

02;07;10;12

## **Использование двумерной распределенной обратной связи для синхронизации многопучковой системы планарных МСЭ**

© Н.С. Гинзбург, Н.Ю. Песков, А.С. Сергеев,  
А.В. Аржанников, С.Л. Синицкий

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород  
Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 8 августа 2000 г.

Предложено использование двумерной распределенной обратной связи для синхронизации излучения в многопучковом генераторе, представляющем собой совокупность МСЭ-модулей планарной геометрии, каждый из которых запитывается ленточным РЭП. Показано, что связь различных модулей может быть осуществлена через возникающие в двумерных брэгговских структурах поперечные потоки электромагнитной энергии.

1. В настоящее время ведутся достаточно интенсивные теоретические [1–4] и экспериментальные [5–7] исследования использования двумерной распределенной обратной связи (РОС) для генерации мощного когерентного излучения релятивистскими электронными пучками ленточной и трубочатой геометрии. Подобный механизм обратной связи может быть реализован с помощью двумерных брэгговских резонаторов планарной и коаксиальной геометрии. Теоретический анализ показывает, что для обеих конфигураций возможно получение пространственно-когерентного излучения при одном из поперечных размеров системы, на несколько порядков превосходящих длину волны. Работоспособность новой схемы обратной связи продемонстрирована недавно [5,6] экспериментально в мазере на свободных электронах (МСЭ) 4-миллиметрового диапазона, реализованном на базе специализированного ускорителя ЭЛМИ (ИЯФ СО РАН), формирующего ленточный релятивистский электронный пучок (РЭП) с энергией частиц 1 MeV, погонным током 200 A/cm, поперечным сечением  $0.3 \times 20$  cm и длительностью импульсов более 5  $\mu$ s. В качестве развития этих исследований предлагается созда-

ние мощных источников электромагнитного излучения как совокупности синфазно работающих генераторных или усилительных модулей в виде планарных МСЭ, примыкающих друг к другу и тем самым создающих единое устройство с многослойной электродинамической структурой и пространством взаимодействия, развитым по двум поперечным координатам. В данной работе будет показано, что синхронизация фазы колебаний может быть осуществлена путем связи различных модулей через поперечные (по отношению к направлению поступательного движения частиц) потоки электромагнитной энергии, которые возникают в двумерных брэгговских структурах. При этом возможна реализация как генераторных, так и усилительных схем. В первом случае должно иметь место замыкание в кольцо потоков энергии с первого и последнего модуля. Во втором случае данное кольцо оказывается разомкнутым, и его концы используются для подачи входного сигнала. Первоначальную экспериментальную проверку предложенного механизма синхронизации предполагается осуществить на установке ЭЛМИ путем объединения в единое устройство двух планарных мазеров.

2. Общая схема многомодульного МСЭ-генератора изображена на рис. 1, *a*. Каждый из модулей (рис. 1, *b*) представляет собой генератор с двумерным планарным брэгговским резонатором, пластины которого гофрированы по закону

$$a = a_1 \cos(\bar{h}z) \cos(\bar{h}x), \quad (1)$$

$\bar{h} = \sqrt{2}\pi/d$ ,  $d$  — период гофрировки,  $2a_1$  — глубина гофрировки. МСЭ-модуль запитывается ленточным РЭП, поступательная скорость которого направлена вдоль оси  $z$ . Электроны пучка, фокусируемые ведущим продольным магнитным полем, осциллируют в поле планарного ондулятора, примыкающего к каждому из модулей. Различные модули связаны последовательно через поперечные потоки энергии, возникающие за счет рассеяния при возбуждении двумерного брэгговского резонатора ленточным РЭП. При этом для замыкания кольца обратной связи первый и последний модули должны быть также связаны друг с другом.

Электромагнитное поле внутри модуля с индексом  $n$  представим как совокупность 4 парциальных волн, две из которых ( $A_{\pm}$ ) распространяются в продольном, а две другие ( $B_{\pm}$ ) в поперечном по отношению к

движению электронного пучка направлении:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \operatorname{Re} \left( \left[ \mathcal{A}_{+,n} e^{-i\bar{h}z} + \mathcal{A}_{-,n} e^{i\bar{h}z} + \mathcal{B}_{+,n} e^{-i\bar{h}x} + \mathcal{B}_{-,n} e^{i\bar{h}x} \right] e^{i\bar{\omega}t} \right), \quad (2)$$

