
ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

УДК 535.417

Ю. Ц. БАТОМУНКУЕВ, Н. А. МЕЩЕРЯКОВ

ВНЕОСЕВЫЕ ОБЪЕМНЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Рассмотрены особенности записи внеосевого объемного голограммного оптического элемента (ГОЭ), используемого в качестве однокомпонентного объектива для ближней инфракрасной области спектра. Экспериментально показано, что средние волновые aberrации опорной и объектной волн, возникающие на стадии записи ГОЭ, меньше длины волны лазера более чем на порядок. Измеренные значения поперечной aberrации внеосевого объемного ГОЭ близки к расчетным, повышение его отношения сигнал/шум позволяет увеличить дальность обнаружения источников инфракрасного излучения.

Ключевые слова: голограммный оптический элемент, инфракрасный диапазон спектра.

В последнее время интенсивно развиваются методы определения пространственного расположения лазерных источников инфракрасного (ИК) излучения. Одной из основных трудностей реализации этих методов является повышение отношения сигнал/шум. Стекло-вые линзы, используемые для фокусировки детектируемого лазерного излучения, пропускают широкий спектр излучения, и для выделения из этого спектра лазерного излучения с требуемой длиной волны необходимы дополнительные узкополосные спектральный и пространственный фильтры. На практике их применение приводит к относительно низкому уровню сигнал/шум и к ограничению расстояния, с которого может быть определено местоположение источника ИК-излучения [1].

В работе [2] в качестве монохроматического объектива инфракрасного излучения был предложен осевой объемный голограммный оптический элемент (ГОЭ) — фокусатор, представляющий собой голограмму объемной зонной пластины Френеля, зарегистрированную в светочувствительном материале реоксан [3]. Известно, что такой голограммный элемент может быть представлен как совокупность локальных объемных решеток, обладающих спектральной и угловой селективностью [4].

Расположение источников опорной и объектной волн при записи (а) и восстановлении (б) осевого объемного ГОЭ в [2] представлено на рис. 1 (z_r , z_o , z_i — координаты источников

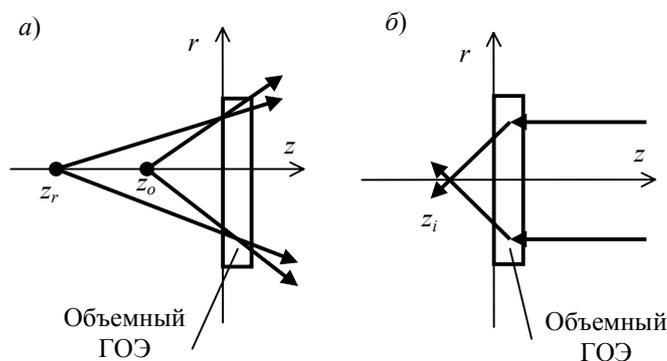


Рис. 1

опорной, объектной и восстановленной волны соответственно). Длина волны записи (0,514 мкм) существенно отличалась от рабочей длины (1,06 мкм). Особенностью записанного ГОЭ было восстановление плоской волны, направленной противоположно записывающим волнам.

Недостатками осевого объемного ГОЭ являются наличие недифрагировавшего излучения (нулевой порядок дифракции) и низкая спектральная селективность центральной части ГОЭ, что создает фоновую засветку при регистрации сигнала от ИК-источника и снижает отношение сигнал/шум. Увеличение отношения сигнал/шум может быть достигнуто путем применения внеосевых объемных ГОЭ, которые одновременно выполняют функции фокусирующей линзы, отклоняющего зеркала, спектрального, углового и пространственного фильтров [4].

На рис. 2 представлена схема записи (а) и восстановления (б) пропускающего внеосевого объемного ГОЭ (P_r, P_o, P_i — источники опорной, объектной и восстановленной волн; d_r, d_o, d_i — соответственно расстояния от них до ГОЭ). В нем отсутствуют отмеченные недостатки, присущие осевому объемному ГОЭ, так как точка фокусировки P_i восстановленной волны пространственно расположена вне недифрагировавшей волны. Внеосевой объемный ГОЭ обладает высокой спектральной, угловой и пространственной селективностью, что обеспечивает возможность пространственной и спектральной локализации источников фонового излучения.

