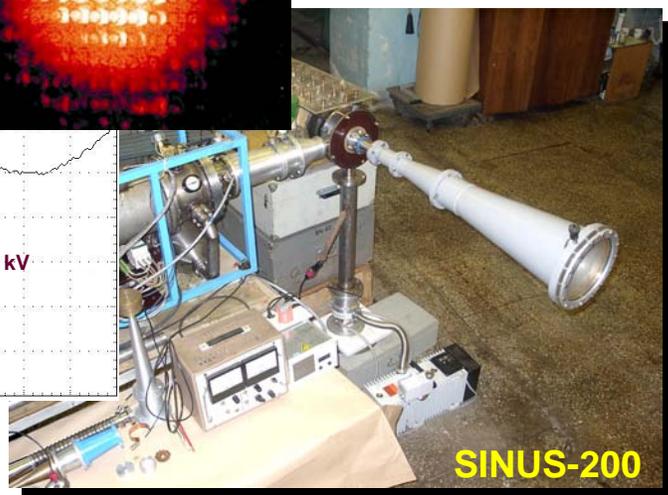
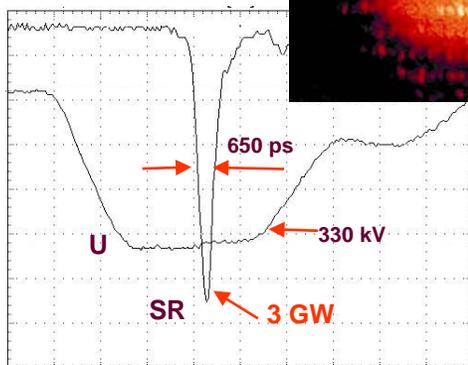
ГЕНЕРАТОРЫ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ



38 ГГц (8 мм)

ИПФ РАН,
ИЭФ УрО
РАН, ИСЭ РАН

Энергия электронов – 300 кэВ
Ток пучка – 2.2 кА
Мощность пучка – **0.7 ГВт**
Длительность импульса СИ – 200 пс
Пиковая мощность – **1.2 ГВт**
Коэффициент конверсии – 1.5



10 ГГц (3 см)

ИЭФ УрО
РАН, ИСЭ РАН

Энергия электронов – 330 кэВ
Ток пучка – 5 кА
Мощность пучка – **1.7 ГВт**
Длительность импульса СИ – 650 пс
Пиковая мощность – **3 ГВт**
Коэффициент конверсии – 1.8

СОДЕРЖАНИЕ

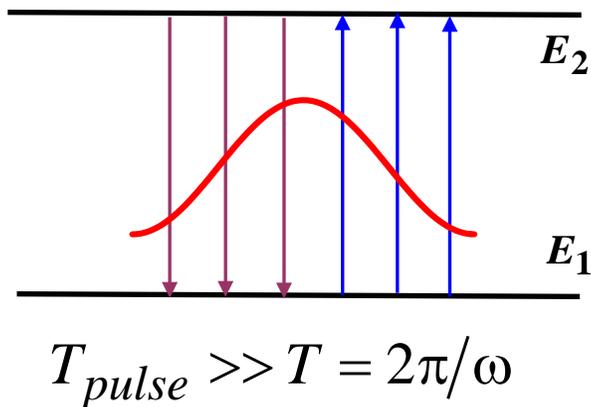
РАЗДЕЛ 1. Самоиндуцированная прозрачность и формирование SIT солитонов и их периодических последовательностей в условиях резонансного циклотронного поглощения. Модуляторы СВЧ излучения.

РАЗДЕЛ 2. Эффект пассивной синхронизации мод в системах электронно-волнового взаимодействия. Микроволновые диссипативные солитоны.

РАЗДЕЛ 3. Автомодельные режимы усиления и компрессии СВЧ импульсов в электронных потоках. Генерация импульсов микроволнового сверхизлучения и их применение в ускорительных задачах.

САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Оптическая самоиндуцированная прозрачность



Распространение ультракоротких импульсов света в резонансных неинвертированных (пассивных) средах

$$T_{pulse} \ll T_{1,2}$$

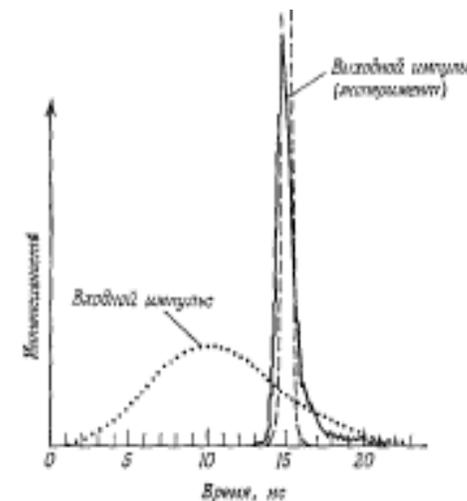
$$\omega \approx \omega_{12} = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}$$

Увеличение мощности падающего импульса света

- Поглощение
- Формирование SIT-солитона. Самокомпрессия.
- Распад на несколько солитонов

Солитонное решение

$$A(z, t) = \frac{2\hbar}{d \cdot T_s} \operatorname{sech} \left(\frac{t - z/V_s}{T_s} \right)$$



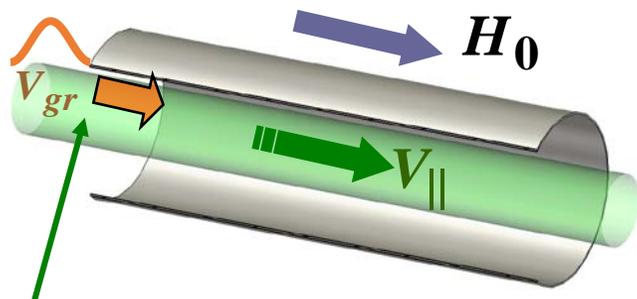
S. L. McCall, E. L. Hahn PRL 1967

САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Классический аналог

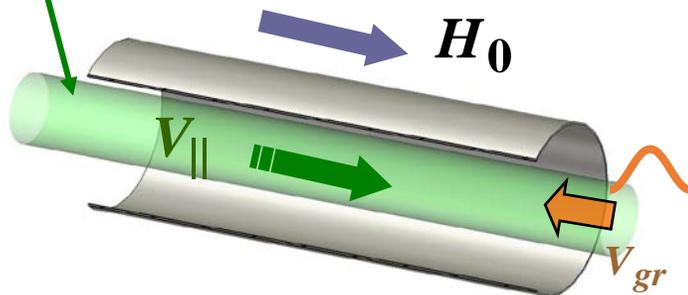
э.м. импульс

$$T_{pulse} < L/V_{||}$$



Электронный пучок с нулевой поперечной скоростью

$$V_{\perp 0} = 0$$



Распространение ультракоротких микроволновых импульсов в потоке невозбужденных циклотронных осцилляторов

Условие циклотронного резонанса

$$\omega - hV_{||} \approx \omega_H^0$$

Попутное распространение

$$\omega + hV_{||} \approx \omega_H^0$$

Встречное распространение

$$\omega_H^0 = \frac{eH_0}{mc\gamma} \quad - \text{ релятивистская гирочастота}$$

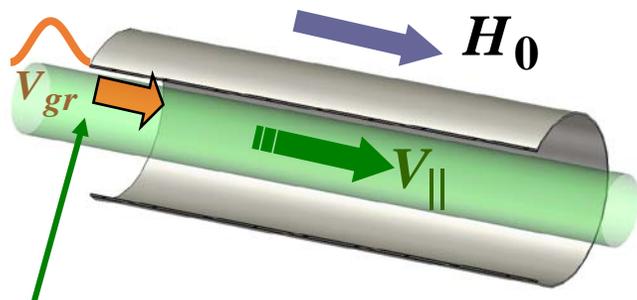
N.Ginzburg, A.Sergeev, I.Zotova, Phys. Rev. Lett. (2010)

САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Классический аналог

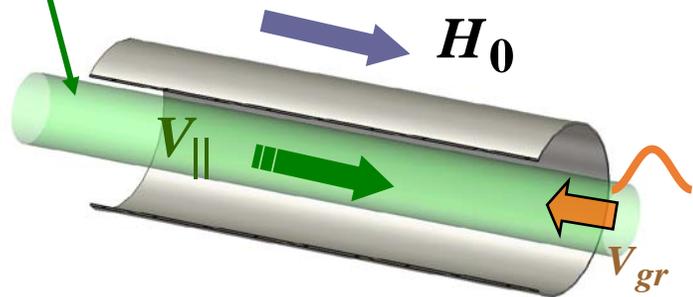
э.м. импульс

$$T_{pulse} < L/V_{||}$$



Электронный пучок с нулевой поперечной скоростью

$$V_{\perp 0} = 0$$



Параметр
неизохронности

$$\mu = \frac{\gamma}{\omega} \left(\frac{\partial \omega_H}{\partial \gamma} + h \frac{\partial V_{||}}{\partial \gamma} \right) \Bigg|_{\gamma=\gamma_0} = \frac{\beta_{||0} (1 - \beta_{ph}^{-2})}{2(1 \mp \beta_{ph}^{-1} \beta_{||0})}$$

$$\mu \neq 0 \quad \text{если} \quad V_{ph} \neq c$$



Эффекты самоиндуцированной прозрачности реализуются только вне области авторезонанса

N.Ginzburg, A.Sergeev, I.Zotova, Phys. Rev. Lett. (2010)

САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Основные уравнения
попутное распространение

$$V_{ph} \neq c \quad \sqrt{G}/\mu \ll 1$$

$$\tau = \sqrt{G}(\hat{t} - \hat{z}/\beta_{||0}) \left| \beta_{gr}^{-1} - \beta_{||0}^{-1} \right|^{-1}$$

$$\frac{\partial a}{\partial Z} + \frac{\partial a}{\partial \tau} = -p$$



Отсутствует усреднение
по начальным фазам

$$Z = \sqrt{G}\hat{z} \quad p = p_+ \mu^{1/2} G^{-1/4}$$

$$a = \hat{a} \mu^{1/2} G^{-3/4} \quad \delta = \Delta G^{-1/2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + ip(\delta + |p|^2) = a$$



Уравнение
неизохронного
осциллятора

$$\Delta = (1 \mp \beta_{ph}^{-1} \beta_{||0} - \omega_{H0}/\omega) \beta_{||0}$$

Граничные условия

$$p|_{Z=0} = 0$$

$$a|_{Z=0} = a_0 \sin^2(\pi\tau/T), \quad \tau \in [0, T]$$

- входной э.м. импульс

$$\hat{a} = i \frac{eAE_s(R_0)}{mc\omega} \frac{1 \mp \beta_{ph}^{-1} \beta_{||0}}{\beta_{||0}^2} \quad \text{- амплитуда поля}$$

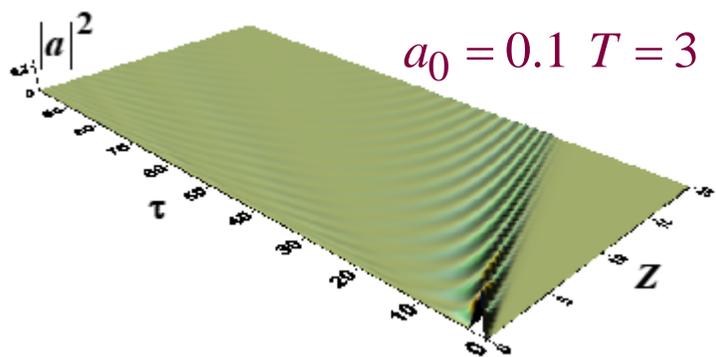
$$p_+ = \frac{(p_x + ip_y) e^{-i\omega t \pm ihz}}{mc\gamma_0 \beta_{||0}} \quad \text{- поперечный импульс}$$

G - параметр тока

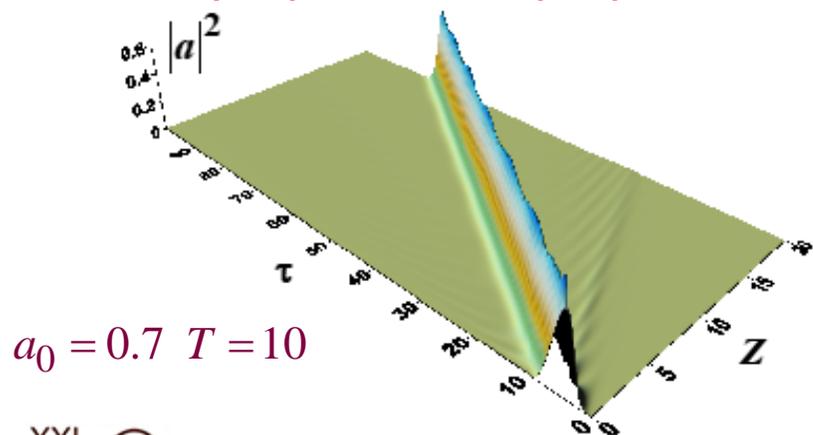
САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Результаты моделирования

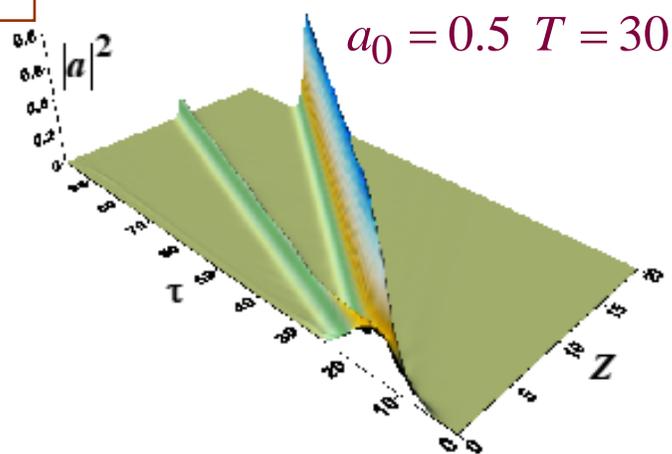
Циклотронное поглощение



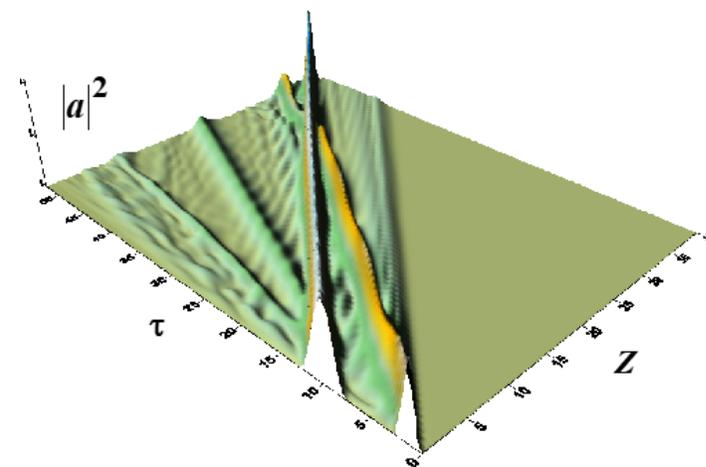
Самоиндуцированная прозрачность



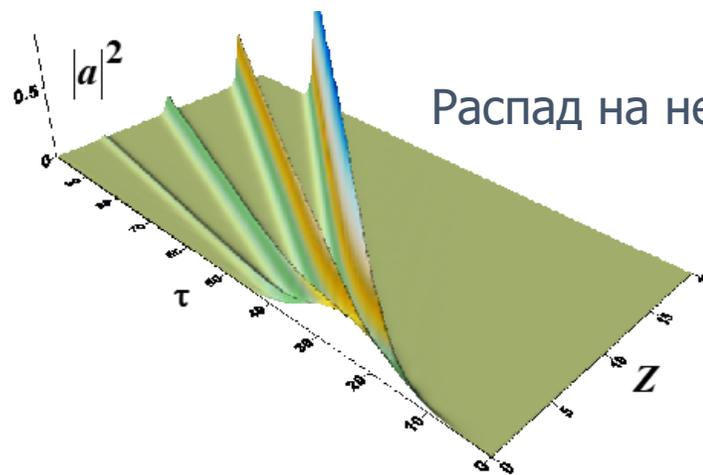
Самокомпрессия



Столкновение солитонов



Распад на несколько солитонов

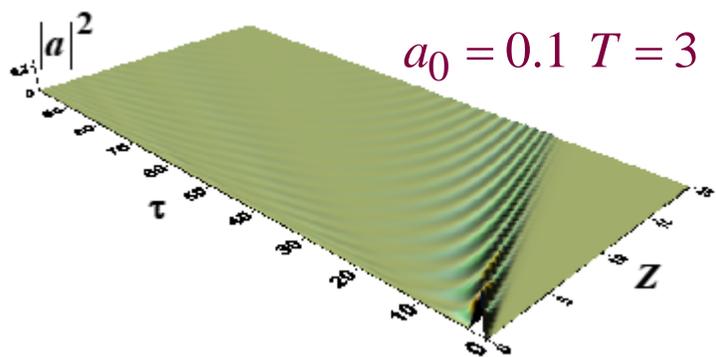


Солитоны, бегущие с разной скоростью, имеют различную амплитуду и длительность

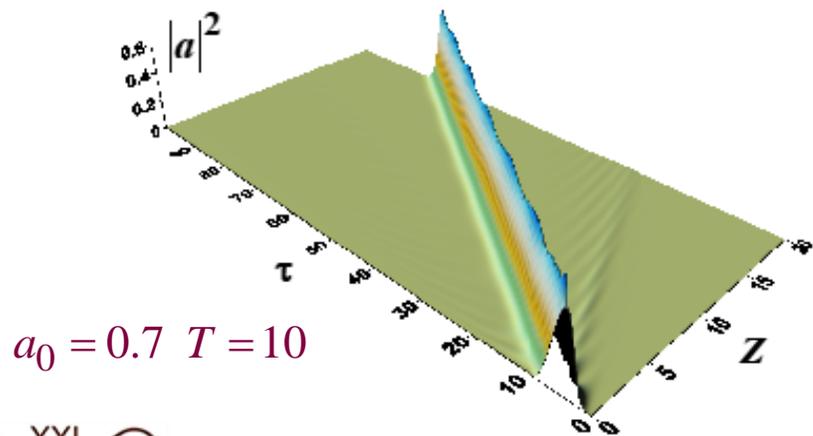
САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Результаты моделирования

