

## Определение параметров кристаллической решетки на основе быстрого преобразования Фурье

М.Ю. Понамарев

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
443010, Россия, г. Самара,  
ул. Л. Толстого, 23

*Аннотация* – В данной работе показано, что изображение, формируемое в результате прохождения когерентного излучения через кристалл, обладает определенными характерными особенностями. При повороте кристалла по отношению к оси распространения исследуемого пучка на выходе было обнаружено образование распределения интенсивности сложной структуры, связанное с преобразованием «плоского изображения» в «объемное». Кристаллические пластины могут быть применены для формирования распределения непрерывного «плоского» светового поля в реализации реальной 3D-сцены, что может обеспечить трехмерное изображение на телевизионном экране, а также на экране монитора компьютера. Также это можно использовать в рекламных щитах. Полученное таким образом трехмерное изображение можно наблюдать непосредственно глазами человека (без использования специальных очков). Таким образом повышается информационная емкость изображения на экране, а восприятие картины приближается к реальным условиям.

*Ключевые слова* – горный хрусталь; кристаллическая решетка; пучки Бесселя и Гаусса – Лагерра; преобразования Фурье.

### Введение

В последние годы значительно возрос объем информации, воспринимаемой человеком с экранов отображающих устройств. В связи с этим все большее внимание уделяется вопросам повышения качества и информационной емкости видеоизображения.

Наблюдается значительный рост исследований в области микро-, опто- и наноэлектроники [1]. В 2020 г. получены результаты, влияющие на перспективы получения новых материалов в сфере оптоэлектроники [2]. Исследования показывают значительные возможности для получения элементной базы для оптоэлектроники.

Примером применения могут стать оптоэлектронные и квантовые технологии, в том числе для производства 3D-дисплеев нового поколения. Трехмерное изображение, создаваемое такими устройствами, несет дополнительную информацию для наблюдателя о размерах, объеме и взаимном расположении объектов.

Пример распределения непрерывного светового поля, соответствующего световому полю реальной 3D-сцены – на рис. 1. 3D-экраны широко используются там, где требуется пространственное восприятие информации: например, в медицине или дефектоскопии. Кроме того, качественное трехмерное изображение воспринимается бинокулярным зрительным аппаратом человека, не вызывая его эмоционального и физического утомления.

Имеется существенная заинтересованность в применении 3D-дисплеев для формирования трехмерного телевидения – телевидения, содержащего объемное изображение, которое способно передать зрителю «эффект глубины». В большинстве современных телевизоров используется система стереоскопических очков.

### 1. Экспериментальное исследование свойств природных кристаллов

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

Объектом исследования стали кристаллическая пластинка, полученная из 11 различных кристаллов кварца (горного хрустала). Толщина исследуемых пластинок различная – от 2 до 5 мм. Физические параметры пластинок – размер: 80–170 × 70–110 × 15–55 мм; плотность: 2,57–2,62 г/см<sup>3</sup>; прозрачность: 97 %; сингония: тригональная; агрегаты: сростки кристаллов, двойники; район добычи: месторождения Южного Урала (Челябинская область). Кристаллический кварц (горный хрусталь) является самым распространенным минералом в земной коре. Кристаллы кварца представляют собой шестигранные призмы и имеют шестигранную структурную решетку (рис. 2).

