

УДК 537.52

## РЕЗОНАНСНЫЕ ОТРАЖАТЕЛИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОТРАЖЁННОГО СИГНАЛА НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГИРОТРОНОВ

*А. А. Богдашов\**, *Ю. В. Новожилова*, *А. П. Фокин*, *М. Ю. Глявин*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Экспериментальное исследование влияния резонансного отражения рабочей моды на режимы генерации гиротрона является актуальной задачей современной вакуумной электроники больших мощностей. В статье сформулированы требования к внешней резонансной отражательной системе и предложены варианты её построения. Рассмотрены резонансные отражатели двух типов, предназначенные для экспериментов с гиротроном на рабочей моде  $TE_{0,2}$  на частоте 28 ГГц. Исходные требования состоят в том, что коэффициент отражения рабочей моды гиротрона на резонансной частоте должен составлять 5–10 % при добротности отражателя более 15 000 в диапазоне перестройки частоты гиротрона магнитным полем 27 998–28 008 МГц. Первый вариант отражателя представляет собой цилиндрический резонатор на моде  $TE_{0,3,1}$ . Измеренный коэффициент отражения составил 6 % на частоте 27 999 МГц с добротностью 15 000. Второй вариант — перестраиваемый двухзеркальный резонатор на моде  $TEM_{0,0,p}$  ( $p \gg 1$ ). Для возбуждения излучением гиротрона двухзеркального резонансного отражателя разработан и изготовлен ряд волноводных преобразователей: моды круглого волновода  $TE_{0,2}$  в моду  $TE_{0,1}$ , моды  $TE_{0,1}$  в моду  $TE_{1,1}$ , а также преобразователь моды  $TE_{1,1}$  в линейно поляризованный гауссов волновой пучок. Измеренный коэффициент отражения при перестройке частоты в полосе 27 990–28 010 МГц составил 8 % с добротностью около 40 000. Представлены расчётные и измеренные характеристики преобразователей, а также измеренные частотные характеристики разработанных резонансных отражателей.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время ведутся интенсивные исследования, связанные со стабилизацией частоты в гиротронах различных частотных диапазонов и уровней мощности [1–3]. Развитие возможностей управления параметрами излучения откроет новые перспективы применения гиротронов как в задачах нагрева и диагностики плазмы, так и в спектрометрии. В настоящее время рассматриваются различные подходы к задаче управления и стабилизации частоты и мощности излучения гиротронов.

Наиболее простыми в реализации являются пассивные методы, основанные на воздействии внешнего сигнала или отражённой волны на режим генерации гиротрона. Для реализации этих методов не требуются изменения в конструкции или схеме питания приборов. Методы, основанные на отражении сигнала от удалённой нагрузки, оказываются наиболее доступными. Следует отметить, что теоретические и экспериментальные исследования воздействия отражений на режимы генерации гиротронов ведутся довольно давно, при этом системы на основе отражённого сигнала рассматриваются в основном в теоретических работах [4–12], а число соответствующих экспериментов не столь велико [13–16].

В данной работе сформулированы требования к внешнему резонансному отражателю, предлагаются варианты его построения, обсуждаются результаты измерений параметров резонансных отражателей при малом уровне мощности. Предложенные резонансные отражатели двух типов (см. рис. 1), волноводный и квазиоптический двухзеркальный, предназначены для экспериментов

\* wavelover@yandex.ru

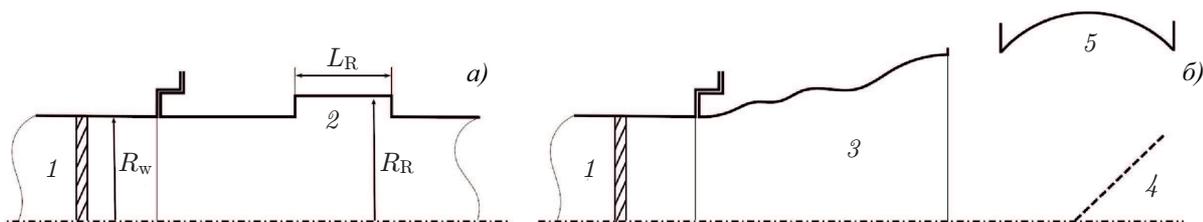


Рис. 1. Волноводный (а) и квазиоптический двухзеркальный (б) резонансные отражатели (1 — выход гиротрона, 2 —  $TE_{0,3,1}$ -резонатор, 3 — преобразователи типов мод, 4 — диэлектрическая пластина связи, 5 — двухзеркальный резонатор)

с гиротроном на рабочей моде  $TE_{0,2}$  на частоте 28 ГГц. Для возбуждения моды  $TE_{0,2}$ , имитирующей рабочую моду гиротрона в измерениях при малом уровне мощности, разработаны и экспериментально исследованы волноводные преобразователи типов мод круглого волновода.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требования к внешнему резонансному отражателю достаточно противоречивы и связаны в основном с рядом ограничений практического характера. Для проведения эксперимента был выбран хорошо зарекомендовавший себя технологический гиротрон на второй гармонике гирочастоты (28 ГГц) с рабочей модой  $TE_{0,2}$  [17], имеющий прямой вывод излучения. Диапазон перестройки частоты генерации этого гиротрона магнитным полем составляет  $27\,998 \div 28\,008$  МГц. Для наблюдения эффекта влияния резонансного отражения необходимо, чтобы добротность внешнего отражателя была существенно выше добротности резонатора гиротрона:  $Q \gg 3\,500$ . Уровень отражённого сигнала не должен быть выше 10 %, т. к. иначе возможен неустойчивый режим работы гиротрона. Кроме того, необходимо реализовать устойчивый захват частоты внешним отражённым сигналом, чтобы при нагреве отражателя генерируемым излучением резонансная частота не уходила из полосы перестройки гиротрона. Также желательно обеспечить механическую перестройку резонансной частоты отражателя в полосе перестройки частоты гиротрона магнитным полем.

