

07;12

## Голографические спектроделители для УФ-области спектра

© В.С. Образцов, А.Г. Михайлова, В.И. Подоба

Федеральное государственное унитарное предприятие  
„Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптических  
приборов и систем“, Сосновый Бор Ленинградской области  
E-mail: onv@niiki.ru

Поступило в Редакцию 23 сентября 2003 г.

Теоретически и экспериментально проанализированы возможности использования нелинейной регистрации голографических зеркал для создания спектроделителя с пространственным разделением двух длин волн в спектральной области 290–330 nm.

Применение голографических оптических элементов (ГОЭ) позволяет уменьшить сложность оптических систем, значительно сократить их размеры и вес, что особенно важно для систем космического базирования [1]. Существенное повышение эффективности использования ГОЭ достигается при совмещении нескольких функций в одном элементе. Например, в приемных системах лидаров, регистрирующих сигнал рассеяния на нескольких длинах волн, громоздкая оптическая схема спектроделения может быть выполнена на основе одного многоцветного голографического зеркала (МГЗ). МГЗ представляет собой совокупность отражающих объемных фазовых решеток, сопряженных в одном слое и имеющих спектральный отклик на требуемых длинах волн. Для изготовления голографических зеркал используют в основном слои бихромированной желатины (БХЖ), на которых получают ГОЭ с высокой дифракционной эффективностью и хорошими эксплуатационными качествами. Широко распространенные технологии позволяют изготавливать на этих слоях зеркала со спектральным откликом на длинах волн не ниже 355 nm [2]. Однако многие применения лидаров требуют работы в более коротковолновой спектральной области 290–330 nm [3]. В ряде случаев, например в лидарах, работающих на принципе дифференциального поглощения [4], необходимо также решать сложную задачу пространственного разделения пучков на близких длинах волн. Как

показано в [5], при нелинейной регистрации отклик голографических зеркал в указанном спектральном диапазоне может быть получен на гармониках основного дифракционного максимума.

В данной работе теоретически и экспериментально проанализированы возможности использования нелинейной регистрации голографических зеркал для создания спектроделителя с пространственным разделением двух длин волн в спектральной области 290–330 nm.

Для исследований были выбраны незадубленные слои бихромированной желатины, изготовленные согласно [6]. Данные слои обладают более высокой чувствительностью по сравнению со слоями, изготовленными по другим известным методикам [2,7].

Перед экспонированием слои выдерживали в течение 1.0–1.5 h в атмосфере с относительной влажностью 5%. После экспонирования слои набухали в дистиллированной воде при температуре 14–15°C. Затем слои подвергали обезвоживанию в растворах изопропилового спирта с концентрациями от 50 до 100%. Окончательную сушку слоев производили в сушильном шкафу при температуре 100°C в течение часа.

Запись МГЗ производили во встречных пучках в иммерсионной кювете с зеркалом. В качестве иммерсионной жидкости использовали обезвоженный керосин. Для формирования гармоник в области 290–330 nm основной дифракционный максимум при нормальном падении светового пучка с учетом дисперсии показателя преломления желатины должен лежать в области 600–680 nm. Для этого угол падения параллельного пучка света лазерного излучения ( $\lambda = 515$  nm) на иммерсионную кювету варьировали в пределах от 18 до 41°. Данный диапазон углов был выбран с учетом того, что после обработки по указанной выше методике толщина слоя увеличивается в 1.12–1.17 раза. На основании расчетов по теории связанных волн [8] исходная толщина слоя была выбрана 23  $\mu\text{m}$  с целью получения спектрального отклика гармоник с полушириной порядка 2 nm.

При проведении теоретического анализа параметров голографических зеркал использовали аппроксимацию экспозиционной характеристики слоев в виде  $n(E) = n_0(1 - \exp(-E/E_0))$ , где  $n_0$  и  $E_0$  — параметры экспозиционной характеристики, соответствующие максимально достижимому размаху модуляции показателя преломления слоя на аппроксимируемом участке и величине энергии, при которой размах модуляции в  $1/(1 - \exp^{-1})$  раз меньше максимально достижимой

величины [9]. Параметры  $n_0$  и  $E_0$  определяли методом наименьших квадратов с использованием уравнений для амплитуд гармонических составляющих профиля модуляции показателя преломления [7]:

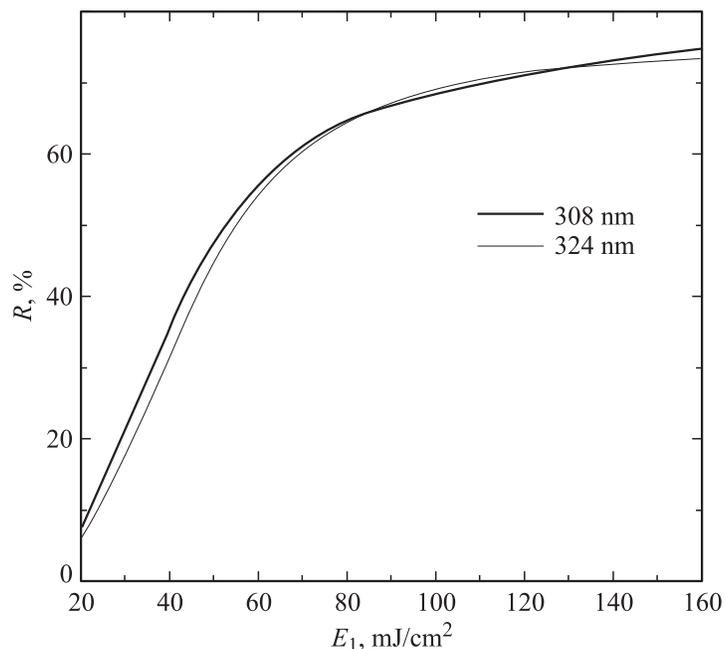
$$n_i(z) = n_0 \exp(-E/E_0(1+b))2I_i(z),$$

где  $i = 1, 2$  — порядки дифракции,  $b$  — отношение интенсивностей интерферирующих пучков, равное в нашем случае произведению коэффициента пропускания регистрирующего слоя и коэффициента отражения зеркала,  $z = 2\sqrt{b}E/E_0$ ,  $I_i(z)$  — модифицированная функция Бесселя  $i$  порядка. Значения амплитуд модуляции  $n_i(z)$  определяли по калибровочным графикам зависимости оптической плотности голографического зеркала от амплитуды модуляции показателя преломления. Калибровочные графики получали на основе формул Когельника для коэффициента пропускания объемной отражающей фазовой решетки с постоянным коэффициентом поглощения [8]. Коэффициент поглощения определяли по данным измерения плотности вне зоны дифракции. Определенные по данной методике значения параметров  $n_0$  и  $E_0$  были равны 0.176 и 167.4 мДж/см<sup>2</sup> соответственно.

Экспозиционную характеристику использовали для оценки условий получения отражающего голографического спектроделителя с максимально возможными значениями коэффициентов отражения для двух длин волн в спектральной области 290–330 нм. Расчет коэффициентов отражения проводили с помощью формул Когельника для дифракционной эффективности объемной отражающей фазовой решетки с постоянным коэффициентом поглощения [8]. При расчете зависимости амплитуд модуляций первых гармоник профиля показателя преломления от экспозиции при регистрации в слое БХЖ двух отражающих решеток использовали формулы работы [7].

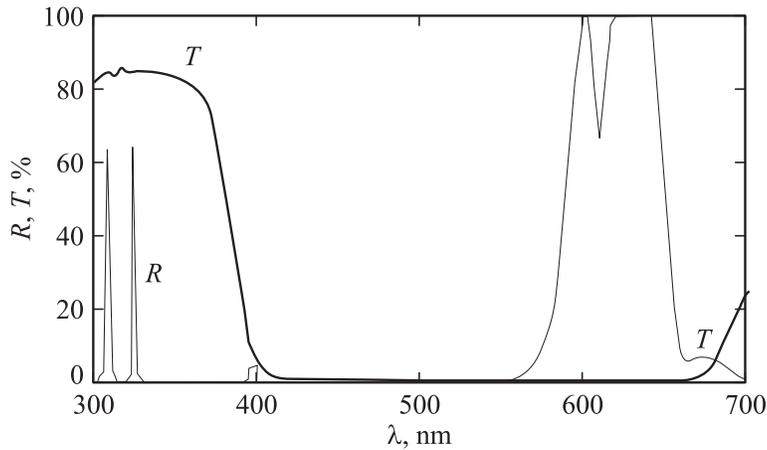
Расчеты показали, что на используемом слое возможно получение спектроделителя для двух длин волн с коэффициентами отражения до 80% (рис. 1).

