

07

© 1990 г.

СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭМУЛЬСИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

О. Н. Карнович, В. В. Крылов, Ю. П. Удоев

В диапазоне длин волн 0.5—1.0 мкм экспериментально исследовано спектральное распределение дифракционной эффективности фазовых голографических решеток пропускающего типа с пространственной частотой ~ 1700 лин/мм, приготовленных на пластинках ЛОИ-2. Показано, что соответствующим выбором экспозиции и режимов химической обработки в области 0.8—0.9 мкм может быть получена абсолютная дифракционная эффективность ≥ 70 % при относительной дифракционной эффективности ~ 90 %. С позиций известной теории Когельника рассмотрены особенности обнаруженных спектральных распределений.

В связи с выяснением общих закономерностей голографического метода восстановления волновых фронтов и выявлением методов химической обработки для получения голограмм с высокой эффективностью исследованию дифракционных свойств голографических решеток, приготовленных на фотоэмульсионных материалах, посвящено большое число работ (см., например, [1-4]). Однако, за немногими исключениями, исследования проведены в видимой области спектра, особенно на длине волны 0.63 мкм. Промышленный выпуск полупроводниковых лазеров стимулирует разработку голографических оптических элементов различного назначения, рассчитанных на работу в ИК области спектра. В настоящей работе для пластинок ЛОИ-2-633 в ближней ИК области спектра проведено сравнительное исследование дифракционной эффективности (ДЭ) фазовых голографических решеток пропускающего типа, полученных различными методами химической обработки.

Голографические решетки записывались на установке СИН-1 в сходящихся коллимированных пучках He—Ne лазера ($\lambda = 0.63$ мкм) по обычной симметричной схеме с делением фронта волны при соотношении интенсивностей пучков $\sim 1 : 1$, имеющих s-поляризацию. Решетки имели примерно круговую апертуру с диаметром 15 мм. Для уменьшения влияния неидентичности химической обработки и свойств фотоматериалов на каждой пластинке записывалось несколько решеток при различных экспозициях. Оптическая схема включала элементы для контроля интенсивностей лазерного пучка и одного из записывающих пучков. Пространственная частота решеток была ~ 1700 лин/мм. Химическая обработка экспонированных пластинок проводилась тремя способами: 1) путем обычного отбеливания после проявления в растворе Д-19 и фиксирования, 2) путем такого же отбеливания после проявления в концентрированных растворах ГП-2, 3) по методу Чанга—Виника (ЧВ) [5] после проявления в Д-19. Во всех случаях отбеливание проводилось в растворе R-10 (КЛ). Фиксирование проводилось в коммерческом кислом фиксаже. Характерные времена обработки были следующие: проявление в Д-19 5 мин, проявление в ГП-2 12 мин, отбеливание 5—8 мин, фиксирование 5 мин. Решетки, полученные методом отбеливания, дополнительно обрабатывались в осветляющем растворе сульфата натрия и в некоторых случаях в изопропанол.

Спектральное распределение ДЭ полученных решеток исследовалось в диапазоне 0.5—1.0 мкм с помощью призменного монохроматора УМ-2, за выходной щелью которого последовательно располагались коллимирующая линза, поляризатор, задающий *s*-поляризацию, диафрагмы, исследуемая решетка на вращающемся столике и фотоумножитель. Градуировка монохроматора в ИК области спектра проводилась путем сравнения спектров пропускания стекла ПС-7, измеренных на монохроматоре и спектрофотометре СФ-8. Выходной ток ФЭУ измерялся в двух положениях решетки: при нормальном падении волны на решетку и при повороте решетки на угол Брэгга, фиксировавшийся по достижению минимума интенсивности волны, прошедшей через решетку. Относительная дифракционная эффективность (ОДЭ), определяемая соотношением (1а), рассчитывалась по выражению (1б)

$$\eta = \frac{I_d}{I_d + I_{06}}, \quad \eta = 1 - M \frac{I_{06}}{I_{00}} \quad (1a), (1b)$$

В этих выражениях I_d и I_{06} — интенсивности дифрагированной волны и волны нулевого порядка в проходящем свете при угле Брэгга; I_{00} — интенсивность

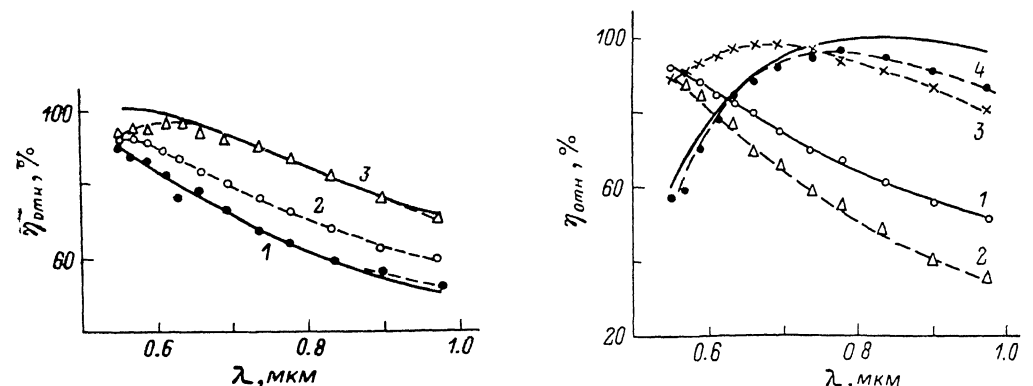


Рис. 1. Зависимость ОДЭ от длины волны для решеток, полученных методом Чанга—Виника для одной (1, 2) и другой пластинок (3).

