

# HCN-лазер с двухслойным анизотропным выходным зеркалом

С.А.Андренко, Ю.Е.Каменев, В.Л.Пазынин

*Предложено, разработано и экспериментально исследовано устройство связи лазерного резонатора с внешней средой в виде двух одинаковых одномерных проволочных решеток, установленных в параллельных друг другу плоскостях с взаимным сдвигом образующих их проволок в этих плоскостях на полпериода. Получено теоретическое подтверждение возможности применения такой структуры. Представлена схема лазерного излучателя, с помощью которого исследовалась зависимость выходной мощности лазера от расстояния между решетками. Экспериментально обнаружено, что существенное влияние на пропускание предложенной структуры оказывает как расстояние между плоскостями решеток, так и их взаимное смещение в этих плоскостях.*

**Ключевые слова:** HCN-лазер, одномерная проволочная решетка, период решеток, пропускание, выходное зеркало.

## 1. Введение

Одним из объектов, на которых происходит рассеяние электромагнитных волн, являются периодические структуры в виде дифракционных решеток. В оптическом диапазоне такие структуры широко применяются в реальных устройствах. В настоящее время в теоретическом исследовании и практическом применении данных структур наступает новый этап, связанный с освоением терагерцевого диапазона и развитием квазиоптической техники.

Свойства решеток существенно зависят от параметра  $\chi$ , который определяется отношением периода решетки  $l$  к длине волны  $\lambda$  электромагнитного излучения, взаимодействующего с ней:  $\chi = l/\lambda$ . Условно различают три типа такого взаимодействия: длинноволновое ( $\chi \ll 1$ ), коротковолновое ( $\chi \gg 1$ ) и резонансное ( $\chi \sim 1$ ). Методы и условия проведения анализа происходящих явлений выбираются, исходя из значений  $\chi$ . В этом плане основополагающей является работа [1], послужившая толчком для развития электродинамической теории периодических решеток. В последовавших за ней монографиях [2, 3] представлены методы и алгоритмы теоретического исследования различных периодических структур, а также проведен анализ их свойств.

Ключевым объектом при создании элементной базы квазиоптических элементов терагерцевого диапазона является периодическая структура, выполненная в виде одномерной проволочной решетки (ОПР). На базе такой ОПР был создан ряд квазиоптических устройств, аналогичных волноводным устройствам, предназначенным для работы в более низкочастотной области [4]. Использование ОПР в терагерцевых лазерах позволило создавать HCN-лазеры с определенным распределением интенсивности

пучка выходного излучения [5], оптимизировать связь лазера с внешней средой [6], управлять поляризационно-частотными характеристиками выходного излучения [7–9], регулировать диаметр пучка [10], оптимизировать взаимодействие активной среды с электромагнитным излучением [11]. Применение специальных лазерных резонансных систем и особых режимов работы лазера дает возможность определять параметры ОПР, используемых в качестве выходных лазерных зеркал [12]. Применяемые ранее в HCN-лазере ОПР должны были удовлетворять условию  $\chi \ll 1$ , а коэффициент пропускания для излучения, линейно поляризованного таким образом, что его электрический вектор параллелен проволокам решетки, не должен был превышать 0.06.

Цель настоящей работы – оптимизировать связь лазерного резонатора с внешней средой путем использования в качестве выходного зеркала структуры, состоящей из двух смежных одинаковых ОПР, параметр  $\chi$  каждой из которых может быть близок к единице.

## 2. Теоретические предпосылки и экспериментальная техника

Для применения двухслойной ОПР в качестве выходного лазерного зеркала необходимо знать коэффициент пропускания такой структуры. Расчеты коэффициентов пропускания проводились методом конечных разностей во временной области (FDTD) [13]. Этот метод универсален, прост в реализации и позволяет моделировать очень широкий класс электродинамических структур (в нашем случае бесконечных ОПР) при условии, что корректно решена проблема ограничения расчетного пространства. В настоящей работе мы использовали для этих целей точные граничные условия, приведенные в [14].

