Синтез плоских дифракционных элементов для формирования барельефных 3D-изображений

А.А. Гончарский [1], С.Р. Дурлевич [1]
[1] Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, 119234, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д.1, стр.4

Аннотация

Статья посвящена синтезу элементов плоской оптики для формирования эффекта смены двух барельефных 3D изображений, который включает расчет фазовой функции и прецизионное формирование микрорельефа дифракционного элемента. Оптический элемент разбивается на элементарные области, размер которых не превышает 50 микрон. Расчет микрорельефа в каждой элементарной области базируется на картах высот, полученных из компьютерных 3D моделей формируемых изображений. Для формирования микрорельефа используется электронно-лучевая технология. Точность изготовления многоградационного микрорельефа по глубине составляет 10 нм. При освещении оптического элемента белым светом при наклоне элемента вверх-вниз наблюдатель видит эффект смены двух трехмерных изображений. Кадры видео, отснятые с изготовленного оптического элемента, демонстрируют высокую эффективность разработанного метода синтеза. Разработанные плоские оптические элементы, тиражируемые с помощью стандартного оборудования для массового производства защитных голограмм, могут быть использованы для защиты банкнот, паспортов, ценных бумаг.

Ключевые слова: компьютерная оптика, дифракционная оптика, оптические защитные элементы, трехмерные изображения, электронно-лучевая литография.

Цитирование: **Гончарский, А.А.** Синтез плоских дифракционных элементов для формирования барельефных 3D-изображений / А.А. Гончарский, С.Р. Дурлевич // Компьютерная оптика. – 2026. – Т. 50, № 5. – 1878. – doi: 10.18287/COJ1878.

Citation: Goncharsky AA, Durlevich SR. Synthesis of Flat Diffractive Elements for 3D-Bas-Relief Images Formation. Computer Optics 2026; 50(5): 1878. doi: 10.18287/COJ1878.

Введение

Статья посвящена решению задач синтеза плоской оптики для формирования 3D-изображений. Для решения этой задачи используются как аналоговые технологии, так и компьютерно-синтезированные голограммы. В работах Яноша Габора [1] и его последователей [2 – 4] были разработаны методы аналогового синтеза для формирования 3D-изображений. Несмотря на заслуженную международную оценку, аналоговые методы записи элементов плоской оптики по масштабам применения уступают цифровым голограммам, где удалось разработать технологии массового тиражирования оптических элементов [5].

В настоящее время подавляющее количество стран используют плоские компьютерно-синтезированные оптические элементы для защиты от подделки паспортов, банкнот, ценных бумаг, ID, акцизных марок и т. п. Тиражи защитных элементов в таких проектах исчисляются миллиардами [6]. Интересно отметить, что оригинал первой защитной голограммы для защиты банкнот от подделки был изготовлен в восьмидесятых годах прошлого столетия по электронно-лучевой технологии фирмой Csiro [7]. Прорывные результаты в области разработки компьютерно-синтезированных защитных оптических элементов по электронно-лучевой технологии были получены в течение последних 20 лет [8]. Электронно-лучевая технология позволяет формировать микрорельеф с точностью порядка 10 нм по глубине [9]. Изготовленные по электронно-лучевой технологии элементы могут быть тиражированы и могут формировать как двумерные, так и трёхмерные изображения при освещении элемента белым светом [10, 11].

