

DOI: <https://10.15407/rej2018.02.069>

УДК 535.14+537.862

PACS 42.60.Бу

М. И. Дзюбенко, Ю. Е. Каменев, В. П. Радионов, З. Ю. Литвина*

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: mid41@ukr.net

**Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба*

77/79, ул. Сумская, Харьков, 61023, Украина

РЕЗОНАТОРНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ОДНОМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ

Предмет и цель работы. Терагерцевый (ТГц) диапазон частот в настоящее время привлекает большое внимание в связи с широкими возможностями применения его для решения целого ряда задач в науке, технике и медицине. В этом диапазоне в качестве частично прозрачных зеркал лазеров и различных квазиоптических приборов широко используются металлические решетки с периодом меньше длины волны. Определение параметров таких решеток является актуальной задачей.

Методы и методология работы. В работе рассмотрен способ экспериментального сравнения параметров (потерь и коэффициента пропускания) металлических решеток, состоящих из параллельных проводников. В качестве измерительной установки использован ТГц-лазер с плавной регулировкой вывода излучения из резонатора. Выходным зеркалом такого лазера служит исследуемая металлическая решетка. Вторым зеркалом лазерного резонатора является двугранное 90° зеркало. Регулировка обратной связи осуществляется путем поворота двугранного зеркала вокруг оси резонатора. Угол поворота двугранного зеркала, при котором обеспечивается максимум мощности лазерного излучения, характеризует коэффициент пропускания исследуемой решетки. Величина максимума мощности лазерного излучения характеризует величину потерь в исследуемой решетке. Это позволяет производить экспериментальное сравнение параметров решеток без использования метрологических приборов.

Результаты работы. В качестве апробации способа проведено экспериментальное сравнение параметров металлических решеток, имеющих разные конструкции. Выработаны рекомендации по повышению достоверности измерений и дальнейшему развитию этого способа.

Заключение. Предложенный способ является эффективным инструментом для сравнения коэффициентов пропускания и потерь в одномерных металлических решетках с целью их контроля и выбраковки. Кроме того, этот способ может служить измерительным инструментом в случае использования для сравнения эталонных решеток с известными параметрами. Ил. 6. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: металлическая решетка, терагерцевый диапазон, резонатор, потери.

Терагерцевый (ТГц) диапазон (0,1...10 ТГц) в настоящее время активно осваивается в различных областях науки, техники и медицины. Разрабатываются и совершенствуются различные квазиоптические устройства и приборы, способные работать в этом диапазоне. Одним из важных элементов квазиоптических устройств являются металлические решетки. Наибольшее распространение получили одномерные решетки, состоящие из параллельных металлических лент или проводников круглого сечения, поперечные размеры которых меньше длины волны. Такие решетки применяются в качестве частично прозрачных зеркал в различных устройствах: ТГц-лазерах, аттенуаторах, поляризаторах, вращателях плоскости поляризации и во многих других приборах. Расчету параметров металлических решеток посвящен ряд фун-

даментальных работ [1–3]. Кроме коэффициентов пропускания и отражения, часто требуется учитывать потери, вносимые решеткой. Особенно это важно при использовании решеток в качестве частично прозрачных зеркал в ТГц-лазерах. При каждом проходе через лазерный резонатор часть излучения теряется на зеркалах и незначительные потери, вносимые решеткой, могут существенно влиять на мощность излучения и КПД лазера. Теоретически рассчитать суммарные потери с достаточной точностью крайне сложно, поскольку, кроме геометрических размеров и проводимости металла, существенное влияние на параметры решетки оказывает технология ее изготовления. Обычно используются два типа решеток: из металлических проводников, расположенных на прозрачной подложке, и металлических провод-

ников, закрепленных на рамке. В решетках, выполненных на подложках, кроме геометрических размеров проводников, существенное влияние на параметры решетки оказывает материал подложки, ее толщина, а также неравномерность толщины и неоднородность материала подложки. В решетках, закрепленных на рамке, наблюдается провисание проводников, что существенно влияет на их параметры. Исходя из всего этого, становится очевидным, что более достоверные результаты может дать экспериментальное определение параметров решетки.

