

УДК 519.6; 517.958:5

doi 10.26089/NumMet.v17r438

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА БИНАРНЫХ НАНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**А. А. Гончарский¹, С. Ю. Серёжников²**

В рамках широко распространенной технологии Augmented Reality обсуждается возможность контроля подлинности защитных оптических меток на основе бинарных нанооптических элементов. С помощью смартфона фотографируют изображение защитной метки. Полученное изображение интерпретируется как дифракционный оптический элемент. В приближении Френеля рассчитывают изображение, формируемое дифракционным оптическим элементом, которое используют для идентификации подлинности защитной метки. Защитная метка представляет собой фазовый оптический элемент, глубина микрорельефа которого не превышает 0.5 мкм. Нанооптические элементы изготавливаются с помощью электронно-лучевой литографии. Разработанные нанооптические элементы устойчивы к частичному повреждению микрорельефа и могут быть использованы для идентификации банкнот, документов и др.

Ключевые слова: нанооптические элементы, плоская компьютерная оптика, киноформ, электронно-лучевая литография, идентификация защитных меток, дополненная реальность, распознавание образов.

В настоящее время для защиты банкнот и документов широко используются голографические элементы. Первые защитные голограммы появились более 25 лет назад. Существующую технологию изготовления защитных голограмм можно разделить на два этапа. На первом этапе изготавливается оригинал голограммы. На втором этапе с использованием оригинала изготавливаются тиражные копии голограмм, которые практически не отличаются от оригинала, что обеспечивает их низкую себестоимость при больших тиражах. К недостаткам голографических защитных технологий относится широкая распространенность технологии изготовления оригиналов. Практически все компании, работающие в этой области, используют одни и те же установки для записи оригиналов с помощью оптического излучения.

В последние годы появилось принципиально новое направление по разработке защитных элементов. Оригиналы защитных элементов изготавливаются с помощью электронно-лучевой литографии — наукоемкой и малораспространенной технологии [1–3]. Электронно-лучевая технология позволяет изготавливать микрорельеф оптических элементов с точностью порядка 20 нм. Такие элементы получили название нанооптических защитных элементов. Нанооптические элементы можно тиражировать с помощью стандартного голографического оборудования, поэтому при больших тиражах цена нанооптических защитных элементов не отличается от цены стандартных голограмм [4]. С помощью нанооптических защитных технологий можно изготавливать защитные признаки, которые невозможно подделать или имитировать с помощью оптических методов записи оригиналов. Нанооптические элементы в настоящее время уже используются для защиты банкнот, документов, пластиковых карт, паспортов и др. [5–8].

В настоящее время получили широкое распространение различные информационные технологии, основанные на использовании мобильных устройств. С их помощью считываются и контролируются линейные штрихкоды и двумерные бар-коды. Технологии распознавания меток являются частью технологии дополненной реальности (Augmented Reality, AR) [9], позволяющей извлекать информацию об объектах по их фотографии, сделанной с мобильного устройства, и отображать ее на экране устройства вместе с объектом. Уже запущена AR-система “Amazon Flow”, использующая информацию с бар-кодов на различных товарах для отображения информации о них. В настоящей статье рассматриваются технологии синтеза и распознавания нанооптических защитных меток, которые могут применяться в AR-системах. С помощью таких меток можно защищать банкноты, паспорта, пластиковые карты, документы и др.

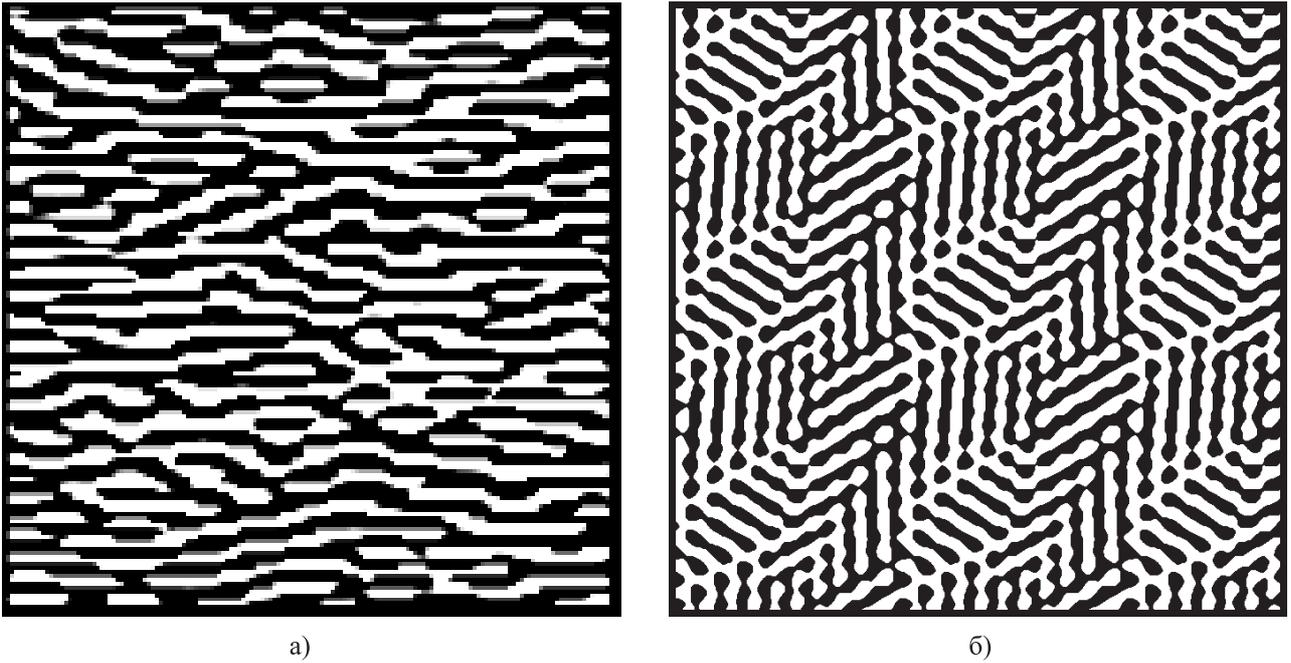
Нанооптический защитный элемент представляет собой плоский фазовый элемент, микрорельеф которого при его освещении белым светом формирует визуальное изображение. На рис. 1 приведена схема регистрации изображения защитного элемента с помощью смартфона.