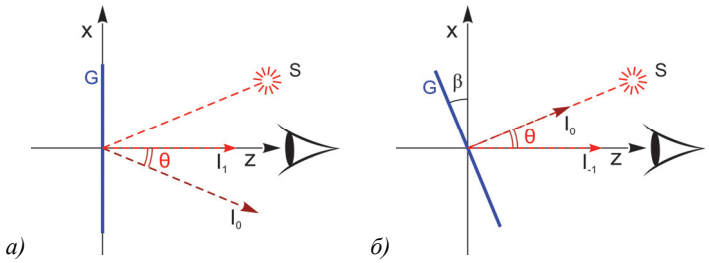
В работе [12] был синтезирован плоский оптический элемент, который при освещении его белым светом формировал монохроматическое 3D-изображение игральных костей. Для того чтобы сформировать такой визуальный 3D-образ, область оптического элемента разбивалась на элементарные области размером менее 100 мкм. Используя 3D-модель объекта, в заданных точках наблюдения на первом этапе синтеза были рассчитаны диаграммы направленности рассеянного света для каждой элементарной области. На втором этапе по заданной диаграмме направленности для каждой элементарной области рассчитывался микрорельеф. Расчёт проводился при заданном положении источника света и точки наблюдения. С математической точки зрения вторая задача состоит в решении нелинейного интегрального уравнения Фредгольма первого рода. Трехмерное изображение рассчитывалось в окрестности первого порядка дифракции. Задача расчёта микрорельефа оптического элемента для формирования 3D-изображения в окрестности нулевого порядка является более сложной.

В работе [13] были разработаны методы синтеза плоского оптического элемента для формирования 3D-изображения в окрестности нулевого порядка. Особенностью решения этой задачи синтеза является то, что объёмный визуальный эффект сохраняется видимым наблюдателю даже при повороте оптического элемента на 360 градусов. Рассчитанный микрорельеф является многоградационным. Точность изготовления микрорельефа составляет 10 нм по его глубине. Приведённое в статье [13] видео демонстрирует высокие возможности разработанных методов синтеза.

В настоящей работе предложен другой метод решения задачи синтеза плоского оптического элемента для формирования 3D-изображений. Разработанный в статье метод решения обратной задачи синтеза позволяет решать более сложную задачу, а именно эффект смены двух 3D-барельефных изображений при наклоне элемента. Приведённое видео [14], заснятое с изготовленного оптического элемента, демонстрирует высокую эффективность предложенных решений.

1. Постановка обратной задачи синтеза и методы ее решения

Рассматривается задача синтеза оптического элемента, когда при наклоне элемента наблюдатель видит эффект смены двух барельефных изображений. На рис. 1 приведены оптические схемы наблюдения визуальных изображений. Свет от точечного источника S рассеивается оптическим элементом G, трехмерные изображения формируются с разных сторон относительно нулевого порядка дифракции. На рис. 1*а* изображение формируется выше нулевого порядка дифракции, а на рис. 1*б* изображение формируется ниже нулевого порядка дифракции.



а) *б)*

Рис. 1. Оптические схемы наблюдения трехмерного эффекта: (а) для первого изображения, (б) для второго изображения

Здесь θ — угол дифракции, β — угол наклона оптического элемента в вертикальной плоскости относительно направления на глаз наблюдателя, вектора $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_0$, $\mathbf{I}_{-1}$ обозначают направления на первый, нулевой и минус первый порядок дифракции соответственно.

Наилучшее качество изображений достигается при использовании монохроматического света. Тем не менее разработанный метод синтеза позволяет формировать эффект смены трехмерных изображений даже при использовании источника с белым спектром. Особенностью настоящей работы является использование барельефных структур, для которых, как показано в настоящей статье, вполне применимо использование протяженных источников с немонохроматическим светом.

