

А. Г. НИКИТЕНКО, Ю. В. ТРОИЦКИЙ  
(Новосибирск)

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ЗЕРКАЛА С АМПЛИТУДНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

Использование лазерных зеркал с пропусканием, зависящим от координаты, открывает новые возможности управления характеристиками излучения ОКГ. Можно, например, получать лазерные пучки с произвольным (в том числе П-образным) распределением интенсивности [1, 2] или осуществлять неоднородный вывод энергии высших поперечных мод [3]. Применение таких зеркал позволяет воздействовать на характеристики мод оптического резонатора [4, 5], в том числе неустойчивого [6]. Далее, эти зеркала могли бы в принципе совмещать (при увеличении общего КПД) функции лазерного зеркала и аподизирующего пространственного фильтра, необходимого для подавления самофокусировки излучения мощных лазеров [7].

В работе [1] обращено внимание на то, что при использовании неоднородного зеркала в качестве элемента оптического резонатора необходимо обеспечить неизменность фазы коэффициента отражения по поверхности зеркала, иначе в резонатор будут вноситься большие дифракционные потери.

В настоящей работе рассматривается вопрос об изготовлении эквивалентных зеркал со ступенчато-изменяющейся амплитудой коэффициента пропускания. Эксперименты, выполненные в [1—3], основывались на двух методах изготовления неоднородных зеркал, предложенных в [1]. В этих методах: 1) использовалась независимость фазы коэффициента отражения от числа слоев многослойного диэлектрического покрытия, состоящего из четвертьволновых слоев двух диэлектриков, 2) геометрический фактор в набеге фазы был исключен благодаря обращению зеркала подложкой внутрь резонатора. Недостаток описанных в [1] вариантов зеркал заключается в том, что большое отношение пропусканий двух областей зеркала может быть получено лишь за счет большой разницы числа напыляемых на эти области диэлектрических слоев. Это приводит к увеличению переходной зоны между двумя областями зеркала и в результате — к снижению эффективности всей системы, особенно в случае лазерных пучков с малыми размерами, например в полупроводниковых лазерах и резонансных преобразователях пучков [2].

В настоящей работе предлагается новый способ изготовления неоднородных зеркал, в котором большой контраст по пропусканию получается при различии всего на единицу в числе четвертьволновых слоев. Схема зеркала показана на рис. 1. Область  $b$  имеет малое энергетическое пропускание  $T_b$ , область  $a$  — пропускание  $T_a$ ,  $T_a > T_b$ . Отражающее покрытие наносится в три этапа. Первый состоит в том, что на всю поверхность подложки наносится  $N$  четвертьволновых слоев двух диэлектриков с чередующимися показателями преломления  $n_H$  и  $n_L$ . На рисунке эти слои обозначены  $I$ ,  $N=10$ . На втором этапе область  $a$  закрывается маской и на оставшуюся часть поверхности зеркала наносится один четвертьволновый слой ( $II$  на рис. 1) диэлектрика с таким же показателем преломления ( $n_H$  на рис. 1), как и у  $(N-1)$ -го слоя. Затем маска удаляется, и на третьем этапе на всю поверхность зеркала наносятся диэлектрические слои ( $III$  на рис. 1), число которых  $N'$ , а показатель преломления первого из них одинаков с показателем

