

В. П. Радионов, В. К. Киселев

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: kiseliov@ire.kharkov.ua*

КОНИЧЕСКИЕ 90° ЗЕРКАЛА ДЛЯ РЕЗОНАТОРА ЛАЗЕРА ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

В средней части терагерцевого диапазона радиочастот (~1 ТГц) одними из доступных источников излучения являются газоразрядные лазеры. Юстировка зеркал резонатора – это наиболее ответственная и сложная операция, которую приходится выполнять в процессе эксплуатации таких лазеров. Актуальной задачей является разработка лазерных резонаторов, зеркала которых не требуют юстировки. В работе проведено исследование конических зеркал с углом при вершине 90°. Испытания проводились в резонаторе газоразрядного HCN-лазера на длине волны 337 мкм ($f = 0,89$ ТГц). Результаты экспериментов показали, что такие зеркала не требуют точной юстировки. Это дает возможность повысить стабильность излучения, значительно упростить конструкцию лазера и снизить трудоемкость его обслуживания. Ил. 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: лазер терагерцевого диапазона, конические зеркала, юстировка зеркал резонатора.

Проблема юстировки зеркал резонатора присуща всем лазерам, но особенно она ощутима в газоразрядных субмиллиметровых лазерах, служащих источниками излучения в средней части терагерцевого (ТГц) диапазона частот (~1 ТГц). В таких лазерах юстировку зеркал приходится осуществлять не только при сборке, но и периодически при проведении регламентных работ по очистке зеркал и разрядной трубки от полимерного налета. Для долговременной стабильности излучения необходимо обеспечивать стабильность юстировки зеркал в процессе работы лазера. Эта задача усложняется тем, что в результате газового разряда выделяется большое количество тепла, вызывающее тепловое расширение продольных стержней, образующих каркас, на котором закреплены юстировочные механизмы зеркал (длина стержней обычно превышает 1 м). Одинаковое удлинение стержней легко компенсируется с помощью механизма осевого перемещения подвижного зеркала. Такими механизмами обычно снабжены резонаторы лазеров ТГц диапазона, поскольку они нуждаются в настройке на резонансную длину. Однако при появлении разности в длинах стержней в пределах нескольких десятков микрон (вследствие, например, неравномерного нагрева стержней либо разности их коэффициентов расширения) происходит нарушение юстировки и существенное угнетение генерации. Для обеспечения стабильности юстировки используются различные системы термостабилизации элементов крепления зеркал и всего каркаса лазера. Например, применяется система термостабилизации стержней с помощью проточной воды, что значительно усложняет конструкцию лазера и повышает ее стоимость. Разработка лазерных резонаторов, зеркала которых не требуют точной юстировки, является актуальной задачей, решение которой позволило бы существенно сократить работы по обслуживанию лазера и значительно упростить всю его конструкцию.

1. Постановка задачи. Работы по созданию резонаторов с зеркалами, которые не нуж-

даются в точной юстировке, проводились и ранее. Например, в качестве зеркал, не нуждающихся в точной юстировке, могут использоваться трехгранные 90° уголкового отражатели, обладающие свойствами возврата излучения строго в обратном направлении [1]. Такой резонатор показал стойкость к нарушению юстировки [2], однако не удалось решить проблему вывода излучения сквозь отверстие в уголкового отражателе. Вывод излучения осуществлялся с помощью делительной пластины, установленной в резонаторе, которая усложняла конструкцию резонатора и вносила дополнительные потери. Кроме того, уголкового отражатели сложны в изготовлении и имеют повышенные потери за счет трех отражений от их граней. В лазерных резонаторах могут использоваться конические зеркала, которые легче в изготовлении и вносят меньшие потери в резонатор. Конические зеркала с углами при вершинах, близкими к 180° [3, 4], используются в резонаторах как альтернатива сферическим зеркалам, корректируя расходимость излучения. Однако особый интерес вызывают конические зеркала с углами при вершинах 90° [5]. Такие зеркала в виде отражающей вовнутрь 90° конической поверхности обладают свойствами, позволяющими рассматривать их как альтернативу уголкового отражателям. По законам геометрической оптики лучи, которые падают на такое зеркало и лежат в плоскостях, содержащих ось конуса, после двух отражений от диаметрально противоположных образующих возвращаются строго в обратном направлении независимо от угла наклона падающего луча к оси конуса. Для лучей, не лежащих в осевой плоскости, ход лучей сложнее, но также наблюдается корректировка направления отраженного луча навстречу падающему лучу. Следовательно, такие зеркала могут повысить стойкость резонатора к нарушению юстировки. Для проверки этого в лазерах ТГц диапазона и были проведены данные исследования.

