

УДК 621.373.826

МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОДНЫЙ РЕЗОНАТОР С НАКЛОНЕННЫМ ЗЕРКАЛОМ

А.В. Володенко, О.В. Гурин, А.В. Дегтярев, В.А. Маслов, В.А. Свич, А.Н. Топков

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков, 61077, Украина

e-mail: Andrey.V.Degtyarev@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 3 декабря 2010 г.

Экспериментально исследовано влияние разъюстировки плоских зеркал металлического волноводного резонатора терагерцового лазера ($\lambda = 0,4326$ мм) на энергетические потери, поляризацию и модовый состав излучения. Показано, что разъюстировка резонатора в плоскости параллельной плоскости поляризации возбуждающего излучения приводит к более быстрому росту потерь энергии низших несимметричных мод и большей зависимости степени поляризации этих мод от угла перекоса отражателя, чем при разъюстировке зеркал в плоскости перпендикулярной плоскости поляризации возбуждающего излучения. Для низшей симметричной моды такого различия в поведении энергетических потерь и степени поляризации не наблюдается.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: волноводный резонатор, разъюстировка зеркал, терагерцовый диапазон, энергетические потери, модовый состав, поляризация

Експериментально досліджено вплив роз'юстування плоских дзеркал металевого хвилевідного резонатора терагерцового лазера ($\lambda = 0,4326$ мм) на енергетичні втрати, поляризацію і модовий склад випромінювання. Показано, що роз'юстування резонатора в площині паралельній площині поляризації збуджуючого випромінювання призводить до більш швидкого зростання втрат енергії нижчих несиметричних мод і більшої залежності ступеня поляризації цих мод від кута перекосу відбивача, ніж при роз'юстування дзеркал у площині перпендикулярній площині поляризації збуджуючого випромінювання. Для нижчої симетричної моди такої відмінності в поведінці енергетичних втрат і ступеня поляризації не спостерігається.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: хвилевідний резонатор, роз'юстування дзеркал, терагерцовий діапазон, енергетичні втрати, модовий склад, поляризація

A study was made of the influence of misalignment of the plane mirrors of a metal waveguide resonator for terahertz laser ($\lambda = 0,4326$ mm) on the energy losses, polarization and mode structure of the radiation. It is shown that misalignment of the cavity in a plane parallel to the plane of polarization of the exciting radiation leads to more rapid growth of the energy losses of the lower asymmetric modes, and greater the degree of polarization of these modes on the tilt angle of the reflector than at the misalignment of mirrors in a plane perpendicular to the polarization plane of the exciting radiation. For the lowest symmetric mode this difference in the behavior of energy loss and the degree of polarization is not observed.

KEYWORDS: waveguide resonator, misalignment of the mirrors, terahertz range, energy losses, mode composition, polarization

ВВЕДЕНИЕ

В литературе неоднократно отмечалась высокая модовая селективность и устойчивость к разъюстировке резонаторов волноводных лазеров. Например, в [1] было показано, что введение в резонатор дополнительных потерь (проволочек), разъюстировка зеркал и наложение внешнего магнитного поля приводят лишь к изменению мощности генерации, но не меняют модового состава излучения. Влияние разъюстировки зеркал плоского резонатора на мощность излучения волноводного лазера экспериментально исследовано в [2, 3]. В [2] показано, что волноводный резонатор существенно устойчивее открытого плоского резонатора, однако вопрос о модовом составе излучения лазера с разъюстированным резонатором не рассмотрен. Результаты, полученные в [3], свидетельствуют о сильном влиянии разъюстировки плоских зеркал на модовый состав излучения. Все эти данные относятся к изучению характеристик излучения волноводных лазеров оптического и среднего ИК диапазонов. Влияние разъюстировки плоских зеркал на характеристики излучения волноводных квазиоптических резонаторов терагерцовых (ТГц) лазеров в литературе не рассмотрено.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния разъюстировки плоских зеркал металлического волноводного резонатора ТГц лазера ($\lambda = 0,4326$ мм) на энергетические потери и модовый состав излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Структурная схема экспериментальной установки для исследования спектра резонаторных мод, распределения их выходной интенсивности и поляризации приведена на рис. 1. Для получения симметричных резонансных кривых и обеспечения возможности исследования распределения интенсивности на выходе резонатора он включался на "проход" [4]. Исследуемый резонатор образован полым круглым медным волноводом 10 диаметром 13,8 мм и длиной 600 мм и полупрозрачными отражателями, в качестве которых применялись сетки из никелевых лент шириной 25 мкм, толщиной 17 мкм и периодом 100 мкм. Для излучения на длине волны $\lambda = 0,4326$ мм, на которой проводились измерения, коэффициент пропускания отражателей составлял 6 %.