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 119992, Москва; ст. науч. сотр., e-mail: gonchar@srcc.msu.ru

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 119992, Москва; электроник, e-mail: s2110sj@gmail.com



Рис. 1



a)

б)

Рис. 2

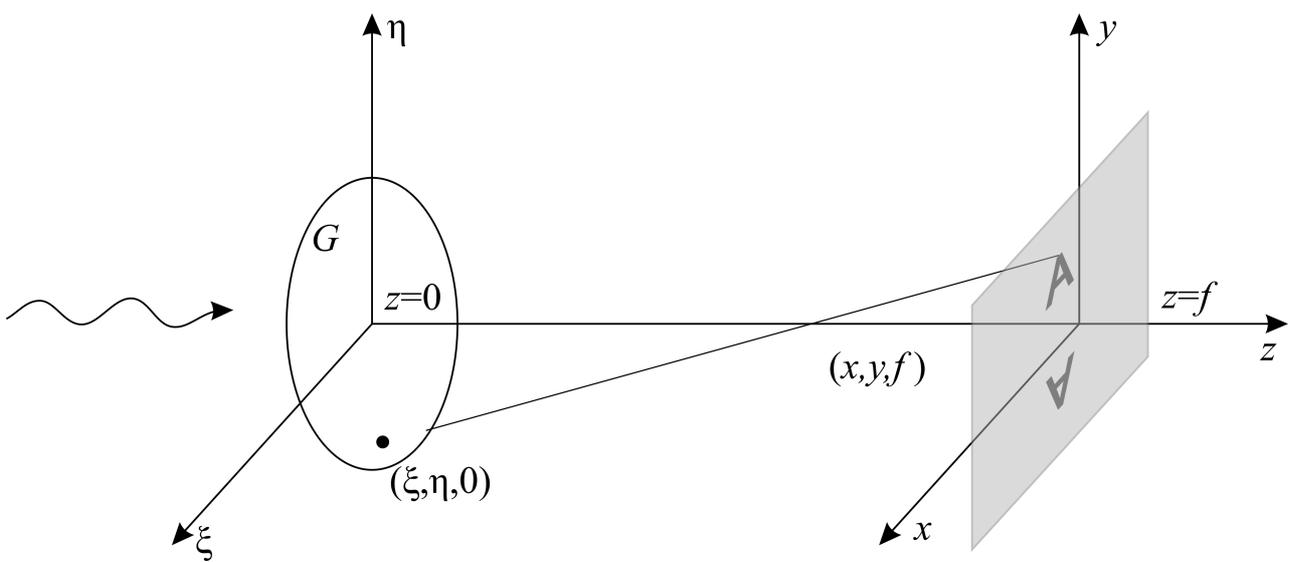


Рис. 3

Защитная метка фотографируется с помощью смартфона. Полученное изображение интерпретируется как дифракционный оптический элемент, который формирует изображение, используемое для идентификации защитной метки.

На рис. 2 приведены фрагменты изображений защитных меток, которые можно использовать для идентификации с помощью смартфона. Бинарные изображения на рис. 2а и 2б представляют собой некоторую текстуру, содержащую информацию, используемую для идентификации подлинности защитной метки.

Центральным моментом является использование защитных меток, изготовленных на основе бинарных киноформов, для процедуры идентификации изображений. Киноформ как оптический элемент широко используется в современной оптике [10–15].

На рис. 3 приведена схема формирования 2D-изображения плоским оптическим элементом — киноформом. Оптический элемент расположен в плоскости $z = 0$. Декартовы координаты в плоскости оптического элемента обозначим через (ξ, η) , а декартовы координаты в фокальной плоскости $z = f$, параллельной плоскости элемента, — через (x, y) . Область G — область оптического элемента, f — расстояние до фокальной плоскости. Схема приведена для плоских оптических элементов, работающих на прохождение. Схема на отражение отличается только тем, что лазерное излучение падает на оптический элемент с другой стороны.

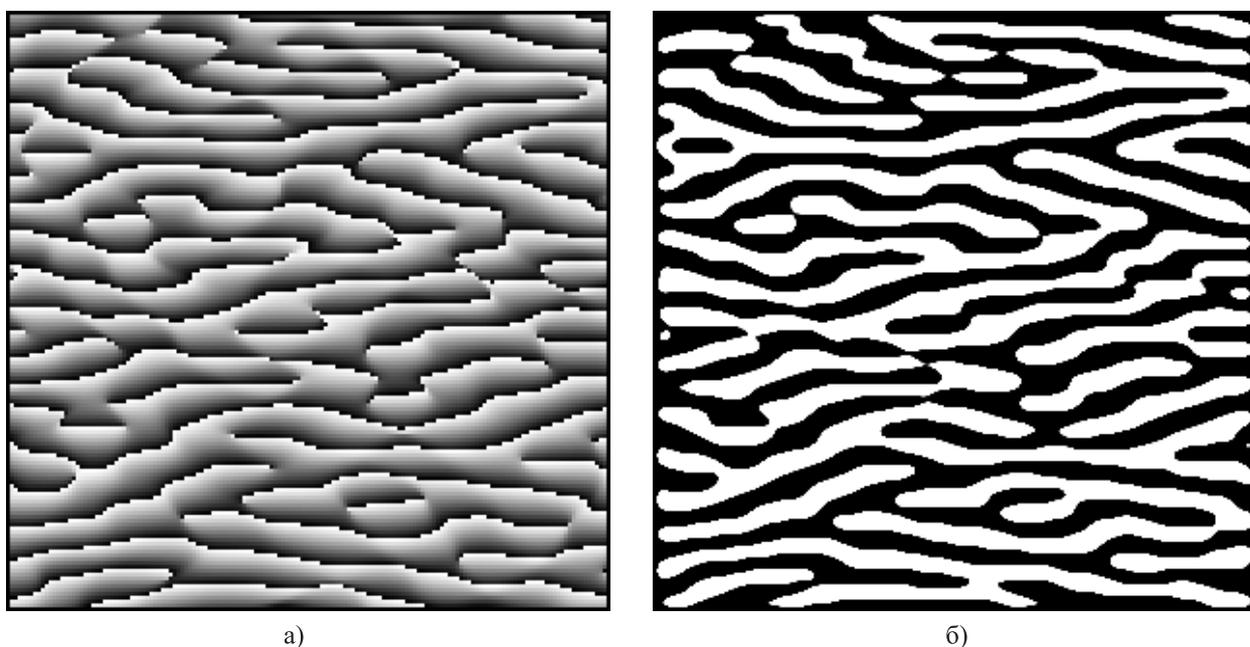


Рис. 4

Киноформ как дифракционный оптический элемент, формирующий заданное изображение в фокальной плоскости $z = f$, был впервые предложен в работе Лизема [16]. Различают многоградационные киноформы и бинарные киноформы. На рис. 4а проиллюстрирована микроструктура многоградационного киноформа. Глубина микрорельефа в точке (x, y) на рис. 4 пропорциональна потемнению в этой точке. Глубина микрорельефа многоградационного киноформа для видимого диапазона длин волн не превышает 0.6 мкм. Рис. 4б иллюстрирует структуру бинарного киноформа, формирующего то же самое изображение.

