

12

## Генерация мощного узкополосного излучения 75 GHz в мазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью

© А.В. Аржанников, Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский,  
П.В. Калинин, Н.Ю. Песков, А.С. Сергеев,  
С.Л. Сеницкий, В.Д. Степанов, М. Тумм

Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет  
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород  
E-mail: arzhannikov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 9 апреля 2013 г.

Реализован планарный МСЭ-генератор на основе ленточного релятивистского электронного пучка ( $0.8 \text{ MeV}/1 \text{ kA}/4 \mu\text{s}$ ), формируемого ускорителем ЭЛМИ. В качестве электродинамической системы использован комбинированный двухзеркальный резонатор, составленный из входного двумерного и выходного одномерного брэгговских отражателей. Использование двумерной распределенной обратной связи, реализуемой во входной брэгговской структуре, позволило достигнуть стабильного, хорошо воспроизводимого режима одномодовой генерации при поперечном размере системы, составляющем  $\sim 25 \times 2.5$  длин волн. В результате экспериментов на частоте 75 GHz получено узкополосное излучение с шириной спектра  $\sim 20 \text{ MHz}$  в импульсах длительностью  $\sim 100\text{--}200 \text{ ns}$  и мощностью на уровне 30–50 MW.

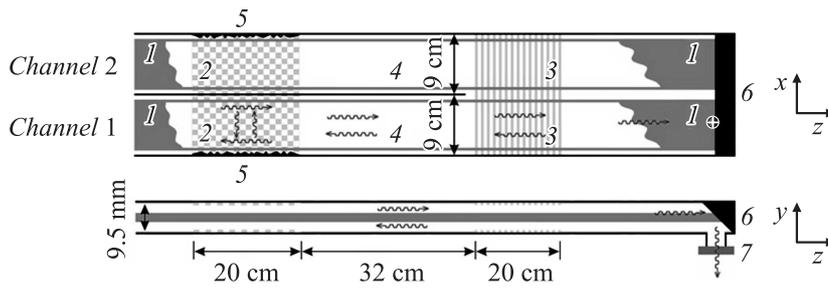
Двумерная распределенная обратная связь (РОС) может рассматриваться как достаточно универсальный метод получения мощного когерентного излучения от пространственно-развитых активных сред различной физической природы, включая релятивистские электронные пучки (РЭП) ленточной и трубчатой конфигурации [1,2]. Данный механизм обратной связи реализуется с помощью двумерных брэгговских резонаторов планарной или коаксиальной геометрии, формируемых секциями соответствующих волноводов с неглубокой двумерно-периодической гофрировкой стенок. Наряду с высокой селективностью

достоинством таких резонаторов является совместимость с каналами транспортировки интенсивных РЭП. Согласно результатам теоретического анализа, возникающие на „двумерной“ гофрировке поперечные (по отношению к движению электронов) потоки электромагнитной энергии синхронизируют излучение различных частей пространственно-развитого РЭП, что позволяет получить устойчивый режим одномодовой генерации при поперечных размерах систем, достигающих  $10^2$ – $10^3$  длин волн [3,4]. Соответственно на базе существующих электронных пучков [5,6] использование двумерной РОС позволяет в перспективе реализовать генераторы направленного когерентного микроволнового излучения с гигаваттным уровнем мощности.

К настоящему времени с помощью „холодных“ электродинамических тестов показана высокая селективность двумерных брэгговских структур при поперечных размерах до 50 длин волн [7]. Принципиальная работоспособность нового механизма обратной связи подтверждена в предшествующих экспериментальных исследованиях мазеров на свободных электронах (МСЭ) планарной [8] и коаксиальной [9] геометрии. Данная статья посвящена демонстрации узкополосного режима генерации в экспериментальном макете МСЭ планарной геометрии, реализованного в ИЯФ СО РАН в сотрудничестве с ИПФ РАН и Исследовательским центром Карлсруэ (Германия).