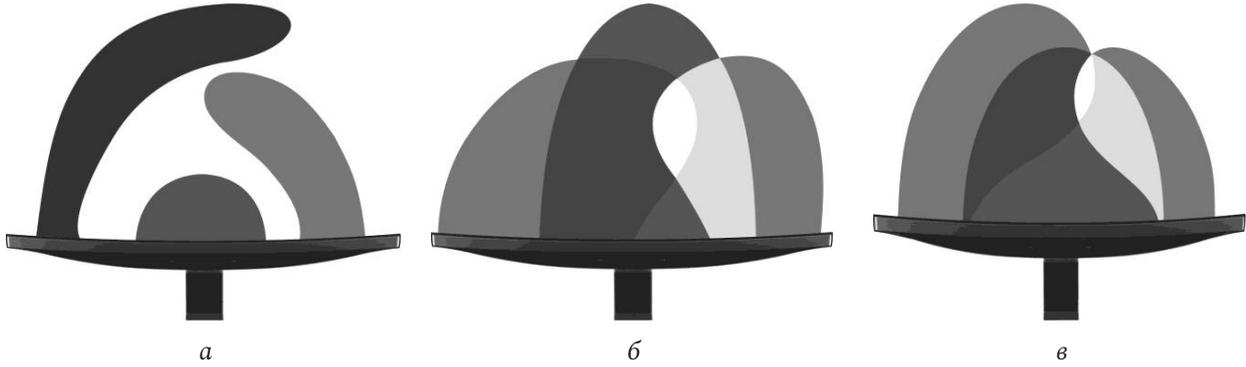


Рис. 1. Вид сверху 3D-дисплея (а, б); примеры воспроизведения непрерывного светового поля, соответствующего световому полю реальной 3D-сцены на экране (в)  
Fig. 1. Top view of the 3D display (a, b); examples of reproduction of a continuous light field corresponding to the light field of a real 3D scene on the screen (c)

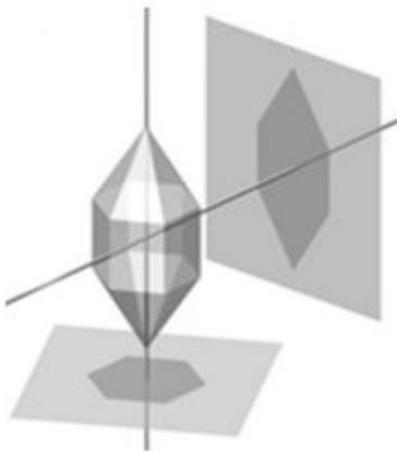


Рис. 2. Модель кристаллической решетки кварца в пространстве  
Fig. 2. Model of the crystal lattice of quartz in space

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

На элементарную ячейку кристалла кварца, имеющую при комнатной температуре параметры,  $a = 4,90 \text{ \AA}$ ,  $c = 5,39 \text{ \AA}$ , приходятся три молекулы  $\text{SiO}_2$ . Пространственная модель кристаллической решётки кварца выглядит следующим образом (рис. 3, а).

Схема распределения узлов кристаллической решетки кварца при наблюдении перпендикулярно оптической оси кристалла представлена на рис. 3, б.

Задача расчета дифракции на кристаллических структурах может быть сведена к выполнению 3D-преобразования Фурье [6; 8]. Рассмотрим преобразование Фурье:

$$F(\xi) = \tau[f(x)](\xi) = \int_R f(x) e^{-2\pi x \xi} dx, \quad (1)$$

где  $f(x)$  – входная функция от одной переменной;  $F(\xi)$  – полученная выходная функция;  $\tau[f(x)](\xi)$  – оператор преобразования Фурье.

Тогда в двумерном случае (1) запишется следующим образом:

$$F(\xi, \eta) = \tau[f(x, y)](\xi, \eta) = \iint_R f(x, y) e^{-2\pi(x\xi + y\eta)} dx dy, \quad (2)$$

где  $f(x, y)$  – входная функция двух переменных.

Аналогично (2) можно записать функцию трех переменных преобразования Фурье, которое будет выглядеть следующим образом:

$$F(\xi, \eta, \zeta) = \tau[f(x, y, z)](\xi, \eta, \zeta) = \iiint_R f(x, y, z) e^{-2\pi(x\xi + y\eta + z\zeta)} dx dy dz, \quad (3)$$

Обозначение переменных аналогично (1) и (2).

