

# НСN-лазер с адаптивным выходным зеркалом

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

*Предложено, разработано и экспериментально исследовано устройство оптимальной связи лазерного резонатора с внешней средой в виде сопряженных одномерной проволочной решетки и плоского зеркала с отверстием. Исследовалась зависимость выходной мощности лазера от расстояния между зеркалом и решеткой, диаметра отверстия в плоском зеркале и периода решетки. Полученные результаты не только подтверждают возможность использования такого устройства связи, но и указывают конкретные пути и принципы его применения.*

**Ключевые слова:** НCN-лазер, электродинамические параметры, одномерная проволочная решетка, поляризация, фазовый сдвиг.

## 1. Введение

Ранее в качестве выходного зеркала субмиллиметровых лазеров, как правило, применялись либо плоское зеркало с отверстием (ЗО) [1], либо полупрозрачное анизотропное зеркало в виде одномерной проволочной решетки (ОПР) [2].

Для получения переменной связи лазерного резонатора с внешней средой использовали выходное устройство в виде интерференционного фильтра, содержащего две параллельные двумерные сетки, установленные так, чтобы можно было изменять расстояние между ними [3]. Такое выходное устройство сложно в изготовлении, эксплуатации и не позволяет изменять диаметр выходного пучка.

В настоящее время наиболее широкое применение в субмиллиметровых лазерах находит выходное зеркало в виде ОПР. Однако для получения максимальной выходной мощности лазера требуется ОПР с определенными электродинамическими параметрами для конкретного лазерного резонатора. Кроме того, часто необходимо согласование диаметра выходного лазерного пучка с диаметром волноведущего тракта. Так, например, диаметр пучка НCN-лазера составляет не менее 40 мм, а диаметр волноведущего квазиоптического тракта [4] – 20 мм. Для их согласования используют известные квазиоптические переходы, но они трудоемки в изготовлении и имеют значительные линейные размеры [5].

Цель настоящей работы – исследование возможности применения гибридного зеркала, адаптированного к внешним волноведущим трактам.

## 2. Методика измерений и экспериментальная техника

Известно, что при падении на ОПР линейно поляризованного электромагнитного излучения с поляризаци-

ей, параллельной проволокам решетки, и длиной волны, много большей периода решетки, одна часть этого излучения проходит через ОПР, а другая – отражается от нее. При этом прошедший сигнал получает фазовый сдвиг по отношению к падающему и как бы «прорваливается» сквозь решетку (ускоряется решеткой). В зависимости от конструктивных параметров ОПР фазовый сдвиг может быть значительным [6].

В [7, 8] с использованием НCN-лазера (длина волны  $\lambda = 337$  мкм) экспериментально определялся фазовый сдвиг для различных ОПР. Проведенные эксперименты показали хорошее совпадение теоретических [6] и экспериментальных результатов. Их анализ дал возможность предложить устройство связи лазерного резонатора с внешней средой, позволяющее не только оптимизировать связь, но и регулировать диаметр выходного пучка.

Предлагаемое устройство содержит два плоскопараллельных, удаленных друг от друга зеркала, одно из которых (внутреннее) выполнено в виде ОПР, а другое – в виде плоского ЗО. Расстояние между этими зеркалами

$$L = \frac{n\lambda}{2} + \Delta L, \quad (1)$$

где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  $\Delta L$  соответствует фазовому сдвигу, обусловленному данной ОПР. Физически это означает, что ЗО попадает в узел стоячей волны, обусловленной ОПР.

Испытания предложенного выходного устройства проводились с помощью модернизированного электрораз-

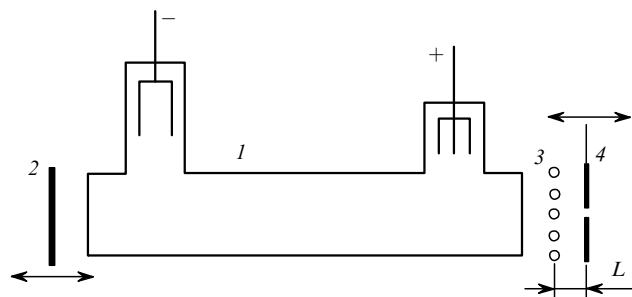


Рис.1. Схема лазерного излучателя:  
1 – разрядная трубка; 2 – глухое зеркало; 3 – ОПР; 4 – плоское ЗО.

