

# Зависимость направленности выделения контуров изображения на основе эффекта Брюстера от градиента неоднородности объекта

Д.В. Нестеренко<sup>1,2</sup>, А.В. Любарская<sup>1</sup>, М.Д. Колесникова<sup>1</sup>, В.А. Сойфер<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

**Аннотация.** В работе теоретически и экспериментально изучается влияние направления градиента амплитуды и фазы объекта на направленность выделения контуров на изображении на основе эффекта Брюстера. Исследуется поведение передаточной функции для лучей, распространяющихся в плоскости падения и вне нее. Результаты исследования могут быть использованы для создания аналоговых оптических систем обработки изображений и информации.

## 1. Введение

Исследованиям в области аналоговой обработки изображений в последнее время уделяется большое внимание. Так, реализация оптического дифференцирования на основе возбуждения мод поверхностных плазмон-поляритонов в конфигурации Кречмана была описана в работе [1]. Задача выделения контуров изображений была решена с использованием резонансных структур для монохроматического излучения и показана их эффективность в реализации широкого класса математических операций над световыми сигналами [2-7]. Использование эффекта Брюстера для пространственного дифференцирования поляризованных оптических сигналов было предложено в теоретической работе [8]. Малая, в отличие от металлов, дисперсия диэлектриков предполагает, что этот эффект может эффективно применяться для широкополосного поляризованного источника излучения. Экспериментальная проверка возможности применения эффекта Брюстера для оптического выделения контуров изображений как фазовых, так и амплитудных объектов была проведена в работе [9]. На основе экспериментальных данных было отмечено, что это оптическое преобразование зависит от направления изменения неоднородности объектов. Однако, передаточная функция в [9] была записана только для одномерного распределения сигнала в плоскости падения луча.

В данной работе теоретически и экспериментально исследуется влияние направления градиента двумерного распределения неоднородности образца на направление оптического дифференцирования на основе эффекта Брюстера.

## 2. Описание эксперимента

Известно, что при падении плоской  $p$  поляризованной волны под определённым углом  $\theta_B$  на границу раздела двух диэлектриков с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  коэффициент

отражения стремится к нулю, а пропускание достигает максимального значения. Угол  $\theta_B$  называется углом Брюстера, где  $\tan(\theta_B) = n_2 / n_1$ , а этот эффект называется эффектом Брюстера. Схема оптической системы, используемой для проведения экспериментального исследования, приведена на рис. 1, где  $ND$  – фильтр нейтральной оптической плотности,  $P$  – поляризатор,  $L_1$  и  $L_2$  – линзы коллиматора,  $A$  – апертура,  $O$  – оптическая структура,  $Pr$  – призма,  $L_3$  – линза,  $PD$  – фоточувствительная матрица. Описание работы данной оптической схемы приведено в работе [3].

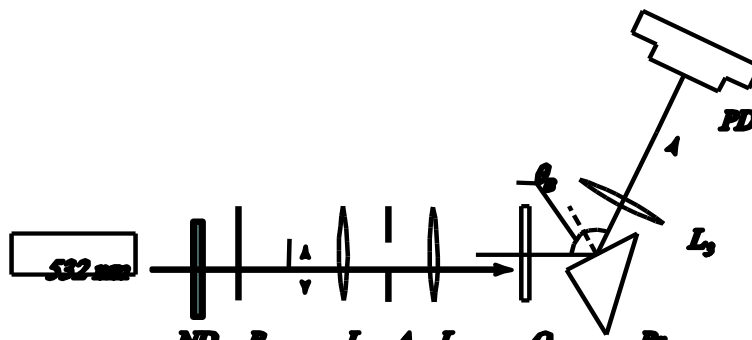


Рисунок 1. Оптическая схема.

Изображение объекта на матрицу  $PD$  производится линзой  $L_3$ , фокусирующей рассеянные от объекта лучи. Предположим, что падающий и отраженный пучки имеют профили поля  $S_{in}(x, y)$  и  $S_{out}(x, y)$  в системе координат луча, соответственно, где  $x$  – координата, перпендикулярная направлениям распространения луча и магнитного поля, и  $y$  – координата, параллельная направлению магнитного поля. С помощью пространственного преобразования Фурье падающий (отраженный) пучок может быть записан как суперпозиция плоских волн  $S_{in(out)}(x, y) = \iint s_{in(out)}(k_x, k_y) \exp(ik_x x + ik_y y) dk_x dk_y$ , где  $k_x$  и  $k_y$  – компоненты волнового вектора плоской волны вдоль направления  $x$  и  $y$ , соответственно, а  $s_{in(out)}(k_x, k_y)$  – соответствующие амплитуды. Следовательно, преобразование профиля падающего поля в отраженное описывается пространственной функцией спектрального переноса  $H(k_x, k_y)$ , где  $H(k_x, k_y) = s_{out}(k_x, k_y) / s_{in}(k_x, k_y)$ .