На рис. 5а приведено изображение, формируемое многоградационным киноформом. На рис. 5б приведено изображение, формируемое бинарным киноформом. Точка в середине изображения на рис. 5б соответствует нулевому порядку дифракции. Изображение, формируемое бинарным киноформом, всегда симметрично относительно нулевого порядка. Из этих рисунков следует, что изображение, формируемое многоградационным киноформом, таким не является. В настоящей статье обсуждаются возможности идентификации защитных меток, изготовленных на базе бинарных киноформов.

Каждый киноформ (многоградационный или бинарный) задается своей фазовой функцией $\varphi(\xi, \eta)$. Плоский фазовый оптический элемент осуществляет преобразование волновой функции падающего излучения так, чтобы волновая функция после оптического элемента $u(\xi, \eta, 0 + 0)$ и волновая функция до

оптического элемента $u(\xi, \eta, 0 - 0)$ были связаны соотношением

$$u(\xi, \eta, 0 + 0) = u(\xi, \eta, 0 - 0)e^{ik\varphi(\xi, \eta)}. \quad (1)$$

Здесь $k = 2\pi/\lambda$ и λ — длина волны света. Формируемое оптическим элементом изображение $F(x, y)$ и фазовая функция $\varphi(\xi, \eta)$ связаны соотношением

$$\left| \gamma \iint_G u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp\left(ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f}\right) e^{ik\varphi(\xi, \eta)} d\xi d\eta \right| = F(x, y). \quad (2)$$

Соотношение (2) позволяет при заданной фазовой функции $\varphi(\xi, \eta)$ рассчитать формируемое в фокальной плоскости изображение $F(x, y)$. Зная фазовую функцию, можно рассчитать изображение, формируемое оптическим элементом, и наоборот, зная изображение, можно рассчитать фазовую функцию оптического элемента.

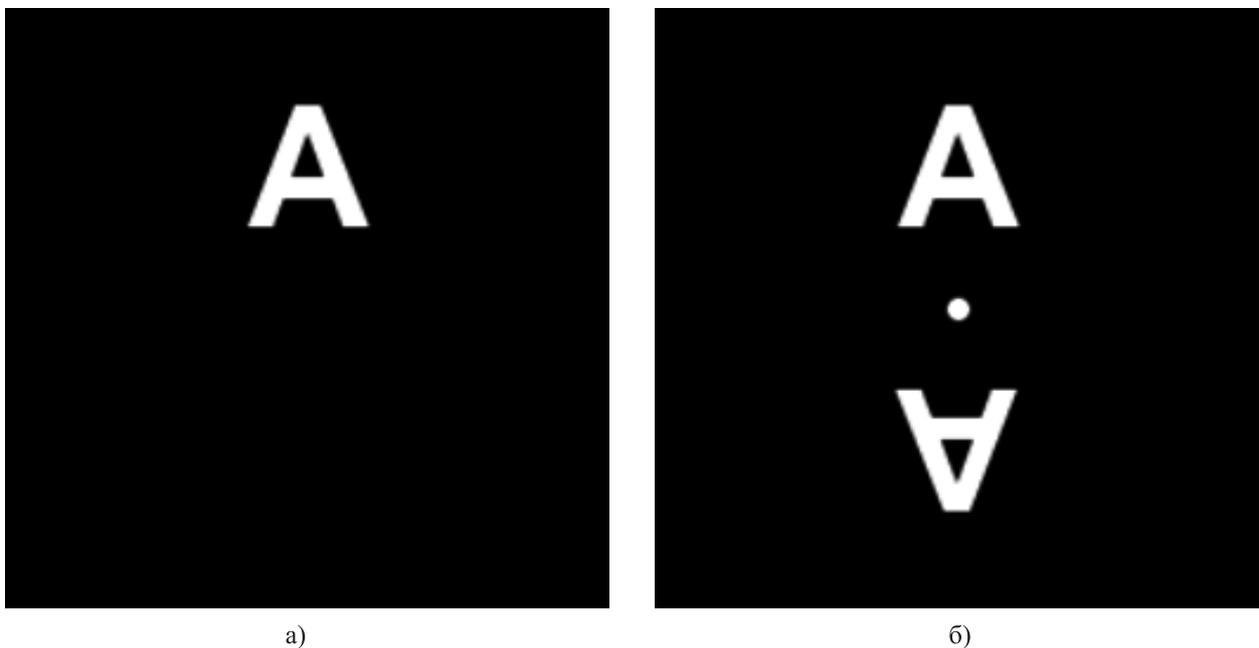


Рис. 5

Задача расчета изображения $F(x, y)$ является прямой задачей. Если задано $F(x, y)$ и требуется найти фазовую функцию $\varphi(\xi, \eta)$, то такая задача называется обратной. Для решения этой задачи необходимо решать задачу (2) относительно $\varphi(\xi, \eta)$ при заданной функции $F(x, y)$. Разработаны эффективные численные итерационные методы решения этой задачи [17]. Первый алгоритм решения задачи (2) был предложен Лиземом еще в 1969 г. [16]. После этого в литературе можно найти многочисленные попытки улучшить предложенный Лиземом алгоритм [18, 19]. По мнению авторов статьи, итерационный алгоритм, предложенный Лиземом, позволяет эффективно находить приближенное решение задачи (2) для широкого класса прикладных задач. Все расчеты в настоящей статье выполнены с использованием этого алгоритма.

Таким образом, для контроля подлинности защитной метки с помощью смартфона приходится решать две задачи. Первая из них решается на этапе синтеза нанооптического элемента. Задавая изображение $F(x, y)$ в фокальной плоскости, мы рассчитываем фазовую функцию плоского оптического элемента. На этом этапе решается обратная задача определения фазовой функции $\varphi(\xi, \eta)$ по заданному изображению $F(x, y)$. Функция $\varphi(\xi, \eta)$ однозначно определяет микрорельеф нанооптического элемента. Для многоградационного киноформа при нормальном падении излучения на плоский оптический элемент глубина микрорельефа $h(\xi, \eta)$ в точке (ξ, η) равна $0.5\varphi(\xi, \eta)$. Для бинарного киноформа фазовая функция тоже определяет глубину микрорельефа, которая принимает всего два значения — 0 и H . Для видимого света $H < 0.4$ мкм. Глубина микрорельефа бинарного киноформа $h(\xi, \eta)$ принимает значение, равное H , только для тех точек (ξ, η) , для которых выполнено соотношение $0 < k\varphi(\xi, \eta) < \pi$.