2. Постановка эксперимента и результаты. Эксперименты проводились на газоразряд-

ном HCN-лазере с длиной волны излучения 337 мкм (0,89 ТГц). Подобные лазеры используются для проведения биомедицинских исследований [6]. От биомедицинских лазеров в первую очередь требуется надежность, долговременная стабильность выходной мощности и простота обслуживания, поэтому проблема юстировки и сохранения стабильности юстировки зеркал для таких лазеров является весьма актуальной. В то же время к ним не предъявляют требований по поводу высоких уровней мощности, поляризации и модового состава излучения.

Исследуемый лазер имел длину резонатора 1 500 мм и диаметр разрядной трубки 50 мм. Для него были изготовлены зеркала в виде отражающей вовнутрь конической поверхности с углом при вершине 90°. Допуск изготовления задавался в сторону уменьшения угла с целью придания зеркалам свойства компенсации расходимости излучения. Выходное зеркало (рис. 1) изготовлено из алюминиевого сплава способом токарной обработки. В центре зеркала выполнено круглое отверстие для вывода излучения.

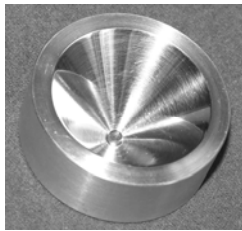


Рис. 1. Коническое 90° выходное зеркало

Непрозрачные конические зеркала (рис. 2) изготавливались способом токарной обработки из алюминиевого сплава (рис. 2, а) и методом наращивания на конической модели (рис. 2, б). При наращивании удалось получить более качественную вершину конуса.

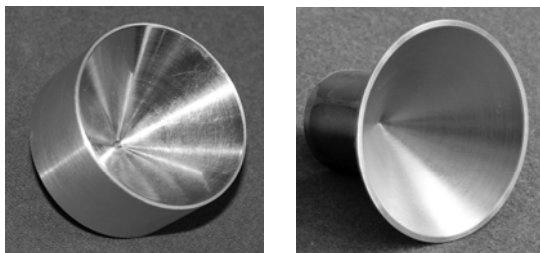


Рис. 2. Конические 90° непрозрачные зеркала

Были испытаны три схемы резонаторов (рис. 3), в каждой из которых резонатор образован разрядной трубкой 1, служащей волноводом, и зеркалами 2, 3. Зеркало 3 имеет отверстие для вывода излучения из резонатора, зеркало 2 снаб-

жено устройством 4 для перемещения вдоль оси резонатора. С его помощью производится настройка резонатора на резонансную длину, кратную целому числу полуволн линии излучения активного вещества. Направление распространения излучения в резонаторе показано стрелками 5. Под воздействием энергии накачки в разрядной трубке 1 синтезируется активное вещество, в котором происходит генерация и усиление лазерного излучения вследствие многократного отражения от зеркал 2, 3. Излучение, попавшее в область центрального отверстия в зеркале 3, выводится из резонатора. В область центрального отверстия излучение попадает благодаря дифракции. Смещению излучения к оси резонатора способствует также и то, что угол между диаметрально противоположными образующими конических зеркал выбран несколько меньше 90° (оптимизация угла не проводилась).

