

11.2;13.4

Генерация периодической последовательности ультракоротких электромагнитных импульсов в схеме с двумя параллельными излучающим и поглощающим электронными пучками

© Н.С. Гинзбург, М.Н. Вилков, Ю.Ю. Данилов, А.П. Конюшков, Л.А. Юровский, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, И.В. Зотова

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
E-mail: ginzburg@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2020 г.

В окончательной редакции 9 ноября 2020 г.

Принято к публикации 9 ноября 2020 г.

Показана возможность генерации периодической последовательности ультракоротких микроволновых импульсов в схеме с двумя параллельными соосными электронными пучками, формируемыми единым катодом и транспортируемыми в едином вакуумном объеме. Внешний цилиндрический пучок обеспечивает усиление излучения при прямолинейном движении вдоль периодической замедляющей системы, а внутренний приосевой — нелинейное циклотронное поглощение.

Ключевые слова: генерация ультракоротких импульсов, насыщающийся циклотронно-резонансный поглотитель, многолучевые (многопучковые) генераторы.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.04.50642.18365

В физике лазеров для генерации ультракоротких (фемтосекундных) импульсов (УКИ) широко используется установка в резонатор лазера нелинейного элемента, поглощающего излучение малой амплитуды и прозрачного для излучения большой интенсивности [1]. Представляется перспективным перенос указанного метода в электронику СВЧ, где в зависимости от частотного диапазона в качестве активного элемента могут использоваться различные типы электронных усилителей. Очевидно, что микроволновое излучение в виде периодической последовательности ультракоротких импульсов актуально для большого числа физических и технических приложений, включая диагностику плазмы и твердого тела, связь и радиолокацию высокого разрешения и т.п. В работах [2,3] проведен анализ динамики УКИ-генераторов на основе двухсекционной схемы, в которой усилительная секция и секция нелинейного поглощения запитывались двумя независимыми электронными пучками. На базе такой концепции в настоящий момент ведется подготовка к экспериментальному исследованию УКИ-генератора 8-миллиметрового диапазона, где в качестве усилителя используется винтовая гиротронная лампа бегущей волны, а в качестве нелинейного абсорбирующего элемента — циклотронно-резонансный поглотитель, основанный на взаимодействии излучения с первоначально прямолинейным электронным пучком [3].

Следует отметить, что практическая реализация подобной системы требует разработки достаточно сложной схемы, обеспечивающей передачу сигнала между секциями, а также вывод излучения в полезную нагрузку. В связи с этим в настоящей работе предлагается альтернативная схема УКИ-генераторов, отличительной особенностью которой является использование двух па-

раллельных электронных пучков, формируемых единым катодом и транспортируемых в едином вакуумном объеме. Один из указанных пучков обеспечивает усиление излучения, а второй — нелинейное циклотронное поглощение. Предшествующий анализ динамики УКИ-генераторов показал, что для генерации периодической последовательности импульсов важное значение имеет соотношение между поступательной скоростью электронов и групповой скоростью волны. Для генерации импульсов максимальной амплитуды групповая скорость волны в секции усиления должна отличаться от поступательной скорости частиц, что позволяет формируемому электромагнитному импульсу отбирать энергию от различных фракций электронного пучка. Напротив, в секции нелинейного поглощения оптимален режим группового синхронизма, обеспечивающий минимальное взаимное влияние различных фрагментов электромагнитного импульса через электронный пучок. В таких условиях обеспечивается максимальный контраст между поглощением малого шумового фона и практически полной прозрачностью при прохождении участков импульса большой амплитуды.

