

Применение субмиллиметрового HCN-лазера для определения электродинамических параметров одномерных проволочных решеток

Ю.Е.Каменев, С.А.Масалов, А.А.Филимонова

Предложен способ и описано устройство для определения электродинамических параметров одномерных проволочных решеток в субмиллиметровом диапазоне. Исследуемая решетка использовалась в качестве выходного зеркала лазера. Экспериментально измерены коэффициент пропускания и фазовый сдвиг нескольких решеток с различными параметрами на длине волны $\lambda = 337$ мкм.

Ключевые слова: HCN-лазер, электродинамические параметры, одномерная проволочная решетка, поляризация, двугранное зеркало.

Уникальные электродинамические свойства одномерных проволочных решеток (ОПР) позволяют использовать их в различных устройствах, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн в качестве пропускающих или отражающих поляризующих элементов [1]. Теоретические исследования электродинамических свойств различных полупрозрачных (в том числе одномерных проволочных) и отражательных решеток с разными параметрами $\chi = l/\lambda$ и $S = d/l$ (где l – период решетки, d – диаметр проволок, λ – длина волны), систематизированы в [2, 3]. Ранее экспериментальное определение коэффициента пропускания ОПР проводилось путем облучения исследуемой решетки с последующим сравнением прошедшего сквозь решетку и отраженного от нее сигналов [4] или сравнением прошедшего и не прошедшего сквозь решетку сигналов [5]. Определение фазового сдвига также основано на анализе излучения, прошедшего сквозь решетку [6, 7].

В настоящей работе предлагается способ определения электродинамических параметров ОПР (коэффициента пропускания и фазового сдвига прошедшей сквозь решетку волны при условии $\chi \ll 1$) в субмиллиметровом диапазоне при помощи HCN-лазера с длиной волны $\lambda = 337$ мкм.

В этом способе используется известное свойство двугранного зеркала – изменять азимут поляризации отраженной от него волны на угол 2α , где α – азимут поляризации волны, падающей на 90-градусное двугранное зеркало. При этом в силу поляризующих свойств решетки прошедшая сквозь нее волна будет содержать две ортогональные, линейно поляризованные компоненты: компоненту $E^2 \sin^2 2\alpha$ с вектором поляризации, перпендикулярным проволокам решетки (предполагается, что

для этой компоненты ОПР полностью прозрачна), и компоненту $E^2 |T_E| \cos^2 2\alpha$ с вектором поляризации, параллельным проволокам решетки, где E – амплитуда волны, нормально падающей на решетку, а $|T_E|$ – коэффициент пропускания ОПР для поляризации, вектор которой параллелен проволокам решетки. Сравнивая эти компоненты, получаем

$$|T_E| = \tan^2 2\alpha. \quad (1)$$

Таким образом, из экспериментальной зависимости выходной мощности от угла α между проволоками исследуемой решетки и ребром двугранного зеркала для компонент с E - и H -поляризациями [8] определяется угол α , при котором мощности этих компонент равны; коэффициент пропускания $|T_E|$ вычисляется из соотношения (1). С помощью этого способа можно также находить фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, который возникает между двумя линейно поляризованными параллельно и перпендикулярно проволокам решетки составляющими волны (компонентами с E - и H -поляризациями) при прохождении сквозь ОПР.

Известно, что поляризационные параметры волны выражаются через амплитуды ортогональных компонент с E - и H -поляризациями и разность фаз между ними [9], а также, что при нормальном падении на ОПР линейно поляризованной волны при произвольном азимуте прошедшая волна будет иметь две ортогональные линейно поляризованные компоненты, сдвинутые по фазе. Следовательно, выходное излучение в общем случае будет всегда эллиптически поляризованным. Для нахождения фазового сдвига экспериментально определяют угол α , при котором две прошедшие компоненты с E - и H -поляризациями будут равны, и для этого угла снимают азимутальную зависимость выходного сигнала. Эта зависимость будет иметь форму эллипса, а углы наклона его осей (в силу равенства компонент) по отношению к проволокам решетки будут равны 45° . Далее измеряют большую и малую оси эллипса, а фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ определяют из соотношения [9]

Ю.Е.Каменев, С.А.Масалов, А.А.Филимонова. Институт радиотехники и электроники им. А.Я.Усикова НАНУ, Украина, 61085 Харьков, ул. акад. Проскуры, 12; e-mail: kamenev@ire.kharkov.ua; masalov@ire.kharkov.ua

Поступила в редакцию 6 октября 2004 г., после доработки – 10 января 2005 г.