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

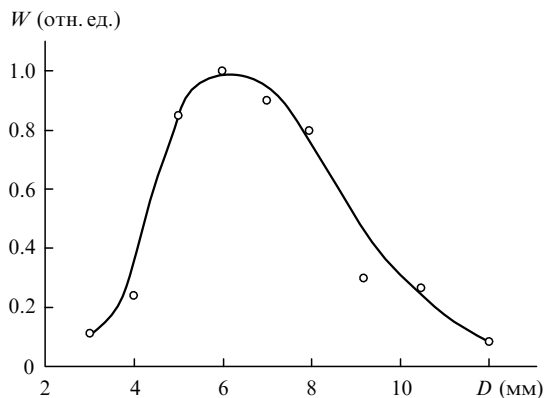


Рис.2. Зависимость мощности лазерного излучения  $W$  от диаметра отверстия  $D$  в плоском зеркале.

рядного HCN-лазера (рис.1) [9]. Экспериментально измерялась мощность лазерного излучения для различных устройств связи. Первоначально регистрировалась зависимость мощности лазерного излучения  $W$  от диаметра отверстия  $D$  в выходных зеркалах (в отсутствие решетки 3), которые в дальнейшем использовались в сочетании с ОНР. На рис.2 представлена типичная зависимость  $W(D)$ , из которой видно, что для данного лазерного резонатора оптимальный диаметр отверстия находится вблизи 6 мм, а максимальный диаметр, при котором возникает излучение, составляет 12 мм.

Далее, при установке исследуемой ОНР и зеркала с отверстием диаметром 7 или 8 мм экспериментально определялось оптимальное расстояние  $L$ , а затем для этого  $L$  измерялась зависимость лазерной мощности от диаметра отверстия. Расстояние  $L$  подбиралось с помощью набора колец толщиной 15 мкм или специального юстировочного узла, в котором раздельно юстировались ОНР и ЗО. В юстировочном узле ОНР и ЗО первоначально устанавливались на расстоянии 29.5 мм друг от друга и имелась возможность параллельного перемещения ЗО относительно ОНР. Применяемые в настоящей работе решетки представляли собой коваровые кольца с внутренним диаметром 40 мм, наружным диаметром 50 мм и толщиной 3 мм, на которых укреплялись проволоки из вольфрама.

Теоретическая оценка фазового сдвига и коэффициента пропускания для этих решеток в случае нормального падения электромагнитной волны на ОНР проводилась по приближенным аналитическим выражениям [6]:

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

$$= |T_E| \exp(i \arg T_E), \tag{2}$$

Табл.1.

$l$ (мкм)	$d$ (мкм)	$S$	$\chi$	$ T_E $	$\varphi_E$	$ T_H $	$\varphi_H$	$\Delta\varphi = \varphi_H - \varphi_E$
50	10	0.2	0.148	0.165	$-83^\circ 47'$	0.99902	$54'$	$84^\circ 41'$
60	10	0.167	0.178	0.248	$-78^\circ 24'$	0.99932	$44'$	$79^\circ 8'$
100	10	0.1	0.297	0.578	$-56^\circ 20'$	0.99976	$26'$	$56^\circ 46'$
200	10	0.05	0.593	0.913	$-24^\circ 54'$	0.99994	$13'$	$25^\circ 6'$

Примечание:  $\varphi_E$  и  $\varphi_H$  – фазовые сдвиги для волн с  $E$  и  $H$ -поляризациями соответственно.

