

# Генерация пространственно-когерентного излучения в лазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью

А. В. Аржанников<sup>+\*1)</sup>, Н. С. Гинзбург\*, В. Ю. Заславский\*, В. Г. Иваненко<sup>+</sup>, И. А. Иванов<sup>+</sup>, П. В. Калинин<sup>+</sup>, А. С. Кузнецов<sup>+</sup>, С. А. Кузнецов<sup>+\*</sup>, Н. Ю. Песков\*, А. С. Сергеев\*, С. Л. Синицкий<sup>+\*</sup>, В. Д. Степанов<sup>+\*</sup>

<sup>+</sup>Институт ядерной физики им. Будкера Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия

\*Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

\*Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 14 марта 2008 г.

После переработки 7 мая 2008 г.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по генерации пространственно-когерентного электромагнитного излучения в планарном лазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью. Для поперечной синхронизации излучения использована двумерная брэгговская структура, установленная на начальном участке пространства взаимодействия. В диапазоне 75 ГГц на основе указанного механизма при ширине ленточного килоамперного электронного пучка, в 20 раз превышающей длину волны, экспериментально показана возможность узкополосной генерации.

PACS: 41.60.Cg, 42.55.Tv, 52.59.Rz, 84.40.Ik

1. Экспериментальная реализация в ИЯФ СО РАН микросекундных килоамперных релятивистских электронных пучков с высокой яркостью и энергозапасом в десятки и сотни килоджоулей [1] стимулировала использование таких уникальных пучков для возбуждения сильной турбулентности в плазме с целью достижения условий протекания термоядерных реакций [2], а также для генерации мощного когерентного электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. В рамках генераторных приложений важной особенностью упомянутых пучков является их ленточная геометрия, при которой один из поперечных размеров, достигающий 1.5 м, уже в миллиметровом диапазоне на несколько порядков превосходит длину волны. В этой связи, разработка генераторов когерентного излучения на основе подобных пучков требует принципиально новых подходов для обеспечения пространственной синхронизации излучения. Для решения данной задачи было предложено использовать двумерную распределенную обратную связь (РОС), реализуемую с помощью двоякопериодических брэгговских структур [3, 4]. Этот механизм можно рассматривать как развитие широко используемой в квантовой и классической электронике одномерной РОС на ос-

нове одномерных (однопериодических) брэгговских структур [5–7].

В традиционном варианте одномерная обратная связь реализуется за счет брэгговского рассеяния двух встречных волн, распространяющихся в попутном и встречном по отношению к поступательной скорости частиц направлениях. Новый принцип предполагает включение в цепь обратной связи четырех парциальных волновых потоков:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \text{Re} \left\{ \left[ A_+ e^{-ihz} + A_- e^{ihz} + B_+ e^{-ihx} + B_- e^{ihx} \right] \cdot e^{i\omega t} \right\}, \quad (1)$$

два из которых ( $A_{\pm}$ ) распространяются соосно с пучком в  $\pm z$  направлениях, а два других ( $B_{\pm}$ ) – в поперечных  $\pm x$  направлениях, синхронизуя излучение отдельных частей широкого ленточного электронного пучка. Это открывает возможность генерации когерентного излучения с высокой интегральной мощностью при умеренной плотности пучков и плотности потока энергии. Описанная схема рассеяния реализуется в двумерных брэгговских структурах, представляющих собой две параллельные металлические пластины, внутренние поверхности которых гофрированы по закону

<sup>1)</sup>e-mail: a.v.arzhannikov@inp.nsk.ru

$$a = \frac{a_{2D}}{4} [\cos \bar{h}_{2D}(z-x) + \cos \bar{h}_{2D}(z+x)], \quad (2)$$

где глубина гофра  $a_{2D}$  много меньше зазора между пластинами  $a_0$ , который составляет несколько длин волн  $\lambda$ . Эффективное рассеяние парциальных волн (1) имеет место при выполнении условия брэгговского резонанса, при котором значения волновых чисел парциальных волн  $h$  совпадают с проекциями трансляционных векторов брэгговской решетки  $\bar{h}_{2D}^\pm = \bar{h}_{2D}x_0 + \bar{h}_{2D}z_0$  на  $x$  и  $z$  направления (рис.1b), где  $|\bar{h}_{2D}^\pm| = 2\pi/d_{2D}$ ,  $d_{2D}$  – период гофрировки,  $\bar{\omega} =$