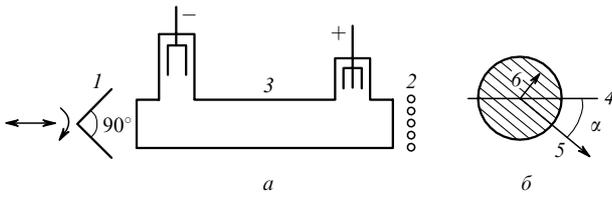


Рис.1. Схема лазерного излучателя (а) и азимутальное расположение зеркал (б):

1 – двугранное зеркало; 2 – исследуемая ОПР; 3 – стеклянный волновод; 4 – ребро двугранного зеркала; 5 – компонента с E-поляризацией; 6 – компонента с H-поляризацией.

$$\Delta\varphi = \arccos \frac{A_2^2 - A_1^2}{A_2^2 + A_1^2}, \tag{2}$$

где A_1 и A_2 – малая и большая полуоси эллипса соответственно.

В экспериментальной установке, на которой реализуется предлагаемый способ, использовался электроразрядный HCN-лазер с полым катодом [10], резонатор которого (рис.1) был образован стеклянным волноводом с внутренним диаметром 38 мм, зеркалом в виде исследуемой ОПР и полуволновым фазовым зеркалом, выполненным в виде двугранного зеркала с углом между гранями 90° и установленным так, чтобы оно могло продольно перемещаться и поворачиваться вокруг оси.

Детектором излучения служил пироэлектрический приемник, нечувствительный к поляризации, поляризационным анализатором – вращающаяся решетка, установленная под углом к оси выходного излучения [11]. В качестве тракта использовались квазиоптические элементы [1].

В эксперименте угол α изменялся дискретно путем поворота двугранного зеркала вокруг оси, а перемещением этого зеркала вдоль оси добивались максимальной мощности лазерного излучения для данного угла. При этом снималась зависимость выходной мощности лазера от угла между проволоками выходной решетки и ребром двугранного зеркала для двух составляющих, поляризованных параллельно и перпендикулярно проволокам решетки (типичная зависимость представлена на рис.2).

Из анализа этих зависимостей определялся угол, при котором обе компоненты были равны между собой (точки пересечения кривых 1, 2 на рис.2). Значение этого угла затем использовалось для вычисления коэффициента

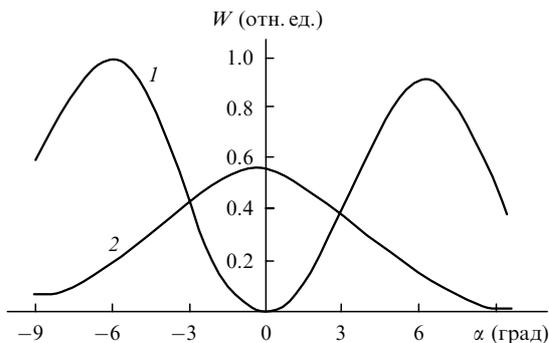


Рис.2. Зависимости мощности лазерного излучения W от угла между ребром двугранного зеркала и проволоками выходной решетки для H-поляризации, ориентированной ортогонально проволокам (1), и E-поляризации, ориентированной параллельно проволокам (2). Шаг решетки 30 мкм, диаметр проволоки 8 мкм.

Табл.1.

