

С. А. Андренко, Ю. Е. Каменев

**ПРИМЕНЕНИЕ HCN-ЛАЗЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОДНОМЕРНЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ РЕШЕТОК**

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

Предложен новый способ определения фазового сдвига электромагнитной волны, прошедшей сквозь одномерную проволочную решетку при нормальном падении на нее. Для реализации предложенного способа использовался HCN-лазер, широко применяемый в качестве источника излучения в терагерцевом диапазоне длин волн. Выходное зеркало такого лазера было выполнено в виде измеряемой решетки и сплошного зеркала с отверстием. Методологически способ основан на определении разностной длины лазерного резонатора при поочередной генерации лазерного излучения на двух поляризациях: параллельной проволокам решетки и перпендикулярной. Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: одномерная проволочная решетка, фазовый сдвиг, поляризация, лазерное излучение, HCN-лазер.

Одномерно-периодические решетки широко используются в различных отраслях физики и техники. Имеются глубокие теоретические исследования различных периодических структур, которые позволяют не только теоретически изучать их общие свойства, но и выявлять специфические свойства, присущие каждой структуре в отдельности [1, 2]. Что касается экспериментального определения электродинамических параметров периодических структур, то таких исследований очень мало. Широкое применение периодических структур в виде одномерных проволочных решеток (ОПР) при освоении терагерцевого диапазона электромагнитного спектра вызвало потребность экспериментального определения электродинамических параметров таких структур. Ранее проводились экспериментальные исследования по определению параметров ОПР в мм диапазоне [3, 4].

В работах [5, 6] был сделан краткий анализ теоретических и экспериментальных исследований в этой области и предложен способ определения параметров ОПР (коэффициента пропускания и фазового сдвига прошедшей сквозь решетку волны), основанный на использовании исследуемой решетки в качестве выходного зеркала резонатора HCN-лазера.

Резонатор такого лазера был образован 90° двугранным зеркалом (углоковый отражатель) и исследуемой ОПР. В данном способе использовалось известное свойство двугранного зеркала изменять азимут поляризации отраженной от него волны на угол 2α , где α – угол между направлением вектора поляризации падающей волны на двугранное зеркало и ребром этого зеркала. При этом если $\alpha \neq 0$, то выходное лазерное излучение будет представлено в виде волны с двумя ортогонально поляризованными компонентами: с параллельной и перпендикулярной проволокам ОПР поляризацией. Установив угол α , при

котором обе компоненты равны, требуемые параметры вычислялись при помощи простых соотношений [5, 6]. При этом параметр решетки $\kappa = l/\lambda$ (l – период решетки, λ – длина волны) должен удовлетворять условию $\kappa \ll 1$.

В нашей работе предложен новый способ определения фазового сдвига ОПР, позволяющий измерять решетки ($\kappa \leq 1$) по упрощенной методике, используя при этом менее сложный экспериментальный лазерный излучатель.

1. Методика измерений и техника проведения эксперимента. В экспериментальной установке использовался HCN-лазер (рис. 1): резонатор содержит гибридное выводное зеркало [7, 8] в виде сопряженных плоского зеркала с отверстием и исследуемой ОПР, установленных на расстоянии $L = \Delta L + n\lambda/2$. Здесь ΔL соответствует фазовому сдвигу, который обусловлен данной ОПР, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, λ – длина волны.

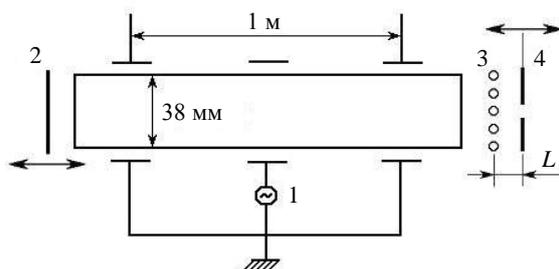


Рис. 1. Схема лазерного генератора: 1 – ВЧ-генератор; 2 – глу- хое зеркало; 3 – ОПР; 4 – плоское зеркало с отверстием

Накачка активной среды производилась при помощи ВЧ-генератора 1, работающего на частоте 13,5 МГц.