Вторая задача состоит в идентификации подлинности защитной метки. Изготовленный нанооптический элемент фотографируется смартфоном. Полученное изображение интерпретируется как дифракционный оптический элемент — киноформ. Рассчитывается изображение $F(x, y)$, формируемое киноформом в фокальной плоскости, т.е. решается прямая задача. Именно это изображение участвует в процессе идентификации подлинности. Таким образом, на этапе идентификации решается только прямая задача, решение которой на процессорах современных смартфонов занимает сотые доли секунды и может осуществляться в реальном времени в системе Augmented Reality.

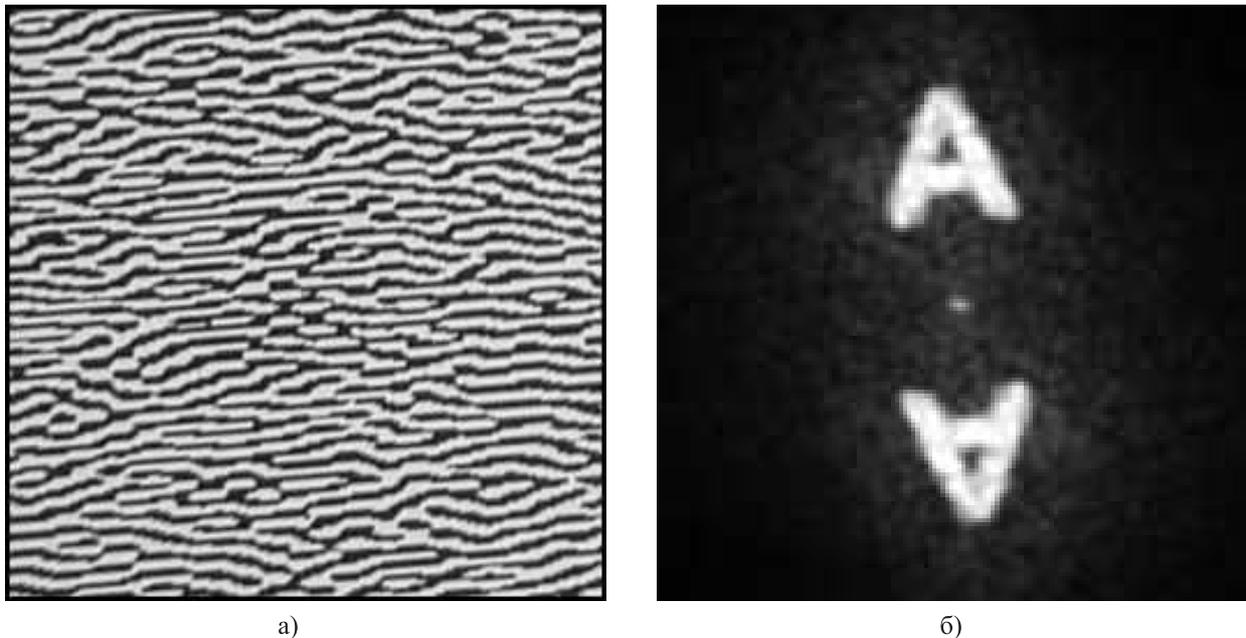


Рис. 6

Нетрудно видеть, что для обычного пользователя изображение микроструктуры киноформа (рис. 4) совсем не напоминает формируемое киноформом изображение $F(x, y)$ на рис. 5, используемое смартфоном для идентификации. Можно считать, что осуществляется процесс идентификации изображения, которое зашифровано указанным выше способом. На рис. 6а представлено реальное сфотографированное смартфоном изображение киноформа. С помощью установки электронно-лучевого экспонирования ZBA-21 в НИВЦ МГУ был изготовлен нанооптический элемент размером 32×40 мм. Площадь киноформа для автоматизированного контроля на оптическом элементе составляет порядка 4 кв. см. Оптический элемент изготовлен с разрешением 0.1 мкм. Глубина микрорельефа бинарного киноформа составляет 0.3 мкм.

На рис. 6б иллюстрируется восстановленное изображение $F(x, y)$, формируемое фазовым оптическим элементом, представленным на рис. 6а.

Рассчитанное смартфоном изображение можно отображать на экране смартфона в системе Augmented Reality. Такие изображения могут представлять собой, например, логотип и легко идентифицируются пользователем визуально.

Широко используемые метки со штрихкодами могут быть либо распознаны, либо не распознаны при недостаточном качестве изображения, например при большом расстоянии до объекта или при отсутствии части изображения. Совершенно по-другому обстоит дело с киноформом. Изображение, формируемое киноформом, уменьшается обратно пропорционально расстоянию до объекта, как и изображение самого объекта. Чем меньше расстояние до объекта и выше детализация изображения, тем более подробная информация может быть извлечена. Кроме того, как будет показано далее, восстановленное изображение устойчиво к повреждению или перекрытию части поверхности киноформа другими предметами. Это свойство киноформа делает его перспективным для использования в системах Augmented Reality.

Представляет интерес автоматическая идентификация защитных меток, осуществляемая с помощью смартфона. Если рассчитанное смартфоном изображение состоит из небольшого количества цифр или букв, а в памяти смартфона зашит эталон, то процедура идентификации изображения $F(x, y)$ сводится к оптическому распознаванию символов (OCR: Optical Character Recognition). В настоящее время технология OCR широко распространена и используется для сканирования документов, в том числе с помощью смартфонов [20, 21]. Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться в задачах идентификации

символов, является то, что процедура идентификации должна быть инвариантна относительно поворота и смещения символов. Существует большой набор алгоритмов и программное обеспечение как для персональных компьютеров, так и для смартфонов, которое успешно решает эту задачу. В основе большинства таких алгоритмов лежит сжатие изображения, заключающееся в выделении на изображении символа небольшого числа ключевых точек, которые затем используются в процедуре идентификации [22]. Такие алгоритмы получили название “структурно-логические”.

