

А. В. Аржанников<sup>1,2</sup>, Н. С. Гинзбург<sup>3</sup>, В. Ю. Заславский<sup>3</sup>, В. Г. Иваненко<sup>2</sup>,  
И. А. Иванов<sup>2</sup>, П. В. Калинин<sup>2</sup>, А. С. Кузнецов<sup>2</sup>, С. А. Кузнецов<sup>2</sup>, Н. Ю. Песков<sup>3</sup>,  
А. С. Сергеев<sup>3</sup>, С. Л. Сеницкий<sup>1,2</sup>, В. Д. Степанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630092, Россия

<sup>3</sup>Институт прикладной физики РАН  
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603000, Россия  
E-mail: Arzhannikov@inp.nsk.su

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНОМ МАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С КОМБИНИРОВАННЫМ БРЭГГОВСКИМ РЕЗОНАТОРОМ \*

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по генерации электромагнитного излучения в планарном мазере на свободных электронах в условиях двумерной распределенной обратной связи. В эксперименте доказана возможность одночастотной генерации на решеточных модах двумерного отражателя при килоамперных токах пучка мэвных электронов.

### Введение

Авторы данной статьи ведут исследования по генерации мощных импульсов 4-миллиметрового излучения в мазере на свободных электронах (МСЭ) с накачкой колебаний сильноточным ленточным релятивистским электронным пучком (РЭП) с начала 1990-х гг. [1–4]. Применение планарной геометрии в схеме МСЭ позволяет снять ограничение на величину тока пучка в генераторе излучения, которое обусловлено собственным пространственным зарядом электронов пучка. Это дает возможность доведения тока пучка в генераторе до уровня 30–50 кА при энергии электронов масштаба 1 МэВ, что обеспечивает мощность генератора в несколько гигаватт. В случае планарной геометрии наращивание тока в генераторе достигается прямым увеличением ширины ленточного пучка, генерируемого в одном ускорительном диоде, например, до

1,5 м, как это сделано на ускорителе У-2 [5], либо созданием многопучкового ускорительного диода, в котором осуществляется генерация нескольких одинаковых ленточных пучков с поперечными размерами каждого из них масштаба  $1 \times 20 \text{ см}^2$  [6]. Для достижения пространственной когерентности миллиметрового излучения, генерируемого в планарном МСЭ, в котором один из поперечных размеров пучка на порядок величины и более превышает длину волны излучения, ключевой задачей является обеспечение синхронизма между электромагнитными колебаниями, излучаемыми различными точками в поперечном сечении пучка. Для решения этой проблемы в случае планарного МСЭ нами предложено использовать двумерную распределенную обратную связь (РОС) [3; 7; 8], которая реализуется за счет постановки в резонатор мазера в качестве отражателя миллиметровых волн

\* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках программы РАН «Физика микроволн», программы Отделения РАН «Проблемы радиофизики» и программы Президиума РАН «Наносекундная релятивистская электроника большой мощности», а также за счет грантов РФФИ № 05-02-17036, № 06-08-01506, гранта ФРГ № Rus 02/042, гранта INTAS 2192.

Авторы выражают особую признательность профессору Манфреду Тумму (Исследовательский центр Карлсруэ, Германия), а также профессору Алану Фелпсу (Страсклайдский университет, Глазго, Великобритания) за сотрудничество в исследованиях.

пары брэгговских решеток с двумерной нарезкой поверхности. В частности, такие пары решеток могут располагаться на входном и выходном участках резонатора планарного МСЭ, который является одновременно и вакуумным каналом для транспортировки ленточного РЭП. В таком резонаторе двумерная РОС реализуется путем взаимного рассеяния на гофрированной поверхности входного двумерного отражателя встречной по отношению к электронному пучку волны в волну, распространяющуюся поперек пучка, которая в свою очередь рассеивается на той же гофрировке в попутную к пучку волну. Кольцо обратной связи замыкается в выходном отражателе, в котором попутная волна отражается во встречную.

Для достижения высокой селективности по модам резонатора МСЭ двумерные брэгговские структуры должны быть открыты в поперечном направлении [8; 9]. Это приводит к заметным потерям энергии электромагнитной волны и, следовательно, к снижению добротности резонатора. Для снижения этих потерь было предложено использование комбинированного резонатора, составленного из двумерного входного и одномерного выходного брэгговских отражателей, соединенных секцией регулярного волновода [10]. В этом случае усиление попутной ЭМ-волны, находящейся в синхронизме с электронами пучка, происходит главным образом в регулярной секции резонатора, не имеющей гофрировки стенок, и на участке, занятом выходным одномерным брэгговским рефлектором. В результате амплитуда поперечно распространяющихся парциальных электромагнитных волн внутри входного двумерного отражателя становится относительно

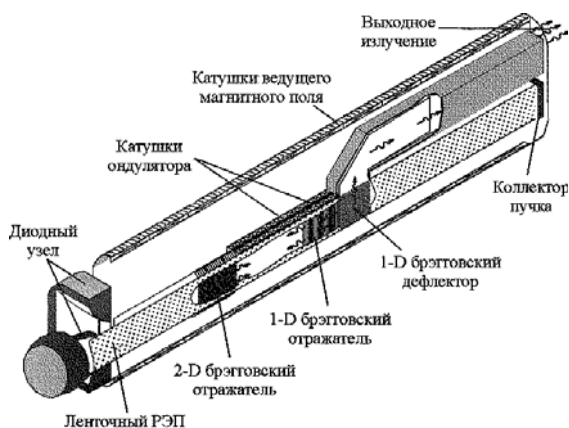


Рис. 1. Схематическое изображение планарного МСЭ, установка ЭЛМИ

небольшой, и потери энергии электромагнитной волны существенно снижаются. Также значительно снижается и вероятность внутрирезонаторного СВЧ-пробоя в сравнении с закрытым планарным резонатором, составленным только из двумерных отражателей. В то же время пространственная когерентность излучения от сверхразмерного электронного пучка по-прежнему может быть достигнута благодаря наличию поперечных потоков энергии внутри входного двумерного отражателя.