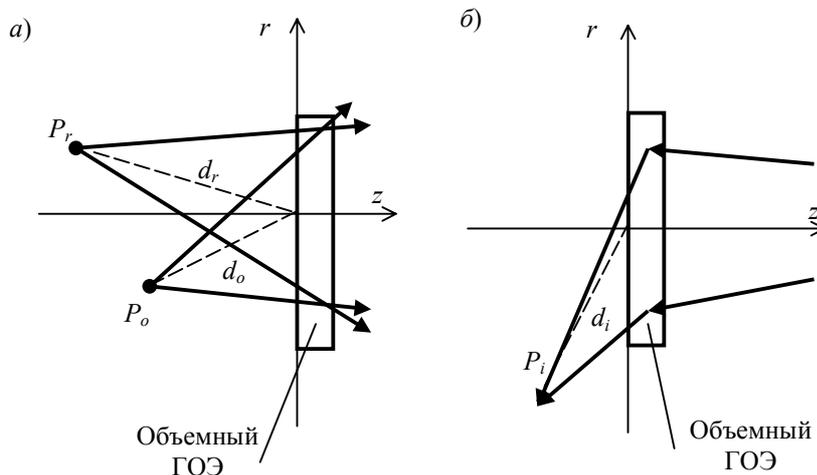


Рис. 2

Отношение сигнал/шум внеосевого объемного ГОЭ определяется слабым фоновым светом, возникающим из-за отражения излучения от корпуса и оправ объектива, рассеяния на пыли и неоднородностях воздуха. Так как практический интерес представляет регистрация очень слабых сигналов от ИК-источников, необходимо учитывать шум, возникающий при дифракции фонового рассеянного света на самом ГОЭ. Одной из причин рассеяния служит появление в объеме ГОЭ в процессе его изготовления паразитных решеток. В работе [5] предложен способ контроля дифракционной эффективности паразитных решеток непосредственно в процессе изготовления ГОЭ.

На рис. 3 представлены характерные графики роста дифракционной эффективности η_n паразитных „шумовых“ решеток (кривая 1, эксперимент) и дифракционной эффективности этих решеток (кривая 2, расчет), рассчитанной по формуле

$$\eta_n = 1 - \frac{i_o I_o + i_r I_r}{I_o + I_r},$$

где i_o — относительная интенсивность объектной волны, I_o — начальная интенсивность объектной волны, i_r — относительная интенсивность опорной волны, I_r — начальная интенсивность опорной волны. Под относительной интенсивностью подразумевается отношение интенсивности волны к начальному значению.

На рис. 4 представлен график величины рассогласования α интерференционной картины и регистрируемой в объеме полимерных сред типа реоксан дифракционной структуры, рассчитанной по формуле [5]

$$\alpha = \arcsin \frac{i_o I_o I_r - i_r I_o I_r - \eta I_r^2 + \eta I_o^2}{2 \{ \eta I_o I_r (I_o + I_r) [i_o I_o + i_r I_r - \eta (I_o + I_r)] \}^{1/2}},$$

где η — дифракционная эффективность объемного ГОЭ. Величина рассогласования α зависит от изменения наклона и дополнительного искривления интерференционных полос, сдвига и изменения их периода. Экспериментально получено, что средняя величина рассогласования α много меньше 180° , что позволяет прийти к выводу о том, что возникающие в процессе записи волновые aberrации опорной и объектной волн существенно меньше длины волны и после первой минуты записи не превышают одной десятой длины волны лазера. Это подтверждается известным фактом, что сдвиг максимума угловой селективности существенно меньше угла селективности. Величина рассогласования α также может служить критерием оценки имеющих место фото- и термоиндуцированных волновых aberrаций в процессе записи.

