

Научная статья
УДК 548.4, 548.7, 538.911, 538.958
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.045

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ ОСВЕЩЁННОСТИ КАРТИН ФОТОРЕФРАКТИВНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В МОНОКРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ. УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ УРОВНЕЙ

**Диана Владимировна Мануковская¹, Сергей Леонидович Шевырев²,
Николай Васильевич Сидоров³**

^{1,3}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

²Дальневосточный геологический институт, Владивосток, Россия

¹d.manukovskaia@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9139-3502>

²shevirev@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6649-7492>

³n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1075-7421>

Аннотация

Разработана программа, которая автоматизирует исследование картин фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) и оптимизирует в том числе выделение слоев ФИРС и ассоциированных с ними уровней освещённости. Её использование существенно улучшает методику определения фрактальной размерности слоев ФИРС. Код программы написан в среде программирования Python, реализована она в среде «Ноутбук» Jupyter. Программа применена для анализа картин ФИРС в нелинейно-оптическом монокристалле ниобата лития, использует две директории: *in* — для хранения в ней изображений ФИРС для поточной обработки и *out* — для сохранения туда excel-совместимой таблицы экспериментальных данных в формате CSV и готовых изображений выделенных слоев ФИРС.

Ключевые слова:

ниобат лития, фоторефрактивное рассеяние света, фрактальная размерность, автоматизация

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН № FMEZ-2022-0016.

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2022-0016.

Для цитирования:

Мануковская Д. В., Шевырев С. Л., Сидоров Н. В. Автоматизация выделения уровней освещённости картин фоторефрактивного рассеяния света в монокристаллах ниобата лития. Методика получения фрактальной размерности уровней // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 276–281. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.045.

Original article

AUTOMATION OF SEPARATION OF ILLUMINANCE LEVELS OF PHOTOREFRACTIVE LIGHT SCATTERING PATTERNS IN LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS. METHOD CLARIFICATION FOR OBTAINING THE FRACTAL DIMENSION OF LEVELS

Diana V. Manukovskaya¹, Sergey L. Shevirev², Nikolay V. Sidorov³

^{1,3}Tananaev Institute of Chemistry of the Kola Science Centre of RAS, Apatity, Russia

²Far Eastern Geological Institute, Vladivostok, Russia

¹d.manukovskaia@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9139-3502>

²shevirev@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6649-7492>

³n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1075-7421>

Abstract

A program has been developed that automates the study of photoinduced light scattering (PILS) patterns. Among other things, the program optimizes the selection of PILS layers and their associated light levels. Using the program significantly improves the method for determining the fractal dimension of PILS layers. The program code is written in the Python programming environment and implemented in the Jupyter Notebook environment. The program was used to analyze PILS patterns in a nonlinear optical lithium niobate single crystal. It uses two directories: "in" for storing PILS images for on-line processing and "out" for saving there an Excel-compatible table of experimental data in CSV format and ready-made images of selected FIRS layers.

Keywords:

lithium niobate, photorefractive light scattering, fractal dimension, automation

Acknowledgements:

the article was supported by the federal budget on the topic of the state assignment of the Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the Kola Science Centre of the RAS No. FMEZ-2022-0016.

Funding:

state assignment on the topic of research No. FMEZ-2022-0016.

For citation:

Manukovskaya D. V., Shevyrev S. L., Sidorov N. V. Automation of separation of illuminance levels of photorefractive light scattering patterns in lithium niobate single crystals. Method clarification for obtaining the fractal dimension of levels // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 276–281. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.045.

Введение

В нелинейно-оптическом монокристалле ниобата лития (LiNbO_3) под действием лазерного излучения возникает фотоиндуцированное изменение показателей преломления, получившее название эффекта фоторефракции (Optical Damage). Ему сопутствует фотоиндуцированное рэлеевское рассеяние света (ФИРС) на лазерно-индуцированных дефектах [1, 2]. На эффекте фоторефракции основана голографическая запись информации кристаллом LiNbO_3 . В то же время эффект фоторефракции существенно искажает фронт световой волны, распространяющейся в кристалле, что приводит к нестабильности и потере генерации в твердотельном лазере на основе активированного редкоземельным элементом кристалла LiNbO_3 , а также существенно ограничивает использование кристалла LiNbO_3 для разработки и изготовления функциональных элементов для преобразователей частоты и электрооптических модуляторов частоты.