В настоящей статье представлены результаты серии экспериментальных исследований по генерации 4-миллиметрового излучения в планарном МСЭ с комбинированным брэгговским резонатором, которые проводятся в ИЯФ на установке ЭЛМИ.

### Планарный мазер и его электродинамическая система

Схема планарного МСЭ, реализуемая на установке ЭЛМИ, представлена на рис. 1, геометрия электродинамической системы – на рис. 2. Ленточный электронный пучок с сечением  $0,4 \times 7 \text{ см}^2$ , с энергией электронов до 1 МэВ и током до 3 кА генерируется в ленточном вакуумном магнитно-изолированном диоде и транспортируется в планарном вакуумном канале с сечением  $9,5 \times 100 \text{ мм}$ , стенки которого изготовлены из меди, в условиях сильного магнитного поля. Поперечная (ондуляторная) компонента магнитного поля имеет период 4 см и амплитуду до 0,2 Т, тогда как продольная составляющая поля практически однородна и имеет величину до 1,4 Т.

Комбинированный резонатор лазера состоит из входного двумерного и выходного одномерного брэгговских отражателей, соединенных отрезком регулярного волновода с поперечным сечением  $0,95 \times 10 \text{ см}^2$  и длиной 32 см (см. рис. 2). Входной отражатель, составленный из двух параллельных пластин из меди с двумерной «шахматной» гофрировкой, имеет длину 19 см. Глубина гофрировки рабочей поверхности пластин – 0,2 мм, период гофрировки по обоим направлениям – 0,4 см. В специальных исследованиях было показано, что брэгговские решетки с шахматной нарезкой поверхности

по своим селективным свойствам очень близки к решеткам, имеющим на поверхности двумерную синусоидальную гофрировку [11]. Выходной отражатель имеет длину 19 см и состоит из решеток с гофрировкой в виде одномерных параллельных борозд с периодом 2 мм и глубиной 0,07 мм.

Вывод излучения из резонатора осуществляется с помощью брэгговского дефлектора [11; 12], который позволяет повернуть излучение в поперечном направлении и отделить его от сильноточного электронного пучка, который распространяется далее на коллектор. Дефлектор электромагнитной волны образован парой пластин длиной 10 см с одномерной гофрировкой поверхности и специальной формой области, занятой гофрировкой. Бороздки прямоугольной нарезки имеют глубину 0,4 мм, направление нарезки наклонено под углом  $45^\circ$  к направлению распространения волны, попутной к электронному пучку. На данной гофрировке волна рассеивается в поперечном направлении по отношению к направлению движения пучка и покидает щелевой канал, занятый электронным пучком. После выхода из резонатора волна направляется зеркалом в выходной волновод с поперечным сечением  $0,95 \times 9 \text{ см}^2$ . Геометрическая форма области дефлектора, занятой гофрированной поверхностью, была оптимизирована в компьютерном моделировании с целью обеспечения перевода попутной электронному пучку волны в  $H_{10}$  моду выходного волновода при высокой эффективности ( $\sim 90\%$ ) такого преобразования. Выходной волновод заканчивается рупором, и излучение выходит в атмосферу через тефлоновое окно толщиной 2,5 мм и размером  $9 \times 9 \text{ см}^2$ .

Электронный пучок после прохождения резонатора движется далее в щелевом вакуумном канале к графитовому коллектору, удаленному на расстояние 0,5 м от выхода резонатора. Такое сравнительно большое расстояние предназначено для увеличения времени задержки между моментом образования плазмы на коллекторе и ее появлением в резонаторе, поскольку появление

плазмы в резонаторе приводит к срыву генерации СВЧ-излучения. Для контроля динамики распространения плазмы в резонаторе и выходном щелевом канале в 4-х точках электродинамической системы мазера были установлены световоды  $\varnothing 1 \text{ мм}$ , осуществляющие вывод света из вакуумного канала на ФЭУ в системе оптической диагностики (точки вывода светового излучения по световодам обозначены на рис. 2. символами  $lv$ ).

### **Селективные особенности комбинированного брэгговского резонатора**

Комбинированный резонатор обладает набором собственных мод, различающихся по продольному индексу и лежащих в полосе резонансного отражения брэгговских решеток. «Решеточные» моды, находящиеся по частоте вблизи 75 ГГц, были выбраны в качестве рабочих мод мазера. Помимо «решеточных» мод, обусловленных работой двумерной распределенной обратной связи, в спектре собственных частот резонатора в общем случае присутствуют также паразитные полосы возбуждения в районе 73 и 77 ГГц, которые связаны с возбуждением в двумерном рефлекторе «запертых» мод вследствие отражения поперечных потоков излучения от проводящих боковых стенок резонатора [7; 10]. Благодаря рассеянию на двумерной нарезке паразитные «запертые» моды оказываются связанными с обратной и попутной волнами, последняя из которых может эффективно накачиваться электронами пучка.

На рис. 3, а представлены результаты компьютерного моделирования частотного отклика комбинированного резонатора, возбуждаемого широкополосным импульсом излучения. Разные графики соответствуют различным коэффициентам отражения ( $R$ ) торцевых стенок двумерного отражателя. Можно видеть, что в случае «открытого»

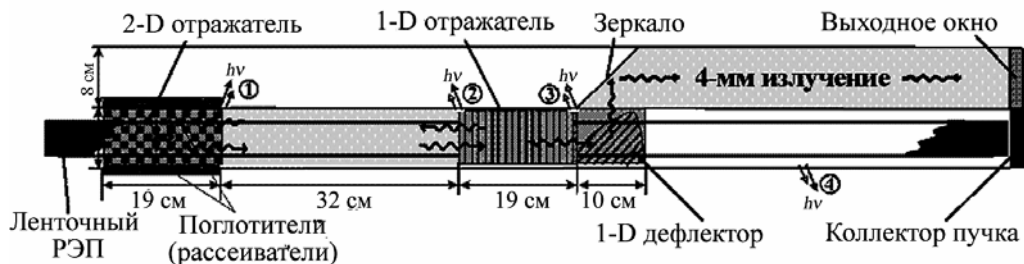


Рис. 2. Геометрические размеры электродинамической схемы МСЭ в описываемых экспериментах