Экспериментально реализованная схема МСЭ с двумерной РОС изображена на рис. 1. Генератор состоял из двух каналов, пространство взаимодействия которых разделено между собой металлической стенкой. Эти каналы запитывались близкими по параметрам ленточными РЭП 0.8 МэВ/1 кА/4  $\mu$ s, генерируемыми в едином катодном узле ускорителя ЭЛМИ (ИЯФ СО РАН). Пучки формировались в ленточном магнитно-изолированном диоде и транспортировались в сильном (до 1.4 Т) ведущем магнитном поле в вакуумных каналах с поперечным сечением 0.95  $\times$  9 см. Сечение пучков в пространстве взаимодействия составляло 0.4  $\times$  7 см. Поперечное магнитное поле с амплитудой до 0.2 Т создавалось планарным ондулятором с периодом 4 см, имеющим участок плавного пространственного включения длиной 24 см.

Электродинамическая система каждого генератора представляла собой комбинированный двухзеркальный резонатор. Входной (установленный на катодном конце резонатора) двумерный брэгговский отражатель имел длину 20 см и был выполнен из двух медных пластин с двумерной „шахматной“ гофрировкой с глубиной  $a_{2D} = 0.02$  см и периодом по



**Рис. 1.** Схема узкополосного двухканального планарного 75-GHz МСЭ с двумерной РОС, реализованного на основе ускорителя ЭЛМИ: 1 — ленточный электронный пучок, 2 и 3 — входной двумерный и выходной одномерный брэгговские отражатели, 4 — регулярная секция волновода, 5 — рассеиватели поперечных волновых потоков, 6 — графитовый коллектор, 7 — выходное окно. Указаны основные геометрические размеры электродинамической системы. Стрелками показаны направления волновых потоков в одном из каналов.

обоим направлениям  $d_{2D} = 0.4$  см. Основная гармоника Фурье данной гофрировки имеет вид [7]

$$a = \frac{2a_{2D}}{\pi^2} [\cos(\bar{h}_{2D}z - \bar{h}_{2D}x) + \cos(\bar{h}_{2D}z + \bar{h}_{2D}x)] \quad (1)$$

и при выполнении условия „двумерного“ брэгговского резонанса

$$\bar{h}_{2D} \approx h, \quad (2)$$

где  $\bar{h}_{2D} = 2\pi/d_{2D}$ , обеспечивает связь четырех парциальных волновых потоков, распространяющихся во взаимно-перпендикулярных направлениях

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0(y) \operatorname{Re} \left\{ [A_+(x, z)e^{-ihz} + A_-(x, z)e^{ihz} + B_+(x, z)e^{-ihx} + B_-(x, z)e^{ihx}] e^{i\omega t} \right\}. \quad (3)$$

Формируемые в данной структуре поперечные (по отношению к движению пучка) волновые потоки  $B_{\pm}$  осуществляли пространственную синхронизацию излучения широкого ленточного РЭП в поперечном ( $x$ )

направлении. Данные волновые потоки за пределами резонатора рассеивались боковыми стенками (рассеивателями), профиль поверхности которых носил нерегулярный характер.

Выходящая из двумерного отражателя попутная (синхронная) волна  $A_+$  в регулярной части резонатора усиливалась электронным пучком, осциллирующим в комбинированном ондуляторном и однородном продольном ведущем магнитном поле. На выходе резонатора (с коллекторного конца) было установлено традиционное однопериодическое брэгговское зеркало. В экспериментальных условиях указанный отражатель имел гофрировку в форме параллельных прямоугольных канавок с периодом  $d_{1D}$  и основной гармоникой Фурье вида

$$a = \frac{2a_{1D}}{\pi} \cos(h_{1D}z), \quad (4)$$

$\bar{h}_{1D} = 2\pi/d_{1D}$ . Данная структура обеспечивала рассеяние двух встречно-распространяющихся парциальных волн