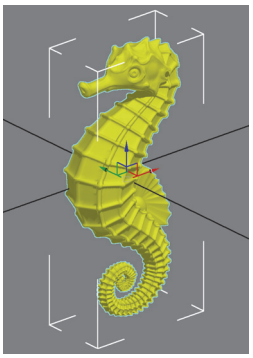


Рис. 2. Исходная компьютерная 3D-модель морского конька

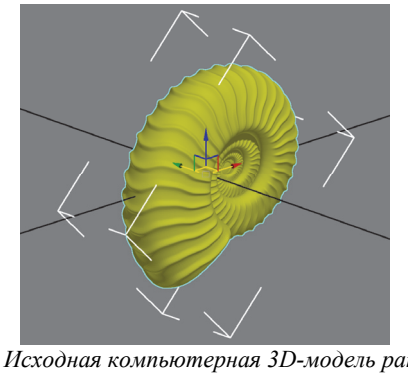


Рис. 3. Исходная компьютерная 3D-модель раковины

Процесс синтеза 3D-изображений с барельефными структурами начинается с выбора и подготовки 3D-моделей. Для первого изображения использована 3D-модель «морского конька», приведенная на рис. 2. На рис. 3 приведена 3D-модель «ракушки», которая будет использована для формирования второго 3D-изображения, участвующего в эффекте смены изображений. Следующим этапом является формирование барельефных изображений. На рис. 4 приведено барельефное изображение морского конька, на рис. 5 приведена карта высот, соответствующая барельефу на рис. 4. Яркость в каждой точке рис. 5 пропорциональна высоте рельефа.

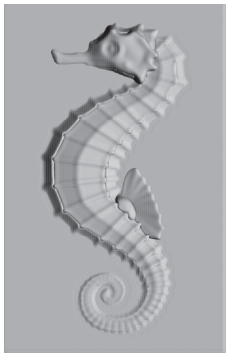


Рис. 4. Барельефное изображение морского конька



Рис. 5. Карта высот барельефного изображения морского конька

Аналогично для второго изображения на рис. 6 приведены барельефные изображения двух ракушек, на рис. 7 приведена карта высот, соответствующая барельефу на рис. 6. Яркость в каждой точке рис. 7 пропорциональна высоте рельефа.

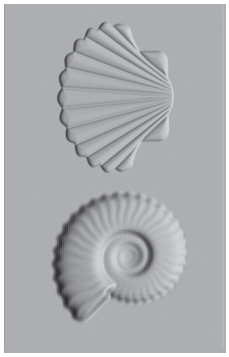


Рис. 6. Барельефное изображение ракушек

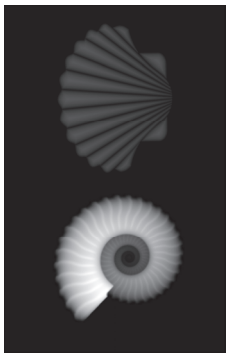


Рис. 7. Карта высот барельефного изображения ракушек

Диапазон изменения карты высот на рис. 5 и рис. 7 составляет от 0 до 1,5 мм. В случае синтеза одного барельефного изображения, карта высот которого задана функцией $h(x, y)$, фазовая функция оптического элемента определяется по формуле: $\Phi(x, y) = 2\pi \cdot h(x, y)/\lambda$ [15, 16]. Здесь λ – длина волны излучения. Глубина микрорельефа d отражающего оптического элемента в точках (x, y) определяется через фазовую функцию по формуле $d(x, y) = \lambda/2 \cdot \Phi(x, y)/2\pi$ [15]. В нашем случае, чтобы наблюдать два отдельных барельефных изображения, к фазовой функции $\Phi(x, y)$ добавляется слагаемое в виде наклонной плоскости, которая отклоняет базовый угол наблюдения барельефа в одну или другую сторону от нулевого порядка дифракции на угол θ. Таким образом, для фазовой функции Φ_1, формирующей изображение первого барельефа, имеем $\Phi_1(x, y) = 2\pi \cdot (h_1(x, y) + y \sin\theta)/\lambda$, а для второго барельефа $\Phi_2(x, y) = 2\pi \cdot (h_2(x, y) - y \sin\theta)/\lambda$. Здесь $h_1(x, y)$ и $h_2(x, y)$ — карты высот первого и второго барельефного изображения соответственно.

2. Расчет микрорельефа оптического элемента для формирования эффекта смены барельефных изображений

Для формирования микрорельефа дифракционного оптического элемента G область последнего разбивается на элементарные области G_{ij}, где $i = 1, \ldots N, j = 1, \ldots M$ размером, не превышающим 50 микрон. Пример разбиения области G приведен на рис. 8. Элементарные области, для которых $i+j$ четно, формируют первое 3D-изображение, а для которых $i+j$ нечетно – второе.

