

НАБЛЮДЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ МОДОВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

© 2013 М.Ю. Понамарев

Институт систем обработки изображений Российской академии наук, г. Самара

Поступила в редакцию 05.11.2013

Рассматривается формирование дифракционной картины при прохождении световых пучков Бесселя и Гаусса-Лагерра через пластины кристаллического кварца. Экспериментальные исследования показывают различия в формировании изображений и выявляют изменения в симметричной структуре пучков в зависимости от ориентации пластины кристалла. Предлагаемый эксперимент позволяет увидеть преимущества структурных пучков Гаусса-Лагерра перед Бесселевыми пучками в картине дифракции при прохождении через кристалл. Результаты работы существенны для исследования механизмов дифракции световых пучков в природных кристаллах

Ключевые слова: дифракция, оптические параметры, кристаллический кварц, структурные световые пучки, формирование изображений.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области получения изображений дифракции когерентного излучения на различных структурах находят практическое применение при решении задач анализа неизвестных оптических свойств различных анизотропных материалов (диэлектрической проницаемости) по спектрофотометрическим данным.

Структурные световые пучки, характеризующиеся различными модами лазерного излучения [1-6], находят применение в разнообразных областях благодаря своим особым свойствам. Одни типы мод проявляют «бездифракционные» свойства [4], т.е. не уширяются и не расплываются при распространении, другие обладают орбитальным угловым моментом и используются при оптическом манипулировании и других приложениях сингулярной оптики, третьи демонстрируют «баллистические» свойства.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию формирования изображений дифракции лазерных пучков на трехмерной решетке, образованной атомами в пластине кристаллического кварца.

Применение структурных световых пучков, например пучков Бесселя и Гаусса-Лагерра, которые обладают целым рядом особенных свойств, позволяет проводить качественный анализ и интерпретацию результатов дифракционных экспериментов.

Использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1], позволяет эффективно решать задачу формирования лазерных пучков с за-

данным модовым составом и их весовым вкладом. Наиболее энергетически выгодными являются фазовые ДОЭ, для расчета которых были разработаны как итерационные алгоритмы, так и методы кодирования [6-7]. Итеративные методы обеспечивают высокую дифракционную эффективность, а методы кодирования - высокую точность преобразования фундаментальной лазерной моды в высшие моды практически любого типа – моды Бесселя, моды Лагерра-Гаусса и Эрмита-Гаусса, гипергеометрические моды, пучки Эйри и др. На рис. 1 показаны примеры изображений структурных пучков, сформированных с использованием ДОЭ.

Для исследования рассеяния лазерного излучения в кристалле кварца в работе [8] было предложено исследовать характер неоднородности кристалла, возникающей в точке фазового превращения и приводящее к сильному возрастанию интенсивности рассеянного света. Результат подобных дифракционных измерений показал, что неоднородности вытянуты вдоль оптической оси кристалла.

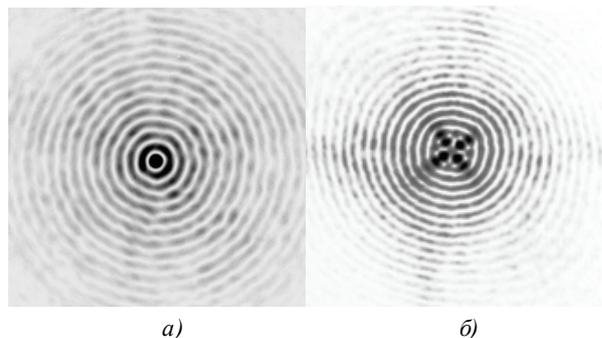


Рис. 1. Изображение структурных пучков, полученные с использованием ДОЭ: а – пучок Бесселя; б – пучок Гаусса-Лагерра

Понамарев Максим Юрьевич, стажер-исследователь.
E-mail: mponomarev1978@gmail.com

В работе [9] был продемонстрирован способ формирования дифракционной картины при прохождении пучка Бесселя через кристаллическую пластину. Для получения пучка в работе использовался аксикон, а не ДОЭ.