Рассмотрим суперпозицию гауссовых пучков одного распределения со сдвигом  $x_p$ :

$$f(x) = \sum_{p=1}^P c_p \exp\left[-\frac{(x-x_p)^2}{\sigma^2}\right], \quad (4)$$

где  $x_p$  и  $\sigma$  – некоторые вещественные числа.

Рассчитаем преобразование Фурье от функции (4), таким образом, получаем:

$$F(\xi) = \sigma\sqrt{\pi} e^{-\pi^2 \xi^2 \sigma^2} \sum_{p=1}^P c_p e^{2\pi x_p \xi}. \quad (5)$$

Аналогично (5) можно получить для двумерного и трёхмерного случаев.

Применение структурных световых пучков, например пучков Бесселя и Гаусса – Лагерра, которые обладают целым рядом особенных свойств,

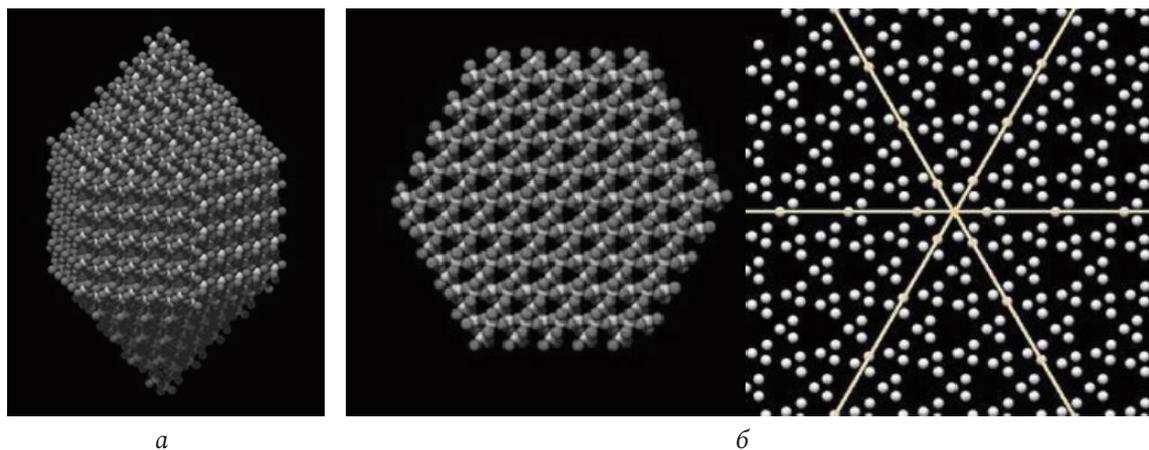


Рис. 3. Пространственная модель кристаллической решетки кварца (а); схема распределения узлов кристаллической решётки кварца (б)  
Fig. 3. Spatial model of the crystal lattice of quartz (a); diagram of the distribution of nodes of the crystal lattice of quartz (b)



Рис. 4. Изображения структурных пучков, полученные с использованием ДОЭ: а – пучок Бесселя; б – пучок Гаусса – Лагерра  
Fig. 4. Images of structural beams obtained using DOE: a – Bessel beam; b – Gauss-Laguerre beam

позволяет проводить качественный анализ и интерпретацию результатов дифракционных экспериментов.

Использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [4] позволяет эффективно решать задачу формирования лазерных пучков с заданным модовым составом и их весовым вкладом. Наиболее энергетически выгодными являются фазовые ДОЭ, для расчета которых были разработаны как итерационные алгоритмы, так и методы кодирования [11]. 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 Эйре и др. На рис. 4 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 приводящей к сильному возрастанию интенсивности рассеянного света. Результат подобных дифракционных измерений показал, что неоднородности вытянуты вдоль оптической оси кристалла.

В [10] был продемонстрирован способ формирования дифракционной картины при прохождении пучка Бесселя через кристаллическую пластину. Для получения пучка в работе использовался аксикон, а не ДОЭ.