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

Для анализа  $H(k_x, k_y)$  коэффициент отражения  $r_{12}$  ТМ поляризованной плоской волны от границы раздела сред с диэлектрическими постоянными  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  можно записать как:

$$r_{12}(\alpha, \beta) \approx \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2\alpha_B^3} (\alpha - \alpha_B) + \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \frac{\beta}{\alpha_B} \cos \theta_B, \quad (1)$$

где  $\alpha = n_1 \sin \theta$ , где  $2\pi\alpha / \lambda$  – проекция волнового вектора плоской волны с длиной волны  $\lambda$  на границу раздела сред в плоскости падения волны под углом  $\theta$  к нормали,  $2\pi\beta / \lambda$  – проекция волнового вектора на ось  $y$ . При  $\alpha_B = \sqrt{\epsilon_i \epsilon_j / (\epsilon_i + \epsilon_j)}$  и  $\beta = 0$ , коэффициент отражения  $r_{ij} = 0$ .

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

$$H(k_x, k_y) \approx \left[ (\epsilon_1 - \epsilon_2) \frac{k_x}{2\alpha_B^3} + \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \frac{k_y}{\alpha_B} \right] \cos \theta_B. \quad (2)$$

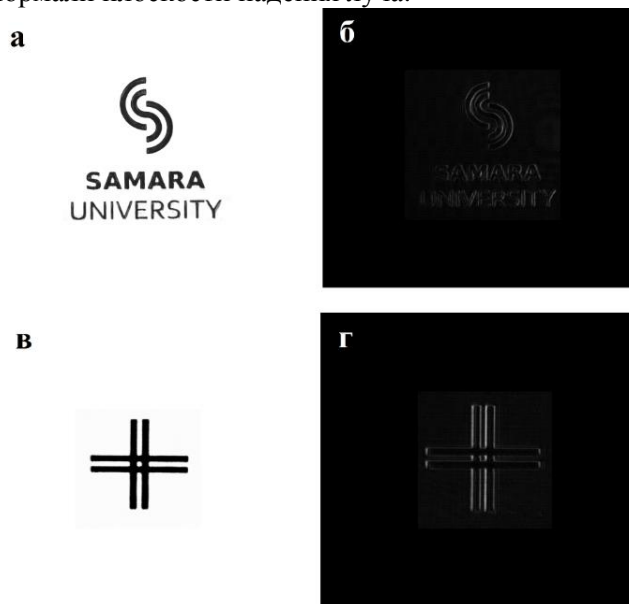
Пространственная функция спектрального переноса (2) может быть представлена вблизи  $k_x, k_y = 0$  как

$$H(k_x, k_y) \approx ik_x A + ik_y B, \quad (3)$$

где  $A$  и  $B$  – комплексные константы. Ур. (3) является передаточной функцией дифференциатора первого порядка. Соответственно, в пространственной области профиль отражённого поля описывается аппроксимацией  $S_{out} = A(S_{in})'_x + B(S_{in})'_y$ . Таким образом, пространственное дифференцирование может быть реализовано на основе эффекта Брюстера для  $p$ -поляризованного двумерного распределения излучения. Для воздуха ( $n_1 = 1$ ) и призмы BK7 ( $n_2 = 1,515$ )  $|A|^2 / |B|^2 > 20$ , в этом случае интенсивность результата дифференцирования по оси  $x$  превышает интенсивность дифференцирования по оси  $y$  более, чем в 20 раз.