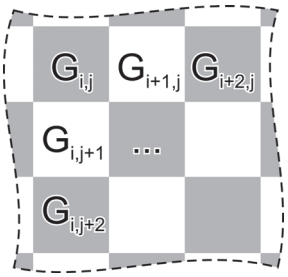


Рис. 8. Разбиение области оптического элемента G на элементарные области G_{ij}

Небольшая модификация структуры микрорельефа позволяет сформировать дополнительное цветное изображение при больших углах дифракции. Вариант такого разбиения приведен на рис. 9. Формирование дополнительного цветного изображения при больших углах дифракции осуществляется с помощью дифракционных решеток разного периода и разного направления. Решетки расположены в областях, помеченных темно-синим цветом на рис. 9.

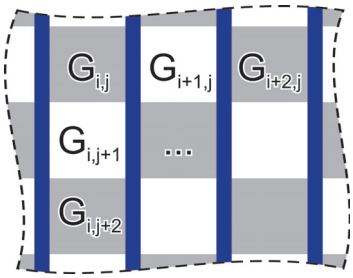


Рис. 9. Разбиение области оптического элемента G на элементарные области G_{ij} с дополнительными участками (показаны темно-синим цветом) для формирования дополнительного двумерного изображения видимого при больших углах дифракции

Схема наблюдения дополнительного двумерного изображения приведена на рис. 10.

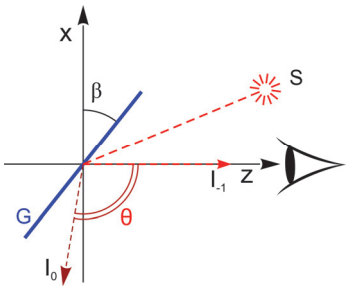


Рис. 10. Оптическая схема наблюдения дополнительного двумерного изображения

Углы дифракции θ, при которых можно наблюдать двумерное изображение при освещении оптического элемента белым светом, находятся в диапазоне от 55 до 130 градусов.

Рассматриваемая в статье задача синтеза плоского оптического элемента для формирования трехмерных изображений с математической точки зрения сводится к расчету фазовой функции оптического элемента, которая полностью определяет его дифракционные свойства. Задача заключается в том, чтобы фазовая функция оптического элемента совпадала с фазовой функцией смоделированного выше барельефа. На рис. 11 приведен фрагмент микрорельефа оптического элемента, структура которого приведена на рис. 9.

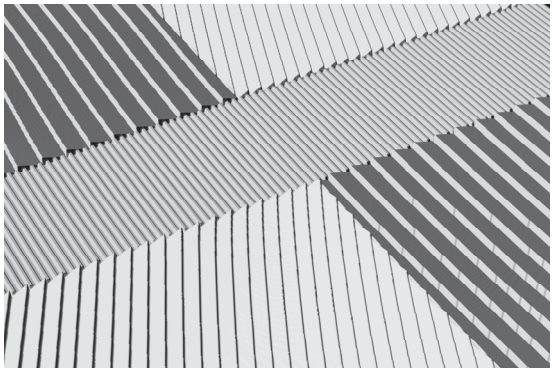


Рис. 11. Фрагмент микрорельефа оптического элемента, формирующего эффект смены двух барельефных изображений

3. Электронно-лучевая литография для формирования многоградационных оптических элементов

Для изготовления элементов плоской оптики в оптическом диапазоне можно использовать различные технологии, в том числе фотолитографию, рентгеновскую литографию, электронно-лучевую литографию и другие. Наиболее перспективной технологией формирования микрорельефа оптических защитных элементов является электронно-лучевая литография. Электронно-лучевая литография представляет собой технологию синтеза различных микроструктур с предельно высоким разрешением. Запись микроструктур осуществляется электронным лучом. Разрешение записи определяется минимальным размером электронного луча. Электронный луч можно сфокусировать в пятно размером до нескольких нанометров, что и определяет высочайшее разрешение электронно-лучевой технологии.