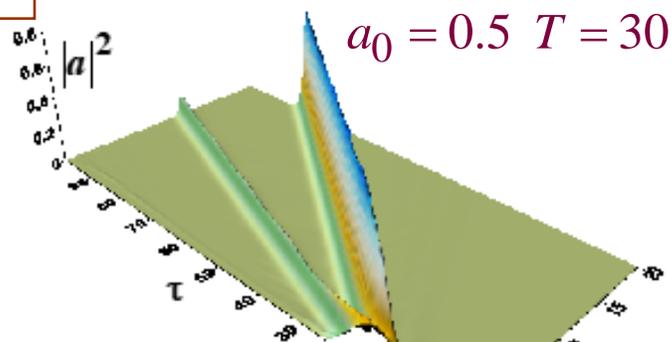
Циклотронное поглощение



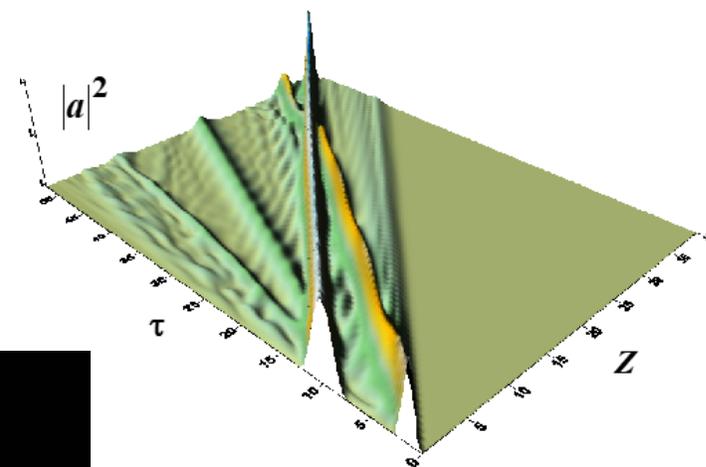
Самоиндуцированная прозрачность



Самокомпрессия



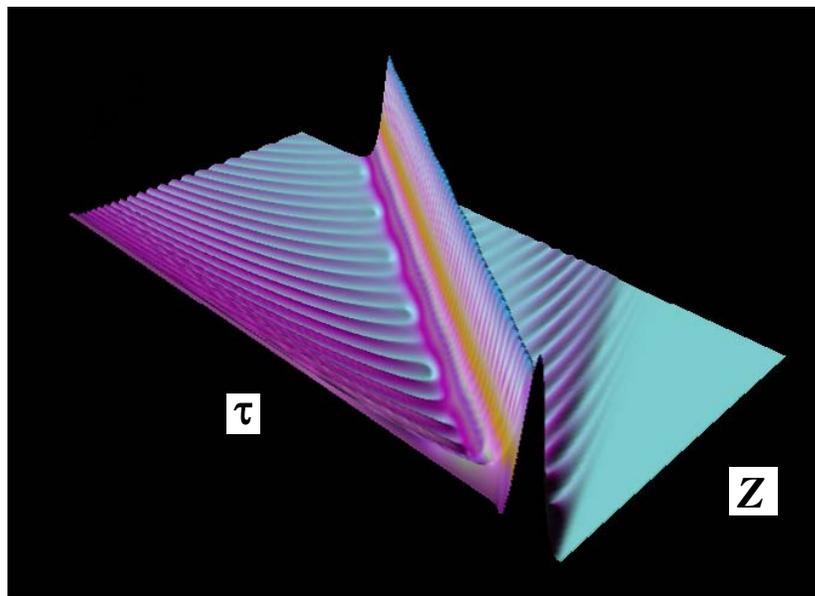
Столкновение солитонов



КО СОЛИТОНОВ

$.5 \quad T = 40$

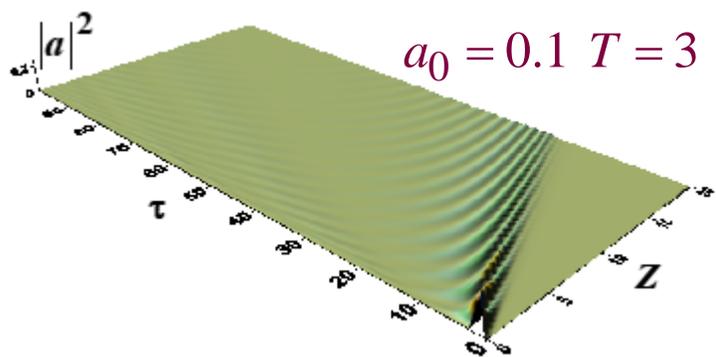
итоны, бегущие с разной скоростью, имеют различную амплитуду и длительность



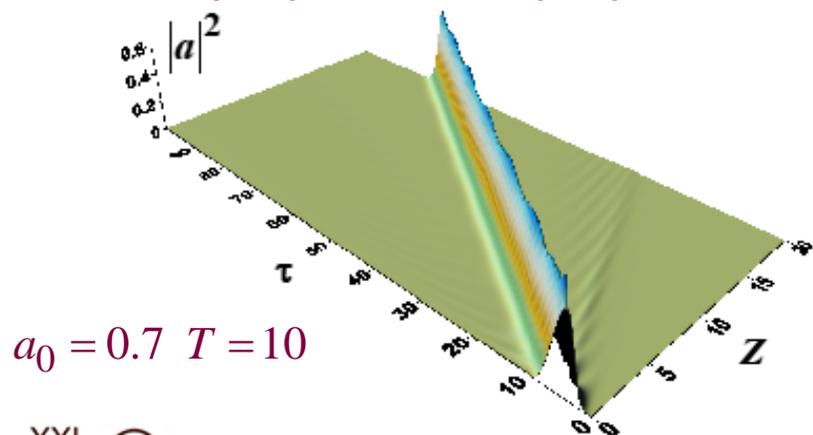
САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Результаты моделирования

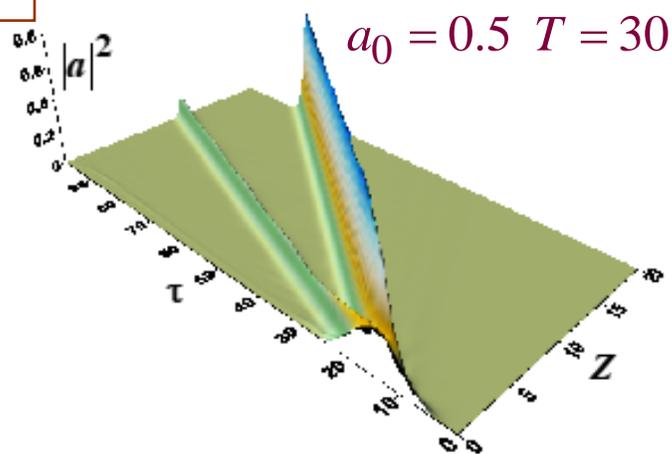
Циклотронное поглощение



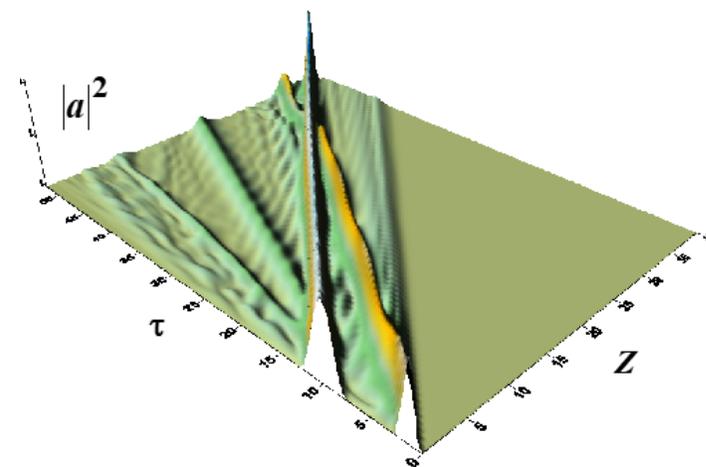
Самоиндуцированная прозрачность



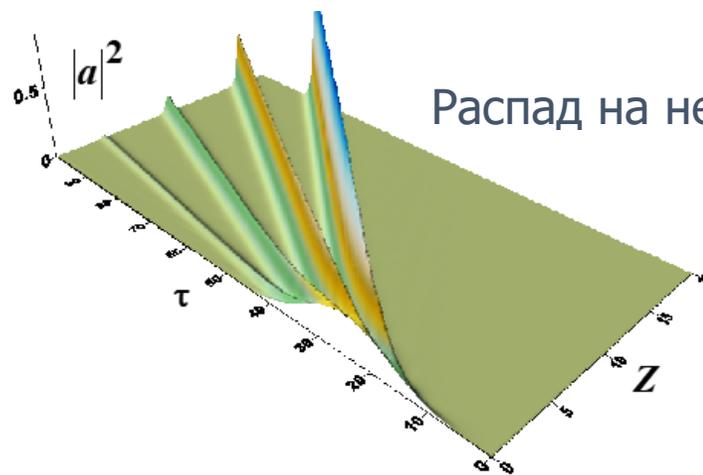
Самокомпрессия



Столкновение солитонов



Распад на несколько солитонов



Солитоны, бегущие с разной скоростью, имеют различную амплитуду и длительность

САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Двухпараметрическое солитонное решение

$$a(Z, \tau) = \tilde{a}(\xi) e^{i\varphi(\xi) + i\Omega\tau}$$

$$p(Z, \tau) = \tilde{p}(\xi) e^{i\psi(\xi) + i\Omega\tau}$$

$$\xi = Z - U\tau$$

U - скорость солитона

Ω - сдвиг несущей частоты относительно циклотронного резонанса

$$\tilde{a}, \tilde{p}(\xi = \pm\infty) = 0$$

$$\frac{d\tilde{a}}{d\xi} = \frac{\tilde{p}}{s^2} \cos \chi, \quad \frac{d\tilde{p}}{d\xi} = \tilde{a} \cos \chi$$

$$\frac{d\chi}{d\xi} = \frac{\Omega}{s^2} + \tilde{p}^2 - \left(\frac{\tilde{a}}{\tilde{p}} + \frac{\tilde{p}}{s^2 \tilde{a}} \right) \sin \chi$$

$\chi = \psi - \varphi$ - разностная фаза

$s = \sqrt{1 - U}$ - отличие скорости солитона от групповой скорости излучения

Интегралы движения

$$\sin \chi = s^{3/2} \tilde{a}^2 / 4$$

$$\tilde{p} = \sqrt{s \tilde{a}}$$

Параметры солитона зависят не только от скорости, но и от частотного сдвига

A.Sergeev, L.Yurovskiy, N.Ginzburg, I.Zotova, A. Rostuntsova, N.Ryskin... Chaos (2022)

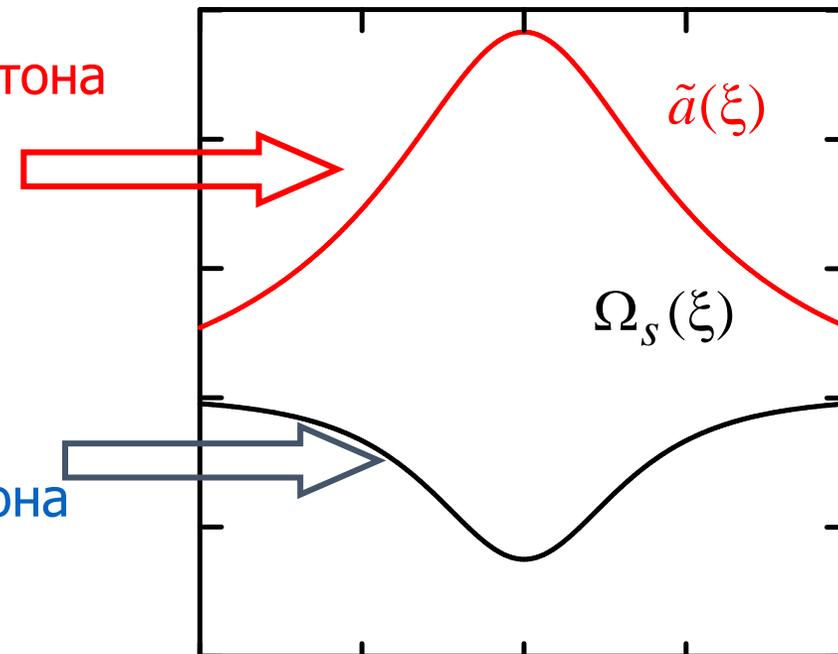
САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Двухпараметрическое солитонное решение

$$\tilde{a}(\xi, U, \Omega) = \sqrt{\frac{4}{s^3} \left(\frac{1 - (\Omega/2s)^2}{\Omega/2s + \cosh \left[\frac{2}{s} \xi \sqrt{1 - (\Omega/2s)^2} \right]} \right)}$$

$$\Omega_s(\xi, U, \Omega) = \frac{\Omega(s^2 - U)}{s^2} + \frac{U}{s} \frac{1 + (\Omega/2s) \sinh \left[\frac{2}{s} \xi \sqrt{1 - (\Omega/2s)^2} \right]}{(\Omega/2s) + \sinh \left[\frac{2}{s} \xi \sqrt{1 - (\Omega/2s)^2} \right]}$$

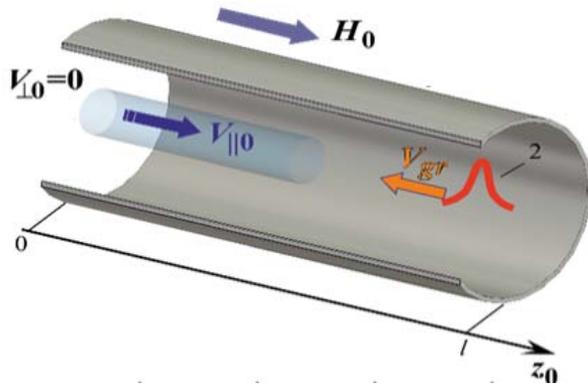
Профиль солитона



A.Sergeev, L.Yurovskiy, N.Ginzburg, I.Zotova, A. Rostuntsova, N.Ryskin... Chaos (2022)

САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Формирование SIT-солитонов при взаимодействии со встречной волной



Скорость солитона может быть направлена против невозмущенной групповой скорости волны

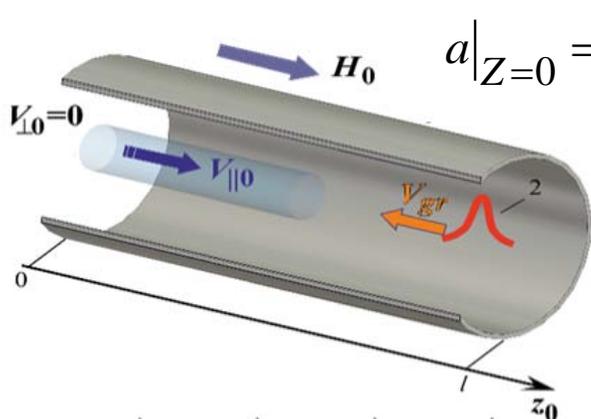
$$U \rightarrow -U$$

$$\xi = Z + U\tau \quad U > -1$$

$$s = \sqrt{1+U}$$

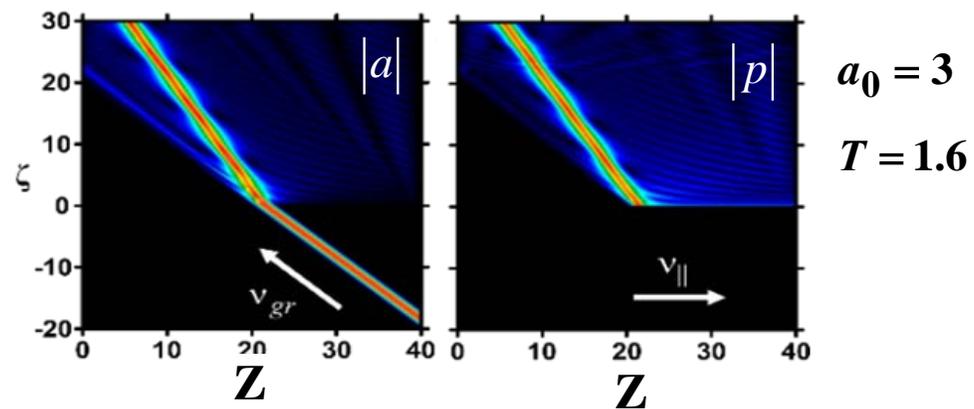
САМОИДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ SIT-СОЛИТОНОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Формирование SIT-солитонов при взаимодействии со встречной волной



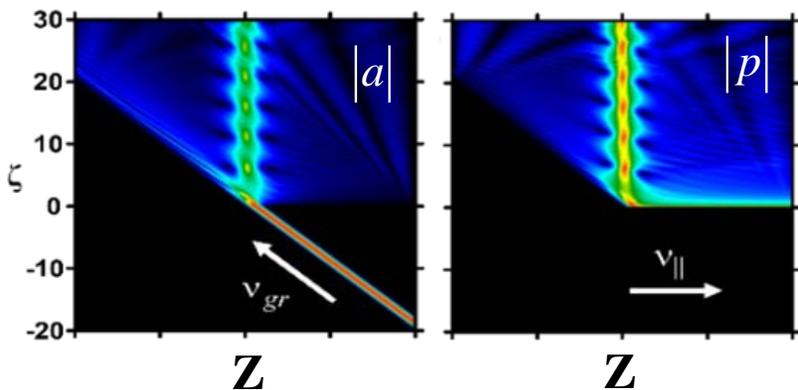
$$a|_{Z=0} = a_0 \sin^2(\pi(\tau + T_d)/T) e^{-i\delta\tau}$$