Принципиальная схема исследуемого двухпучкового УКИ-генератора показана на рис. 1, а. Здесь внешний электронный пучок обеспечивает усиление излучения при черенковском взаимодействии с замедленной волной, распространяющейся в цилиндрическом волноводе с периодической гофрировкой боковых стенок. Насыщающееся поглощение обеспечивается внутренним приосевым электронным пучком, для которого путем вариации величины ведущего магнитного поля на определенном участке выполнены условия циклотронного резонанса с излучением. Эффект насыщения обусловлен

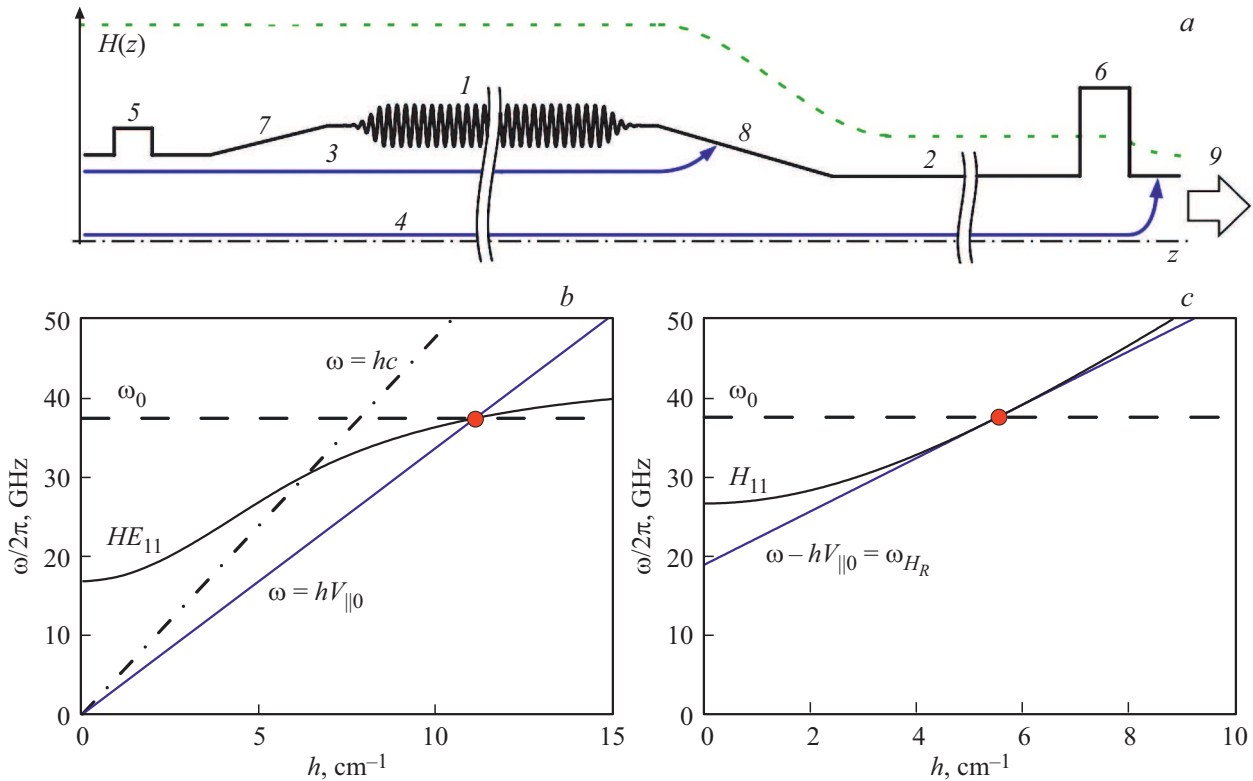


Рис. 1. *a* — схема генератора ультракоротких импульсов на основе двух соосных электронных пучков: *1* — секция усиления на основе гофрированного волновода, *2* — секция циклотронного поглощения, *3* — внешний усиливающий пучок, *4* — внутренний поглощающий приосевой пучок, *5* и *6* — входной и выходной рефлекторы, *7* и *8* — согласующие конусообразные волноводы, *9* — вывод излучения в полезную нагрузку, $H(z)$ — профиль ведущего магнитного поля; *b* — дисперсионная диаграмма для секции, в которой реализуется усиление гибридной волны HE_{11} гофрированного волновода прямолинейным электронным пучком; *c* — дисперсионная диаграмма для секции циклотронного поглощения волны H_{11} регулярного волновода в режиме группового синхронизма, ω_0 — несущая частота.

релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии частиц. Кроме того, электродинамическая система генератора включает два отражателя, расположенных с катодной и коллекторной стороны пространства взаимодействия. Экспериментальное тестирование описанной схемы УКИ-генератора в 8-миллиметровом диапазоне планируется провести на базе термоэмиссионного микросекундного ускорителя „САТУРН“ (ИПФ РАН) [4], формирующего электронные пучки с энергией электронов до 200–300 keV и током до 200 А. Дальнейшее моделирование проведено в проекции на указанный эксперимент.

В секции усиления, представляющей собой цилиндрический волновод с достаточно глубокой осесимметричной гофрировкой, в качестве рабочей использована гибридная мода HE_{11} (рис. 1, *b*). Внешний трубчатый электронный пучок движется прямолинейно вблизи гофрированной поверхности в сильном ведущем магнитном поле. В условиях черенковского синхронизма $\omega_0 = h_1 V_{||0}$ (h_1 — продольное волновое число на частоте точного синхронизма ω_0 , $V_{||0}$ — начальная продольная скорость электронов) процесс усиления попутной волны

$$E = \text{Re}(A_1(z, t)E_z(\mathbf{r}_\perp)e^{i\omega_0 t - ih_1 z}) \quad (1)$$

с медленно меняющейся комплексной амплитудой $A_1(z, t)$ и поперечной структурой $E_z(\mathbf{r}_\perp)$ описется следующей системой уравнений [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_1}{\partial Z} + \frac{\partial a_1}{\partial \tau} &= G_1 \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial Z} &= -\text{Re}(a_1 E_z(r_b) e^{i\theta}), \quad \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{1}{\beta_{||}} - \frac{1}{\beta_{ph1}}, \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\theta = \omega_0 t - h_1 z$ — фаза электрона относительно синхронной волны, $\tau = \omega_0(t - z/V_{||0})(c/V_{gr1} - c/V_{||0})^{-1}$ — временная переменная, учитывающая отличие поступательной скорости электронов $V_{||} = c\beta_{||}$ от групповой скорости волны $V_{gr1} = (\partial h_1 / \partial \omega)^{-1}$, $V_{ph1} = c\beta_{ph1} = \omega_0 / h_1$ — фазовая скорость волны, $Z = \omega_0 z / c$ — продольная координата, $a_1 = eA_1 / m_e c \omega_0 \gamma_0$ — нормированная амплитуда поля, $G_1 = eI_1 E_z(r_b) / \pi m_e c^3 \gamma_0 N_1$, I_1 — ток усиливающего трубчатого пучка с радиусом r_b , $\gamma_0 = (1 - V_{||0}^2 / c^2)^{-1/2}$ — фактор Лоренца, $\varepsilon = \gamma / \gamma_0$ — нормированная энергия частиц. Граничные условия для электронов на входе в пространство взаимодействия имеют вид $\theta|_{Z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi)$, $\varepsilon|_{Z=0} = 1$. Заметим, что