Для канала Флоке нами была сформулирована начально-краевая задача [14] для компоненты электрического поля, параллельной металлическим проволокам, из которых составлена решетка. Дискретизация этой задачи совместно с «поглощающими» граничными условиями [14] и последующее ее решение в рамках стандартной

С.А.Андренко, Ю.Е.Каменев, В.Л.Пазынин. Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усыкова НАНУ, Украина, 61085 Харьков, ул. Акад. Проскуры, 12; e-mail: kamenev@ire.kharkov.ua

Поступила в редакцию 8 июля 2009 г., после доработки – 15 января 2010 г.

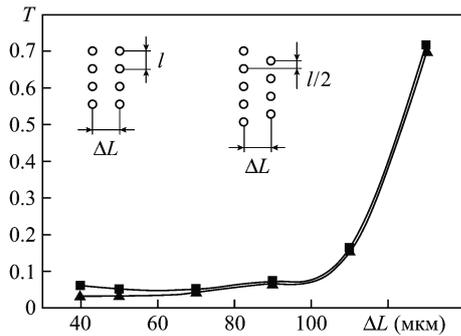


Рис.1. Теоретические зависимости коэффициента пропускания  $T$  от расстояния между решетками  $\Delta L$  при нулевом взаимном смещении проволок ОПР (■) и их взаимном смещении на полпериода (▲) (см. вставку на рисунке).

FDTD-схемы позволили получить корректные результаты, точность которых ограничена лишь погрешностью разностной схемы. С помощью стандартного фурье-преобразования эти результаты – коэффициенты пропускания ОПР – трансформировались из временной области в частотную. Для нахождения зависимостей, приведенных на рис.1, из полученного частотного спектра была выбрана частота 0.89 ТГц ( $\lambda = 337$  мкм). В расчетах использовались следующие параметры ОПР: диаметр проволок  $d = 10$  мкм и период решетки  $l = 100$  мкм, что соответствует  $\chi \approx 0.3$ . Из рис.1 видно, что существует область расстояний между решетками  $\Delta L$ , где коэффициент пропускания рассматриваемой структуры составляет  $\sim 0.05$ , а это указывает на возможность ее применения в качестве выходного зеркала HCN-лазера.

В работе [12] при использовании ОПР в качестве лазерного выходного зеркала были измерены коэффициент пропускания решетки для нормально падающего электромагнитного излучения с  $\lambda = 337$  мкм и его фазовый сдвиг. Полученные результаты позволили разработать и исследовать HCN-лазер с двухзеркальным выходным устройством, при этом одно из зеркал было выполнено в виде одномерной проволочной решетки, а второе – в виде плоского зеркала с отверстием [9]. Проведенные экспериментальные исследования не только подтвердили работоспособность предложенного устройства, но и указали пути его практического применения. Основным достоинством этого устройства является то, что оно дает возможность получить выходной пучок с диаметром, соответствующим диаметру внешнего волноводного тракта.

В настоящей работе исследовался HCN-лазер, выходное зеркало которого состояло из двух одинаковых ОПР с периодом  $l = 100$  мкм и диаметром проволок  $d = 10$  мкм. Первоначально решетки были установлены на расстоянии  $\Delta L \sim 60$  мкм друг от друга, что примерно соответствует теоретическому фазовому сдвигу электромагнитной волны при прохождении сквозь такую решетку [10], а проволоки этих решеток были сдвинуты на полпериода относительно друг друга.

Схема лазерного излучателя представлена на рис.2. Возбуждение лазерной среды проводилось ВЧ генератором на частоте 13 МГц с помощью цилиндрических электродов, расположенных с внешней стороны стеклянной тонкостенной разрядной трубки. Мощность ВЧ генератора составляла  $\sim 500$  Вт. Используемые ОПР были стандартными и представляли собой коваровые кольца с внутренним диаметром 40 мм, наружным диаметром 50 мм и толщиной 3 мм, на которых с шагом 100 мкм

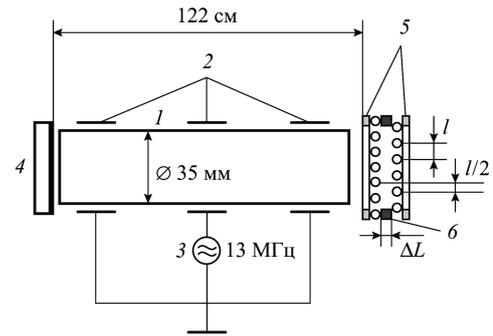


Рис.2. Схема лазерного излучателя: 1 – разрядная трубка; 2 – ВЧ электроды; 3 – ВЧ генератор; 4 – глухое зеркало; 5 – ОПР; 6 – прокладка.