Самоиндуцированная прозрачность



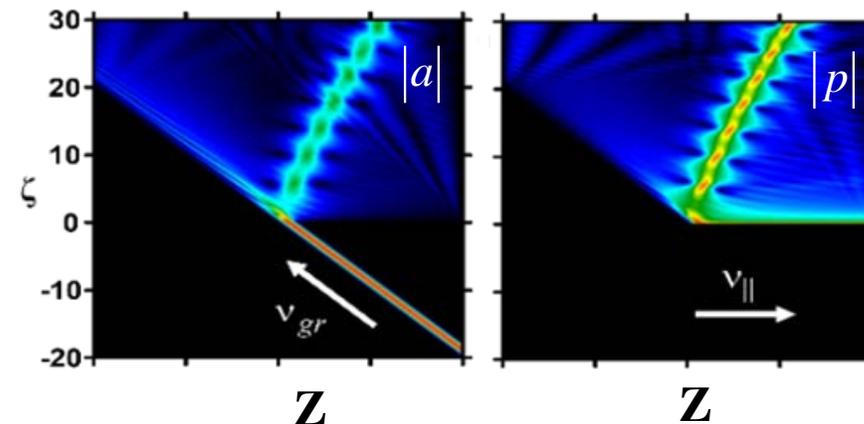
Остановка солитона

$a_0 = 3$
 $T = 1.22$

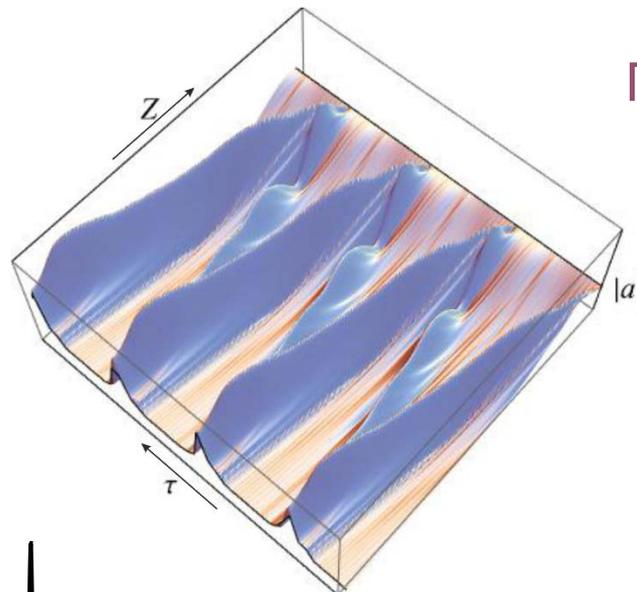
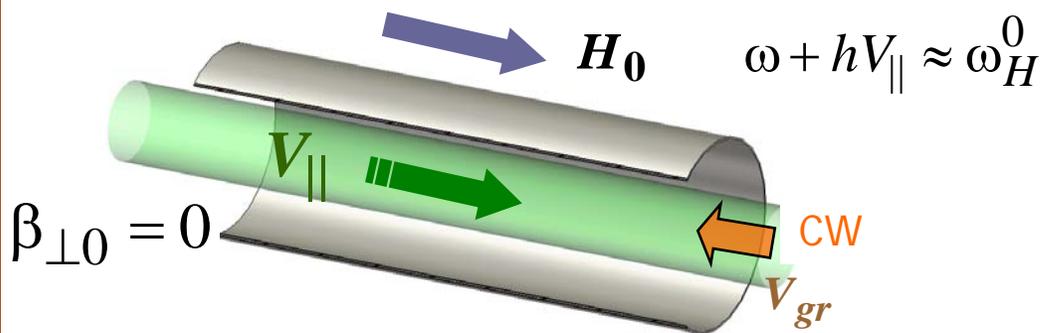


«Увлечённый» солитон

$a_0 = 3$
 $T = 1.15$



ФОРМИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ SIT-СОЛИТОНОВ ПРИ ВСТРЕЧНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ И ПУЧКА

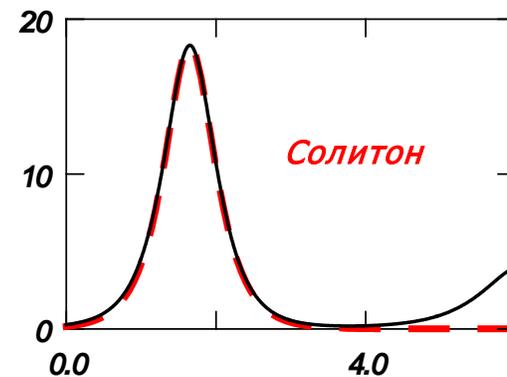
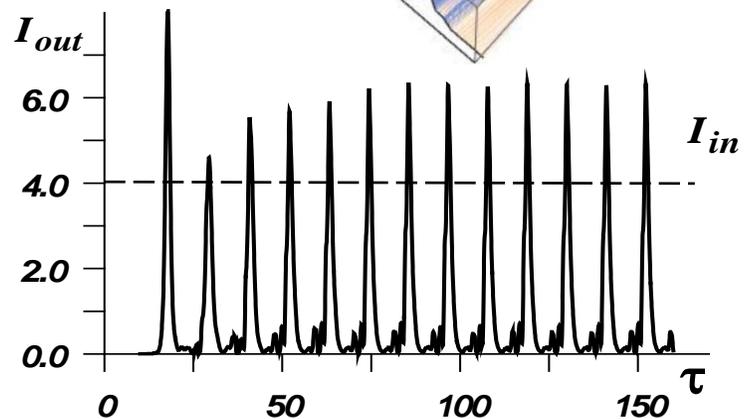


Периодическая модуляция входного сигнала

$$\frac{\partial a}{\partial Z} + \frac{\partial a}{\partial \tau} = p$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + ip(\delta + |p|^2) = a$$

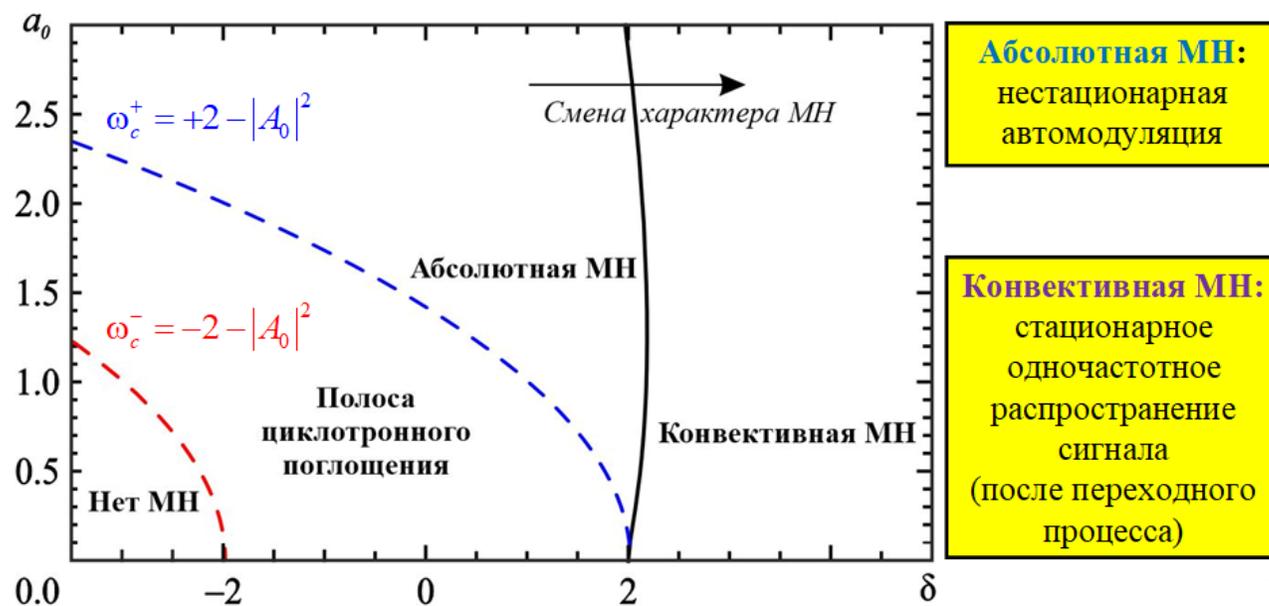
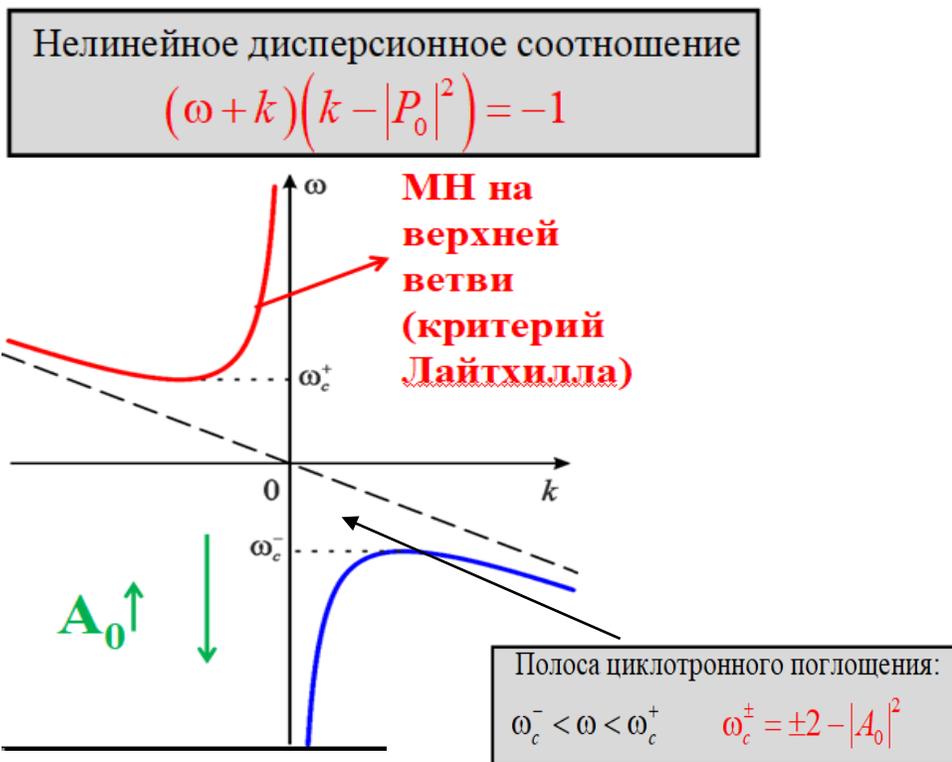
$$p|_{Z=0} = 0 \quad a|_{Z=L} = a_{in}$$



I.Zotova, N.Ginzburg, E.Kocharovskaya, A.Sergeev, Phys. Rev. Lett. (2014)

ФОРМИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ SIT-СОЛИТОНОВ ПРИ ВСТРЕЧНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ И ПУЧКА

Модуляционная неустойчивость – неустойчивость монохроматической волны относительно медленных модуляций на боковых частотах



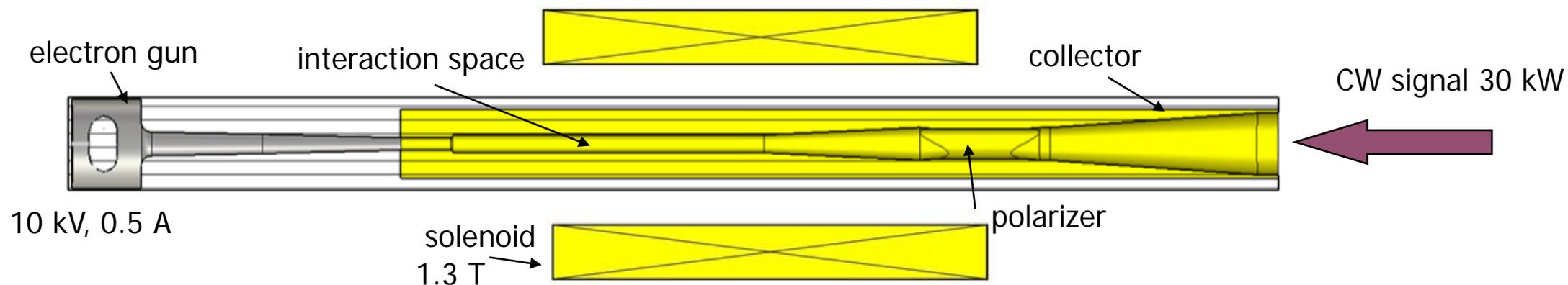
А.Ростунцова, Н.Рыскин Нелинейная школа -2024)

A. Rostuntsova, N.Ryskin, N.Ginzburg, I.Zotova, Phys.Rev E (2022)

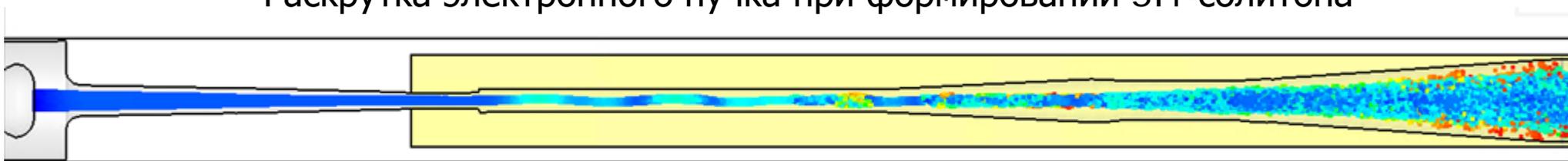
ЦИКЛОТРОННО-РЕЗОНАНСНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА САМОИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

Моделирование циклотронно-резонансного модулятора диапазона 33-36 ГГц

Самсонов С.В.

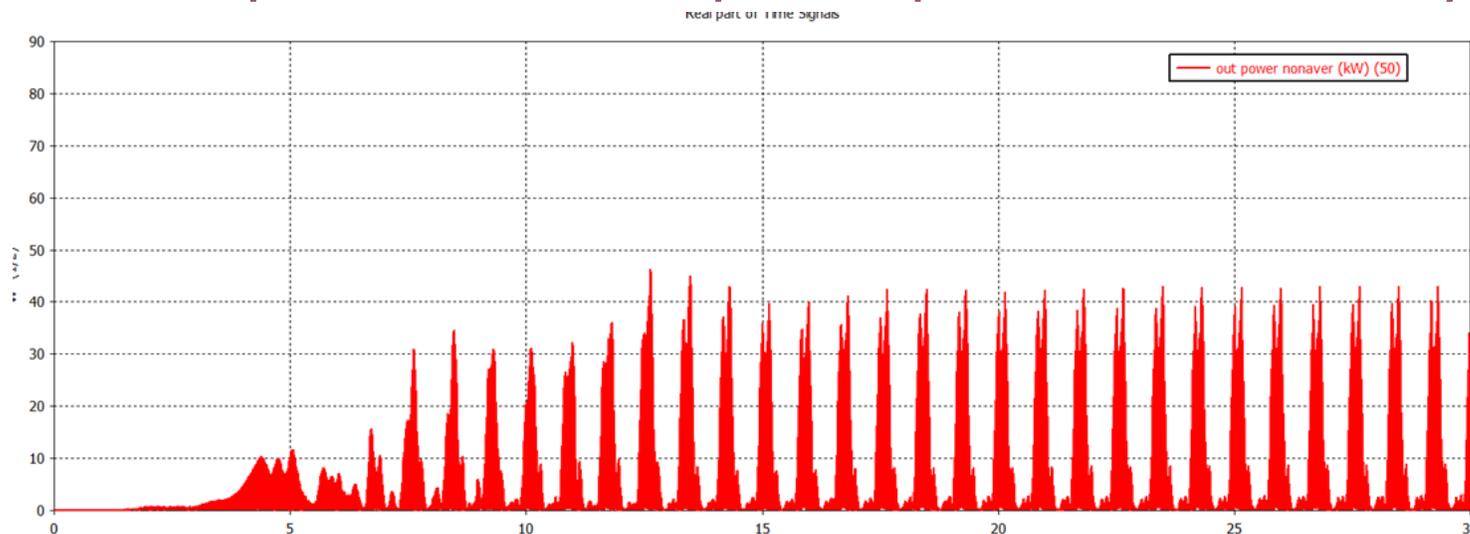


Раскритка электронного пучка при формировании SIT-солитона



ЦИКЛОТРОННО-РЕЗОНАНСНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА САМОИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

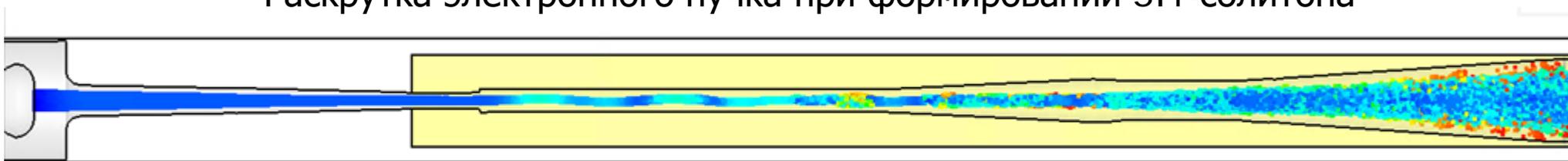
Моделирование циклотронно-резонансного модулятора диапазона 33-36 ГГц



Параметры выходного излучения:

- длительность импульса ~ 0.3 нс
- пиковая мощность $\sim 20-40$ кВт
- период $\sim 1-3$ нс