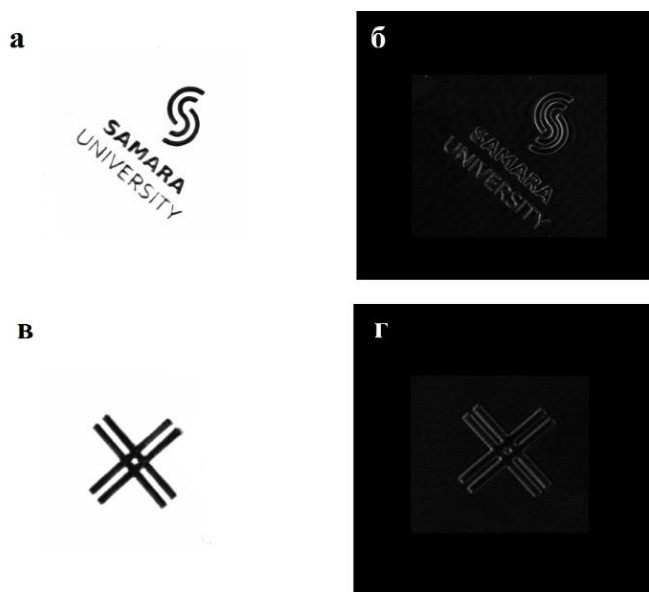
### 3. Результаты и обсуждение

В качестве образцов были использованы амплитудные маски в оптически непрозрачной пленке оксида хрома на стеклянной подложке. На рисунках 1(а) и 1(в) представлены изображения изготовленных масок в следующем положении: криволинейный логотип с горизонтальной надписью и крест, состоящий из горизонтальных и вертикальных полос. На рисунках 1(б) и 1(г) представлены соответствующие преобразованные изображения. На рисунках видно, что выделение контуров производится преимущественно вдоль вертикального направления, которое параллельно нормали плоскости падения луча.



**Рисунок 1.** Демонстрация направленности выделения контуров для амплитудного образца с размерами 1200 мкм, поворот  $0^\circ$  на прозрачной подложке: (а), (в) оригинальные изображения, (б), (г) соответствующие преобразованные изображения.

Для проверки зависимости направленности выделения контуров изображения, мы провели эксперименты с поворотом образца. На рисунке 2(а) и 2(в) представлены изображения образцов, ориентированных под углом  $45^\circ$  относительно оригинального положения. Преобразованные изображения повернутых масок показаны на рисунках 2(б) и 2(г). Выраженные яркие вертикальные контура криволинейного логотипа выделяют другую область. Текст, преимущественно состоящий из линий, располагающихся под углом  $45^\circ$ , почти полностью подсвечен. Преобразованное изображение маски «крест» приведено на рисунке 2(г). В этом случае наблюдается равномерная интенсивность контуров, поскольку все градиенты маски расположены под углом  $45^\circ$ .



**Рисунок 2.** Демонстрация направленности выделения контуров для амплитудного образца с размерами 1200 мкм, поворот 45° на прозрачной подложке: (а), (в) оригинальное изображение, (б), (г) соответствующее преобразованное изображение.

Градиенты маски, ориентированные горизонтально, рассеивают лучи преимущественно в плоскости распространения луча. Преобразование пространственного дифференцирования этих лучей в направлении  $x$  происходит с амплитудой  $A$ . Градиенты маски, ориентированные вертикально, рассеивают лучи преимущественно в плоскости, нормальной плоскости распространения луча. Преобразование пространственного дифференцирования этих лучей в направлении  $y$  происходит с амплитудой  $B$ . Таким образом, интенсивность преобразования градиентов маски, ориентированных горизонтально, в 20 раз больше интенсивности преобразования градиентов маски, ориентированных вертикально. Для градиентов маски, ориентированных под углом 45°, наблюдается равная интенсивность, в 6 раз меньшая градиентов маски, ориентированных горизонтально.

#### 4. Заключение

В данной работе экспериментально и теоретически показано, что выделение контуров двумерных изображений объектов на основе преобразования Брюстера преимущественно осуществляется для неоднородностей объекта, градиент которых параллелен плоскости падения луча. Рассмотренный эффект может применяться для селективной обработки изображений амплитудных и фазовых объектов с линейными размерами более длины волны используемого источника излучения в микроскопии биологических и медицинских исследований.

#### 5. Литература

- [1] 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. – P. 1-3. DOI: 10.1038/ncomms15391.
- [2] 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(5). – P. 1278-1281. – DOI: 10.1364/OL.39.001278.
- [3] 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.

- [4] 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(21). – P. 25084-25092. DOI: 10.1364/OE.22.025084.
- [5] 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(17). – P. 18828-18842. DOI: 10.1364/OE.24.018828.
- [6] Kazanskiy, N.L. Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(11). – P. 14004-14013. DOI: 10.1364/OE.22.014004.
- [7] Головастикова, Н.В. Дифференцирование и интегрирование трёхмерного оптического импульса во времени с использованием брэгговских решёток с дефектным слоем / Н.В. Головастикова, 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.
- [8] Youssefi, A. Analog computing by Brewster effect / A. Youssefi, F. Zangeneh-Nejad, S. Abdollahramezani, A. Khavasi // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41(15). – P. 3467.
- [9] 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.

### Благодарности

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

## The dependence of the image edge detection directivity by Brewster effect on the gradient of inhomogeneities of objects

D.V. Nesterenko<sup>1,2</sup>, A.V. Lyubarskaya<sup>1</sup>, M.D. Kolesnikova<sup>1</sup>, V.A. Soifer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** The influence of the direction of the gradient of the amplitude and phase of objects on the directivity of the image edge detection by Brewster effect is studied both theoretically and experimentally. We study the transfer function for in-plane and out-of-plane rays. The results of the study can be used in optical systems for image and information processing.