Теоретическая модель формирования дифракционной картины при прохождении световых пучков Бесселя рассмотрена в [7]. Теоретическое рассмотрение распространения пучка Бесселя для одноосных кристаллов дано в [6]. В поставленном эксперименте формируется дифракционная кар-

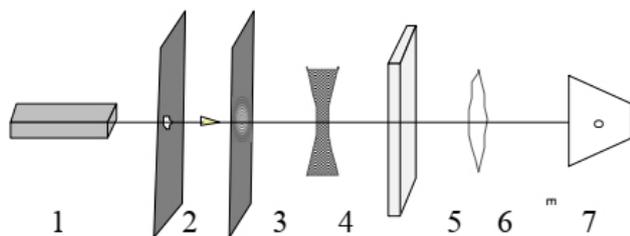


Рис. 5. Схема формирования световых пучков: 1 – источник лазерного излучения; 2 – пинхол; 3 – дифракционный оптический элемент (ДОЭ); 4 – рассеивающая линза; 5 – исследуемая кристаллическая пластина; 6 – собирающая линза; 7 – камера  
Fig. 5. Scheme of the formation of light beams: 1 – laser radiation source; 2 – pinhole; 3 – diffractive optical element (DOE); 4 – diffusing lens; 5 – investigated crystal plate; 6 – collecting lens; 7 – camera

тина, показывающая произошедшие изменения в симметрической структуре световых пучков Бесселя и Гаусса – Лагерра при прохождении через кристаллическую пластину кварца.

Кристаллическая решетка имеет набор присутствующих ей расстояний между плоскостями расположения атомов в решетке. 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, 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 пучка были обнаружены определенные шаблоны перераспределения энергии в выходной плоскости.

Однако математическая модель, позволяющая провести расчёты для численного сравнения дан-

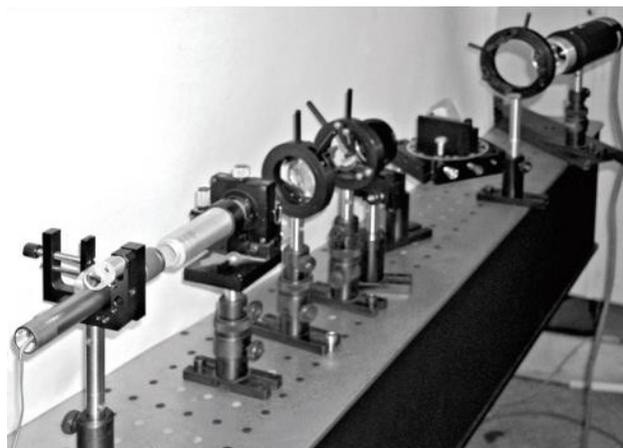


Рис. 6. Внешний вид экспериментальной установки  
Fig. 6. External view of the experimental setup

ных натурального эксперимента с теоретическим, предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам, поскольку требует решения прямой задачи оптики, связанной с вычислением интеграла Кирхгофа [5].

При проведении эксперимента использовались ДОЭ, изготовленные на оборудовании исследовательско-технологического центра дифракционной оптики [3] методом фотолитографии и плазмохимического травления микрорельефа [6].

На основе анализа литературы и существующих методов исследования кристаллической решетки 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 (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 [10].

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.

Примеры изображений световых пучков, полученных при отсутствии кристаллической пла-