Остаются неисследованными следующие проблемы: 1) исследования изменения структурных пучков, сформированных ДОЭ при прохождении через кристалл, поскольку энергетическая структура пучков, сформированных ДОЭ, отличается от структурных пучков сформированных рефракционными элементами, и 2) исследования изменения структурных пучков других типов, например, пучков Бесселя более высоких порядков.

Теоретическая модель формирования дифракционной картины при прохождении световых пучков Бесселя рассмотрена в [4]. Теоретическое рассмотрение распространения пучка Бесселя для одноосных кристаллов дано в [8].

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВОДИМОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Кристаллический кварц (горный хрусталь) является самым распространённым минералом в земной коре. Кристаллы кварца – шестигранные призмы и имеют шестигранную структурную решётку (рис. 2) [11].

Кристаллический кварц является анизотропным одноосным кристаллом. Материал обладает выраженным двулучепреломлением и высокой объёмной однородностью показателя преломления. Диапазон оптической прозрачности кристаллического кварца достаточно широк и определяется полосой длин волн 0,15-4 микрона [9].

На элементарную ячейку кристалла кварца, имеющую при комнатной температуре параметры $a=4,90 \text{ \AA}$, $c=5,39 \text{ \AA}$, приходятся три молекулы SiO_2 .



Рис. 2. Модель кристаллической решетки кварца в пространстве

Пространственная модель кристаллической решётки кварца выглядит следующим образом (рис. 3) [8].

Схема распределения узлов кристаллической решетки кварца при наблюдении перпендикулярно оптической оси кристалла представлена на рис. 4.

В поставленном эксперименте формируется дифракционная картина, показывающая про-

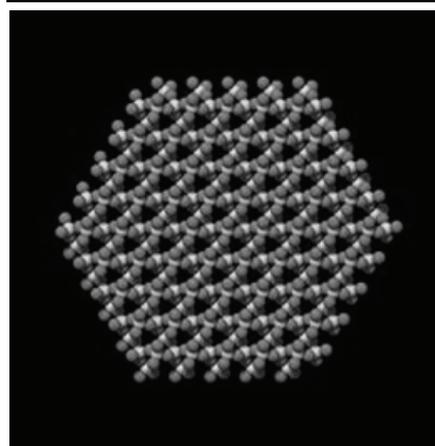
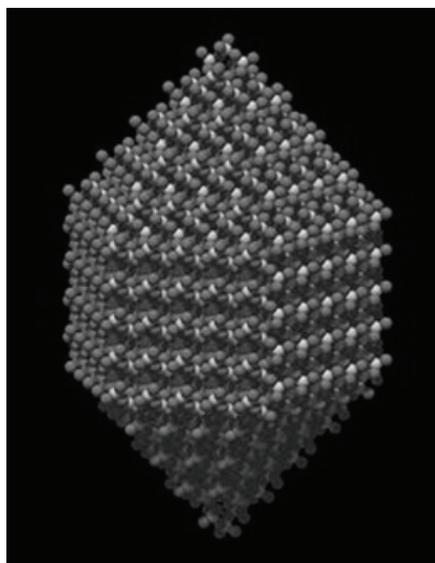


Рис. 3. Пространственная модель кристаллической решетки кварца

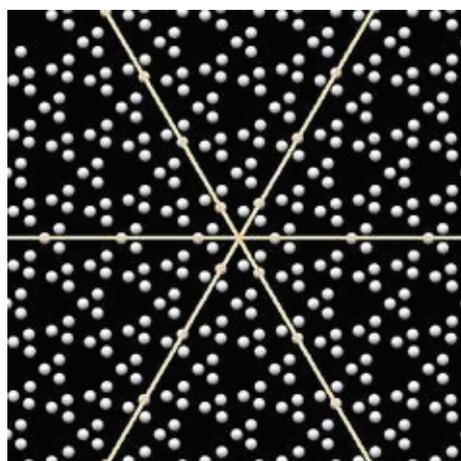


Рис. 4. Схема распределения узлов кристаллической решетки кварца

изошедшие изменения в симметрической структуре световых пучков Бесселя и Гаусса-Лагерра при прохождении через кристаллическую пластину кварца.

