

### 34. Формирование и свойства трехмерных объектов — объектов произвольной формы, структурированных элементов и голографических изображений

*Н. Д. Ворзובה, П. П. Соколов*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы дифракционные свойства структурированных голографических элементов, применительно к задачам солнечной энергетики и фотоники. Рассмотрен новый метод голографической 3D печати для получения объектов с произвольной трехмерной формой поверхности, исследованы факторы, определяющие характеристики проектируемых голографических изображений, требования к условиям получения и свойства трехмерных объектов.

*Ключевые слова:* голография, голографическая 3D-печать, периодические структуры, дифракционная эффективность, угловая селективность.

*Цитирование:* **Ворзובה, Н. Д.** Формирование и свойства трехмерных объектов — объектов произвольной формы, структурированных элементов и голографических изображений / Н. Д. Ворзובה, П. П. Соколов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 180–183.

Работа посвящена исследованию процессов формирования и свойств трехмерных объектов — периодических структур и элементов на их основе, а также элементов с произвольной трехмерной формой поверхности применительно к актуальным практическим задачам.

Одной из таких задач является задача получения дифракционных элементов солнечных концентраторов. Основным требованием к элементам является сочетание высоких дифракционных свойств с широким диапазоном углов падения излучения. Особенностью данной работы является исследование дифракционных и селективных свойств структурированных элементов при падении излучения в трехмерном пространстве. Структуры записывались в попутных пучках в фотополимерных материалах Bayfol NX и акрилатных композициях [1]. Условия записи оптимизировались для получения максимальной дифракционной эффективности. Для объемных решеток, выявлен ряд новых закономерностей и свойств (рисунок 1а). Установлено, что при падении излучения в брэгговской плоскости, максимальные значения ДЭ (80 %) сохраняются в широком диапазоне углов падения — до 40°. Установлено, также, что в решетке существуют направления распространения излучения, отличные от классического брэгговского направления (очень «косое» прохождение через решетку), при которых дифракционная эффективность достигает максимальных значений (более 80 %). При этом контур угловой селективности остается достаточно широким. Этот результат является важным и решает проблему использования солнечного излучения при больших углах падения (более 70°).

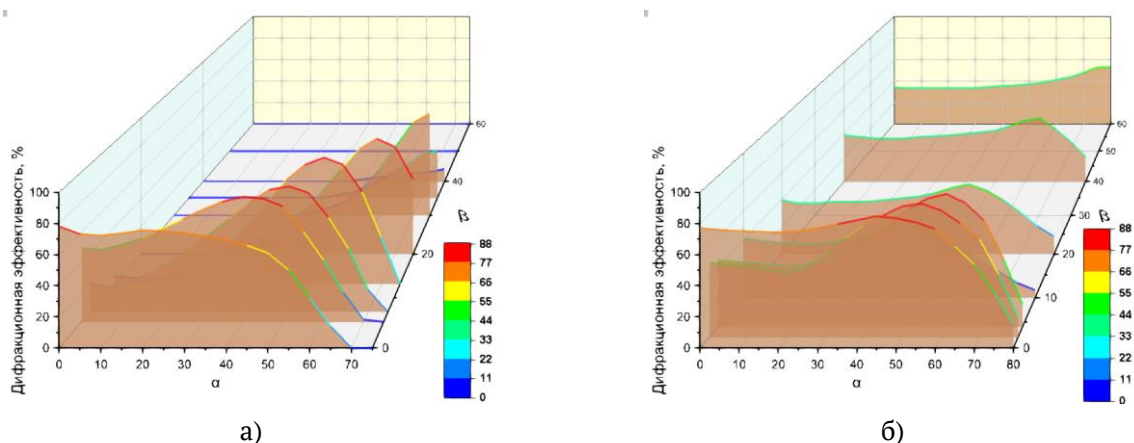


Рис. 1 Сравнение дифракционных свойств объемных (а) и гибридных (б) структур

Наряду со свойствами объемных решеток, в работе исследованы свойства гибридных структур — объемных решеток с модуляцией показателя преломления, на поверхности которых формируются рельефные решетки. Выявлены диапазоны углов падения излучения, в которых проявляются свойства объемной и рельефной составляющих составляющей гибридной структуры. На трехмерных графиках (рисунок 1) можно видеть направления прохождения излучения через объемные и гибридные структуры — значения углов  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых значения дифракционной эффективности максимальны. Видно также преимущество гибридных структур, обеспечивающих достаточно высокие значения дифракционной эффективности в большем диапазоне углов по сравнению с объемными структурами. Применительно к задаче получения дифракционных дефлекторов солнечных концентраторов это означает, что структуры обеспечивают высокие дифракционные свойства не только при движении солнца в течение дня (угол  $\alpha$ ), но и при изменении его высоты над горизонтом (угол  $\beta$ ) в течение года.

Полученные результаты определяют возможность существенного расширения углового диапазона при высоких дифракционных характеристиках по сравнению с существующими решениями [2–6].

Второй задачей являлось исследование возможности получения дифракционных управляемых расщепителей световых пучков, обеспечивающих сочетание высокой дифракционной эффективности с угловой селективностью, позволяющей изменять интенсивности излучения в каналах при повороте элемента без предъявления высоких требований к точности угловых перемещений. Для получения расщепителей использовались промышленные фотополимеры Вауfol НХ и техника интерференционного копирования структур эталонов — двумерных решеток, полученных в промышленных галогенсеребряных материалах ПФГ-03М при последовательной записи. При оптимизации экспозиционных параметров в фотополимерах Вауfol НХ получены двух- и пятиканальные управляемые расщепители. Возможные применения элементов — техника физического эксперимента, защитные технологии, системы передачи информации.

