

**Зотова И.В., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С.,
Заславский В.Ю.**

Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики РАН

Генерация солитонов при резонансном циклотронном взаимодействии прямолинейного электронного пучка со встречной волной

Показана возможность генерации периодической последовательности ультракоротких микроволновых импульсов при резонансном циклотронном взаимодействии первоначально прямолинейного электронного пучка со встречной волной. При этом формирующиеся импульсы представляют собой солитоны, амплитуда и длительность которых жестко связаны со скоростью распространения. Исследовано влияние дисперсии на формирование солитонов. Полученные результаты подтверждены в рамках прямого PIC (particle-in-cell) моделирования.

Ключевые слова: Ультракороткие импульсы, циклотронное резонансное взаимодействие, солитоны.

Расширение круга приложений мощных источников электромагнитного излучения, включая диагностику плазмы, системы локации, спектроскопию и т.д., обуславливает актуальность исследований по генерации в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах когерентных последовательностей коротких (наносекундных) импульсов. В частности, обогащение спектра излучения повышает эффективность ЯМР-спектроскопии [1]. Для решения указанного круга задач в работах [2,3] исследовалась возможность использования СВЧ модуляторов на основе полупроводниковых переключателей, контролируемых лазерным излучением, а в работе [4] – генерация последовательностей коротких импульсов в микроволновых генераторах с пассивной синхронизацией мод. В то же время существует альтернативная возможность [5], основанная на специфических особенностях резонансного циклотронного взаимодействия излучения со встречным потоком электронов, у которых отсутствует начальная вращательная скорость (т.е. на входе в пространство взаимодействия пучок является прямолинейным). Данная работа посвящена теоретическому анализу подобных процессов, в том числе, при учете влияния на формирование солитонов дисперсии при волноводном распространении излучения вблизи критической частоты. Результаты, полученные на основе усредненного подхода, подтверждены в рамках прямого численного моделирования. В настоящее время в ИПФ РАН планируются эксперименты по наблюдению «генерации» солитонов в миллиметровом диапазоне длин волн.

1. Описание формирования солитонов в рамках усредненного подхода.

Рассмотрим взаимодействие встречной TE_{mn} волны

$\vec{E} = \text{Re} \left\{ \vec{E}^S(\vec{r}_\perp) A(z, t) \exp(i\omega t + ihz) \right\}$ с электронным потоком (Рис. 1а) в условиях циклотронного резонанса: $\omega + hV_0 \approx \omega_H$, где $V_0 = \beta_0 c$ - поступательная скорость частиц,

$\omega_H = eH_0/mc\gamma$ - гирочастота. В предположении малых плотностей тока пучка система уравнений, описывающая электронно-волновое взаимодействие в этом случае, приводится к виду

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

где: $\tau = \sqrt{G}\omega(t - z/V_0) \frac{\beta_{gr}\beta_0}{\beta_{gr} + \beta_0}$, $Z = \frac{\sqrt{G}\omega z}{c}$, $a = \frac{\sqrt{(1 + \beta_{ph}^{-1}\beta_0)}}{2\sqrt{2}G^{3/4}\beta_0^{3/2}\gamma_0} \frac{eAJ_{m-1}(\kappa R_0)}{mc\omega}$,

$p = \frac{\sqrt{\mu}(p_x + ip_y)}{G^{1/4}mc\gamma_0\beta_0} e^{-i\omega t - ihz}$, $\mu = \frac{\beta_0(1 - \beta_{ph}^{-2})}{2(1 + \beta_{ph}^{-1}\beta_0)}$ - параметр неизохронности,

$\delta = \left(1 + \beta_{ph}^{-1}\beta_0 - \frac{\omega H_0}{\omega}\right)\beta_0^{-1}G^{-1/2}$ - расстройка циклотронного резонанса, β_{gr} , β_{ph} - групповая и фазовая скорость волны,

$$G = \frac{eI_b}{mc^3} \frac{2\mu(1 + \beta_{ph}^{-1}\beta_0)^2}{\gamma_0\beta_{ph}^{-1}\beta_0^3} \frac{J_{m-1}^2(\kappa R_0)}{J_m^2(v_n)(v_n^2 - m^2)},$$

