

ОПТИЧЕСКОЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА БРЮСТЕРА

Д.В. Нестеренко^{1,2}, М.Д. Колесникова², А.В. Любарская²¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Теоретически и экспериментально изучаются подходы к реализации аналоговых оптических преобразований для выделения контуров изображений с использованием планарных границ разделов сред диэлектрик-диэлектрик. В работе демонстрируется возможность и исследуется эффективность выполнения операций пространственного дифференцирования и выделения контуров на изображениях амплитудных и фазовых оптических элементов на основе эффекта Брюстера для поляризованного света.

Ключевые слова: нанопотоника, аналоговые оптические вычисления, планарная структура, волноводная мода, резонанс, эффект Брюстера, обработка изображений.

Цитирование: Нестеренко, Д.В. Оптическое дифференцирование на основе эффекта Брюстера / Д.В. Нестеренко, М.Д. Колесникова, А.В. Любарская // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 758-763. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-758-763.

Введение

Традиционные оптические аналоговые системы в пространственной области используют громоздкие системы линз и фильтров [1]. В настоящее время предпринимаются значительные усилия по миниатюризации вычислительных элементов до сопоставимых с длиной волны и субволновых размеров. В частности, теоретически была показана возможность управления фазой и амплитудой волны, прошедшей через сложный массив метаатомов, для формирования желаемой пространственной функции пропускания [2]. Однако прямая экспериментальная демонстрация обработки изображений затруднительна из-за технологической сложности изготовления метаматериалов [3–5].

Также были опубликованы теоретические расчёты по конструированию дифракционных резонансных структур. Было показано, что резонансные структуры нанопотоники позволяют эффективно реализовать широкий класс математических операций над световыми сигналами и эффективно выполнять дифференцирование и интегрирование оптического сигнала по пространственным переменным, вычисление оператора Лапласа, оптическое решение дифференциальных уравнений [6–11]. Основным препятствием для экспериментальной демонстрации обнаруженных эффектов является сложность изготовления таких двумерных и трехмерных структур [12].

Сверхбыстрые оптические аналоговые вычисления характеризуются высокопроизводительными операциями с низким энергопотреблением и являются предметом активных исследований в фотонике [13]. Применение метаматериалов и дифракционных резонансных структур для оптических вычислительных систем позволяет осуществлять миниатюризацию вычислительных элементов до субволновых масштабов. Однако изготовление двух- и трехмерных микро- и наноструктур требует сложных затратных операций. Кроме того, оптимизация резонансных элементов осуществляется только для фиксированных длин волн.

Теоретически была продемонстрирована возможность использования эффекта Брюстера для пространственного дифференцирования поляризованных оптических сигналов [14]. Однако экспериментально подтверждение этой гипотезы до сих пор, насколько известно авторам, проведено не было.

В данной статье изложены результаты разработки и практического использования упрощенной оптической системы на основе эффекта Брюстера, позволяющей производить аналоговое оптическое дифференцирование с высоким пространственным разрешением на примере амплитудных и фазовых оптических структур.

Описание эксперимента

Оптическая система схематично изображена на рис. 1. В качестве источника света был использован полупроводниковый лазер с длиной волны 532 нм. Ослабление мощности выходного Гауссова пучка осуществлялось фильтром нейтральной оптической плотности ND. Далее поляризатор P пропускает р-поляризованное излучение с электрическим вектором, направленным в плоскости падения луча. Расширение и коллимация пучка осуществлялась коллиматором, состоящим из линз L₁ и L₂, а также апертуры A, находящейся в фокальной плоскости этих линз.

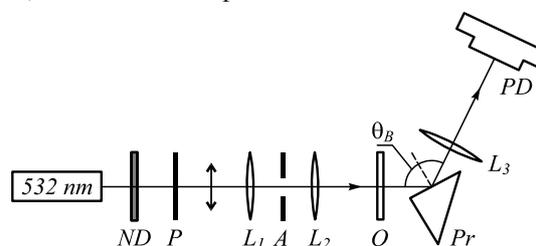


Рис. 1. Оптическая схема

Далее пучок проецируется на оптическую структуру O, меняющую пространственное распределение амплитуды и/или фазы пучка. Структура O, изображение которой исследуется в данной работе, пред-

ставляет собой маску в тонкой пленке материала, нанесенного на стеклянную подложку.