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

$$= |T_H| \exp(i \arg T_H), \tag{3}$$

где  $T_E$  и  $T_H$  – комплексные коэффициенты пропускания ОНР для компонент с  $E$ - и  $H$ -поляризациями соответственно;  $Q = \pi^2 S^2 / 4$ ;  $S = d/l$ ;  $\chi = l/\lambda$ ;  $d$  – диаметр проволок (в микрометрах);  $l$  – шаг решетки (в микрометрах). По этим формулам можно определить модули (коэффициенты пропускания) и аргументы (сдвиги фаз)  $T_E$  и  $T_H$ . В табл.1 приведены результаты расчетов для нескольких типов решеток.

Необходимо отметить, что решетки с шагом 50 и 60 мкм имеют коэффициент пропускания  $|T_E|$ , меньший, чем усиление активной среды применяемого HCN-лазера, а решетки с шагом 100 и 200 мкм – значительно больший. Таким образом, первые две решетки могут служить в качестве самостоятельных выходных зеркал. Сдвиг фазы  $\varphi_E$  (табл.1) определяет теоретическое расстояние  $\Delta L$ .

### 3. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На рис.3 представлена зависимость выходной лазерной мощности от диаметра отверстия в плоском зеркале. При этом устройство связи содержит ЗО и ОНР с шагом 50 мкм и частичным заполнением апертуры проволокой. Из этой зависимости видно, что мощность излучения монотонно растет с увеличением диаметра отверстия.

При начальном расстоянии  $L = 29.5$  мм между ОНР и ЗО (с диаметром отверстия 18 мм) и последующем параллельном перемещении ЗО было установлено, что в

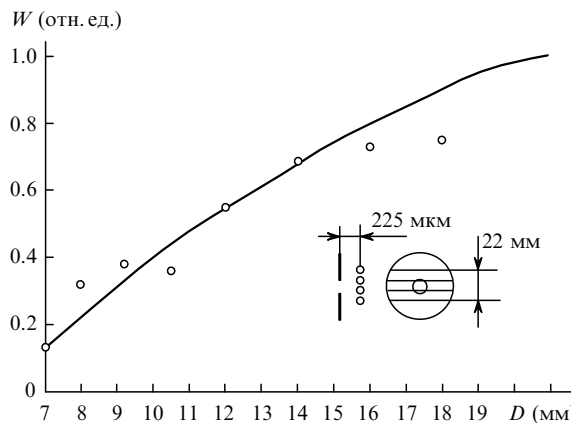


Рис.3. Зависимость мощности лазерного излучения  $W$  от диаметра отверстия в плоском зеркале  $D$  (параметры ОНР –  $l = 50$  мкм,  $d = 10$  мкм). На вставке – схематичное изображение устройства связи, состоящего из ЗО и ОНР.

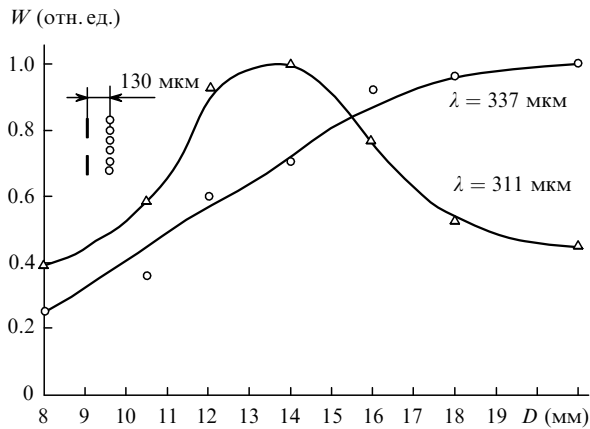


Рис.4. Зависимости мощности лазерного излучения  $W$  от диаметра отверстия в плоском зеркале  $D$  (параметры ОНР –  $l = 60$  мкм,  $d = 15$  мкм).