I_b - ток электронного пучка, $\kappa = v_n/R$, R - радиус волновода, R_0 - радиус инжекции электронов, $J_m(x)$ - функция Бесселя, v_n - n -ый корень уравнения $J'_m(x) = 0$. Будем считать, что начальная вращательная скорость у электронов на входе в пространство взаимодействия отсутствует: $p(Z=0) = 0$. Внешний стационарный сигнал подается на систему с противоположного (коллекторного) конца: $a(Z=L) = a_{in}$.

Как показано в [6], система уравнений (1) имеет солитоноподобное решение, которое в случае точного циклотронного резонанса $\delta = 0$ может быть записано в виде

$$I = \frac{4}{(1+U)^{3/2}} \operatorname{sech} \left[\frac{2}{\sqrt{1+U}} (Z - U\tau) \right], \quad (2)$$

где $I = |a|^2$ - интенсивность электромагнитного поля, U - скорость распространения солитона. В соответствии с (2) отличительной чертой взаимодействия со встречной волной является существование неподвижного ($U = 0$) солитона $I = 4\operatorname{sech}(2Z)$ с пиковой интенсивностью $I^* = 4$. При этом солитоны с пиковой интенсивностью, превышающей I^* , распространяются навстречу электронному пучку ($U < 0$), в то время как солитоны с $I_{peak} < I^*$ сносятся электронным пучком в направлении его движения ($U > 0$).

В случае непрерывного входного сигнала в зависимости от его интенсивности $I_{in} = a_{in}^2$ и длины пространства взаимодействия L наблюдаются различные режимы взаимодействия (Рис. 1б). При малых интенсивностях $I_{in} < I^*$ при любой длине пространства взаимодействия (зона I) имеет место режим циклотронного поглощения, в котором амплитуда поля и модуль поперечного импульса монотонно убывают от коллекторного к катодному концу системы. В зоне II амплитуда поля и поперечный импульс электронов могут периодически изменяться вдоль пространства взаимодействия. При этом наряду с режимами поглощения могут реализоваться режимы нелинейного

просветления (пунктирные линии на плоскости параметров Рис.1 б), когда амплитуды излучения на входе и выходе системы равны $I_{in} = I_{out}$. Существование таких режимов было впервые показано в [7] на основе стационарной модели взаимодействия. Нестационарный подход с использованием уравнений (1) позволяет определить границы стационарных режимов, вне которых имеют место режимы периодической и хаотической автомодуляции (зоны III и IV на Рис.1б).

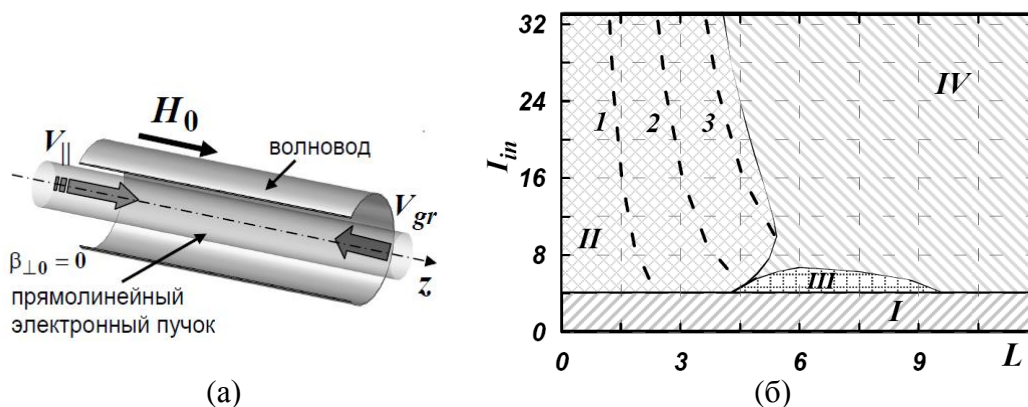


Рис. 1. (а) Схема циклотронного взаимодействия стационарного излучения со встречным электронным пучком. (б) Зоны режимов взаимодействия на плоскости параметров (I_{in}, L) .

