

**М.И. Дзюбенко, Ю.Е. Каменев, С.А. Масалов, В.П. Радионов**

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

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

E-mail: mid41@ukr.net

## **Измерение электродинамических характеристик одномерных металлических ленточных решеток в терагерцевом диапазоне**

***Предмет и цель работы.** Терагерцевый (ТГц) диапазон частот привлекает большое внимание в связи с возможностями его применения для решения 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 целью данной работы.*

***Методы и методология работы.** В статье представлен способ экспериментального определения параметров (коэффициента пропускания и вносимого фазового сдвига) 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  $90^\circ$  зеркало. Регулировка обратной связи осуществляется путем поворота двугранного зеркала вокруг оси резонатора, в результате чего лазерное излучение приобретает эллиптическую поляризацию. Угол поворота двугранного зеркала, при котором обеспечивается равенство мощностей E- и H-поляризаций лазерного излучения, служит экспериментальным значением для расчета коэффициента пропускания решетки. Поляризационный эллипс излучения при этом угле поворота является основанием для расчета фазового сдвига, вносимого решеткой.*

***Результаты работы.** В качестве апробации способа проведено экспериментальное определение параметров металлических ленточных решеток, выполненных на прозрачной подложке. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами. Выработаны рекомендации по повышению достоверности измерений и дальнейшему развитию этого способа.*

***Заключение.** Предложенный способ позволяет определять параметры одномерных металлических ленточных решеток без использования метрологических приборов. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 17 назв.*

***Ключевые слова:** металлическая решетка, терагерцевый диапазон, резонатор, лазер, коэффициент пропускания, фазовый сдвиг.*

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 одномерные металлические решетки, состоящие из параллельных проводников, период ( $l$ ) которых меньше половины длины волны ( $l/\lambda < 0,5$ ). 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 фундаментальных работ [1–8]. Однако часто возникает потребность экспериментального измерения параметров решеток, поскольку конструктивные особенности и технология их изготовления могут вносить существенные коррективы в теоретические расчеты. В данной

работе представлены результаты экспериментальных измерений коэффициентов пропускания металлических ленточных решеток и вносимого ими фазового сдвига.

**1. Экспериментальная установка.** Лазерный резонатор может служить эффективным прибором для экспериментального измерения параметров решеток, выполняющих функции его зеркал [9]. Благодаря многократному отражению излучения от зеркал, незначительное изменение параметров решетки приводит к существенному изменению выходной мощности лазера. При этом для измерений не требуются высокоточные измерительные приборы, достаточно иметь индикатор, позволяющий контролировать относительное изменение мощности лазерного излучения.

Для определения параметров одномерных металлических ленточных решеток использован лазерный резонатор с плавной регулировкой связи, который образован исследуемой решеткой и двугранным  $90^\circ$  отражателем [10, 11]. Терагерцевые лазеры с резонатором, выполненным по такой схеме, не только обеспечивают оптимальную обратную связь, но и позволяют определять электродинамические параметры одномерных металлических решеток [12]. В наших экспериментах использовался газоразрядный HCN-лазер с длиной волны 337 мкм. Схема лазерного резонатора показана на рис. 1. Принцип регулировки вывода излучения из резонатора (регулировки связи) основан на известном свойстве двугранного  $90^\circ$  отражателя изменять поляризацию падающего на него излучения. Если на двугранный отражатель падает линейно поляризованное излучение, вектор напряженности электрического поля которого расположен под углом  $+\alpha$  к ребру отражателя,

то вектор напряженности отраженного излучения будет расположен под углом  $-\alpha$  к ребру отражателя, следовательно, повернут на угол  $2\alpha$  относительно вектора напряженности падающего излучения.

Когда ребро двугранного отражателя параллельно проводникам одномерной металлической решетки, в лазерном резонаторе генерируется линейно поляризованное излучение. Вектор напряженности электрического поля параллелен проводникам решетки ( $E$ -поляризация). Решетка отражает основную часть излучения в резонатор и пропускает лишь малую часть. Соотношение между этими частями задано параметрами решетки. В терагерцевых газоразрядных лазерах оптимальный коэффициент пропускания выходного зеркала обычно составляет 1–5 %. В случае, когда ребро двугранного зеркала параллельно проводникам решетки, из резонатора выводится минимальная часть излучения, задаваемая коэффициентом пропускания решетки  $T_E$  (для  $E$ -поляризации).