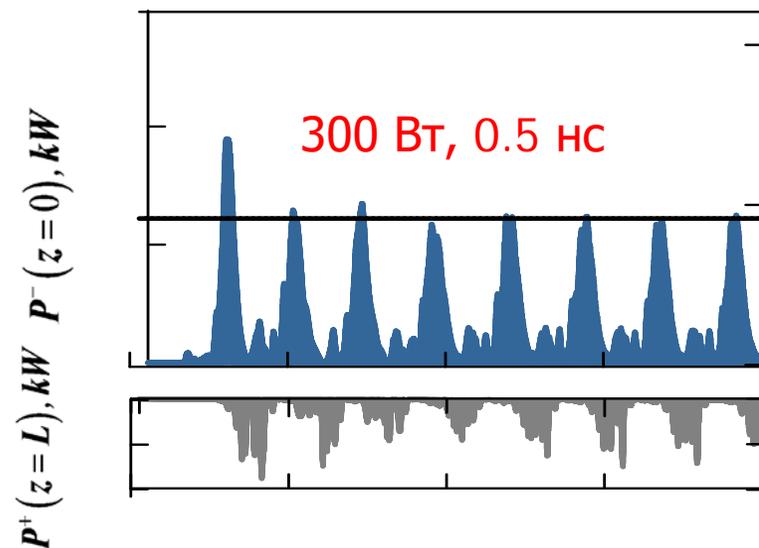
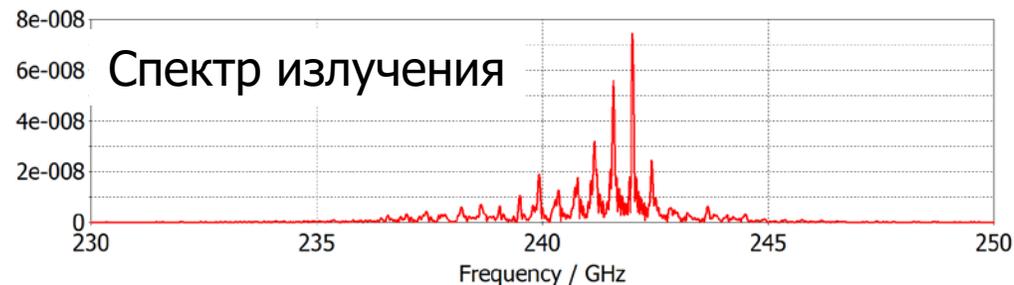
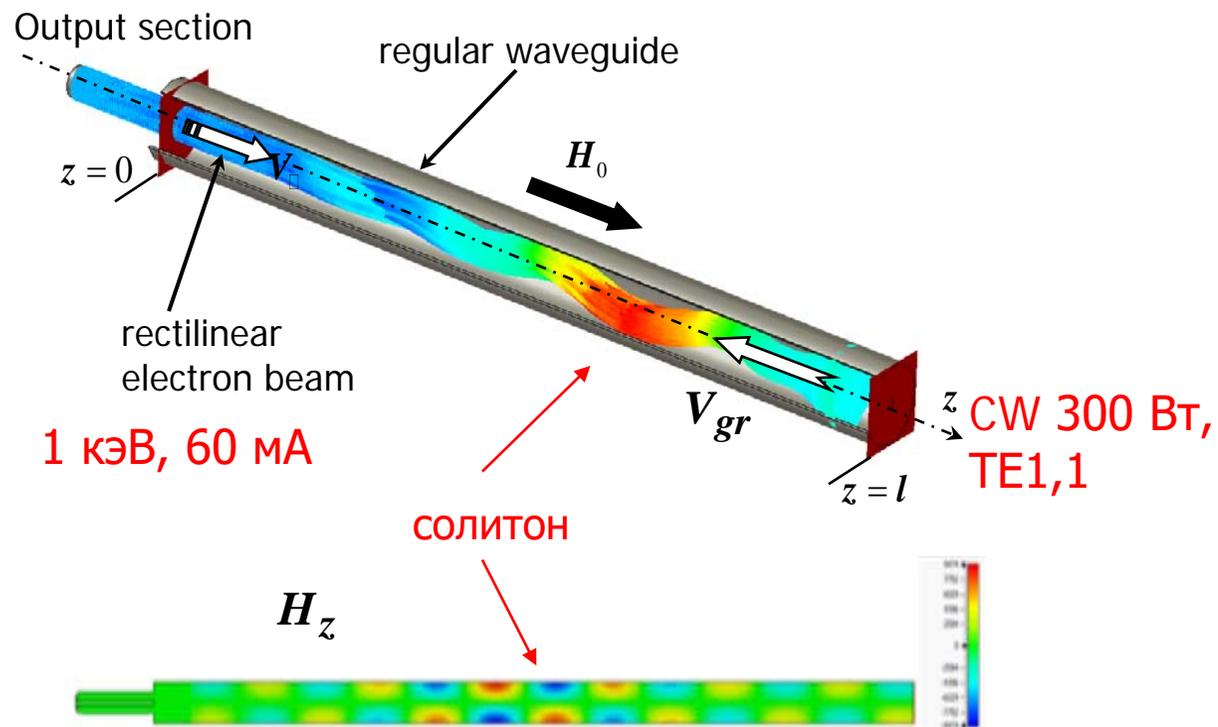
Раскрутка электронного пучка при формировании SIT-солитона



ЦИКЛОТРОННО-РЕЗОНАНСНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА САМОИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

Моделирование циклотронно-резонансного модулятора диапазона 230 ГГц

Заславский В.Ю.



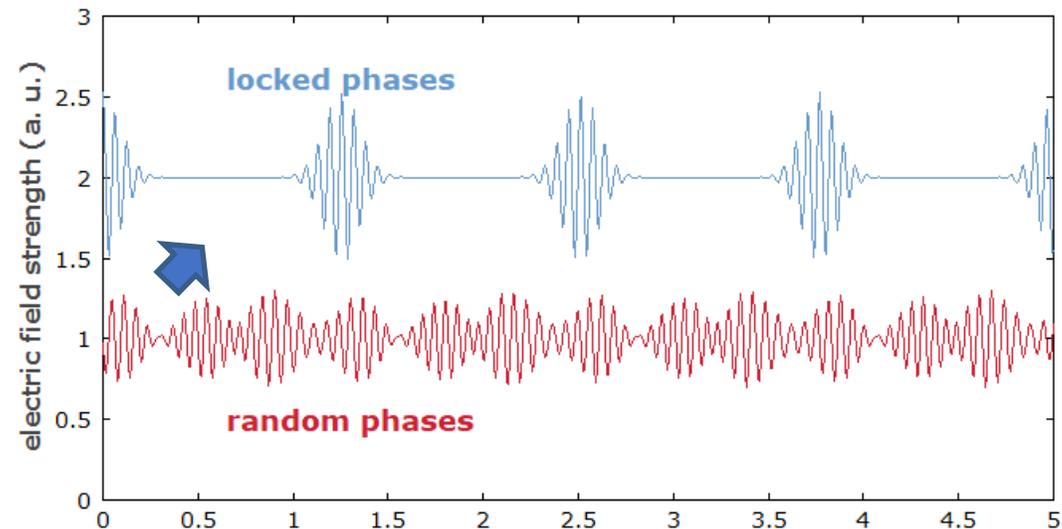
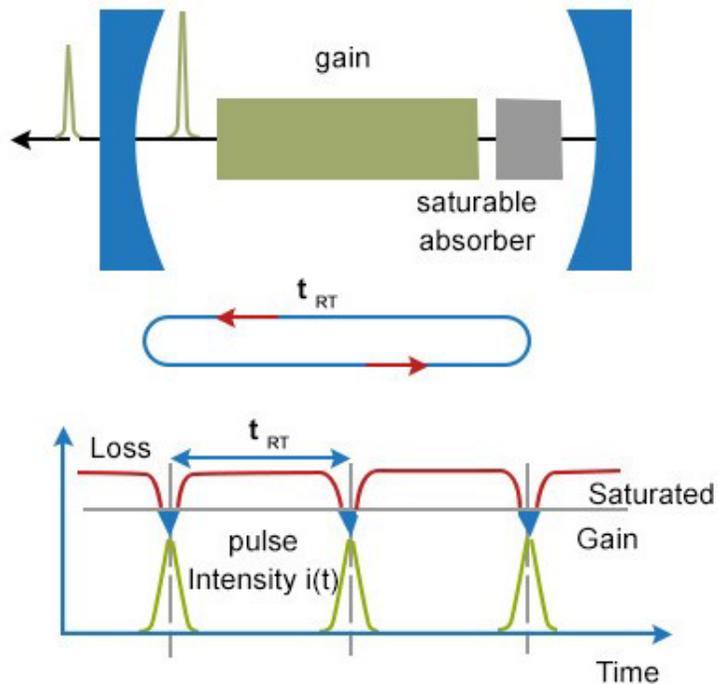
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ. РАЗДЕЛ 1

При взаимодействии излучения с первоначально-прямолинейным электронным пучком в условиях циклотронного резонанса может реализоваться эффект самоиндуцированной прозрачности с формированием SIT-солитонов, характеристики которых (амплитуда и длительность) соответствуют аналитическим двухпараметрическим солитонным решениям.

При встречном резонансном взаимодействии монохроматической электромагнитной волны с прямолинейным замагниченным электронным пучком в определенных условиях происходит ее трансформация в периодическую последовательность коротких импульсов (SIT-солитонов), что может быть использовано для создания модуляторов стационарных сигналов.

ЭФФЕКТ ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

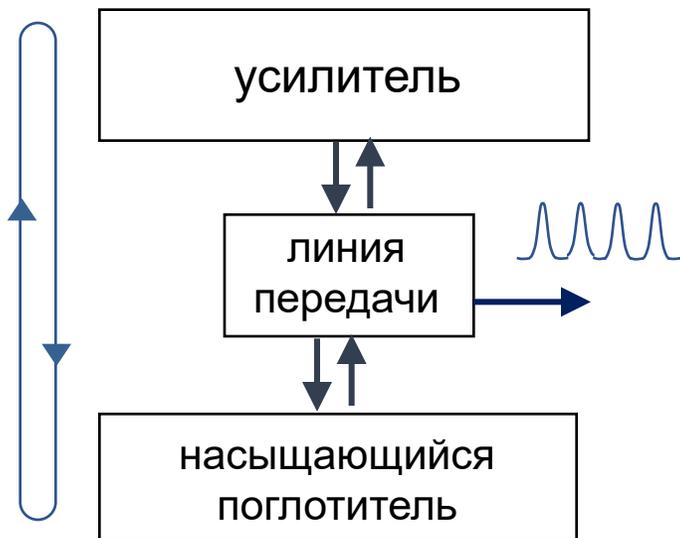
Эффект пассивной синхронизации мод в лазерах с насыщающимися поглотителями



Формирование
ДИССИПАТИВНЫХ СОЛИТОНОВ

N.Rozanov...,
E.Vanin...,
A.Sergeev...

ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД



Универсальная система уравнений электронно-волнового взаимодействия в высокооборотном резонаторе

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \left(1 + \sigma(|\alpha|^2)\right) \alpha + i\varepsilon \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} = \pi^{-1} \int_0^L \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0 dZ$$

Поглотитель

$$\sigma(\alpha) = \frac{\sigma_0}{1 + \nu|\alpha|^2}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + s \frac{\partial}{\partial \xi}\right)^2 \theta = \text{Re}(\alpha e^{i\theta}),$$

$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi], \quad \left(\frac{\partial}{\partial Z} + s \frac{\partial}{\partial \xi}\right) \theta|_{Z=0} = \delta.$$

α - амплитуда поля
 θ - фаза электронов в синхронной волне

δ - начальная расстройка

$$\xi = t - z/V_{gr}$$

τ - «медленное» время
прохода возмущения по цепи
обратной связи

$s = \beta_{||}^{-1} - \beta_{gr}^{-1}$ - параметр «проскальзывания»
(отстройка от группового синхронизма)

N.Ginzburg, G.Denisov, I.Zotova, M.Vilkov, A.Sergeev Phys.Plasmas 2016

ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Режим группового синхронизма

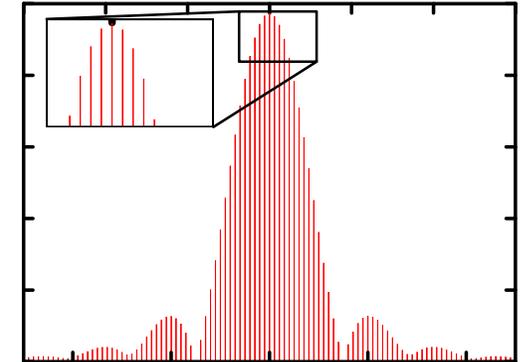
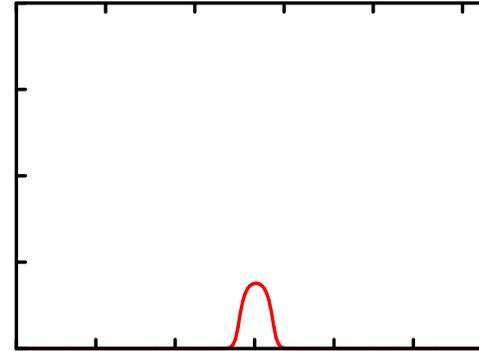
$$s = \beta_{||}^{-1} - \beta_{gr}^{-1} = 0$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \left(1 + \sigma(|\alpha|^2)\right) \alpha + i\varepsilon \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} = \chi(\alpha) \alpha$$

Dissipative optical solitons

N. Rozanov, Phys. Usp., 43, 421, 2000.

E. Vanin, et al Phys. Rev. A, 49, 2806, 1994.



Идеальный поглотитель $\sigma(\alpha) = \frac{\sigma_0}{1 + \nu|\alpha|^2}$

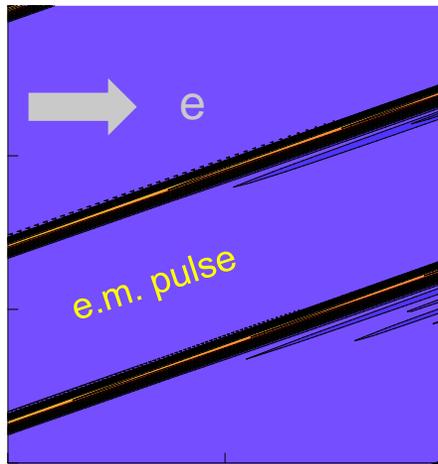
N. Ginzburg, E.Kocharovskaya, M.Vilkov Phys. Plasmas (2018)

ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

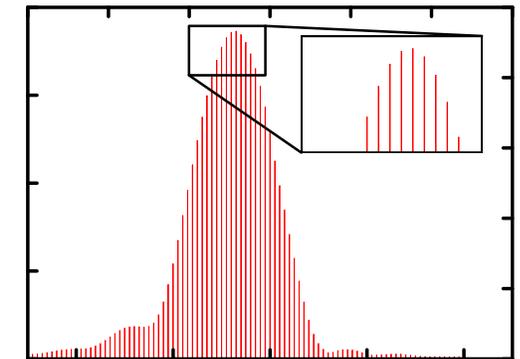
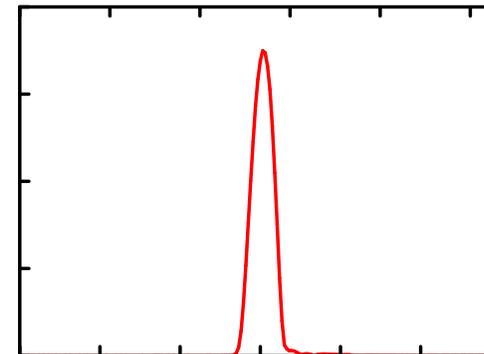
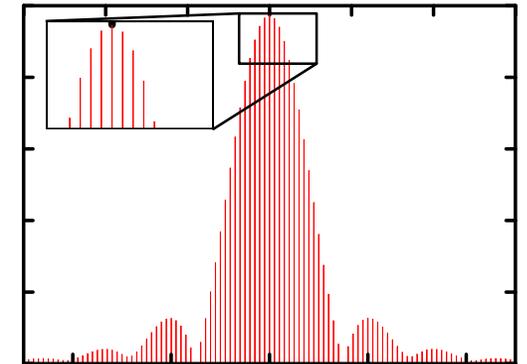
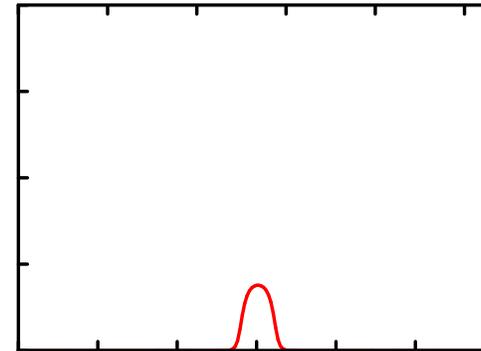
Режим «проскальзывания»

$$s = \beta_{\parallel}^{-1} - \beta_{gr}^{-1} \neq 0$$

Э.м. импульс аккумулирует энергию
различных электронных фракций



Повышение
пиковой
мощности



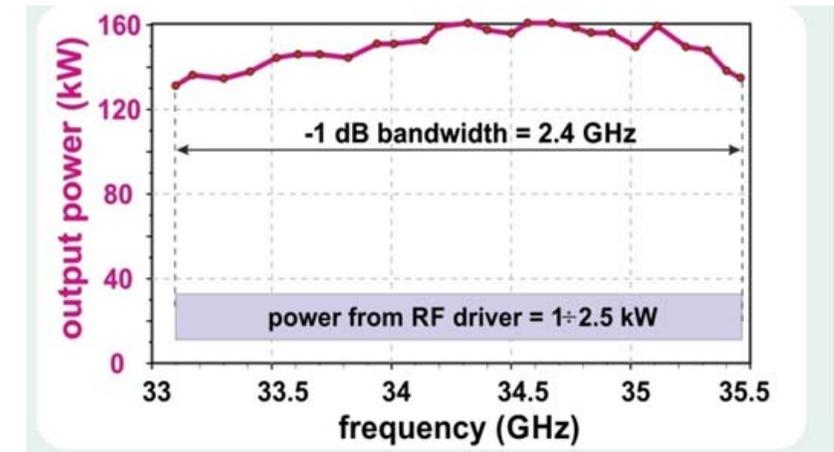
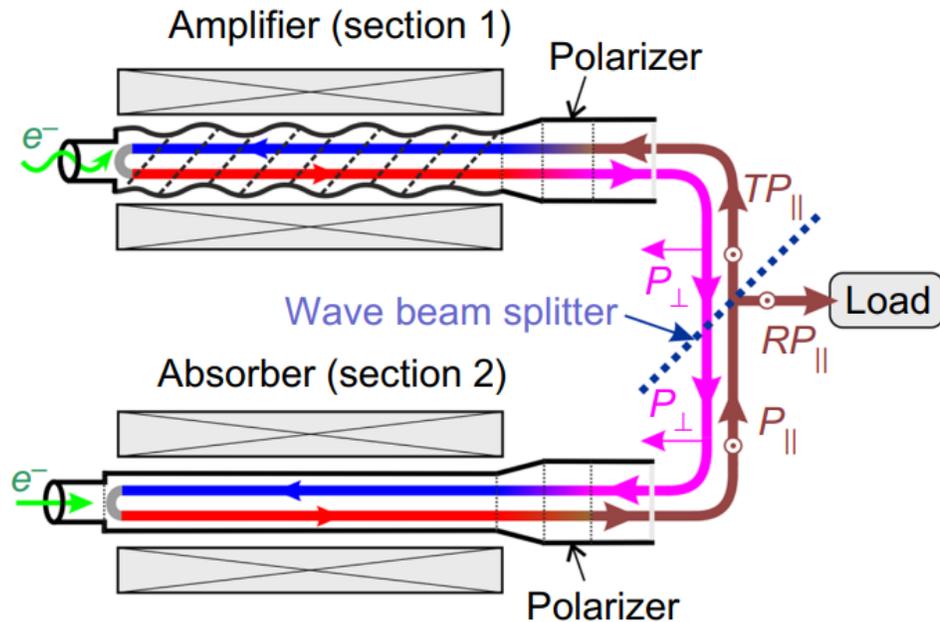
N. Ginzburg, E.Kocharovskaya, M.Vilkov Phys. Plasmas (2018)

ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Электронный генератор мм-диапазона с пассивной синхронизацией мод

Рабочая частота ~ 32 ГГц

Широкополосная винтовая гиро-ЛБВ
(2-я циклотронная гармоника)

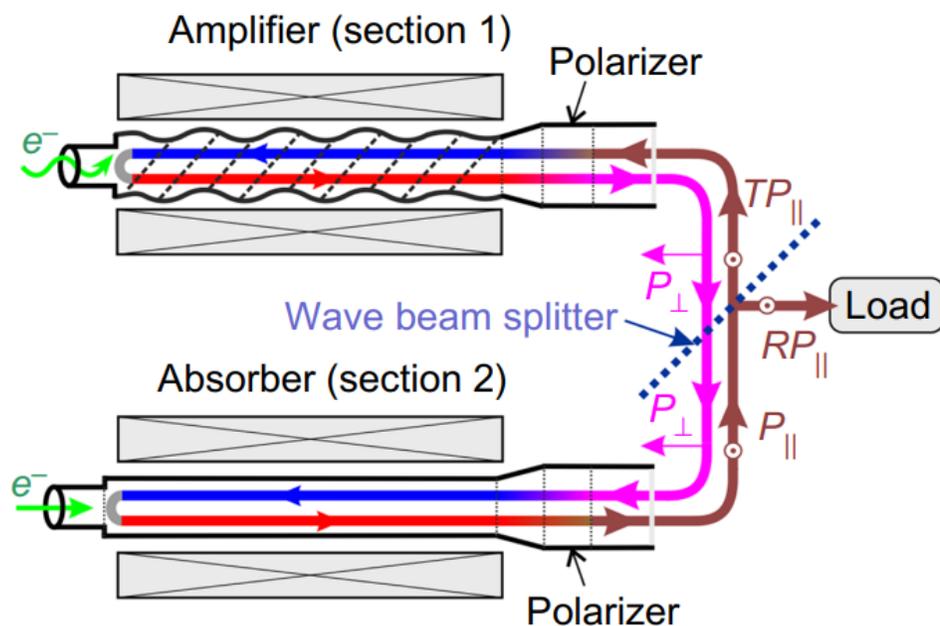


N. Ginzburg, S.Samsonov, G.Denisov, M.Vilkov, et al... Phys. Rev. Appl. (2020),(2021)

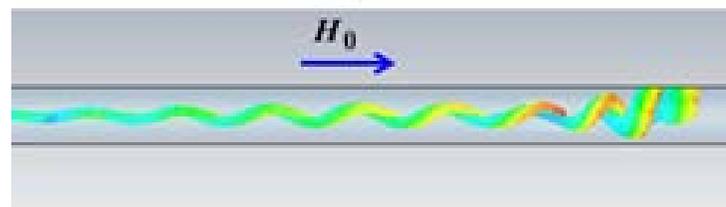
ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Электронный генератор мм-диапазона с пассивной синхронизацией мод

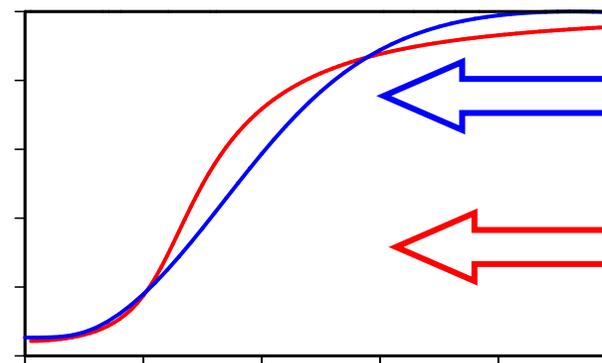
Рабочая частота ~ 32 ГГц



Циклотронно-резонансный поглотитель (1-я циклотронная гармоника)



$$\omega_H = \frac{eH_0}{mc\gamma}$$



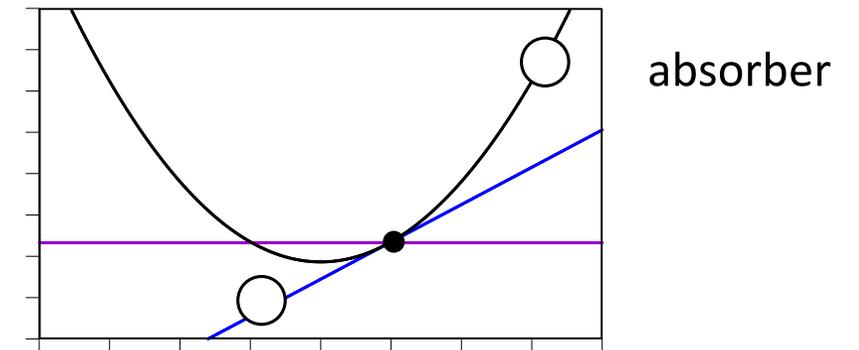
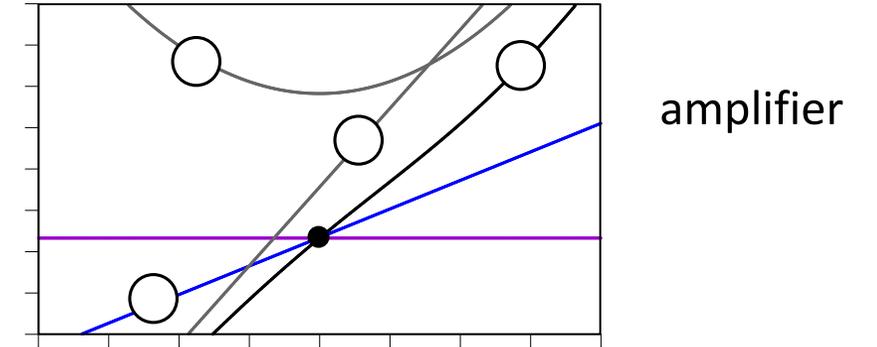
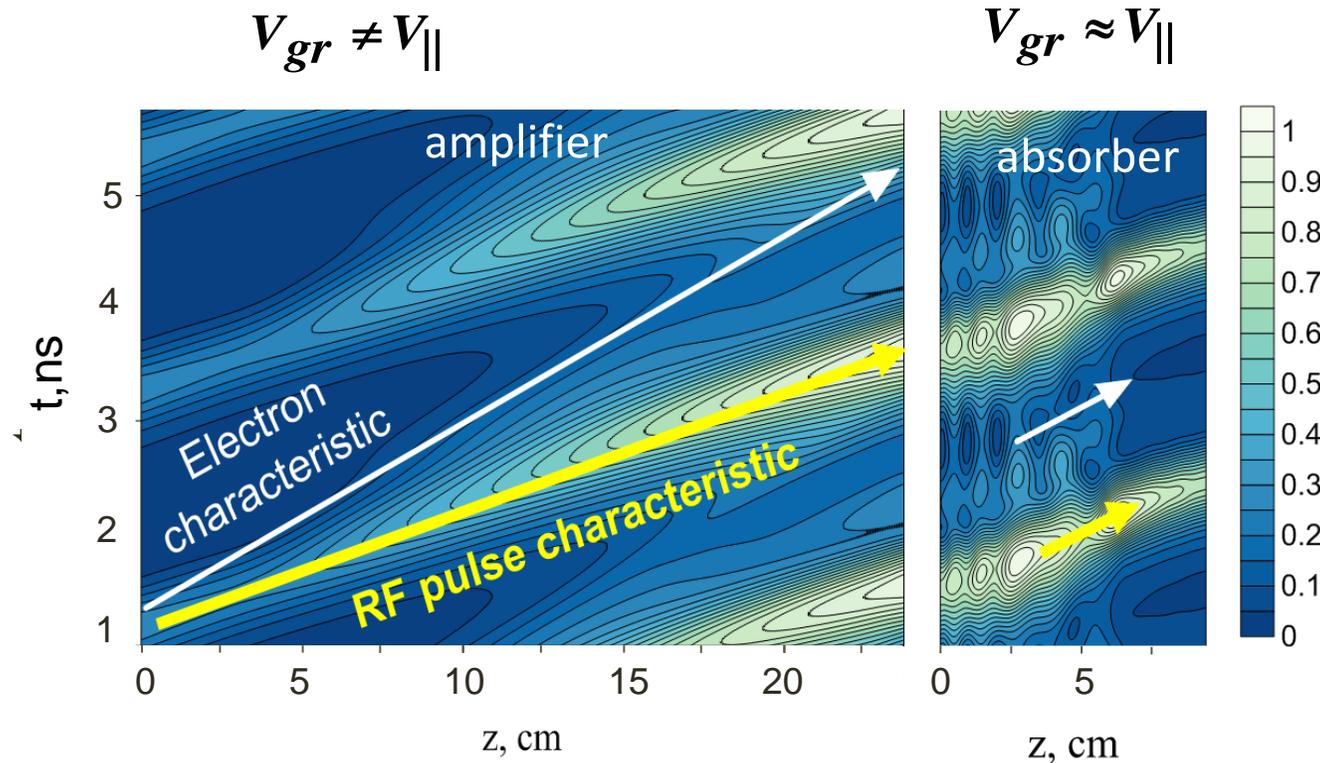
Циклотронный поглотитель

Идеальный поглотитель

N. Ginzburg, S.Samsonov, G.Denisov, M.Vilkov, et al... Phys. Rev. Appl. (2020),(2021)

ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Результаты моделирования



N. Ginzburg, S.Samsonov, G.Denisov, M.Vilkov, et al... Phys. Rev. Appl. (2020),(2021)

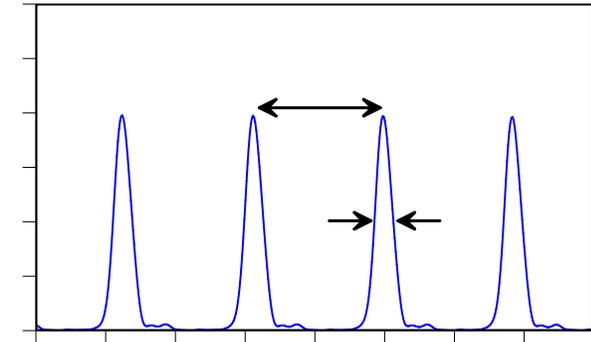
ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Результаты моделирования

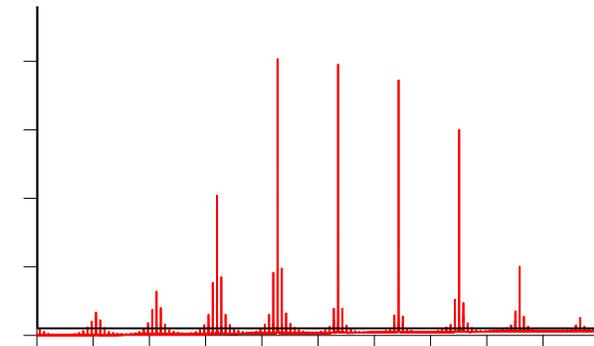
Рабочая частота ~ 32 ГГц

	Amplifier	Absorber
Electron energy	50 keV	40 keV
Electron current	6.7 A	1 A
Pitch factor	~1	0
Interaction length	244 mm	91 mm
Waveguide radius	3.57 mm	2.96 mm
Corrugation period	11.6 mm	—
Corrugation amplitude	0.45 mm	—
Operating mode	TE _{2,1} /TE _{1,1}	TE _{1,1}
Magnetic field	~0.65 T	~1.1 T

Огибающая импульсов



Спектр

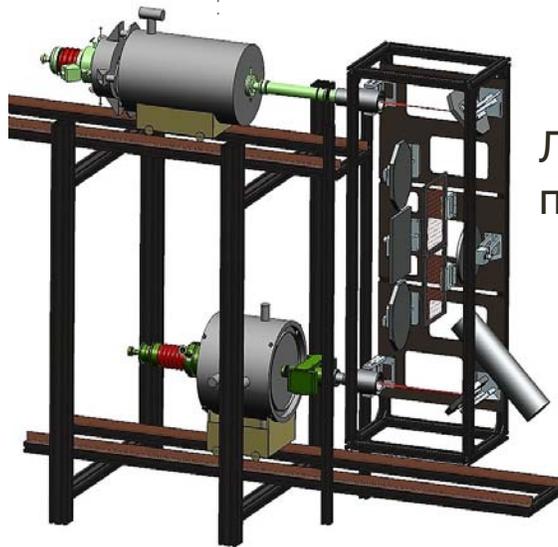


N. Ginzburg, S.Samsonov, G.Denisov, M.Vilkov, et al... Phys. Rev. Appl. (2020),(2021)

ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

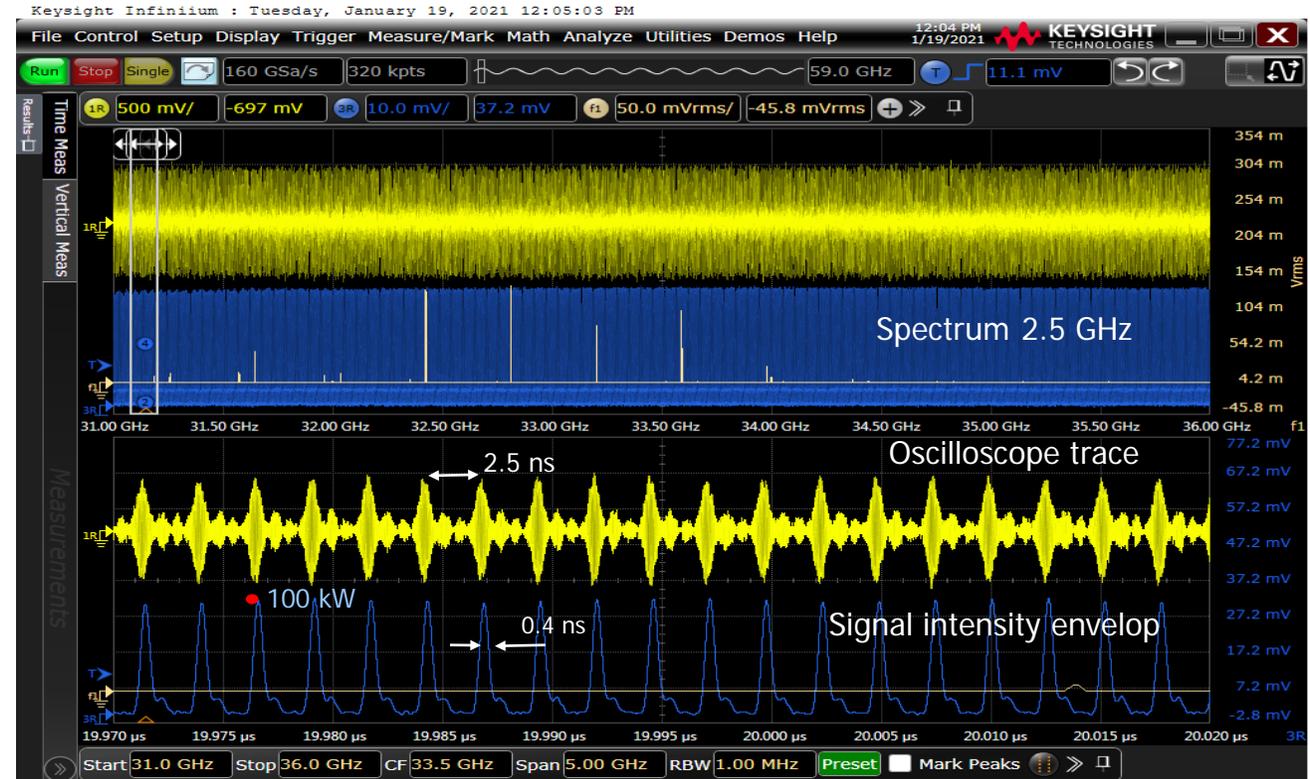
Результаты экспериментов

Винтовая гиро-ЛБВ 32 ГГц/50 кВ/ 7 А



Линия
передачи

Циклотронно-резонансный
поглотитель 32 ГГц/40 кВ/ 1 А



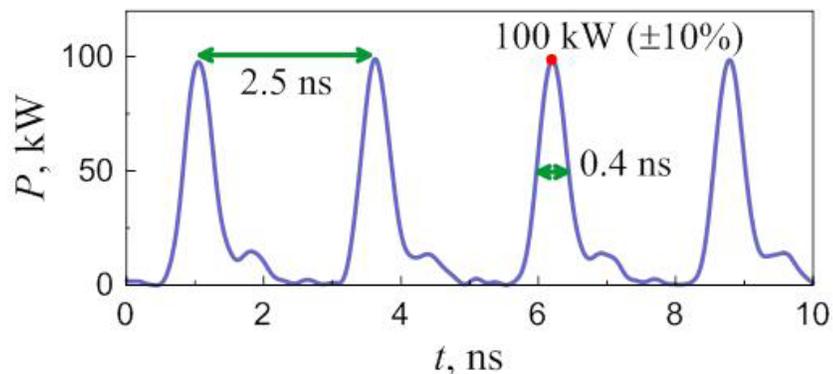
Периодическая генерация **0.4 нс/100 кВт** импульсов с высокой фазовой корреляцией. Частота повторения **400 МГц**.