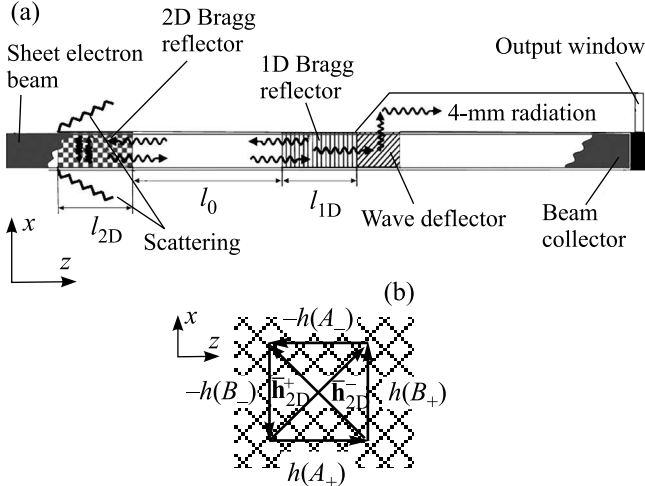


Рис.1. Схема экспериментально реализованного МСЭ с двумерной РОС (а) и диаграмма, иллюстрирующая процесс рассеяния парциальных волн на двумерной брэгговской структуре (b)

$= \bar{h}_{2D}c$  – брэгговская частота, которая выбрана в (1) в качестве несущей. Дополнительным достоинством указанных структур является возможность обеспечения устойчивой, близкой к равновесной, транспортировки сильноточных ленточных пучков [1].

Проведенные теоретические исследования мазеров на свободных электронах (МСЭ) с двумерной РОС показали, что этот механизм может быть использован для пространственной синхронизации излучения, генерируемого как ленточными, так и трубчатыми электронными пучками [4, 8]. В данной работе приводятся результаты исследований 75 ГГц планарного МСЭ, в которых экспериментально реализован режим узкополосной одномерной генерации. Для демонстрации работоспособности нового механизма обратной связи использован моделирующий ленточный пучок с шириной около 20 длин волн. Следует отметить, что практически одновременно аналогичный режим получен в коаксиальной схеме 37 ГГц МСЭ с двумерной РОС с периметром пучка порядка 25 длин волн [8, 9].

2. Принципиальная схема экспериментально реализованного планарного МСЭ изображена на рис.1. Электродинамическая система генератора представляет собой гибридный резонатор, составленный из двух разных по характеру работы брэгговских структур: двумерной – на входе пучка в резонатор и одномерной – на выходе системы. Пространственная синхронизация излучения в поперечном ( $x$ ) направлении осуществляется во входном отражателе за счет описанной выше схемы связи четырех волновых потоков (1). Вытекающая из двумерного отражателя попутная волна в регулярной части резонатора усиливается электронным пучком, осциллирующим в комбинированном ондуляторном и однородном продольном ведущем магнитном поле. На выходе установлено традиционное одномерное брэгговское зеркало, которое отражает относительно небольшую часть энергии в катодном направлении, замыкая цепь обратной связи и создавая условия самовозбуждения генератора.

Динамика МСЭ с двумерной РОС описывается системой уравнений для амплитуд парциальных волновых потоков  $A_\pm$ ,  $B_\pm$ , испытывающих взаимное рассеяние на двумерной брэгговской структуре (2) [4]:

$$\begin{cases} \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) A_+ + i\alpha_{2D} (B_+ + B_-) = J, \\ \left( \frac{\partial}{\partial Z} - \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) A_- + i\alpha_{2D} (B_+ + B_-) = 0, \\ \left( \frac{\partial}{\partial X} \pm \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) B_\pm + i\alpha_{2D} (A_+ + A_-) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Синхронная с частицами попутная волна  $A_+$  возбуждается электронным потоком. Фактор возбуждения – высокочастотный ток  $J = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$  – находится из решения усредненных уравнений движения, записанных для фаз электронов  $\theta$  относительно синхронной волны [10]

$$\left( \frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \text{Re} \{ A_+ e^{i\theta} \} \quad (4)$$