Взаимодействие излучения с решеткой изменяется при изменении угла падения. При нормальном падении излучения на решетку измерения усложняются тем, что отраженное излучение распространяется по одному пути с падающим излучением и требуется применять меры по их разделению. В то же время измерение параметров решеток при таком расположении весьма актуально, поскольку на практике решетки часто располагаются строго перпендикулярно направлению распространения излучения. Одним из примеров такого расположения являются квазиоптические резонаторы, в частности резонаторы ТГц-лазеров, в которых решетки выполняют функции частично прозрачных зеркал.

Лазерный резонатор может служить эффективным прибором для экспериментального измерения параметров решеток, выполняющих функции его зеркал. Благодаря многократному отражению излучения от зеркал, незначительное изменение потерь в них приводит к существенному изменению мощности лазерного излучения. Кроме того, в резонаторах, содержащих металлические решетки, удается получить плавную регулировку связи. Прозрачность зеркала в виде одномерной металлической решетки зависит от поляризации падающего на него излучения. Это дает возможность плавно регулировать вывод излучения из резонатора [4] и, следовательно, точно настроиться на оптимум связи с окружающей средой. Величина оптимальной связи несет информацию об усилении и потерях в резонаторе. В данной работе рассмотрен способ контроля и определения потерь в одномерных металлических решетках путем экспериментального сравнения исследуемых решеток. Это позволяет проводить

контроль и отбраковку решеток либо измерение их коэффициента пропускания и вносимых потерь путем сравнения с аналогичными параметрами эталонных решеток.

Методология исследований. Для определения потерь в одномерных металлических решетках использован лазерный резонатор с плавной регулировкой связи, который образован одномерной металлической решеткой и двугранным 90° отражателем. Регулировка связи в таком резонаторе осуществляется поворотом двугранного отражателя [5, 6]. Тергерцевые лазеры с резонатором, выполненным по такой схеме, не только обеспечивают оптимальную обратную связь, но и позволяют определять электродинамические параметры одномерных металлических решеток [7].

Максимальная мощность лазерного излучения достигается при оптимальном значении коэффициента пропускания выходного зеркала резонатора, которое обеспечивает вывод части излучения из резонатора, осуществляя связь резонатора с окружающей средой (обеспечивает обратную связь в генераторе, которым является лазер). Если в резонаторе изменяются потери, то изменяется и значение оптимальной связи. При этом чем меньше потери в резонаторе, тем выше мощность излучения при оптимальном значении связи. Следовательно, в лазерном резонаторе с плавной регулировкой связи можно проводить сравнение потерь в зеркалах, которыми он образован.

В наших экспериментах использовался газоразрядный HCN-лазер с длиной волны 337 мкм. Конструкция лазера показана на рис. 1.

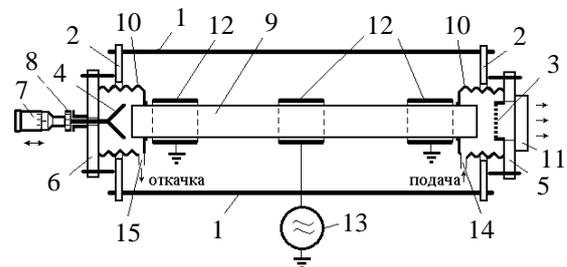


Рис. 1. Конструкция газоразрядного HCN-лазера

Лазер имеет жесткий каркас, образованный термостабилизированными стержнями 1 с двумя закрепленными на их торцах диэлектрическими панелями 2. Резонатор лазера об-

разован двумя внутренними зеркалами 3, 4, установленными на юстировочных устройствах 5, 6. Резонатор имеет длину 1,2 м, а диаметр зеркал – 40 мм. Зеркало 3 – частично прозрачное, через него производится вывод излучения. В качестве этого зеркала использовалась одномерная металлическая решетка. В качестве зеркала 4 использован двугранный 90° отражатель. Зеркало 4 снабжено микрометрическим механизмом 7 для перемещения его вдоль оси резонатора и механизмом 8 для поворота зеркала 4 вокруг оси резонатора. Лазер работает в одномодовом одночастотном режиме, и генерация возможна, когда между зеркалами укладывается целое число полуволн. Для настройки резонатора на резонансную длину служит механизм перемещения 7. Механизм перемещения обеспечивает контроль перемещения зеркала с точностью до 1 мкм. С помощью механизма поворота 8 осуществляется плавная регулировка вывода излучения из резонатора.