где  $\mathcal{A}_{\pm}(x, z, t)$ ,  $\mathcal{B}_{\pm}(x, z, t)$  — медленные функции,  $\bar{\omega} = \bar{h}c$  — несущая частота, в качестве которой выбрана брэгговская частота (частота точного брэгговского резонанса). Процесс электронно-волнового взаимодействия в  $n$ -м модуле может быть описан с помощью следующей системы уравнений (ср. с [2,3]):

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) A_{+,n} + i\alpha(B_{+,n} + B_{-,n}) &= J_n, \quad J_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta_n} d\theta_{0n}, \\ \left( \frac{\partial}{\partial Z} - \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) A_{-,n} + i\alpha(B_{+,n} + B_{-,n}) &= 0, \\ \left( \frac{\partial}{\partial X} \pm \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) B_{\pm,n} + i\alpha(A_{+,n} + A_{-,n}) &= 0, \\ \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta_n &= \operatorname{Re}(A_{+,n} e^{i\theta_n}), \end{aligned} \quad (3)$$

$Z = z\bar{h}C$ ,  $X = x\bar{h}C$ ,  $\tau = t\bar{\omega}C$ ,  $(A_{\pm}, B_{\pm}) = (A_{\pm}, B_{\pm})eK\mu/\gamma m\bar{\omega}cC^2$ ,  $K \approx \beta_{\perp}/2\beta_{\parallel}$  — параметр связи электронов с волной,  $\mu \approx \gamma^{-2}$  — параметр инерционной группировки,  $\gamma$  — релятивистский масс-фактор электронов,  $v_{\parallel,\perp} = \beta_{\parallel,\perp}c$  — поступательная и осцилляторная скорость частиц соответственно,  $v_{gr} = \beta_{gr}c$  — групповая скорость волн,  $\theta = \bar{\omega}t - hz - h_w z$  — фаза электронов относительно синхронной волны,  $h_w = 2\pi/d_w$ ,  $d_w$  — период ондулятора,

$$C = \left( \frac{eI_0}{mc^3} \frac{\lambda^2 \mu K^2}{8\pi\gamma a_0} \right)^{1/3}$$

— параметр усиления (параметр Пирса),  $I_0$  — погонный ток пучка,  $a_0$  — расстояние между пластинами,  $\alpha$  — коэффициент связи волн на двумерной брэгговской структуре, пропорциональный глубине гофрировки  $a_1$  [1,2].

Граничные условия для электронного пучка и парциальных волн, распространяющихся вдоль пучка, т.е. параллельно оси  $z$ , могут быть представлены в виде

$$A_{+,n} \Big|_{z=0} = 0, \quad A_{-,n} \Big|_{z=L_z} = 0, \quad (4)$$

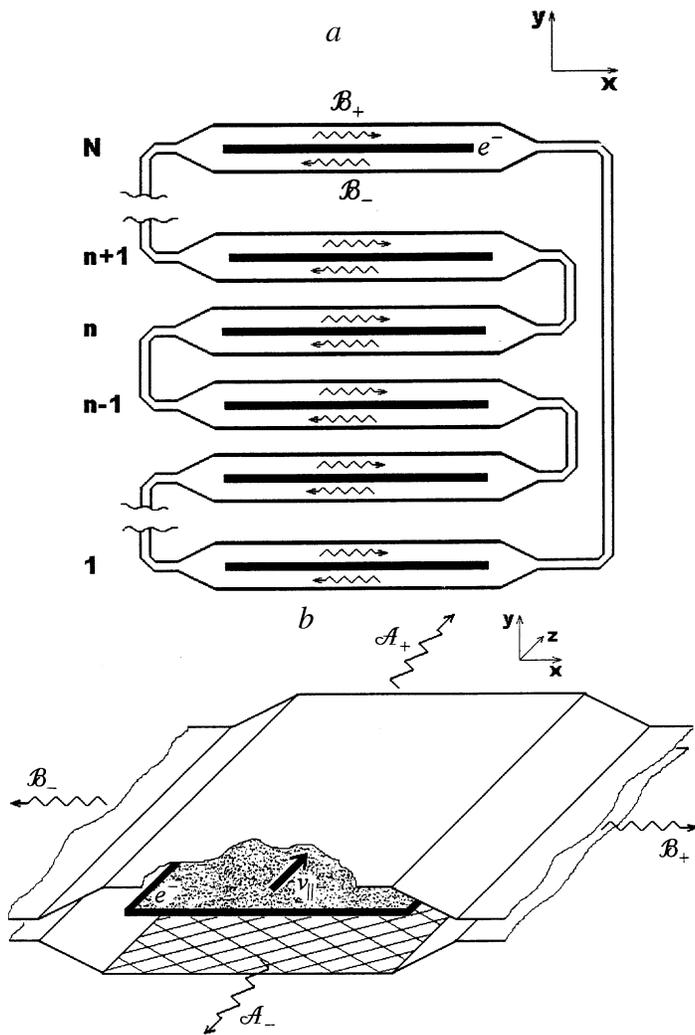
$$\theta_n \Big|_{z=0} = \theta_{0n} \in [0, 2\pi), \quad \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta_n \Big|_{z=0} = \Delta_n, \quad (5)$$