с граничными условиями

$$\theta \Big|_{z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta \Big|_{z=0} = \Delta.$$

В выходном отражателе (рис.1) присутствуют только две парциальные волны, взаимное рассеяние которых на одномерной брэгговской структуре  $a = a_{1D} \cos(\bar{h}_{1D}z)$  ( $\bar{h}_{1D} = 2\pi/d_{1D}$ ,  $d_{1D}$  – период структуры) описывается уравнениями

$$\left( \frac{\partial}{\partial Z} \pm \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) A_\pm + i\alpha_{1D} A_\mp = 0. \quad (5)$$

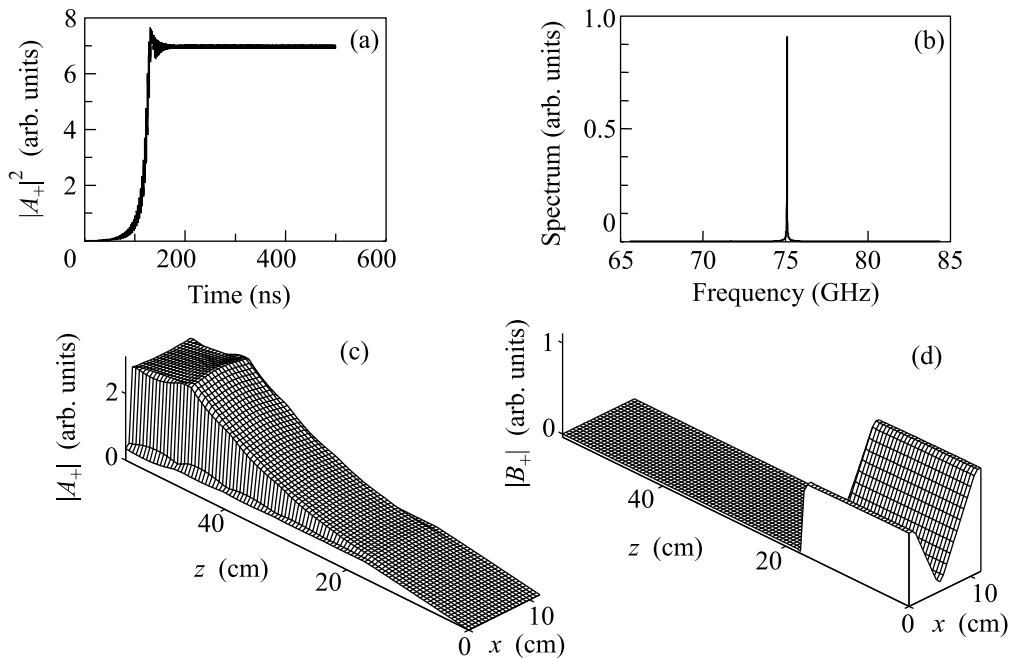


Рис.2. Моделирование процесса синхронизации излучения в планарном МСЭ с комбинированным резонатором, составленным из одномерного и двумерного брэгговских зеркал. Зависимость нормированной выходной мощности  $|A_+|^2$  от времени в условиях установления одноимодовой одночастотной генерации (а), спектр выходного излучения (б) и пространственная структура полей парциальных волн  $|A_+|$  и  $|B_+|$  (с), (д) в стационарном режиме