В ходе эксперимента предполагается предварительная настройка и проверка работоспособности резонансного отражателя с помощью стандартного анализатора цепей. Однако стабильность сигнала стандартных анализаторов цепей ограничивает возможности измерения высокودобротных резонансов. Для примера, панорамный измеритель P2-65 едва позволяет измерять параметры резонаторов с добротностью около  $10\,000 \div 15\,000$ .

Таким образом, требования к внешнему резонансному отражателю для проведения экспериментов с гиротроном на второй гармонике гирочастоты на моде  $TE_{0,2}$  можно сформулировать следующим образом. Отражатель моды  $TE_{0,2}$  должен иметь умеренную добротность, но не менее 15 000. Коэффициент отражения на резонансной частоте должен составлять  $5 \div 10$  % по мощности. Предпочтительна перестройка резонансного отражателя в области перестройки частоты гиротрона магнитным полем  $27\,998 \div 28\,008$  МГц.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Для достижения необходимых параметров отражателя предлагается использовать простейшую конфигурацию в виде проходного резонатора, включённого в волноводный тракт между гиротроном и согласованной нагрузкой. В простейшей модели резонатор представляет собой пару плоских зеркал, расположенных на расстоянии  $2L$ , между которыми распространяется плос-

кая волна с волновым числом  $k = 2\pi/\lambda$ . Резонатор возбуждается через делительную пластину с коэффициентом прохождения  $t$ , а величина потерь на отражение от каждого из зеркал резонатора характеризуется коэффициентом  $R_m$ . Ограничимся рассмотрением системы без учёта поперечной структуры поля в резонаторе. Такой подход допустим в случае возбуждения низшей поперечной моды квазиоптического резонатора с помощью волнового пучка с соответствующим пространственным амплитудно-фазовым распределением поля.

Добротность такого проходного резонатора

$$Q = \frac{Q_c Q_1}{Q_c + Q_1} \quad (1)$$

определяется добротностью связи

$$Q_c = \frac{2kL}{1 - |t|^2} \quad (2)$$

и собственной добротностью резонатора

$$Q_1 = \frac{2kL}{1 - |R_m|^2}. \quad (3)$$

Характер потерь, определяющих собственную добротность резонатора, в данном случае не имеет значения. Коэффициенты прохождения ( $|T|^2$ ) и отражения ( $|R|^2$ ) на резонансной частоте также определяются добротностью связи и собственной добротностью резонатора:

$$|T|_{\min}^2 = \frac{1}{(1 + Q_1/Q_c)^2}, \quad |R|_{\max}^2 = \frac{1}{(1 + Q_c/Q_1)^2}. \quad (4)$$

Таким образом, при коэффициенте отражения на резонансной частоте  $|R|_{\max}^2 = 0,09$  отношение добротностей должно быть  $Q_c/Q_1 = 2$ , а добротность проходного резонатора  $Q = 2Q_1/3$ .

Необходимо отметить, что при отражении от резонатора 10 % мощности на резонансной частоте половина мощности падающего на отражатель излучения теряется в проходном резонаторе. Проходной резонатор в предлагаемой конфигурации обладает низкой эффективностью для практических применений.

### 3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТИПОВ МОД

Излучение гиротрона на второй гармонике гирочастоты (28 ГГц) выводится в виде моды типа  $TE_{0,2}$  круглого многомодового волновода диаметром 32,6 мм. Для проведения экспериментов с гиротроном при уровне мощности около 1 кВт, а также измерений и настройки резонансных отражателей при малом уровне мощности разработан и изготовлен ряд волноводных преобразователей: моды круглого волновода  $TE_{1,1}$  в моду  $TE_{0,1}$ , моды  $TE_{0,1}$  в моду  $TE_{0,2}$ , а также преобразователь моды  $TE_{1,1}$  в линейно-поляризованный гауссов волновой пучок.

Преобразователь моды  $TE_{1,1}$  в моду  $TE_{0,1}$  имеет в каждом поперечном сечении, параллельном входной плоскости, круглое сечение заданного диаметра. Этот тип преобразователя подобен хорошо известному преобразователю с изгибами круглого волновода [18, 19], но несколько отличается поведением парциальных мод вдоль оси волновода. Разработан метод расчёта преобразователя с помощью матрицы рассеяния [20]. Этот подход обладает высокой эффективностью и точностью, что позволяет провести оптимизацию и расчёт последовательно включённых преобразователей и волноводного резонатора в сборе.

Для синтеза профиля преобразователя использована оптимизация роем частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) [21–23]. Исходная идея алгоритма основана на моделировании социального поведения роя пчёл или косяка рыб. Ось волновода задаётся в виде кубической сплайн-функции с подвижными в плоскости смещения оси узлами, при этом размерность пространства оптимизируемых параметров равна удвоенному числу подвижных узлов. Подвижная частица в алгоритме PSO представляет собой точку в пространстве параметров, т. е. некоторую реализацию волноводного преобразователя. Алгоритм PSO задаёт движение частиц в пространстве параметров, которое обеспечивает поиск наилучшей реализации преобразователя, характеризуемой максимальной эффективностью. Эффективность преобразователя  $E_{pj}$  для  $j$ -й частицы определяется содержанием на выходе желаемой моды с комплексной амплитудой  $F_d$  при минимальном уровне отражённого сигнала и мощности нежелательных мод на выходе преобразователя:

$$E_{pj} = |F_d|^2. \quad (5)$$

Движение частиц определяется двумя основными факторами: индивидуальным наилучшим положением частицы  $X_{pbj}$  (индивидуальное наибольшее значение целевой функции), а также наилучшим глобальным положением  $X_{gb}$ . Таким образом, движение каждой частицы обуславливается как индивидуальными, так и коллективными факторами.