С практической точки зрения наибольший интерес представляют режимы формирования периодических последовательностей коротких импульсов (зона III). Типичный пример такого режима представлен на Рис. 2 для $L = 6$, $I_{in} = 4$. При этом каждый импульс в генерируемой последовательности представляет собой солитон с формой, описываемой решением (4) (см. Рис. 2б).

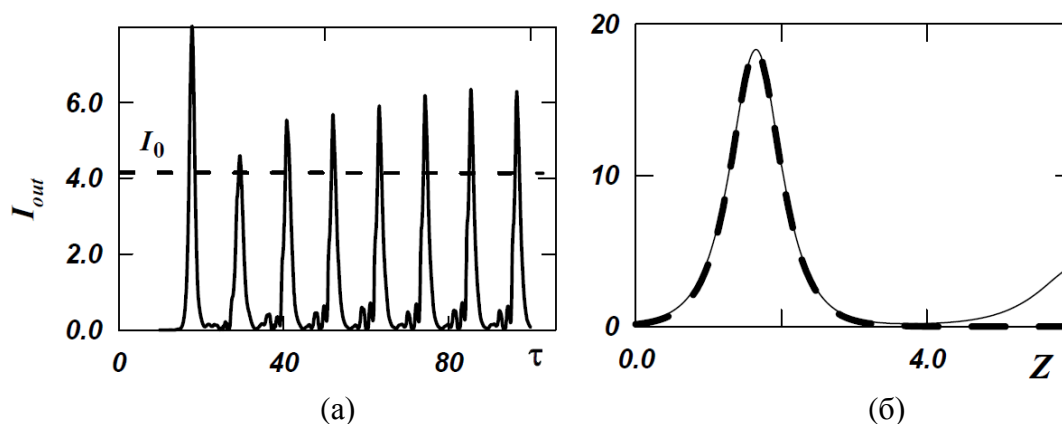


Рис. 2. Режим периодической автомодуляции: (а) – зависимость от времени интенсивности выходного сигнала, (б) – профиль единичного импульса в сравнении с аналитическим солитоноподобным решением (2), показанным пунктирной линией.

2. Формирование солитонов при учете дисперсии

Следует отметить, что солитоны, формирование которых описано в первом разделе представляют собой по сути солитоны самоиндуцированной прозрачности аналогичные хорошо известным в оптике [8-10]. Такие солитоны возникают при распространении излучения в поглощающей среде вследствие нелинейности. В то же время, известно, что при циклотронном взаимодействии нелинейность возрастает вблизи критической частоты. Однако в этом случае на процесс формирования солитонов может оказывать влияние

дисперсия. Учет этого влияния может быть проведен на основе системы уравнений, включающей параболическое уравнение для эволюции амплитуды поля и уравнения движения частиц:

$$\frac{i\sqrt{I_0}}{4\beta_{||0}^2} \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} = \hat{p}, \quad \frac{\partial \hat{p}}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{p}}{\partial \tau} + i\hat{p}(\Delta + |\hat{p}|^2) = -a. \quad (3)$$