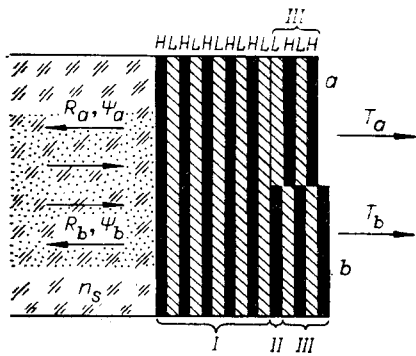
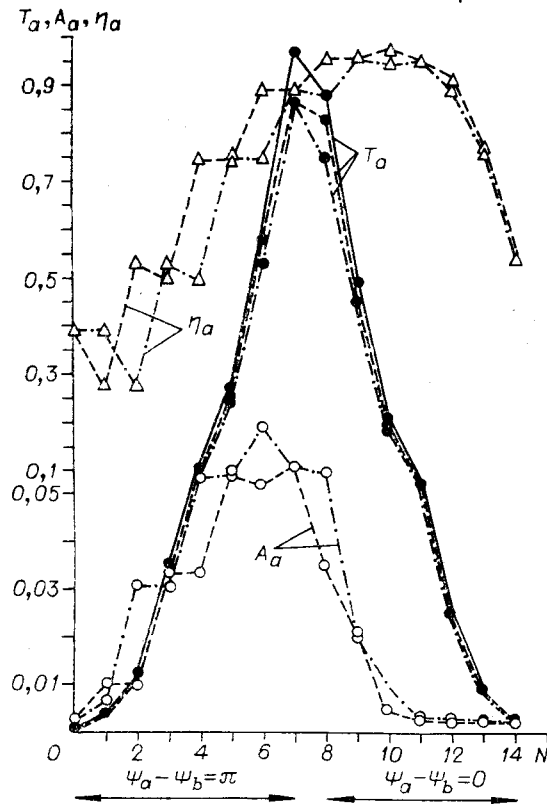


Рис. 1. Схема изготовления зеркал со ступенчатым изменением пропускания.

Рис. 2. Зависимость пропускания, поглощения и КПД области  $a$  неоднородного зеркала от числа слоев первого этапа напыления:  $\Psi_a$  и  $\Psi_b$  — фазы коэффициента отражения областей  $a$  и  $b$  соответственно.



преломления  $N$ -го слоя (например, слоя  $L$  на рис. 1). В результате на область  $b$  оказывается нанесенным  $N+N'+1$  слоев с правильным чередованием диэлектриков. Эта область имеет малое пропускание  $T_b$ . В отличие от этого пропускание  $T_a$  в области  $a$  значительно больше: такое же, как и у  $(N-N')$ -слойника с правильным чередованием. Покрытие в области  $a$  можно рассматривать как настроенный интерферометр Фабри — Перо, два зеркала которого образованы соответственно  $N$ - и  $N'$ -слойниками. При  $N=N'$  получается частный вариант, обычно используемый в интерференционных светофильтрах. Для наших целей  $N > N'$ . Расчет нескольких конкретных структур показал, что при таком способе изготовления неоднородных зеркал можно получить большие отношения  $T_a/T_b$ . В качестве характерного примера таких зеркал на рис. 2 представлены результаты расчета структуры зеркала на кварцевой подложке ( $n_s=1,46$ ) при  $N+N'+1=15$ ,  $n_L=1,35$  и  $n_H=2,32$ . Считалось, что к подложке прилегает слой  $n_H$ . Число  $N$  однородных слоев, наносимых на первом этапе, было различным; его значения отложены по горизонтали на рис. 2 (конечно, имеют смысл лишь целые  $N$ ). При помощи ЭВМ с использованием рекуррентных формул Власова [8] были рассчитаны величины коэффициентов пропускания  $T_a$ ,  $T_b$ , отражения  $R_a$ ,  $R_b$  и поглощения  $A_a=1-T_a-R_a$  областей  $a$  и  $b$ . На рис. 2 показаны значения  $T_a$ ,  $A_a$  и  $\eta_a=T_a/(T_a+A_a)$  — «коэффициента полезного действия» покрытия, зависящего от соотношения поглощенного и проходящего света. Необходимо обратить внимание на десятикратное изменение масштаба по вертикальной оси при значении ординаты 0,05. Точки, соединенные сплошной ломаной линией, получены в отсутствие поглощения в слоях: когда мнимые части показателей преломления  $\kappa_H$  и  $\kappa_L$  равны нулю. В этом случае  $A_a=0$ ,  $\eta_a=1$ ,  $T_b=0,055 \cdot 10^{-2}$ . Как и следовало ожидать, при увеличении  $N$   $T_a$  сначала возрастает, достигает максимума ( $N=7$ ,  $T_a=0,96$ ), а затем начинает спадать.