При повороте двугранного отражателя на угол  $\alpha$  относительно проводников решетки лазерное излучение приобретает эллиптическую поляризацию, в нем появляется ортогональная составляющая ( $H$ -поляризация, при которой вектор напряженности электрического поля перпендикулярен проводникам решетки). Для  $H$ -поляризации решетка практически прозрачна. В результате при увеличении угла  $\alpha$  часть выводимого из резонатора излучения увеличивается. Таким образом, поворачивая двугранное зеркало вокруг оси резонатора, можно в широких пределах изменять долю выводимого из резонатора излучения (изменять связь резонатора с внешним пространством или, другими словами, регулировать обратную связь

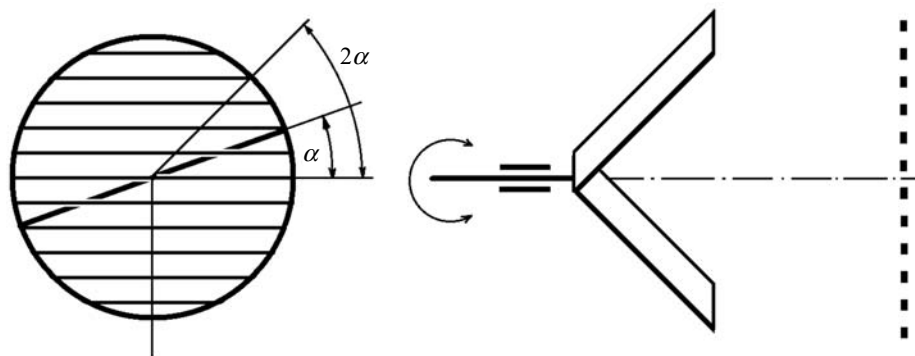


Рис. 1. Схема лазерного резонатора с плавной регулировкой вывода излучения

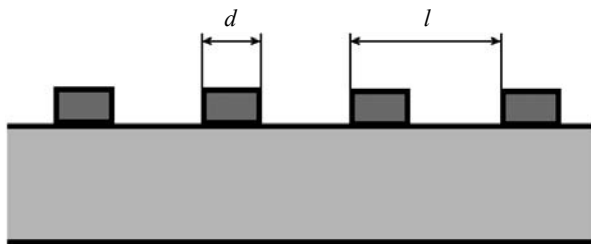


Рис. 2. Ленточная решетка на прозрачной подложке

в квантовом генераторе). При такой схеме регулировки получить оптимум обратной связи можно только при использовании решеток, у которых коэффициент пропускания несколько ниже, чем требуется для данного лазера.

**2. Методика измерений.** Рассмотренный лазерный резонатор позволяет не только регулировать связь, но и определять электродинамические параметры решетки, которая в нем использована. В данной работе использовались и измерялись металлические ленточные решетки, размещенные на прозрачной подложке (рис. 2).

Изменяя угол  $\alpha$  между ребром двугранного зеркала и направлением проводников одномерной решетки, определяем зависимость двух ортогонально поляризованных компонент мощности лазерного излучения от этого угла. Одна компонента параллельна проводникам решетки ( $E$ -поляризация), вторая – перпендикулярна ( $H$ -поляризация). Мощность этих компонент составляет:

$$\begin{aligned} P_E &= U^2 T_E \cos^2 \beta, \\ P_H &= U^2 T_H \sin^2 \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U$  – амплитуда падающего на решетку излучения;  $\beta$  – угол между направлением проводников решетки и направлением вектора электрического поля лазерного излучения, падающего на решетку внутри резонатора;  $T_E$  – коэффициент пропускания решетки для  $E$ -поляризации;  $T_H$  – коэффициент пропускания решетки для  $H$ -поляризации.