Процесс создания плоского оптического элемента с помощью электронно-лучевой литографии можно представить поэтапно:

1. Расчет наноструктур оптического элемента и подготовка данных для экспонирования.
2. Процесс экспонирования на электронном генераторе.
3. Процесс обработки электронного резиста.

Наиболее сложной задачей является формирование многоградационного микрорельефа. Для таких оптических элементов требуется получить в результате микрорельеф, представляющий собой сложную трехмерную поверхность с точностью по высоте порядка нескольких нанометров. Соответственно, к процессам и оборудованию для создания оптических элементов предъявляются специальные требования:

1. Высокая производительность электронно-лучевого литографа.
2. Возможность работы с данными огромного размера.
3. Стабильность работы литографа и параметров процесса в течение большого промежутка времени.

Необходимо отметить, что определение оптимальных параметров экспонирования нанооптических элементов в значительной мере зависит от используемого электронно-лучевого оборудования. Их определение в первую очередь происходит в процессе изготовления тестовых и экспериментальных образцов нанооптических элементов.

Для экспонирования использовался модернизированный электронно-лучевой литограф ZBA-21 с изменяемой формой луча [15]. Формируемый системой электронных линз луч может иметь квадратную или прямоугольную форму. Ускоряющее напряжение литографа равно 20 киловольт. Минимальный размер луча для экспонирования составляет 100 на 100 нанометров. Максимальный размер луча составляет 6,3 микрона. Стандартный размер пластин с электронным резистом составляет 5 на 5 дюймов. Время экспонирования зависит не только от размера нанооптического элемента и разрешения (минимального размера луча), но и от формируемого микрорельефа. При одинаковом размере элемента время экспонирования бинарного микрорельефа обычно в несколько раз меньше, чем время экспонирования многоградационного микрорельефа.

4. Изготовление образца оптического элемента для формирования эффекта смены двух барельефных изображений

Эффективность разработанного метода синтеза была продемонстрирована изготовлением образца оптического элемента, формирующего эффекты смены барельефного изображения «морской конек» на барельефное изображение «ракушки». Размер оптического элемента составил 20 мм × 40 мм. Размер

элементарных областей G_{ij} составил 50 × 50 микрон, соответственно, общее количество областей G_{ij} составило 10^5. Глубина многоградационного микрорельефа составила 300 нанометров. Характерный размер дифракционных зон составил от 1 микрона до 4 микрон. Для формирования дополнительного 2D-изображения, видимого при больших углах дифракции, использовались дифракционные решетки с периодами от 550 до 400 нанометров. Расчет микрорельефа плоского оптического элемента проводился для монохроматического излучения 546 нм. Для экспонирования использовались пластины с позитивным электронным резистом на основе PMMA (полиметилметакрилат). После формирования микрорельефа на электронном резисте пластина металлизировалась серебром в установке вакуумного напыления. Далее была выращена никелевая копия в гальванической ванне с никельсульфаматным электролитом. Эта никелевая копия использовалась для съемки видео [14] работы оптического элемента.



Рис. 12. Кадры 3D-изображений, формируемые дифракционным элементом, в первом порядке дифракции (верхний ряд) и в минус первом (нижний ряд)

Приведенные на рис. 12 и рис. 13 кадры из снятого видео получены при освещении оптического элемента источником белого света, угловой размер которого составлял 5 градусов, тем не менее, разработанные методы синтеза позволили получить высококачественные 3D-изображения. Изображения на рис. 12 получены при углах дифракции менее 40 градусов. При углах дифракции более 55 градусов наблюдатель видит другое цветное изображение (рис. 13), формируемое дифракционными решетками.