Значения  $N \leq 8$  для лазерных зеркал непригодны, так как фазы  $\psi_a$  и  $\psi_b$  коэффициента отражения от областей  $a$  и  $b$  различаются на  $\pi$  (однако такие зеркала могут оказаться полезными для селекции исключением области максимальных  $T_a$ ). На рис. 2 приведены также результаты расчетов  $T_a$ ,  $A_a$  и  $\eta_a$  для  $\lambda=0,63$  мкм при  $\kappa_L=0$ ,  $\kappa_H=10^{-3}$  (штриховые линии) и при  $\kappa_L=10^{-3}$ ,  $\kappa_H=0$  (штрихпунктирные линии). Очевидно, что коэффициент поглощения света в зеркале в этом случае уже не равен нулю. Если он мал, то, как показывают расчеты, при неизменной структуре покрытия он линейно зависит от  $\kappa_L$  и  $\kappa_H$ :

$$A_a = C_1 \kappa_L + C_2 \kappa_H.$$

Данные рис. 2 позволяют найти  $C_1$  и  $C_2$  при каждом заданном  $N$  и, следовательно, величину  $A_a$  при произвольных значениях  $\kappa_L$  и  $\kappa_H$ .

Для структуры, характеристики которой представлены на рис. 2, большие значения  $\eta_a$  получаются при  $N=10-13$ . Например, при  $N=10$ ,  $\kappa_H=10^{-3}$  и  $\kappa_L=0$   $T_a=0,1978$ ,  $A_a=0,49 \cdot 10^{-2}$ ,  $\eta_a=0,97$ . При этих же  $\kappa_L$  и  $\kappa_H$  для областей  $b$  получаем  $T_b=0,055 \cdot 10^{-2}$ ,  $A_b=0,25 \cdot 10^{-2}$ . Таким образом, контраст пропусканий областей  $a$  и  $b$  очень велик:  $(T_a/T_b) \approx 340$ . Следует отметить, что рассмотренная конкретная структура зеркала позволяет получить при хорошем  $\eta_a$  лишь четыре значения  $T_a$ :  $45,8 \cdot 10^{-2}$ ;  $19,8 \cdot 10^{-2}$ ;  $7,19 \cdot 10^{-2}$ ;  $2,54 \cdot 10^{-2}$ . Если нужны промежуточные значения, то следует варьировать показатели преломления диэлектриков и менять их местами. Однако можно поступить проще: сделать слой  $II$  не четвертьволновым. Если в данной системе плавно изменять его толщину от 0 до  $\lambda/4$ , то, например при  $N=11$ ,  $T_a$  плавно изменяется от  $19,78 \cdot 10^{-2}$  до  $0,055 \cdot 10^{-2}$ . При этом, очевидно,  $\Psi_a$  уже не будет равно  $\pi$ . В плоскости раздела покрытий  $I$  и  $II$  фаза меняется от 0 до  $\pi$ , но это изменение «экранируется»  $N$ -слоем  $I$ , и на границе подложка — покрытие вариация фазы может оказаться допустимой. Расчет показывает, что при  $N=11$  отклонение  $\Psi_a$  от  $\pi$  не превышает  $6 \cdot 10^{-3} \pi$ . Обнаруженный эффект «экранировки» фазы многослойником в принципе дает возможность реализовать «почти эквивидазные» зеркала с плавным изменением амплитуды пропускания по поверхности, например гауссовым [4, 6].

Таким образом, предложенный здесь метод позволяет легко осуществить эквивидазные неоднородные отражатели с резкими границами областей и высоким контрастом по пропусканию. Недостатком таких зеркал можно считать их резонансный характер, в результате чего несколько увеличиваются потери на поглощение в слоях. Возможно, это создает также увеличенную избирательность по  $\lambda$ . Если это недопустимо, то следует ориентироваться на схему зеркала, изображенную на рис. 1, б в [1], хотя границы и контраст для нее несколько хуже.