Далее преобразованный пучок падает на поверхность призмы Рг, изготовленной из материала ВК7 с показателем преломления $n_{BK7} \approx 1,515$, установленной таким образом, чтобы падение происходило под углом Брюстера в воздухе $\theta_B = \tan^{-1} n_{BK7} / n_{air} \sim 56,6^\circ$, где показатель преломления окружающей среды $n_{air} = 1$. Пучок, отражённый от границы раздела воздух-призма, фокусируется с помощью линзы L_3 на фоточувствительную матрицу PD. При этом линза L_3 находится на одинаковых расстояниях $2f$ от образца О и фотодетектора PD, где f – фокусное расстояние линзы L_3 .

Изображение объекта на матрицу PD производится линзой L_3 , фокусирующей рассеянные от объекта лучи. Предположим, что падающий и отраженный пучки имеют профили поля $S_{in}(x)$ и $S_{out}(x)$ соответственно, где x – координата, перпендикулярная направлению распространения луча и магнитного поля в системе координат луча. С помощью пространственного преобразования Фурье падающий (отражённый) пучок может быть записан как суперпозиция плоских волн

$$S_{in(out)}(x) = \int S_{in(out)}(k_x) \exp(ik_x x) dk_x,$$

где k_x – компонента волнового вектора плоской волны вдоль направления x , а $S_{in(out)}(k_x)$ – соответствующие амплитуды. Следовательно, преобразование профиля падающего поля в отраженное описывается пространственной функцией спектрального переноса $H(k_x)$, где $H(k_x) = S_{out}(k_x) / S_{in}(k_x)$.

Когда угол падения приближается к углу Брюстера θ_B , в спектрах функции отражения $H(k_x)$ наблюдается минимум вследствие полного пропускания при $k_x \rightarrow 0$, при этом $H(k_x) = 0$.

Для анализа $H(k_x)$ рассмотрим хорошо известное соотношение для коэффициента отражения r_{ij} ТМ-поляризованной плоской волны от границы раздела сред с диэлектрическими постоянными ϵ_i и ϵ_j [15]:

$$r_{ij} = \frac{\beta_i / \epsilon_i - \beta_j / \epsilon_j}{\beta_i / \epsilon_i + \beta_j / \epsilon_j}, \tag{1}$$

где $\beta_i = \sqrt{\epsilon_i - \alpha^2}$, $\alpha = \sqrt{\epsilon_j} \sin \theta$, в этом случае $2\pi\alpha/\lambda$ – проекция волнового вектора плоской волны с длиной волны λ на границу раздела сред в плоскости падения волны под углом θ к нормали. При $\alpha_B = \sqrt{\epsilon_i \epsilon_j / (\epsilon_i + \epsilon_j)}$ коэффициент отражения $r_{ij} = 0$. Этот эффект достигается при определенном угле падения θ_B , называемом углом Брюстера, который может быть найден как $\tan \theta_B = \sqrt{\epsilon_j / \epsilon_i}$. В угловых спектрах отражения это проявляется как резонансный провал на θ_B . Используя разложение в ряд Тейлора ур. (1) вблизи угла Брюстера $\alpha \rightarrow \alpha_B$, подобно аппроксимации коэффициента отражения, реализованной в [16], r_{ij} может быть записан как

$$r_{ij}(\alpha) \approx \frac{\epsilon_i - \epsilon_j}{2\alpha_B^3} (\alpha - \alpha_B). \tag{2}$$

Выражая функцию отражения через коэффициент отражения (2) в виде $H(k_x) \approx r_{ij}(\alpha_B + k_x \cos \theta_B)$, получаем аппроксимацию

$$H(k_x) \approx (\epsilon_i - \epsilon_j) \frac{\cos \theta_B}{2\alpha_B^3} k_x. \tag{3}$$

Пространственная функция спектрального переноса (3) может быть представлена вблизи $k_x = 0$ как

$$H(k_x) \approx ik_x A, \tag{4}$$

где A – комплексная константа. Ур. (4) является передаточной функцией дифференциатора первого порядка. Соответственно, в пространственной области профиль отражённого поля описывается аппроксимацией $S_{out} = A(dS_{in}/dx)$. Таким образом, пространственное дифференцирование может быть реализовано на основе эффекта Брюстера для p -поляризованного излучения. Для света с поляризацией, отличной от p , и неоднородно поляризованного света [17] этот подход работать не будет.