Известно, что E -компонента прошедшей сквозь ОПР волны (поляризация параллельна проволокам ОПР) получает по сравнению с падающей фазовый сдвиг, при этом волна как бы

«проваливается» сквозь решетку (ускоряется ею). Устанавливая плоское зеркало с отверстием на расстоянии, соответствующем фазовому сдвигу ОПР (ΔL), получали максимальную выходную мощность лазерного излучения [7, 8]. Поляризация лазерного излучения при этом задавалась проволоками ОПР и была им параллельна.

Характерная экспериментальная зависимость мощности лазерного излучения от расстояния между исследуемой ОПР и плоским зеркалом показана на рис. 2.

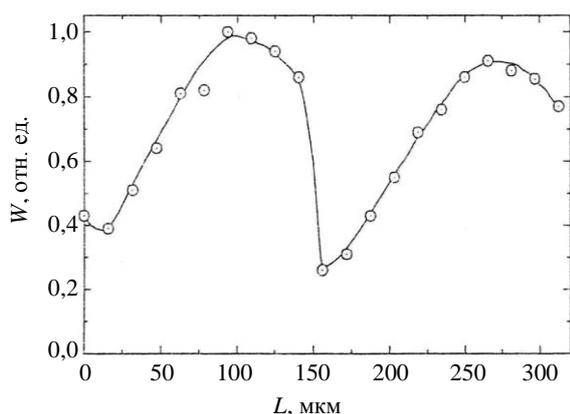


Рис. 2. Зависимость мощности лазерного излучения от расстояния между исследуемой ОПР (60×15 мкм) и плоским зеркалом

Максимальное значение мощности излучения соответствует режиму настройки резонатора лазера на рабочую моду. Очевидно, такая зависимость будет повторяться через $\lambda/2$. В работах [7, 8] было показано, что такой лазер может работать с выводным зеркалом в виде плоского зеркала с отверстием определенных диаметров. При этом лазерный источник (рис. 1) может работать в двух режимах:

- лазерная генерация пучка с поляризацией, параллельной проволокам решетки (*E*-поляризация) при работе лазерного резонатора в конфигурации гибридного выводного зеркала;

- лазерная генерация пучка с поляризацией, ортогональной проволокам решетки (*H*-поляризация), при этом выводным зеркалом будет служить сплошное зеркало с отверстием, а исследуемая ОПР – поляризатором.

Необходимо отметить, что *H*-поляризованная волна, прошедшая сквозь исследуемую ОПР, также испытывает незначительный сдвиг фазы, которым в рамках настоящей работы пренебрегают. Такие режимы можно реализовать при условии изменения расстояния между зеркалами резонатора, что достигается путем продольного перемещения зеркала 2. Величина такого пере-

мещения ΔL задается фазовым сдвигом ОПР $\Delta\varphi$, который вычисляется по формуле

$$\Delta\varphi = 360^\circ \cdot \Delta L / \lambda, \quad (1)$$

где $\lambda = 337$ мкм.

2. Экспериментальные и теоретические результаты. По описанной методике в режиме максимальной выходной мощности (см. рис. 2) измерялась разница (с точностью 1 мкм) в расстоянии между двумя зеркалами резонатора при поочередной генерации лазера на двух ортогональных поляризациях. Полученные значения этой разницы ΔL использовались для вычисления фазового сдвига исследуемых ОПР. Результаты вычислений приведены в таблице.

Период решетки l , мкм	Диаметр проволоки d , мкм	$\kappa = l/\lambda$	$\Delta\varphi$ эксперимент, °	$\Delta\varphi$ теория, °
50	10	0,148	81,6	82,65
42	10	0,125	89,7	86,43
30	10	0,089	98,3	90,41

Расчетные зависимости величины фазового сдвига получали путем использования теоретических выкладок [1]. Задача дифракции на решетке из элементов круглого поперечного сечения сводится к двум независимым решениям:

- магнитное поле параллельно проволокам (*H*-поляризация), при этом $E_x = 0$ и все компоненты поля выражаются через H_x ;

- случай, когда вектор электрического поля параллелен проводникам (*E*-поляризация), при этом $H_x = 0$ и все компоненты выражаются через E_x .