Активное вещество ограничено разрядной трубкой 9, которая одновременно выполняет функции волновода. Разрядная трубка 9 герметично установлена в сильфонах 10, подсоединенных к юстировочным устройствам 5, 6. Вывод излучения из герметичного резонаторного пространства осуществляется сквозь прозрачное окно 11. Газовый разряд возбуждается сквозь стенки разрядной трубки при помощи трех цилиндрических электродов 12, установленных снаружи разрядной трубки 9. Центральный электрод подключен к высокочастотному источнику 13, а крайние электроды заземлены.

При работе газоразрядных ТГц-лазеров требуется производить откачку из резонатора отработанных газов и подавать в резонатор рабочую смесь газов. Поэтому в состав лазера входит система откачки и система подачи рабочей смеси. Подача и откачка производятся через патрубки 14, 15. Откачка осуществляется с помощью форвакуумного насоса (на схеме не показан). Подготовка рабочей смеси газов осуществляется при помощи регулируемых натекателей (на схеме не показаны). В HCN-лазере в качестве рабочей смеси используется смесь из азота и углеводородсодержащих газов под давлением порядка 1 мм рт. ст. Лазер генерирует излу-

чение с длиной волны 337 мкм. Мощность излучения в непрерывном режиме составляет около 10 мВт.

Схема лазерного резонатора с плавной регулировкой вывода излучения (регулировкой обратной связи) показана на рис. 2. Резонатор образован одномерной металлической решеткой и двугранным 90° отражателем. Принцип регулировки основан на известном свойстве двугранного 90° отражателя изменять азимут поляризации падающего на него излучения. Если ребро двугранного отражателя параллельно проводникам одномерной металлической решетки, то из резонатора выводится минимальная часть излучения. Излучение, генерируемое в лазерном резонаторе с выходным зеркалом в виде одномерной решетки, обычно линейно поляризовано. Вектор \vec{E} напряженности электрического поля параллелен проводникам решетки. Решетка отражает основную часть излучения в резонатор и пропускает лишь малую часть. Соотношение между этими частями задано параметрами решетки.

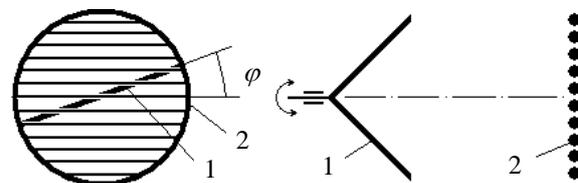


Рис. 2. Схема лазерного резонатора с плавной регулировкой вывода излучения: 1 – двугранное 90° зеркало; 2 – решетка

При повороте двугранного отражателя на угол φ относительно проводников решетки изменяется азимут поляризации отраженного от него излучения. В линейно поляризованном излучении появляется ортогональная составляющая, для которой решетка прозрачна. В результате вывод излучения из резонатора увеличивается. Выводимое излучение приобретает эллиптическую поляризацию. При увеличении угла φ часть выводимого из резонатора излучения увеличивается. Таким образом, поворачивая двугранное зеркало вокруг оси резонатора, можно в широких пределах изменять часть выводимого излучения. Для получения при этом оптимальной связи нужно, чтобы коэффициент пропуска-

ния решетки (в положении, когда $\varphi = 0$) был несколько ниже оптимального.

На рис. 3 показано двугранное 90° зеркало лазерного резонатора, а на рис. 4 – механизм его перемещения и поворота. Механизм обеспечивает перемещение и поворот зеркала и снабжен шкалами отсчета поворота в градусах и перемещения в микрометрах.