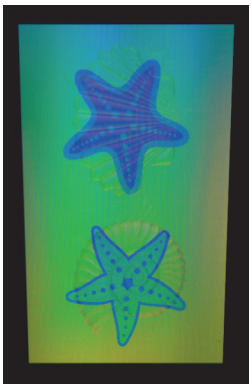


Рис. 13. Кадр дополнительного изображения, формируемый дифракционным элементом при больших углах дифракции

Заключение

1. Задачи синтеза плоских оптических элементов для формирования 3D-изображений являются типичными обратными задачами. Классический подход для их решения требует использования математических моделей и разработки методов решения обратных задач. Наиболее популярной моделью является скалярная волновая модель Френеля, в рамках которой задача синтеза решается и в настоящей статье. Эта модель хорошо описывает дифракцию света на микрорельефе, если характерные размеры микрорельефа превышают длину волны. Эффективность технических и научных решений продемонстрирована изготовлением реальных защитных элементов [14].
2. Какие размеры формируемых 3D-изображений являются оптимальными для визуального контроля? Для защиты паспортов и ID карт размер 3D-изображений может варьироваться от нескольких квадратных сантиметров до паспортной страницы. При защите ценных бумаг и банкнот, например, на ныряющих банкнотных нитях, наиболее эффективным является формирование изображений размером порядка 4 – 5 мм. Трехмерное изображение даже такого маленького размера легко контролируется визуально.
3. Для синтеза плоских оптических элементов в настоящей статье использована электронно-лучевая технология с изменяемой формой луча, минимальный размер которого составляет 0,1 на 0,1 мкм. Для синтеза

эффекта смены изображений в плюс первом и минус первом порядке дифракции микрорельеф оптического элемента должен быть многоградационным, при этом точность формирования его по высоте микрорельефа должна составлять порядка 10 нм. В настоящее время существуют технологии массового изготовления защитных оптических элементов, включающие в себя такие элементы, как ультрафиолетовая прокатка, напыление лаковых слоёв, металлизирование и т.п. Ширина технологии массового тиражирования может составлять 1,5 и даже 2 метра. Разработанные в статье дифракционные оптические элементы могут быть тиражированы с помощью описанных выше технологий.

4. В работах [12, 13] для формирования 3D-изображения использовалась технология, базирующаяся на киноформах [17]. К недостаткам этой технологии можно отнести то, что высокое качество 3D-изображений удается получить при использовании источников белого света с угловыми размерами, не превосходящими 1 градуса. Примером таких источников может служить вспышка смартфона или солнце. Одним из преимуществ разработанной в статье технологии является то, что в отличие от киноформов разработанные методы позволяют получать более чёткие 3D-изображения, даже если угловые размеры источника достаточно велики.

5. В настоящее время интенсивно развивается новое направление, получившее название плазмонных технологий [18, 19]. Характерные размеры микрорельефа для этого направления должны быть меньше длины волны света. Для описания эффектов рассеяния света в этом случае необходимо использовать уравнения Максвелла. Синтезированные с помощью плазмонных технологий плоские оптические элементы уже позволяют формировать 2D цветные изображения в неспектральных цветах [19, 20]. Широкие возможности плазмонная технология имеет и в синтезе 3D-изображений. К значимым достижениям в этой области можно отнести публикацию, в которой с помощью относительно простых микроструктур удалось синтезировать цветные изображения с параллактическим движением в плоскостях с различной глубиной в комбинации с эффектами анимации [21]. Проблемой плазмонных технологий является тиражирование синтезированных оригиналов, в частности воспроизводимость микроструктуры элементов. Разработанная в настоящей статье технология синтеза оптических элементов для формирования 3D-изображений лишена этого недостатка.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова «Разработка методов решения обратных задач диагностики и синтеза в волновых моделях».