укреплялись проволоки из вольфрама диаметром 10 мкм. Расстояние между решетками устанавливалось с помощью кольцевой прокладки 6, а взаимное расположение проволок контролировалось микроскопом.

### 3. Экспериментальные результаты и их анализ

Экспериментально исследовалась зависимость мощности лазерного излучения  $W$  от расстояния между решетками  $\Delta L$  при строгом взаимном смещении проволок ОПР на полпериода (рис.3). Из рис.3 видно, что мощность лазерного излучения достигает максимума при расстоянии между решетками  $\sim 100$  мкм. Установлено, что генерация существует в диапазоне  $\Delta L = 60–160$  мкм. Проведенные эксперименты показали, что при  $\Delta L \approx 60$  и 160 мкм генерация неустойчива, и лазерный резонатор требует тщательной настройки. При  $\Delta L < 60$  мкм генерация не наблюдается, в случае же  $\Delta L > 160$  мкм в пределах наших экспериментальных возможностей было установлено, что при  $\Delta L = 180$  и 190 мкм лазерная генерация не наблюдалась, а при  $\Delta L = 235$  мкм возникала устойчивая лазерная генерация, что указывает на возможность работы данного устройства при  $\Delta L$ , кратных  $\lambda/2$ . Проведенные эксперименты, направленные на определение требуемой точности установки ОПР с взаимным сдвигом их проволок на полпериода, показали, что при  $\Delta L = 100$  мкм генерация возникала даже в случае несмещенных проволок ОПР, а по мере приближения  $\Delta L$  к 60 и 160 мкм требования к точности установки сдвига проволок двух ОПР на полпериода возрастали. Следует отметить, что во всех экспериментах необходима строгая взаимная параллельность проволок ОПР.

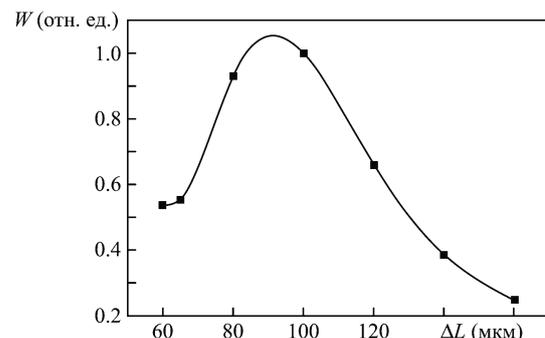


Рис.3. Зависимость мощности лазерного излучения от расстояния между решетками при взаимном смещении проволок ОПР на полпериода.

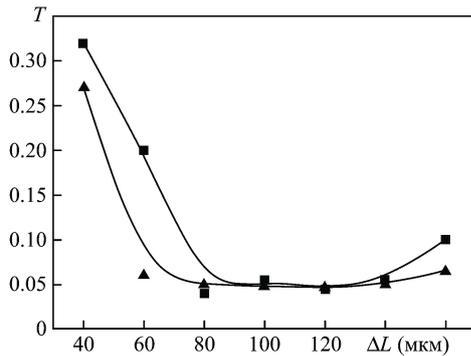


Рис.4. Экспериментальные зависимости коэффициента пропускания выходного устройства от расстояния между решетками при нулевом взаимном смещении проволок ОПР (■) и их взаимном смещении на полпериода (▲).

Для сравнения отметим, что максимальная мощность лазерного излучения, полученная при использовании в качестве выходного зеркала одной ОПР с периодом  $l = 60$  мкм и диаметром проволок  $d = 15$  мкм составляла 0.9 от мощности, полученной при использовании двух ОПР ( $l = 100$  мкм,  $d = 10$  мкм) с  $\Delta L = 100$  мкм, что указывает на неоптимальность коэффициента связи ОПР с  $l = 60$  мкм,  $d = 15$  мкм.