Оценка разрешения

Результаты оптического преобразования изображения можно рассмотреть на примере использования щелевой апертуры с регулируемой шириной, выполняющей роль объекта О. Пространственные распределения интенсивности пучка, прошедшего щелевую апертуру, и пучка, отражённого от призмы под углом Брюстера, показаны на рис. 2а, б соответственно.

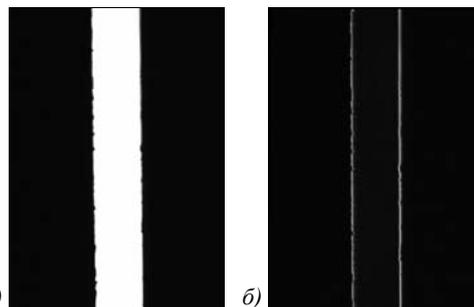


Рис. 2. Оптическое дифференцирование кусочно-гладкого распределения интенсивности: изображение интенсивности пучка, проходящего через щелевую апертуру с контролируемой шириной (200 мкм) (а), и распределение интенсивности отражённого пучка (б)

На изображении пучка, отраженного от призмы, наблюдаются узкие пики интенсивности, соответствующие рассеянию света на краях апертуры, что напрямую демонстрирует эффект пространственного дифференцирования и выделения контуров изображения. В качестве экспериментального исследования характеристик пространственного дифференцирования мы приводим сечения интенсивности перпендикулярно направлению щели для различных значений ширины щели, как показано на рис. 3. Для удобства сравнения профили интенсивности выровнены по центру. Значения интенсивности в каждом сечении нормированы на максимальное значение в этом сечении.

На графиках, показанных на рис. 3а, распределения интенсивности изображений щелевой апертуры получены для значений ширины 25, 100 и 200 мкм.

Флуктуации интенсивности, наблюдаемые вблизи пиков на рис. 2 и 3, появляются в результате дифракции света на краях щелевой апертуры, что ухудшает разрешающую способность оптической системы.

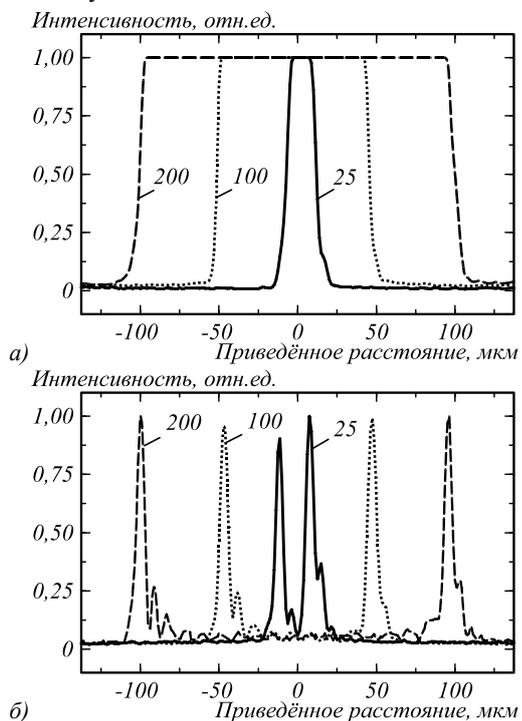


Рис. 3. Пространственное дифференцирование для пучков, прошедших щелевые апертуры: нормированная интенсивность поля, прошедшего щелевую апертуру для значений ширины 200 мкм (пунктирная линия), 100 мкм (точечная линия) и 25 мкм (сплошная линия) (а); нормированная средняя интенсивность преобразованного поля (б)

Разрешающая способность оптической схемы на основе преобразования Брюстера может быть определена измерением пространственной ширины пиков в распределении интенсивности преобразованного изображения на полувысоте интенсивности. В соответствии с графиком на рис. 3б, ширина пиков равна 6 мкм. Таким образом, эффективность обработки изображения ухудшается с уменьшением линейных размеров образца до порядка 12 мкм, что определяет предел пространственного разрешения. При уменьшении ширины щели с 200 мкм до 25 мкм значительного изменения ширины пиков интенсивности не происходит. Таким образом, минимальная ширина щелевой апертуры, при которой сохраняется качество оптического дифференцирования, составляет около 12 мкм. Полученный предел разрешения сопоставим со значениями в 7 мкм, приведёнными для оптической схемы аналогового дифференцирования на основе резонансов мод поверхностных плазмон-полюритонов в работе [9].

