

Применение конических 90-градусных отражателей для решения проблемы юстировки зеркал в лазерах терагерцевого диапазона

В.П.Радионо́в, В.К.Киселев

Проведено исследование конических зеркал с углом при вершине 90° в резонаторе газоразрядного HCN-лазера с длиной волны излучения 337 мкм (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.

Ключевые слова: лазер терагерцевого диапазона, коническое зеркало, юстировка зеркал резонатора.

1. Введение

Проблема юстировки зеркал резонатора присуща всем лазерам, но особенно она ощутима для газоразрядных субмиллиметровых лазеров, служащих источниками излучения в средней части терагерцевого 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 газовом разряде 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 можно компенсировать с помощью механизма осевого перемещения подвижного зеркала. Такими механизмами обычно снабжены резонаторы лазеров терагерцевого диапазона, поскольку они нуждаются в настройке на резонансную длину волны. Однако при появлении различия в длинах стержней в пределах нескольких десятков микрометров (вследствие, например, неравномерного нагрева либо различия коэффициентов расширения стержней) происходит нарушение юстировки и существенное уменьшение мощности генерации. Для обеспечения стабильности юстировки используются различные системы термостабилизации элементов крепления зеркал, значительно усложняющие и удорожающие конструкцию лазера. Разработка лазерных резонаторов, зеркала которых не требуют точной юстировки, является актуальной задачей, решение которой позволило бы существенно облегчить обслуживание лазера и значительно упростить всю его конструкцию. Цель настоящей работы – создание резонатора лазера

терагерцевого диапазона, параметры излучения которого малочувствительны к нарушению юстировки зеркал.

2. Варианты решения задачи

В качестве зеркал резонатора могут использоваться трехгранные 90-градусные уголкового отражатели [1]. Они практически не требуют юстировки, однако возникает проблема вывода излучения сквозь отверстия в таких отражателях. Кроме того, уголкового отражатели сложны в изготовлении и имеют повышенные потери за счет трех отражений от их граней. Представляют интерес зеркала в виде отражающей вовнутрь 90-градусной конической поверхности [2], которые сравнительно просты в изготовлении, вносят меньшие потери в резонатор и обладают свойствами, позволяющими рассматривать их как альтернативу уголкового отражателям. По законам геометрической оптики лучи, падающие на такие зеркала и лежащие 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. Ход лучей, не лежащих в осевой плоскости, сложнее, но для них также наблюдается корректировка направления отраженного луча навстречу падающему. Для проверки устойчивости энергетических характеристик лазера терагерцевого диапазона к нарушению юстировки конических 90-градусных зеркал и были выполнены данные исследования.

3. Результаты эксперимента

Эксперименты проводились с использованием газоразрядного HCN-лазера с длиной волны излучения 337 мкм (0.89 ТГц). Подобные лазеры применяются для биомедицинских исследований [3]. От биомедицинских лазеров в первую очередь требуются надежность, долговременная стабильность выходной мощности и простота обслуживания. Поэтому проблема юстировки зеркал и ее стабильности для таких лазеров является весьма актуальной. В то же время к ним не предъявляются высокие требования по мощности, поляризации и модовому составу излучения.

В.П.Радионо́в, В.К.Киселев. Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАНУ, Украина, 61085 Харьков, ул. Акад. Проскуры, 12; e-mail: radion@ire.kharkov.ua

Поступила в редакцию 12 февраля 2014 г., после доработки – 20 марта 2014 г.

Для исследований были изготовлены два конических зеркала (рис.1). Оба они имеют отражающую вовнутрь коническую поверхность с углом при вершине 90° . Допуск изготовления задан в сторону уменьшения угла, для того чтобы зеркала могли компенсировать расходимость излучения. Выходное зеркало (на рис.1 слева) изготовлено из алюминиевого сплава путем токарной обработки. В центре зеркала расположено круглое отверстие для вывода излучения. Второе зеркало (на рис.1 справа) изготовлено из меди методом наращивания на конической модели, что позволило получить качественную вершину.