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0(y) \operatorname{Re} \{ [A_+(x, z)e^{-ihz} + A_-(x, z)e^{ihz}] e^{i\omega t} \} \quad (5)$$

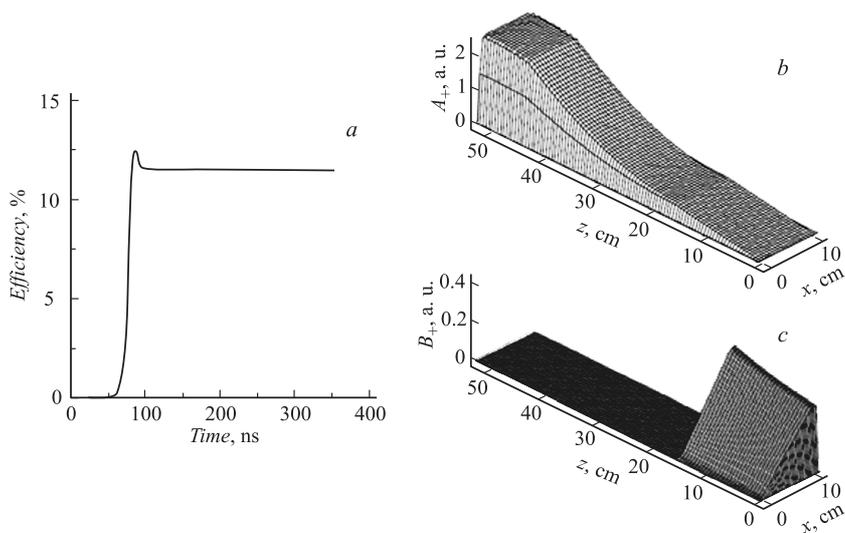
в условиях резонанса

$$\bar{h}_{1D} \approx 2h. \quad (6)$$

Это зеркало переотражало относительно небольшую часть энергии, излученной электронным пучком в катодном направлении, замыкая цепь обратной связи и обеспечивая условия самовозбуждения генератора. Очевидно, для одновременного выполнения условий (2) и (6) период одномерной гофрировки  $d_{1D}$  должен быть вдвое меньше периода двумерной гофрировки  $d_{2D}$ . Таким образом, в экспериментальной реализации МСЭ период гофрировки выходной структуры составлял  $d_{1D} = 0.2$  см, глубина  $a_{1D} = 0.007$  см. Выходной отражатель имел длину 20 см, регулярная часть резонатора — 32 см (рис. 1).

Предварительно было проведено тестирование электродинамических характеристик комбинированного брэгговского резонатора. Измеренные в „холодных“ электродинамических тестах частоты и добротности собственных мод были близки к расчетным, найденным в трехмерном моделировании [8].

После прохождения резонатора ленточный РЭП и генерируемый им СВЧ-импульс транспортировались к коллектору (рис. 1). Развязка



**Рис. 2.** Моделирование процесса установления режима стационарной генерации при оптимальных условиях: *a* — зависимость КПД от времени и *b* — пространственная структура полей парциальных волн  $A_+$  и  $B_+$  в стационарном режиме.