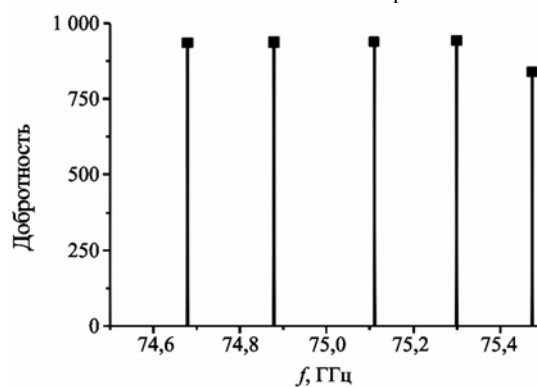
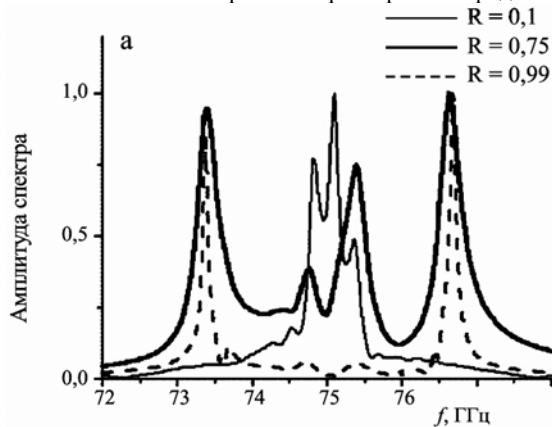


Рис. 4. Добротности «решеточных» мод гибридного резонатора с рассеивателями

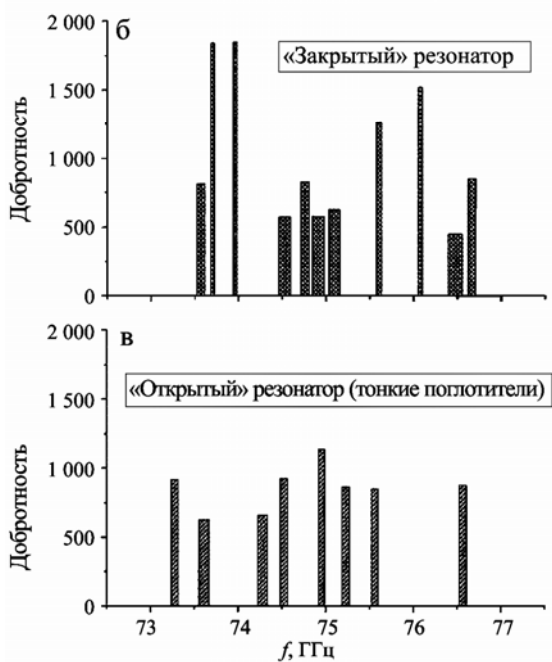


Рис. 3. Результаты моделирования частотного отклика гибридного резонатора (а) и «холодных» измерений добротности мод резонатора (б, в)

двумерного отражателя, когда поперечные потоки энергии поглощаются микроволновыми поглотителями и коэффициент отражения для поперечных потоков мал ( $R = 0,1$ ), возбуждается только небольшой интервал частот вблизи 75 ГГц, в котором расположены «решеточные» моды. Напротив, в случае «закрытого» двумерного отражателя ( $R = 0,99$ ) эффективно возбуждаются лишь «запертые» моды вблизи частот 73,3 и 76,6 ГГц. В «холодных» измерениях селективных свойств резонатора зарегистрированы оба типа мод. В отсутствие поглощения на боковых торцах отражателя измеренные значения добротности «решеточных» и «запертых» мод близки к 500 и 2000 соответственно (рис. 3, б – «закрытый» резонатор). Для подавления возбуждения запертых мод в боковые торцы двумерного рефлектора вначале были помещены тонкие СВЧ-поглотители с коэффициентом поглощения  $\sim 50\%$ . В этом случае добротность «запертых» мод удалось понизить до уровня «решеточных» мод (рис. 3, в – «открытый резонатор»). В последующей серии экспериментов были использованы толстые поглотители с уровнем поглощения более 90%. В этих условиях паразитные моды в боковых полосах, согласно «холодным» измерениям, оказались полностью

подавлены. В качестве альтернативы поглотителям для подавления «запертых» мод могут использоваться специальные рассеиватели – металлические бруски, боковая поверхность которых гофрирована случайным образом. По результатам холодных измерений, спектральные свойства отражателя с рассеивателями эквивалентны свойствам открытого отражателя. Как и в случае использования толстых поглотителей, в спектре присутствуют только «решеточные» моды, лежащие в полосе частот брегговского резонанса. Измеренные частоты и добротности этих мод приведены на рис. 4.

#### Диагностики спектрального состава 4-мм излучения на установке ЭЛМИ

Система регистрации спектрального состава излучения, генерируемого на установке ЭЛМИ, включает два основных типа спектральной диагностики: четырехканальную квазиоптическую диагностику, обеспечивающую регистрацию плотности энергии ЭМ излучения в широком интервале и одноканальную гетеродинную диагностику для измерения деталей спектра генерации с высоким разрешением по частоте.

*Четырехканальная квазиоптическая диагностика.* Данная диагностика построена на основе квазиоптической линии передачи, в которой в качестве частотно-селективных элементов используются четыре полосовых фильтра Фабри–Перо со смещенными полосами пропускания, которые в совокупности перекрывают частотный диапазон как «решеточных», так и «запертых» мод комбинированного резонатора. Схема этой диагностики представлена на рис. 5, а. Сигнал микроволнового излучения, прошедшего каждый фильтр, регистрируется маломощными кристаллическими детекторами и далее оцифровывается с помощью АЦП с временным разрешением 5 нс. Четырехканальная диагностика обеспечивает «обзорную» регистрацию спектрального состава излучения в каждом из импульсов, генерируемых лазером, в частотном интервале 72,5–77 ГГц. Частотное разрешение диагностики определяется значением полосы пропускания фильтров, среднее значение которой около 0,7 ГГц (см. рис. 5, в).

Каждый из фильтров Фабри–Перо представляет собой пару плоскопараллельных двумерных сеток (рис. 5, б), сделанных из медной фольги на текстолитовой подложке.