Форма, угол и динамика раскрытия индикатрисы ФИРС непосредственно связаны с составом кристалла, особенностями упорядочения его структурных единиц и состоянием дефектности [2–4] (рис. 1). Одним из подходов в изучении картин ФИРС и лазерно-индуцированных дефектов является выделение уровней освещённости картины, которые соответствуют разным степеням устойчивости лазерно-индуцированных дефектов [3, 4]. Путём определения фрактальной размерности этих уровней освещённости и исследования её поведения в зависимости от времени и плотности мощности лазерного излучения можно определять динамику перераспределения лазерно-индуцированных дефектов в кристалле в процессе раскрытия индикатрисы ФИРС. Эти сведения помогают более качественно исследовать фоторефрактивный отклик, особенности локализации и динамики лазерно-индуцированных дефектов в кристаллах разного состава и технологий получения. Однако экспериментальное выделение уровней освещённости и их анализ является времязатратной и трудоёмкой процедурой. Нами была разработана программа, которая автоматизирует в том числе выделение слоев ФИРС и ассоциированных с ними уровней освещённости картин ФИРС.

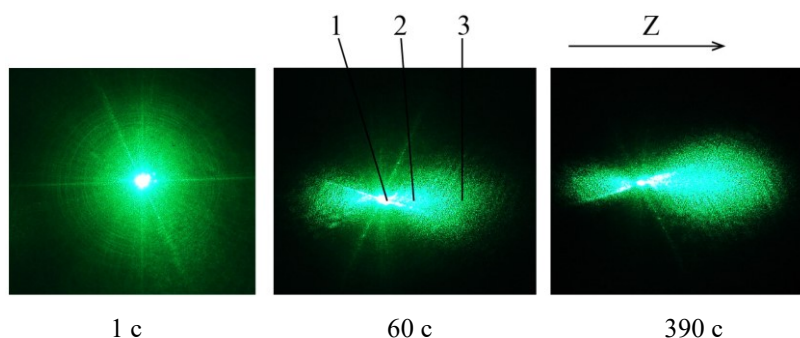


Рис. 1. Трёхслойная спекл-структура ФИРС в стехиометрическом кристалле LiNbO_3 её раскрытие во времени в монокристалле $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (0,52 мас. %). Лазерный луч направлен перпендикулярно плоскости рисунка.

Форма индикатрисы спекл-структуры ФИРС и интенсивность ФИРС в нелинейно-оптическом кристалле LiNbO_3 зависят от геометрии взаимного расположения образца кристалла, ориентированного по главным кристаллографическим осям, а также от параметров падающей световой волны,

фоторефрактивных свойств кристалла, плотности мощности, длины волны и времени воздействия на кристалл возбуждающего лазерного излучения. Величина фоторефрактивного эффекта определяет, насколько легко возбуждаются лазерно-индуцированные дефекты, рассеивающие свет.

ФИРС — динамическое явление. Индикатриса ФИРС раскрывается не мгновенно, а в течение достаточно длительного времени. Время раскрытия индикатрисы ФИРС определяется величиной и особенностями диффузионного фотоэлектрического поля в кристалле. При этом форма индикатрисы ФИРС с течением времени в процессе её раскрытия меняется (см. рис. 1). В кристаллах LiNbO_3 разного состава время полного раскрытия индикатрисы ФИРС обычно составляет около 60 с. Но существуют легированные кристаллы LiNbO_3 , в которых время раскрытия составляет несколько секунд после воздействия на кристалл лазерного излучения. В полностью раскрытом виде индикатриса ФИРС имеет форму искажённой восьмёрки или овала (кометообразную) (см. рис. 1), при этом больший лепесток восьмёрки направлен вдоль положительного вектора кристаллографической оси Z (полярная ось), вдоль которой направлена спонтанная поляризация P_s , меньший лепесток направлен вдоль отрицательного направления оси Z .