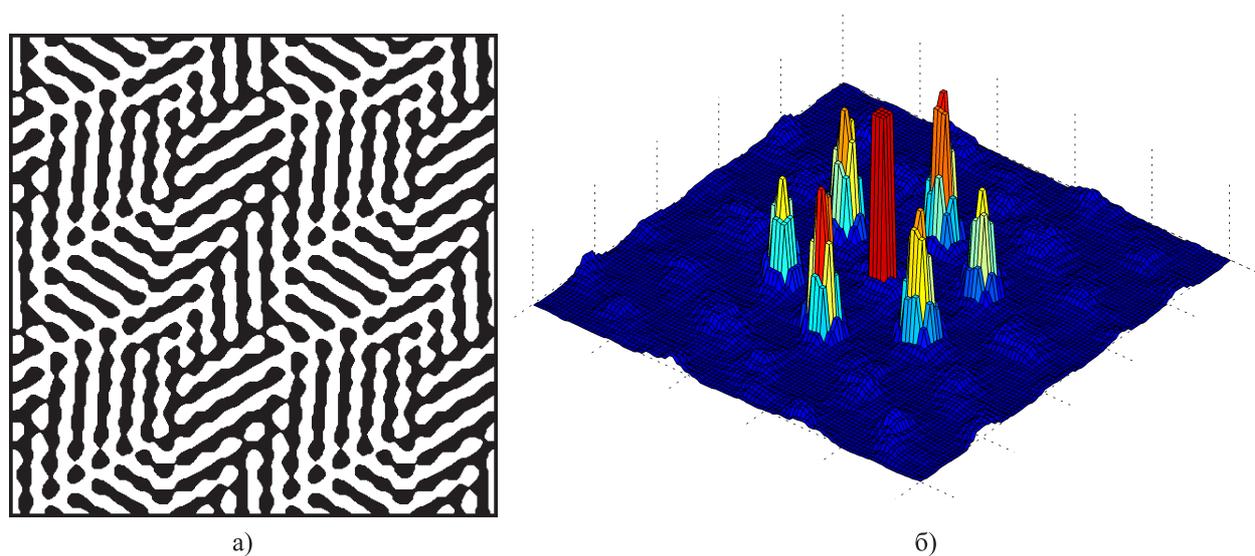


Рис. 7

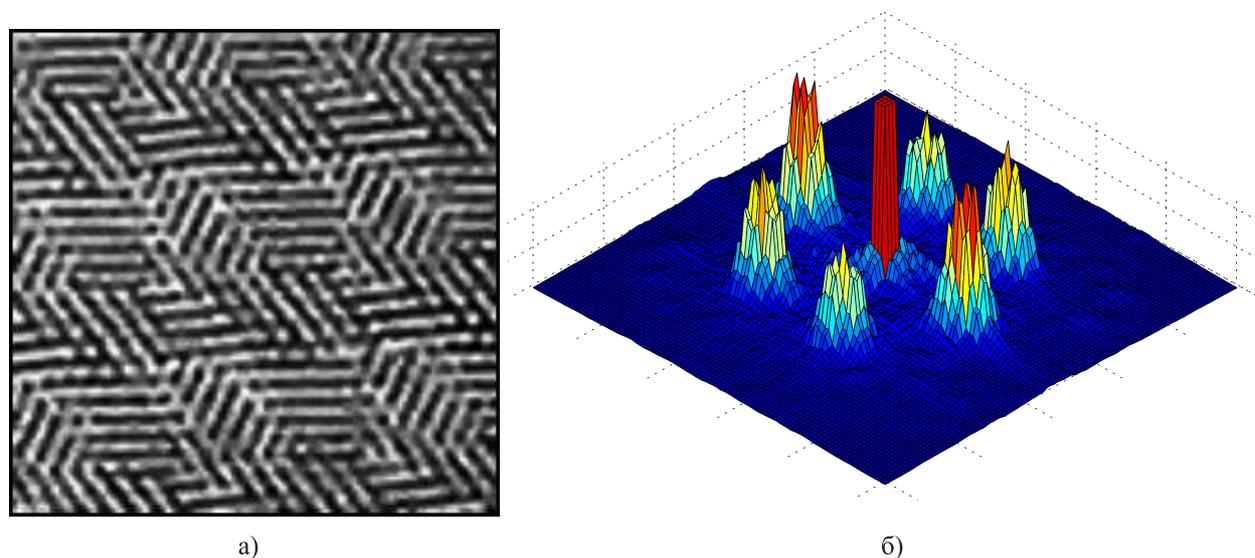


Рис. 8

Наиболее просто задача идентификации решается в случае, когда идентифицируемое изображение $F(x, y)$ представляет собой набор точек. Хорошо известно, что для этого случая существуют инвариантные относительно поворота и смещения признаки, к которым относятся линейные или угловые расстояния между точками. На рис. 7а приведен киноформ, формирующий в фокальной плоскости изображение $F(x, y)$, состоящее из 6 точек, расположенных на окружности. Распределение интенсивности изображения $F(x, y)$ приведено на рис. 7б. В этом случае процедура идентификации является предельно простой: в качестве признака для инвариантной относительно поворота идентификации используются угловые расстояния между яркими точками изображения $F(x, y)$.

На рис. 8а приведено реальное изображение, сфотографированное смартфоном с киноформа, изготовленного с помощью электронно-лучевой технологии. На рис. 8б приведено распределение интенсив-

ности изображения $F(x, y)$, формируемого фазовым оптическим элементом, представленным на рис. 8а. Изображение на рис. 8б вполне пригодно для автоматизированного контроля подлинности с помощью смартфона.

Киноформ как плоский оптический элемент обладает одним очень важным свойством — каждый фрагмент киноформа формирует все изображение. Как следствие, даже повреждение значительной части микрорельефа плоского фазового оптического элемента не очень значительно влияет на формируемое изображение.