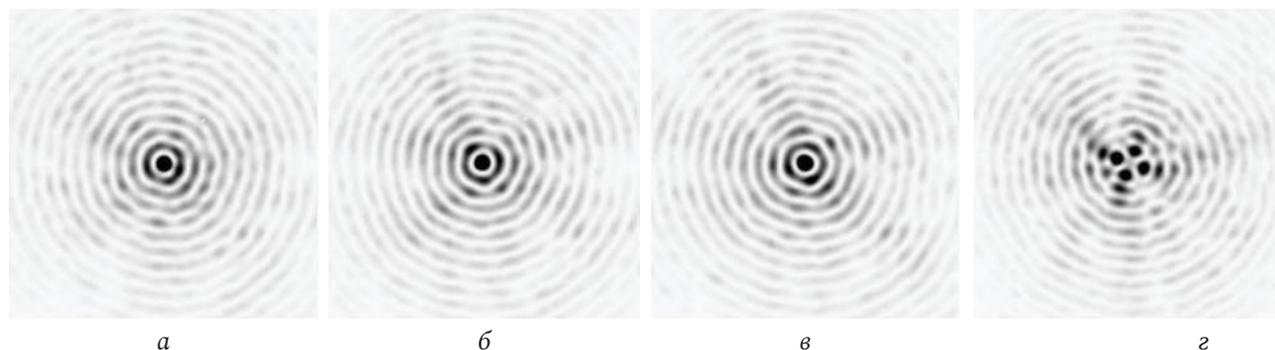


Рис. 7. Распределение интенсивности при прохождении пучка Бесселя через кристаллическую пластину при углах поворота:  $a - 0^\circ$ ;  $б - 10^\circ$ ;  $в - 20^\circ$ ;  $г - 30^\circ$

Fig. 7. Intensity distribution when a Bessel beam passes through a crystal plate at angles of rotation:  $a - 0^\circ$ ;  $b - 10^\circ$ ;  $c - 20^\circ$ ;  $d - 30^\circ$

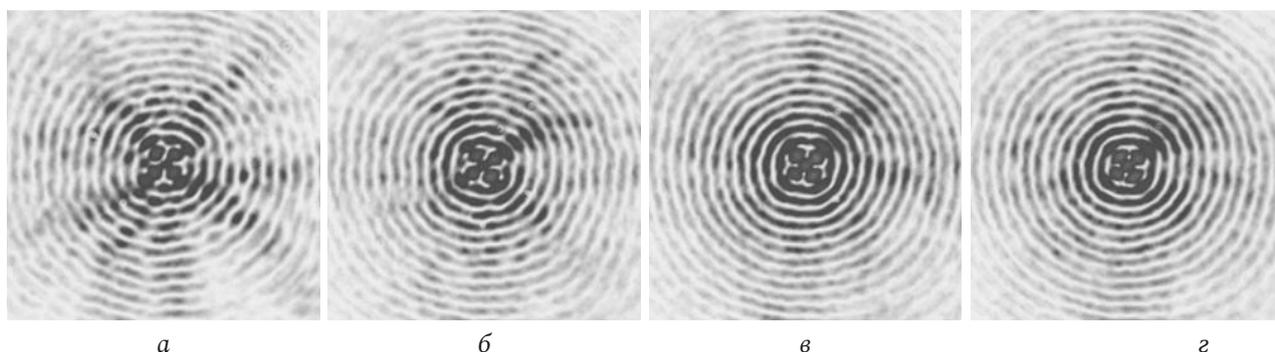


Рис. 8. Распределение интенсивности при прохождении пучка Гаусса – Лагерра через кристаллическую пластину при углах поворота:  $a - -5^\circ$ ;  $б - 0^\circ$ ;  $в - 15^\circ$ ;  $г - 30^\circ$

Fig. 8. Intensity distribution during the passage of a Gaussian-Laguerre beam through a crystal plate at angles of rotation:  $a - -5^\circ$ ;  $b - 0^\circ$ ;  $c - 15^\circ$ ;  $d - 30^\circ$

стины, показаны на рис. 8. Примеры полученных изображений при различных поворотах кристаллической пластины для пучка Бесселя приведены на рис. 8. Угол поворота пластины менялся от  $-45^\circ$  до  $45^\circ$  с шагом изменения угла  $5^\circ$ ,  $0^\circ$  соответствует перпендикулярному падению пучка на плоскость пластины. Наблюдаемое распределение интенсивности показывает зависимость изменения структуры пучка от ориентации кристаллической пластины, 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 рис. 7, 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. 7).