Кристаллическая решетка имеет набор присущих ей расстояний между плоскостями расположения атомов в решётке. Дифракционные картины, создаваемые всеми атомами в каждой плоскости, складываются, практически не влияя одна на другую. Следовательно, дифракционная картина от N плоскостей изменится незначительно по сравнению с дифракционной картиной от отдельной плоскости, но не изменит своей структуры.

Объясняется это следующим образом. Хотя световые пучки от двух или большего числа полос могут интерферировать друг с другом и образовывать дополнительные интерференционные полосы, но разность хода для всех таких комбинаций различна. Поэтому максимумы и минимумы дополнительных полос налагаются друг на друга, в результате чего в среднем остаются неизменными, если не считать слабой радиальной структуры.

Это обстоятельство и используется в данном эксперименте для получения наглядного изображения с перераспределением энергии излучения при прохождении через кристаллическую пластину. Сравнивая изображения пучков, прошедших и не прошедших через кристаллическую решётку, можно выделить изменения, вносимые кристаллической структурой в распределение энергии пучка.

При повороте кристаллов по отношению к оси распространения пучков были обнаружены определенные шаблоны перераспределения энергии в выходной плоскости.

Однако математическая модель, позволяющая провести расчёты для численного сравнения данных натурального эксперимента с теоретическим, предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам, поскольку требует решения прямой задачи оптики, связанной с вычислением интеграла Кирхгофа [10-15].

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Целью проводимого эксперимента является регистрация различных изображений формируемых структурным пучком, прошедшим через кристаллическую пластину, при изменении угла наклона пластины.

При проведении эксперимента использовались ДОЭ, изготовленные на оборудовании исследовательско-технологического центра дифракционной оптики [16, 17] методом фотолитографии и плазмохимического травления

микрорельефа [18-23].

Объектом исследования являлись 31 кристаллическая пластина, полученная из 11 различных кристаллов кварца (горного хрусталя). Толщина исследуемых пластин различная от 2 до 5 мм. Физические параметры пластин - размер: 80-170x70-110x15-55мм; плотность: 2,57-2,62 гр/см³; прозрачность: 97%; сингония: тригональная; агрегаты: сростки кристаллов, двойники; район добычи: месторождения Южного Урала (Челябинская область).

На основе анализа литературы и существующих методов исследования кристаллической решётки [24-26], была предложена следующая оптическая схема (рис. 5).

Рассматриваемая экспериментальная установка (рис. 6) состоит из лазера с длиной волны 633 нм (1), излучение от которого, пройдя пинхол (2) и дифракционный оптический элемент (ДОЭ) (3), сформировавший структурный пучок, далее падает на рассеивающую линзу (4), создающую расходящийся пучок для увеличения размеров анализируемой области изображения, который проходит через пластину природного кристалла горного хрусталя (5), собирающая линза

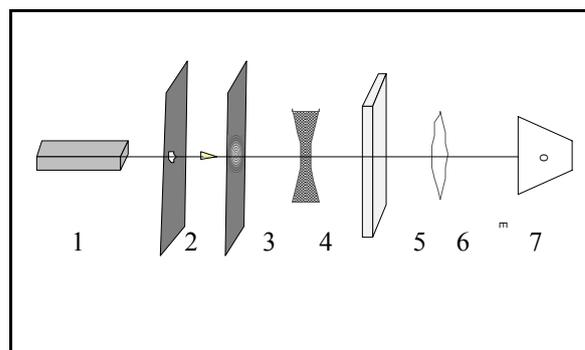


Рис. 5. Схема формирования световых пучков: 1 – источник лазерного излучения; 2 – пинхол; 3 – дифракционный оптический элемент (ДОЭ); 4 – рассеивающая линза; 5 – исследуемая кристаллическая пластина; 6 – собирающая линза; 7 – камера