References

[1] Gabor D. A new microscopic principle. Nature 1948; 161(4098): 777-778. DOI: 10.1038/161777a0.
[2] Benton SA. Hologram reconstructions with extended incoherent sources. Journal of the Optical Society of America 1969; 59(11): 1545-1546.
[3] Denisyuk YuN. On the mapping of the optical properties of an object in the wave field of radiation scattered by it. Doklady Akademii Nauk SSSR 1962; 144(6): 1275-1278. [In Russian]
[4] Denisyuk YuN, Sukhanov VI. Hologram recorded in a three-dimensional medium as the most perfect form of image. Soviet Physics Uspekhi 1970; 13(3): 414-415. DOI: 10.1070/PU1970v013n03ABEH004268.
[5] van Renesse RL. Optical Document Security. Boston, MA: Artech House; 2005. ISBN: 978-1-58053-258-7.
[6] Lancaster IM, Mitchell A. The growth of optically variable features on banknotes. In: van Renesse RL, ed. Proceedings of SPIE 5310, Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V. SPIE; 2004: 34-45. DOI: 10.1117/12.549893.
[7] Lee RA. Pixelgram: An application of electron-beam lithography for the security printing industry. In: Proceedings of SPIE 1504, Holographic Optical Security Systems. SPIE; 1991: 48-54. DOI: 10.1117/12.47117.
[8] Goncharsky AA, Goncharsky AV, Durlevich S, Melnik D. 3D-zero-order imaging: A new holographic principle. Optics and Photonics News 2020; 31(12): 57.
[9] Rai-Choudhury P, ed. Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication. Volume 1: Microlithography. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press; 1997. ISBN: 978-0-8194-2378-8.
[10] Goncharsky AV, Goncharsky AA, Durlevich S. Diffractive optical element with asymmetric microrelief for creating visual security features. Optics Express 2015; 23(22): 29184-29192. DOI: 10.1364/OE.23.029184.
[11] Firsov A, Firsov A, Loechel B, Erko A, Svintsov A, Zaitsev S. Fabrication of digital rainbow holograms and 3D-imaging using SEM-based electron-beam lithography. Optics Express 2014; 22(23): 28756-28770. DOI: 10.1364/OE.22.028756.
[12] Goncharsky AV, Goncharsky AA, Durlevich S. High-resolution full-parallax computer-generated holographic stereogram created by electron-beam technology. Optical Engineering 2017; 56(6): 063105. DOI: 10.1117/1.OE.56.6.063105.
[13] Goncharsky A, Goncharsky A, Durlevich S, Melnik D. Synthesis of nano-optical elements for zero-order diffraction 3D-imaging. Scientific Reports 2022; 12: 8639. DOI: 10.1038/s41598-022-12414-y.
[14] Basrelief switch effect. Video file. Source: <www.inverseproblems.ru/downloads/bas_switch.mp4 >
[15] Goncharsky AV, Goncharsky AA. Computer Optics and Computer Holography. Moscow: Moscow University Press; 2004.
[16] Soifer VA, ed. Diffractive Nanophotonics. Boca Raton, FL: CRC Press; 2016. ISBN: 978-0-429-16915-1.
[17] Lesem LB, Hirsch PM, Jordan JA. The kinoform: A new wavefront reconstruction device. IBM Journal of Research and Development 1969; 13(2): 150-155. DOI: 10.1147/rd.132.0150.
[18] Petrov NI, Danilov VA, Popov VV, Usievich BA. Large positive and negative Goos-Hänchen shifts near the surface plasmon resonance in a subwavelength grating. Optics Express 2020; 28(5): 7552-7565. DOI: 10.1364/OE.386472.

[19] Kristensen A, Yang JKW, Bozhevolnyi SI, Link S, Nordlander P, Halas NJ, Mortensen NA. Plasmonic colour generation. Nature Reviews Materials 2017; 2: 16088. DOI: 10.1038/natrevmats.2016.88.
[20] Lim KTP, Liu H, Liu Y, Yang JKW. Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control. Nature Communications 2019; 10: 25. DOI: 10.1038/s41467-018-07808-4.
[21] Jiang H, Kaminska B, Porras H, Raymond M, Kapus T. Microlens arrays above interlaced plasmonic pixels for optical security devices with high-resolution multicolor motion effects. Advanced Optical Materials 2019; 7(12): 1900237. DOI: 10.1002/adom.201900237.