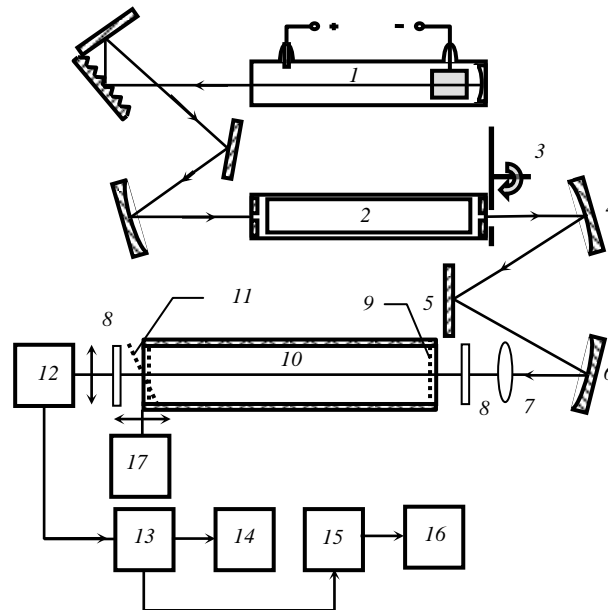


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – CO₂-лазер; 2 – ТГц ячейка; 3 – механический модулятор; 4-6 – зеркала; 7 – тефлоновая линза; 8 – аттенуатор; 9, 11 – отражатели; 10 – медный волновод; 12 – пирозлектрический приемник; 13 – усилитель; 14 – осциллограф; 15 – АЦП; 16 – ЭВМ, 17 – электродвигатель.

Все элементы резонатора были смонтированы на измерительной линии ИЗА-2, которая позволяла прецизионно (с перекосом не более 1 секунды) с помощью электропривода 16 перемещать вдоль оптической оси резонатора выходной отражатель 11. Резонатор возбуждался через полупрозрачный отражатель 9 излучением ТГц лазера с оптической накачкой (ЛОН), состоящего из CO₂-лазера накачки 1 и ТГц ячейки 2. ТГц ЛОН работал на молекуле муравьиной кислоты (НСООН) на длине волны 0,4326 мм. Пучок выходного излучения лазера прерывался механическим модулятором 3 с частотой около 100 Гц и затем с помощью согласующего квазиоптического тракта, состоящего из сферических 4, 6 и плоского 5 зеркал вводился в исследуемый резонатор под углом 0,01 рад к оси резонатора, что исключало попадание отраженного от резонатора излучения в лазер. Для исключения обратной связи между резонатором и детектором установлен аттенуатор 8. Для возбуждения высших мод резонатора перед ним помещалась тефлоновая линза 7 с фокусным расстоянием 30 см. Прошедшее через резонатор излучение регистрировалось приборами 12–16.

Методика измерений аналогична описанной в [4]. Спектр собственных колебаний резонатора регистрировался при изменении длины резонатора электроприводом 16. Полные энергетические потери за круговой обход δ определялись по измеренной ширине резонансной кривой. Суммарные потери энергии за круговой обход можно представить в виде

$$\delta = \delta_w + \delta_r + \delta_d + \delta_t,$$

где δ_w – волноводные потери, δ_r – потери в отражателях, вызванных поглощением и пропусканием, δ_d – потери, вызванные дифракцией на участка свободного пространства, δ_t – потери, обусловленные перекосом отражателей. Располагая отъюстированные отражатели вплотную к волноводу находим δ_0 при угле перекоса $\alpha = 0^\circ$. Наклоняя один из отражателей и измеряя полные потери резонаторных мод можно найти зависимость их дополнительных потерь от угла перекоса:

$$\delta_i(\alpha) = \delta(\alpha) - \delta_0.$$

Поперечные моды идентифицировались по межмодовым интервалам, которые рассчитывались по их фазовым сдвигам за круговой обход резонатора, и известным из теории [5] поперечным распределениям интенсивности. Измерение поперечных распределений интенсивности вблизи выходного отражателя резонатора проводилось при сканировании пироэлектрического приемника 12 с пространственным разрешением 1 мм в плоскости перпендикулярной направлению распространения излучения. Степень поляризации Π измерялась путем разделения пучка, проходящего через резонатор, на две ортогонально поляризованные компоненты с минимальной и максимальной мощностью с помощью анализатора. В качестве анализатора использовалась нанесенная на полиэтиленовой пленке одномерная решетка с поляризующей способностью 99 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Соосное возбуждение резонатора гауссовым пучком