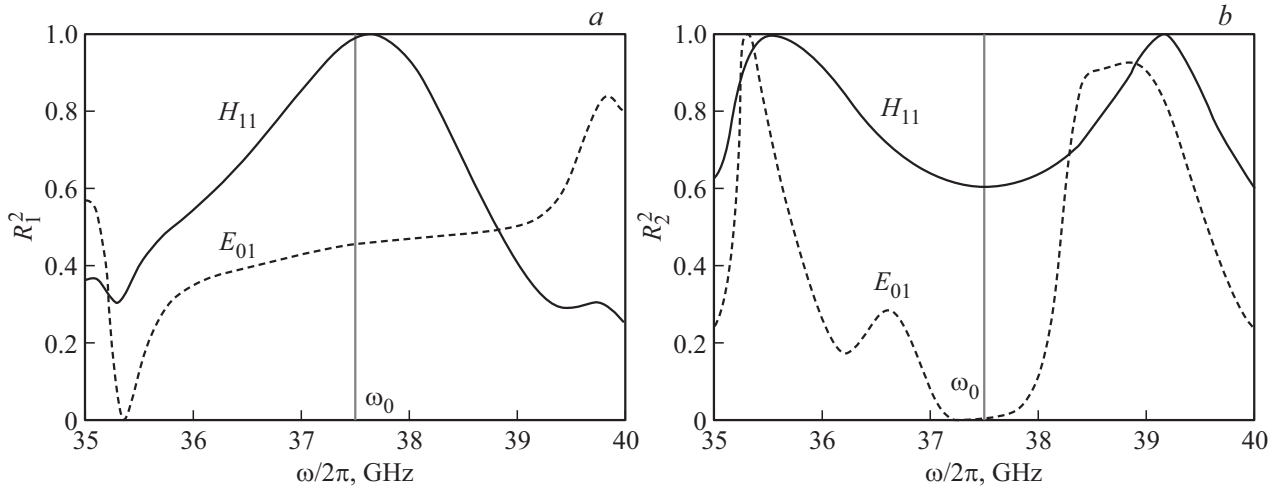


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов отражения по мощности входного (а) и выходного (б) отражателей для рабочей H_{11} и паразитной моды E_{01} .

внутренний приосевой электронный пучок движется достаточно далеко от замедляющей системы и вследствие радиального спада амплитуды медленной волны в черенковском взаимодействии практически не участвует.

Предположим, что после прохождения замедляющей системы внешний пучок высаживается на стенку. Это может быть достигнуто адиабатическим уменьшением радиуса волновода и одновременным уменьшением величины ведущего магнитного поля. При этом гибридная волна HE_{11} трансформируется в моду H_{11} регулярного волновода. Для моды H_{11} соответствующим подбором величины магнитного поля создаются условия циклотронного резонанса $\omega_0 - h_2 V_{||0} = \omega_{H_R}$ для взаимодействия с внутренним приосевым электронным пучком. Процесс поглощения излучения в условиях группового синхронизма (т.е. при равенстве поступательной скорости электронов и групповой скорости волны $V_{||0} = V_{gr2} = (\partial h_2 / \partial \omega)^{-1}$) описывается системой уравнений [6]:

$$\frac{\partial a_2}{\partial Z} = G_2 p_+, \quad \frac{\partial p_+}{\partial Z} + i p_+ [\Delta + |p_+|^2] = -\nu a_2, \quad (3)$$

Здесь $p_+ = (p_x + i p_y) e^{-\omega_0 t} / m_e c \gamma_0 \sqrt{2\beta_{||0}}$ — нормированный поперечный импульс электронов, $a_2 = e A_2 / m_e c \omega_0 \gamma_0$ — нормированная амплитуда поля в области поглощения, $G_2 = e I_2 (\sqrt{2} \kappa_2)^3 / m_e \omega_0^3 N_2 \beta_{||0}^{3/2} \gamma_0$, I_2 — ток поглощающего пучка, $\nu = c \kappa_2 / \omega_0 (2\beta_{||0})^{3/2}$, $\Delta = \beta_{||0}^{-1} (\omega_0 - h_2 V_{||0} - \omega_{H_R}) / \omega_0$ — начальная расстройка циклотронного резонанса, $\omega_{H_R} = e H_R / m_e c \gamma_0$ — релятивистская гирочастота, H_R — величина магнитного поля в области нелинейного поглощения, N_2 — норма рабочей моды, κ_2 — поперечное волновое число. На входе в область циклотронно-резонансного поглощения поперечная скорость у электронов отсутствует: $p|_{Z=0} = 0$.