Экспериментальная демонстрация для амплитудного объекта

В данном параграфе представлены результаты эксперимента по обработке изображений амплитуд-

ных образцов, представляющих собой маску в оптически непрозрачной пленке оксида хрома на стеклянной подложке. В непрозрачном слое на прозрачной подложке сформированы изображения, представленные на рис. 4а, в и рис. 5а, в. Изображения на рис. 4а, в включают криволинейный логотип Самарского национального исследовательского университета и надпись. Изображения на рис. 5а, в представляют собой скрещенные полосы для демонстрации преимущественного направления операции дифференцирования. Для проверки влияния фона были созданы два типа структур в пленке. Первый вариант – прозрачное изображение на непрозрачном фоне (рис. 4а и 5а). Вторым вариантом – непрозрачное изображение на прозрачном фоне (рис. 4в и 5в). Распределения интенсивности преобразованных изображений представлены на рис. 4б, г и рис. 5б, г. На изображениях после преобразования наблюдаются яркие линии, преимущественно соответствующие вертикальным краям изображений. Линии, соответствующие горизонтальным краям, не проявляются.



Рис. 4. Выделение контуров для амплитудного образца с линейными размерами 2,5×2,5 мм: оригинальные изображения (а), (в); соответствующие преобразованные изображения (б), (г)

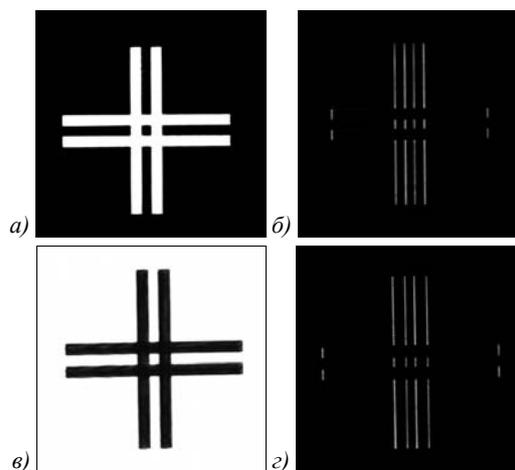


Рис. 5. Демонстрация направленности выделения контуров для амплитудного образца с размерами 2,5×2,5 мм: оригинальные изображения (а), (в); соответствующие преобразованные изображения (б), (г)

Вследствие природы эффекта Брюстера дифференцирование производится только вдоль одного направления, в нашем случае – вертикального. Выделение контуров для первого и второго вариантов структур дало идентичные результаты. Сравнение разных типов изображений показало отсутствие влияния фона на результат преобразования. Эксперименты с изображениями различных размеров показали, что эффективность выделения контуров снижается с уменьшением минимальных размеров элементов изображений.

Экспериментальная демонстрация для фазового объекта

Далее приведены результаты для фазового образца. Изготовление фазовых оптических элементов может быть осуществлено технологиями фотолитографии [18], разрешению записи при этом ограничено дифракцией. Формирование рельефа в прозрачной маске было проведено электронно-лучевой литографией на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Supra 25, что позволило осуществить запись структуры с большей точностью. Таким образом, используемая в работе структура представляет собой маску в прозрачной плёнке электронного резиста с показателем преломления 1,46 и толщиной 550 нм на стеклянной подложке. Изображение маски в резисте на прозрачной подложке представлено на рис. 6а. Маска состоит из перекрещенных полос шириной 100 мкм каждая. Пучок, прошедший через подложку и резист, приобретает набег фазы по сравнению с пучком, прошедшим только подложку.