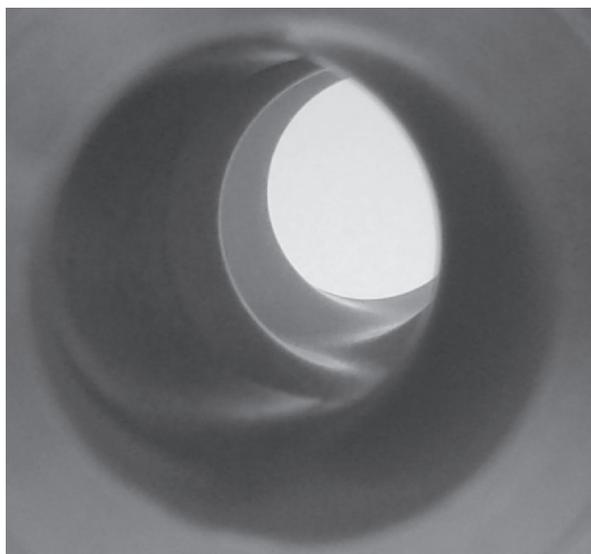


Рис. 2. Фотография внутренней поверхности преобразователя мод  $TE_{1,1}$ – $TE_{0,1}$

определяется соответствующими весовыми коэффициентами  $C_p = 2,041$  и  $C_g = 0,948$ . Коэффициенты  $\eta_g$  и  $\eta_p$  — случайные числа на отрезке  $[0, 1]$ . Превалирование индивидуального фактора обеспечивает лучшие условия для поиска глобального оптимума и преодоления локальных экстремумов в пространстве параметров.

Для упрощения изготовления преобразователя фрезерованием в виде единой детали из сплава алюминия выбрано оптимальное соотношение длины преобразователя (92 мм) и его диаметра (17 мм). На рис. 2 показана фотография внутреннего профиля синтезированного преобразователя мод  $TE_{1,1}$ – $TE_{0,1}$ .

Преобразователь моды  $TE_{0,1}$  в моду  $TE_{0,2}$  обладает аксиальной симметрией [24]. Его профиль также оптимизирован с помощью алгоритма PSO. Расчётная частотная зависимость эффективности преобразования моды  $TE_{1,1}$  в моду  $TE_{0,2}$  в преобразователях из алюминия показана на

Пусть  $X_j$  — координаты  $j$ -й частицы, тогда движение частицы описывается простой формулой

$$\tilde{V}_j = w [V_j + C_g \eta_g (X_{gb} - X_j) + C_p \eta_p (X_{pbj} - X_j)], \quad \tilde{X}_j = X_j + \tilde{V}_j, \quad (6)$$

где  $V_j$  — скорость  $j$ -й частицы на текущей итерации,  $\tilde{V}_j$  — скорость частицы на следующей итерации, а  $X_j$  — координата частицы на следующей итерации. В начальный момент частицы случайным образом распределены в пространстве параметров, их скорости также заданы случайным образом. После первой итерации определяются индивидуальные наилучшие значения целевой функции  $E_{pj}$  и соответствующие координаты  $X_{pbj}$ , а также наилучшее глобальное значение  $E_g$  в точке  $X_{gb}$ . Влияние индивидуального и коллективного факторов на движение частицы

рис. 3, где по вертикальной оси отложена мощность  $P_{TE_{0,2}}$  моды  $TE_{0,2}$ . Для согласования диаметров между преобразователями включены конусные волноводные переходы. Содержание моды  $TE_{0,2}$  на выходе последовательно включённых преобразователей типов мод  $TE_{1,1}-TE_{0,2}$  составляет 98 % в диапазоне перестройки частоты гиротрона. Омические потери в среднем около 2 %.

Измерение эффективности преобразователей представляет собой достаточно сложную задачу. Проведено сканирование пространственного распределения интенсивности поля в свободном пространстве на расстоянии 50 мм от выходной апертуры преобразователя  $TE_{1,1}-TE_{0,1}$  (см. рис. 4), а также преобразователей  $TE_{1,1}-TE_{0,1}$  и  $TE_{0,1}-TE_{0,2}$  в сборе (см. рис. 5). Сканирование одномерным прямоугольным волноводом выполнено при малом уровне мощности [25] в ортогональных линейных поляризациях на частоте 28 ГГц. Измеренные пространственные распределения качественно соответствуют искомым модам. Кроме того, для сравнения проведены расчёт и измерение коэффициента отражения от сборки преобразователей в широкой полосе частот (см. рис. 6).

Для определения эффективности преобразователя моды  $TE_{1,1}$  в гауссов волновой пучок были проведены измерения пространственных распределений интенсивности поля в нескольких поперечных сечениях на частоте 28 ГГц. Фаза поля была восстановлена с помощью итерационной процедуры [26]. Измеренная эффективность преобразования моды  $TE_{1,1}$  в заданный гауссов волновой пучок с перетяжкой на расстоянии 80 мм от излучающей апертуры составила 98 %.

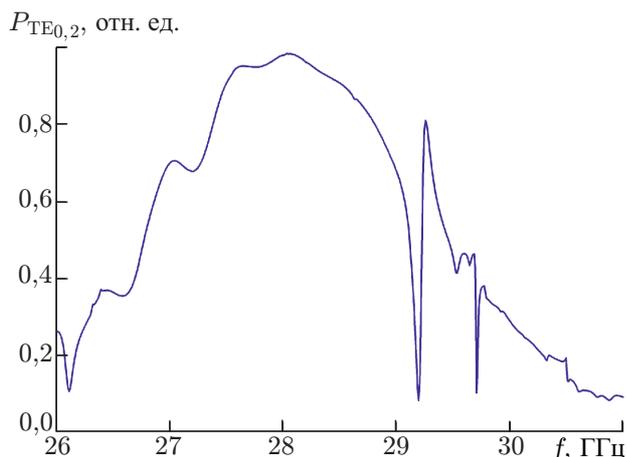


Рис. 3. Расчётная частотная зависимость эффективности преобразователей  $TE_{1,1}-TE_{0,1}$  и  $TE_{0,1}-TE_{0,2}$  в сборе. Материал волноводов — алюминий