N. Ginzburg, S.Samsonov, G.Denisov, M.Vilkov, et al... Phys. Rev. Appl. (2020),(2021)

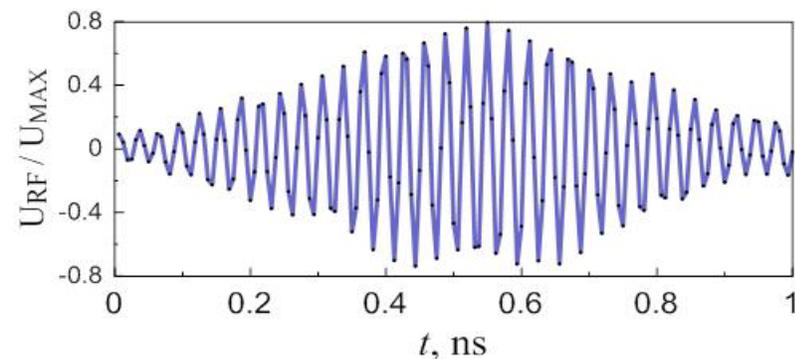
ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Результаты экспериментов

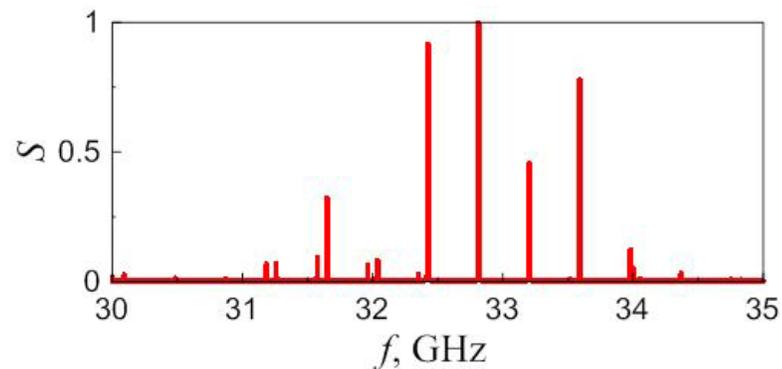
Огибающая импульсов



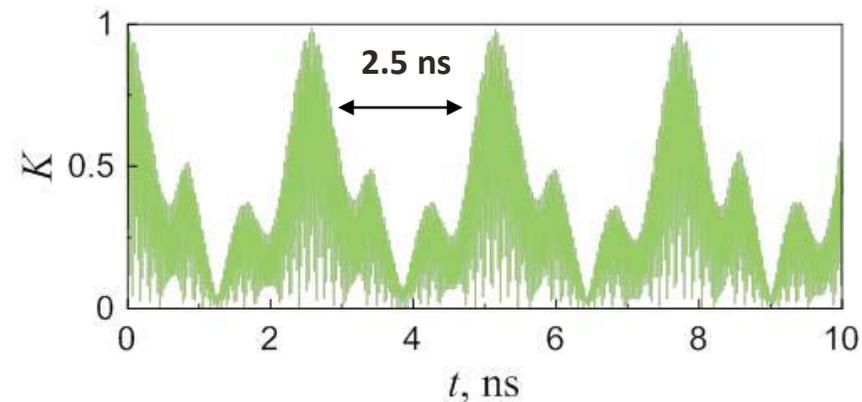
Профиль импульса



Спектр



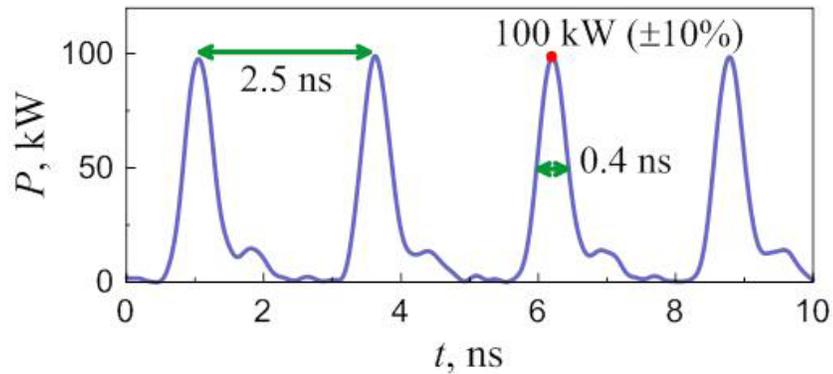
Автокорреляционная функция



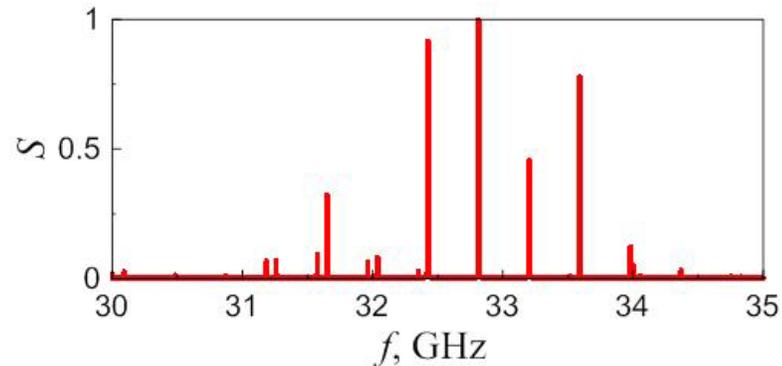
ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Результаты экспериментов

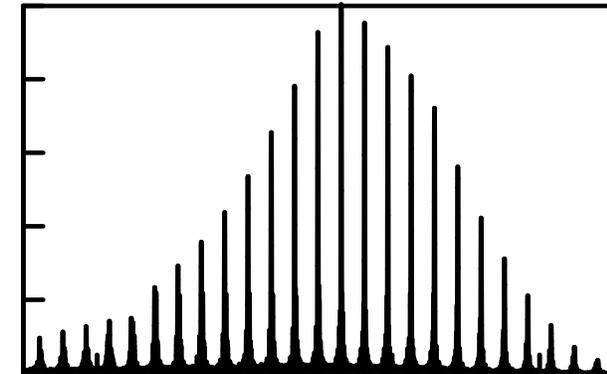
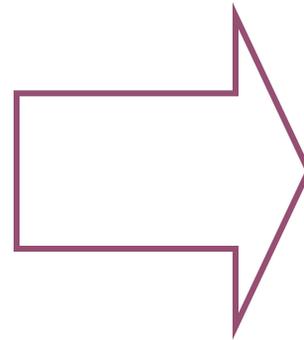
Огибающая импульсов



Спектр



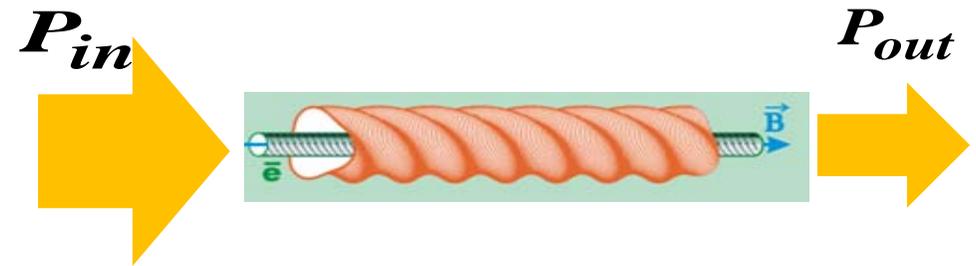
Возможность существенного
обогащения спектра в
жестком режиме генерации



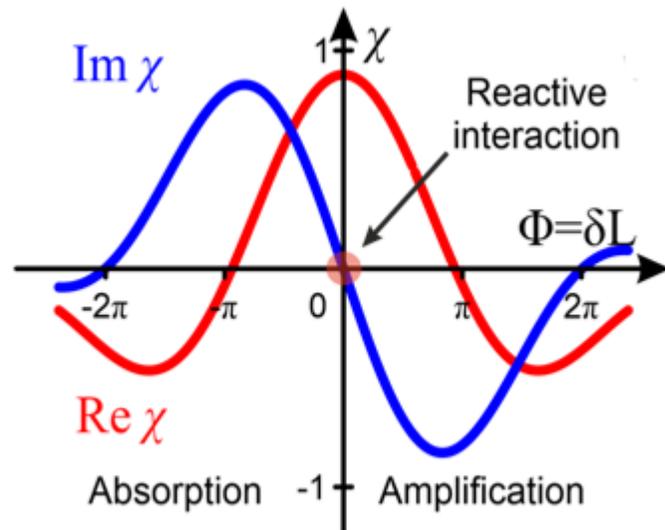
ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Возможность существенного повышения частоты с использованием
компфнеровского поглотителя

Преимущество: работа на гармонике гирочастоты



Электронная восприимчивость $\chi = \chi' - i\chi''$ vs.
расстройка синхронизма



Активная (усиливающая) среда

$$\text{Im } \chi < 0$$

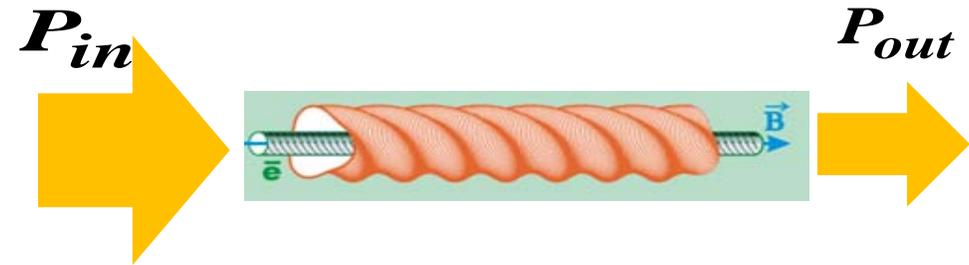
Пассивная (поглощающая) среда
Kompfner dip

$$\text{Im } \chi > 0$$

ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

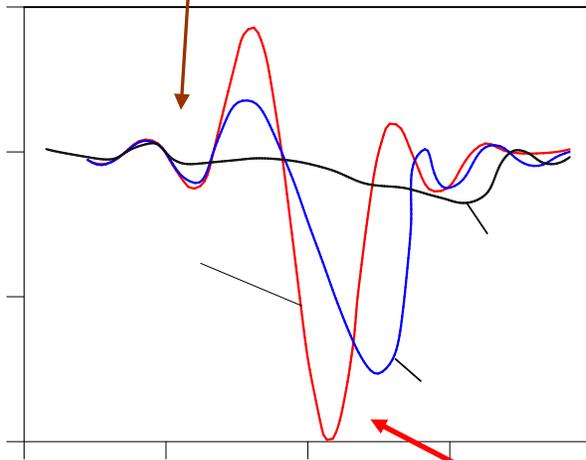
Возможность существенного повышения частоты с использованием
компфнеровского поглотителя

Преимущество: работа на гармонике гирочастоты



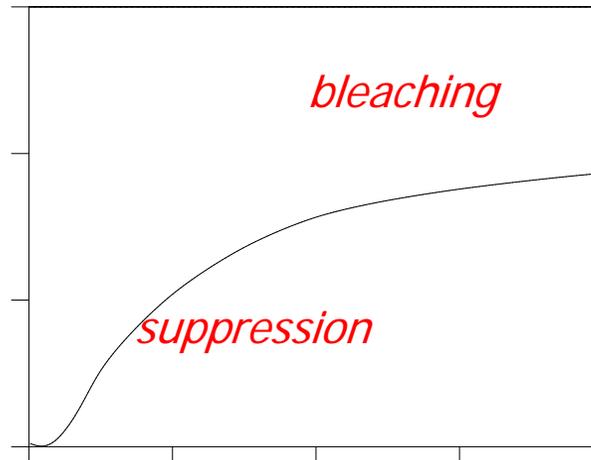
f=95 ГГц

amplification

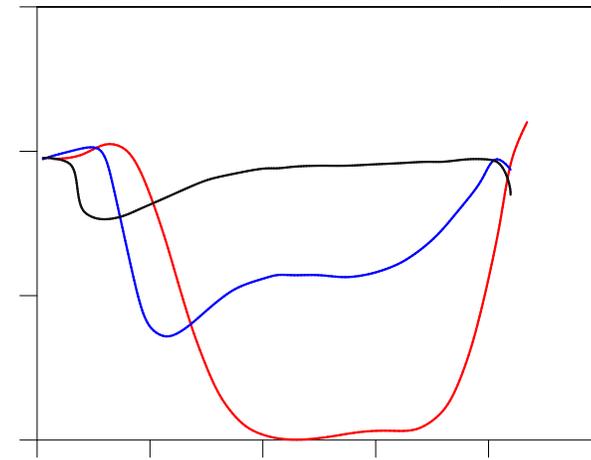


Kompfner dip

bleaching



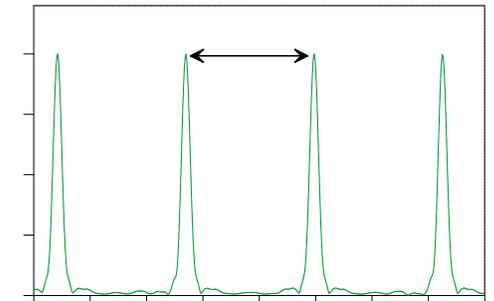
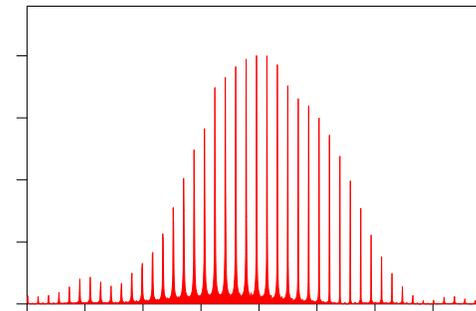
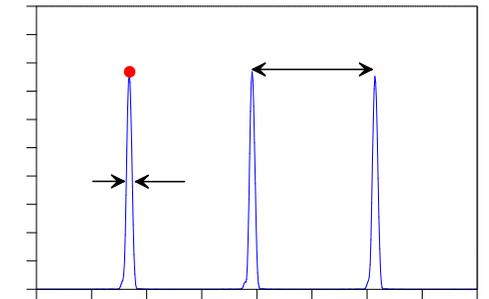
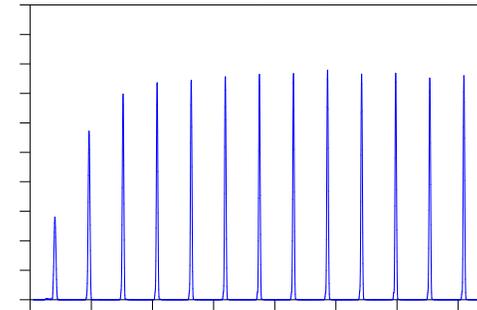
suppression



ДВУХ-СЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Моделирование генератора диапазона 95 ГГц с компфнеровским поглотителем

	Amplifier	Absorber
Accelerator voltage	68 kV	54 kV
Beam current	10 A	5.8 A
Pitch-factor	1.2	0.5
Guiding magnetic field	1.96 T	1.91 T



M. Vilkov, N. Ginzburg, I. Zotova, S. Seregeev,
S. Samsonov PIERS Conference 2024

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ. РАЗДЕЛ 2

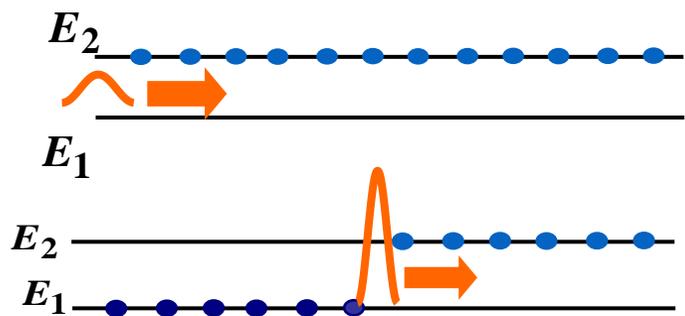
Показана возможность реализации эффекта пассивной синхронизацией мод в системах электронно-волнового взаимодействия. На основе схожести физических моделей и описывающих уравнений (в некоторых приближениях) проведена аналогия с формированием оптических диссипативных солитонов в лазерах с насыщающимися поглотителями. В то же время выявлена определенная специфика электронных систем, позволяющая определить наиболее оптимальные условия экспериментальной реализации импульсных СВЧ генераторов.

Экспериментально реализован генератор 8-ми миллиметрового диапазона с пассивной синхронизацией мод в схеме «гирос-ЛБВ + циклотронно-резонансный поглотитель». Получены периодические цуги 100 кВт/0.4 нс импульсов с частотой повторения 0.4 ГГц.

Показана возможность существенного повышения частоты с использованием компфнеровского поглотителя, работающего на второй циклотронной гармонике

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УСИЛЕНИЯ И КОМПРЕССИИ СВЧ ИМПУЛЬСОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКАХ

Оптический аналог: усиление коротких импульсов света в инвертированных двухуровневых средах



$$T_{pulse} \ll T_{1,2}$$

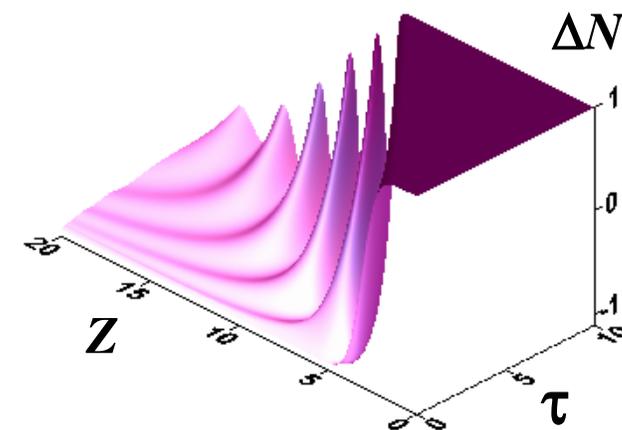
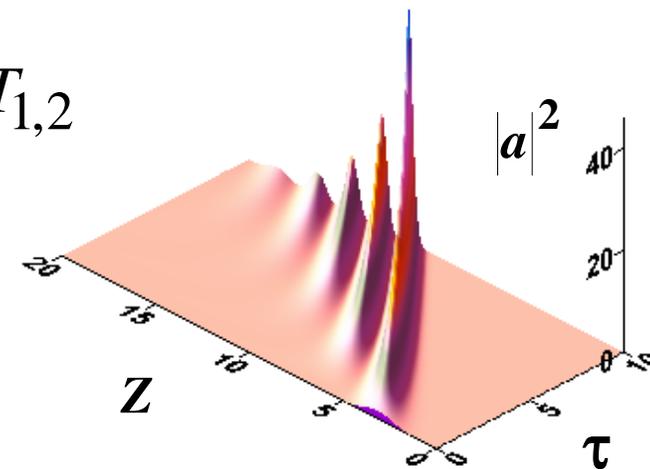
$$\omega \approx \omega_{12}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) a = iP \quad \Gamma_{1,2} = 1/\omega T_{1,2}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial \tau} + \cancel{\Gamma_2} \right) P = -ina$$