Рис. 3. Двугранное 90° зеркало

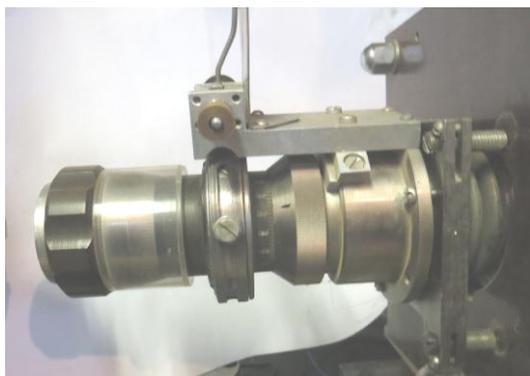


Рис. 4. Механизм перемещения и поворота двугранного зеркала лазерного резонатора

С помощью данной лазерной установки было произведено сравнение потерь, вносимых в лазерный резонатор проволочной и ленточной решетками, которые изображены на рис. 5.

Проволочная решетка образована вольфрамовыми проводниками диаметром 10 мкм с шагом 60 мкм. Они закреплены на металлическом кольцевом основании методом гальванического наращивания (рис. 5, а).

Ленточная решетка выполнена методом напыления на прозрачной полиамидной пленке толщиной 25 мкм (рис. 5, б). Проводники выполнены из меди, имеют ширину 30 мкм и толщину 10 мкм. Шаг решетки составляет 50 мкм. Для получения плоской поверхности

пленку закрепили в специальной оправе из двух концентрических колец.

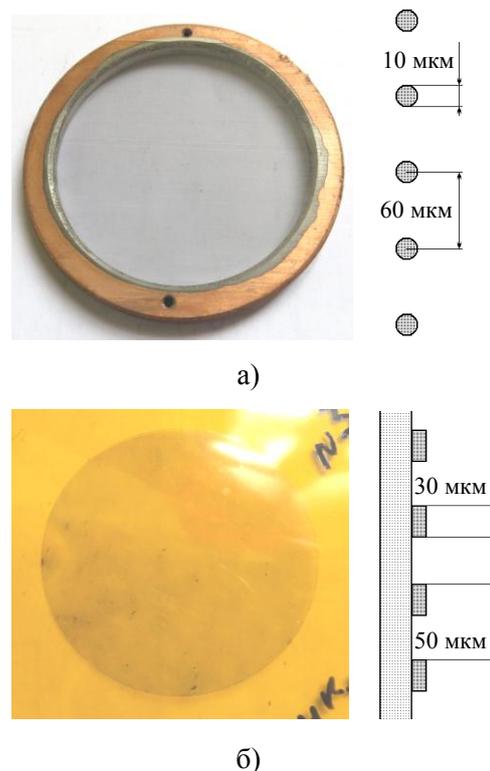


Рис. 5. Частично прозрачные зеркала лазерного резонатора: а) металлическая проволочная решетка, закрепленная на кольцевом основании; б) металлическая ленточная решетка, выполненная на прозрачной пленке

В ходе эксперимента решетки поочередно устанавливались в лазерном резонаторе с последующей юстировкой. Параметры активного вещества и накачки были идентичны. Излучение принималось пироэлектрическим приемником, не чувствительным к поляризации. Экспериментальные зависимости мощности лазерного излучения от угла поворота ребра двугранного зеркала относительно проводников решетки приведены на рис. 6.

Для повышения точности измерений после каждого поворота двугранного зеркала производилась его юстировка по максимуму мощности лазерного излучения, фиксируемого пироэлектрическим приемником. Это требовалось делать потому, что даже незначительное технологическое нарушение перпендикулярности ребра зеркала к оси резонатора, а также неравенство углов между осью и гранями приводит к нарушению юстировки резонатора при повороте двугранного зеркала. В свою очередь нарушение юстировки при-

водит к увеличению потерь в резонаторе и изменению мощности лазерного излучения. Величина этих изменений зависит еще и от поляризации излучения в резонаторе [8]. Поэтому дополнительная юстировка после каждого поворота двугранного зеркала хотя и значительно усложняет проведение эксперимента, но повышает достоверность измерений.