Были проведены качественные эксперименты по определению пропускания сдвоенных ОПР в зависимости от взаимного смещения их проволок. Использовалось линейно поляризованное лазерное излучение с  $\lambda = 337$  мкм. На рис.4 показаны экспериментальные зависимости коэффициентов пропускания сдвоенных ОПР от  $\Delta L$  при несмещенных и сдвинутых на полпериода проволоках. Из этих зависимостей видно, что при  $\Delta L$ , близких к 100 мкм, коэффициент пропускания не зависит от взаимного смещения проволок ОПР.

Анализируя полученные результаты, отметим, что теоретической предпосылкой применения описанной структуры в качестве выходного зеркала лазерного резонатора было наличие области, где коэффициент пропускания составляет  $\sim 0.05$ . Из рис.1 видно, что эта область соответствует расстоянию между решетками  $\Delta L = 40 - 100$  мкм. Экспериментально получено максимальное значение мощности лазерного излучения при  $\Delta L \sim 90$  мкм (рис.3). Из сравнения зависимостей, представленных на рис.1 и 4, видно, что имеется область совпадения теоретических и экспериментальных результатов, которая соответствует расстояниям  $\Delta L = 60 - 100$  мкм. При  $\Delta L > 120$  мкм теоретический коэффициент пропускания увеличивается (рис.1), а экспериментальный имеет лишь тенденцию к увеличению (рис.4). Различие теоретического и экспериментального коэффициентов пропускания при  $\Delta L < 60$  мкм требует специальных экспериментальных исследований и теоретических расчетов, что выходит за рамки настоящей работы и будет предметом дальнейших исследований.

## 4. Заключение

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты коррелируют с проведенными ранее расчетами. Проверка и уточнение применяемой теории многослойных структур с помощью описанной экспериментальной методики может быть предметом дальнейших исследований. Используя многослойную структуру в качестве выходного лазерного зеркала, можно с большой точностью измерить ее пропускание в зависимости от взаимного сдвига проволок или от расстояния между ОПР. Прикладное значение полученных результатов заключается в возможности применения в качестве выходных лазерных зеркал более «редких» ОПР ( $\chi \sim 1$ ). Это особенно важно для лазеров, более коротковолновых по сравнению с HCN-лазером (например, H<sub>2</sub>O- и DCN-лазеры и др.), т. к. при работе с ними возникают технологические трудности при изготовлении соответствующих ОПР. Применение такой структуры дает возможность изменять и оптимизировать связь лазерного излучателя с внешней средой, что может быть использовано для определения параметров лазерной активной среды. При этом данная структура задает поляризацию выходного лазерного излучения, а распределение его интенсивности в лазерном пучке не искажается.

1. Агранович З.С., Марченко В.А., Шестопапов В.П. *ЖТФ*, **32**, 381 (1962).
2. Шестопапов В.П. *Метод задачи Римана–Гильберта в теории дифракции и распространения электромагнитных волн* (Харьков: ХГУ, 1971).
3. Шестопапов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г. *Дифракция волн на решетках* (Харьков: ХГУ, 1973).
4. Усиков А.Я., Канер Э.А., Трутьев И.Д. *Электроника и радиопизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн* (Киев: Наукова думка, 1986).
5. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Полевой Б.И., Валитов Р.А. *ПТЭ*, № 1, 187 (1970).
6. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М. *Квантовая электроника*, **17**, 58 (1990).
7. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М., Филимонова А.А. *Квантовая электроника*, **17**, 1305 (1990).
8. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М. *Квантовая электроника*, **15**, 236 (1988).
9. Каменев Ю.Е., Кулешов Е.М., Лебеденко А.Н. *Квантовая электроника*, **11**, 213 (1984).
10. Каменев Ю.Е., Масалов С.А., Филимонова А.А. *Квантовая электроника*, **36**, 849 (2006).
11. Каменев Ю.Е. *Квантовая электроника*, **33**, 181 (2003).
12. Каменев Ю.Е., Масалов С.А., Филимонова А.А. *Квантовая электроника*, **35**, 375 (2005).
13. Taflov A. *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method* (Boston: Artech House, 2000).
14. Sirenko Y.K., Strom S., Yashina N.P. *Modeling and Analysis of Transient Processes in Open Resonant Structures. New Methods and Techniques* (New York: Springer, 2007).