где  $L_z$  — длина модулей,  $\Delta_n = (\bar{\omega} - h\nu_{\parallel} - h_w\nu_{\parallel})/\bar{\omega}C$  — начальная расстройка ондуляторного синхронизма на несущей частоте в  $n$ -й секции. Для парциальных волн, распространяющихся в поперечном направлении и осуществляющих связь различных модулей, граничные условия могут быть представлены в виде

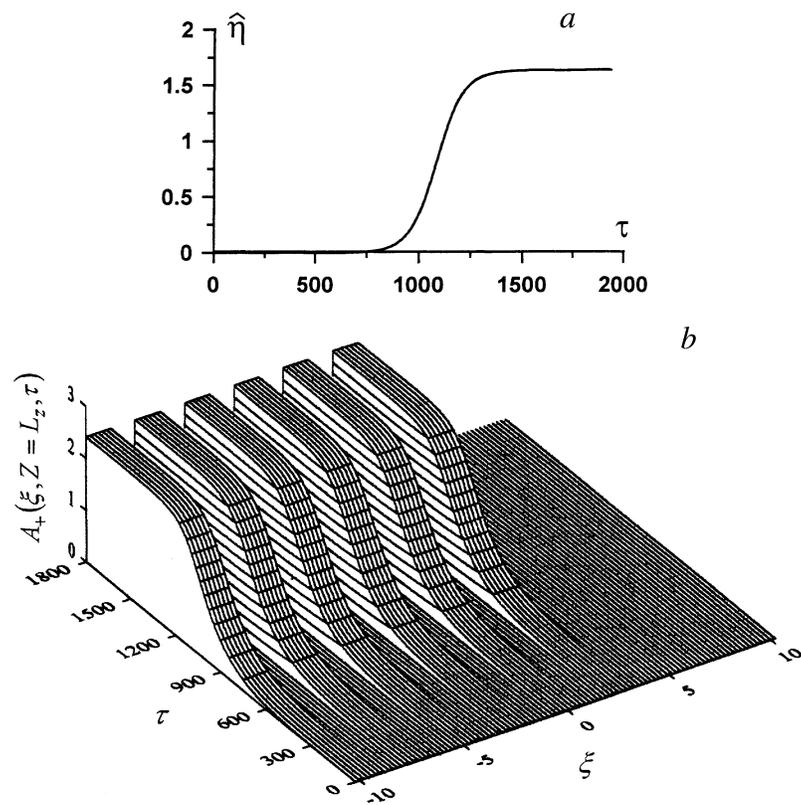
$$\begin{aligned} & \left[ B_{+,n}(\tau) = \Gamma B_{-,n-1}(\tau - T) \right]_{x=0}, \quad \left[ B_{-,n}(\tau) = \Gamma B_{+,n+1}(\tau - T) \right]_{x=L_x}, \\ & \left[ B_{-,N}(\tau) = \Gamma^N B_{+,1}(\tau - NT) \right]_{x=L_x}, \quad \left[ B_{-,1}(\tau) = \Gamma^N B_{+,N}(\tau - NT) \right]_{x=L_x}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $L_x$  — ширина модулей,  $T$  — время запаздывания при распространении сигнала между соседними модулями,  $\Gamma < 1$  — коэффициент омических потерь. При этом для связи между крайними модулями было естественно предположить, что время запаздывания равно  $NT$ , где  $N$  — полное число модулей. Таким образом, различные модули оказываются фактически связанными в кольцо (рис. 10), и процесс синхронизации автоколебаний в системе  $N$  отдельных модулей в значительной степени оказывается аналогичным процессу синхронизации в МСЭ-генераторе с двумерным брегговским резонатором коаксиальной геометрии [3]. Следует также отметить, что подобно МСЭ коаксиальной геометрии наличие омических потерь для волн  $B_{\pm}$  является необходимым условием установления стационарного режима автоколебаний.