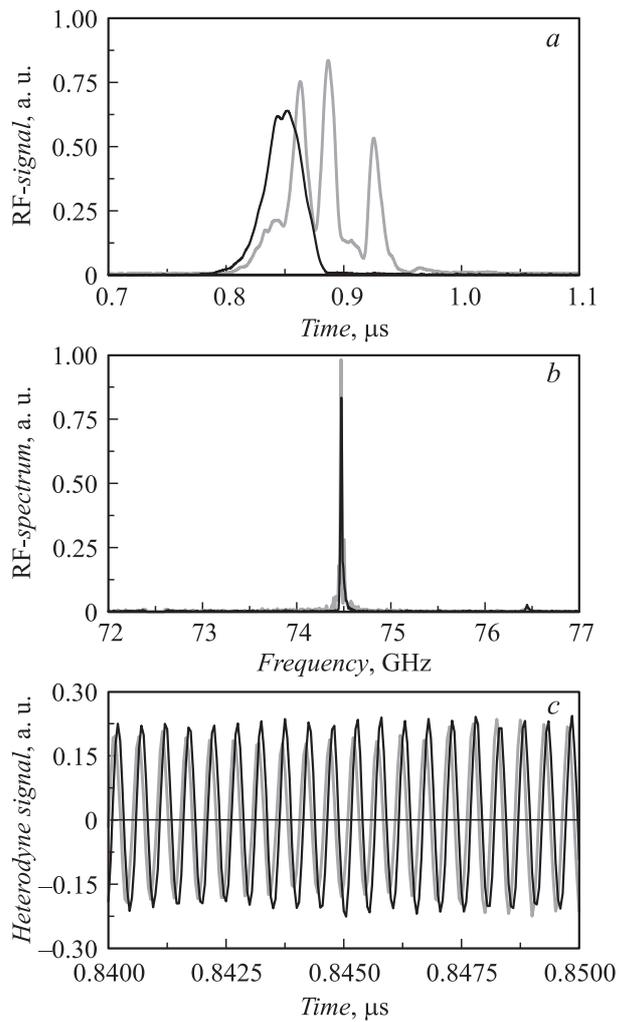
электронного пучка и мощного излучения в каждом канале осуществлялась непосредственно на графитовом коллекторе, плоскость которого была наклонена под углом  $45^\circ$  к направлению движения пучка. Поверхность графита отражала СВЧ-импульс, поворачивая его в поперечном направлении вдоль оси  $y$ . Вывод излучения из каждого канала осуществлялся через окно, изготовленное из тефлона.

Теоретический анализ планарного МСЭ-генератора с двумерной РОС проводился в рамках модели, основанной на методе связанных волн, которая детально описана в [3,4,8]. На рис. 2 приведены результаты моделирования процесса установления автоколебаний при параметрах пучка и электродинамической системы, близких к экспериментальному макету. Анализ пространственного распределения выходного излучения демонстрирует полную фазовую корреляцию полей в различных точках, что соответствует синхронизации излучения отдельных

фракций ленточного электронного потока. Важно подчеркнуть, что распределение поля электромагнитной волны по поперечной координате  $x$  формируется двумерной брэгговской структурой, и для синхронной с электронным потоком парциальной волны  $A_+$  это распределение практически однородно (рис. 2, *b*), что обеспечивает одинаковые условия энергообмена для всех фракций электронного пучка и относительно высокий КПД.

В экспериментах по генерации СВЧ-импульсов регистрировались параметры электронного пучка, спектральные характеристики излучения, а также динамика выводимого световодами оптического свечения плазмы, возникающей на различных участках канала транспортировки сильноточного РЭП. Анализ спектра микроволнового излучения в каждом канале МСЭ осуществлялся с помощью гетеродинной измерительной системы. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на ускорительном диоде, тока электронного пучка и сигнала с ВЧ-детектора представлены на рис. 3. Заметный уровень СВЧ-сигнала на детекторе наблюдался, когда ток пучка превышал 0.5–0.6 кА, что хорошо соответствует расчетной величине стартового тока генератора. Зависимость мощности излучения от величины ондуляторного поля имела достаточно четко выраженный оптимум и хорошо соответствовала расчетам. Спектр излучения в согласии с результатами моделирования при рабочих параметрах пучка демонстрировал стабильную узкополосную генерацию в окрестности частоты 75 GHz, что соответствовало возбуждению одной из мод комбинированного брэгговского резонатора (в большинстве импульсов возбуждалась мода, имеющая минимальную частоту в полосе брэгговских отражений). Длительность СВЧ-импульсов составляла  $\sim 100$ – $200$  ps. Ширина спектра излучения была близка к естественной ширине для импульсов данной длительности. Шумовая компонента составляла менее 25 dB.