При угле поворота около  $15^\circ$  (рис. 8, в) наблюдаются минимальные изменения в радиальной симметрии пучка. По-видимому, при таком положении пластины световой пучок распространя-

ется параллельно оптической оси кристалла и не подвергается искажениям. То есть в том случае, когда угол падения светового пучка составляет с оптической осью кристалла  $0^\circ$ , то в результирующем распределении интенсивности пучка наблюдается минимум искажений (рис. 7 и 8, в). Таким образом, на основе проведенного эксперимента можно разработать практическую методику для определения оптических свойств кристаллической пластины.

Проведенный 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 распределения интенсивности сложной структуры.

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

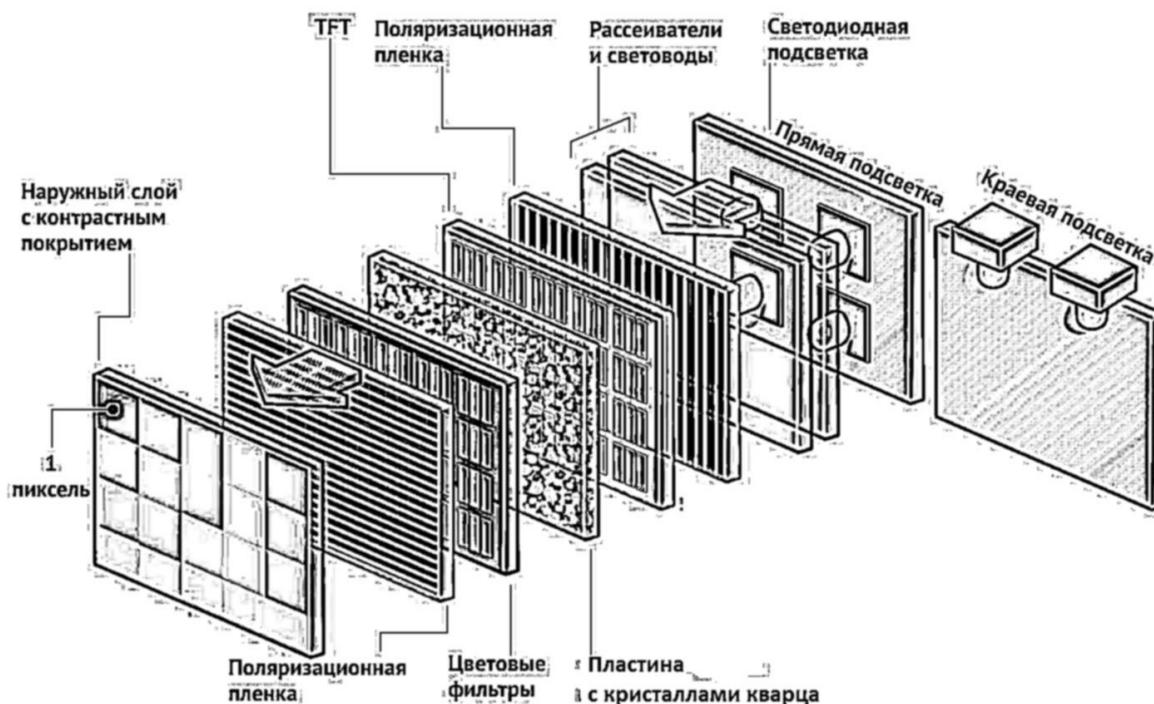


Рис. 9. Применение в LED-технологии пластин природного кристалла кварца  
Fig. 9. Application of natural quartz crystal plates in LED technology

## 2. Применение в телевидении

Рассмотрим экспериментальное исследование формирования изображений дифракции лазерных пучков на трехмерной решетке, образованной атомами в пластине кристаллического кварца (рис. 9). Для наглядности понимания физических процессов возьмем уже существующую LED-технологию формирования телеизображения и вставим пластины кристалла кварца. Сформируем прямые световые кучки Гаусса – Лагерра.