Сетки имеют следующие геометрические параметры:  $g = 1$  мм,  $a = 0,32$  мм,  $t = 0,018$  мм,  $d = 0,9$  мм,  $L \approx 8$  мм, рабочая апертура –  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>. При выборе значений перечисленных параметров мы использовали результаты работ [13; 14] в следующей схеме: задавая значения  $t$ ,  $d$ , осуществлялся подбор значений  $g$ ,  $a$ ,  $L$  из соображений обеспечения ширины полосы пропускания  $\Delta\nu_{\text{FWHM}} \approx 0,6 \div 0,7$  ГГц в окрестности частоты 75 ГГц и коэффициента контраста не менее 25 дБ. При этом для обеспечения необходимого смещения полос пропускания фильтров в частотном интервале 72,5–77 ГГц для соседних спектральных каналов вводилась добавка к межсеточному зазору  $L$  от одного канала к другому в среднем на величину 0,1 мм, что при  $L \approx 8$  мм соответствует смещению положения максимума пропускания на величину  $\sim 0,94$  ГГц.

При изготовлении сеточных фильтров Фабри–Перо с приведенными выше характеристиками следует учитывать то, что для исключения возможности паразитного уширения полос пропускания фильтров на величину масштаба 0,1 ГГц, точность выдерживания значения параметра  $a$  в пределах апертуры сетки и плоскопараллельность сеток должны быть не хуже, чем  $\Delta a = 10$  мкм и  $\Delta L = 40$  мкм соответственно. Именно недостаточной точностью изготовления фильтров объясняется повышенное значение ширины полос пропускания спектральных каналов № 2 и 3 четырехканальной диагностики (рис. 5, в). Кроме этого, существует возможность паразитных перетражений на элементах квазиоптической линии, что должно приводить к искажению лоренцевой формы аппаратного контура пропускания фильтра, стоящего в линии. На практике данная проблема частично устраняется выведением фильтра из режима строго нормального падения излучения на его плоскость путем его поворота на небольшой угол, как это показано на рис. 5, а.

*Гетеродинная диагностика.* Для прецизионного анализа спектра излучения лазера с разрешением по частоте  $\pm 10$  МГц была использована одноканальная гетеродинная измерительная система, работа которой базируется на смешении на нелинейном элементе потока анализируемого электромагнитного излучения с излучением, поступающим от калиброванного задающего СВЧ-генератора. Гетеродинная схема изме-

рений представлена на рис. 6. Излучение лазера, принимаемое рупорной антенной, проходит через полосовой интерференционный фильтр и 3 дБ-ответвитель и попадает на балансный смеситель. На второе плечо смесителя подается опорный сигнал от задающего ЛОВ-генератора, имеющего возможность установки выходной частоты в диапазоне  $60 \div 79$  ГГц с точностью  $\pm 10$  МГц, которая и определяет частотное разрешение диагностики. Регулируемые аттенюаторы служат для выравнивания мощности сигналов, поступающих на смеситель. Сигнал промежуточной частоты (ПЧ), получаемый со смесителя, регистрируется цифровым

осциллографом «Tektronix TDS-3054B». Последующий Фурье-анализ сигнала ПЧ дает информацию о спектре частот излучения, поступающего на смеситель. Отметим, что верхняя частота рабочего диапазона ПЧ используемого смесителя составляет 12 ГГц, поэтому диапазон регистрируемых гетеродинной диагностикой частот фактически ограничен лишь полосой пропускания осциллографа, паспортное значение которой составляет 500 МГц.

Для упрощения проблемы интерпретации данных гетеродинной диагностики,

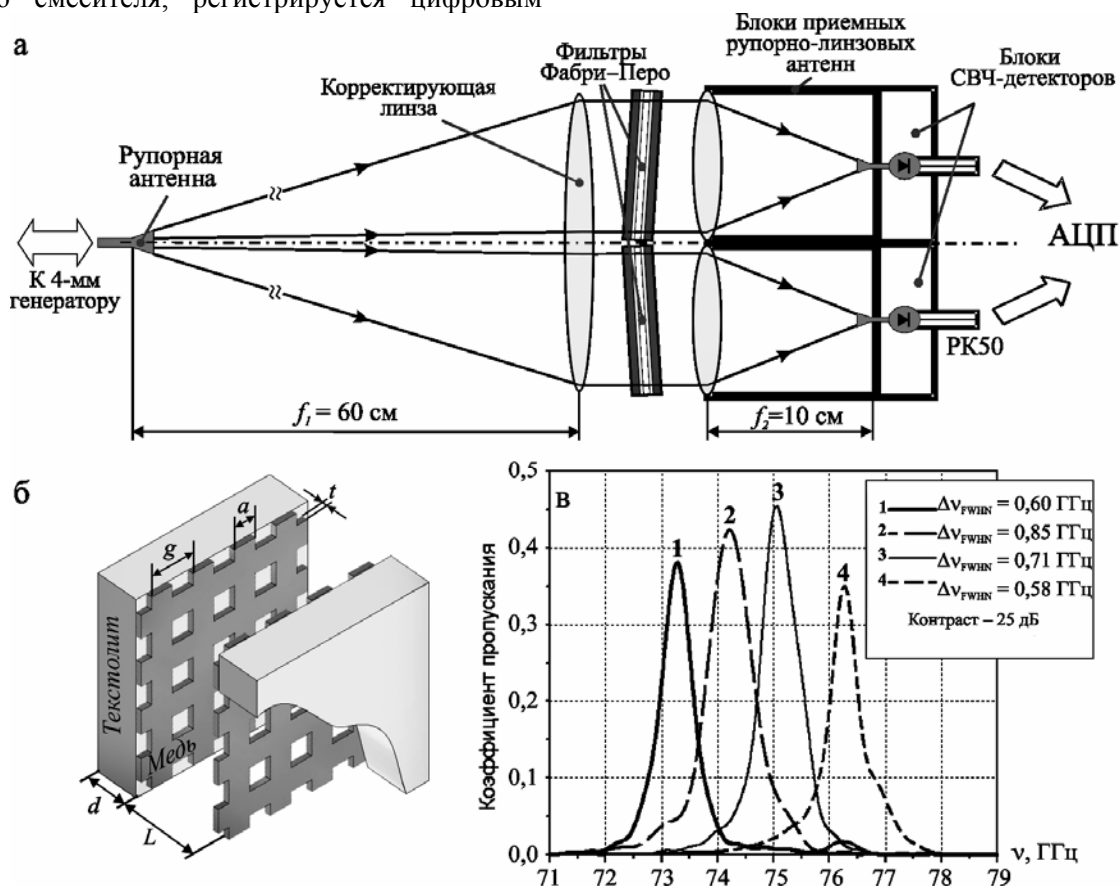


Рис. 5. Схема 4-канальной квазиоптической диагностики (а) на основе полосовых сеточных фильтров Фабри-Перо (б) и их АЧХ (в)