При равенстве компонент  $P_E$  и  $P_H$  выполняется соотношение:

$$T_E = T_H \operatorname{tg}^2 \beta. \quad (2)$$

Используя соотношение (2), можно на основании экспериментально определенного угла  $\beta$  рассчитать величину  $T_E$ . При этом величина

ну  $T_H$  (коэффициент пропускания решетки для  $H$ -поляризации) можно взять из теоретических расчетов [1–8]. Для рассматриваемых в нашей работе решеток величина  $T_H$  близка к единице и замена ее единицей не внесет существенных погрешностей в расчет.

При прохождении электромагнитных волн сквозь одномерную металлическую решетку компонента с  $E$ -поляризацией опережает по фазе компоненту с  $H$ -поляризацией [5, 6]. В результате этого при прохождении через решетку линейно поляризованное излучение может приобретать эллиптическую или круговую поляризацию [13–15]. Фазовый сдвиг между  $E$ - и  $H$ -составляющими эллиптической поляризации можно определить по параметрам поляризационного эллипса или поляризационной диаграммы [16] по формуле:

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_I = \operatorname{arctg} \frac{2r}{(1-r^2) \sin 2\delta}, \quad (3)$$

где  $\delta$  – угол наклона поляризационного эллипса;  $r = B/A$  – коэффициент эллиптичности,  $B$  и  $A$  – малая и большая полуоси поляризационного эллипса.

При равенстве  $E$ - и  $H$ -компонент формула расчета фазового сдвига приобретает следующий вид:

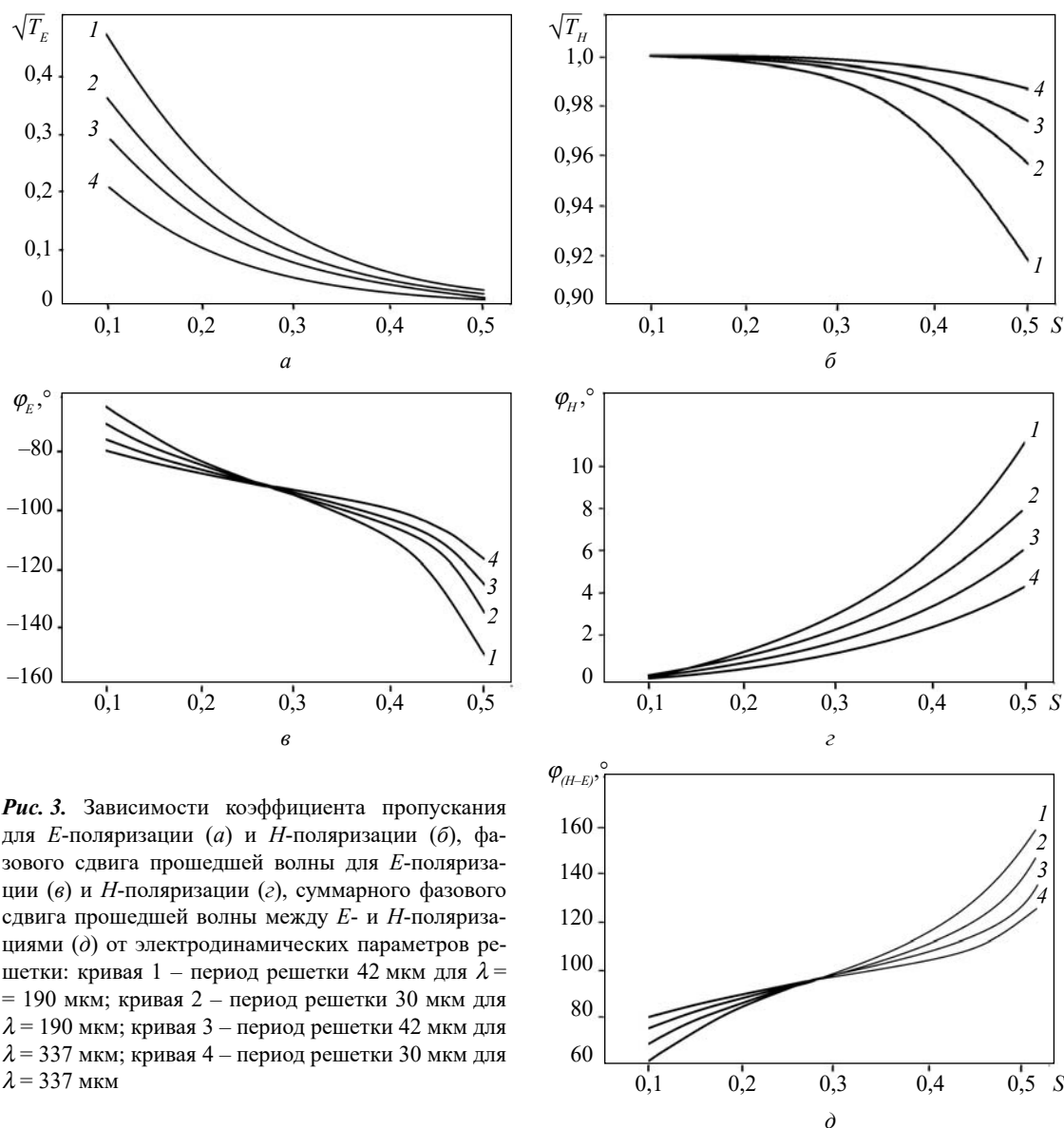
$$\Delta\varphi = \operatorname{arccos} \frac{A^2 - B^2}{A^2 + B^2}. \quad (4)$$