этой конфигурации генерация существует при изменении  $L$  в пределах  $\pm 15$  мкм и повторяется через  $\lambda/2$ . Для сравнения была измерена мощность лазерного излучения при использовании в качестве выходного зеркала решетки с шагом 50 мкм и диаметром проволок 10 мкм. Мощность оказалась на 10 % больше, чем в случае применения в исследуемом выходном устройстве зеркала с отверстием диаметром 21 мм (рис.3).

На рис.4 показана зависимость мощности лазерного излучения от диаметра отверстия в плоском зеркале при использовании решетки с шагом 60 мкм. В данной конфигурации кроме излучения с  $\lambda = 337$  мкм исследовалось излучение с  $\lambda = 311$  мкм. Из приведенных зависимостей видно, что для  $\lambda = 337$  мкм с увеличением отверстия наблюдается насыщение мощности выходного лазерного излучения, что, в свою очередь, подобно зависимости для  $\lambda = 311$  мкм, указывает на оптимальную связь. Мощность лазерного излучения при использовании этой решетки (в отсутствие ЗО) составляет 0.6 ( $\lambda = 337$  мкм) и 0.2 ( $\lambda = 311$  мкм) от максимальной мощности, полученной при использовании в качестве выходного зеркала ОНР с  $l = 50$  мкм и  $d = 10$  мкм.

На рис.5 приведена зависимость мощности лазерного излучения ( $\lambda = 337$  мкм) от изменения расстояния между ОНР и ЗО (первоначальное расстояние устанавливалось

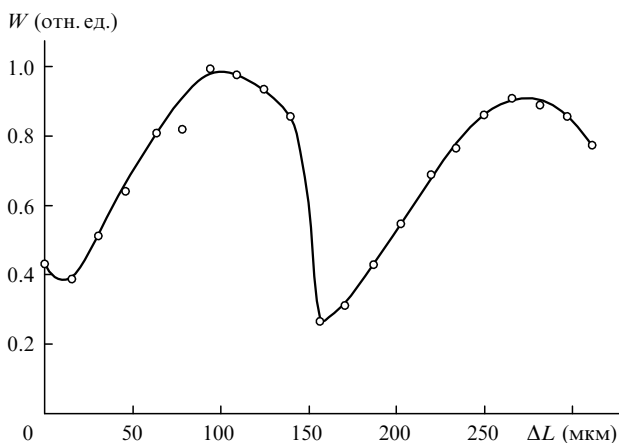


Рис.5. Зависимость мощности лазерного излучения  $W$  с  $\lambda = 337$  мкм от изменения  $\Delta L$  расстояния между ОНР и ЗО при диаметре отверстия в зеркале 21 мм (параметры ОНР –  $l = 60$  мкм,  $d = 15$  мкм).

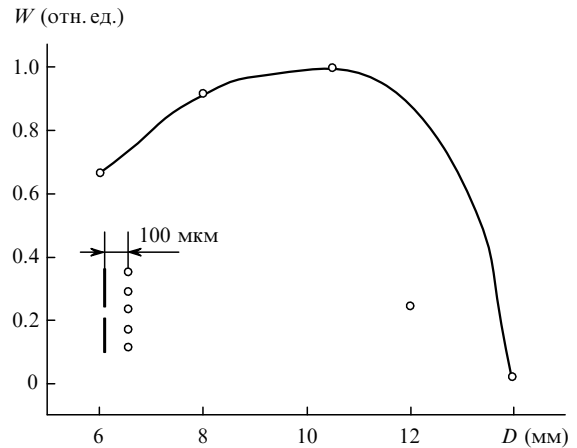


Рис.6. Зависимость мощности лазерного излучения  $W$  от диаметра отверстия в плоском зеркале  $D$  (параметры ОНР –  $l = 100$  мкм,  $d = 10$  мкм).

равным 29.5 мм) при диаметре отверстия в зеркале 21 мм. Видно, что максимум мощности выходного лазерного излучения повторяется через  $\lambda/2$ . Генерация существует при любом расстоянии между ЗО и ОНР. Это объясняется тем, что коэффициент пропускания данной решетки меньше усиления активной среды.