При записи (3)–(5) использованы следующие нормированные переменные:  $Z = zC\bar{\omega}/c$ ,  $X = xC\bar{\omega}/c$ ,  $\tau = tC\bar{\omega}$ ,  $(A_{\pm}, B_{\pm}) = (A_{\pm}, B_{\pm}) \cdot e\kappa\mu/\gamma mc\bar{\omega}C^2$ ,  $\gamma$  – релятивистский масс-фактор,  $\nu_{gr} = \beta_{gr}c$  – групповая скорость волн,  $\kappa = \nu_{\perp}/\nu_{\parallel}$  – параметр связи электронов с волной,  $\nu_{\perp}$  – поперечная скорость частиц в ондуляторном поле,  $\nu_{\parallel} = \beta_{\parallel}c$  – поступательная скорость частиц,  $\mu \approx \gamma^{-2}$  – параметр инерционной группировки [6],  $\Delta$  – начальная расстройка синхронизма электронов с волной на несущей частоте,  $C = (I_0\lambda^2\mu\kappa^2/8\pi I_a\gamma a_0)^{1/3}$  – параметр усиления,  $I_0$  – погонный ток пучка,  $I_a = mc^3/e$  – альфвеновский ток,  $\alpha_{2D,1D}$  – коэффициенты связи волн на двумерной [4] и одномерной [6] брэгговских структурах соответственно. Усиление синхронной волны  $A_+$  в регулярной секции резонатора описывается уравнениями (3), (4), где с учетом отсутствия рассеяния волн следует положить  $\alpha = 0$ . При моделировании предполагалось, что внешние потоки энергии отсутствуют, то есть амплитуды парциальных волновых потоков на соответствующих границах равны нулю.

На рис.2 показаны результаты моделирования процесса генерации и пространственной синхронизации излучения в условиях, близких к экспериментальным как по конфигурации электродинамической

системы, так и по параметрам электронного пучка (см. п.3). Наиболее принципиальным результатом является вывод о том, что при произвольном задании начальной шумовой модуляции электронного потока, либо малых начальных возмущений электромагнитных полей в процессе развития автоколебаний устанавливается заданное пространственное распределение полей, определяемое только параметрами системы и не зависящее от начальных условий. При этом фронт выходного излучения, ассоциированный с волной  $A_+$ , имеет детерминированное (то есть не случайное) фазовое распределение по поперечной координате  $X$ . С точки зрения нелинейной динамики это означает синхронизацию излучения отдельных фракций ленточного электронного потока с помощью входной брэгговской структуры, связывающей продольные и поперечные потоки энергии. Важно также подчеркнуть, что в стационарном режиме генерации распределение поля синхронной электронному потоку парциальной волны  $A_+$  практически однородно по координате  $X$  (см. рис.2с), что обеспечивает одинаковые условия энергоотдачи для всех фракций пучка. При изменении энергии электронов, то есть изменении параметра  $\Delta$ , частота генерируемого излучения изменялась скачкообразно, что соответствовало возбуждению мод с различ-

ным числом вариаций поля по продольной координате  $Z$ .

3. Новая схема МСЭ была реализована на базе ускорителя ЭЛМИ. Ленточный релятивистский электронный пучок с сечением  $0.4 \times 7$  см, энергией электронов 0.8 МэВ и током до 3 кА генерировался в ленточном вакуумном магнитно-изолированном диоде и транспортировался в сильном (до 1.4 Тл) ведущем магнитном поле в планарном вакуумном канале с сечением  $0.95 \times 10$  см. Поперечная (ондуляторная) компонента магнитного поля имела период 4 см и амплитуду до 0.2 Тл. Резонатор мазера состоял из входного двумерного и выходного одномерного брэгговских отражателей, соединённых отрезком регулярного волновода длиной  $l_0 = 32$  см (см. рис.1). Входной отражатель, составленный из двух медных пластин с двумерной “шахматной” гофрировкой, имел длину  $l_{2D} = 19$  см, глубину гофрировки 0.02 см и период по координатам  $x$  и  $z$  0.4 см (период по диагоналям  $d_{2D} = 0.28$  см). Проведенные измерения показали [11], что брэгговские решетки с “шахматной” гофрировкой поверхности по своим электродинамическим характеристикам близки к решеткам с двумерной синусоидальной гофрировкой (2). Поперечные потоки энергии, возникающие в двумерном брэгговском отражателе, рассеивались за пределами резонатора дополнительными металлическими пластинами (рассеивателями), профиль поверхности которых носил нерегулярный характер. Поскольку основное усиление излучения электронным потоком имело место после двумерного зеркала (см. рис.2с), то энергетические потери, связанные с этим рассеянием, достаточно малы. Выходной брэгговский отражатель длиной  $l_{1D} = 19$  см имел гофрировку в виде параллельных прямоугольных канавок с периодом 0.2 см и глубиной 0.007 см. Предварительно было проведено тестирование электродинамических характеристик комбинированного брэгговского резонатора. Измеренные частоты и добротности собственных мод оказались близки к расчетным [12].