Теоретическую оценку фазового сдвига и коэффициента пропускания можно выполнить для решеток произвольного профиля на основе строгих решений соответствующих задач дифракции волн [5, 6, 14]. Для проволочных решеток из круглых проводников эти параметры можно получить по приближенным аналитическим выражениям [5, 6, 13]:

$$\begin{aligned} T_E &= 1 - \left[ \frac{1}{1 + 2i\chi \ln(\pi S)} + \frac{2iQ}{(1+iQ)^2} \left( 1 - \frac{\pi^2 S}{12} \right) \right] = \\ &= |T_E| \exp(i \arg T_E); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_H &= 1 - iQ \left[ \frac{1}{1+iQ} - \frac{2}{(1-iQ)^2} \left( 1 - \frac{\pi^2 S}{12} \right) \right] = \\ &= |T_H| \exp(i \arg T_H), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $T_E$ ,  $T_H$  – комплексные коэффициенты пропускания одномерной решетки для компо-



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента пропускания для  $E$ -поляризации ( $a$ ) и  $H$ -поляризации ( $б$ ), фазового сдвига прошедшей волны для  $E$ -поляризации ( $в$ ) и  $H$ -поляризации ( $г$ ), суммарного фазового сдвига прошедшей волны между  $E$ - и  $H$ -поляризациями ( $д$ ) от электродинамических параметров решетки: кривая 1 – период решетки 42 мкм для  $\lambda = 190$  мкм; кривая 2 – период решетки 30 мкм для  $\lambda = 190$  мкм; кривая 3 – период решетки 42 мкм для  $\lambda = 337$  мкм; кривая 4 – период решетки 30 мкм для  $\lambda = 337$  мкм

нент с  $E$ - и  $H$ -поляризациями соответственно;  $Q = \pi^2 S^2 \chi / 4$ ,  $\chi = l / \lambda$ ,  $S = d / l$  ( $l$  – период решетки,  $d$  – диаметр проводников,  $\lambda$  – длина волны).

По формулам (5), (6) можно определить модуль (коэффициент пропускания) и аргумент (сдвиг фазы) комплексных коэффициентов пропускания с погрешностью 1 % при  $\chi < 0,5$ ,  $S < 0,5$ . При этом  $\Delta\varphi = \arg T_E - \arg T_H$ .

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты теоретических расчетов коэффициентов пропускания и фазовых сдвигов для различных решеток.

На рис. 3,  $a$ ,  $б$  приведены зависимости коэффициента пропускания от параметра  $S$  для  $E$ - и  $H$ -поляризаций. Из этих графиков видно, что

при малых  $S$  для  $H$ -поляризации наблюдается полное пропускание, а для  $S > 0,25$  пропускание меньше 100 %. Для  $E$ -поляризации ситуация обратная.