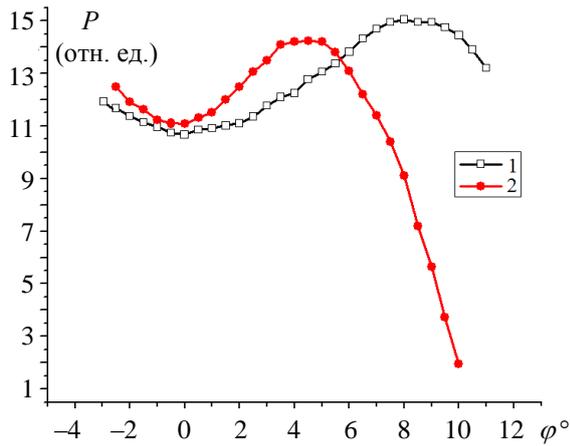


Рис. 6. Графики зависимости мощности лазерного излучения от угла поворота двугранного зеркала: 1 – для ленточной решетки; 2 – для проволочной решетки

В случае, когда ребро двугранного зеркала параллельно проводникам решетки (угол $\varphi = 0$), энергетика резонатора подобна резонатору, образованному плоским зеркалом и решеткой. Различие состоит лишь в том, что потери на двугранном зеркале больше, чем на плоском, за счет двух переотражений. В этом случае из резонатора выводится минимальная часть генерируемого в нем излучения. Лазерное излучение при таком расположении элементов резонатора линейно поляризовано. Вектор поляризации параллелен проводникам решетки.

При повороте двугранного зеркала лазерное излучение приобретает эллиптическую поляризацию и доля выводимого излучения увеличивается, что и позволяет подобрать оптимальную обратную связь (при условии, что связь, обеспечиваемая данной решеткой, при $\varphi = 0$ ниже оптимальной).

В ходе экспериментов установлено, что максимальная мощность лазерного излучения в режиме оптимальной обратной связи оказалась выше при использовании ленточной решетки. Параметры накачки и состав

смеси были максимально стабилизированы. Следовательно, исследуемая ленточная решетка имеет меньшие потери по сравнению с исследуемой проволочной, несмотря даже на то, что в состав ленточной решетки входит пленка, имеющая потери порядка 30%. Из представленных зависимостей также следует, что ленточная решетка менее прозрачна, чем проволочная, поскольку оптимум связи получен для нее при большем угле φ .

Приведенная методика позволяет производить сравнение параметров одномерных металлических решеток. При этом можно сравнивать не только потери в решетках, но и их коэффициент пропускания. Чем выше значение мощности излучения в режиме оптимальной связи – тем меньше потери в решетке. Если оптимальная связь достигнута при меньшем угле поворота φ , то решетка более прозрачна. Главным условием для сравниваемых решеток является то, что их коэффициент пропускания должен быть меньше, чем коэффициент пропускания оптимального выходного зеркала для данного лазера при угле $\varphi = 0$. Для большей достоверности результатов сравнения желательно, чтобы сравниваемые решетки обеспечивали оптимум связи при близких углах φ . Ведь при изменении угла φ изменяется поляризация излучения и при этом может изменяться не только коэффициент пропускания решетки, но и потери в ней. Для сравнения потерь в решетках, коэффициенты пропускания которых существенно отличаются, можно вводить в резонатор дополнительные нормированные потери (например, дополнительные пленки). Если использовать для этого пленки с нормированными потерями, то можно численно определять разницу потерь в решетках.

Выводы. Таким образом, в данной работе экспериментально проверен резонансный способ определения потерь в одномерных проволочных решетках с использованием ТГц-лазера. Предложенный способ может служить инструментом для сравнения коэффициентов пропускания и потерь в одномерных металлических решетках с целью их контроля и выбраковки. В случае сравнения с эталонными решетками с известными параметрами данный способ может служить инструментом для измерения. В ходе испытаний выработаны рекомендации по повы-

шению достоверности измерений и дальнейшего развитию этого способа.