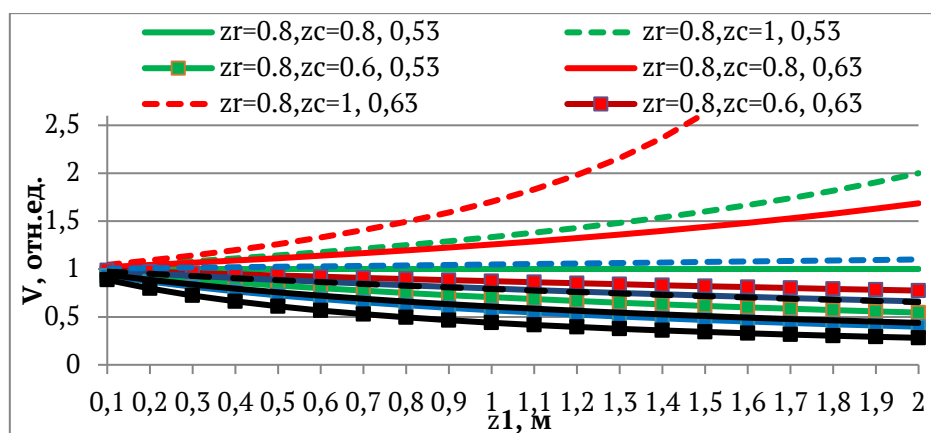


Рис. 2. Влияние длин волн и геометрических параметров схем записи проектирующей голограммы и восстановления изображений на размерные характеристики трехмерных объектов

Третьей задачей являлось исследование нового голографического метода получения трехмерных объектов произвольной трехмерной конфигурации. Метод заключается в проекции голографического изображения формируемого объекта в объем фотополимеризующего материала и полимеризации в области резкого изображения при ограничении полимеризации вне области наибольшей резкости. Преимуществом метода, относительно аддитивных технологий 3D печати является исключение последовательного синтеза трехмерного объекта — весь объект формируется в результате однократного экспонирования материала. В предыдущих работах [7] была показана принципиальная возможность реализации метода и получения элементов с трехмерной формой поверхности, соответствующей форме поверхности исходных объектов. Однако, метод практически не исследован. Задачей данной работы являлось выявление и исследование факторов, определяющих требования к условиям записи и свойства трехмерных объектов.

На основании зависимости, устанавливающей связь материальных и экспозиционных параметров построены графики, позволяющие определить требования к создаваемому поглощению формирующего излучения в объеме материала с целью ограничения полимеризации вне области наибольшей резкости проектируемого изображения, длительности экспонирования, локализации проектируемого изображения и глубине профиля формируемого трехмерного объекта.

Требования к условиям записи проектирующих голограмм, а также размерные характеристики трехмерных объектов определялись с использованием зависимости поперечного увеличения восстановленного изображения  $V$  от расстояния до объекта  $z_1$  для различных отношений длин волн записывающего и восстанавливающего излучений  $\mu$  и геометрических параметров схемы записи голограммы  $z_k$  и схемы проекции  $z_c$ .

На рисунке 2 можно видеть, в частности, что наибольшие изменения в размерах (в плоскости и по глубине изображения) наблюдаются при увеличении длины волны восстанавливающего излучения относительно длины волны записи проектирующей голограммы

(0,53 мкм), а также при уменьшении расстояния до опорного источника. Для длины волны формирующего излучения в УФ-области спектра (благоприятной с точки зрения спектральной чувствительности перспективных фотополимерных материалов и реализации метода в незатемненных помещениях) возможно уменьшение размеров проектируемых изображений при малых размерных трансформациях по глубине.

Полученные зависимости позволяют определить требования к длине волны формирующего излучения, геометрическим параметрам схемы записи проектирующей голограммы и схемы получения трехмерного объекта, а также глубине объекта (при заданных допусках на размеры). Метод может являться альтернативой аддитивных технологий 3D печати и использоваться в ряде областей техники, медицине, технологиях защищенной печати, изобразительной графике.

### Список источников

- [1] **Burunkova, Yu. E.** Nanomodified optical acrylate composites / Yu. E. Burunkova, S. A. Semina, L. N. Kaporski, and V. V. Levichev // *J. Opt. Technol.* — 2008. — Vol. 75. — P. 653–657.
- [2] **Akbari, H.** Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications / H. Akbari, I. Naydenova, and S. Martin // *Appl. Optics.* — 2014. — Vol. 53. — № 7. — P. 1343–1353.
- [3] **De Jong, T. M.** Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators / T. M. de Jong, D. K. G. de Boer, and C. W. M. Bastiaansen // *Optics Express.* — 2011. — Vol. 19. — № 16. — P. 15127–142.
- [4] **Marín-Sáez, J.** Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications / J. Marín-Sáez, J. Atencia, D. Chemisana, M.-V. Collados // *Optic Express.* — 2016. — Vol. 24. — № 6. — P. 720–730.
- [5] **Pratheep, H. R.** A review of holographic optical elements in solar concentrator applications / H. R. Pratheep A. Balamurugan // *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology.* — 2018. — Vol. 4 — № 3. — P. 214–222.
- [6] **Ferrara, M. A.** Volume Holographic Optical Elements as Solar Concentrators: An Overview / M. A. Ferrara, V. Striano, G. Coppola // *Appl. Sci.* — 2019. — Vol. 9. — P. 193.
- [7] **Vorzobova, N. D.** Formation of 3D Structures in a Volumetric Photocurable Material via a Holographic Method / N. D. Vorzobova, V. G. Bulgakova, and V. O. Veselov // *Optics and Spectroscopy.* — 2015. — Vol. 119. — № 6. — P. 1034–1037.