На рис. 3,  $в$ ,  $г$  представлен фазовый сдвиг для  $E$ - и  $H$ -поляризаций, на рис. 3,  $д$  – суммарный сдвиг между  $E$ - и  $H$ -поляризациями. Из рис. 3,  $в$ ,  $г$  следует, что для  $E$ -поляризации фаза как бы «проваливается» сквозь решетку (иными словами, фаза прошедшей волны существенно опережает фазу падающей волны), а для  $H$ -поляризации «не доходит» до решетки. Кроме того, из графиков рис. 3,  $д$  следует, что суммарный фазовый сдвиг  $90^\circ$  наступает при  $S \approx 0,25$ . Другими словами, если диаметр проволоки решетки равен четверти периода,

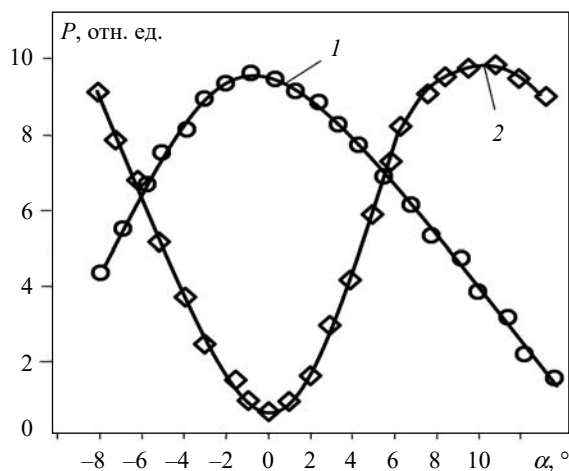


Рис. 4. Зависимость мощности  $P$  лазерного излучения от угла  $\alpha$  между ребром двугранного зеркала и направлением проводников ленточной решетки с шириной лент 30 мкм и периодом 50 мкм, кривая 1 –  $E$ -поляризация, кривая 2 –  $H$ -поляризация

а прошедшие сквозь решетку  $E$ - и  $H$ -поляризации равны по амплитуде, то излучение будет иметь круговую поляризацию. Теоретические расчеты хорошо коррелируют с результатами экспериментального определения параметров проволочных решеток [13].

Проверенный способ экспериментального определения параметров проволочных решеток [12] был применен и для ленточных решеток. В экспериментах исследовались ленточные решетки с периодом и шириной проводников  $50 \times 30$ ,  $100 \times 50$ ,  $150 \times 90$  мкм. Решетки поочередно устанавливались в лазерном резонаторе с последующей его юстировкой. Параметры активного вещества и накачки были идентичны. Излучение регистрировалось пироэлектрическим приемником с поляризатором. На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость мощности лазерного излучения от угла поворота ребра двугранного зеркала относительно проводников ленточной решетки с шириной лент 30 мкм и периодом 50 мкм. Из полученной зависимости определялся угол

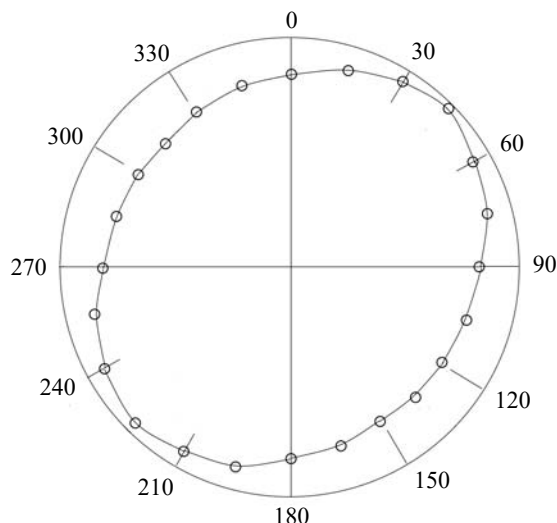


Рис. 5. Поляризационная диаграмма решетки с шириной лент 30 мкм и периодом 50 мкм для случая, когда  $E$ - и  $H$ -составляющие поляризации равны

$+\alpha$  либо  $-\alpha$ , при котором  $E$ - и  $H$ -составляющая поляризации равны (точки пересечения зависимостей 1 и 2 на рис. 4).

По формуле (2) производится расчет коэффициента пропускания решетки для  $E$ -поляризации ( $T_E$ ). При этом полагается, что  $\beta = 2|\alpha|$ .