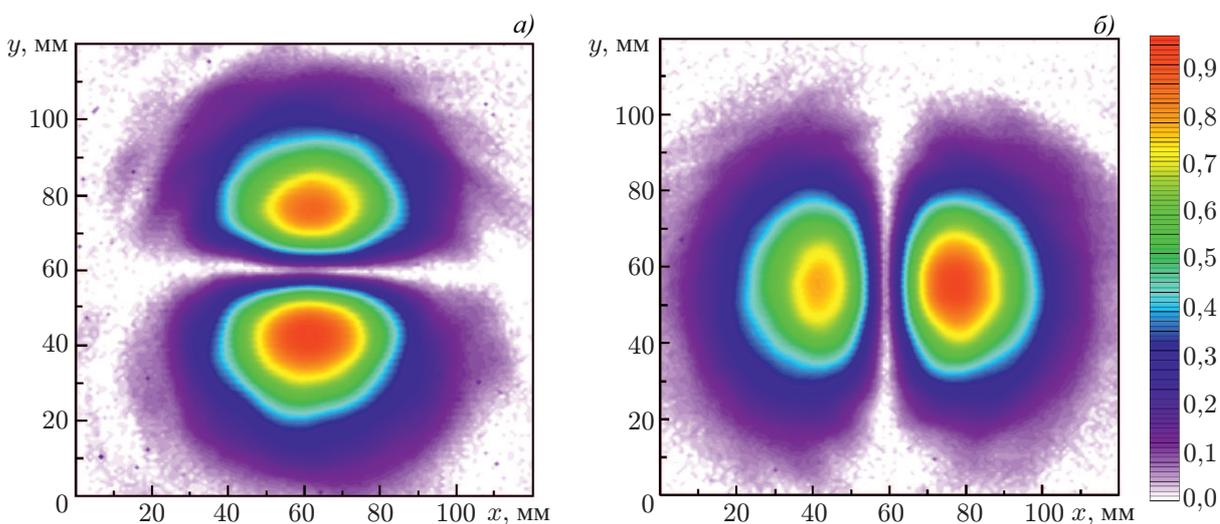


Рис. 4. Измеренное распределение амплитуды электрического поля на выходе преобразователя мод  $TE_{1,1}-TE_{0,1}$  на частоте 28 ГГц для поляризаций  $|E_x|$  (а) и  $|E_y|$  (б). Значения поля даны в относительных единицах

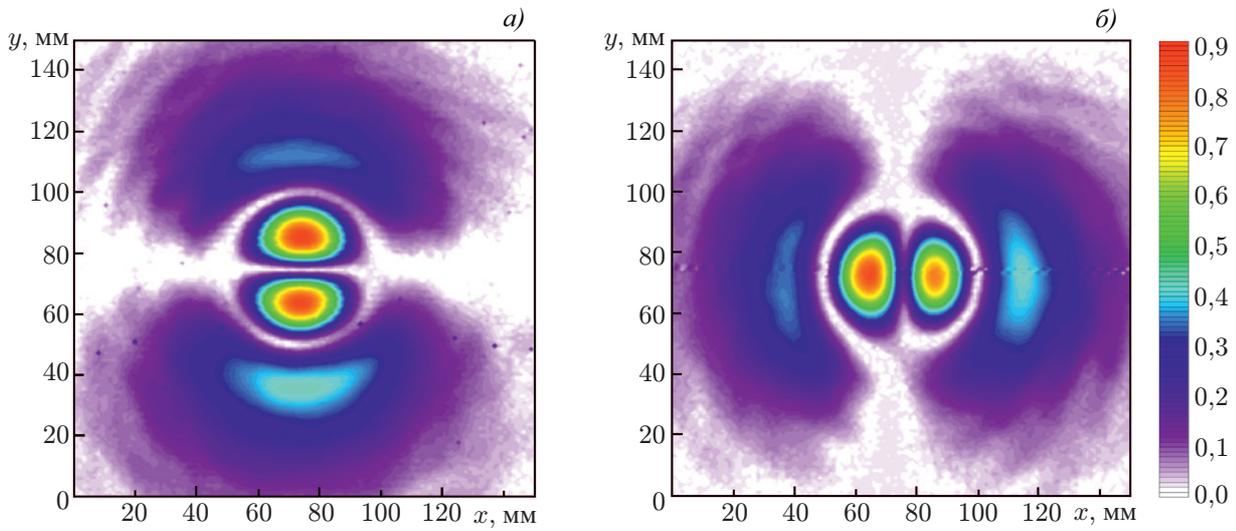


Рис. 5. Измеренное распределение амплитуды электрического поля на выходе преобразователей мод  $TE_{1,1}-TE_{0,1}$  и  $TE_{0,1}-TE_{0,2}$  в сборе на частоте 28 ГГц для поляризаций  $|E_x|$  (а) и  $|E_y|$  (б). Значения поля даны в относительных единицах