3. Моделирование процесса синхронизации МСЭ-модулей проводилось при параметрах, близких к условиям эксперимента, планируемого на ускорителе ЭЛМИ. Осцилляторная скорость  $\beta_{\perp} \approx 0.2 \div 0.25$  сообщалась частицам в активном планарном ондуляторе с периодом 4 см при поперечной составляющей ондуляторного поля до 0.2 Т и ведущем поле около 1 Т. Ширина отдельных пучков принималась равной 15 см при погонном токе  $\sim 200$  А/см. Таким образом, при частоте

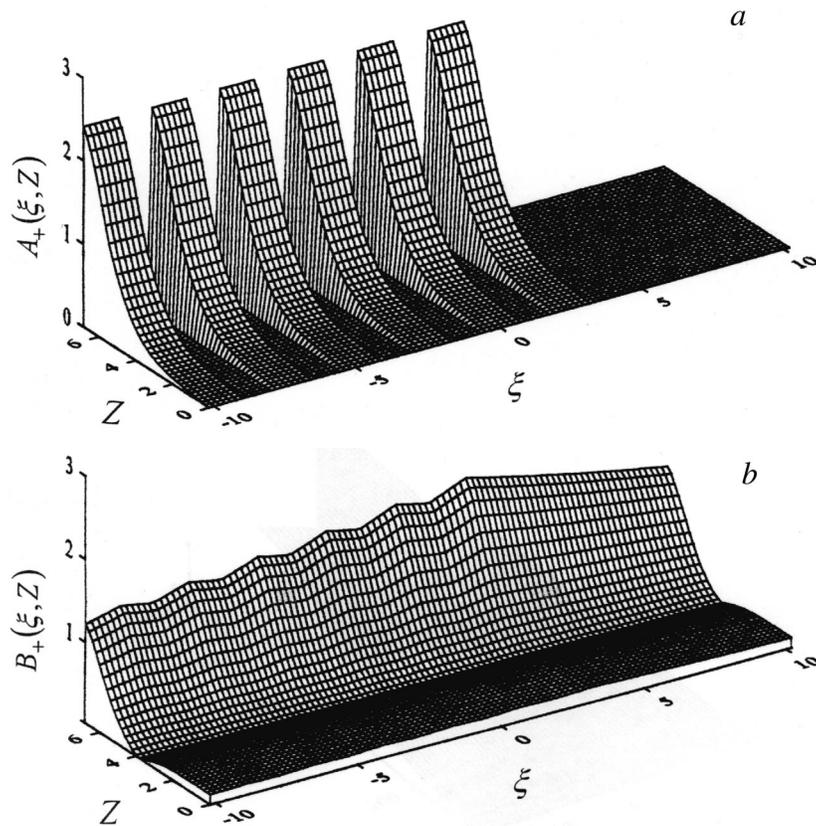


**Рис. 1.** *a* — общая схема многопучкового МСЭ, состоящего из  $N$  планарных модулей (в каждом модуле показано поперечное сечение ленточного РЭП и направление поперечных потоков электромагнитной энергии). *b* — схема отдельного МСЭ-модуля, использующего двумерный брэгговский резонатор и запитываемого ленточным РЭП.



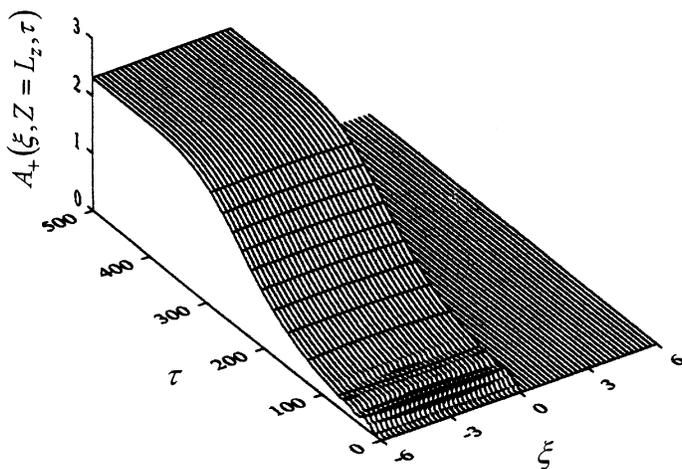
**Рис. 2.** Моделирование процесса установления автоколебаний в 6-модульном ( $N = 6$ ) МСЭ-генераторе. Зависимости от времени (а) нормированного электронного КПД и (б) амплитуды поля на выходе системы  $Z = L_z$  ( $L_z = 6.8$ ,  $L_x = 1.2$ ,  $T = 1.2$ ,  $\alpha = 0.1$ ,  $\Delta = -0.2$ ,  $\Gamma = 0.95$ ).