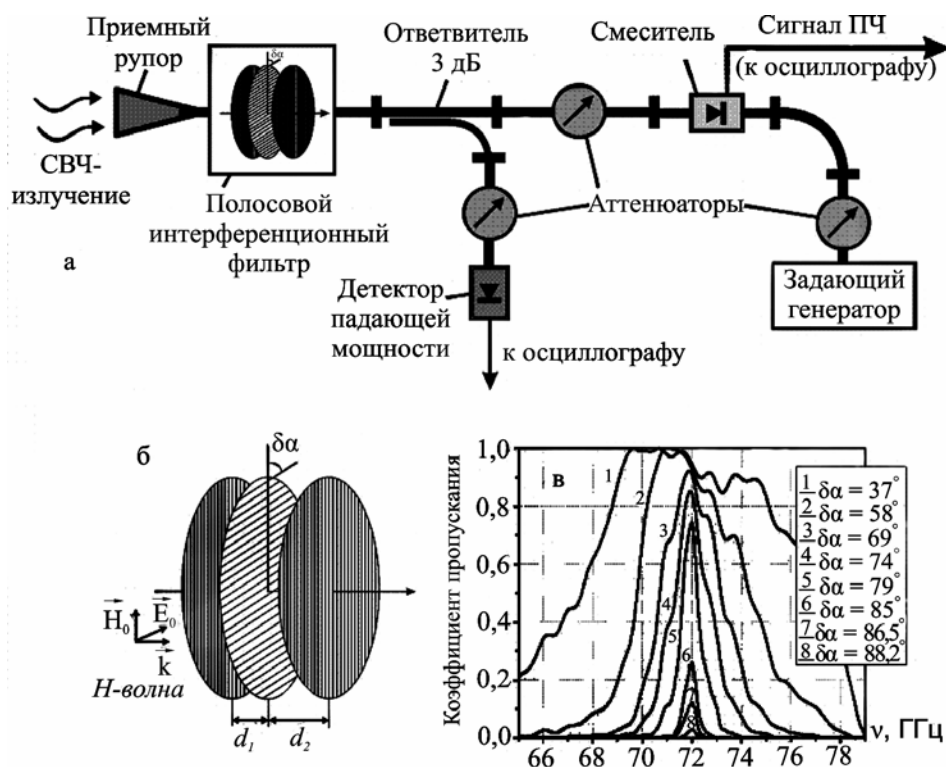


Рис. 6. Принципиальная схема гетеродинной измерительной системы (а) и полосовой интерференционный фильтр на скрещенных сеточных поляризаторах (б) с семейством линий, описывающих его АЧХ (в)

связанной с неоднозначностью определения знака смещения фурье-компонент сигнала пч относительно задающей частоты гетеродина, а также для предотвращения возможной перегрузки смесителя большой суммарной мощностью при широкополосном импульсе генерируемого в мсэ излучения, на входе гетеродинной диагностики используется специально созданный полосовой интерференционный фильтр на скрещенных сеточных поляризаторах (см. рис. 6). Теоретическое описание данного трехсеточного интерференционного фильтра было развито нами в работах [15; 16]. Применяемый в экспериментах фильтр состоит из трех плоскопараллельных одномерных сеток апертурой  $\varnothing 110$  мм, составленных из золоченых вольфрамовых проволочек диаметром 70 мкм и периодом расположения 220 мкм и обладающих высокими поляризационными свойствами. В отличие от других частотно-селективных устройств данного диапазона этот квазиоптический фильтр имеет возможность варьирования как положения полосы пропускания по шкале частот за счет изменения межсеточных зазоров  $d_1, d_2$  (см. Рис. 6), так и ширины полосы пропускания при заданном интерференционном порядке за счет варьирования угла скрещенности  $\delta\alpha$  средней сетки поляризатора. При работе на пятом интерфе-

ренционном порядке ( $d_1 + d_2 \sim 10$  мм) полоса пропускания фильтра может перестраиваться в диапазоне 0,4÷10 гГц (рис. 6, в).

### Результаты экспериментов по генерации 4-мм излучения

На установке ЭЛМИ была проведена серия экспериментов по генерации импульсов на частотах в окрестности 75 ГГц, соответствующих решеточным модам комбинированного резонатора. В данных опытах на боковых стенках двумерного отражателя были установлены либо поглотители, либо рассеиватели излучения, которые должны подавлять «запертые» моды резонатора. Во время генерации импульсов излучения мы регистрировали наряду с параметрами электронного пучка и частотными характеристиками излучения также и свет плазмы, возникающей на различных участках вакуумного канала по пути сильноточного РЭП. Свет, излучаемый плазмой, выводился с помощью световодов, расположенных в различных частях вакуумного канала лазера:  $h\nu_1$  – во входном отражателе,  $h\nu_2$  – в регулярной части резонатора,  $h\nu_3$  – в области выходного отражателя,  $h\nu_4$  – вблизи коллектора пучка (см. рис. 2). На рис. 7 приведены типичные сигналы с различных