При этом адресацию – процесс «включения» (свет не пропускается) и «выключения» (свет пропускается) пикселей для формирования изображения на поляризованном экране – подадим на тонкие пленочные транзисторы (TFT). Для максимального угла обзора самой панели можно применить стереочки, тогда угол обзора изображения составляет до  $160^\circ$ . Можно смотреть панель практически с любого положения (под углом до  $80^\circ$  относительно центра экрана).

Теоретическая модель повышения качества цветовоспроизведения, т. е. уменьшения цветовых искажений, представлена в [13].

LED-панели не портят зрения, так как их принцип работы построен по отличной от ЭЛТ-технологии, и при воспроизведении изображения экран не мерцает. Имеющиеся результаты исследований говорят о том, что применение монокристаллов горного хрусталя является благоприятным для зрения человека.

Получены структуры электромагнитного излучения, при прохождении которых через пластину кристаллического кварца они оказывают благоприятные воздействия на сосудистую систему глазного дна человека [12].

Таким образом, применение природных кристаллов с регулярной кристаллической решеткой в системах формирования телевизионного изображения имеет возможность создать стереоэффект. Применение пучков Гаусса – Лагерра при прохождении ими кристаллов с регулярной кристаллической решеткой при рассчитанных углах кристаллической решетки, изменяясь масштабно, резонирует и создает на выходе телевизионной панели стереоизображение.

## Заключение

В заключение можно сделать следующий вывод. 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.

Кристаллические пластины могут быть использованы для формирования распределения непрерывного светового поля реальной 3D-сцены на экране 3D.

## Список литературы

1. Mazhnik E., Oganov A.R. Application of machine learning methods for predicting new superhard materials // *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 128, no. 7. P. 075102. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0012055>
2. Lu Y. Stretching diamond for next-generation microelectronics // CityU. URL: <https://www.cityu.edu.hk/research/stories/2021/01/01/stretching-diamond-next-generation-microelectronics>
3. 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.
4. Формирование эталонных волновых фронтов элементами компьютерной оптики / М.А. Голуб [и др.] // *Компьютерная оптика*. 1990. № 7. С. 3–26.
5. Казанский Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // *Компьютерная оптика*. 2006. № 29. С. 58–77.
6. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // *Микроэлектроника*. 2004. Т. 33, № 3. С. 209–224.
7. Хонина С.Н., Волоотовский С.Г., Харитонов С.И. Особенности непараксиального распространения Гауссовых и Бесселевых мод вдоль оси кристалла // *Компьютерная оптика*. 2013. Т. 37, № 3. С. 297–306. DOI: <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2013-37-3-297-306>
8. Calculating x-ray diffraction on crystals by means of the differential method / S.I. Kharitonov [et al.] // *Proc. SPIE*. 2015. Vol. 9807. P. 98070V. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2234054>
9. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovskiy S.G. 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: <https://doi.org/10.1080/09500340.2011.568710>
10. Zusin D.H., Maksimenka R., Filippov V.V., Chulkov R.V., Perdrix M., Gobert O., Grabtchikov A.S. Bessel beam transformation by anisotropic crystals // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2010. Vol. 27, № 8. P. 1828–1833. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.27.001828>
11. Ложкин Л.Д., Осипов О.В., Вороной А.А. Цветокоррекция в трехцветных устройствах цветовоспроизведения // *Компьютерная оптика*. 2017. Т. 41, № 1. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-1-88-94>
12. Казанский Н.Л., Куприянов А.В., Понамарев М.Ю. Аппаратно-программный комплекс терапевтического воздействия на васкулярыне и около васкулярыне структуры глазного дна человека с использованием резонансных магнитоэлектрических эффектов в природных кристаллах (гос. контракт от «11» июня 2010 г. № 02.740.11.0841).