излучения 75 GHz параметр Пирса был равен  $C \approx 4 \times 10^{-3}$ . На рис. 2, 3 представлены результаты моделирования процесса синхронизации шести генераторных модулей с приведенной нормализованной шириной пространства взаимодействия  $L_x = 1.2$  (что в условиях эксперимента на ЭЛМИ соответствует  $l_x = 20$  см), длиной модулей  $L_z = 6.8$  ( $l_z = 110$  см), нормализованным временем запаздывания



**Рис. 3.** Пространственное распределение амплитуд полей парциальных волн (а)  $\mathcal{A}_+$  и (б)  $\mathcal{B}_+$  в стационарном режиме генерации для параметров МСЭ, соответствующих рис. 2.

$T = 1.2$  (0.67 ns) и коэффициентом омических потерь  $\Gamma \approx 0.95$ . Рис. 2 иллюстрирует процесс установления стационарного режима генерации. Частота генерации в установившемся режиме близка к частоте точного берегового резонанса. На рис. 2, а показана зависимость от времени интегрального по все модулям КПД, на рис. 2, б представлена временная зависимость распределения поля  $A_+$  в выходном сечении  $Z = L_z$ . При



**Рис. 4.** Моделирование процесса установления автоколебаний в односекционном ( $N = 1$ ) планарном МСЭ-генераторе при замыкании в кольцо поперечных электромагнитных потоков. Зависимость от времени амплитуды поля на выходе системы  $Z = L_z$  ( $L_z = 6.8$ ,  $L_x = 6$ ,  $T = 6$ ,  $\alpha = 0.1$ ,  $\Delta = 0$ ,  $\Gamma = 0.95$ ).

этом введена координата  $\xi$ , описывающая распределение поля по общему контуру системы, включая все модули и волноводы связи. На рис. 3 показано пространственное распределение поля синхронной волны  $A_+$  и одной из поперечно распространяющихся волн  $B_+$ , осуществляющих синхронизацию различных модулей.

Важно подчеркнуть, что синхронизация имеет место даже в условиях, когда различные модули запитываются электронными потоками с несколько различающимися энергиями и соответственно имеющими разные значения расстройк синхронизма  $\Delta_n$ . При рассматриваемых геометрических параметрах самовозбуждение и синхронизация различных модулей имела место, пока относительный разброс расстроек составлял до 50% ширины полосы самовозбуждения. Далее автоколебания срывались. Ситуаций, в которых режим синхронизации нарушался и отдельные модули генерировали на разных частотах в проведенном моделировании, не наблюдалось.

4. Отметим в заключение, что поперечная синхронизация излучения в генераторе путем замыкания правого и левого конца пространства взаимодействия может быть эффективна и в случае одного модуля. Как показано в [1–3], использование двумерной РОС позволяет практически неограниченно увеличивать ширину пространства взаимодействия в случае открытых в поперечном направлении систем. Вместе с тем для экспериментальной реализации значительные преимущества имеют закрытые в поперечном направлении системы. В [4] показано, что использование в МСЭ комбинированных резонаторов, составленных из одномерного и двумерного планарных брэгговских зеркал, позволяет отчасти решить эту проблему. Использование дополнительного волновода, замыкающего в кольцо поперечные потоки энергии с правого и левого концов, может рассматриваться в качестве альтернативного решения, достоинством которого является более высокая селективность по поперечному индексу. На рис. 4 показан процесс формирования поперечного распределения амплитуды выходного излучения, при котором устанавливается стационарный режим генерации с частотой, совпадающей с брэгговской частотой.

## Список литературы

- [1] *Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 9. С. 23.
- [2] *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Phelps A.D.R., Konoplev I.V., Robb G.R.M., Cross A.W.* // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. P. 935.
- [3] *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S.* // Opt. Comm. 1994. V. 112. P. 151.
- [4] *Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Аржанников А.В., Синицкий С.Л.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 16. С. 8.
- [5] *Agarin N.V., Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Ivanenko V.G. et al.* // Proc. of the IV Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas". Nizhny Novgorod, Russia, 1999. P. S24.
- [6] *Agarin N.V., Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Ivanenko V.G. et al.* // Abstracts of the 21st Int. FEL Conf. Hamburg, Germany, 1999. P. Mo-O-04.
- [7] *Phelps A.D.R., Cross A.W., Robb G.R.M., Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Konoplev I.V.* // Proc. of 19th Int. FEL Conf. Beijing, China, 1997. P. II-122.