При адиабатически плавном изменении радиуса волновода при переходе от секции излучения к секции

поглощения должна сохраняться мощность излучения (при длине конусообразного перехода между секциями 6 см на рис. 1 расчетный коэффициент отражения по мощности менее 0.1%). Соответственно нормированные амплитуды волн связаны условием

$$a_{1,out}(\tau) = \chi a_{2,in}(\tau), \quad (4)$$

где $\chi = \sqrt{\omega_0^3 h_2 N_2 / 2 c^3 \kappa_2^4 N_1}$. Отразившись от правого зеркала, при встречном распространении излучение не взаимодействует с электронными потоками. Достигнув левого конца системы, излучение вновь испытывает отражение, в результате амплитуды полей на входе в область усиления и на выходе из области поглощения связаны условием

$$a_{1,in}(\tau) = \chi^{-1} R_1 R_2 a_{2,out}(\tau - T_d), \quad (5)$$

где T_d — время задержки, $R_{1,2}$ — коэффициенты отражения от левого и правого отражателя соответственно.

Мощность излучения в полезную нагрузку дается выражением

$$P = \frac{m_e^2 \omega_0^4}{8 e^2} \frac{V_{gr2}}{\kappa_2^4} \gamma_0^2 N_2 (1 - R_2^2) |a_{2,out}|^2. \quad (6)$$

Моделирование в рамках уравнений (2), (3) проводилось при следующих параметрах усилительной секции: средний радиус волновода 6.15 мм, период гофра 1.5 мм, глубина гофра 1.16 мм, длина секции 110 мм. Внешний электронный пучок имел в этой секции радиус 4 мм. Длина и радиус волновода во второй секции составляли соответственно 68 и 3.3 мм, что при $H_R = 0.95$ Т обеспечивало насыщающееся циклотронное поглощение в режиме касания дисперсионных характеристик пучка и моды H_{11} регулярного волновода (рис. 1, с).

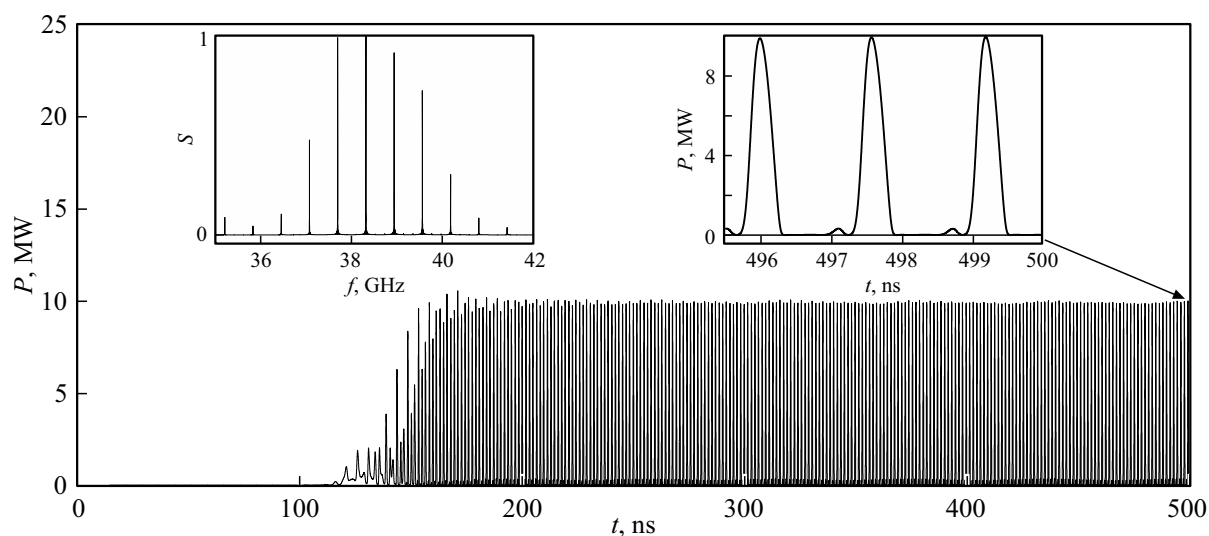


Рис. 3. Установление режима генерации периодической последовательности импульсов. На правой вставке — профиль импульсов в увеличенном масштабе, на левой — спектр излучения, представляющий собой набор продольных мод резонатора.