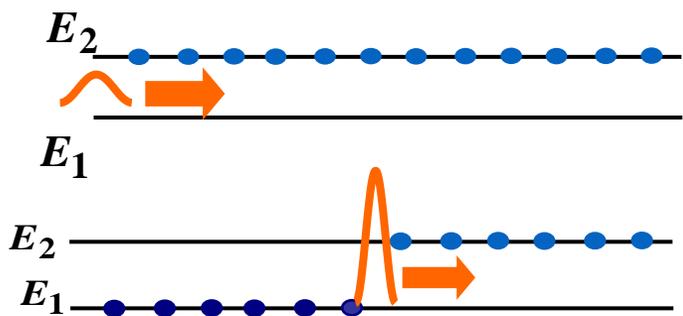
$$\left(\frac{\partial}{\partial \tau} + \cancel{\Gamma_1} \right) n = -\text{Im}(aP^*)$$

$$a|_{Z=0} = a_0(\tau), P|_{Z=0} = 0, n|_{Z=0} = 1$$



АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УСИЛЕНИЯ И КОМПРЕССИИ СВЧ ИМПУЛЬСОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКАХ

Оптический аналог: усиление коротких импульсов света в инвертированных двухуровневых средах



$$T_{pulse} \ll T_{1,2}$$

$$\omega \approx \omega_{12}$$

$$P = \sin \Phi \quad n = \cos \Phi \quad a = \partial \Phi / \partial t$$

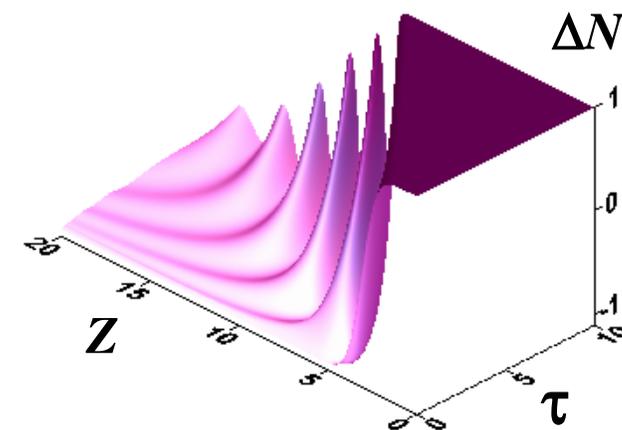
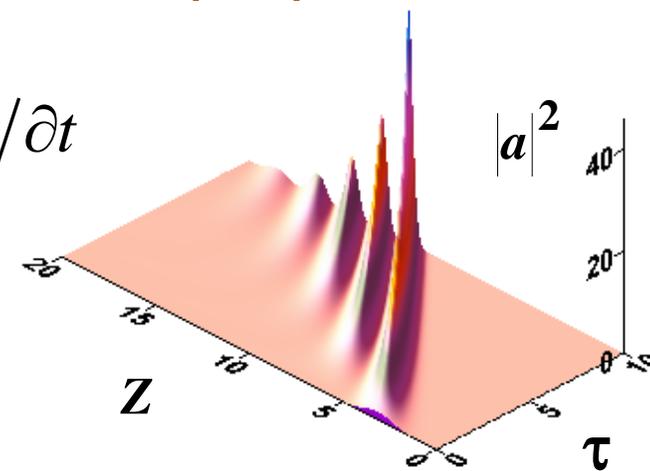
Уравнение Синус-Гордона

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = \sin \Phi$$

Автомодельное решение

$$\Phi = \Phi(\xi), \quad \xi = \tau(Z - \tau)$$

амплитуда линейно растет
длительность линейно сокращается



АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УСИЛЕНИЯ И КОМПРЕССИИ СВЧ ИМПУЛЬСОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКАХ

Автомодельные решения при черенковском взаимодействии

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} \pm \frac{\partial a}{\partial \xi} = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$$

«+» встречное распространение (ЛОВ)
«-» попутное распространение (ЛБВ)

Автомодельная подстановка

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -\text{Re}(ae^{i\theta})$$

$$\eta = \sqrt{\tau} (\xi \mp \tau), \quad a(\xi, \tau) = \tau A(\eta), \quad \theta(\xi, \tau) = \vartheta(\eta).$$

τ, ζ - безразмерные время и координата

$$\frac{d^2 \vartheta}{d\eta^2} = -\text{Re}(Ae^{i\vartheta}),$$

a - амплитуда поля

$$\frac{dA}{d\eta} = -\frac{2}{\eta} \left(A + \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\vartheta} d\vartheta_0 \right).$$

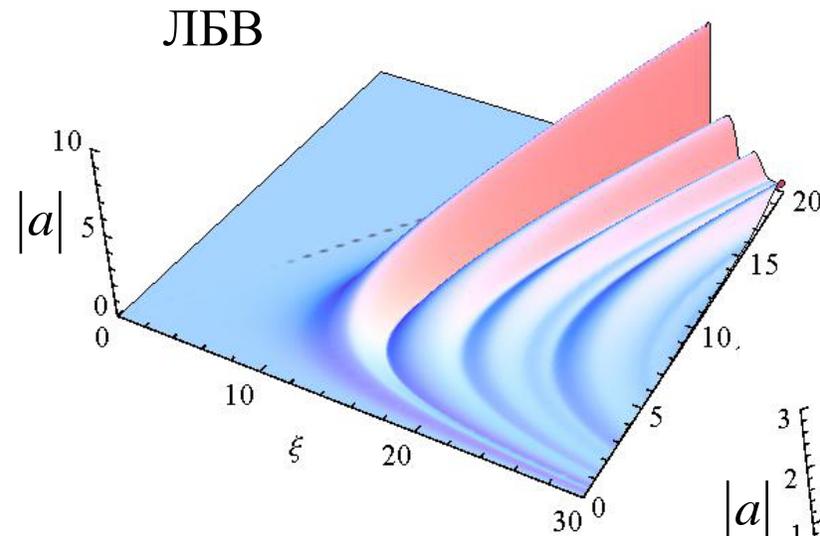
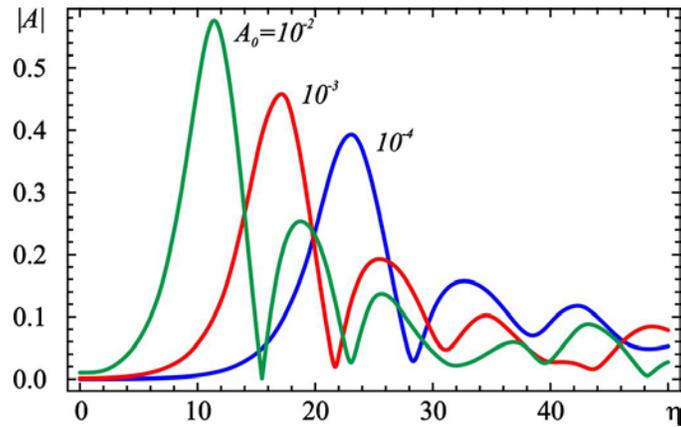
θ - фаза электронов относительно синхронной волны

Система
обыкновенных ДУ

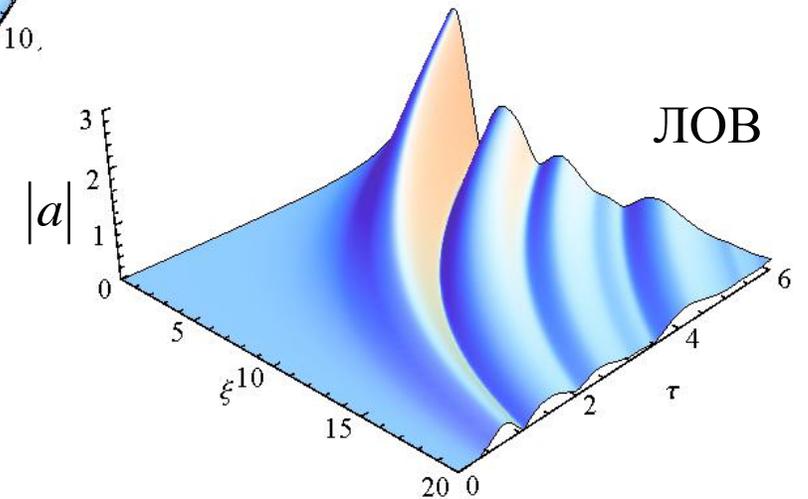
A. Rostuntsova, N. Ryskin, N. Ginzburg Phys. Plasmas (2020)

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УСИЛЕНИЯ И КОМПРЕССИИ СВЧ ИМПУЛЬСОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКАХ

Автомодельные решения при черенковском взаимодействии



При возникновении начального импульса из собственных шумов АР описывают процесс черенковского СИ



Характеристики импульса:

Пиковая амплитуда $A_{\max} \sim \tau$,

Ширина импульса $\Delta \sim 1/\sqrt{\tau}$

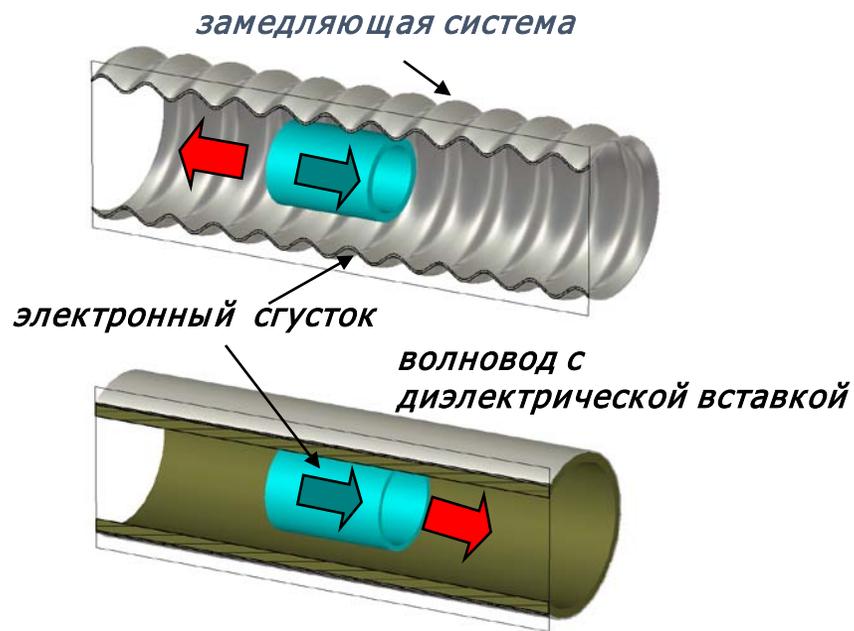
Положение максимума $\xi_{\max} = \xi_0 \pm \tau + \frac{\eta_0}{\sqrt{\tau}}$

A. Rostuntsova, N. Ryskin, N. Ginzburg Phys. Plasmas (2020)

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ

Классический аналог СИ – когерентное импульсное излучение протяженного в масштабе длины волны электронного сгустка

Встречная э.м. волна



Попутная волна

Когерентность излучения обеспечивается за счет:

- развития группировки;
- проскальзывания волны относительно сгустка вследствие разности групповой скорости излучения и поступательной скорости частиц.

$$\lambda \ll l_b \leq l_c$$

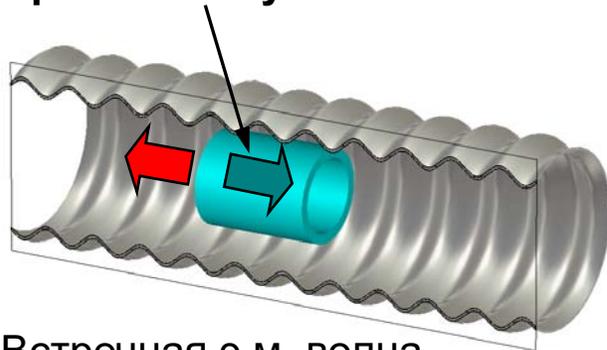
$$l_c = |\operatorname{Im} \Gamma|^{-1} \left(1 \pm V_{\parallel} / V_{gr} \right)$$

- длина когерентности

Взаимодействие со встречной волной наиболее эффективно, т.к. при этом обеспечивается наибольшая длина когерентности (знак «+»)

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВСТРЕЧНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ И ПУЧКА

электронный сгусток

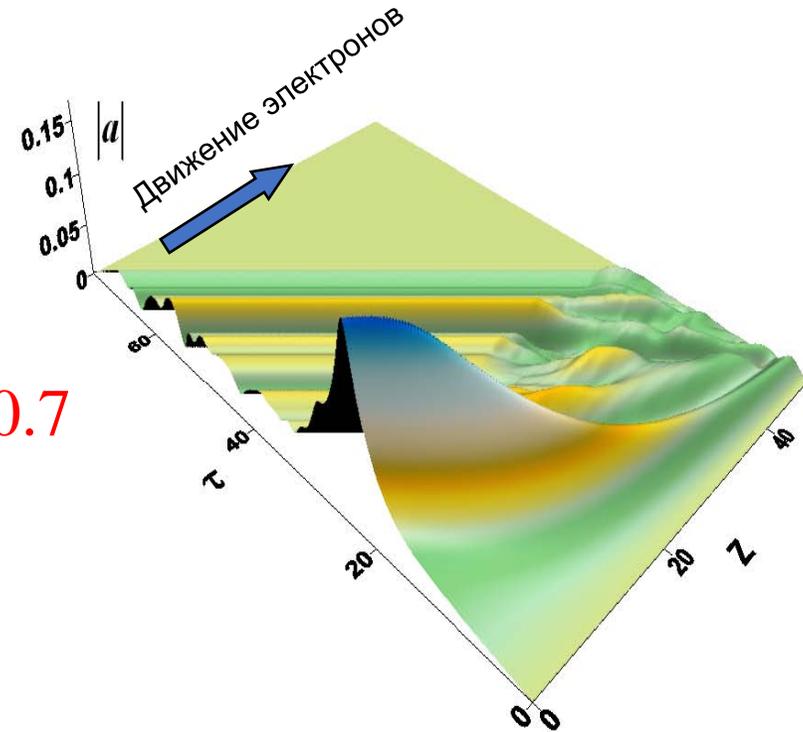


Встречная э.м. волна

Формирование импульса СИ подчиняется автомодельным решениям

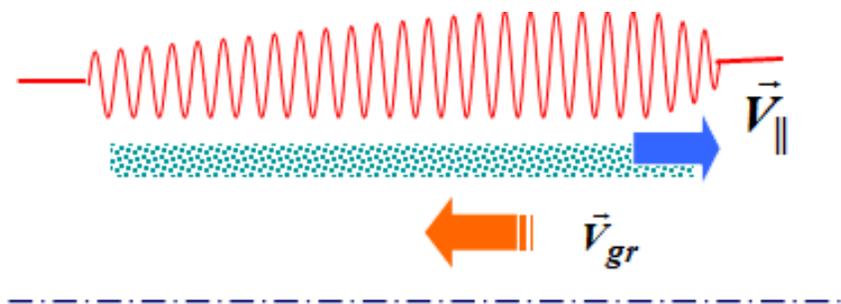
$$K = \frac{P}{P_{beam}} \approx 0.7$$

В процессе «проскальзывания» относительно электронов формирующийся импульс аккумулирует энергию различных фракций



ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВСТРЕЧНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ И ПУЧКА

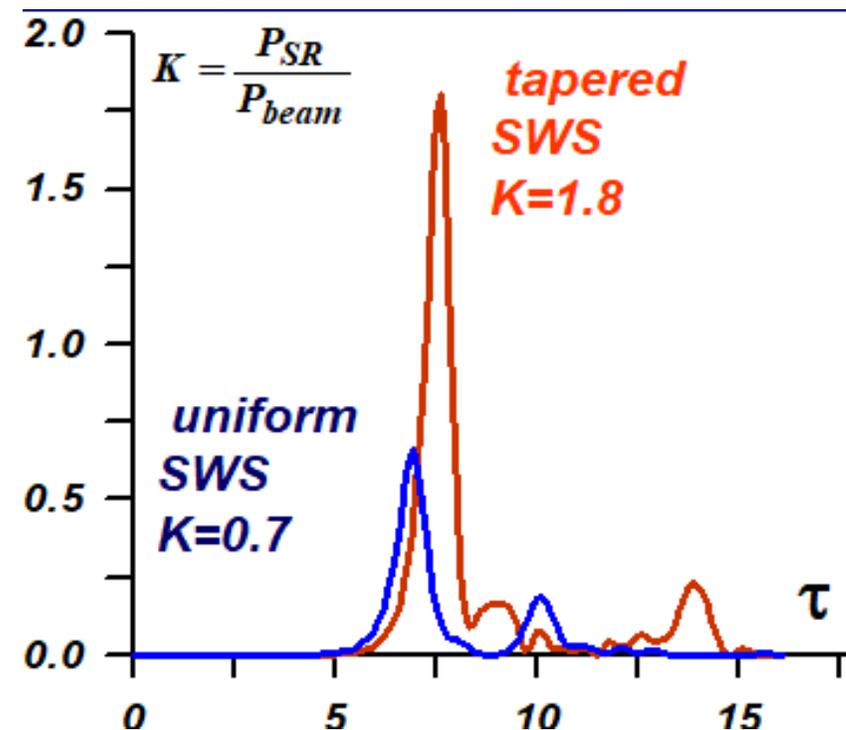
Повышение мощности СИ в неоднородной замедляющей системе



Пиковая мощность СИ
может превышать
мощность пучка

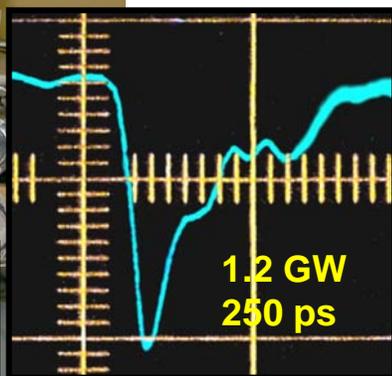
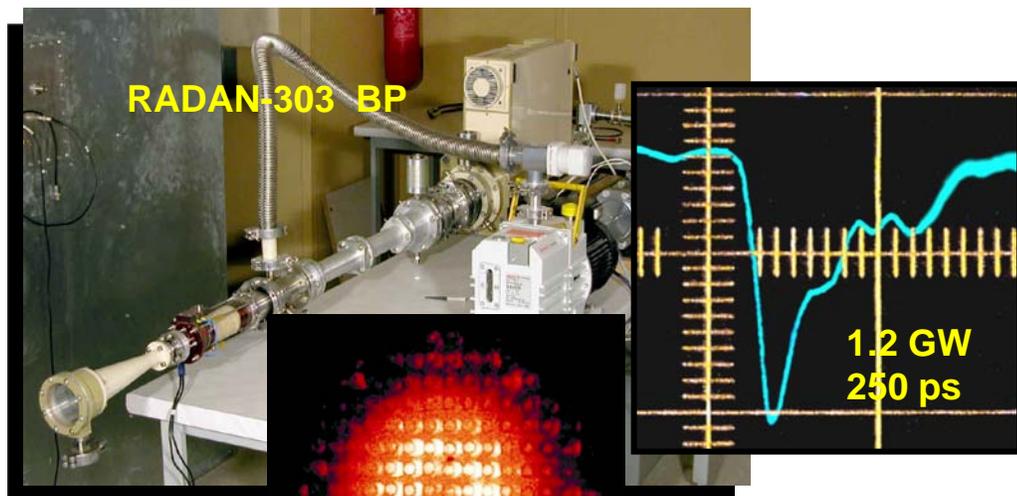
Закон изменения импеданса связи
при условии линейного роста пиковой мощности

$$K(z) = K_0 / (1 - z/L)$$



I.V. Pegel , et al Laser and Particle Beams (2003)