Время экспонирования, мин: 1 — 4,7, 2 — 8, 3 — 6.

Рис. 2. Зависимость ОДЭ от длины волны для решеток, полученных путем обычного отбеливания после проявления в Д-19 (1, 2) и при дополнительной обработке в изопропаноле (3, 4).

Время экспонирования, мин: 1 — 2, 2 — 8, 3 — 6, 4 — 10.

проходящей волны нулевого порядка при нормальном падении; M — коэффициент, учитывающий различие френелевских потерь на отражение при указанных двух положениях решетки.

Для каждой решетки измерялась также величина T коэффициента светопропускания при нормальном падении, что давало возможность приблизительно оценить абсолютную дифракционную эффективность (АДЭ) по соотношению $\eta_a = T\eta$. Величина η может быть рассчитана по (1б) только в том случае, когда при наклонном падении существует лишь один дифрагированный пучок, а при нормальном падении дифрагированных пучков нет. Используя известные условия Брэгга и уравнение решетки, легко найти, что при рабочем периоде решетки указанные условия выполняются при $\lambda > 0.6$ мкм. В диапазоне $0.5 < \lambda < 0.6$ мкм кинематическое уравнение решетки допускает наличие двух дифрагированных пучков при нормальном падении, однако при достаточно большой величине параметра Клейна [1] их наличие будет приводить к небольшому занижению значений ОДЭ, рассчитанных по (1б), и величин T , измеренных в дальней зоне.

Измерения показали, что вид зависимостей $\eta(\lambda)$ и величина ОДЭ в ИК области сильно зависят от экспозиции и режима химической обработки (рис. 1—3). При обработке по методу ЧВ достигнуты высокие (~96 %) значения ОДЭ в районе $\lambda \sim 0.6$ мкм, однако с увеличением λ величина ОДЭ монотонно умень-

шается (рис. 1). При отбеливании полученных образцов как такового же, так и другого типов, характеризующиеся наличием максимума при $\lambda > 0.6$ мкм, причем величина ОДЭ в этом максимуме также является высокой (до 94—98 %). Зависимости $\eta(\lambda)$ второго типа получены в двух случаях: при проявлении в достаточно концентрированных растворах ГП-2 (кривые 3, 4 на рис. 3) и при дополнительной обработке в изопропаноле образцов, отбеленных после проявления в Д-19 (кривые 1, 2 на рис. 2). Общий характер наблюдаемых зависимостей во многих случаях может быть объяснен на основе известных результатов теории Когельника [6] при использовании выражения для ОДЭ чисто фазовой пропускающей решетки

$$\eta = \sin^2 \varphi(\lambda) \equiv \sin^2 \frac{\pi \Delta L}{\lambda \cos \theta}, \quad (2)$$

где Δ — амплитуда синусоидальной фазовой модуляции, L — толщина решетки, λ — рабочая длина волны в вакууме, θ — внутренний угол Брэгга.

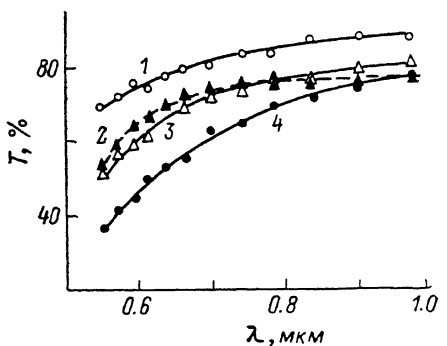
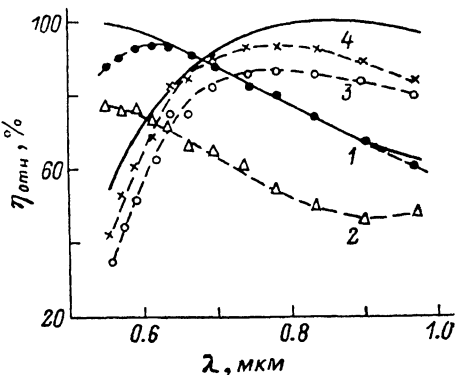


Рис. 3. Зависимость ОДЭ от длины волны для решеток, полученных путем отбеливания после проявления в 11%-ном (1, 2) и 34%-ном (3, 4) растворах ГП-2.

Время экспонирования, мин: 1, 3 — 1; 2, 4 — 4.

Рис. 4. Зависимость коэффициента светопропускания от длины волны при различных способах обработки.

1 — метод Чанга-Винника, 2 — отбеливание после проявления в Д-19, 3 — то же с дополнительной обработкой в изопропанол, 4 — отбеливание после проявления в 34%-ном растворе ГП-2.