При соосном возбуждении резонатора на его входе формировался слабо расходящийся пучок излучения с гауссовым профилем интенсивности диаметром на уровне 1/10 от максимальной интенсивности равным диаметру используемого волновода. Характерный вид перестроенной кривой резонатора при угле разьюстировки α выходного зеркала относительно оптической оси $\alpha = 0^\circ$ (а) и $\alpha = 0,5^\circ$ (б) приведен на рис. 2. При этом в спектре резонатора наблюдаются соответственно две и три моды TE_{11q} , TE_{12q} и TE_{03q} . Поперечное распределение интенсивности первой моды в первом случае

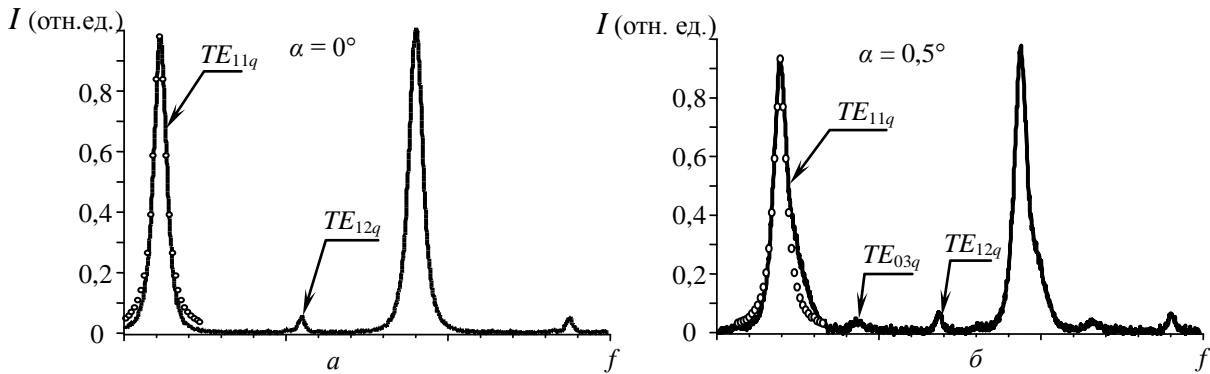


Рис. 2. Перестроенные характеристики резонатора при соосном возбуждении

соответствует волноводной моде TE_{11} и измеренная степень ее поляризации равна 91 %. Сравнение расчетных и измеренных межмодовых интервалов позволяет утверждать, что вторая наблюдаемая мода –

TE_{12q} . Измеренные полные потери энергии за круговой обход резонатора моды TE_{11q} в этом случае составили 31 %. Погрешность измерения полных потерь в эксперименте равна $\pm 2,5\%$.

При разьюстировке в резонаторе наблюдается возбуждение высших мод, имеющих меньшую степень поляризации и происходит изменение структуры поля в нем. Это подтверждает приведенная на рис. 3 зависимость дополнительных потерь энергии и степени поляризации моды TE_{11q} от угла разьюстировки выходного отражателя. При этом при перекосе отражателя в плоскости перпендикулярной направлению вектора поляризации возбуждающего резонатор излучения наблюдается более слабая зависимость характеристик резонаторных мод от разьюстировки, чем при перекосе в

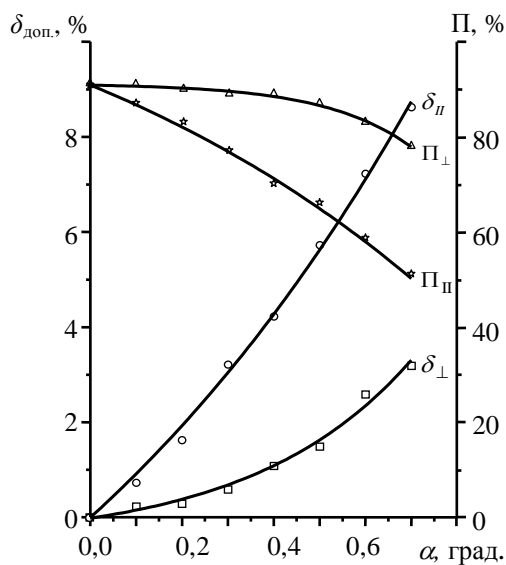


Рис.3. Зависимость дополнительных потерь энергии $\delta_{доп}$ и степени поляризации Π моды TE_{11q} от угла перекоса отражателя α

плоскости параллельной направлению вектора поляризации. Это обусловлено по-видимому тем, что в первом случае основной вклад в формирование основных резонаторных мод вносят несимметричные волноводные TE_{1m} моды, а во втором случае – симметричные TE_{0m} моды, имеющие меньшие потери. Это подтверждается и более слабой зависимостью степени поляризации моды TE_{11q} от угла перекоса во втором случае.