Принцип преобразования изображения для фазового образца происходит аналогично принципу, описанному ранее для амплитудного образца. В этом случае вдали от краев маски, где происходит скачок фазы, пучки могут рассматриваться как невозмущенные фоновые. Тогда результатом преобразования (4) будет близкая к нулю интенсивность. Вблизи краёв маски происходит рассеяние света, которое приводит к возрастанию интенсивности преобразованного изображения. Пример изображения, полученного в результате преобразования, представлен на рис. 6б.

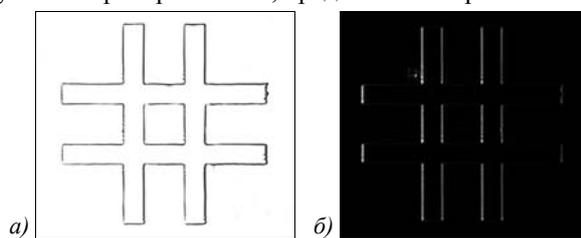


Рис. 6. Выделение контуров для фазового образца: оригинальное изображение (а), изображение после преобразования (б)

Заключение

Проведенные в работе теоретическое обоснование и экспериментальное исследование показывают возможность применения эффекта Брюстера для пространственного дифференцирования для поляризованного света. Также экспериментально продемонстриро-

вана эффективность выделения контуров амплитудного и фазового изображений при использовании более простой оптической системы по сравнению с предыдущими реализациями. Выделение контуров изображения осуществляется только в направлении, перпендикулярном плоскости падения луча. Экспериментальный предел достижимого разрешения обработки амплитудного и фазового изображений на собранной оптической схеме составил 6 мкм. Разработанная оптическая система позволяет в режиме реального времени обрабатывать целиком изображения с размерами, обусловленными габаритами поверхности призмы.

Результаты, полученные в данном проекте, могут быть использованы для создания компактных систем сверхбыстрых аналоговых вычислений и обработки изображений реального времени в медицинских и геоинформационных приложениях, для расширения возможностей существующих оптических устройств и для создания новых устройств, в том числе опто-электронных систем на чипе.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) в части «Экспериментальная демонстрация для фазового объекта», Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-00613) в остальных частях. Авторы выражают благодарность сотрудникам ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» В.В. Подлипову, С.Г. Волотовскому и С.В. Ганчевской за создание фазовых и амплитудных масок.

Литература

1. **Goodman, J.W.** Introduction to Fourier optics / J.W Goodman. - New York: McGraw-hill, 1996. - 441 p. - ISBN: 978-0-07-114257-1.
2. **Silva, A.** Performing mathematical operations with metamaterials / A. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alù, N. Engheta // Science. – 2014. – Vol. 343, Issue 6167. – P. 160-163. – DOI: 10.1126/science.1242818.
3. **Pors, A.** Analog computing using reflective plasmonic metasurfaces / A. Pors, M.G. Nielsen, S.I. Bozhevolnyi // Nano Letters. – 2014. - Vol. 15, Issue 1. - P. 791-797. – DOI: 10.1021/nl5047297.
4. **Hwang, Y.** Optical metasurfaces for subwavelength difference operations / Y. Hwang, T.J. Davis // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 109(18). – 181101. – DOI: 10.1063/1.4966666.
5. **Kazanskiy, N.L.** Use of photonic crystal cavities for temporal differentiation of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38, Issue 7. – P. 1149-1151. – DOI: 10.1364/OL.38.001149.
6. **Doskolovich, L.L.** Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, E.A. Bezus, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39, Issue 5. - P. 1278-1281. – DOI: 10.1364/OL.39.001278.
7. **Golovastikov, N.V.** Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings / N.V. Golovastikov,