датчиков, получаемые во время генерации миллиметрового излучения в планарном мазере. Из поведения осциллограмм свечения плазмы в различных точках видно, что появление плазмы внутри резонатора приводит к быстрому понижению мощности генерируемого мазером СВЧ-излучения. При этом следует заметить, что в эксперименте не зарегистрировано различия в появлении свечения плазмы в канале с электронным пучком для двух случаев: 1) в двумерном брэгговском отражателе размещен поглотитель миллиметрового излучения и 2) установка в боковых стенках брэгговского отражателя специального рассеивателя такого излучения. С помощью спектрометра МДР-23 (спектральное разрешение 0,16 нм) были зарегистрированы интенсивности нескольких спектральных линий:  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ , C II, O I, причем  $H_\alpha$  оказалась наиболее интенсивной (рис. 8). Кроме того, был проанализирован профиль спектральной линии  $H_\alpha$  интегрально за время ее свечения. По профилю этой линии были оценены значения плотности плазмы, которая составила величину  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , и температура ионной компоненты –  $T_i \sim 5 \text{ эВ}$ . По результа-

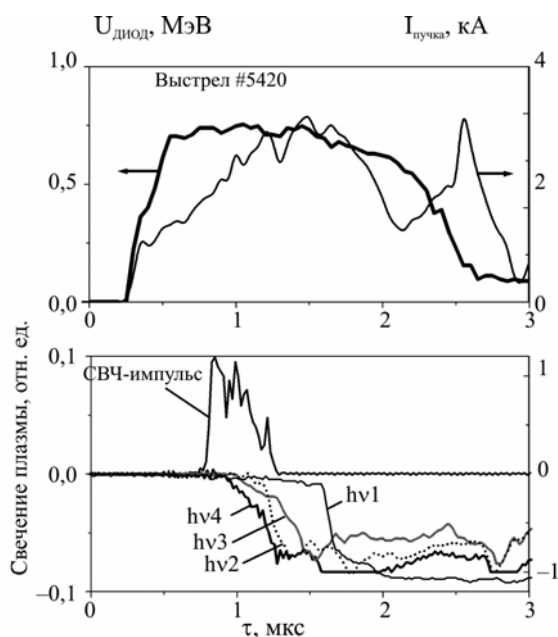


Рис. 7. Сигналы напряжения на диоде и тока электронного пучка (верхние осциллограммы), а также мощности 4-мм излучения и светового излучения плазмы в четырех точках резонатора (нижние осциллограммы)

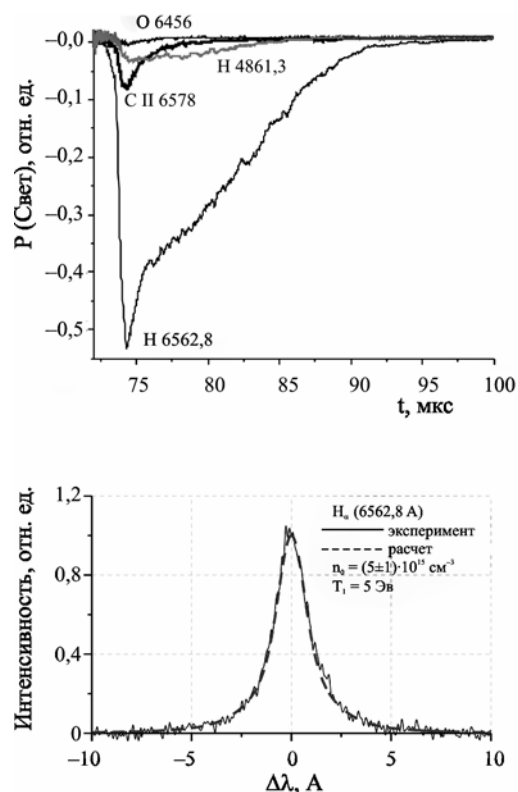


Рис. 8. Временное поведение интенсивности спектральных линий плазмы (верхние осциллограммы) и профиль линии  $H_\alpha$ , зарегистрированный интегрально по времени (нижний график)

там регистрации свечения плазмы можно сделать вывод, что во время генерации импульса СВЧ излучения в канале мазера может возникать плазма с плотностью  $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , которой достаточно для заметного отражения 4-миллиметрового излучения. В таких условиях плазма может мешать подавлению паразитных «запертых» мод резонатора, которое мы стремимся осуществить за счет установки поглотителя или рассеивателя в двумерном отражателе.

На рис. 9, а–д показаны результаты спектральных измерений мощности излучения мазера, полученные в типичном выстреле из серии экспериментов с комбинированным резонатором при использовании поглотителей излучения с недостаточно высоким коэффициентом поглощения (коэффициент отражения по мощности  $\sim 50\%$ , см. [17]). Анализ поведения во времени сигналов 4-канальной квазиоптической диагностики показывает, что генерация на пониженных частотах (см. рис. 5, полосы 1, 2) происходит как в начале, так и в конце импульса излучения приблизительно на одинаковом уровне, в то время как возбуждение на более высоких частотах (полосы 3, 4)



нарастает к концу импульса (рис. 9 б, в). Такое поведение спектра излучения может быть объяснено изменением энергии электронов пучка и эффектом конкуренции мод. Анализ сигналов со смесителя гетеродинной диагностики (рис. 9 з, д) позволяет выявить режимы одночастотной генерации с длительностью до 100 нс при общей длительности импульса СВЧ-излучения до 500 нс. Возникновение этих режимов совпадает по времени с резким нарастанием сигнала в третьем канале четырехканальной диагностики, регистрирующем излучение с частотой вблизи 75 ГГц. Этот эффект показан на рис. 9 б, д как пример возбуждения одной из «решеточных» мод.