Шаг решетки (мкм)	Диаметр проволоки (мкм)	$ T_E _{\text{exp}}$	$ T_E _{\text{theor}}$	$\Delta\varphi_{\text{exp}}$	$\Delta\varphi_{\text{theor}}$
30	8	0.009	0.004	87°30'	90°56'
30	15	0.002	0.0006	112°	119°43'
42	10	0.023	0.011	86°30'	88°54'

пропускания исследуемой ОПР из соотношения (1). Для определения фазового сдвига фиксировался этот угол и снималась азимутальная зависимость выходного лазерного излучения, которое было эллиптически поляризованным с углом наклона эллипса по отношению к проволокам исследуемой решетки, равным 45°. Затем измерялись амплитуды большой и малой полуосей эллипса, а фазовый сдвиг вычислялся по формуле (2).

Экспериментальная проверка предложенного способа определения электродинамических параметров ОПР проводилась нами для трех решеток из вольфрамовой проволоки, закрепленной на коваровых кольцах диаметром 40 мм. Данные представлены в табл.1.

Теоретическая оценка указанных электродинамических параметров ОПР проводилась по приближенным аналитическим формулам, взятым из монографий [2, 3]. В случае нормального падения они имеют вид

$$T_E = 1 - \left[\frac{1}{1 + 2i\chi \ln(\pi S)} + \frac{2iQ}{(1 + iQ)} \left(1 - \frac{\pi^2 S^2}{12} \right) \right] = |T_E| \exp(i \arg T_E), \tag{3}$$

$$T_H = 1 - iQ \left[\frac{1}{1 + iQ} - \frac{2}{(1 - iQ)^2} \left(1 + \frac{\pi^2 S^2}{12} \right) \right] = |T_H| \exp(i \arg T_H), \tag{4}$$

где $Q = \pi^2 S^2 \chi / 4$; T_E и T_H – комплексные коэффициенты пропускания ОПР для компонент с E- и H-поляризациями соответственно. По формулам (3), (4) можно определить модуль (коэффициент пропускания) и аргумент (сдвиг фазы) комплексных коэффициентов пропускания с погрешностью 1 % при $\chi < 0.5$ и $S < 0.5$. При этом $\Delta\varphi = \arg T_E - \arg T_H$.

Несмотря на то что в экспериментах не предпринимались шаги к повышению точности получения экспериментальных данных, а также не оценивалась погрешность измерений, можно отметить хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов, в первую очередь при определении фазового сдвига. Что касается расхождения теоретических и экспериментальных значений пропускания, то тут прежде всего нужно отметить неточность определения угла α , неидеальность решетки и т. д. Поэтому в случае применения предлагаемого метода для точного определения параметров ОПР или проверки теоретических подходов сначала необходимо провести оценку погрешности метода, а сами измерения должны быть многократными с последующим усреднением.

В заключение отметим, что практическое значение предложенного способа заключается в его применимости для определения электродинамических параметров ОПР с $\chi < 0.2$ и $S < 0.5$ для проволок любого профиля.

1. Усиков А.Я., Канер Э.А., Трутень И.Д. *Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн* (Киев: Наукова думка, 1986).
2. Шестопапов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г. *Дифракция волн на решетках* (Харьков: ХГУ, 1973).
3. Шестопапов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А., Сиренко Ю.К. *Резонансное рассеяние волн. Т.1. Дифракционные решетки* (Киев: Наукова думка, 1986).
4. Sentz A., Ryee M., Gastand C., Auvray J., Letur J.P. *Rev. Sci. Instr.*, **49** (7), 926 (1978).
5. Green I.P., Veron D., Belland P. *Int. J. Infrared and Millim. Waves*, **7** (11), 1747 (1986).
6. Слюсарский В.А. *ЖТФ*, **35**, 1984 (1965).
7. Горшунов Б.П., Лебедев С.П., Масалов С.А. *ЖТФ*, **54**, 825 (1984).
8. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М. *Квантовая электроника*, **17**, 58 (1990).
9. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. *Поляризация радиолокационных сигналов* (М.: Сов. радио, 1966).
10. Каменев Ю.Е. *Квантовая электроника*, **26**, 269 (1999).
11. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М., Филимонова А.А. *Квантовая электроника*, **17**, 1305 (1990).