- D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus // Optics Communications. – 2015. – Vol. 338. – P. 457-460. – DOI: 10.1016/j.optcom.2014.11.007.
8. **Bykov, D.A.** Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, V.A. Soifer // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, Issue 21. – P. 25084-25092. – DOI: 10.1364/OE.22.025084.
 9. **Golovastikov, N.V.** Analytical description of 3D optical pulse diffraction by a phase-shifted Bragg grating / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // Optics Express. – 2016. – Vol. 24, Issue 17. – P. 18828-18842. – DOI: 10.1364/OE.24.018828.
 10. **Kazanskiy, N.L.** Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, Issue 11. – P. 14004-14013. – DOI: 10.1364/OE.22.014004.
 11. **Головастик, Н.В.** Дифференцирование и интегрирование трёхмерного оптического импульса во времени с использованием брэгговских решёток с дефектным слоем / Н.В. Головастик, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 13-21. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-13-21.
 12. **Dyachenko, P.N.** The three-dimensional photonic crystals coated by gold nanoparticles / P.N. Dyachenko, S.V. Karpeev, E.V. Fesik, Yu.V. Miklyaev, V.S. Pavelyev, G.D. Malchikov // Optics Communications. – 2011. – Vol. 284, Issue 3. – P. 885-888. – DOI: 10.1016/J.OPTCOM. 2010.10.006.
 13. **Zhu, T.** Plasmonic computing of spatial differentiation / T. Zhu, Y. Zhou, Y. Lou, H. Ye, M. Qiu, Z. Ruan, S. Fan // Nature Communications. – 2017. – Vol. 8. – 15391. – DOI: 10.1038/ncomms15391.
 14. **Youssefi, A.** Analog computing by Brewster effect / A. Youssefi, F. Zangeneh-Nejad, S. Abdollahramezani, A. Khavasi // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41, Issue 15. – P. 3467-3470. – DOI: 10.1364/OL.41.003467.
 15. **Yeh, P.** Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory / P. Yeh, A. Yariv, C.-S. Hong // Journal of the Optical Society of America. – 1977. – Vol. 67, Issue 4. – P. 423-438. – DOI: 10.1364/JOSA.67.000423.
 16. **Nesterenko, D.V.** Asymmetric surface plasmon resonances revisited as Fano resonances / D.V. Nesterenko, S. Hayashi, Z. Sekkat // Physical Review B. – 2018. – Vol. 97, Issue 23. – 235437. – DOI: 10.1103/PhysRevB.97.235437.
 17. **Khonina, S.N.** Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of DOEs / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // Journal of the Optical Society of America A. – 2011. – Vol. 28(10). – P. 2115-2123. – DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
 18. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V. Uspleniev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15, Issue 5. – P. 331-340. – DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.

Сведения об авторах

Нестеренко Дмитрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, и.о. старшего научного сотрудника лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. E-mail: nesterenko@ssau.ru.

Колесникова Мария Дмитриевна (1997) в настоящее время обучается в Самарском национальном исследовательском университете по направлению «Электроника и наноэлектроника». E-mail: mari.kolesnikova.11@mail.ru.

Любарская Анна Валериевна (1997) в настоящее время обучается в Самарском национальном исследовательском университете по направлению «Электроника и наноэлектроника». E-mail: anya.lyubarskaya@mail.ru.

ГРПТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 1 октября 2018 г. Окончательный вариант – 14 октября 2018 г.

OPTICAL DIFFERENTIATION BASED ON THE BREWSTER EFFECT

D.V. Nesterenko^{1,2}, M.D. Kolesnikova², A.V. Lyubarskaya²

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia;

²Samara National Research University, Moskovskoye shosse 34, 443086, Samara, Russia

Abstract

In this work, technologies of analog optical computing for image edge detection using flat interfaces between dielectrics are studied both theoretically and experimentally. The feasibility of analog differentiation and edge detection by using the Brewster effect for polarized light sources is demonstrated. The efficiency of the analog image processing is investigated using a variety of amplitude and phase masks.

Keywords: nanophotonics, optical analog computing, planar structures, waveguide mode, optical resonances, Brewster effect, image processing.

Citation: Nesterenko DV, Kolesnikova MD, Lyubarskaya AV. Optical differentiation based on the Brewster effect. Computer Optics 2018; 42(5): 758-763. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-758-763.

Acknowledgements: This work was partly funded by Ministry of Science and Higher Education within the State assignment FSRC “Crystallography and Photonics” RAS under agreement 007-Г3/Ч3363/26 (“Experimental demonstration for phase objects”) and the Russian Foundation for Basic Research under project No. 18-07-00613 (the rest sections).