Выходные зеркала газоразрядных лазеров терагерцевого диапазона наиболее часто подлежат монтажу с последующей неизбежной юстировкой. Их приходится демонтировать при очистке резонатора, заменять при подборе оптимальной связи на выходе в случае смены рабочего вещества и рабочих режимов накачки, а также при переходе на линии излучения с разным усилением. Следовательно, резонатор, содержащий выходное зеркало, не требующее точной юстировки, в сочетании с плоским зеркалом представляет практический интерес и, кроме того, дает возможность сравнить влияния нарушения юстировки плоского и конического зеркал без их замены. Поэтому в первую очередь был испытан такой резонатор (рис.2). Он образован разрядной трубкой 1, служащей волноводом, и зеркалами 2 и 3. Длина резонатора составляет 1500 мм, диаметр разрядной трубки – 50 мм. Выходное зеркало 3 является отражающей вовнутрь боковой поверхностью усеченного прямого конуса с углом между диаметрально противоположными образующими $\sim 90^\circ$ (фотография на рис.1 слева). Плоское металлическое зеркало 2 снабжено устройством 4 для перемещения вдоль оси резонатора. С его помощью проводится настройка резонатора на резонансную длину волны, кратную целому числу длин полуволн линии излучения активного вещества. Направления распространения излучения в резонаторе пока-



Рис.1. Конические 90-градусные зеркала.

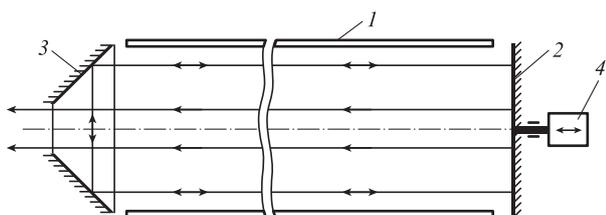


Рис.2. Схема лазерного резонатора с плоским глухим и коническим 90-градусным выходным зеркалами: 1 – разрядная трубка; 2, 3 – зеркала; 4 – устройство для перемещения зеркала 2.

заны стрелками. Под действием накачки в разрядной трубке 1 синтезируется активное вещество, в котором происходят генерация и усиление лазерного излучения вследствие его многократного отражения от зеркал 2 и 3. Излучение, попавшее благодаря дифракции в область центрального отверстия в зеркале 3, выводится из резонатора. Смещению лазерного излучения к оси резонатора способствует также то, что угол между диаметрально противоположными образующими конического зеркала несколько меньше 90° (оптимизация угла не проводилась).

В газоразрядном HCN-лазере с рассматриваемым резонатором было получено лазерное излучение на длине волны 337 мкм с выходной мощностью ~ 3 мВт. Проведено сравнение влияния разъюстировок плоского и конического зеркал на выходную мощность лазера. Из рис.3 представлены соответствующие зависимости. Нулевому углу наклона зеркал отвечает идеальная юстировка, когда оси зеркал параллельны оси резонатора. Поочередно с помощью соответствующего юстировочного механизма осуществлялся наклон каждого из зеркал с последующим возвращением его в исходное положение. Каждый раз при изменении угла наклона с помощью механизма перемещения зеркала корректировалась длина резонатора до настройки на максимум мощности. Из рис.3 видно, что разъюстировка конического 90-градусного зеркала оказывает значительно меньшее негативное влияние на мощность генерации, чем разъюстировка плоского зеркала.

Затем в резонатор вместо плоского зеркала было установлено второе коническое 90-градусное зеркало, фотография которого приведена на рис.1 справа. В таком резонаторе (рис.4) получена генерация излучения на длине волны 337 мкм с выходной мощностью ~ 2 мВт. Лазер работал без системы термостабилизации. Разъюстировка обоих конических 90-градусных зеркал оказывала малое негативное влияние на мощность излучения, примерно на один-два порядка меньшее, чем разъюстировка плоских зеркал в аналогичных резонаторах.