Здесь $\tau = \sqrt{I_0}\omega_c t/2$, $Z = \sqrt{I_0}\omega_c z/2V_{||0}$, $\hat{p}_\perp = (p_x + ip_y)e^{-i\omega_c t + i(m-1)\varphi}/I_0^{1/4}mc$, $a = eAJ_{m-1}(\kappa R_0)/I_0^{3/4}mc\omega_c$, $\beta_{||0} = V_{||0}/c$ - начальная поступательная скорость частиц, $I_0 = 4(eI_b/mc^3)\beta_{||0}^{-1}J_{m-1}^2(\kappa R_0)(v_n^2 - m^2)^{-1}J_m^{-2}(v_n)$, $\Delta = 2(\omega_c - \omega_H)/\sqrt{I_0}\omega_c$ - начальная расстройка от критической частоты рабочей моды ω_c , выбранной за несущую. Следует отметить, что система (3) близка к системе уравнений, описывающей взаимодействие в гиротронах. Однако, вследствие нулевой поперечной скорости частиц на входе в волновод, в данном случае отсутствует усреднение по начальным фазам в правой части уравнения возбуждения. Также как и для гиротронов система (3) сводится к (2) при больших расстройках, что позволяет интерпретировать генерируемые короткие импульсы (см. ниже) как солитоны.

На Рис. 3 представлены результаты моделирования системы уравнений (3) для следующих параметров: $L = 4.2$, $a_{in} = 4.8$, $I_0 = 8 \cdot 10^{-4}$, $\Delta = -3.7$. Указанные параметры соответствуют взаимодействию вблизи критической частоты (см. Рис.3а). При этом, несмотря на наличие дисперсии также имеет место формирование последовательности коротких импульсов.

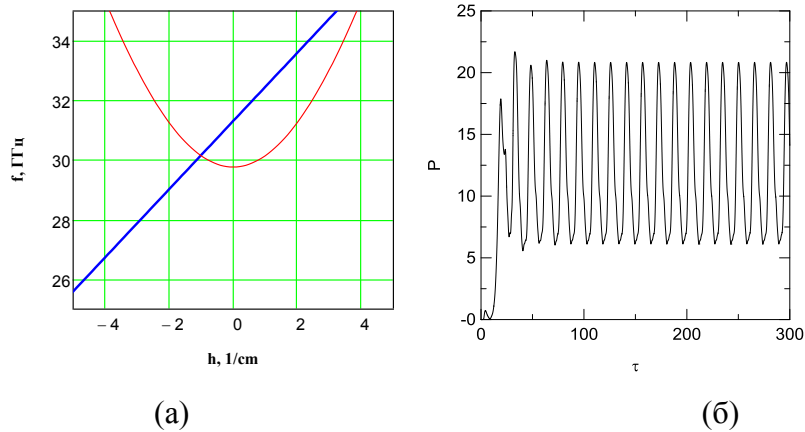


Рис. 3 (а) Дисперсионная диаграмма и (б) зависимость от времени мощности выходного сигнала.

3. Трехмерное моделирование процесса формирования солитонов в миллиметровом диапазоне длин волн.

В данном разделе приведены результаты трехмерного моделирования формирования солитонов с использованием PIC кода CST Studio Suite. Параметры моделирования были выбраны близкими к параметрам планируемого эксперимента по «генерации» солитонов с рабочей частотой 30.16 ГГц: энергия электронов 15 кэВ, ток пучка 0.75 А, длина системы 11.5 см, резонансное магнитное поле 11.5 кЭ, мощность подаваемого сигнала 30 кВт. Рассматривалось возбуждение низшей моды в волноводе с радиусом 0.3 см. В этом случае нормированные параметры совпадают с использованными выше (Рис. 3). На Рис. 4

показана формируемая последовательность коротких импульсов с длительностью 2 нс и пиковой мощностью 40 кВт.

В случае проведения успешных экспериментов в указанном диапазоне представляет интерес реализация указанного режима в более высокочастотных диапазонах. В частности исследуемый режим представляет интерес для модуляции излучения коротковолновых гиротронов с целью последующего использования в спектроскопических приложениях. Моделирование показывает, что при энергии электронов 1 кэВ и токе 65 мА подача в систему излучения гиротрона [11] с рабочей частотой 240 ГГц и мощностью 450 Вт приводит к формированию солитонов с длительностью 0.8 нс и пиковой мощностью ~600 Вт. При этом период следования импульсов может регулироваться как за счет изменения тока в поглощающей секции, так и за счет подбора магнитного поля.