При положении двугранного зеркала, когда  $E$ - и  $H$ -составляющая поляризации равны (точки пересечения зависимостей 1 и 2 на рис. 4), снимается поляризационная диаграмма. На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость мощности лазерного излучения от угла поворота приемника с поляризатором относительно проводников ленточной решетки с шириной лент 30 мкм и периодом 50 мкм (поляризационная диаграмма).

На основании поляризационной диаграммы по формуле (4) производился расчет фазового сдвига между  $E$ - и  $H$ -составляющими эллиптической поляризации.

В таблице приведены расчеты коэффициентов связи и фазового сдвига на основании экспериментальных данных, а также результаты теоретических расчетов этих параметров для исследованных ленточных решеток.

**Выводы.** В работе экспериментально проверен резонаторный способ определения параметров одномерных ленточных металлических решеток с использованием терагерцевого лазера. Приведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами. Наблюдаемые

Шаг решетки, мкм	Ширина проводников, мкм	$T_E$		$\Delta\varphi$	
		Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.
50	30	0,02	0,003	80,2°	49,5°
100	50	0,058	0,033	36,7°	36,9°
150	90	0,119	0,048	57,1°	21,7°

некоторые расхождения, вызваны, по-видимому, влиянием материала подложки.

Предложенный способ измерения может использоваться для решеток, коэффициент пропускания, которых позволяет применять их в качестве выходного зеркала ТГц-лазера. В газораз-

рядном HCN-лазере могут исследоваться решетки с коэффициентом пропускания  $T_E < 0,15$ . Однако, если усовершенствовать измерительную установку, использовав в лазере комбинированное выходное зеркало [17], то могут исследоваться и гораздо более прозрачные решетки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агранович З.С., Марченко В.А., Шестопалов В.П. Дифракция электромагнитных волн на плоских металлических решетках. Журн. техн. физики. 1962. Т. 32, вып. 4. С. 381–394.
2. Ванштейн Л.А. К электродинамической теории решеток. Ч. 1. Электроника больших мощностей. Москва: Наука, 1963. Вып.2. С. 26–56.
3. Третьяков О.А., Шестопалов В.П. Дифракция электромагнитных волн на плоской металлической решетке, лежащей на диэлектрическом слое. Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1963. Т. 6, № 2, С. 353–363.
4. Шестопалов В.П. Метод задачи Римана-Гильберта в теории дифракции и распространения электромагнитных волн. Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1971. 400 с.
5. Шестопалов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г. Дифракция волн на решетках. Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. 288 с.
6. Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А., Сиренко Ю.К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решетки. Киев: Наук. думка, 1986. 227 с.
7. Zinenko T.L., Marciniak M., Nosich A.I. Accurate analysis of light scattering and absorption by an infinite flat grating of thin silver nanostrips in free space using the method of analytical regularization. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2013. Vol. 19, N 3. P. 9000108 (8 p.).
8. Zinenko T.L., Matsushima A., Nosich A.I. Surface-Plasmon, Grating-Mode, and Slab-Mode Resonances in the H- and E-Polarized THz Wave Scattering by a Graphene Strip Grating Embedded into a Dielectric Slab. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2017. Vol. 23, N 4. P. 4601809 (9 p.).
9. Дзюбенко М.И. Каменев Ю.Е., Радионов В.П. Газоразрядные лазеры терагерцевого диапазона. *Радиофизика и электроника.* 2017. Т. 22. № 3. С. 58–80.
10. 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.
11. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М. Волноводный HCN лазер с регулируемой связью. *Квантовая электроника.* 1990. Т. 17, № 1. С. 58–59.
12. Спосіб визначення електродинамічних характеристик одновимірних дрютяних решіток: пат. 76285 Україна: МПК G02F 1/01, G01J 4/00, G01J 5/02 / Ю.Е. Каменев, С.А. Масалов, А.А. Филимонова. № 20040706029; заявл. 20.07.2004; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.
13. 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 электрон. НАН Украины.* Харьков, 2004. Т. 9, № 3. С. 615–618.
14. Горшунов Б.П., Лебедев С.П., Масалов С.А. Использование металлических решеток в качестве фазовых пластинок субмм диапазона. *Журн. техн. физики.* 1984. Т. 54, № 4. С. 825–827.
15. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М., Филимонова А.А. HCN-лазер с круговой поляризацией излучения. *Квантовая электроника.* 1990. Т. 17, № 10. С. 1303–1305.
16. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. *Поляризация радиолокационных сигналов.* Москва: Сов. радио, 1966. 440 с.
17. Каменев Ю.Е., Масалов С.А., Филимонова А.А. HCN-лазер с адаптивным выходным зеркалом. *Квантовая электроника.* 2006. Т. 36, № 9. С. 849–852.