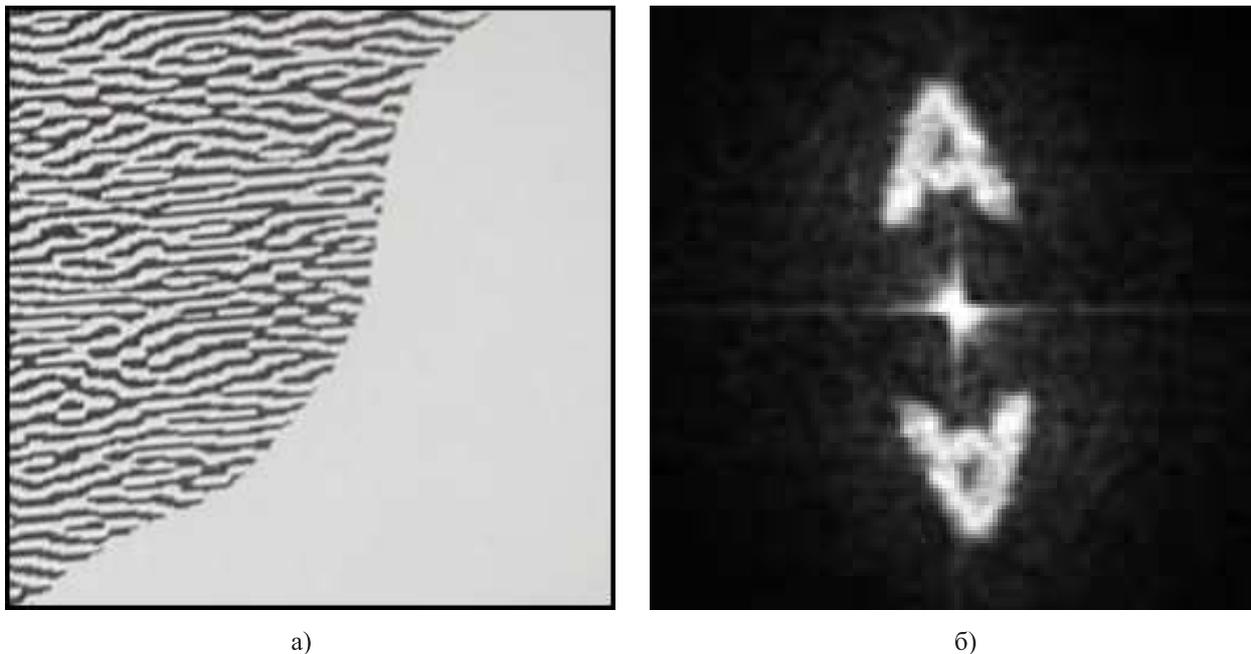


Рис. 9

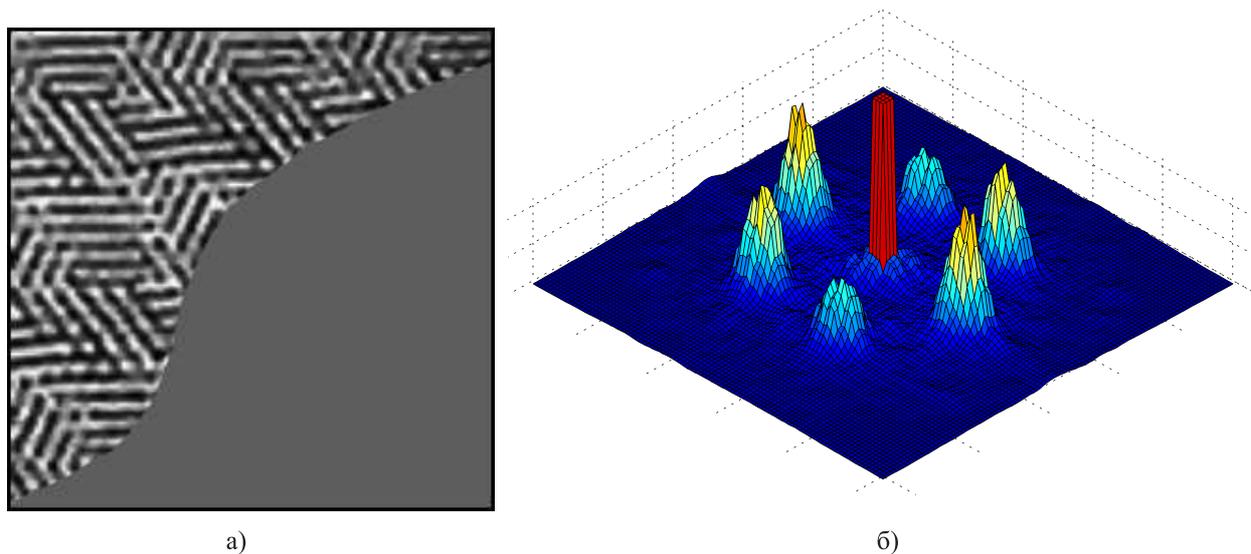


Рис. 10

Проиллюстрируем это свойство рассматриваемых оптических элементов на примере киноформа, формирующего изображение, представленное на рис. 5. На рис. 9а приведено сфотографированное смартфоном изображение киноформа, в котором 50% микрорельефа утрачено. На рис. 9б представлено изображение, формируемое этим киноформом.

Как видно из рисунка, качество изображения ухудшается незначительно, заметно лишь увеличение интенсивности в нулевом порядке. Несмотря на потерю большой площади киноформа, восстановленное

изображение буквы “А” вполне пригодно для визуальной идентификации с помощью смартфона.

Аналогичная ситуация имеет место и в случае, когда изображение $F(x, y)$ представляет собой набор из 6 ярких точек. Это изображение используется для автоматизированного контроля.

На рис. 10а приведено реальное изображение сфотографированного смартфоном киноформа для автоматизированного контроля, в котором 50% изображения утрачено. На рис. 10б приведено распределение интенсивности изображения $F(x, y)$, формируемого этим киноформом. Многочисленные тесты показали, что формируемое изображение вполне пригодно для автоматического контроля подлинности с помощью смартфона.

Изображение киноформа, считываемое смартфоном, является бинарным. В настоящее время существуют сканеры высокого разрешения, с помощью которых можно пытаться скопировать изображение бинарного киноформа, если характерные размеры зон достаточно велики. Важным элементом защиты от подделки является то, что нанооптические элементы могут включать в себя защитные признаки, которые невозможно скопировать с помощью распространенных технологий. В качестве таких признаков можно использовать, например, фрагменты дифракционных решеток с периодом 0.4–0.5 мкм, размер которых не превосходит 50 мкм [5, 6]. На рис. 11а приведена структура такого нанооптического элемента.