На данном этапе не ставилась задача оптимизации конических зеркал и достижения максимальной мощности,

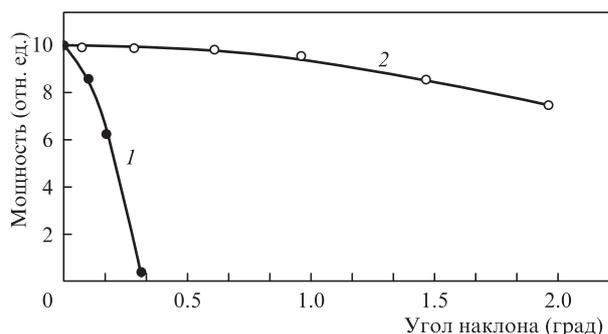


Рис.3. Экспериментальные зависимости выходной мощности HCN-лазера от угла наклона осей плоского (1) и конического (2) зеркал резонатора к его оси.

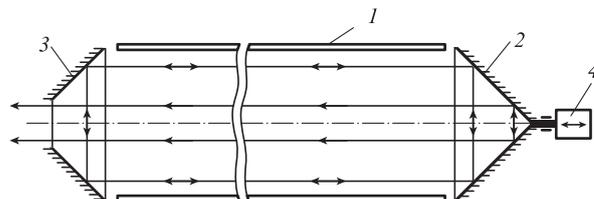


Рис.4. Схема лазерного резонатора с двумя коническими 90-градусными зеркалами. Обозначения те же, что и на рис.2.

требовалось в первую очередь получить генерацию. В связи с этим обратная связь в резонаторе была выбрана заведомо слабее предполагаемой оптимальной связи. Диаметр отверстия в выходном зеркале равнялся 4 мм, хотя оптимальный диаметр отверстия в плоском зеркале составляет для данного лазера 13 мм. Поэтому полученная мощность излучения была сравнительно невысокой – в несколько раз меньше, чем в подобном лазере с оптимизированными плоскими зеркалами. Следует также учитывать и то, что 90-градусные конические зеркала за счет двойного отражения в них вносят несколько большие потери в резонатор, чем плоские зеркала. При этом потери на отражение у них все же меньше, чем у 90-градусных уголкового отражателей, где излучение испытывает три отражения. Надо отметить, что уже полученной выходной мощности с избытком хватает для проведения целого ряда важных биомедицинских исследований [3], для которых в первую очередь требуются надежность и стабильность лазера, а также простота его обслуживания.

В дальнейшем планируются работы по оптимизации коэффициента пропускания конического выходного зеркала, по исследованию влияния на мощность генерации малых отклонений угла конуса от 90° , а также работы по изучению поляризации и модового состава лазерного излучения.

4. Выводы

Проведенные эксперименты показали, что конические 90-градусные зеркала не нуждаются в точной юстировке, поэтому влияние тепловых и механических воздействий на юстировку резонатора с такими зеркалами мало. Это позволяет отказаться от системы термостабилизации резонатора, а также исключить из конструкции лазера сложные механизмы юстировки зеркал вместе с громоздким каркасом из продольных стержней и поперечных переборок, на котором они установлены. При этом зеркала могут быть закреплены непосредственно на волноводе резонатора. Тепловое изменение длины резонатора дает возможность компенсировать механизм перемещения подвижного зеркала.

Применение 90-градусных конических зеркал позволяет значительно упростить конструкцию лазеров терагерцевого диапазона и облегчить их обслуживание.

1. Кобак В.О. *Радиолокационные отражатели* (М.: Высшая школа, 1978).
2. Низьев В.Г., Якунин В.П., Туркин Н.Г. *Квантовая электроника*, **39** (6), 505 (2009).
3. Киселев В.К., Маколинец В.И., Митряева Н.А., Радионов В.П. *Труды VI Междунар. конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине»* (С.-Петербург, Россия, с. 161, 2012).