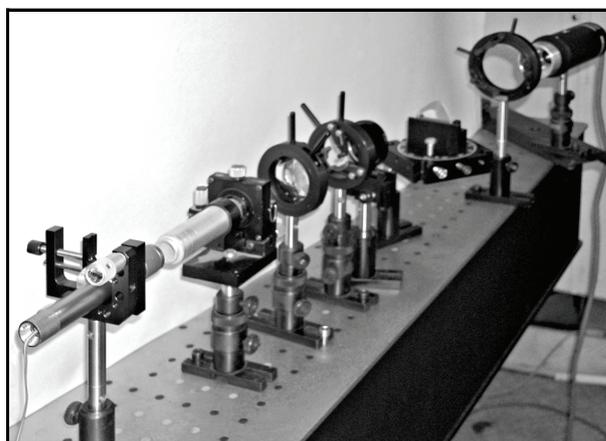


Рис. 6. Внешний вид экспериментальной установки

(6) служит для формирования изображения интерференционной картины на камере (7). Принципиальным отличием оптической системы в рассматриваемой установке от предложенной в работе [9] является использование ДОЭ для формирования структурных пучков.

Для полноты исследований пластины из каждого кристалла были нарезаны под различными углами к оптической оси самого кристалла. Параметры оптической оси кристаллов при проведении эксперимента были неизвестны.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Примеры изображений световых пучков, полученных при отсутствии кристаллической пластины, показаны на рисунке 1. Примеры полученных изображений при различных поворотах кристаллической пластины для пучка Бесселя приведены на рисунке 7. Угол поворота пластины менялся от -45° до 45° , с шагом изменения угла 5° , 0° соответствует перпендикулярному падению пучка на плоскость пластины.

Наблюдаемое распределение интенсивности показывает зависимость изменения структуры пучка от ориентации кристаллической пласти-

ны, поскольку поперечное распределение интенсивности демонстрирует зависимость от угла поворота кристаллической пластины. При детальном анализе интенсивности пучка на выходе можно заметить влияние осевой симметрии кристалла, показанной на рисунке 3, в виде модулированного азимутально-фазового сдвига оптического поля в выходной плоскости.

Дифракционная картина структурных пучков Гаусса – Лагерра, также демонстрирует трансформацию распределения интенсивности, как показано на примерах изображений (рис. 8).

При угле поворота около 15° (рис. 8в) наблюдаются минимальные изменения в радиальной симметрии пучка. По-видимому, при таком положении пластины световой пучок распространяется параллельно оптической оси кристалла и не подвергается искажениям. Т.е. в том случае, когда угол падения светового пучка составляет с оптической осью кристалла 0° , то в результирующем распределении интенсивности пучка наблюдается минимум искажений (рис. 7б и 8в). Таким образом, на основе проведенного эксперимента можно разработать практическую методику для определения оптических свойств кристаллической пластины.

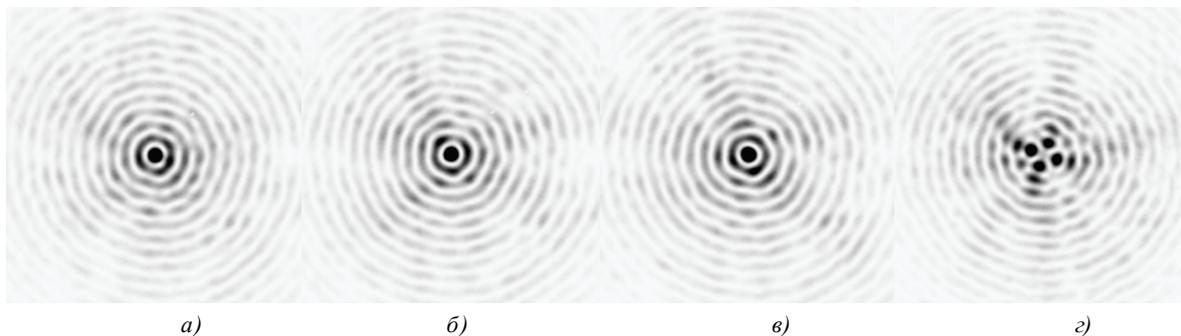


Рис. 7. Распределение интенсивности при прохождении пучка Бесселя через кристаллическую пластину при углах поворота: а – 0° , б – 10° , в – 20° , г – 30°