Библиографический список

1. Вайнштейн Л. А. К электродинамической теории решеток. Ч. 1. Идеальная решетка в свободном пространстве. *Электроника больших мощностей*. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. Т. 2. С. 26–56.
2. Шестопалов В. П., Литвиненко Л. Н., Масалов С. А., Сологуб В. Г. *Дифракция волн на решетках*. Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. 288 с.
3. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Дифракционные решетки. *Резонансное рассеяние волн*. Киев: Наукова думка, 1986. Т. 1. 227 с.
4. Богомолов Г. Д., Русин Ф. С. Открытый резонатор с переменной квазиоптической связью. *Радиотехника и электроника*. 1970. Т. 15, № 4. С. 852–854.
5. А. с. № 1111657 СССР, МКИ Н01S3/08, 3/22. Волноводный газовый лазер / Ю. Е. Каменев, Е. М. Кулешов, В. К. Киселев, Д. Д. Литвинов, В. Н. Полупанов. 1984. Бюл. № 32.
6. Каменев Ю. Е., Кулешов Е. М. Волноводный HCN-лазер с регулируемой связью. *Квантовая электроника*. 1990. Т. 17, № 1. С. 58–59.
7. Каменев Ю. Е., Масалов С. А., Филимонова А. А. Измерение электродинамических параметров одномерных проволочных решеток в субмиллиметровом диапазоне. *Радиофизика и электроника*. Сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. Харьков, 2004. Т. 9, № 3. С. 615–618.
8. Volodenko A. V., Gurin O. V., Degtyarev A. V., Maslov V. A., Svich V. A., Senyuta V. S., Topkov A. N. Radiation characteristics of the metal waveguide resonator with a inclined mirror. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013. Vol. 72, N 14. P. 1349–1359.

REFERENCES

1. Vaynshteyn, L. A., 1963. To the electrodynamic theory of gratings. Part 1. The ideal grating in free space. *High Power Electronics*. Moscow: AS USSR Publ. 2, pp. 26–56 (in Russian).
2. Shestopalov, V. P., Litvinenko, L. N., Masalov, S. A., Sologub, V. G., 1973. *Diffraction of waves on gratings*. Kharkov: Publishing house KhGU (in Russian).
3. Shestopalov, V. P., Kirilenko, A. A., Masalov, S. A., Sirenko, Yu. K., 1986. Diffraction gratings. *Resonance scattering of waves*. Vol. 1. Kiev: Naukova dumka Publ. (in Russian).
4. Bogomolov, G. D., Rusin, F. S., 1970. An open resonator with a variable quasi-optical coupling. *Radiotekhnika i elektronika*, 15(4), pp. 852–854 (in Russian).
5. Kamenev, Ju. E., Kuleshov, E. M., Kiselev, V. K., Litvinov, D. D., Polupanov, V. N., 1984. *Waveguide gas laser*. USSR Authors' Certificate 111,165,7 (in Russian).
6. Kamenev, Yu. E., Kuleshov, E. M., 1990. Waveguide HCN laser with controlled coupling. *Quantum Electronics*, 17(1), pp. 58–59 (in Russian).

7. Kamenev, Yu. E., Masalov, S. A., Filimonova, A. A., 2004. Measurement of electrodynamic parameters of one-dimensional wire gratings in the Sub-millimeter wavelength range *Radiophysics and Electronics*. In: V. M. Yakovenko, ed. 2004. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ., 9(3), pp. 615–618 (in Russian).
8. Volodenko, A. V., Gurin, O. V., Degtyarev, A. V., Maslov, V. A., Svich, V. A., Senyuta, V. S., Topkov, A. N., 2013. Radiation characteristics of the metal waveguide resonator with a inclined mirror. *Telecommunications and Radio Engineering*, 72(14), pp. 1349–1359.

Рукопись поступила 31.01.2018.