## References

1. Mazhnik E., Oganov A.R. Application of machine learning methods for predicting new superhard materials. *Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 128, no. 7, pp. 075102. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0012055>
2. Lu Y. Stretching diamond for next-generation microelectronics. CityU. URL: <https://www.cityu.edu.hk/research/stories/2021/01/01/stretching-diamond-next-generation-microelectronics>
3. Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Rybakov O.E. Development of technology for obtaining a diffractive optical element with submicron dimensions of the relief in a silicon wafer. *Komp'yuternaya optika*, 1998, no. 18, pp. 130–133. (In Russ.)
4. Golub M.A. et al. Formation of reference wavefronts by elements of computer optics. *Komp'yuternaya optika*, 1990, no. 7, pp. 3–26. (In Russ.)
5. Kazanskiy N.L. Research complex for solving problems of computer optics. *Komp'yuternaya optika*, 2006, no. 29, pp. 58–77. (In Russ.)
6. Kazanskiy N.L., Kolpakov V.A., Kolpakov A.I. Investigation of the peculiarities of the process of anisotropic etching of silicon dioxide in the plasma of a high-voltage gas discharge. *Mikroelektronika*, 2004, vol. 33, no. 3, pp. 209–224. (In Russ.)
7. Honina S.N., Volotovskiy S.G., Haritonov S.I. Features of non-paraxial propagation of Gaussian and Bessel modes along the crystal axis. *Komp'yuternaya optika*, 2013, vol. 37, no. 3, pp. 297–306. DOI: <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2013-37-3-297-306> (In Russ.)
8. Kharitonov S.I. et al. Calculating x-ray diffraction on crystals by means of the differential method. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9807, pp. 98070V. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2234054>
9. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovskiy S.G. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system. *Journal of Modern Optics*, 2011, vol. 58, no. 9, pp. 748–760. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500340.2011.568710>
10. Zusin D.H., Maksimenka R., Filippov V.V., Chulkov R.V., Perdrix M., Gobert O., Grabtchikov A.S. Bessel beam transformation by anisotropic crystals. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, vol. 27, no. 8, pp. 1828–1833. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.27.001828>
11. Lozhkin L.D., Osipov O.V., Voronoy A.A. Color grading in three-color devices of color reproduction. *Komp'yuternaya optika*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-1-88-94> (In Russ.)
12. Kazanskiy N.L., Kuprijanov A.V., Ponomarev M.Yu. Hardware and software complex for therapeutic effects on vascular and perivascular structures of the human eye fundus using resonant magnetoelectric effects in natural crystals (state contract dated 11.06.2010, no. 02.740.11.0841). (In Russ.)

## Determination of the crystal lattice parameters based on the fast Fourier transform

*Maxim Yu. Ponamarev*

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics  
23, L. Tolstoy Street,  
Samara, 443010, Russia

*Abstract* – In this work, it is shown that the image formed as a result of the passage of coherent radiation through the crystal has certain characteristic features. When the crystal is rotated with respect to the propagation axis of the investigated beam, the formation of the intensity distribution of a complex structure associated with the transformation of the «flat image» into «volumetric» was detected at the output. Crystalline plates can be used to form the distribution of a continuous «flat» light field in the implementation of a real 3D scene, which can provide a three-dimensional image on a television screen, as well as on a computer monitor screen. It can also be used in billboards. The three-dimensional image obtained in this way can be observed directly with the eyes of a person (without using special glasses). Thus, the information capacity of the image on the screen increases, and the perception of the picture approaches real conditions.

*Keywords* – rock crystal; crystal lattice; Bessel and Gauss-Laguerre beams; Fourier transforms.

### Информация об авторе

Понамарев Максим Юрьевич, соискатель Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

*Область научных интересов:* оптические параметры, структурные световые пучки, искусственный интеллект, суперкомпьютинг.

*E-mail:* mponamarev1978@gmail.com

### Information about the Author

Maxim Yu. Ponamarev, postgraduate student of the Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

*Research interests:* optical parameters, structural light beams, artificial intelligence, supercomputing.

*E-mail:* mponamarev1978@gmail.com