

09
© 1991 г.ЭФФЕКТИВНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
ДЛЯ ВОЛН TE -ПОЛЯРИЗАЦИИ

А. С. Свахин, В. А. Сычугов, А. Е. Тихомиров

Проведен анализ работы структуры, состоящей из диэлектрической пленки с нанесенной на ее поверхность дифракционной решеткой и отражающего зеркала, расположенного с другой стороны пленки. Приведена аналитическая зависимость дифракционной эффективности устройства от его параметров для TE -волн. Экспериментально реализован элемент с дифракционной эффективностью $\eta_{-1} \sim 85\%$ на длине волны 0.448 мкм для TE -поляризации. Отмечена возможность создания на основе такой структуры дифракционных элементов высокой лучевой стойкости.

Для целого ряда оптических приборов, а также для проведения многих оптических экспериментов задача создания высокоэффективных дифракционных решеток является актуальной и в настоящее время. Чаще всего эта задача решается путем применения решеток с углом блеска (эшеллетов). Это могут быть как нарезные дифракционные решетки, так и решетки, полученные путем селективного химического травления на определенных срезах различных кристаллов, в частности кремния [1]. Во всех случаях с целью повышения дифракционной эффективности (ДЭ) эти решетки запываются металлом. Следует отметить, что решетки с углом блеска обладают высокой ДЭ, вообще говоря, при выполнении соотношения

$$\lambda/\Lambda < 1, \quad (1)$$

где λ — длина волны падающего излучения, Λ — период решетки, что не всегда приемлемо.

В случае когда условие (1) не выполнено, можно достичь высокой ДЭ путем изготовления металлизированных решеток вполне определенной глубины, которая должна строго соответствовать используемому профилю решетки. Так, в работе [2] приводятся расчетные результаты для глубин решеток треугольного, синусоидального, прямоугольного профилей в зависимости от длины волны падающего излучения в случае высокой ДЭ этих решеток. Результаты расчетов показывают, что высокая ДЭ для волн TE -поляризации может быть достигнута лишь при очень больших глубинах решеток. Например, ДЭ, равная 100% , для решетки синусоидального профиля при выполнении условия $\lambda = \Lambda$ достигается при полной глубине решетки $2\sigma = 0.7\Lambda$. Само же изготовление дифракционных решеток такой большой глубины сопряжено с рядом технологических сложностей, особенно для случая $\Lambda \sim 1$ мкм.

С другой стороны, при работе некоторых устройств, например полупроводниковых лазеров с внешним селективным отражателем, в качестве такого отражателя может быть применена дифракционная решетка. Использование решетки, эффективно работающей в случае излучения TE -поляризации, является предпочтительным, поскольку позволяет получать более спектрально узкую линию излучения.

Следует также отметить, что и сама металлизация дифракционной решетки далеко не всегда приемлема, так как при этом сильно уменьшается лучевая стойкость решеток за счет поглощения металла. Обычно для предотвращения

оптического разрушения решеток используются расширители светового пучка, понижающие плотность мощности падающего излучения.

С целью решения указанных проблем предлагается использовать комбинированную структуру, представленную на рис. 1. Падающая волна, попадая из среды 1 на гофрированную поверхность раздела сред 1 и 2, испытывает дифракцию как в среду 1, так и в среду 2, отражение от границы раздела сред и преломление в среду 2. Все прошедшие в среду 2 лучи испытывают отражение от зеркала 3, в результате чего для них указанный процесс взаимодействия с гофрированной поверхностью многократно повторяется. В пленке 2 распространяется два типа волн: один из них соответствует преломленной волне и распространяется под углом φ , определяемым из условия $\sin \varphi = (n_1/n_2) \sin \theta$, другой — под углом ψ , получаемым из условия $\sin \psi = \frac{1}{n_2} (n_1 \sin \theta - (\lambda/\Lambda))$, и соответствует волне «-1» порядка дифракции.

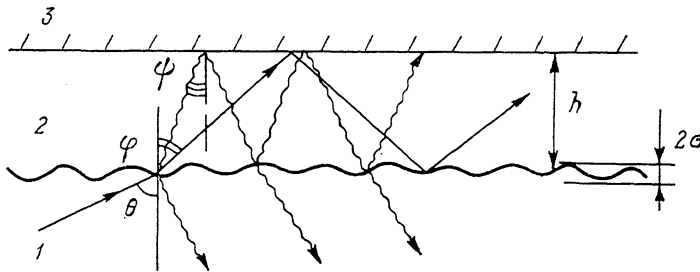


Рис. 1. Схема исследуемой структуры.

1 — среда с показателем преломления n_1 , 2 — среда с показателем преломления n_2 , 3 — отражающее зеркало. Прямые линии — лучи, соответствующие падающей и преломленным волнам, волнистые — лучи, соответствующие диффракционным волнам.