Аналогичные эксперименты проводились также с решетками, период которых составлял 100, 200 и 300 мкм. На рис.6 представлена зависимость мощности лазерного излучения от диаметра отверстия в плоском зеркале при использовании ОНР с шагом 100 мкм. Расстояние  $L$  между ОНР и ЗО составляло 100–130 мкм. Для такой решетки оптимальный диаметр отверстия плоского зеркала равен 10.5 мм. При диаметрах отверстия 12 и 14 мм мощность излучения была меньше, а генерация являлась неустойчивой. При диаметре отверстия 16 мм генерация не наблюдалась. Необходимо отметить, что для этой решетки максимальная выходная мощность была примерно такой же, как и для решеток, рассмотренных выше. При использовании решетки с периодом 200 мкм, расстоянием между решеткой и плоским зеркалом 100 мкм и при диаметре отверстия в плоском зеркале вплоть до 8 мм наблюдалось лазерное излучение с поляризацией, параллельной и перпендикулярной проволокам решетки. При этом мощность излучения с поляризацией, параллельной проволокам решетки, в 1.5 раза больше, чем с перпендикулярной поляризацией. При диаметре отверстия 9.5 мм сигнал не наблюдался.

Для решетки с шагом 300 мкм получена генерация при диаметре отверстия 8 мм и расстоянии между плоским зеркалом и решеткой 200 мкм. Сигнал с поляризацией, параллельной проволокам решетки, по величине был таким же, как и для ортогональной поляризации. Необходимо отметить, что при  $\chi > 0.5$  воздействие ОНР на  $E$ - и  $H$ -компоненты становится сравнимым и при определенных параметрах  $\chi$  и  $S$  может быть одинаковым [6].

Проводились эксперименты и с другими конфигурациями выходного устройства в виде ЗО и ОНР, из которых можно отметить следующие: использовалось ЗО с прямоугольным отверстием, а в качестве ОНР применялись решетки как с полным, так и с частичным заполнением апертуры, которая по размеру совпадала с прямоугольным отверстием ЗО. При этом измеренные энергетические характеристики лазерного излучения были не хуже энергетических характеристик, приведенных выше.

#### 4. Выводы

Таким образом, полученные результаты не только подтверждают работоспособность предложенного устройства связи, но и указывают практические пути его реализации и границы его применимости. Устройство позволяет осуществлять трансформацию диаметра пучка, а также получать оптимальную связь лазерного резонатора с внешней средой, варьируя параметры ОПР и диаметры отверстия в ЗО. Кроме того, исследуемое выходное устройство позволяет получить выходной пучок с диаметром, соответствующим диаметру внешнего волноводящего тракта. Оно с успехом может быть использовано в качестве перехода между квазиоптическими волноводами, различающимися диаметрами, в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Экспериментальные характеристики таких переходов могут быть несколько хуже характеристик известных квазиоптических переходов [5].

1. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Валитов Р.А. *ЖТФ*, **39**, 1135 (1969).
2. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Полевой Б.И., Валитов Р.А. *ПТЭ*, № 1, 187 (1970).
3. Ulrich R., Bridges T.J., Pollack M.A. *Proc. Symp. on Submillimeter Waves* (New York: Polytechnic Institute of Brooklyn, 1970, p. 605).
4. Усиков А.Я., Канер Э.А., Трутень И.Д. *Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн* (Киев: Наукова думка, 1986).
5. Киселев В.К. *Радиофизика и электроника (Харьков)*, **4** (1), 15 (1999).
6. Шестопапов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г. *Дифракция волн на решетках* (Харьков: ХГУ, 1973).
7. Каменев Ю.Е., Масалов С.А., Филимонова А.А. *Квантовая электроника*, **35**, 375 (2005).
8. Каменев Ю.Е., Масалов С.А., Филимонова А.А. *Радиофизика и электроника (Харьков)*, **9** (3), 615 (2004).
9. Каменев Ю.Е. *Квантовая электроника*, **26**, 269 (1999).