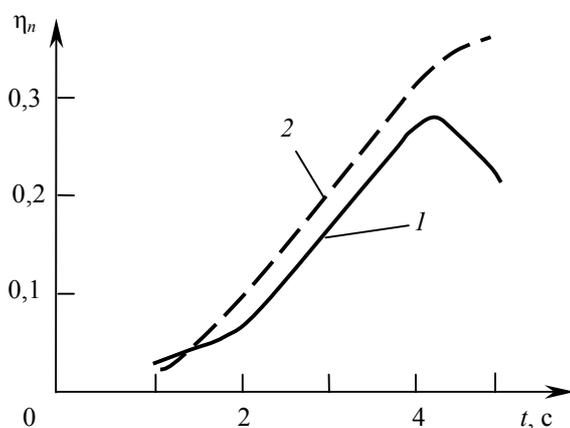


Рис. 3

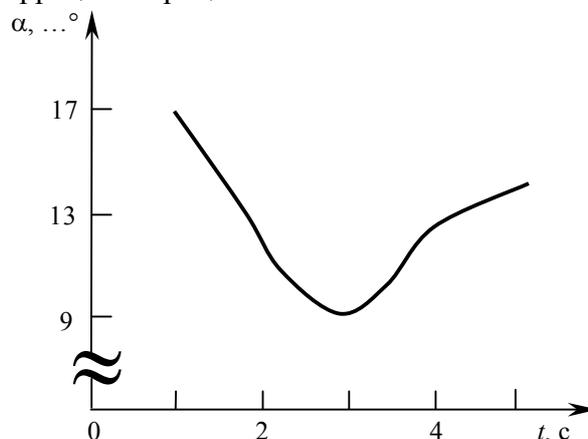


Рис. 4

Расчет схемы записи внеосевого объемного ГОЭ был выполнен в приближении зеркально-линзовой модели [6, 7], в соответствии с которой ГОЭ может быть представлен в виде тонкой линзы (тонкого ГОЭ) и сферического зеркала. Координаты источников схемы записи определялись из выполнения в меридиональной и сагиттальной плоскости условий дифракции Брэгга и формулы объемного ГОЭ

$$\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} = \frac{1/d_1 + 1/d_2}{Q} = \frac{1}{F},$$

где d_1 и d_2 — расстояние от центра объемного ГОЭ до предмета и изображения соответственно, F — фокусное расстояние объемного ГОЭ, Q — параметр, равный отношению фокусных расстояний объемного ГОЭ к сферическому зеркалу [6]. В расчетах также учитывалось условие отсутствия сферической aberrации на рабочей длине волны. Остаточные aberrации объемного ГОЭ могут быть определены как сумма aberrаций тонкой линзы и сферического зеркала [6, 7].

Стандартная схема записи внеосевого ГОЭ сферическими волнами представлена на рис. 5, она включает в себя лазер 1, микрообъектив с микродиафрагмой 2, объективы 3, полупрозрачное зеркало 4, отражающие зеркала 5, механический затвор 6, объемный ГОЭ 7, фотодиоды (типа ФД-7К) 8, миллиамперметры 9. Полупрозрачное зеркало, отражающие зеркала и голографическая среда объемного ГОЭ устанавливались по схеме интерферометра Маха—Цендера. Угол между осями падающих на среду сферических волн измерялся теодолитом. Голографическая среда закреплялась в оправе на вращающемся основании, позволяющем

устанавливать различные относительные углы падения волн на среду. Значения интенсивности прошедших среду волн регистрировались с помощью фотодиодов ФД-7К и миллиамперметров. Все элементы схемы, за исключением миллиамперметров, закреплялись на жестком стальном основании. В качестве светочувствительной среды использовалась голографическая среда типа реоксан [3, 8]. Среда типа реоксан [8, 9] была разработана в ГОИ им. С. И. Вавилова на основе полиметилметакрилата введением в него различных светочувствительных красителей. Известно, что эти голографические среды прозрачны в ближней инфракрасной области спектра. Длина волны аргонового лазера составляла 0,514 мкм. Экспозиция превышала 2,5 Дж/см² (по прошедшим пучкам). Для измерения дифракционной эффективности одна из падающих на среду волн перекрывалась механическим затвором. Диаметр ГОЭ составлял 20 мм и был ограничен мощностью используемого лазера. Расчетное значение поперечной aberrации ГОЭ на рабочей длине волны 1,06 мкм составляло 0,15 мм. Измеренное значение поперечной aberrации на рабочей длине волны было равно 0,2 мм. Дифракционная эффективность записанных ГОЭ на рабочей длине волны превышала 50 %.