В данном случае с целью упрощения задачи мы считаем, что волны всех других порядков отсутствуют и, строго говоря, эти допущения реализуются при выполнении следующих двух условий:

$$n_1 \sin \theta + \frac{\lambda}{\Lambda} > n_2, \quad (2)$$

$$\frac{2\lambda}{\Lambda} - n_1 \sin \theta > n_2. \quad (3)$$

Условие (2) соответствует отсутствию «+1», а условие (3) — «-2» порядков дифракции. Выполнение указанных условий дает возможность получения высокой дифракционной эффективности, которая обеспечивается конструктивной интерференцией диффракционных волн только «-1» порядка. Расчет дифракционной эффективности η_{-1} структуры, показанной на рис. 1, был проведен двумя способами. В первом из них был использован оптико-геометрический подход [3], в котором путем суммирования отраженных на зеркале и на границе раздела воздух—диэлектрик волн была найдена суммарная амплитуда диффракционной волны. Затем из отношения потока дифракционной волны к потоку падающей была найдена величина η_{-1} , которая для TE-волн оказалась равной

$$\eta_{-1} = \frac{(k\sigma)^2 \sqrt{1 - (n^*)^2} \sqrt{1 - (n^* - N)^2} (n_2^2 - 1)^2 \cos^2\left(\frac{\Delta_0}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\Delta}{2}\right)}{\left\{n_2^2 - (n^*)^2 - (n_2^2 - 1) \cos^2\left(\frac{\Delta_0}{2}\right)\right\} \left\{n_2^2 - (n^* - N)^2 - (n_2^2 - 1) \cos^2\left(\frac{\Delta}{2}\right)\right\}}, \quad (4)$$

где

$$\Delta = 2kh \sqrt{n_2^2 - (n^* - N)^2} - \pi,$$

$$\Delta_0 = 2kh \frac{[n_2^2 - n^*(n^* - N)]}{\sqrt{n_2^2 - (n^*)^2}} - \pi,$$

$n^* = \sin \theta$, θ — угол падения света на решетку в воздухе; $N = \lambda/\Lambda$, Λ — период решетки; $k = (2\pi)/\lambda$; 2σ — глубина решетки; n_1 был выбран равным единице.

Выражение (4) получено при условии достаточно малой глубины гофра, а именно $(k\sigma)^2 \ll 1$, однако фактически значимые спектральные зависимости,

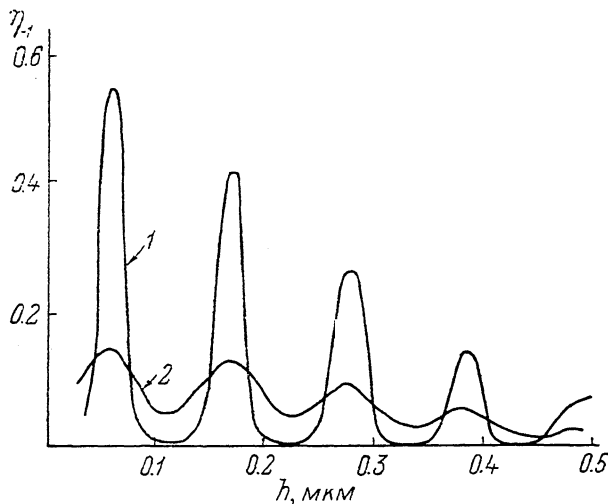


Рис. 2. Расчетная зависимость ДЭ η_{-1} от толщины h пленки.

$\sigma = 200 \text{ \AA}$, $\lambda = 0.488 \text{ мкм}$, $n_2 = 2.25$, $n_1 = 1$, $\theta = 45^\circ$; 1 — зависимость для TE -поляризации, 2 — зависимость для TM -поляризации.

зависимости от толщины слоя h и его показателя преломления n_2 , формула дает и при больших глубинах решетки. Так, из формулы следует, что показатель преломления n_2 существенным образом определяет величину η_{-1} , и по-

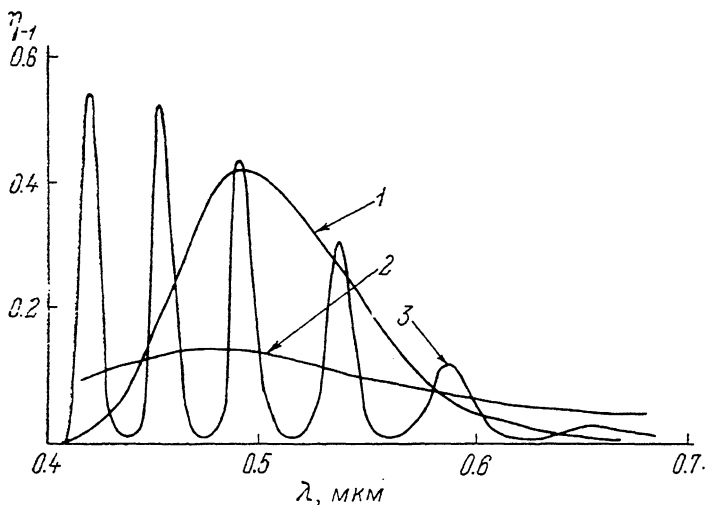


Рис. 3. График расчетной зависимости ДЭ η_{-1} от длины волны λ .