Возбуждение резонатора сфокусированным пучком излучения

При возбуждении резонатора сфокусированным пучком излучения воспроизводимость спектра ухудшается из-за резкой зависимости условий возбуждения различных мод от положения перетяжки пучка. Смещая линзу Γ поперек и вдоль пучка, удалось увеличить коэффициент передачи резонатора на любой выбранной моде.

Характерный вид перестроечных характеристик резонатора при оптимизации коэффициента передачи моды TE_{12q} приведен на рис. 4а. При этом в спектре резонатора наблюдались три низшие моды. Измеренная степень поляризации моды TE_{12q} составляет 45 %, что несколько ниже расчетного значения для волноводной моды TE_{12} . Это может быть обусловлено близким расположением мод TE_{12q} и TE_{01q} в спектре резонатора. Суммарные потери моды TE_{12q} при $\alpha = 0^\circ$ равны 18 %. Зависимость дополнительных потерь энергии и степени поляризации для данной моды, обусловленная перекосом отражателя, приведена на рис. 5.

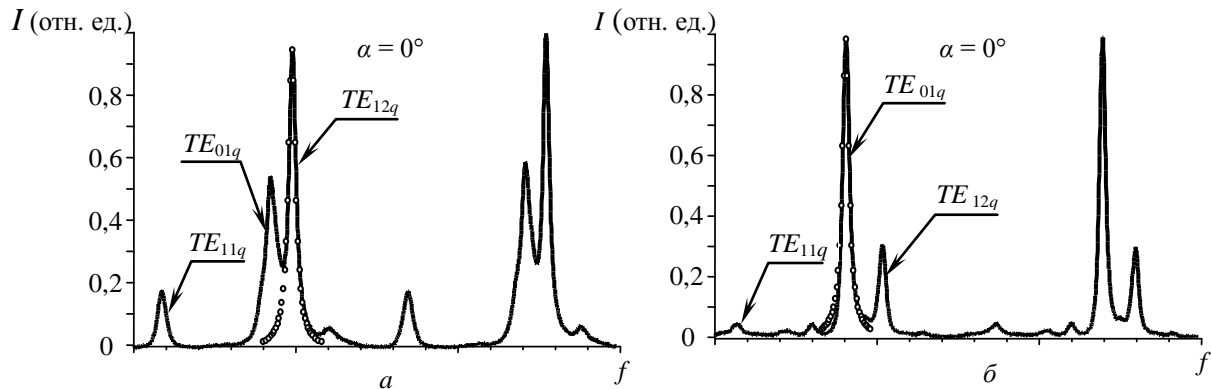


Рис. 4. Перестроечные характеристики резонатора при оптимизации коэффициента передачи на моду TE_{12q} (а) и моду TE_{01q} (б)

Здесь также, как и для моды TE_{11q} , наблюдается большая зависимость дополнительных потерь энергии от перекоса отражателя в плоскости параллельной направлению вектора поляризации возбуждающего излучения, чем для расстройки в плоскости параллельной направлению вектора поляризации возбуждающего излучения. Однако для моды TE_{12q} это различие выражено более слабо, чем

для моды TE_{11q} . Так, при угле разъюстировки $0,7^\circ$ разность дополнительных потерь при различных направлениях перекоса отражателей для моды TE_{11q} составляет порядка 6 %, а для моды TE_{12q} – порядка 3 %. Аналогично изменяется степень поляризации излучения, прошедшего через резонатор.

Характерный вид перестроечных характеристик резонатора при оптимизации коэффициента передачи моды TE_{01q} приведен на рис. 4б. В спектре резонатора также, как и при настройке на моду TE_{12q} , наблюдаются моды TE_{11q} , TE_{12q} и TE_{01q} .

Измеренное значение степени поляризации моды TE_{01q} не превышает 8 %. Некоторое отличие поляризации данной моды от круговой может быть вызвано неидеальностью используемого волновода (эллиптичность, кривизна и др.) или влиянием моды TE_{12q} , которая находится на частотном расстоянии от моды TE_{01q} меньшем, чем ширина резонансной кривой на уровне 0,1 по