На основании анализа временного поведения плазмы в канале, регистрируемого с помощью свечения световодов, было установлено, что ограничение полной длительности сигнала СВЧ-излучения связано с возникновением плазмы в коллекторной части пространства взаимодействия. Полная мощность излучения на уровне  $\sim 3$ – $50$  MW в каждом канале была оценена по показаниям калориметра. Диаграмма направленности выходного излучения определялась по свечению табло из неоновых ламп, которое устанавливалось на различных расстояниях от выходного окна генератора.



**Рис. 3.** Результаты экспериментальных исследований: *a* — типичные осциллограммы напряжения на диоде, тока пучка и СВЧ-импульсов в различных каналах; *b* — спектры излучения, демонстрирующие стабильность частоты излучения; *c* — фрагменты сигналов со смесителей, демонстрирующие синхронизацию фазы излучения между каналами (черные кривые — канал № 1, серые кривые — канал № 2).

Таким образом, совокупность проведенных теоретических и экспериментальных исследований демонстрирует работоспособность нового механизма обратной связи и возможность его использования для пространственной синхронизации излучения двумерных активных сред. Следует отметить, что в реализованном макете планарного МСЭ с двумерной РОС устойчивый режим узкополосной одномодовой генерации достигнут при поперечном размере системы  $\sim 25 \times 2.5$  длин волн, что по степени сверхразмерности сопоставимо с электродинамическими системами современных мегаваттных гиротронов [10–13]. С другой стороны, достигнутый энергозапас в СВЧ-импульсе на уровне  $\sim 3\text{--}7\text{ Дж}$  превосходит известные авторам аналоги в классе релятивистских импульсных генераторов 4-мм диапазона длин волн.

Отметим в заключение, что в качестве дальнейшего развития обсуждаемых экспериментов предполагается удаление металлической стенки между каналами с целью тестирования возможности синхронизации излучения двух параллельных ленточных РЭП путем использования двумерной РОС. Следует отметить, что уже в описанных выше экспериментах (в двухканальной схеме, представленной на рис. 1) синхронизация излучения из обоих каналов наблюдалась за счет их слабой дифракционной связи в коллекторном узле (рис. 3, с).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта правительства РФ (№ 11.G34.31.0033), грантов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 12-08-31491, 13-08-01075, 13-08-01281 и 13-02-01037), гранта президента РФ для молодых ученых (МК-7314.2013.2), а также фонда „Династия“.

## Список литературы

- [1] *Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю.* и др. // Труды IX Междунар. симпоз. по сильноточной электронике. Екатеринбург–Москва, Россия, 1992. Т. 1. С. 205.
- [2] *Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 9. С. 23.
- [3] *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S.* et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 60 (1). P. 935.
- [4] *Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Песков Н.Ю., Сергеев А.С.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 3.

- [5] *Бастриков А.Н., Бугаев С.П., Киселев И.Н.* и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 3. С. 483.
- [6] *Arzhannikov A.V., Nikolaev V.S., Sinitsky S.L., Yushkov M.V.* // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. (4). P. 1657.
- [7] *Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 3. С. 46.
- [8] *Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю.* // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87 (11). С. 715.
- [9] *Konoplev I.V., Cross A.W., Phelps A.D.R.* et al. // Phys. Rev. E. 2007. V. 76. P. 056406.
- [10] *Litvak A.G., Denisov G.G., Myashikov V.E.* et al. // Int. J. Infrared, Mm and THz Waves. 2011. V. 32. P. 337.
- [11] *Sakamoto K., Kasugai A., Kajiwara K.* et al. // Nuclear Fusion. 2009. V. 49. P. 095019.
- [12] *Piosczyk B., Dammertz G., Dumbrajs O.* et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2004. V. 32. P. 853.
- [13] *Blank M., Felch K., Borchard P.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. P. 867.