$\sigma = 200 \text{ \AA}$, $h = 0.17 \text{ мкм}$, $n_2 = 2.25$, $n_1 = 1$, $\theta = 45^\circ$; 1, 2 — то же, что и на рис. 2; 3 — зависимость для TE -поляризации при $h = 1.44 \text{ мкм}$.

этому для реализации высокоэффективного элемента необходимо выбирать возможно большее значение n_2 .

В случае TM -волн выражение для η_{-1} получается весьма громоздким и малоприменимым для анализа работы элемента, поэтому наряду с первым способом расчета η_{-1} нами был использован метод Фурье—Релея для расчета ДЭ структуры. Результаты расчета для TE -волн были сопоставлены с тем, что дает формула (4), и было выявлено удовлетворительное их совпадение. На рис. 2

представлена зависимость η_{-1} от толщины пленки h , а на рис. 3 — спектральные зависимости для TE - и TM -волн, полученные методом Фурье—Релея. В расчетах предполагалось, что на зеркале 3 происходит 100%-ное отражение волны с изменением фазы на π . Из произведенных расчетов видно, что при указанных глубинах решетки для случая TE -поляризации ДЭ η_{-1} существенно выше, чем для случая TM -волн. Расчет же для еще более глубоких решеток указанным методом, строго говоря, является некорректным по причине нарушения критерия Релея: $(2\sigma)/\lambda < 0.07$. Сопоставление кривых 1 и 3 на рис. 3 позволяет сделать вывод о возможности создания на основе рассматриваемой структуры эффективных дифракционных элементов как с узкой, так и с широкой спектральными полосами дифракции.

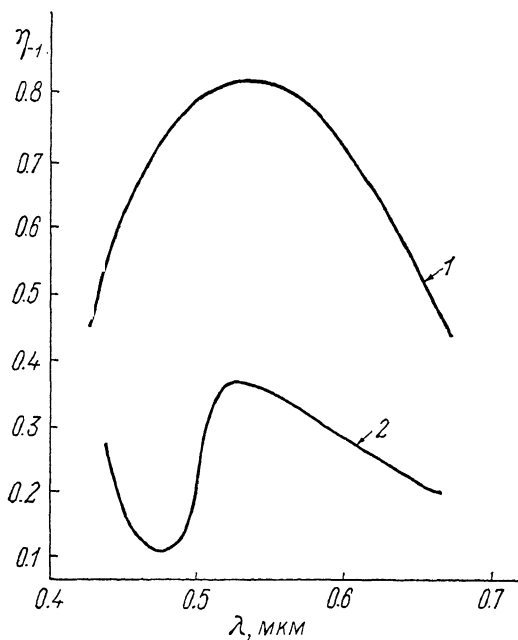


Рис. 4. Экспериментально измеренная спектральная зависимость η_{-1} при $\theta=45^\circ$.
1, 2 — то же, что и на рис. 2.

Нами был экспериментально реализован элемент, в котором в качестве зеркала 3 (рис. 1) использовалась пленка Al толщиной $\sim 1000 \text{ \AA}$, напыленная на поверхность стеклянной подложки. В качестве среды 2 выбиралась пленка Nb_2O_5 ($n_2=2.25$) толщиной $\sim 1700 \text{ \AA}$, напыленная магнетронным методом на поверхность предварительно полученного Al зеркала. Дифракционная решетка с периодом $\Lambda=0.55 \text{ мкм}$ изготавливалась по голографической методике с использованием He—Cd лазера с длиной волны излучения $\lambda_H=0.441 \text{ мкм}$ на слое фоторезиста СК-502, который предварительно наносился на поверхность пленки 2. После экспонирования и процесса проявления фоторезиста полученный на его поверхности рельеф переносился на пленку Nb_2O_5 путем реактивного ионного травления в атмосфере фреона CF_4 , используемого в качестве рабочего газа при ускоряющем напряжении 3 кВ и плотности ионного тока $\sim 75 \text{ мкА/см}^2$, при этом скорость травления пленки составляла $\sim 90 \text{ \AA/мин}$. Оцененная по времени травления полная глубина решетки 2σ составила величину $\sim 1500 \text{ \AA}$.