Сведения об авторах

Гончарский Антон Александрович, 1975 года рождения, в 2024 году защитил диссертацию на соискание степени доктора физ-мат. наук по специальностям 1.3.6 – «Оптика» и 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В настоящий момент работает в должности старшего научного сотрудника в лаборатории разработки систем автоматизации обработки изображений в научно-исследовательском вычислительном центре МГУ им. Ломоносова. Сфера научных интересов: разработка численных методов решения обратных задач, расчет и синтез плоских нанооптических элементов, электронно-лучевая литография. E-mail: *gonchar@srcc.msu.ru*

Дурлевич Святослав Радомирович, 1974 года рождения, в 1997 году окончил физический факультет Московского государственного университета им М. В. Ломоносова. Автор более 20 международных патентов на изобретения в области плоской компьютерной оптики. В настоящий момент работает в должности ведущего программиста в лаборатории разработки систем автоматизации обработки изображений в научно-исследовательском вычислительном центре МГУ им. Ломоносова. Сфера научных интересов: разработка численных методов решения обратных задач плоской компьютерной оптики, расчет и синтез плоских нанооптических элементов, электронно-лучевая литография. E-mail: *sdurlevich@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28 октября 2025 г. *Окончательный вариант – 12 февраля 2026 г.*

Synthesis of Flat Diffractive Elements for 3D-Bas-Relief Images Formation

A.A. Goncharsky [1], S.R. Durlevich [1]
Research Computing Center of the Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory 1, p. 4, Moscow, 119991, Russia

Abstract

This article is devoted to the synthesis of flat optical elements for creating the effect of switching two 3D bas-relief images. The synthesized diffractive optical element has a multilevel structure formed by using electron beam lithography. The microrelief depth accuracy is 10 nm. When the optical element is illuminated with white light and tilted up and down, an observer sees the effect of switching two three-dimensional images. Videos captured from the fabricated optical element demonstrate the high efficiency of the developed synthesis method. The developed flat optical elements, replicated by using standard equipment for the mass production of security holograms, can be used to protect banknotes, passports, and securities.

Keywords: computer optics, diffractive optics, optical security, 3D-image display, electron beam lithography.

Citation: Goncharsky AA, Durlevich SR. Synthesis of Flat Diffractive Elements for 3D-Bas-Relief Images Formation. Computer Optics 2026; 50(5): 1878. doi: 10.18287/COJ1878.

Acknowledgements: The results were obtained as part of the government project of Lomonosov Moscow State University “Development of methods for solving inverse problems of diagnostics and synthesis in wave models”.

About authors

Anton Goncharsky (b. 1975), defended his dissertation in 2024 for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences in the specialties 1.3.6 (Optics) and 1.2.2 (Mathematical Modeling, Numerical Methods, and Software Systems). He currently works as a senior research fellow in the Automation Image Processing Systems Development Laboratory at Lomonosov Moscow State University Research Computing Center. His research interests include the development of numerical methods for solving inverse problems, the calculation and synthesis of flat nano-optical elements, electron beam lithography. E-mail: *gonchar@srcc.msu.ru*

Svyatoslav Durlevich (b. 1974), graduated from the Physics Department of Lomonosov Moscow State University in 1997. He is the author of over 20 international patents for inventions in the field of flat computer optics. He currently works as a senior programmer in the Automation Image Processing Systems Development Laboratory at the Lomonosov Moscow State University Research Computing Center. Research interests: development of numerical methods for solving inverse problems of flat computer optics, calculation and synthesis of flat nano-optical elements, electron beam lithography. E-mail: *sdurlevich@ya.ru*

Received on October 28, 2025. *The final version – February 12, 2026.*