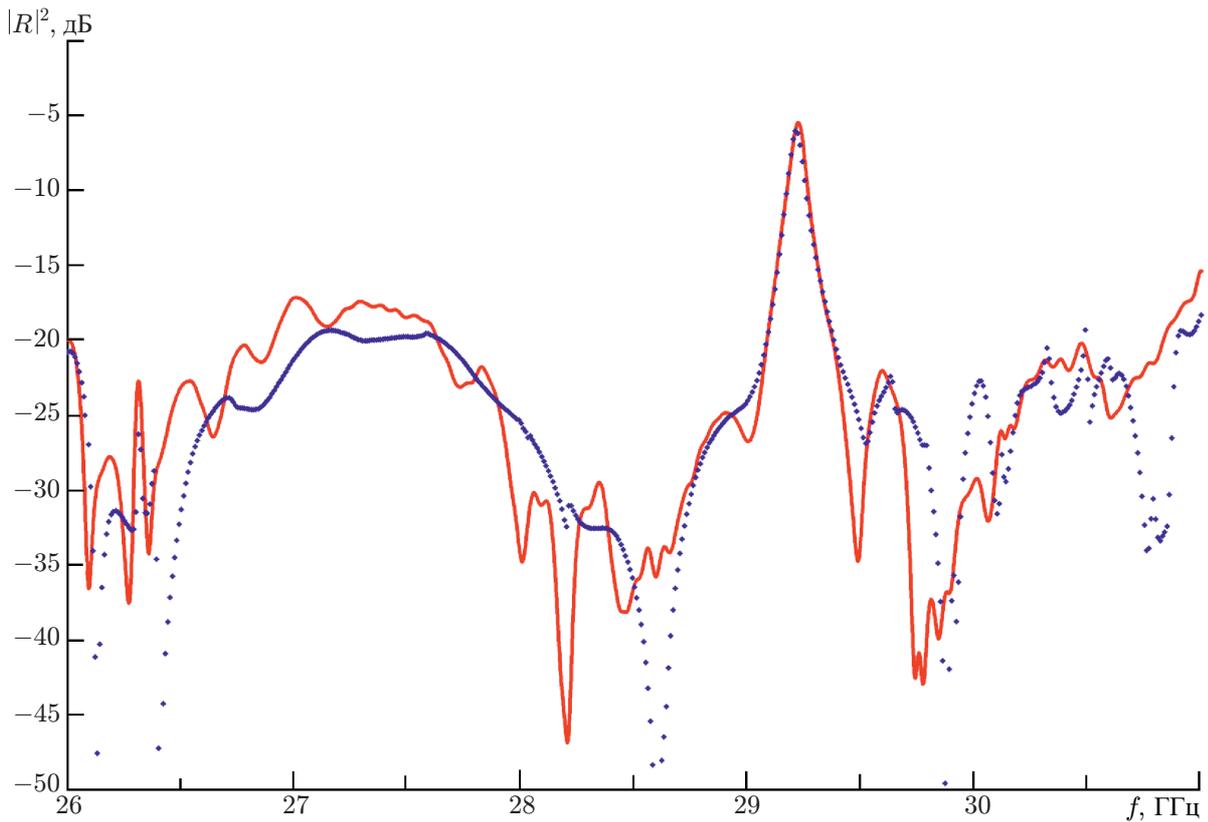


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения от преобразователей  $TE_{1,1}-TE_{0,1}$  и  $TE_{0,1}-TE_{0,2}$  в сборе (красная линия соответствует измерениям, синие точки — расчёту)

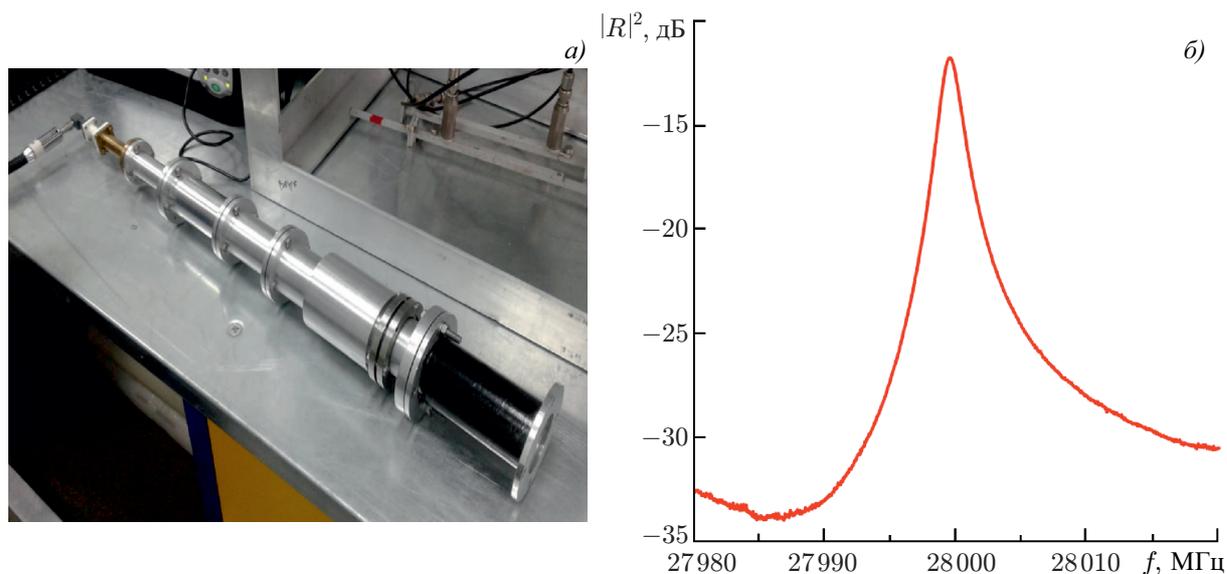


Рис. 7. Волноводный резонансный отражатель с преобразователями  $TE_{1,1}-TE_{0,2}$  в сборе (а), измеренная частотная зависимость коэффициента отражения от волноводного отражателя с добротностью  $Q = 15\,000$  (б)