В выходной части генератора для вывода излучения был использован брэгговский дефлектор [12], который отклонял излучение в параллельный канал (см. рис.1а). Таким образом осуществлялась развязка выходного канала излучения и канала сброса электронного пучка. Дефлектор представлял собой периодическую структуру, трансляционный вектор которой составлял  $45^\circ$  с осью системы. При этом специальная оптимизация области, занятой гофрировкой, обеспечивала эффективность вывода излучения до 90% на частоте брэгговского резонанса, а также формирова-

ла структуру выходного излучения, близкую к  $H_{1,0}$  волне прямоугольного волновода.

В экспериментах по генерации СВЧ импульсов регистрировались параметры электронного пучка, частотные характеристики излучения, а также выводимого световодами оптического свечения плазмы, возникающей на различных участках канала транспортировки высокоэнергетического релятивистского электронного пучка. Для прецизионного анализа спектра микроволнового излучения мазера была использована гетеродинная измерительная система с разрешением по частоте  $\pm 10$  МГц. Для определения знака смещения фурье-компонент сигнала промежуточной частоты относительно задающей частоты гетеродина на входе гетеродинной диагностики был установлен дополнительный оригинальный полосовой интерференционный фильтр на скрещенных сеточных поляризаторах [13].

Типичные осциллограммы импульсов напряжения на ускорительном диоде, тока электронного пучка и сигнала с детектора 4-миллиметрового излучения представлены на рис.3а. Заметный уровень СВЧ

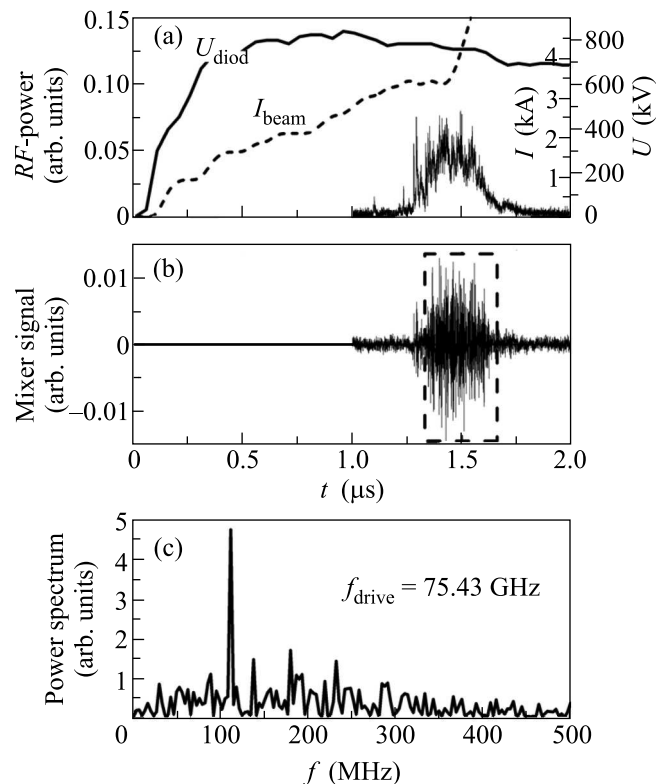


Рис. 3. Типичные осциллограммы напряжения на диоде  $U_{\text{diode}}$ , тока пучка  $I_{\text{beam}}$  и СВЧ-импульса (а), сигнала со смесителя (б) и спектра излучения (с)

сигнала на детекторе наблюдался, когда ток пучка превышал 1 кА, что хорошо соответствует расчетной