ФИРС имеет многослойную структуру. В самом центре (собственно пятно лазерного луча в кристалле) располагается область, каждая точка которой рассеивает свет. По всему сечению этой области показатели преломления кристалла изменены полностью. Эта область называется первым слоем ФИРС [3]. Вокруг него образуется второй слой ФИРС, в этой области кристалла существуют стационарные лазерно-индуцированные дефекты, которые рассеивают свет всё время облучения. Третий слой ФИРС формируется ещё дальше от лазерного луча, лазерно-индуцированные дефекты в нём то возникают, то погасают, то есть флуктуируют. Таким образом, можно сказать, что слои ФИРС соответствуют разным степеням устойчивости лазерно-индуцированных дефектов. Конечно, они задаются расстоянием от лазерного луча: чем ближе слой, тем больше энергии он получает, тем более часто возбуждаются лазерно-индуцированные дефекты и тем более они устойчивы во времени. В реальности же слои проникают друг в друга. Например, стационарный лазерно-индуцированный дефект, относящийся ко второму слою ФИРС, может быть окружён со всех сторон флуктуирующими дефектами, которые формируют третий слой. Именно в разделении этих слоёв и состоит задача, решение которой мы представляем в этой статье.

Монокристаллы ниобата лития уникальны ещё и тем, что их полезные свойства и их сочетания меняются путём варьирования технологических особенностей приготовления шихты, выращивания монокристаллов, а также изменением состава, в том числе и легированием. С точки зрения фоторефрактивных свойств легирующие компоненты могут как усиливать фоторефракцию (тогда это будут фоторефрактивные легирующие добавки), так и подавлять её (нефоторефрактивные). К первым относятся многозарядные катионы переходных металлов, например, Fe, Cu, ко вторым — Zn, Mg и др. Благодаря связи особенностей состояния дефектности кристалла LiNbO_3 , особенностей упорядочения его структурных единиц и особенностей формирования диффузионных фотополей в кристалле, ФИРС будет меняться, откликаясь на малейшие перестройки структуры, вызванные легированием и технологической предысторией.

Ранее было показано, что возможно применить фрактальную геометрию к цифровому изображению ФИРС и получить сведения о перераспределении лазерно-индуцированных дефектов непосредственно во время раскрытия картины ФИРС [4]. Такая информация позволит более тонко определить связь разных структурных и технологических факторов с фоторефрактивными свойствами монокристаллов ниобата лития. Для этого требуется разделить цветное изображение ФИРС, полученное с помощью цифровой фотокамеры, на шесть уровней освещённости. Четыре самые светлые (или яркие) из них соответствуют трём слоям ФИРС и лазерному лучу. Именно во время цифрового разделения слоёв ФИРС [4] выяснилось, что картину ФИРС составляет ещё и остаточная мощность лазерного луча, которая после прохождения образца достигла выходной грани кристалла. После разделения каждый слой ФИРС и лазерный луч сохраняются отдельно и анализируется их фрактальная размерность.

Однако сам процесс получения и разделения слоёв «вручную» достаточно трудоёмкий. Подсчитано [5], что от начальной точки получения картины ФИРС до получения фрактальной размерности слоя для данной секунды облучения требуется 22 операции и 8 мин времени исследователя, который собирает данные сведения, к тому же эти операции и время зависят от человеческого фактора

и требуют дополнительного места на диске компьютера и отдельной иерархии директорий для их хранения. Таким образом, возникает необходимость в программном инструменте, который разделяет слои автоматически для любого количества изображений и сохраняет их в отдельную уже созданную директорию. Тем самым экономится время исследователя, исключается человеческий фактор и более точно определяется значение фрактальной размерности ФИРС для дальнейшего рассмотрения.

Экспериментальная часть

Кристаллы для исследований выращивались методом Чохральского из расплава на установке Кристалл-2. Подробности выращивания и приготовления шихты изложены в работах [1–3]. Методика получения картин ФИРС подробно описана в работах [3, 4]. В исследованиях ФИРС использовалось излучение лазера Nd:YAG MLL-100 (Changchun New Industries Optoelectronics Tech. Co. Ltd, Changchun, China), λ_0 — 532 нм, плотность мощности — до 3,4 Вт/см². Рассеянное кристаллом излучение попадало на полупрозрачный экран, за которым помещалась цифровая фотокамера SONY NEX-F3 (4), регистрирующая ФИРС с разрешением 4912×3264 пикселей. С определённым интервалом времени делается фотография ФИРС, после чего слои ФИРС по уровням освещённости выделяются либо вручную, либо с помощью написанной нами программы.