#### 4. ВОЛНОВОДНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ

Первый вариант отражателя представляет собой расширение круглого волновода на резонансной моде  $TE_{0,3,1}$ . Отражатель представляет собой дюралюминиевый резонатор в виде участка круглого волновода с диаметром 34,816 мм и длиной 49,5 мм. Выбор геометрических параметров определяется необходимой добротностью и коэффициентом отражения и существенно зависит от омических потерь, рассеяния излучения в высшие моды и связи, обусловленной неоднородностями — ступеньками, образующими резонатор. Расчёт и выбор геометрических параметров волноводного отражателя проведён с учётом омических потерь мод круглого волновода. При вычислениях предполагалось, что на отражатель падает единственная рабочая мода гиротрона  $TE_{0,2}$ , а другие моды, возникающие в выходном расширении резонатора гиротрона, для простоты не учитывались. Для измерения коэффициента отражения при малом уровне мощности последовательно включаются преобразователи типов мод  $TE_{1,1}-TE_{0,1}$  и  $TE_{0,1}-TE_{0,2}$ . На рис. 7а показана волноводная система в сборе. На рис. 7б представлена частотная зависимость коэффициента отражения, измеренная с помощью векторного анализатора цепей при комнатной температуре. Добротность отражателя составляет около 15 000, коэффициент отражения по мощности — 6 % на резонансной частоте 27 999 МГц. Резонансная частота оказалась на краю диапазона перестройки гиротрона вследствие увеличения диаметра изготовленного резонатора на 10 мкм по сравнению с расчётным значением 34,826 мм.

Необходимо отметить, что представленный резонатор является хорошим примером того, как малые по сравнению с длиной волны неоднородности в сверхразмерном волноводном тракте могут привести к существенным омическим потерям на паразитном резонансе.

Первоначально предполагалось, что волноводный отражатель на фиксированную частоту обеспечивает необходимые для эксперимента с гиротроном характеристики. Но эффект захвата частоты с волноводным отражателем обнаружен не был, что, видимо, вызвано быстрым уходом частоты отражателя из зоны генерации гиротрона за счёт омического нагрева и расширения резонатора выходным излучением с мощностью около 1 кВт. Измерения температуры волно-

водного отражателя с помощью инфракрасной камеры показали, что резонансный отражатель нагревается существенно больше, чем прилегающие участки однородного волноводного тракта. Для уменьшения влияния нагрева на параметры резонансного отражателя и обеспечения возможности перестройки частоты был разработан отражатель на основе квазиоптического двухзеркального резонатора с подвижным зеркалом.

## 5. КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ

Перестраиваемый квазиоптический резонансный отражатель на моде  $TE_{0,0,p}$  ( $p \gg 1$ ) обладает лучшими характеристиками по сравнению с волноводным отражателем. В данном случае на выходе гиротрона необходимо установить последовательность преобразователей типов мод  $TE_{0,2}-TE_{0,1}$ ,  $TE_{0,1}-TE_{1,1}$  и  $TE_{1,1}-TE_{0,0}$  (гауссов волновой пучок). Возбуждение резонатора соответствующим волновым пучком обеспечивает селективное возбуждение низшего  $TE_{0,0,q}$ -колебания в квазиоптическом резонаторе [27]. В отличие от волноводного отражателя в данном варианте требуемую величину дифракционных потерь можно обеспечить выбором размера фокусирующих зеркал резонатора, а рабочую частоту перестраивать изменением расстояния между ними. Основным преимуществом такого отражателя является малый по сравнению с волноводным резонатором нагрев отражающих поверхностей, что обеспечивает лучшую стабильность резонатора в эксперименте с гиротроном. В этом случае рассеянное излучение будет поглощаться в воде, протекающей по тefлоновой трубке вокруг резонатора.

Параметрами, существенно влияющими на добротность квазиоптического резонансного отражателя  $Q$ , коэффициент отражения  $R$  и коэффициент прохождения  $T$ , являются связь (коэффициент прохождения через делительную пластинку  $t$ ) и потери (коэффициент отражения от зеркала в резонаторе  $R_m$ , включающий в себя не только омические, но и дифракционные потери):

$$R = - \frac{(1 - t^2) R_m \exp(ikL + i\varphi)}{1 + t^2 R_m^2 \exp(i2kL + i2\varphi)}, \quad (7)$$

$$T = it \left[ 1 + \frac{(1 - t^2) R_m^2 \exp(i2kL + i2\varphi)}{1 + t^2 R_m^2 \exp(i2kL + i2\varphi)} \right], \quad (8)$$

где  $\varphi = (1/\pi) \arccos(1 - L/R_\varphi)$  — дополнительный набег фазы при отражении от фокусирующих зеркал,  $2L$  — расстояние между зеркалами,  $R_\varphi$  — радиус кривизны зеркала.

Связь резонатора осуществляется через делительную диэлектрическую пластинку, установленную под углом к выходному излучению гиротрона. Излучатель (преобразователь мод  $TE_{1,1}-TE_{0,0}$ ) формирует линейно-поляризованный гауссов волновой пучок с перетяжкой полуширины 17,5 мм на расстоянии 80 мм от выходной апертуры излучателя в центре делительной пластины. Входной диаметр излучателя составляет 17 мм, выходной диаметр 80 мм, длина 250 мм. Делительная пластинка размещена в центре симметричного резонатора со сферическими зеркалами. Требуемый коэффициент связи достигается выбором толщины пластины. Квазиоптический резонатор достаточно компактен (см. рис. 8а) — расстояние между зеркалами составляет около 240 мм при диаметре зеркал 120 мм.