Расчетные зависимости $\eta(\lambda)$ для некоторых образцов показаны на рис. 1—3 сплошными линиями. Расчетные кривые получены путем привязки к экспериментальным значениям η при $\lambda \sim 0.63$ мкм (кривая 4 на рис. 2 и кривые 1, 4 на рис. 3) и $\lambda \sim 0.78$ мкм (кривые 1, 3 на рис. 1 и кривая 1 на рис. 2). При расчете учитывалось изменение внутреннего угла Брэгга с изменением λ , а величина Δ предполагалась постоянной.

Из (2) следует, что если при некоторой длине волны λ_0 величина $\varphi(\lambda_0) < \pi/2$, то с увеличением λ ОДЭ будет уменьшаться, а с уменьшением λ — увеличиваться. При $\varphi(\lambda_0) > \pi/2$ поведение $\eta(\lambda)$ должно быть противоположным: с увеличением λ ОДЭ должна увеличиваться, а с уменьшением λ — уменьшаться. Как видно из рис. 1—3, эти очевидные следствия выражения (2) позволяют качественно объяснить общий вид экспериментальных кривых. Величина $\varphi(\lambda_0)$ для расчетных кривых второго типа бралась во втором квадранте. Расхождения между расчетными и экспериментальными зависимостями $\eta(\lambda)$ могут быть обусловлены рядом факторов: угловой расходимостью и некогерентностью реальных световых пучков, возможной дисперсией Δ , неоднородностью решеток по апертуре. Влияние этих факторов наиболее значительно при расчетных значениях $\eta \sim 100$ %. Выполненные нами на длине волны $\lambda = 0.63$ мкм измерения угловой зависимости ДЭ показали, что для ряда решеток вид этой зависимости¹ отличается от теоретически ожидаемых по [6]. Это ука-

¹ Результаты измерений угловых зависимостей предполагается рассмотреть в другой публикации.

зывало на отличие реальных периодических структур от идеальной модели [6], что также могло влиять на вид экспериментальных зависимостей $\eta(\lambda)$.

Полученные данные показывают, что относительно низкие значения ОДЭ при $\lambda=0.63$ мкм необязательно указывают на неэффективность использованного метода химической обработки, а могут быть связаны с достижением $\varphi > \pi/2$. Хорошим критерием перевала через $\varphi=\pi/2$ является спектральное поведение ОДЭ. Однако для практических применений существенна в конечном счете величина АДЭ, а не ОДЭ. Результаты измерений коэффициента светопропускания T для образцов с наибольшими значениями ОДЭ в ИК области спектра представлены на рис. 4. Видно, что самое высокое пропускание (70—90 %) имеют решетки, полученные по методу ЧВ, а наиболее низкое — отбеленные после проявления в концентрированном растворе ГП-2, причем величина T во всех случаях уменьшается с уменьшением длины волны. Поскольку поглощение света в AgJ существенно лишь при $\lambda < 0.5$ мкм [7], то наблюдаемое в рабочем спектральном диапазоне поведение $T(\lambda)$ для всех образцов определяется главным образом рассеянием света, обусловленным как зернистостью эмульсионного слоя, так и дефектами его поверхности [8]. Более высокое пропускание решеток, полученных методом ЧВ, с учетом известных результатов теории рассеяния [9] можно объяснить, как и в случае решеток на основе бихромированного желатина, меньшей разностью между локально средним показателем преломления и показателем преломления объемных микронеоднородностей. При этом, однако, может быть значительным вклад рассеяния на дефектах приповерхностного слоя, поскольку величина T , как и величина ДЭ, весьма критична к предистории фотоэмульсионного слоя и режиму его обработки. Из рис. 1—4 следует, что на пластинках ЛОИ-2 в диапазоне 0.8—0.9 мкм может быть достигнута достаточно высокая АДЭ (65—73 %) различными методами обработки, но в тех случаях, когда требования к уровню шума являются жесткими, предпочтительнее использовать метод Чанга—Виника.

Список литературы

- [1] Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., 1973. 686 с.
- [2] Кириллов Н. И. Высокорастворимые фотоматериалы для голографии и процессы их обработки. М., 1979. 136 с.
- [3] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. // Опт. и спектр. 1984. Т. 57. Вып. 4. С. 677—683.
- [4] Syms R. R. A., Solyman L. // Appl. Opt. 1983. Vol. 22. N 10. P. 1479—1496.
- [5] Chang B. J., Winick K. // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1980. Vol. 215. P. 172—177.
- [6] Kogelnik H. // Bell Syst. Techn. J. 1969. Vol. 48. N 9. P. 2909—2947.
- [7] Агеев Л. А., Милославский В. К., Шкляревский И. Н. // Опт. и спектр. 1971. Т. 31. Вып. 6. С. 1034—1036.
- [8] Чураев А. Л. // Тез. докл. V Всесоюз. коэфф. по голографии. Рига, 1985. Ч. I. С. 21—22.
- [9] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1973. 719 с.

Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина

Поступило в Редакцию
24 августа 1988 г.
В окончательной редакции
25 августа 1989 г.