На рис. 10 представлены результаты последних экспериментов по генерации излучения в МСЭ, в резонатор которого помещались СВЧ-поглотители с поглощением, приближающимся к 100 % (коэффициент отражения по мощности ~ 5 %) (верхний ряд осциллограмм) либо рассеиватели (нижний ряд). В левом столбце рисунка показаны осциллограммы сигналов с детектора, который измерял мощность СВЧ-

излучения, поступающего от лазера на гетеродинную диагностику. В среднем столбце помещены сигналы промежуточной частоты, вырабатываемые смесителем. Крайний справа столбец представляет Фурье-образы той части сигналов со смесителя, которая выделена пунктирными линиями на осциллограммах этих сигналов, изображенных на среднем столбце рисунка. В описываемых в настоящей работе экспериментах значение ширины полосы пропускания интерференционного фильтра, стоящего на входе гетеродинной диагностики, составляло ~ 1 ГГц. Можно видеть, что использование поглотителей в боковых стенках двумерного отражателя позволяет осуществлять генерацию на «решеточных» модах, однако селективности резонатора недостаточно для выделения только одной моды (в спектре генерируемого импульса присутствуют две частоты в течение 200 нс). Использование же рассеивателей позволяет в большом количестве импульсов срабатывания установки достигать условий одночастотной генерации в течение практически всей длительности импульса излучения по-

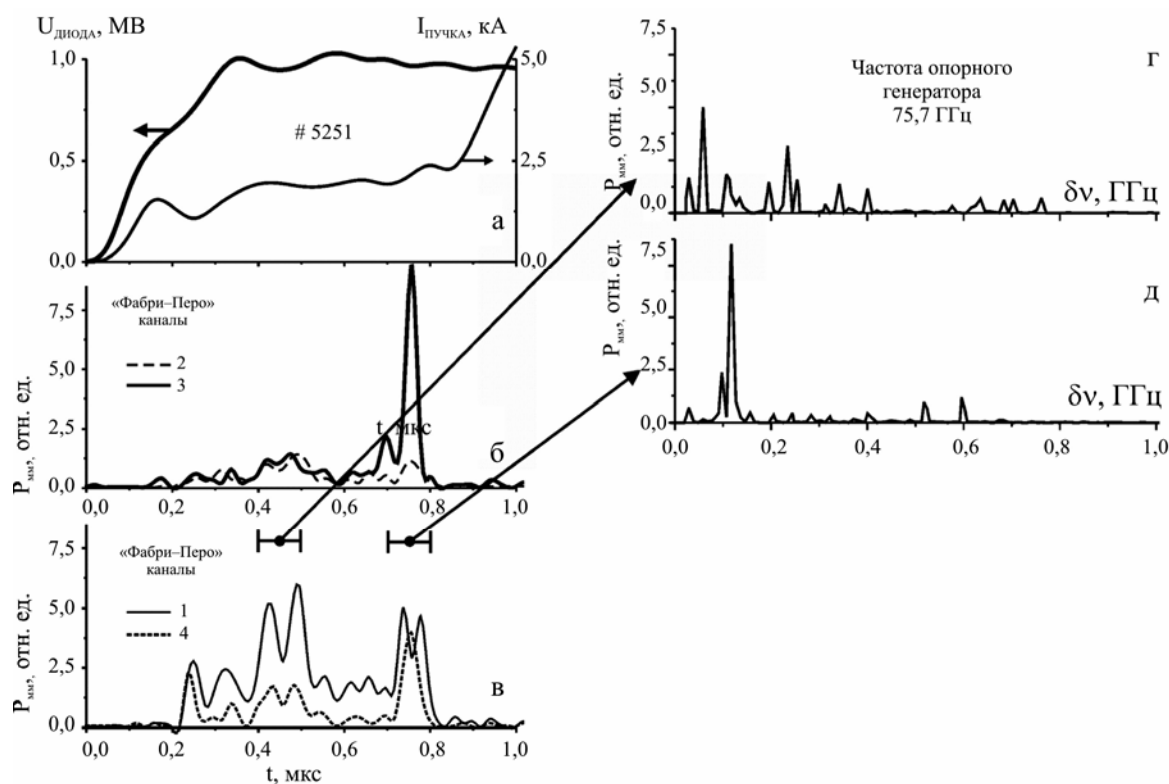


Рис. 9. Осциллограммы типичного выстрела при использовании в резонаторе тонких поглотителей: а – напряжение на диоде и ток пучка; б, в – сигналы 4-канальной диагностики «Фабри–Перо»; з, д – Фурье-спектры сигнала гетеродинной диагностики, отнесенные к различным интервалам по времени

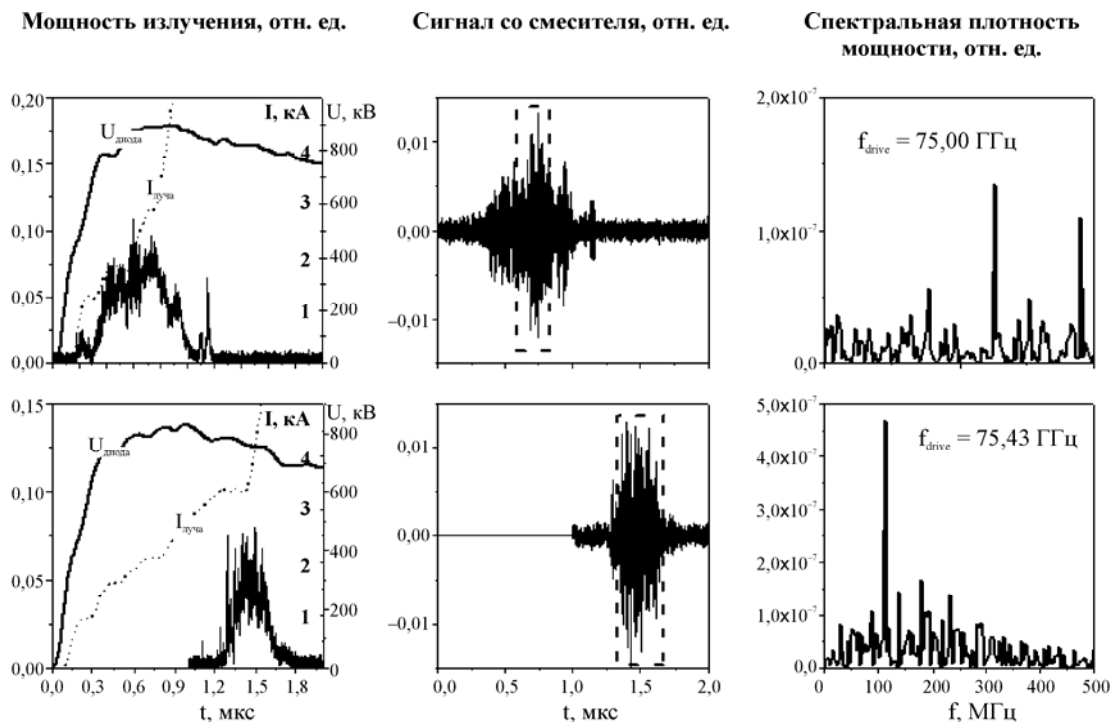


Рис. 10. Сигналы, характеризующие работу планарного мсэ с комбинированным резонатором для двух случаев: верхний ряд – в двумерном брэгговском отражателе установлен поглотитель излучения, нижний ряд – в отражателе установлен рассеиватель