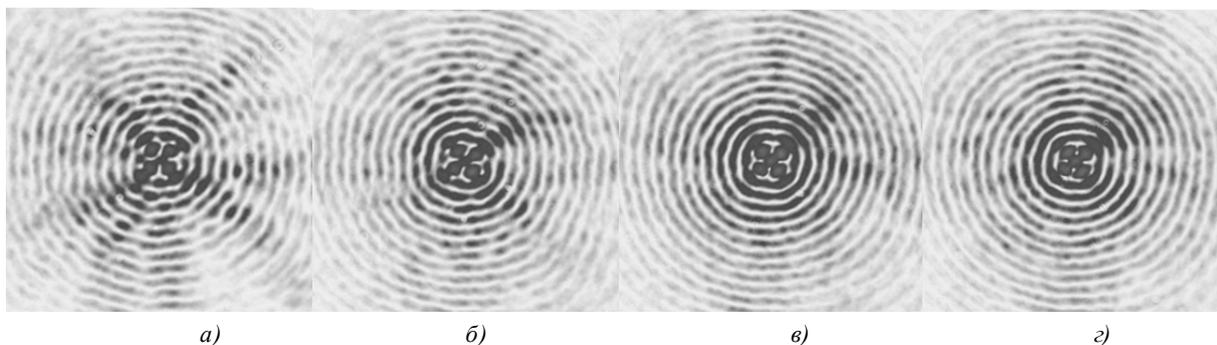


Рис. 8. Распределение интенсивности при прохождении пучка Гаусса-Лагерра через кристаллическую пластину при углах поворота: а – -15° , б – 0° , в – 15° , г – 30° .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проведены экспериментальные исследования трансформации распределения интенсивности пучков Бесселя как нулевого, так и более высоких порядков, а также пучков Гаусса-Лагерра.

Проведённый эксперимент показал, что изображение, формируемое в результате прохождения когерентного излучения через кристалл, обладает характерными особенностями. При повороте кристалла по отношению к оси распространения исследуемого пучка, на выходе было обнаружено образование распределение интенсивности сложной структуры.

При этом структурные пучки Гаусса-Лагерра имеют преимущества перед Бесселевыми пучками, т.к. не изменяют пространственной структуры после прохождении через кристалл, а лишь приобретают фазовый набег и сохраняют свою структуру в свободном пространстве, изменяясь лишь масштабно.

Ориентация кристалла существенным образом влияет на результирующее изображение. Поперечное распределение интенсивности зависит от угла поворота кристаллической пластины. Таким образом, данный эксперимент действительно подтверждает возможность оценивания, косвенным образом, параметров кристаллической структуры.