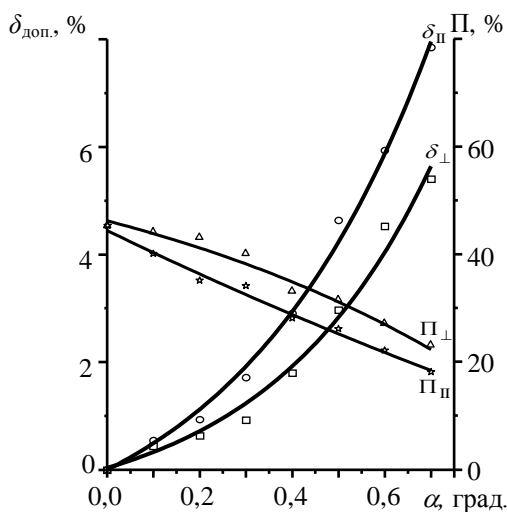


Рис. 5. Зависимость дополнительных потерь энергии $\delta_{\text{доп}}$ и степени поляризации Π моды TE_{12q} от угла перекоса отражателя α

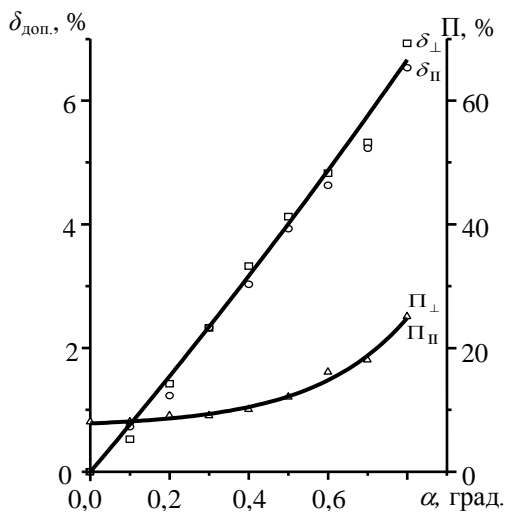


Рис. 6. Зависимость дополнительных потерь энергии $\delta_{\text{доп}}$ и степени поляризации П моды TE_{01q} от угла перекоса отражателя α

интенсивности от максимальной. Суммарные потери моды TE_{01q} при $\alpha = 0^\circ$ равны 17 %. Зависимость характеристик излучения для этой моды, обусловленная перекосом отражателя, приведена на рис. 6. В этом случае зависимость потерь энергии от направления перекоса отражателя относительно вектора поляризации возбуждающего излучения в пределах погрешности измерений не наблюдалась. Это, по-видимому, можно объяснить отсутствием поля данной моды на стенках волновода. Изменение степени поляризации излучения также не зависит от направления перекоса отражателя. Увеличение степени поляризации излучения при увеличении угла перекоса отражателя можно объяснить появлением в спектре резонатора высших мод, имеющих большую степень поляризации излучения.

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследовано влияние разъюстировки плоских зеркал металлического волноводного резонатора терагерцового лазера ($\lambda = 0,4326$ мм) на энергетические потери, поляризацию и модовый состав излучения. Показано, что разъюстировка резонатора в плоскости параллельной плоскости поляризации возбуждающего излучения приводит к более быстрому росту потерь энергии для мод TE_{11q} , TE_{12q} , чем при перекосе зеркал в плоскости перпендикулярной плоскости поляризации возбуждающего излучения. Потери энергии моды TE_{01q} не зависят от направления плоскости перекоса зеркал относительно плоскости поляризации возбуждающего излучения. Степень поляризации TE_{11q} и TE_{12q} мод резонатора уменьшается практически линейно с увеличением угла перекоса отражателей. Наблюдается большая зависимость степени поляризации этих мод при перекосе зеркала в плоскости параллельной плоскости поляризации возбуждающего излучения, чем при перекосе в перпендикулярной плоскости. Для моды TE_{01q} такого различия в поведении степени поляризации не наблюдается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jensen R.E., Tobin M.S. CO₂ waveguide gas laser // Appl. Phys. Lett. – 1972. – Vol.20, № 12. – P. 508–510.
2. Кузяков Б.А., Хорьков В.Ф. Малогабаритный одномодовый квантовый генератор на углекислом газе // Радиотехника и электроника. – 1981. – Т. 26, № 3. – С. 610–616.
3. Антюхов В.В., Глова А.Ф., Качурин О.Р. и др. Характеристики излучения волноводного CO₂-лазера с плоскими зеркалами // Квантовая электроника. – 1985. – Т.12, № 8. – С. 1612–1616.
4. Дегтярев А.В., Свич В.А., Ткаченко В.М., Топков А.Н. Металлические волноводные резонаторы субмиллиметровых лазеров с однородными отражателями // Использование радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Сборник научных трудов ИРЭ АН Украины. – Харьков. – 1993. – С. 105–111.
5. Справочник по волноводам. Пер. с англ. / Под ред. Я.Н.Фельда. – М.: Сов. Радио, 1952. – 432 с.