Для каждой из поляризаций при помощи метода интегральных уравнений получают бесконечные системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитуд волн пространственного спектра дифрагированного поля. Системы уравнений получены в результате использования соответствующих граничных условий на металле и щели решетки. Путем усечения этих систем выделяют конечную систему уравнений, на основе которой проводится приближенное аналитическое решение задачи дифракции.

Для случая длинноволнового приближения теоретическая оценка фазового сдвига исследуемых ОПР в случае нормального падения электромагнитной волны на решетку может быть проведена по следующим выражениям [1]:

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

$$T_H = 1 - iQ \left[\frac{1}{1+Q} - \frac{2}{(1-iQ)^2} \left(1 + \frac{\pi^2 S^2}{12} \right) \right] = \quad (3)$$

$$= |T_H| \exp(i \arg T_H),$$

где $Q = \frac{\pi^2 S^2}{4}$; T_E и T_H – комплексные коэффициенты пропускания ОПР для компонент с E - и H -поляризациями соответственно; d – диаметр проволоки; l – шаг решетки; $S = d/l$; $\kappa = l/d$. По этим формулам можно определить модуль (коэффициент пропускания) и аргумент (сдвиг фазы) комплексных коэффициентов пропускания с погрешностью 1 % при $\kappa \leq 0,3$ и $S \leq 0,3$. В данной работе не рассматривается случай H -поляризации, так как в этом случае S мало и ее влияние незначительно. На рис. 3 представлена теоретическая зависимость фазового сдвига от электродинамического параметра решетки κ . Сдвиг фазы исследуемых ОПР задает расстояние между данной решеткой и зеркалом с отверстием при генерации на ортогональных поляризациях.

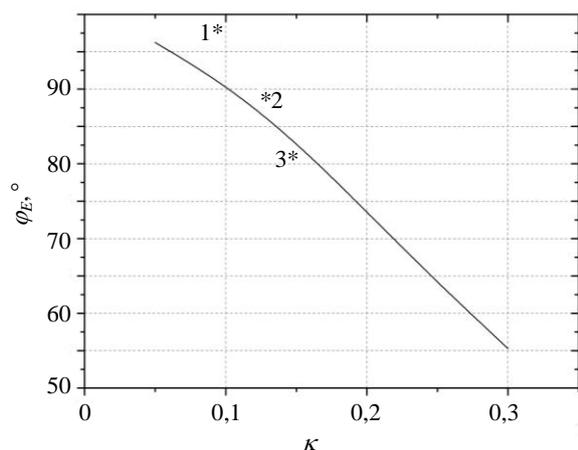


Рис. 3. Зависимость фазового сдвига от электродинамического параметра ОПР κ при $\lambda = 337$ мкм: сплошная кривая – теоретические значения; * – экспериментальные значения для решеток с периодами: 1 – 30 мкм; 2 – 42 мкм; 3 – 50 мкм

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов (см. таблицу и рис. 3) дает несоответствие менее 10 %. Необходимо также отметить тенденцию к лучшему соответствию теоретических и экспериментальных результатов при увеличении периода исследуемых ОПР, что коррелирует с результатами работы [5], где также замечено расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами при уменьшении периода исследуемых ОПР.

Выводы. Таким образом, наши результаты подтвердили принципиальную достоверность теоретических предпосылок и экспериментальной

методики, а расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами при увеличении параметра S требует уточнения теоретических предпосылок, в которых следует учитывать дополнительные физические факторы, например взаимодействие между соседними проволоками, скин-эффект и др., а в экспериментальном плане – учета фазового сдвига для H -поляризации, который увеличивается при увеличении S . Ценность предложенного способа заключается в применимости его для определения фазового сдвига как «густых» ($\kappa \ll 1$), так и «редких» ($\kappa \leq 1$) ОПР с произвольным профилем проволоки.