Вручную алгоритм следующий: изображение ФИРС разделить на шесть уровней освещённости в графическом редакторе GIMP 2.8.0 (GNU image Manipulation Program, GNU Project, США), используя инструменты «Обесцвечивание по освещённости» и «Постеризация», выделить каждый уровень; используя инструмент «выделение по цвету», создать новое изображение в новый файл; сохранить файл в формате tif. в директорию с именем рассматриваемого слоя с названием в формате «НЛ — тип допанта-концентрация допанта-мощность возбуждения-секунда освещения-уровень освещённости». После этого для сохранённых изображений вычисляется и анализируется фрактальная размерность.

Код программы для выделения слоев ФИРС и анализа их фрактальной размерности был написан в среде программирования Python. Программа реализована в среде «Ноутбук» Jupyter. Она использует две директории: *in* — для хранения в ней изображений ФИРС для поточной обработки и *out* — для сохранения туда excel-совместимой таблицы экспериментальных данных в формате CSV и готовых изображений выделенных слоев ФИРС.

Результаты исследований

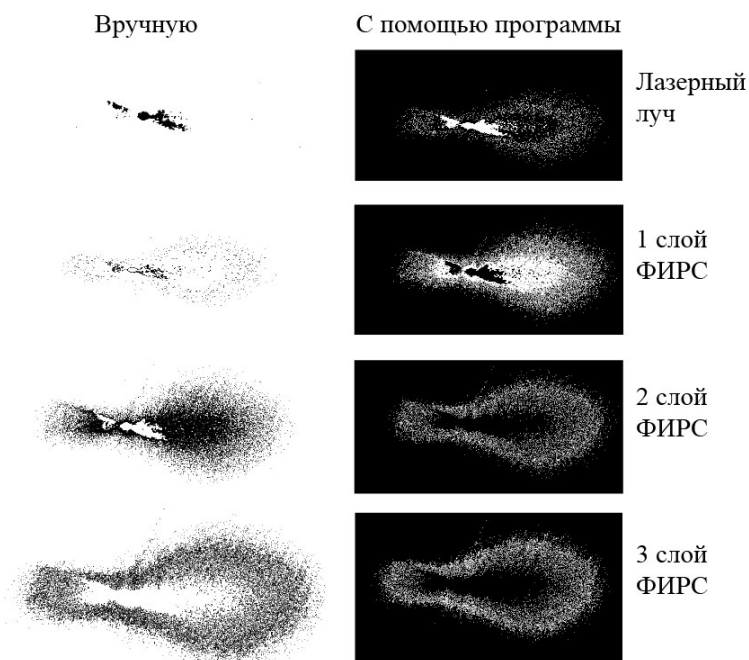


Рис. 2. Выделение трёх слоев ФИРС и лазерного луча из изображения картины ФИРС, возбуждённой в монокристалле LiNbO₃:Zn (0,52 мас. %) на 390-й секунде облучения вручную, согласно описанному алгоритму и с помощью программы

На рис. 2 представлено сравнение выделения слоёв ФИРС вручную по описанному выше алгоритму и с помощью созданной нами программы. Исходные цифровые изображения картин ФИРС были помещены в директорию *in*, вычисленные обработанные выделенные слои были взяты из директории *out*. Рис. 2 демонстрирует, что написанный нами код выполняет работу по разделению слоёв ФИРС так же эффективно, как и вручную, то есть слои, выделенные программой, не отличаются от слоёв, выделенных при непосредственном участии исследователя. Однако программа делает это поточно и в 20 раз быстрее [5]. Таким образом, мы автоматизировали процесс выделения слоёв ФИРС для дальнейшего анализа их фрактальной размерности.