рядка 330 нс (нижний ряд осциллограмм). Результаты экспериментов, приведенные на рис. 10, демонстрируют генерацию мод лазера с частотами 75,3 и 75,48 ГГц в случае использования поглотителей и с частотой 75,3 ГГц при использовании рассеивателей. Данные частоты совпадают с частотами собственных резонаторных мод, представленных на рис. 4.

Следует отметить, что, как показала 4-канальная диагностика на полосовых фильтрах Фабри–Перо, в описанной последней серии экспериментов возможна генерация на частотах, соответствующих паразитным «запертым» модам комбинированного резонатора, хотя в двумерном отражателе стояли поглотители либо рассеиватели. Такая ситуация может быть объяснена появлением плазмы в резонаторе в результате СВЧ-пробоя, которая своим отражением 4-миллиметрового излучения препятствует работе поглотителей СВЧ-излучения.

### Заключение

Таким образом, компьютерное моделирование и «холодные» тестовые эксперименты на специальном стенде показали возможность сильного подавления паразит-

ных «запертых» мод по отношению к решеточным модам комбинированного планарного резонатора путем установки в двумерном брэгговском отражателе дополнительных поглотителей либо рассеивателей миллиметровых волн.

В экспериментах на установке ЭЛИМИ с накачкой волн в планарном лазере пучком релятивистских электронов с током 2–3 кА был зарегистрирован высокий уровень спектральной плотности излучения вблизи частот, соответствующих «решеточным» модам комбинированного резонатора. В случае использования микроволнового рассеивателя, зарегистрированы режимы одномодовой генерации в течение всей длительности импульса, достигающей 300 нс, на частотах, соответствующих собственным решеточным модам резонатора.

### Список литературы

1. Аржанников А. В., Синуцкий С. Л., Юшков М. В. Микросекундный ленточный РЭП в плоском ондуляторе и генерация в этой системе миллиметрового излучения. Препринт ИЯФ 91-85. Новосибирск, 1991.
2. Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Yushkov M. V. Propagation of microsecond ribbon

REB in the plane wiggler with guiding magnetic field // Twelfth International Free Electron Laser Conf., Paris, France. Program and Abstracts. P., 1990. P.105.

3. *Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Nikolaev V. S. et al.* FEL driven by high current ribbon REB and operated with two dimensional feedback // 14th Intern. FEL Conference. Technical Digest. Kobe, Japan, 1992. P. 214.

4. *Arzhannikov A. V., Bobylev V. B., Ginzburg N. S. et al.* Ribbon-FEL experiments at one-dimension distributed feedback // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research. 1995. Vol. A358. P. 112–113.

5. *Arzhannikov A. V., Bobylev V. B., Nikolaev V. S. et al.* New results of the full scale ribbon beam experiments on the U-2 device // 10th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. Prog. of Conf. San Diego, 1994. P. 136–140.

6. *Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Bobylev V. B. et al.* Four-channel planar FEM for high-power mm-wave generation (theoretical and experimental problems) // Nuclear Instr. and Methods in Phys. Research A. 2003. Vol. A507. P. 129–132.

7. *Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Peskov N. Yu. et al.* Super-power free-electron lasers with two-dimension distributed feedback // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research. 1995. Vol. A358. P. 189–192.

8. *Ginzburg N. S., Peskov N. Yu., Sergeev A. S. et al.* Theory and design of a free-electron maser with two-dimensional feedback driven by a sheet electron beam // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 60. No. 1. P. 935–945.

9. *Песков Н. Ю., Гинзбург Н. С., Денисов Г. Г. и др.* Теоретическое и экспериментальное исследование пространственно-развитых планарных двумерных брэгговских резонаторов // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, вып. 8. С. 72–83.

10. *Гинзбург Н. С., Сергеев А. С., Песков Н. Ю. и др.* К теории планарных ЛСЭ с комбинированными резонаторами, состав-

ленными из одномерного и двумерного брэгговских зеркал // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, вып. 16. С. 8–16.

11. *Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Kalinin P. V. et al.* Selective Properties of Planar Bragg Reflectors and Their Applications for Multichannel Masers // Elsevier Science B.V. 2003. P. II–11, 12.

12. *Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю., Сергеев А. С.* Электродинамические свойства двумерных брэгговских резонаторов // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, вып. 3. С. 401–414.

13. *Baker E. A. M., Walker B.* Fabry-Perot interferometers for use at submillimeter wavelengths // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1982. Vol. 15. P. 25–32.

14. *Green J. P., Veron D., Belland P.* Theory of the transmission of metal strip gratings on a dielectric substrate. Application to submillimeter laser coupling // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1986. Vol. 7. No. 11. P. 1747–1767.

15. *Аржанников А. В., Кузнецов С. А., Синицкий С. Л.* Спектральные свойства интерференционных СВЧ-фильтров на основе скрещенных решеток-поляризаторов // ЖТФ. 2002. Т. 72, вып. 9. С. 102–107.

16. *Аржанников А. В., Кузнецов С. А.* Квазиоптическое описание спектральных характеристик интерференционного СВЧ-фильтра на скрещенных сетках-поляризаторах // Физика, радиопизика – новое поколение в науке: Межвуз. сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов, студентов. Барнаул, 2004. Вып. 4. С. 6–15.

17. *Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Ivanenko V. G. et al.* Radiation spectrum of planar FEM at different conditions of 2D distributed feedback realization // Proceedings of the International Workshop «STRONG MICROWAVE IN PLASMAS». Nizhny Novgorod, 2005. Vol. 1. P. 271–276.

Материал поступил в редколлегию 14.09.2006