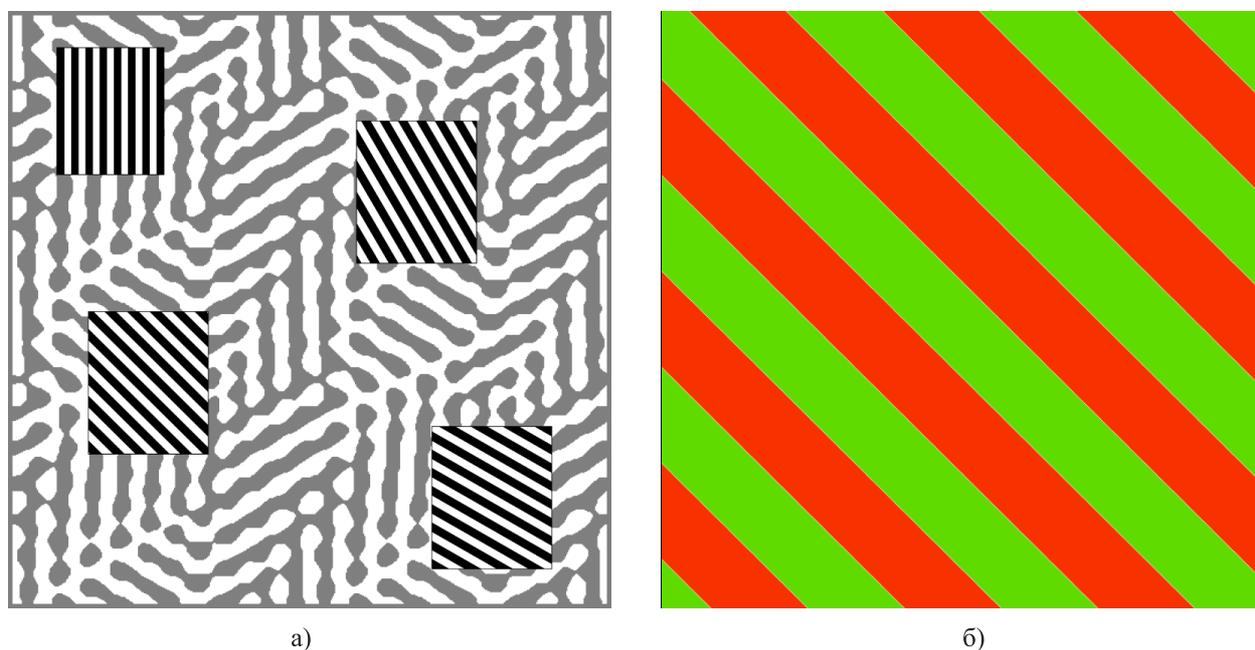


Рис. 11

На рис. 11б представлено цветное изображение, формируемое дифракционными решетками и видимое при больших углах дифракции — более 60° . Таким образом, при больших углах дифракции наблюдатель видит не изображение киноформа, а другое цветное изображение. Фрагменты дифракционных решеток настолько малы, что разрешения человеческого глаза недостаточно, чтобы увидеть разбиение. Наличие второго изображения при больших углах дифракции является гарантией подлинности оптического защитного элемента. Регистрация изображения защитной метки смартфоном осуществляется при небольших углах, поэтому фрагменты дифракционных решеток на нем не видны.

Выводы.

1. В настоящей статье предложены принципиально новые нанооптические элементы, позволяющие с использованием широко распространенной технологии Augmented Reality контролировать подлинность защитных меток с помощью мобильных устройств. Подробно обсуждаются возможности автоматизированного контроля защитных меток на основе бинарных киноформов.

2. Использование киноформов как оптических элементов для распознавания образов в системах Augmented Reality имеет ряд преимуществ. Восстановленное смартфоном изображение устойчиво к повреждению или перекрытию части поверхности киноформа во время съемки. Как показали эксперименты, для устойчивого распознавания достаточно даже 30% площади киноформа.

3. Нанооптические элементы можно изготавливать большими тиражами с помощью стандартного оборудования, что обеспечивает их невысокую цену. Разработанная технология может быть использована для защиты документов, ценных бумаг, товаров народного потребления и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Firsov An., Firsov A., Loechel B., Erko A., Svintsov A., Zaitsev S.* Fabrication of digital rainbow holograms and 3-D imaging using SEM based e-beam lithography // *Optics Express*. 2014. **22**, N 23. 28756–28770.
2. *Sheng Y., Wang J.* Binary hologram of very large space bandwidth product designed by the genetic algorithm // *Digital Holography & 3-D Imaging Meeting, OSA Technical Digest*. 2015. doi 10.1364/DH.2015.DM4A.3.
3. *Rai-Choudhury P. (Ed.)* Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication. Vol. 1: Microlithography. Bellingham: SPIE Press, 1997.
4. *Van Renesse R.L.* Optical document security. Boston: Artech House, 2005.
5. *Goncharsky A., Goncharsky A., Durlevich S.* Diffractive optical element for creating visual 3D images // *Optics Express*. 2016. **24**, N 9. 9140–9148.
6. *Goncharsky A., Goncharsky A., Durlevich S.* Diffractive optical element with asymmetric microrelief for creating visual security features // *Optics Express*. 2015. **23**, N 22. 29184–29192.
7. *Гончарский А.А., Дурлевич С.П.* Об одной задаче синтеза нанооптических элементов для формирования динамических изображений // *Вычислительные методы и программирование*. 2013. **14**. 343–347.
8. *Гончарский А.А.* Об одной задаче синтеза нанооптических элементов // *Вычислительные методы и программирование*. 2008. **9**. 405–408.
9. *Aleksy M., Vartiainen E., Domova V., Naedele M.* Augmented reality for improved service delivery // *IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA) 2014*. Washington, DC: IEEE Press, 382–389.
10. *Belloni F., Monneret S.* Quadrant kinoform: an approach to multiplane dynamic three-dimensional holographic trapping // *Applied Optics*. 2007. **46**, N 21. 4587–4593.
11. *Karvinen P. et al.* Kinoform diffractive lenses for efficient nano-focusing of hard X-rays // *Optics Express*. 2014. **22**, N 14. 16676–16685.
12. *Zhang H., Liu H., Lu Z., Zhang H.* Modified phase function model for kinoform lenses // *Applied Optics*. 2008. **47**, N 22. 4055–4060.
13. *Sales T.R.M., Morris G.M.* Diffractive-refractive behavior of kinoform lenses // *Applied Optics*. 1997. **36**, N 1. 253–257.
14. *Moh K.J., Yuan X.-C., Cheong W.C., Zhang L.S., Lin J., Ahluwalia B.P.S., Wang H.* High-power efficient multiple optical vortices in a single beam generated by a kinoform-type spiral phase plate // *Applied Optics*. 2006. **45**, N 6. 1153–1161.
15. *Yuan X.-C., Ahluwalia B.P.S., Cheong W.C., Bu J., Niu H.B., Peng X.* Direct electron beam writing of kinoform micro-axicon for generation of propagation-invariant beams with long non-diffracting distance // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2007. **9**. 329–334.
16. *Lesem L.B., Hirsch P.M., Jordan J.A.* The kinoform: a new wave-front reconstruction device // *IBM J. Res. Dev.* 1969. **13**. 105–155.
17. *Гончарский А.В., Гончарский А.А.* Компьютерная оптика. Компьютерная голография. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004.
18. *Tan Q., Yan Y., Jin G., Xu D.* Fine design of Diffractive optical element for beam transform // *Proceedings of SPIE*. 2001. **4443**. 184–188.
19. *Fienup J.R.* Phase retrieval algorithms: a comparison // *Applied Optics*. 1982. **21**, N 15. 2758–2769.
20. *Mohammad F., Anarase J., Shingote M., Ghanwat P.* Optical character recognition implementation using pattern matching // *Int. J. Comput. Sci. Inform. Technol.* 2014. **5**, N 2. 2088–2090.
21. *Mollah A.F., Majumder N., Basu S., Nasipuri M.* Design of an optical character recognition system for camera-based handheld devices // *Int. J. Comput. Sci. Iss.* 2011. **8**, N 4. 283–289.
22. *Lowe D.G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints // *International Journal of Computer Vision*. 2004. **60**, N 2. 91–110.