На основании полученных результатов предстоит рассчитать математическую модель описывающую распределение интенсивности когерентного излучения при прохождении через кристаллические структуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась при поддержке программы фундаментальных исследований РАН-ОНИТБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.В., Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Соифер В.А., Соловьев В.С., Успенев Г.В., Харитонов С.И., Хошина С.Н. Методы компьютерной оптики [под редакцией В.А. Соифера]. Издание 2-ое исправленное. М.: Физматлит. 2003. 688 с.
2. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Карпеев С.В., Мирзов А.В., Уваров Г.В. Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами // Квантовая электроника. 1988. Том 15, № 3. С. 617-618.
3. Карпеев С.В., Павельев В.С., Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Гаврилов А.В., Ерополов В.А. Fibre sensors based on transverse mode selection // Journal of Modern Optics. 2007. Vol. 54, № 6. P. 833-844. DOI:10.1080/09500340601066125.
4. Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Волотовский С.Г. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system // Journal of Modern Optics. 2011. Vol. 58, № 9. P. 748-760. DOI: 10.1080/09500340.2011.568710.
5. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G., Khonina S.N. Use of photonic crystal cavities for temporal differentiation of optical signals // Optics Letters. 2013. Vol. 38, № 7. P. 1149-1151.
6. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Формирование эталонных волновых фронтов элементами компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 1990. № 7. С. 3-26.
7. Kazanskiy N.L., Kotlyar V.V., Soifer V.A. Computer-aided design of diffractive optical elements // Optical Engineering. 1994. Vol. 33, № 10. P. 3156-3166.
8. Хонина С.Н., Волотовский С.Г., Харитонов С.И. Особенности непараксиального распространения Гауссовых и Бесселевых мод вдоль оси кристалла // Компьютерная оптика. 2013. Том 37, № 3. С. 297-306.
9. Zusin D.H., Maksimenka R., Filippov V.V., Chulkov R.V., Perdrix M., Gobert O., Grabchikov A.S. Bessel beam transformation by anisotropic crystals // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. Vol. 27, № 8. P. 1828-1833.
10. Волотовский С.Г., Казанский Н.Л., Павельев В.С. Программное обеспечение для итерационного расчета и исследования ДОО // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 48-53.
11. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // Автометрия. 1988. № 1. С. 70-82.
12. Kazanskiy N.L., Soifer V.A. Diffraction investigation of geometric-optical focusators into segment // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. 1994. Vol. 96, № 4. P. 158-162.
13. Doskolovich L.L., Golub M.A., Kazanskiy N.L., Khramov A.G., Pavelyev V.S., Serafimovich P.G., Soifer V.A., Volotovskiy S.G. Software on diffractive optics and computer generated holograms // Proceedings of SPIE. 1995. Vol. 2363. P. 278-284.
14. Казанский Н.Л. Математическое моделирование оптических систем. Самара: СГАУ. 2005. 240 с.
15. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Cloud Computing for Nanophotonic Simulations // Lecture Notes in Computer Science. 2013. Vol. 7715. P. 54-67.
16. Казанский Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58-77.
17. Казанский Н.Л. Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. Том 13, № 4-1. С. 54-62.
18. Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е. Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 130-133.
19. Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseev O.Yu., Soifer V.A. A Method for the Diffractive Microrelief Forming Using the Layered Photoresist Growth // Optics and Lasers in Engineering. 1998. Vol. 29, № 4-5. P. 281-288.
20. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника. 2004. Том 33, №3. С. 209-224.
21. Pavelyev V.S., Borodin S.A., Kazanskiy N.L., Kostyuk G.F., Volkov A.V. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface // Optics & Laser Technology. 2007. Vol. 39, № 6. P. 1234-1238.

22. *Bezus E.A., Daskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings // *Microelectronic Engineering*. 2011. Vol. 88, № 2. P. 170–174.
23. *Bezus E.A., Daskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Interference pattern formation in evanescent electromagnetic waves using waveguide diffraction gratings // *Quantum Electronics*. 2011. Vol. 41, № 8. P. 759–764.
24. *Kazanskiy N.L., Popov S.B.* Machine Vision System for Singularity Detection in Monitoring the Long Process // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2010. Vol. 19, № 1. P. 23–30.
25. *Сойфер В.А., Куприянов А.В.* Анализ и распознавание наномасштабных изображений: традиционные подходы и новые постановки задач // *Компьютерная оптика*. 2011. Том 35, № 2. С. 136–144.
26. *Куприянов А.В.* Анализ текстур и определение типа кристаллической решетки на наномасштабных изображениях // *Компьютерная оптика*. 2011. Том 35, № 2. С. 151–157.

SUPERVISION OF DISTRIBUTION OF INTENSITY AT MODOV'S PASSING OF LIGHT BUNCHES AT DISTRIBUTION THROUGH CRYSTAL STRUCTURES

© 2013 M.Yu. Ponomarev

Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara

Formation of a diffraction picture when passing light bunches of Bessel and Gauss-Laguerre through plates of crystal quartz is considered. Experiments show distinctions in formation of images and reveal changes in symmetric structure of bunches depending on orientation of a plate of a crystal. Offered experiment allows to see advantages of structural bunches of Gauss-Laguerre before Bessel bunches in a diffraction picture when passing through a crystal. Results of work are essential to research of mechanisms of diffraction of light bunches in natural crystals

Keywords: diffraction, optical parameters, crystal quartz, structural light bunches, image formation.