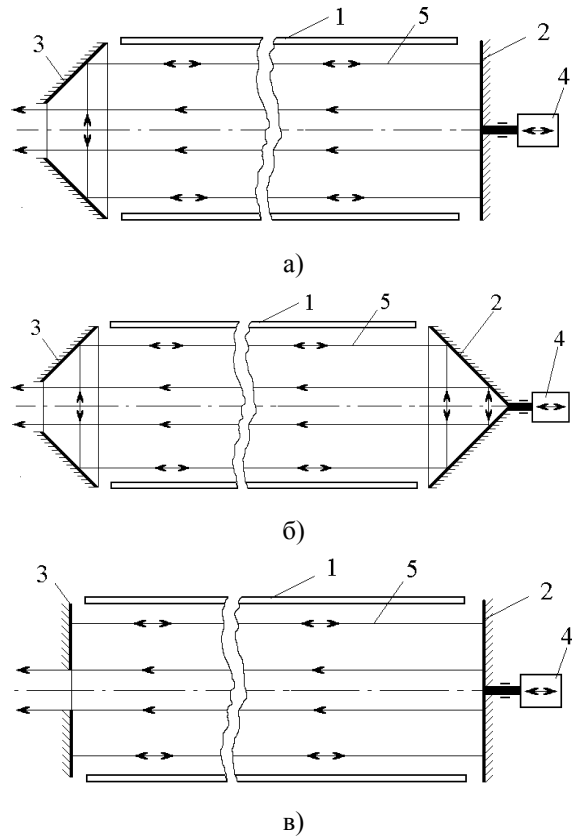


Рис. 3. Схемы резонаторов

Выходные зеркала газоразрядных лазеров ТГц диапазона наиболее часто подлежат монтажу с последующей неизбежной юстировкой. Их приходится демонтировать при очистке резонатора, заменять при подборе оптимальной связи в случае смены рабочих вещества и режимов накачки и при переходе на линии излучения с разным усилением. Следовательно, резонатор, содержащий выходное коническое зеркало, не требующее

точной юстировки, в сочетании с плоским зеркалом (рис. 3, а) представляет практический интерес и, кроме того, дает возможность сравнить влияние нарушения юстировки плоского и конического зеркал без их замены. Поэтому в первую очередь был испытан такой резонатор [7]. Получено лазерное излучение на длине волны 337 мкм. Мощность излучения на выходе лазера составила ~ 3 мВт. Проведено сравнение влияния перекоса плоского и конического зеркал на мощность излучения. Испытания показали, что перекося конического 90° зеркала оказывал малое негативное влияние на мощность излучения, примерно на один–два порядка меньше, чем перекося плоского зеркала. Наклон плоского зеркала на угол 20' относительно положения точной юстировки приводит к полному исчезновению генерации. В то время как наклон конического зеркала на 2° вызывает снижение мощности излучения примерно на 20 %.

Затем был испытан резонатор с двумя коническими зеркалами (рис. 3, б). Получена генерация на длине волны 337 мкм с выходной мощностью ~ 2 мВт [8]. Для такого резонатора снята зависимость влияния перекоса зеркал на мощность излучения (рис. 4, а). Для сравнения снята аналогичная зависимость (рис. 4, б) для резонатора с плоскими зеркалами (см. рис. 3, в).