Стаття надійшла 07.12.2019

#### REFERENCES

1. Agranovich, Z.S., Marchenko, V.A., Shestopalov, V.P., 1962. Diffraction of electromagnetic waves on flat metal gratings. *Zh. Tekh. Fiz.*, **32**(4), pp. 381–394 (in Russian).
2. Vainshtein, L.A., 1963. On the electrodynamic theory of gratings. Pt. 1. In: *Elektronika bol'shikh moshchnostey*, 2, pp. 26–56. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ. House (in Russian).
3. Tret'yakov, O.A., Shestopalov, V.P., 1963. Diffraction of electromagnetic waves on a flat metal grating lying on a dielectric layer. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.*, **6**(2), pp. 353–363 (in Russian).
4. Shestopalov, V.P., 1971. *The method of the Riemann-Hilbert problem in the theory of diffraction and propagation of electromagnetic waves.* Kharkiv: Publishing house of the Kharkov University (in Russian).
5. Shestopalov, V.P., Litvinenko, L.N., Masalov, S.A., Sologub, V.G., 1973. *Diffraction of waves on gratings.* Kharkov: Publishing house of the Kharkov University (in Russian).

6. Shestopalov, V.P., Kirilenko, A.A., Masalov, S.A., Sirenko, Ju.K., 1986. *Resonance scattering of waves*. Vol. 1. *Diffraction gratings*. Kiev: Naukova dumka Publ. (in Russian).
7. Zinenko, T.L., Marciniak, M., Nosich, A.I., 2013. Accurate analysis of light scattering and absorption by an infinite flat grating of thin silver nanostrips in free space using the method of analytical regularization. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19**(3), pp. 9000108(8 p.).
8. Zinenko, T.L., Matsushima, A., Nosich, A.I., 2017. Surface-Plasmon, Grating-Mode, and Slab-Mode Resonances in the H- and E-Polarized THz Wave Scattering by a Graphene Strip Grating Embedded into a Dielectric Slab. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **23**(4), pp. 4601809 (9 p.).
9. Dzyubenko, M.I., Kamenev, Yu.E., Radionov, V.P., 2017. Gas-discharge lasers of the terahertz range. *Radiophys. Electron.*, **22**(3), pp. 58–80 (in Russian).
10. 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).
11. Kamenev, Ju.E., Kuleshov, E.M., 1990. Waveguide HCN laser with controlled coupling. *Quantum Electronics*, **17**(1), pp. 58–59.
12. Kamenev, Ju.E., Masalov, S.A., Filimonova, A.A., 2006. *Method for determination of electrodynamic characteristics of one-dimensional wire gratings*. Ukraine. Pat. 76285 (in Ukrainian).
13. Kamenev, Ju.E., Masalov, S.A., Filimonova, A.A., 2004. Measurement of electrodynamic parameters of one-dimensional wire gratings in the Sub-millimeter wavelength range. In: V.M. Yakovenko, ed. 2004. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **9**(3), pp. 615–618 (in Russian).
14. Gorshunov, B.P., Lebedev, S.P., Masalov, S.A., 1984. Use of metal gratings as phase plates of the submm range. *Zh. Tekh. Fiz.*, **54**(4), pp. 825–827 (in Russian).
15. Kamenev, Ju.E., Kuleshov, E.M., Filimonova, A.A., 1990. HCN laser emitting circularly polarized light. *Sov. J. Quantum Electron.*, **17**(10), p. 1303–1305.
16. Kanareykin, D.B., Pavlov, N.F., Potekhin, V.A., 1966. *Polarization of radar signals*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
17. Kamenev, Ju.E., Masalov, S.A., Filimonova, A.A., 2006. HCN laser with an adaptive output mirror. *Sov. J. Quantum Electron.*, **36**(9), pp. 849–852 (in Russian).