Выводы

Программа, созданная на базе среды Python, эффективно и быстро выделяет слои ФИРС в монокристаллах ниобата лития различного состава лазером видимой длины волны. Таким образом, мы автоматизировали этот этап исследования картин ФИРС и улучшили методику получения фрактальной размерности слоёв ФИРС, что важно для более глубокого понимания связи разных факторов, таких как технология приготовления шихты, особенности выращивания, тип и концентрация легирующего компонента, с особенностями состояния дефектной структуры и фоторефрактивными свойствами монокристаллов ниобата лития.

Список источников

1. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны / Н. В. Сидоров [и др.]. М.: Наука, 2003. 255 с.
2. Максименко В. А., Сюй А. В., Карпец Ю. М. Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития. М.: Физматлит, 2008. 96 с.
3. Трёхслойная спекл-структура в фоторефрактивном монокристалле ниобата лития / Н. В. Сидоров [и др.] // ДАН. 2011. Т. 437, № 3. С. 352–335.
4. Manukovskaya D. V. Comparison of fractal analysis and photoinduced light scattering in $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (0,018–2,05 wt %) single crystals // Opt. Las. Techn. 2020. Vol. 127. P. 106166. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106166>.
5. Автоматизация получения фрактальной размерности уровней освещённости фотоиндуцированного рассеяния света в фоторефрактивных монокристаллах ниобата лития с помощью программы в языковой среде Python для распознавания оптических свойств монокристаллов / Д. В. Мануковская [и др.] // Сборник тезисов докладов науч. конф.-шк. «Искусственный интеллект в химии и материаловедении» = “Artificial Intelligence in Chemistry and Materials Science” (18–20 декабря 2023 г., Москва) / Ин-т органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН. М., 2023. С. 44.

References

1. Sidorov N. V., Volk T. R., Mavrin B. N., Kalinnikov V. T. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны [Lithium niobate: defects, photorefraction, vibrational spectra, polaritons]. Moscow, Nauka, 2003, pp. 255.
2. Maksimenko V. A., Syui A. V., Karpets Yu. M. *Fotoinducirovannye processy v kristallakh niobata litiya* [Photoinduced processes in lithium niobate crystals]. Moscow, Fizmatlit. 2008, pp. 96.
3. Sidorov N. V., Syui A. V., Palatnikov M. N., Kalinnikov V. T. Trekhslonnaya spekl-struktura v fotorefraktivnom monokristalle niobata litiya [Three-layer speckle structure in the photorefractive single crystal of lithium niobate]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2011, Vol. 437, No. 47–49, Iss. 1, pp. 352–335. doi:10.1134/S0012501611030067.
4. Manukovskaya D. V. Comparison of fractal analysis and photoinduced light scattering in $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (0.018–2.05 wt %) single crystals. Optics and Laser Technology, 2020, Vol. 127, pp. 106166, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106166>.
5. Manukovskaya D. V., Kalashnikov A. O., Shevyrev S. L., Palatnikov M. N., Sidorov N. V. Avtomatizatsiya polucheniya fraktal'noj razmernosti urovnej osveshchyonnosti fotoinducirovannogo rasseyaniya sveta v fotorefraktivnyh monokristallakh niobata litiya s pomoshch'yu programmy v yazykovej srede Python dlya raspoznavaniya opticheskikh svoystv monokristallov [Automation of obtaining the fractal dimension

of illumination levels of photoinduced light scattering in photorefractive lithium niobate single crystals using a program in the Python language environment for recognizing the optical properties of single crystals]. *Sbornik tezisev dokladov nauchnoj konferencii-shkoly "Iskusstvennyj intellekt v himii i materialovedenii" (18–20 dekabrya 2023, Moskva)* [Collection of abstracts of reports of the Scientific Conference-School "Artificial Intelligence in Chemistry and Materials Science" Moscow, Institute of Organic Chemistry named after N.D. Zelinsky Russian Academy of Sciences December 18–20, 2023]. Moskva, 2023, pp. 44.

Информация об авторах

Д. В. Мануковская — младший научный сотрудник;

С. Л. Шевырев — кандидат геологических наук, старший научный сотрудник;

Н. В. Сидоров — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник.

Information about the authors

D. V. Manukovskaya — Junior Researcher;

S. L. Shevyrev — PhD (Geology), Senior Researcher;

N. V. Sidorov — Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Principal Researcher.

Статья поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.

The article was submitted 09.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.