По предложенному методу было изготовлено зеркало для  $\lambda=0,63$  мкм с  $N=11$  и общим числом слоев, равным 15. Область повышенного пропускания имела вид квадрата со стороной 0,5 мм. Полученные значения  $T_a$  и  $T_b$  составили соответственно  $4,5 \cdot 10^{-2}$  и  $0,3 \cdot 10^{-2}$ . Ширина переходной зоны была равна примерно 5 мкм. Испытание в He-Ne-лазере показало, что дополнительные потери, связанные с неоднородностью зеркала, малы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий Ю. В. Равномерное освещение при помощи газового лазера.— «Опт. и спектр.», 1974, т. 37, вып. 5, с. 973—978.
2. Курбатов П. Ф., Троицкий Ю. В. Получение негауссовых световых пучков при помощи интерферометра Фабри—Перо с неоднородным зеркалом.— «Опт. и спектр.», 1975, т. 38, вып. 6, с. 1217—1218.
3. Троицкий Ю. В. Неоднородный вывод энергии высших поперечных типов колебаний в газовом оптическом квантовом генераторе.— «Квант. электроника», 1974, т. 1, № 1, с. 124—128.
4. Вахитов Н. Г. Открытые резонаторы с зеркалами, обладающими переменным коэффициентом отражения.— «Радиотехника и электроника», 1969, т. 10, № 9, с. 1676—1683.
5. Власов С. Н. Резонаторы с зеркалами с переменным коэффициентом отражения.— «Радиотехника и электроника», 1965, т. 10, № 9, с. 1715—1718.
6. McAllister G. L., Steier W. H., Lacina W. B. Improved mode properties of unstable resonators with tapered reflectivity mirrors and shaped apertures.— "IEEE J. Quant. Electr.", 1974, vol. QE-10, N 3, p. 346—355.
7. Campillo A. J., Carpenter B., Newnam B. E., Shapiro S. L. Soft apertures for reducing damage in high — power laser — amplifier systems.— "Opt. Commun.", 1974, vol. 10, N 4, p. 313—315.
8. Гребенщиков И. В., Власов А. Г., Непорент Б. С., Суйковская Н. В. Просветление оптики. М.— Л., Гостехиздат, 1946.
9. Троицкий Ю. В. Использование многолучевого фазового интерферометра для получения одночастотной генерации в лазерах.— «Квант. электроника», 1975, т. 2, № 11, с. 2444—2451.

*Поступила в редакцию 6 апреля 1978 г.;  
окончательный вариант — 27 июля 1978 г.*

УДК 681.327.17

**В. М. МАТЮХИНА, В. Н. РЕБИТВА, Е. А. ФИГУРОВСКИЙ,  
Я. Г. ХУСАИНОВА**  
(Новосибирск)

### ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

При исследовании одиночных фотоприемников и матричных фотоэлектрических преобразователей существует ряд задач, решение которых требует генерации импульсного излучения в заданном спектральном диапазоне с весьма широкой регулировкой энергии излучения.

Использование ОКГ с электрооптическими и акустооптическими модуляторами не удовлетворяет поставленным условиям по нескольким причинам. Большой остаточный поток на выходе электрооптического модулятора при полном затемнении (3—7%) резко уменьшает динамический диапазон регулировки энергии [1]. Акустооптический модулятор (дефлектор) не позволяет получить импульс излучения короче нескольких микросекунд из-за малого быстродействия дефлектора и инерционности схемы управления [2]. Нестабильность уровня излучения ОКГ и изменение его модового состава целиком определяют колебания промодулированного потока: они составляют 30—40%; реальный динамический диапазон регулировки энергии не превышает 1,5÷2 порядка.

Значительно лучший результат можно получить при использовании в качестве генераторов излучения быстродействующих инжекционных диодов на основе фосфида и арсенида галлия [3, 4]. При этом может быть достигнут широкий динамический диапазон регулировки энергии излучения, составляющий 4 порядка и более, а нестабильность энергии импульса излучения может быть снижена до единиц процентов.