Received 07.12.2019

M.I. Dzyubenko, Y.E. Kamenev, S.A. Masalov, V.P. Radionov

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine  
12, Acad. Proskura st., Kharkov, 61085, Ukraine

#### MEASUREMENT OF ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF FLAT METAL GRATINGS IN THE TERAHERTZ RANGE

**Subject and purpose.** The terahertz frequency range now attracts much attention of researchers and consumers in connection with the wide possibilities of using it for solving a number of problems in science, technology and medicine. Metal gratings with the period shorter than the wavelength are widely used in this range as partially transparent mirrors of lasers and in various quasi-optical devices. Determining the parameters of such gratings is an actual problem.

**Methods and methodology.** The method of experimental determining of the parameters (transmittance and phase shift) 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. Adjustment of feedback is performed by rotating the dihedral mirror around the resonator axis. Laser radiation acquires elliptical polarization as a result of this. The angle of rotation of the dihedral mirror, which ensures the equality of the powers of the E and H polarizations of the laser radiation, is an experimental value for calculating the transmission coefficient of the investigated grating. The polarization ellipse of radiation at this angle of rotation serves as the basis for calculating the phase shift introduced by the grating.

**Results.** An experimental determination of the parameters of metal gratings made on a transparent substrate, having different structures was carried out as an approbation of the method. Comparison of the experimental data with theoretical calculations was carried out. Recommendations for increasing the reliability of measurements and further development of this method were developed during the tests.

**Conclusions.** The proposed method makes it possible to determine the parameters of one-dimensional metal gratings without using metrological instruments.

**Key words:** metal grating, terahertz range, laser, resonator, transmittance, phase shift.

М.І. Дзюбенко, Ю.Є. Каменєв, С.О. Масалов, В.П. Радіонов

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЕВИХ СТРІЧКОВИХ ГРАТОК  
У ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ

**Предмет і мета роботи.** Терагерцовий (ТГц) діапазон частот привертає велику увагу у зв'язку з широкими можливостями застосування його для вирішення цілої низки завдань в науці, техніці та медицині. У цьому діапазоні в якості частково прозорих дзеркал лазерів і різних квазіоптичних приладів широко використовуються металеві ґратки з періодом, меншим за довжину хвилі. Визначення параметрів таких ґраток є метою цієї роботи.

**Методи і методологія роботи.** У статті представлено спосіб експериментального визначення параметрів (коефіцієнта пропускання і внесеного фазового зсуву) металевих ґраток, що складаються з паралельних провідників. В якості вимірювальної установки використано ТГц-лазер з плавним регулюванням виведення випромінювання з резонатора. Вихідним дзеркалом такого лазера служить досліджувана металева ґратка. Другим дзеркалом лазерного резонатора є двогранне  $90^\circ$  дзеркало. Регулювання зворотного зв'язку здійснюється шляхом повороту двогранного дзеркала навколо осі резонатора. При цьому лазерне випромінювання набуває еліптичної поляризації. Кут повороту двогранного дзеркала, при якому забезпечується рівність потужностей  $E$ - і  $H$ -поляризацій лазерного випромінювання, служить експериментальним значенням для розрахунку коефіцієнта пропускання ґратки. Поляризаційний еліпс випромінювання при цьому куті повороту є основою для розрахунку фазового зсуву, що вноситься ґраткою.

**Результати роботи.** Як апробація способу проведено експериментальне визначення параметрів металевих стрічкових ґраток, що виконані на прозорій підкладці. Проведено порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними розрахунками. Вироблено рекомендації щодо підвищення достовірності вимірювань і подальшого розвитку цього способу.

**Висновки.** Запропонований спосіб дозволяє визначати параметри одновимірних металевих ґраток без використання метрологічних приладів.

**Ключові слова:** металева ґратка, терагерцовий діапазон, лазер, резонатор, коефіцієнт пропускання, фазовий зсув.