Расчёт частотной зависимости возбуждения резонатора и рабочей моды в нём выполнялся в аксиально-симметричном приближении итерационным методом Фокса—Ли [28]. Несмотря на медленную сходимость в случае колебаний с высокой добротностью и трудности при расчёте высших мод резонатора [29, 30], метод Фокса—Ли позволяет в нашем случае быстро находить низшую моду ( $TE_{0,0}$ ) резонатора, обладающую умеренной добротностью. При этом высшие моды  $TE_{m,n}$  ( $\{m, n\} > 1$ ) обладают сравнительно большими дифракционными потерями. Квазиоптические зеркала рассматривались в приближении фазовых корректоров с ограниченными

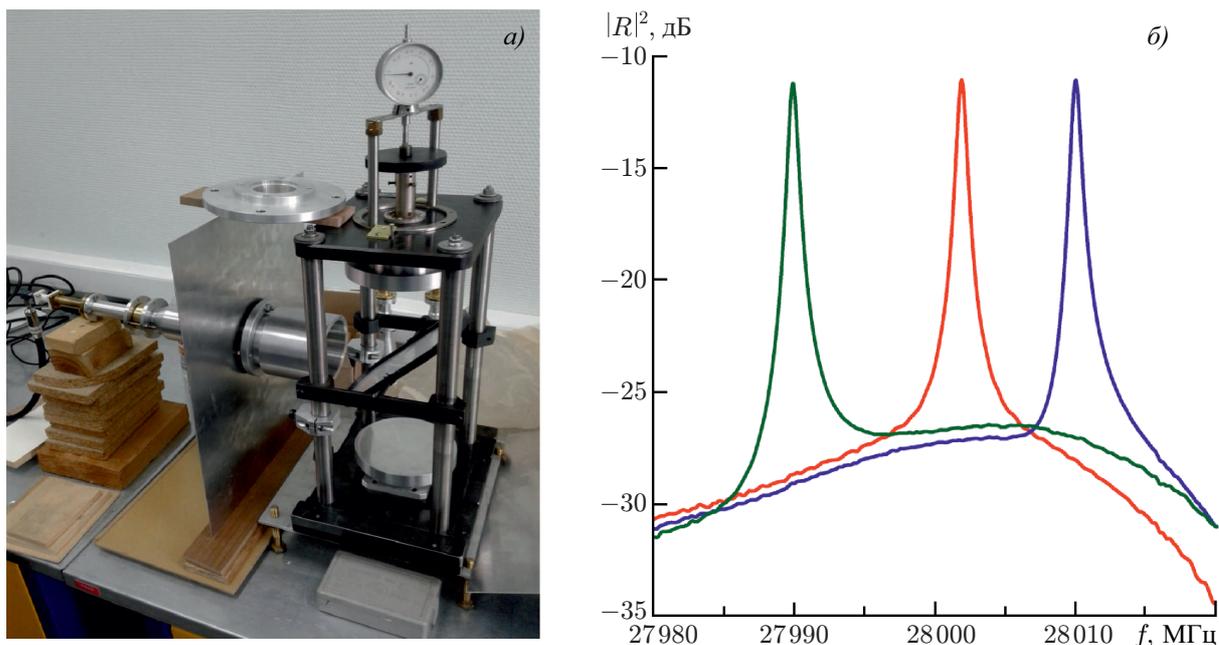


Рис. 8. Квазиоптический двухзеркальный отражатель (а) и частотная зависимость измеренных коэффициентов отражения от резонансного отражателя для разных положений подвижного зеркала (б). Добротность  $Q = 40\,000$

апертурами. Число итераций в методе Фокса—Ли выбиралось исходя из заданной величины погрешности между последовательными итерациями.

Измерения и настройка отражателя при малом уровне мощности сводятся к подключению преобразователя мод  $TE_{1,1}$ — $TEM_{0,0}$  к квазиоптическому резонатору. На рис. 8б показаны частотные зависимости коэффициентов отражения от резонансного отражателя, измеренные при малом уровне мощности с помощью векторного анализатора цепей. Измерения выполнены для разных расстояний между зеркалами в полосе перестройки рабочей частоты гиротрона магнитным полем. Перемещение зеркала резонатора выполнялось по показаниям микрометра. Измеренный коэффициент отражения по мощности составляет около 8 % на резонансной частоте при добротности около 40 000 и не изменяется при настройке частоты.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены два варианта резонансных отражателей, предназначенных для экспериментального исследования влияния отражения моды гиротрона  $TE_{0,2}$  на его работу. С помощью разработанных волноводных преобразователей типов мод ( $TE_{1,1}$ — $TE_{0,1}$ ,  $TE_{0,1}$ — $TE_{0,2}$ , а также моды  $TE_{1,1}$  в гауссов волновой пучок) проведены измерения частотных характеристик отражателей при малом уровне мощности с помощью векторного анализатора цепей. В случае волноводного отражателя, представляющего собой цилиндрический резонатор, измеренный коэффициент отражения моды  $TE_{0,2}$  составляет 6 % по мощности на частоте 27 999 МГц с добротностью 15 000. Во втором варианте отражателя, квазиоптическом двухзеркальном резонаторе с соответствующими преобразователями типов мод, возможна перестройка частоты перемещением одного из зеркал. В полосе перестройки частоты 27 990÷28 010 МГц коэффициент отражения составляет 8 % с добротностью около 40 000. Резонансный отражатель с квазиоптическим перестраиваемым резонатором, несмотря на сложность конструкции, обладает большей тепловой