Экспериментальные значения коэффициентов отражения двухдлинноволновых спектроделителей в спектральном диапазоне 290–330 нм не превышали 72%. График спектрального отражения спектроделителя с пространственным разделением длин волн 308 и 324 нм показан на рис. 2. Коэффициенты отражения  $R$  зеркал для обеих длин волн были равны 63%. Плотность энергии светового пучка на входе иммерсионной кюветы при записи первой и второй решеток была равна  $E_1 = 120$



**Рис. 1.** Расчетная зависимость коэффициентов отражения  $R$  спектроделителя для двух длин волн  $\lambda = 308$  и  $324$  nm от плотности энергии падающего пучка  $E_1$  при записи первой объемной отражающей решетки. (Отношение энергий экспонирования первой и второй объемных отражающих решеток  $k = 0.93$ . Отношение интенсивностей интерферирующих пучков  $b = 0.75$ . Экспериментальные данные для зависимости коэффициента поглощения проявленного слоя БХЖ от энергии экспонирования при расчете аппроксимировали соотношениями:  $\alpha_{308}(E) = 5.1 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-5}E - 8.5 \cdot 10^{-8}E^2$ ,  $\alpha_{324}(E) = 4.9 \cdot 10^{-3} + 2.7 \cdot 10^{-5}E - 8.5 \cdot 10^{-8}E^2$ ).

и  $E_2 = 180$  mJ/cm<sup>2</sup> соответственно ( $R = 71\%$  для обеих решеток при  $E_1 = E_2 = 120$  mJ/cm<sup>2</sup> согласно расчетам). Отраженные от спектроделителя пучки с  $\lambda = 308$  и  $\lambda = 324$  nm были пространственно разведены приблизительно на  $5^\circ$ . Спектральная полуширина обеих полос отражения не превышала 3 nm. Различие в экспериментальных и расчетных значениях плотности энергии экспонирования второй решетки связано с эффектом прерывистого экспонирования [10].



**Рис. 2.** Графики спектров отражения ( $R$ ) спектроделителя и пропускания ( $T$ ) фильтра УФС-5.

Поскольку для отражающих решеток углы высших порядков дифракции совпадают с углом первого порядка дифракции, возникает переналожение пучков спектральных диапазонов 600–680 и 290–330 нм. Этот недостаток легко устраняется при заклейке спектроделителя покровной пластиной из ультрафиолетового стекла УФС-5. Графики спектрального пропускания стеклянной пластины из УФС-5 толщиной 3 мм показаны на рис. 2.

Таким образом, разработана методика изготовления спектральных светоделителей на основе слоя бихромированной желатины, позволяющих разделять пучки двух длин волн в диапазоне 295–330 нм с высокой эффективностью (коэффициенты отражения для излучения на длинах волн 308 и 324 нм превышают 60%). Спектроделители также обеспечивают спектральную фильтрацию с полушириной полосы отражения менее 3 нм, что приемлемо для некоторых лидарных систем. Для изготовления таких спектроделителей можно использовать слои бихромированной желатины толщиной не более 25 мкм. Использование более толстых слоев усложняет процедуру химикофотографической обработки и не дает значительного выигрыша в значениях коэффициента отражения и спектральной полуширины.

## Список литературы

- [1] *Guerra D.V., Schwemmer G.K., Wooten A.D.* et al. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. N 22. P. 287.
- [2] *Crespo J., Pardo M., Satorre M.A.* et al. // Appl. Opt. 1993. V. 32. N 17. P. 3068–3072.
- [3] *Bisson S.E., Goldsmith J.E.M., Mitchell M.G.* // Appl. Opt. 1999. V. 38. N 9. P. 1841–1849.
- [4] *Ball D.J., Dudelzak A.E., Rheault F.* et al. // Proc. SPIE. 1998. V. 3494. P. 223–226.
- [5] *Kalyashova Z.N., Kalyashov T.V., Cheremisina G.A.* et al. // Proc. SPIE. 1997. V. 3011. P. 279–292.
- [6] *Каляшова З.Н., Кузилин Ю.Е., Михайлова А.Г.* // БИ. 1994. № 4. Патент РФ № 2008716.
- [7] *Blair L.T., Solymar L., Takacs J.* // Proc. SPIE. 1989. V. 1136. P. 12–19.
- [8] *Kogelnik H.* // Bell Syst. Tech. J. 1969. V. 48. N 9. P. 2909–2947.
- [9] *Стаселько Д.И., Чураев А.С.* // Опт. и спектр. 1984. Т. 57. № 4. С. 677–683.
- [10] *Nishida N., Sakaguchi M.* // Appl. Opt. 1971. V. 10. N 2. P. 439–440.