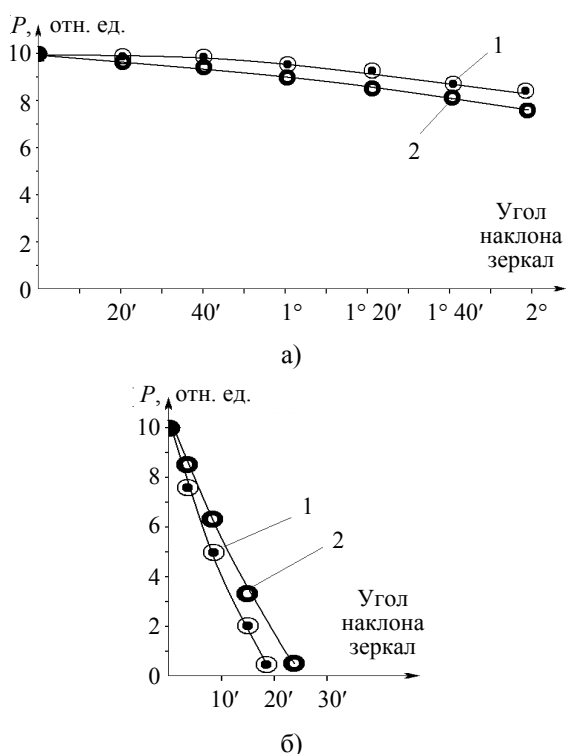


Рис. 4. Экспериментальная зависимость мощности лазерного излучения газоразрядного HCN-лазера (с двумя коническими 90° зеркалами в резонаторе (а); с двумя плоскими зеркалами в резонаторе (б)) от угла наклона зеркал резонатора: 1 – непрозрачного зеркала, 2 – выходного зеркала

Нулевому наклону зеркал соответствует положение идеальной юстировки, когда оси зеркал параллельны оси резонатора. Поочередно производился наклон каждого зеркала с последующим возвращением его в исходное положение с помощью соответствующего юстировочного механизма, имеющего три регулировочных винта, расположенных в вершинах прямоугольного равнобедренного треугольника. Поворот на пол оборота одного из регулировочных винтов, расположенных в точках острых вершин треугольника, соответствует наклону зеркала на 10'. Каждый раз при изменении угла наклона производилась корректировка длины резонатора с помощью механизма перемещения зеркала до настройки на максимум мощности. Излучение принималось пироэлектрическим приемником, позволяющим контролировать изменение сигнала с погрешностью 1% от максимального уровня. Из рис. 4 видно, что перекося конических 90° зеркал оказывает значительно меньшее негативное влияние на генерацию, чем перекося плоских зеркал.

При испытаниях лазера с коническими зеркалами установлены следующие особенности. Такой лазер может успешно работать без системы термостабилизации, однако при этом для обеспечения стабильности излучения необходимо производить подстройку длины резонатора. Механические нагрузки на корпус лазера и перекося установочных опор оказывают значительно меньшее влияние на мощность излучения, чем у лазера с плоскими зеркалами. Конические зеркала не требуют точной юстировки с применением юстировочных устройств. Однако, в отличие от плоских зеркал, необходимо соблюдение соосности конических зеркал и разрядной трубки. Медное коническое зеркало, изготовленное методом наращивания на конической модели (см. рис. 2, б) позволило получить более высокую мощность излучения, чем алюминиевое зеркало, изготовленное токарным способом (рис. 2, а).

На данном этапе не ставилась задача оптимизации конических зеркал и получения максимальной мощности. Для проведения экспериментов требовалось в первую очередь получить устойчивую генерацию, поэтому обратная связь в резонаторе была выбрана заведомо ниже оптимальной связи. Диаметр отверстия в выводном зеркале 4 мм, хотя оптимальный диаметр отверстия в плоском зеркале составляет для данного лазера 13 мм. Вследствие этого полученная мощность излучения была сравнительно невысокой – в несколько раз меньше, чем в подобном лазере с оптимизированными плоскими зеркалами. Следует учитывать и то, что 90° конические зеркала вносят несколько большие потери в резонатор, чем плоские зеркала, за счет двойного отражения. При этом потери на отражение в них все же

меньшие, чем в угловых отражателях, где излучение испытывает три отражения. Надо отметить, что уже полученной выводной мощности с избытком хватает для проведения целого ряда важных биомедицинских исследований [6], в которых прежде всего требуется надежность и стабильность лазера, а также простота его обслуживания.

Выводы. Проведенные эксперименты показывают, что конические 90° зеркала не нуждаются в точной юстировке, следовательно, тепловые и механические воздействия мало влияют на юстировку такого резонатора. Это позволяет отказаться от системы термостабилизации резонатора, а также дает возможность исключить из конструкции лазера сложные механизмы юстировки зеркал вместе с громоздким каркасом из продольных стержней и поперечных переборок, на котором они установлены. Это дает возможность устанавливать зеркала непосредственно на волноводе резонатора. Тепловое изменение длины резонатора позволяет компенсировать механизм перемещения подвижного зеркала.