стабильностью при работе с гиротроном при уровне мощности выходного излучения около 1 кВт.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-02-00839). Авторы благодарят М. Ю. Шмелёва и В. В. Паршина за оказанную помощь в проведении измерений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Denisov G. G. // EPJ Web Conf. 2017. V. 149. Art. no. 01001. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714901001>
2. Idehara T., Mitsudo S., Ogawa I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 3, P. 910–916. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.827599>
3. Fokin A., Glyavin M., Golubiatnikov G., et al. // Sci. Rep. 2018. V. 8, No. 1. Art. no. 4317. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22772-1>
4. Antonsen T. M., Cai S. Y., Nusinovich G. S. // Phys. Fluids B. Plasma Phys. 1992. V. 4, No. 12. P. 4131–4139. <https://doi.org/10.1063/1.860320>
5. Glyavin M. Y., Zapevalov V. E. // Int. J. Infrared Millim. Waves. 1998. V. 19, No. 11. P. 1499–1511. <https://doi.org/10.1023/A:1022655025562>
6. Dumbrajs O., Glyavin M. Y., Zapevalov V. E., Zavolsky N. A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28, No. 3. P. 588–596. <https://doi.org/10.1109/27.887680>
7. Зотова И. В., Гинзбург Н. С., Денисов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 759–769.
8. Airila M. I., Kall P. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2004. V. 52, No. 2. P. 522–528. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.821920>
9. Батанов Г. М., Колик Л. В., Новожилова Ю. В. и др. // Журн. техн. физ. 2001. Т. 71, № 5. С. 90–95.
10. Kharchev N., Cappa A., Malakhov D., et al. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2015. V. 36, No. 12. P. 1145–1156. <https://doi.org/10.1007/s10762-015-0206-0>
11. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Кулыгин М. Л. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 747–758.
12. Melnikova M. M., Rozhnev A. G., Ryskin N. M., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2016. V. 63, No. 3. P. 1288–1293. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2512868>
13. Глявин М. Ю., Запечалов В. Е., Куфтин А. Н., Лучинин А. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 4. С. 440–444.
14. Khutoryan E. M., Idehara T., Melnikova M. M., et al. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2017. V. 38, No. 7. P. 824–837. <https://doi.org/10.1007/s10762-017-0378-x>
15. Glyavin M. Y., Ogawa I., Zotova I. V., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. V. 46, No. 7. P. 2465–2469. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2797480>
16. Богдашов А. А., Глявин М. Ю., Розенталь Р. М. и др. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 5. С. 87–94. <https://doi.org/10.21883/PJTf.2018.05.45712.17032>
17. Vykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 1. P. 67–72. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.823904>
18. Generation and application of high power microwaves. 1st ed. / ed. by R. A Cairns, A. D. R. Phelps. Boca Raton : CRC Press, 1997. 351 p.
19. Belousov V. I., Bogdashov A. A., Chirkov A. V., et al. // Proc. Int. Workshop “Strong Microwaves in Plasmas”. 2–9 August 1999, Nizhny Novgorod. P. 948–953.

20. Levin L. Theory of waveguides: techniques for the solution of waveguide problems. London : Newnes-Butterworth, 1975. 350 p.
21. Kennedy J., Eberhart R. // Int. Conf. Neural Networks. Proc. 27 November –1 December 1995. Perth, Australia. V. 4. P. 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
22. Robinson J., Rahmat-Samii Y. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2004. V. 52, No. 2. P. 397–407. <https://doi.org/10.1109/TAP.2004.823969>
23. Bogdashov A. A., Rodin Y. V. // Int. J. Infrared Millim. Waves. 2007. V. 28, No. 8. P. 627–638. <https://doi.org/10.1007/s10762-007-9248-2>
24. Buckley M. J., Stein D. A., Vernon R. J. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1991. V. 39, No. 8. P. 1301–1306. <https://doi.org/10.1109/22.85404>
25. Bogdashov A. A., Chirkov A. V., Denisov G. G., Rodin Y. V. // Int. J. Infrared Millim. Waves. 2002. V. 23, No. 8. P. 1171–1178. <https://doi.org/10.1023/a:1019607624597>
26. Chirkov A. V., Denisov G. G., Alexandrov N. L. // Opt. Commun. 1995. V. 115, No. 5. P. 449–452. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(94\)00630-D](https://doi.org/10.1016/0030-4018(94)00630-D)
27. Авербах В. С., Власов С. Н., Таланов В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 9–10. С. 1333–1357.
28. Fox A. G., Li T. // The Bell System Tech. J. 1961. V. 40, No. 2. P. 453–488. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1961.tb01625.x>
29. Streifer W. // J. Opt. Soc. Am. 1965. V. 55, No. 7. P. 868–877. <https://doi.org/10.364/JOSA.55.000868>
30. Bergstein L. // Appl. Opt. 1968. V. 7, No. 3. P. 495–504. <https://doi.org/10.1364/AO.7.00495>

Поступила в редакцию 11 июня 2020 г.; принята в печать 23 июля 2020 г.

## RESONANT REFLECTORS FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF THE REFLECTED-SIGNAL INFLUENCE ON THE GYROTRON OPERATION MODES

*A. A. Bogdashov, Yu. V. Novozhilova, A. P. Fokin, and M. Yu. Glyavin*

Experimental study of the influence of resonant reflection of operation mode on the gyrotron generation regimes is a topical problem of modern high-power vacuum electronics. In this work, we formulate the requirements to the external resonant reflection system and propose its development variants. We consider resonant reflectors of two types, which are intended for experiments with a gyrotron on the operation mode  $TE_{0,2}$  at a frequency of 28 GHz. According to the initial requirements, the reflection coefficient of the gyrotron operation mode at the resonant frequency should amount to 5–10% with the reflector quality factor exceeding 15000 in the range 27998–28008 MHz of the gyrotron-frequency tuning by magnetic field. The first variant of the reflector is a cylindrical resonator on the  $TE_{0,3,1}$  mode. The measured reflection coefficient amounted to 6% at a frequency of 27999 MHz with the quality factor 15000. The tunable two-mirror resonator on the mode  $TEM_{0,0,p}$  ( $p \gg 1$ ) is the second variant. A number of the waveguide converters of the round-waveguide mode  $TE_{0,2}$  to the  $TE_{0,1}$  mode, the  $TE_{0,1}$  mode to the  $TE_{1,1}$  mode and the convertor of the  $TE_{1,1}$  mode to the linearly polarized Gaussian wave beam are developed and manufactured for excitation of a two-mirror resonant reflector by the gyrotron radiation. During the frequency tuning in the band 27990–28010 MHz, the measured reflection coefficient amounted to 8% with the quality factor about 40000. The calculated and measured converter characteristics are given along with the measured frequency characteristics of the developed resonant reflectors.

*A. A. Богдашов, Ю. В. Новожилова, А. П. Фокин, М. Ю. Глявин*