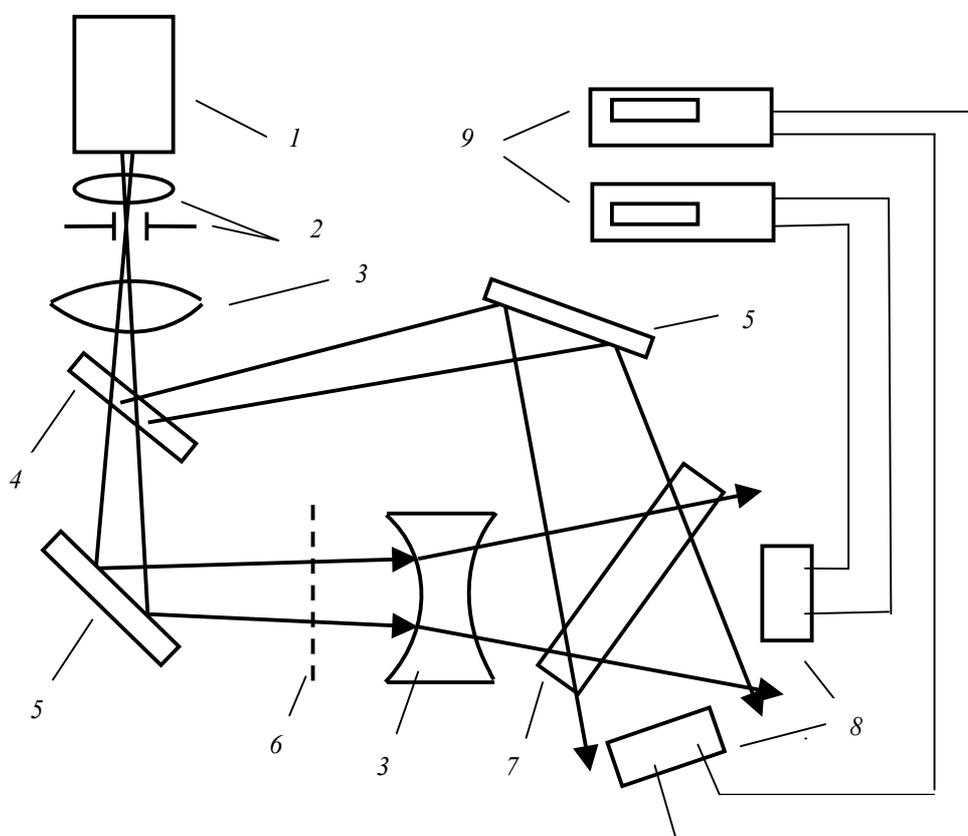


Рис. 5

Таким образом, внеосевые объемные ГОЭ являются перспективными оптическими элементами для ближнего ИК-диапазона спектра, особенно если иметь в виду, что в настоящее время разработаны объемные голографические среды с повышенной стабильностью [10, 11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Южик И. Б., Малинин В. В., Попов Г. Н. Приборы для обнаружения и подавления оптических и оптико-электронных средств // Сб. мат. IV Междунар. науч. конгр. „ГЕО-СИБИРЬ-2008“. Новосибирск, 2008. Т. 4, ч. 1. С. 148—152.
2. Батомункуев Ю. Ц., Сандер Е. А., Шойдин С. А. Аберрации объемных голограмм // Тез. Всесоюз. семинара „Автоматизация проектирования оптических систем“. М., 1989. С. 101—112.

3. Суханов В. И., Лашков Г. И., Петников А. Е., Ащеулов Ю. В., Резникова И. И., Черкасов А. С. Запись фазовых голограмм на органическом полимерном материале с дисперсией, изменяющейся вследствие триплет-сенситивированных процессов // Оптическая голография. Л.: Наука, 1979. С. 24—42.
4. Ган М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1984. 144 с.
5. Батомункуев Ю. Ц., Мецержаков Н. А. Метод измерения отношения сигнала к шуму рассеяния голографического оптического элемента из реоксана // Автометрия. 2003. № 2. С. 30—35.
6. Батомункуев Ю. Ц. Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизотропной усадкой // Автометрия. 2002. № 2. С. 108—114.
7. Корешев С. Н., Ратушный В. П. Полифункциональность рельефно-фазовых отражательных голограммных оптических элементов // Оптич. журн. 2001. № 12. С. 28—32.
8. Вениаминов А. В., Bartsch E., Понов А. П. Постэкспозиционное развитие фотоиндуцированной решетки в полимерном материале с фенантренхином // Опт. и спектр. 2005. Т. 99, № 5. С. 776—782.
9. Андреева О.В., Бандюк О.В., Парамонов А.А., Черкасов А.С., Гаврилюк Е.Р., Андреев П.В. Объемные пропускающие голограммы в полимерной среде с фенантренхином // Оптич. журн. 2000. № 12. С. 27—33.
10. Sazonov Yu. A., Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Gerasimova T. N. Photopolymer material for recording reflection holograms by He-Ne and Kr lasers // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4149. P. 100—106.
11. Щеулин А. С., Вениаминов А. В., Корзинин Ю. Л., Ангервакс А. Е., Рыскин А. И. Высокостабильная голографическая среда на основе кристаллов $\text{CaF}_2 : \text{Na}$ с коллоидными центрами окраски. III. Свойства голограмм // Опт. и спектр. 2007. Т. 103, № 4. С. 668—672.

Сведения об авторах

Юрий Цыдытович Батомункуев

— канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск;
E-mail: opttechnic@mail.ru

Николай Анатольевич Мецержаков

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра метрологии, стандартизации и сертификации, Новосибирск; E-mail: opttechnic@mail.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.