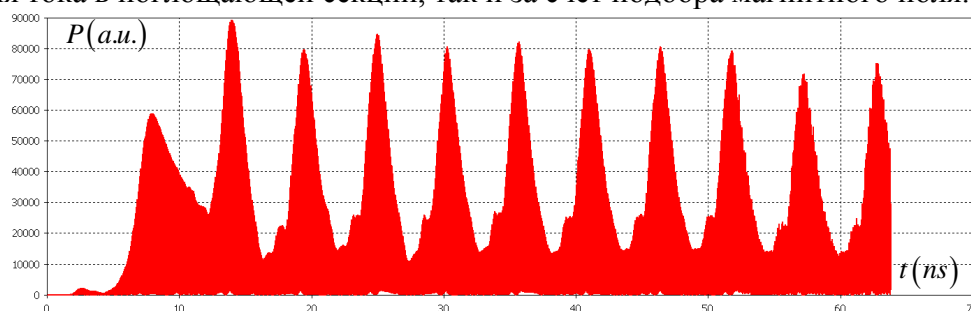


Рис. 4. Формируемая последовательность солитонов, полученная в PIC моделировании с рабочей частотой 30.16 ГГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 15-08-04506.

Библиографический список

1. Nanni E.A., Barnes A.B., Griffin R.G., Temkin R.J. THz Dynamic Nuclear Polarization NMR. IEEE Trans. on THz Sci. and Tech, 2011. V.1, Iss.1 P.145-163
2. Вихарев А.А., Денисов Г.Г., Кочаровский Вл.В. и др. Быстродействующий квазиоптический переключатель фазы волнового пучка, основанный на эффекте индуцированной фотопроводимости в кремнии. Письма в ЖТФ, 2007. Т.33. №.17. С.38-45.
3. Кулыгин М.Л., Денисов Г.Г., Родин Ю.В. Оптически управляемый полупроводниковый модулятор микроволнового излучения с наносекундным быстродействием. Письма в ЖТФ, 2011. Т.37. №.8. С.49-55.
4. Ginzburg N. S. , Denisov G. G. , Vilkov M. N. , Zotova I. V. , and Sergeev A. S. Generation of “gigantic” ultra-short microwave pulses based on passive mode-locking effect in electron oscillators with saturable absorber in the feedback loop. Phys. Plasmas, 2016. V. 23, Issue 5. P. 050702.
5. Zotova I.V., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Kocharovskaya E.R., Zaslavsky V.Yu. Conversion of an Electromagnetic Wave into a Periodic Train of Solitons under Cyclotron Resonance Interaction with a Backward Beam of Unexcited Electron-Oscillators. Phys.Rev.Lett., 2014, V. 113, P. 143901.
6. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Self-Induced transparency and electromagnetic pulse compression in a plasma or an electron beam under cyclotron resonance conditions. Phys. Rev. Lett., 2010. V.105. Iss.26. P.265001.
7. Kovalev N.F., Kolganov N.G., Palitsin A.V., Fuchs M.I. Relativistic BWO with cyclotron selection of an asymmetric wave. Proc. of the 4th Int. Workshop Strong Microwaves: Sources and Applications (ed. by A.G.Litvak), N.Novgorod, Russia, 2000. V.2. P.845–850.
8. McCall S.L., and Hahn E.L. Self-induced transparency by pulsed coherent light. Phys. Rev. Lett., 1967. V. 18. P. 908.
9. McCall S.L., and Hahn E.L. Self-induced transparency. Phys. Rev., 1969. V. 183, P. 457.
10. Allen L., and Eberly J. “Optical Resonance and Two-Level Atoms”, Wiley, N. Y., 1975.
11. Венедиктов Н.П., Запезалов В.Е., Корнишин С.Ю. и др. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике для спектроскопии динамически поляризованных ядер. Изв.ВУЗов. Радиофизика, 2010. Т.53. №4. С.260-268.