величине стартового тока генератора. Установка рассеивателей поперечных волновых потоков в двумерном брэгговском зеркале позволила в большом количестве импульсов получить узкополосную генерацию с частотой, близкой к частоте одной из мод гибридно-го брэгговского резонатора. Так, представленный на рис.3б,с, гетеродинный анализ демонстрирует, что в течение практически всей длительности 300-нс импульса спектр излучения сосредоточен в окрестности частоты 75.3 ГГц, чему соответствует возбуждение единственной моды резонатора. В ряде других выстрелов наблюдалась генерация на частотах 74.9, 75.1 и 75.5 ГГц, соответствующих возбуждению других продольных мод резонатора. Зарегистрировано также одновременное возбуждение нескольких продольных мод. Согласно результатам моделирования, возможность возбуждения различных мод обусловлена изменением энергии электронов и тока пучка в течение импульса, а также нестабильностью параметров пучка от импульса к импульсу. На основании анализа временного поведения свечения плазмы в канале установлено, что ограничение полной длительности СВЧ сигнала связано с приходом коллекторной плазмы на дефлекторе излучения. Полная мощность излучения на уровне нескольких десятков мегаватт была оценена по показаниям калориметра и сигналам с калиброванных детекторов на горячих носителях с учетом диаграммы направленности выходного излучения, которая определялась по свечению табло из не-

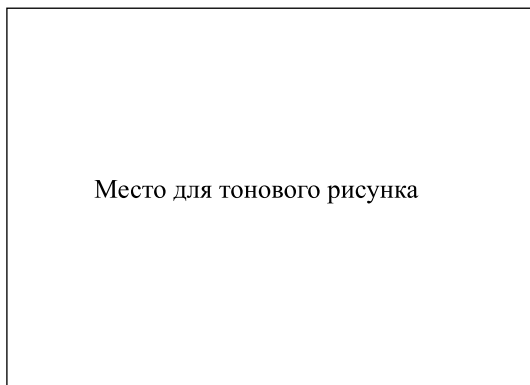


Рис.4. Фотография свечения табло неоновых ламп под воздействием СВЧ-импульса

оновых ламп (рис.4), устанавливаемом на различном расстоянии от выходного окна генератора. При этом

структура поля выходного излучения, близкая к  $H_{1,0}$  волне, подтверждает результаты теоретического анализа об однородном по поперечному сечению распределении поля попутной волны на выходе из пространства взаимодействия.

Таким образом, совокупность проведенных теоретических и экспериментальных исследований демонстрирует работоспособность нового механизма обратной связи и возможность его использования для генерации мощного узкополосного излучения. Важно подчеркнуть, что двумерная РОС может быть использована для пространственной синхронизации излучения не только электронных потоков, но и других неравновесных активных сред, включая лазерные среды [14].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и фонда "Династия".

1. A. V. Arzhannikov, V. B. Bobylev, V. S. Koidan et al., *Trans. of Fusion Technology* **35**, 136 (1999).
2. А. В. Аржанников, В. Т. Астрелин, А. В. Бурдаков и др., *Письма в ЖЭТФ* **77**, 426 (2003).
3. N. S. Ginzburg, N. Yu. Peskov, and A. S. Sergeev, *Opt. Comm.* **96**(4-6), 254 (1993).
4. N. S. Ginzburg, N. Yu. Peskov, A. S. Sergeev et al., *Phys. Rev. E* **60**, 935 (1999).
5. A. Yariv, *Quantum Electronics*, Wiley, N.Y., 1975.
6. V. L. Bratman, G. G. Denisov, N. S. Ginzburg, and M. I. Petelin, *IEEE J. Quant. Electr.* **QE-19**, 282 (1983).
7. И. Е. Ботвинник, В. Л. Братман, А. Б. Волков и др., *Письма в ЖЭТФ* **35**, 418 (1982).
8. I. V. Konoplev, A. W. Cross, A. D. R. Phelps et al., *Phys. Rev. E* **76**, 056406 (2007).
9. I. V. Konoplev, P. McGrane, W. He et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 035002 (2006).
10. В. Л. Братман, Н. С. Гинзбург, М. И. Петелин, *Письма в ЖЭТФ* **9**, 207 (1978).
11. N. Yu. Peskov, N. S. Ginzburg, G. G. Denisov et al., *Opt. Comm.* **187**, 311 (2001).
12. А. В. Аржанников, Н. С. Гинзбург, В. Ю. Заславский и др., *Вестник НГУ, Физика* **1**, 71 (2006).
13. А. В. Аржанников, С. А. Кузнецов, С. Л. Синицкий, *ЖТФ* **72**, 102 (2002).
14. В. Р. Барышев, Н. С. Гинзбург, А. С. Сергеев, *Письма в ЖТФ* **34**, 47 (2008).