Поступила в редакцию
19.09.2016

On a Problem of the Synthesis of Binary Nano-Optical Elements

A. A. Goncharsky¹ and S. Yu. Serezhnikov²

¹ *Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University; Leninskie Gory, Moscow, 119992, Russia; Ph.D., Senior Scientist, e-mail: gonchar@srcc.msu.ru*

² *Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University; Leninskie Gory, Moscow, 119992, Russia; Ph.D., Electronic Engineer, e-mail: s2110sj@gmail.com*

Received September 19, 2016

Abstract: This paper deals with optical security label identification technology as a part of augmented reality technology. Security labels are based on binary nano-optical elements and are photographed using a smartphone. Photographed images are interpreted as diffractive optical elements. Optical images formed by these diffractive elements are computed using the Fresnel approximation. These images are used to identify the security labels. A security label consists of a phase optical element whose microrelief height is of no more than $0.5 \mu\text{m}$. Nano-optical elements are manufactured using electron-beam lithography. The optical security labels are resistant against microrelief damages and can withstand partial loss of an image. The optical elements developed can be used to protect and identify banknotes, documents, etc.

Keywords: nano-optical elements, flat computer optics, kinoform, electron beam lithography, security label identification, augmented reality, pattern recognition.

References

1. An. Firsov, A. Firsov, B. Loechel, et al., "Fabrication of Digital Rainbow Holograms and 3-D Imaging Using SEM Based E-Beam Lithography." *Opt. Express*. **22** (23), 28756–28770 (2014).
2. Y. Sheng and J. Wang, "Binary Hologram of Very Large Space Bandwidth Product Designed by the Genetic Algorithm," *Digital Holography & 3-D Imaging Meeting*, OSA Technical Digest (2015). doi 10.1364/DH.2015.DM4A.3
3. P. Rai-Choudhury (Ed.), *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication*, Vol. 1: *Microlithography* (SPIE Press, Bellingham, 1997).
4. R. L. van Renesse, *Optical Document Security* (Artech House, Boston, 1998).
5. A. Goncharsky, A. Goncharsky, and S. Durlevich, "Diffractive Optical Element for Creating Visual 3D Images," *Opt. Express* **24** (9). 9140–9148 (2016).
6. A. Goncharsky, A. Goncharsky, and S. Durlevich, "Diffractive Optical Element with Asymmetric Microrelief for Creating Visual Security Features," *Opt. Express* **23** (22). 29184–29192 (2015).
7. A. A. Goncharsky and S. R. Durlevich, "A Problem of Synthesis of Nano-Optical Elements for the Formation of Dynamic Images," *Vychisl. Metody Programm.* **14**, 343–347 (2013).
8. A. A. Goncharsky, "On the Problem of Synthesis of Nano-Optical Elements," *Vychisl. Metody Programm.* **9**, 405–408 (2008).
9. M. Aleksy, E. Vartiainen, V. Domova, and M. Naedele, "Augmented Reality for Improved Service Delivery," in *Proc. IEEE 28th Int. Conf. on Advanced Information Networking and Applications, Victoria, Canada, May 13–16, 2014* (IEEE Press, Washington, DC, 2014), pp. 382–389.
10. F. Belloni and S. Monneret, "Quadrant Kinoform: An Approach to Multiplane Dynamic Three-Dimensional Holographic Trapping," *Appl. Opt.* **46** (21), 4587–4593 (2007).
11. P. Karvinen, D. Grolimund, M. Willimann, et al., "Kinoform Diffractive Lenses for Efficient Nano-Focusing of Hard X-Rays," *Opt. Express* **22** (14), 16676–16685 (2014).
12. H. Zhang, H. Liu, Z. Lu, and H. Zhang, "Modified Phase Function Model for Kinoform Lenses," *Appl. Opt.* **47** (22), 4055–4060 (2008).
13. T. R. M. Sales and G. M. Morris, "Diffractive-Refractive Behavior of Kinoform Lenses," *Appl. Opt.* **36** (1), 253–257 (1997).
14. K. J. Moh, X.-C. Yuan, W. C. Cheong, et al., "High-Power Efficient Multiple Optical Vortices in a Single Beam Generated by a Kinoform-Type Spiral Phase Plate," *Appl. Opt.* **45** (6), 1153–1161 (2006).
15. X.-C. Yuan, B. P. S. Ahluwalia, W. C. Cheong, et al., "Direct Electron Beam Writing of Kinoform Micro-Axicon for Generation of Propagation-Invariant Beams with Long Non-Diffracting Distance," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9**, 329–334 (2007).
16. L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan, "The Kinoform: A New Wave-Front Reconstruction Device," *IBM J. Res. Dev.* **13**, 105–155 (1969).
17. A. V. Goncharsky and A. A. Goncharsky, *Computer Optics and Computer Holography* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 2004) [in Russian].
18. Q. Tan, Y. Yan, G. Jin, and D. Xu, "Fine Design of Diffractive Optical Element for Beam Transform," *Proc. SPIE* **4443**, 184–188 (2001). doi 10.1117/12.446750
19. J. R. Fienup, "Phase Retrieval Algorithms: A Comparison," *Appl. Opt.* **21** (15), 2758–2769 (1982).
20. F. Mohammad, J. Anarase, M. Shingote, and P. Ghanwat, "Optical Character Recognition Implementation Using Pattern Matching," *Int. J. Comput. Sci. Inform. Technol.* **5** (2), 2088–2090 (2014).
21. A. F. Mollah, N. Majumder, S. Basu, and M. Nasipuri, "Design of an Optical Character Recognition System for Camera-Based Handheld Devices," *Int. J. Comput. Sci. Iss.* **8** (4), 283–289 (2011).
22. D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *Int. J. Comput. Vis.* **60** (2), 91–110 (2004).