References

- [1] Goodman JW. Introduction to Fourier Optics. New York: McGraw-hill; 1996. ISBN: 978-0-07-114257-1.
- [2] Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alù A, Engheta N. Performing mathematical operations with metamaterials. *Science* 2014; 343: 160-163. DOI: 10.1126/science.1242818.
- [3] Pors A, Nielsen MG, Bozhevolnyi SI. Analog computing using reflective plasmonic metasurfaces. *Nano Lett* 2014; 15(1): 791-797. DOI: 10.1021/nl5047297.
- [4] Hwang Y, Davis TJ. Optical metasurfaces for subwavelength difference operations. *Appl Phys Lett* 2016; 109(18): 181101. DOI: 10.1063/1.4966666.
- [5] Kazanskiy NL, Serafimovich PG, Khonina SN. Use of photonic crystal cavities for temporal differentiation of optical signals. *Opt Lett* 2013; 38(7): 1149-1151. DOI: 10.1364/OL.38.001149.
- [6] Doskolovich LL, Bykov DA, Bezus EA, Soifer VA. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating. *Opt Lett* 2014; 39(5): 1278-1281. DOI: 10.1364/OL.39.001278.
- [7] Golovastikov NV, Bykov DA, Doskolovich LL, Bezus EA. Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings. *Opt Commun* 2015; 338: 457-460. DOI: 10.1016/j.optcom.2014.11.007
- [8] Bykov DA, Doskolovich LL, Bezus EA, Soifer VA. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating. *Opt Express* 2014; 22(21): 25084-25092. DOI: 10.1364/OE.22.025084.
- [9] Golovastikov NV, Bykov DA, Doskolovich LL, Soifer VA. Analytical description of 3D optical pulse diffraction by a phase-shifted Bragg grating. *Opt Express* 2016; 24(17): 18828-18842. DOI: 10.1364/OE.24.018828.
- [10] Kazanskiy NL, Serafimovich PG. Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals. *Opt Express* 2014; 22(11): 14004-14013. DOI: 10.1364/OE.22.014004.
- [11] Golovastikov NV, Bykov DA, Doskolovich LL. Temporal differentiation and integration of 3D optical pulses using phase-shifted Bragg gratings [In Russian]. *Computer Optics* 2017; 41(1): 13-21. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-13-21.
- [12] Dyachenko PN, Karpeev SV, Fesik EV, Miklyaev YuV, Pavelyev VS, Malchikov GD. The three-dimensional photonic crystals coated by gold nanoparticles. *Opt Commun* 2011; 284(3): 885-888. DOI: 10.1016/J.OPTCOM.2010.10.006.
- [13] Zhu T, Zhou Y, Lou Y, Ye H, Qiu M, Ruan Z, Fan S. Plasmonic computing of spatial differentiation. *Nature Communications* 2017; 8: 15391. DOI: 10.1038/ncomms15391.
- [14] Youssefi A, Zangeneh-Nejad F, Abdollahramezani S, Khavasi A. Analog computing by Brewster effect. *Opt Lett* 2016; 41(15): 3467-3470. DOI: 10.1364/OL.41.003467.
- [15] Yeh P, Yariv A, Hong CS. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory. *J Opt Soc Am* 1977; 67(4): 423-438. DOI: 10.1364/JOSA.67.000423.
- [16] Nesterenko DV, Hayashi S, Sekkat Z. Asymmetric surface plasmon resonances revisited as Fano resonances. *Phys Rev B* 2018; 97(23): 235437. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.235437.
- [17] Khonina SN, Karpeev SV. Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of DOEs. *J Opt Soc Am A* 2011; 28(10): 2115-2123. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
- [18] Berezny AE, Karpeev SV, Uspleniev GV. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography. *Optics and Lasers in Engineering* 1991; 15(5): 331-340. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.

Authors' information

Dmitry V. Nesterenko graduated with honours (1999) from Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Physics. Candidate in Optics (2002). Currently he is a senior researcher at Diffractive Optics laboratory of Image Processing Systems Institute RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. His current research interests include nanophotonics, plasmonics and electromagnetic diffraction theory. E-mail: nesterenko@ssau.ru.

Maria D. Kolesnikova currently studying at the Samara National Research University in the direction of “Electronics and Nanoelectronics”. E-mail: mari.kolesnikova.11@mail.ru.

Anna V. Lyubarskaya currently studying at the Samara National Research University in the direction of “Electronics and Nanoelectronics”. E-mail: anya.lyubarskaya@mail.ru.

Received October 1, 2018. The final version – October 14, 2018.