В качестве отражателей предлагается использовать небольшие ступеньки [7], расположенные с катодной и коллекторной сторон пространства взаимодействия с глубиной 1.5 и 4.95 mm и шириной 6.5 и 8.45 mm соответственно. Подобные отражатели позволяют обеспечить необходимый уровень отражения в достаточно широкой частотной полосе ~ 1 GHz (рис. 2). При этом в рабочем частотном диапазоне ~ 37.5 GHz предлагаемые отражатели имеют достаточно низкие коэффициенты отражения для паразитной моды E_{01} , что позволяет избежать ее самовозбуждения.

Моделирование при указанных выше параметрах показало возможность реализации режима периодической импульсной генерации в указанной схеме. В приведенном на рис. 3 примере ток усиливающего пучка составлял 60 A, ток поглощающего пучка 23 A, энергия частиц 210 keV. Пиковая мощность импульсов с длительностью до 320 ps и несущей частотой 37.5 GHz достигает 10 MW. Период следования импульсов 1.6 ns. Важно подчеркнуть, что режим самовозбуждения УКИ-генератора является мягким, т.е. генерация развивается от малых начальных шумов. Таким образом, проведенный анализ демонстрирует работоспособность предлагаемой схемы УКИ-генератора на основе двух параллельных излучающих и поглощающих электронных пучков.

В заключение отметим, что в микроволновой электронике известен ряд успешных экспериментальных реализаций схемы с двумя параллельными электронными пучками, которая использовалась прежде всего для селекции мод по поперечному индексу (см., например, [8,9]). В настоящей работе показано, что аналогичная электронная оптика может быть использована для принципиально иных целей, а именно для реализации периодической импульсной генерации.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00308 А) и частично в рамках госзадания (тема № 0035-2019-0001).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] П.Г. Крюков, *Квантовая электроника*, **31** (2), 95 (2001).
- [2] Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, *Письма в ЖТФ*, **41** (17), 44 (2015).
- [3] N.S. Ginzburg, G.G. Denisov, M.N. Vilkov, A.S. Sergeev, S.V. Samsonov, A.M. Malkin, I.V. Zotova, *Phys. Rev. Appl.*, **13** (4), 044033 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.044033
- [4] Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, Г.С. Кораблев, И.С. Кулагин, В.К. Лыгин, Б.З. Мовшевич, В.И. Цалолихин, М.Ю. Шмелев, *ПТЭ*, № 3, 138 (1995).
- [5] E.B. Abubakirov, A.N. Denisenko, M.I. Fuks, N.G. Kolganov, N.F. Kovalev, M.I. Petelin, A.V. Savelyev, E. Schamiloglu, E.I. Soluyanov, V.V. Yastrebov, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **30** (3), 1041 (2002). DOI: 10.1109/TPS.2002.801601
- [6] G.S. Nusinovich, *Introduction to the physics of gyrotrons* (J. Hopkins University Press, Baltimore, 2004), p. 335.
- [7] Ю.Ю. Данилов, *ЖТФ*, **84** (7), 143 (2014).
- [8] В.Л. Братман, В.П. Губанов, Г.Г. Денисов, С.Д. Корвин, С.Д. Полевин, В.В. Ростов, А.В. Сморгонский, *Письма в ЖТФ*, **14** (1), 9 (1988).
- [9] T. Idehara, M. Glyavin, A. Kuleshov, S. Sabchevski, V. Manuilov, V. Zaslavsky, I. Zotova, A. Sedov, *Rev. Sci. Instrum.*, **88** (9), 094708 (2017). DOI: 10.1063/1.4997994