1. Дифракция волн на решетках / В. П. Шестопапов, Л. Н. Литвиненко, С. А. Масалов, В. Г. Сологуб. – Х.: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1973. – 289 с.
2. Дифракционные решетки: в 2 т. Т. 1. Резонансное рассеяние волн / В. П. Шестопапов, А. А. Кириленко, С. А. Масалов, Ю. К. Сиренко. – К.: Наук. думка, 1986. – 232 с.
3. Субмиллиметровый ЛОВ спектрометр «Эпсилон» / А. А. Волков, Г. В. Козлов, С. П. Лебедев, В. И. Мальцев. – М., 1981. – 17 с. – (Препринт / АН СССР. Физический ин-т; № 80).
4. Горшунов Б. П. Использование металлических решеток в качестве фазовых пластинок субмиллиметрового диапазона / Б. П. Горшунов, С. П. Лебедев, С. А. Масалов // Журн. техн. физики. – 1984. – 54, вып. 4. – С. 825–827.
5. Каменев Ю. Е. Применение субмиллиметрового HCN-лазера для определения электродинамических параметров одномерных проволочных решеток / Ю. Е. Каменев, С. А. Масалов, А. А. Филимонова // Квантовая электрон. – 2005. – 35, № 4. – С. 375–377.
6. Каменев Ю. Е. Измерение электродинамических параметров одномерных проволочных решеток в субмиллиметровом диапазоне / Ю. Е. Каменев, С. А. Масалов, А. А. Филимонова // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2004. – 9, № 3. – С. 615–618.
7. Каменев Ю. Е. HCN-лазер с адаптивным выводным зеркалом / Ю. Е. Каменев, С. А. Масалов, А. А. Филимонова // Квантовая электрон. – 2006. – 36, № 9 – С. 849–852.
8. Каменев Ю. Е. HCN-лазер с гибридным выводным зеркалом / Ю. Е. Каменев, С. А. Масалов, А. А. Филимонова // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – 11, № 2. – С. 270–274.

S. A. Andrenko, Yu. E. Kamenev

HCN-LASER APPLICATION FOR MEASUREMENT OF ONE-DIMENSIONAL WIRE GRATINGS PHASE CHARACTERISTICS

A new method of determining the phase shift of electromagnetic waves transmitted through the one-dimensional wire grating with its normal incidence on the grating. To implement the proposed method HCN-laser was applied, which is widely used as a source of radiation in the THz range. The output mirror of the laser was made in the form of the grating and the solid mirror with an aperture. Methodologically this method is based on determination of the difference in the length of the laser resonator with sequential generation at two polarizations: parallel and perpendicular to the wires of the grating.

Key words: one-dimensional wire grating, phase shift, polarization, laser radiation, HCN-laser.

С. А. Андренко, Ю. Ю. Каменев

ЗАСТОСУВАННЯ HCN-ЛАЗЕРА
ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОВИМІРНИХ
ДРОТЯНИХ РЕШІТОК

Запропоновано новий спосіб визначення фазового зсуву електромагнітної хвилі, що пройшла крізь одновимірну дротяну решітку при нормальному падінні на неї. Для реалізації запропонованого способу був використаний HCN-лазер,

який широко застосовується як джерело випромінювання у терагерцевому діапазоні довжин хвиль. Вихідне дзеркало такого лазера було виконано у вигляді вимірюваної решітки та суцільного дзеркала з отвором. Методологічно спосіб ґрунтується на визначенні різницевої довжини лазерного резонатора при почерговій генерації лазерного випромінювання на двох поляризаціях: паралельній дротам решітки та перпендикулярній.

Ключові слова: одновимірна дротяна решітка, фазовий зсув, поляризація, лазерне випромінювання, HCN-лазер.

Рукопись поступила 08.09.10 г.