Экспериментально измеренные спектральные зависимости для TE - и TM -поляризаций представлены на рис. 4. Максимальная η_{-1} для TE -поляризации составляла 85 % при λ , близких к 0.5 мкм. В спектральной зависимости для TM -поляризации наблюдается провал в сине-зеленой области спектра, который связан с возбуждением поверхностной электромагнитной волны в «—2» порядке дифракции. Вычисленный для данной структуры эффективный показатель

преломления для такой волны $n' = 1.136 + 0.244i$ и его значение, определенное из эксперимента $n' = 1.1 + 0.22i$, количественно соответствуют друг другу.

Следует отметить, что полученное для TE -поляризации максимальное значение $\eta_{-1} = 85\%$ не является предельным для данной структуры и может быть повышено за счет использования в качестве отражающего покрытия β (рис. 1) диэлектрического зеркала с более высоким, чем у Al , коэффициентом отражения. При этом рассматриваемый элемент не будет содержать поглощающих материалов и поэтому, вероятно, будет представлять собой структуру высокой лучевой стойкости (по крайней мере вплоть до плотностей мощности 10 МВт/см^2).

Нами также был реализован элемент, приведенный на рис. 5 и состоящий из двух стеклянных пластин, на поверхность одной из которых нанесено отражающее Al зеркало, а на поверхности другой пластины изготавливалась

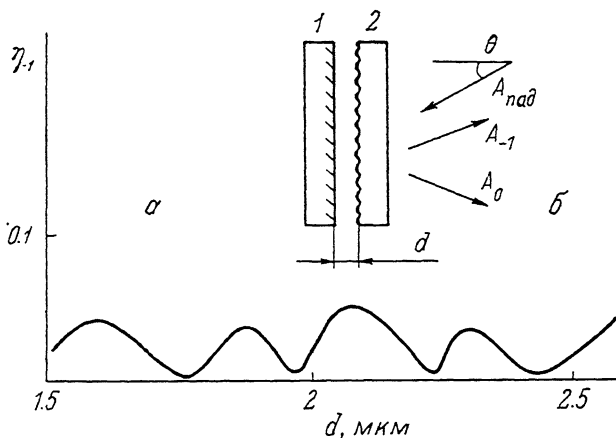


Рис. 5. Расчетная зависимость η_{-1} от толщины зазора d при $n_2=1$, $n_1=1.67$, $\lambda=0.63 \text{ мкм}$, $\theta=45^\circ$ (а) и схема исследуемой структуры (б).

1 — стеклянная пластина с нанесенным на ее поверхность металлическим зеркалом; 2 — стеклянная пластина со сформированной на ее поверхности дифракционной решеткой.

фоторезистивная дифракционная решетка с периодом $\Lambda = 0.5 \text{ мкм}$ по описанной ранее методике. Между пластинами обеспечивался однородный по длине образца зазор d , который можно было плавно изменять без нарушения его однородности. При таком изменении зазора между пластинами было получено перераспределение энергии между отраженной волной A_0 и волной, соответствующей «-1» порядку дифракции A_{-1} . При этом удавалось плавно варьировать эффективность дифракции η_{-1} в пределах $0 \leq \eta_{-1} \leq 0.5$ при соответствующем изменении зазора между пластинами d в пределах $2 \leq d \leq 2.2 \text{ мкм}$ (рис. 5).

Устройство, приведенное на рис. 5, также может быть успешно использовано в качестве дисперсионного элемента резонатора различных перестраиваемых лазеров, например твердотельных, лазеров на красителях, полупроводниковых лазеров с внешней обратной связью, лазеров на основе оптического волокна легированного Er^{3+} и т. д. Применение этого устройства может позволить, в частности, получить максимальную выходную мощность излучения перестраиваемого лазера во всем спектральном диапазоне перестройки либо при необходимости постоянную выходную мощность в некотором спектральном диапазоне при неизменном уровне мощности накачки, что достигается соответствующим изменением добротности дисперсионного резонатора, связанным с подстройкой зазора d между пластинами.

Таким образом, показано экспериментально, что на основе предложенных структур возможно получение высокой эффективности дифракции света, осуществление перестройки эффективности дифракции, а также возможно создание дифракционных элементов высокой лучевой стойкости.

В заключение авторы выражают благодарность И. А. Авруцкому, С. П. Сурову, В. Л. Масленникову за полезные обсуждения и помощь в работе.

Список литературы

- [1] *Yohji Fujii, Koh-ichi Aoyama, Jun-ichiro Minova* // IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. QE-16. N 2. P. 165—169.
- [2] *Breidne M., Maestre D.* // Appl. Optics. 1980. Vol. 19. N 11. P. 1812—1821.
- [3] *Сычугов В. А., Тищенко А. В.* // Квантовая электрон. 1982. Т. 9. № 7. С. 1451—1458.

Институт общей физики АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
10 августа 1990 г.