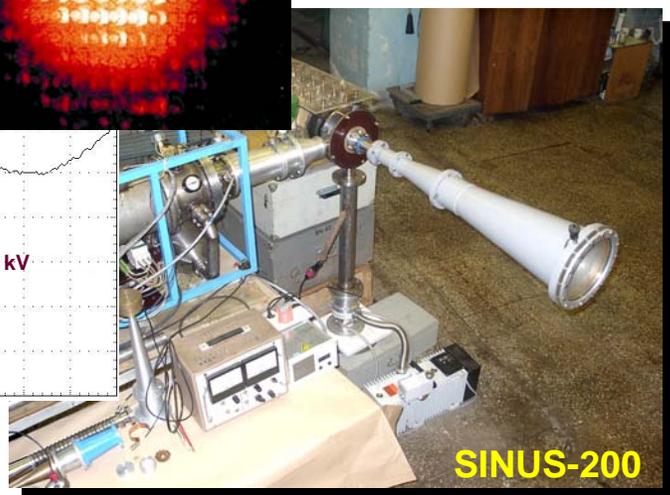
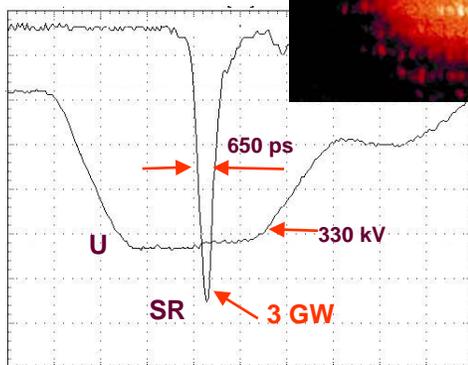
ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВСТРЕЧНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ И ПУЧКА



38 ГГц (8 мм)

ИПФ РАН,
ИЭФ УрО
РАН, ИСЭ РАН

Энергия электронов – 300 кэВ
Ток пучка – 2.2 кА
Мощность пучка – **0.7 ГВт**
Длительность импульса СИ – 200 пс
Пиковая мощность – **1.2 ГВт**
Коэффициент конверсии – 1.5



10 ГГц (3 см)

ИЭФ УрО
РАН, ИСЭ РАН

Энергия электронов – 330 кэВ
Ток пучка – 5 кА
Мощность пучка – **1.7 ГВт**
Длительность импульса СИ – 650 пс
Пиковая мощность – **3 ГВт**
Коэффициент конверсии – 1.8

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВСТРЕЧНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ И ПУЧКА

Автомодельные решения при изменении коэффициента связи

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} - \frac{\partial a}{\partial \xi} = -\chi(\xi) \langle e^{-i\theta} \rangle,$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -\chi(\xi) \operatorname{Re}(ae^{i\theta}).$$



$$\chi = \chi_0 / \sqrt{L - \xi}$$

$$\theta = \vartheta(\zeta)$$

$$a = \sqrt{L - \xi} A(\zeta)$$

$$\zeta = \xi + \tau$$

$$\chi(\xi) = \sqrt{K(\xi)/K(L)}$$

$K(\xi)$ - импеданс связи

L - безразмерная длина

$$\frac{d^2 \vartheta}{d\zeta^2} = -\chi_0 \operatorname{Re}(Ae^{i\vartheta}),$$

$$\frac{dA}{d\zeta} = -2\chi_0 \langle e^{-i\vartheta} \rangle.$$

Пиковая мощность
линейно растет с
координатой

Н.М. Рыскин

ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ИМПУЛЬСАМИ МИКРОВОЛНОВОГО СИ

Концепция коротковолнового короткоимпульсного ускорения в «теплых» металлических структурах

Максимальный градиент ускорения при запитке длинноволновыми клистронами
~ 100 МВ/м



Новые концепции
-плазменно-пучковое ускорение;
-лазерно-пучковое ускорение



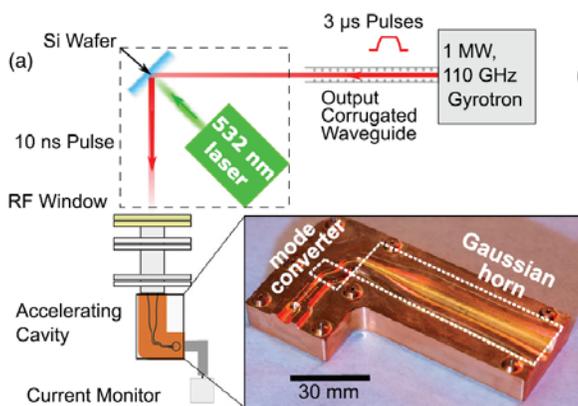
-Продвижение мощных СВЧ источников в мм и суб-мм диапазоны
-Укорочение длительности СВЧ импульса

$$E_s \propto f^{1/2} \cdot \tau^{-1/4 \dots -1/6}$$

τ - время воздействия $\tau > 100$ пс

Концепция коротковолнового короткоимпульсного ускорения в «теплых» металлических структурах

Разработка п/п переключателей и компрессоров для мощных гиротронов



0.5 MW/110 GHz/10 ns

«Холодные» тесты
230 МВ/м

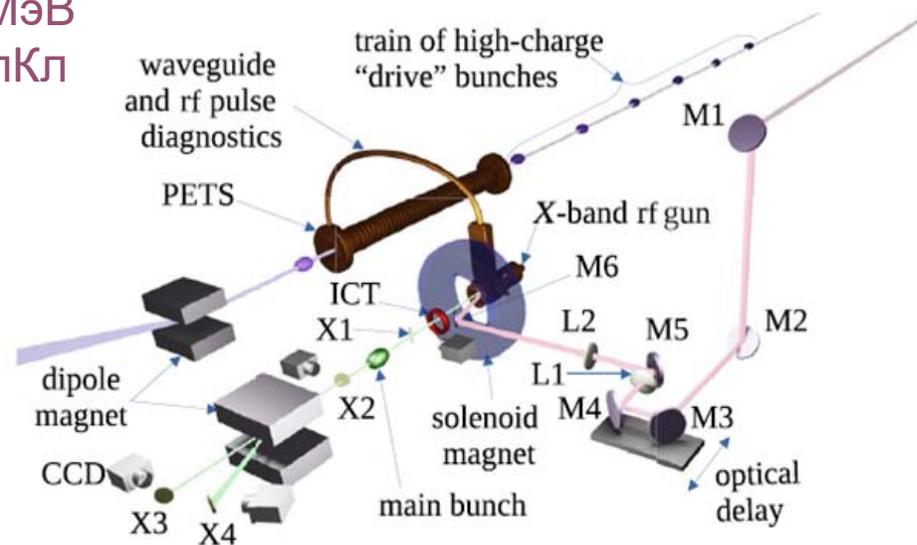


S.V. Kutsaev, et al, Phys. Rev. Applied (2019)
M. Othman, et al, Appl. Phys. Lett. (2020)
A.Palitsyn, G, Denisov, et al. EDL (2024)

Ускорение спонтанным излучением цуга ультрарелятивистских (60 МэВ) сгустков

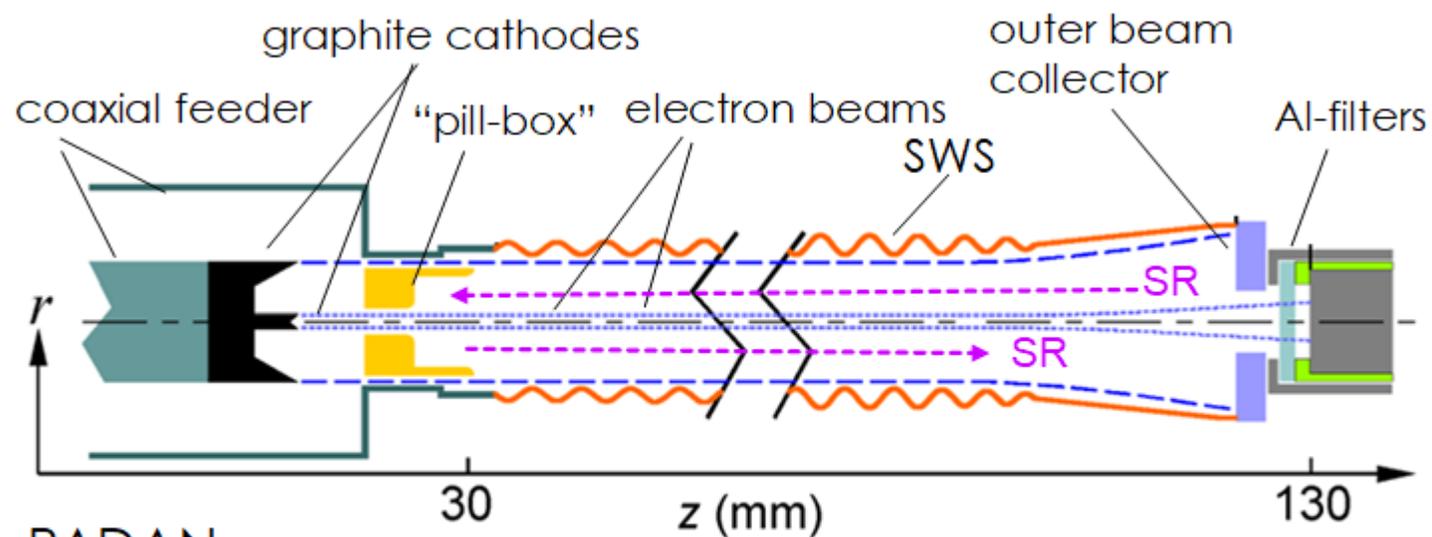
400 МВ/м
~3 МэВ
60 пКл

W.Tan, et al. Phys. Rev. AB (2022)



Argonne Wakefield Accelerator (AWA)

ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ИМПУЛЬСАМИ МИКРОВОЛНОВОГО СИ



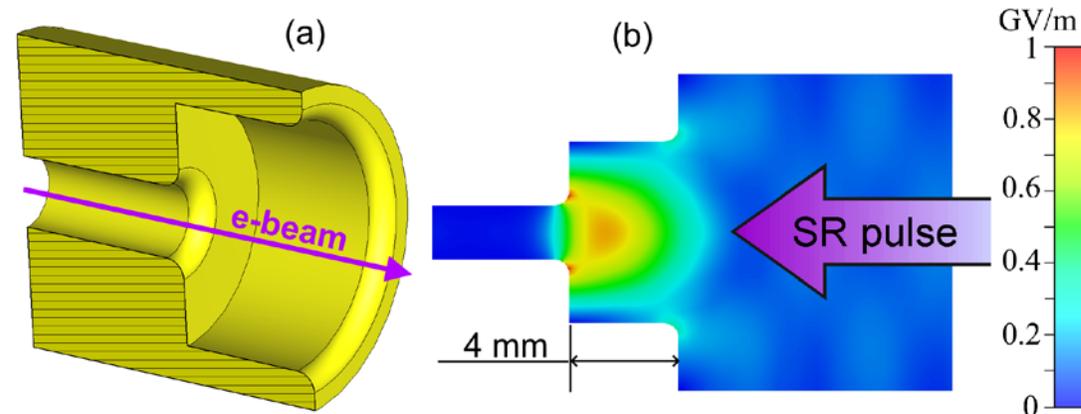
Комбинированная схема
«генератор СИ – ускоритель»

$E_z_{max} \sim 800$ МВ/м

$E_s_{max} \sim 1000$ МВ/м

RADAN

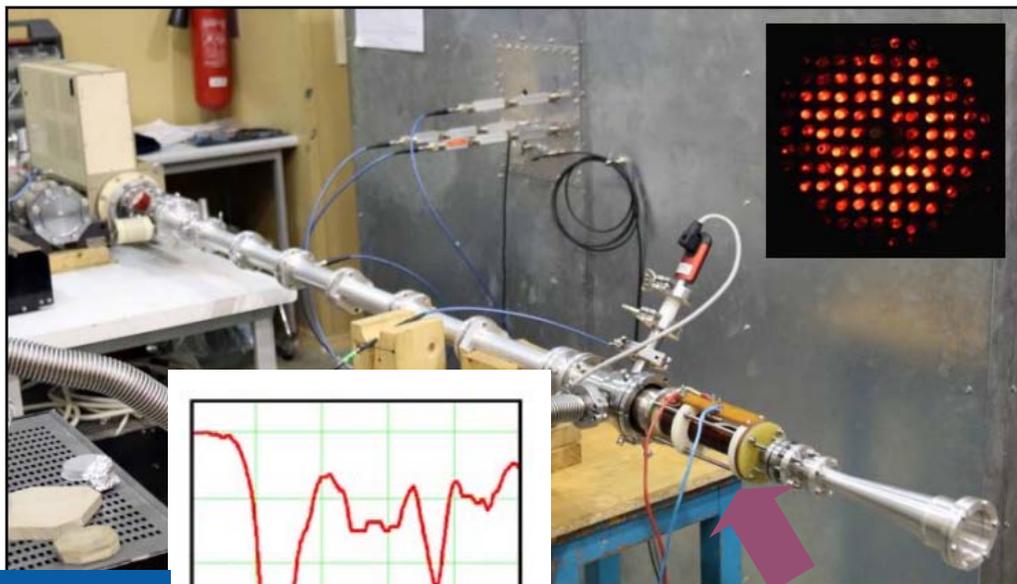
Упрощенное моделирование с Гауссовой
формой импульса СИ (1 ГВт/ 300 пс)
в резонаторе типа «pill-box»



С.В. Кузиков, А.А. Вихарев, А.Э. Федотов

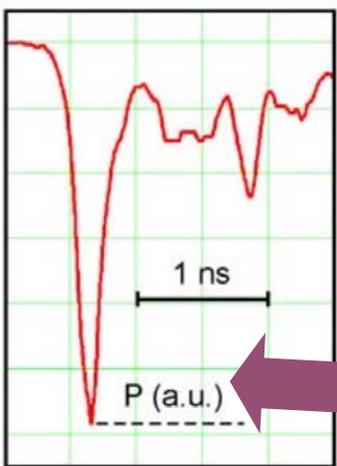
ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ИМПУЛЬСАМИ МИКРОВОЛНОВОГО СИ

Результаты экспериментов (ИЯФ УрО РАН, ИПФ РАН)



$E_{z_max} \sim 500$ МВ/м
 $G_{av} \sim 250$ МВ/м

Набор энергии 1 МэВ

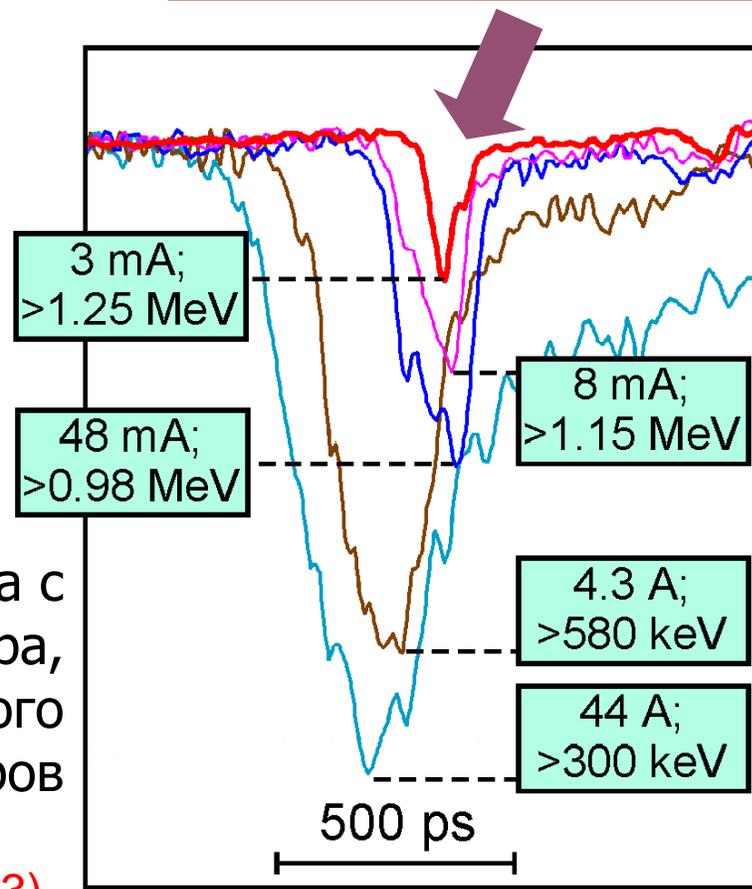


Экспериментальная установка

Импульс СИ

Импульсы тока с детектора, расположенного после Al-фильтров

ускоренная фракция



M.Yalandin et al Phys. Rev. Accel. Beams (2023)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ. РАЗДЕЛ 3

Усиление коротких импульсов при черенковском механизме взаимодействия описывается автомодельными решениями. Эти же решения применимы к формированию импульса микроволнового сверхизлучения (СИ) из собственных шумов электронного потока. В процессе «проскальзывания» импульса СИ относительно пучка аккумулируется энергия различных электронных фракций, в результате чего пиковая мощность СИ может превышать мощность пучка (коэффициент конверсии >1).

На основе эффекта черенковского СИ создан новый класс короткоимпульсных СВЧ источников см и мм диапазонов с уникальными характеристиками: гигаваттной пиковой мощностью и суб-нс длительностью.

Экспериментально продемонстрировано высокоградиентное ускорение электронов импульсом черенковского СИ (1 ГВт/300 пс / 38 ГГц) в резонаторе типа «pill-box». За счет короткого времени воздействия, исключающего развитие ВЧ пробоев, получены ускорительные градиенты, существенно превышающие рекордные значения, достигнутые при использовании длинноволновых клистронов.