M. I. Dzyubenko, Y. E. Kamenev,
V. P. Radionov, Z. Y. Litvina

RESONATOR METHOD FOR DETERMINATION OF LOSSES IN ONE-DIMENSIONAL METAL GRATINGS IN TERAHERTZ RANGE

Subject and purpose. The terahertz frequency range currently attracts much attention due to the wide possibilities of its application for solving a number of problems in science, technology, and medicine. In this range, metal gratings with the period shorter than the wavelength are widely used as partially transparent mirrors of lasers and in various quasi-optical devices. The determination of the parameters of such gratings is an actual problem.

Methods and methodology. The method of experimental comparison of the parameters (losses and transmittance) of metal gratings consisting of parallel conductors is presented in the paper. A THz laser with a smooth adjustment of the output of laser radiation from the resonator was used as a measuring device. The investigated metal grating serves as the exit mirror of this laser. The dihedral 90° mirror is the second mirror of the laser resonator. The adjustment of feedback is performed by rotation of the dihedral mirror around the resonator axis. The angle of rotation of the dihedral mirror, which provides the maximum power of laser radiation, characterizes the transmittance coefficient of the investigated grating. The value of the maximum power of laser radiation characterizes the magnitude of the losses in the investigated grating. This allows one to compare the grating parameters experimentally without the use of metrological instruments.

Results. An experimental comparison of the parameters of metal gratings with different structures was carried out as an approbation of the method. Recommendations for the increase of the measurement reliability and further advancement of this method were developed.

Conclusions. The proposed method is an effective tool for comparing the transmittance and loss factors in one-dimensional metal gratings for their control and culling. In addition, this method can serve as a measuring device, when reference gratings with known parameters are used for comparison.

Key words: metal grating, terahertz range, laser, resonator, losses.

М. І. Дзюбенко, Ю. Ю. Каменєв,
В. П. Радіонов, З. Ю. Літвіна

РЕЗОНАТОРНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ В ОДНОВИМІРНИХ МЕТАЛЕВИХ РЕШІТКАХ У ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Предмет і мета роботи. Терагерцовий діапазон частот на цей час привертає велику увагу дослідників і споживачів у зв'язку з широкими можливостями застосування його для вирішення цілої низки завдань у науці, техніці та медицині. У цьому діапазоні в якості частково прозорих дзеркал лазерів і різних квазіоптичних приладів широко використовуються металеві решітки з періодом, меншим за довжину хвилі. Визначення параметрів таких решіток є актуальним завданням.

Методи і методологія роботи. У роботі розглянуто спосіб експериментального порівняння параметрів (втрат і коефіцієнта пропускання) металевих решіток, що складаються з паралельних провідників. В якості вимірювальної установки використаний ТГц-лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора. Вихідним дзеркалом такого лазера служить

досліджувана металева решітка. Другим дзеркалом лазерного резонатора є двогранне 90° дзеркало. Регулювання зворотного зв'язку здійснюється шляхом повороту двогранного дзеркала навколо осі резонатора. Кут повороту двогранного дзеркала, при якому забезпечується максимум потужності лазерного випромінювання, характеризує коефіцієнт пропускання досліджуваної решітки. Величина максимуму потужності лазерного випромінювання характеризує величину втрат у досліджуваній решітці. Це дозволяє здійснювати експериментальне порівняння параметрів решіток без використання метрологічних приладів.

Результати роботи. В якості апробації способу проведено експериментальне порівняння параметрів металевих решіток, що мають різні конструкції. Вироблено рекомендації щодо підвищення достовірності вимірювань і подальшого розвитку цього способу.

Висновки. Запропонований спосіб є ефективним інструментом для порівняння коефіцієнтів пропускання і втрат в одновимірних металевих решітках з метою їх контролю і вибракування. Крім того, цей спосіб може слугувати вимірювальним засобом у разі використання для порівняння еталонних решіток з відомими параметрами.

Ключові слова: металева решітка, терагерцовий діапазон, лазер, резонатор, втрати.