Применение конических 90° зеркал позволяет повысить стабильность лазеров, облегчить обслуживание, а также дает возможность значительно упростить их конструкцию.

Библиографический список

1. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели / В. О. Кобак. – М.: Высш. шк., 1978. – 248 с.
2. Субмиллиметровый HCN-лазер с угловыми отражателями / Е. М. Кулешов, Ю. Е. Каменев, В. П. Радионов, А. А. Филимонова // Междунар. симп. Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн: тез. докл. – Х., 1994. – Т. 3. – С. 312–313.
3. Войтович Н. Н. Открытые резонаторы и линии с корректорами в виде конусов и усеченных конусов / Н. Н. Войтович // Радиотехника и электрон. – 1966. – № 3. – С. 489–494.
4. Parkhomenko Y. N. Mode Selection in Resonators With Conical Reflectors / Y. N. Parkhomenko, B. Spektor, J. Shamir // IEEE J. of Quantum Electron. – 2008. – 44, N 5. – P. 456–461.
5. Низьев В. Г. Генерация поляризационно-неоднородных мод в мощном CO₂-лазере / В. Г. Низьев, В. П. Якунин, Н. Г. Туркин // Квантовая электрон. – 2009. – 39, № 6. – С. 505–514.
6. Применение терагерцевой лазерной техники для исследования влияния ГВЧ-излучения на опухолевые процессы / В. К. Киселев, В. И. Маколинец, Н. А. Митряева, В. П. Радионов // Радиофизика и электрон. – 2012. – 3(17), № 2. – С. 95–101.

7. Radionov V. P. Terahertz gas-discharge laser with exit cone mirror / V. P. Radionov // Proc. Intern. Symp. Physics and Engineering of MM and Sub-MM Waves (MSMW-13): proc. – Kharkov, 2013. – P. 549–550.
8. Radionov V. P. Conical 90° mirrors in a terahertz gas-discharge laser / V. P. Radionov, V. K. Kiseliov // Intern. Symp. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-13): proc. – Sudak, 2013. – P. 164–165.

Рукопис поступила 26.11.2013.

V. P. Radionov, **V. K. Kiseliov**

CONICAL 90° MIRRORS FOR TERAHERTZ LASER RESONATOR

In the mid part of the terahertz range of frequencies (~ 1 THz) gas-discharge lasers are among the most common and available generators. Alignment of the resonator mirrors is one of the most critical and complex operations that have to be performed while using such lasers. Development of laser resonators that do not require adjustment of the mirrors is an important task. A study of the conical mirrors with an apex angle of 90° was conducted. These mirrors are tested in a laser cavity. The tests were carried out in a gas-discharge HCN-laser at a wavelength of 337 microns ($f=0.89$ THz). Experimental results have shown that such mirrors do not require precise alignment. This makes it possible to improve the stability of the radiation, to simplify the design of the laser and to reduce the complexity of its maintenance.

Key words: terahertz laser, conical mirrors, alignment of the cavity mirrors

В. П. Радіонов, **В. К. Кісельов**

КОНІЧНІ 90° ДЗЕРКАЛА ДЛЯ РЕЗОНАТОРА ЛАЗЕРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

У середній частині терагерцевого діапазону радіохвиль (~ 1 ТГц) одними з доступних джерел випромінювання є газорозрядні лазери. Юстировка дзеркал резонатора – це найбільш відповідальна та складна операція, яку доводиться виконувати в процесі експлуатації таких лазерів. Актуальним завданням є розробка лазерних резонаторів, дзеркала яких не вимагають юстирування. У роботі проведено дослідження конічних дзеркал з кутом при вершині 90°. Випробування проведено в резонаторі газорозрядного HCN-лазера на довжині хвилі 337 мкм ($f=0,89$ ТГц). Результати експериментів показали, що такі дзеркала не вимагають точного юстирування. Це дає можливість підвищити стабільність випромінювання, значно спростити конструкцію лазера та знизити трудомісткість його обслуговування.

Ключові слова: лазер терагерцевого діапазону, конічні дзеркала, юстирування дзеркал резонатора.