

УДК 548.4, 546.06, 544.032.65

Применение фрактального анализа для исследования картин фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах ниобата лития

Д. В. Мануковская, Н. В. Сидоров, М. Н. Палатников, А. В. Сюй

Разработана методика определения фрактальной размерности картин фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС). Исследована динамика проявления лазерно-индуцированных дефектов в слоях картин ФИРС стехиометрических монокристаллов ниобата лития различного генезиса посредством анализа фрактальной размерности слоев картин ФИРС. Проведено сравнение данных о лазерно-индуцированных дефектах, полученных методом фрактального анализа слоев ФИРС с данными, полученными методом измерения угла раскрытия индикатрисы ФИРС.

PACS: 42.25.Bs, 42.30.Ms, 42.30.Va, 42.65.Sf, 42.70.Nq, 42.70.Mr, 05.45.Df

Ключевые слова: ниобат лития, фотоиндуцированное рассеяние света, лазерно-индуцированные дефекты, фрактальная размерность.

Введение

Одним из наиболее важных фоторефрактивных материалов является сегнетоэлектрический кристалл ниобата лития LiNbO_3 . Он обладает высокой лучевой стойкостью, нелинейно-оптическими, электрооптическими, пьезоэлектрическими, пироэлектрическими, фотовольтаическими и фоторефрактивными свойствами, что обуславливает возможность его применения в устройствах голографической записи информации, модуляции, дифракции, преобразования и генерации излучения [1]. В сегнетоэлектрическом монокристалле ниобата лития LiNbO_3 под действием лазерного излучения в освещенной области возникают статические и флуктуирующие микроструктурные дефекты с показателем преломления, отличным от показателя преломления кристалла в отсутствие эффекта фоторефракции [2—6].

На дефектах, наведенных лазерным излучением, происходит фотоиндуцированное рассеяние света (ФИРС) [3—5]. Картина ФИРС в кристалле ниобата лития многослойна [5, 7], ее вид носит фрактальный характер. Она обладает самоподобием и, вследствие своей конечности, дробной размерностью, отличающейся от топологической [8]. Метод анализа фрактальной размерности широко применяется для анализа кластерных, решеточных и каркасных структур композитных материалов [9, 10]. Однако методы фрактального анализа для исследования картин ФИРС в кристаллах ниобата лития, насколько нам известно, ранее не применялись.

В этой связи актуальной задачей является разработка методов анализа картины ФИРС, отражающих характер и распределение в кристалле дефектов, наведенных лазерным излучением. ФИРС, с одной стороны, является мешающим фактором для записи голографической информации, для передачи информации в фоторефрактивных средах. С другой стороны, ФИРС является одним из методов контроля оптического качества кристаллов ниобата лития. Создание материалов с заданными оптическими характеристиками также является актуальной задачей материаловедения [11, 12]. Поэтому несомненный интерес для создания и отработки технологий оптических материалов на основе монокристалла ниобата лития представляет информация о ФИРС в зависимости от состава и структурных особенностей кристалла и мощности возбуждающего лазерного излучения. Послойный анализ картин ФИРС даст возможность выделить вклады энергетических процессов в механизмы формирования и взаимодействия дефектов, наведенных лазерным излучением в кри-

Мануковская Диана Владимировна¹, мл. научный сотрудник.

Сидоров Николай Васильевич¹, зав. сектором.

Палатников Михаил Николаевич¹, зав. сектором.

Сюй Александр Вячеславович², доцент.

¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского Научного Центра РАН.

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, 26а.

Тел. 8 (81555) 7-95-08. E-mail: deenka@yandex.ru

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения.

Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Тел. 8 (4212) 40-76-14. E-mail: fizika@festu.khv.ru

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2014 г.

© Мануковская Д. В., Сидоров Н. В., Палатников М. Н., Сюй А. В., 2015

стале. Анализ динамики развития слоев картины ФИРС может дать информацию о возбуждении и перераспределении лазерно-индуцированных дефектов.

В данной работе фрактальный анализ применен для исследования картины ФИРС в монокристаллах LiNbO_3 стехиометрического состава ($\text{Li/Nb} = 1$), выращенных двумя способами: из расплава, содержащего 58,6 % Li_2O ($\text{LiNbO}_3\text{стех.}$) и из конгруэнтного расплава с добавлением щелочного флюса K_2O ($\text{LiNbO}_3\text{стех.}\text{K}_2\text{O}$). Кристаллы стехиометрического состава перспективны как материалы с низким коэрцитивным полем для нелинейных лазерных сред с периодически поляризованными доменными структурами и для голографической записи информации [12].

Методика эксперимента

Выращивание монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{стех}$ и $\text{LiNbO}_3\text{стех.}\text{K}_2\text{O}$ описаны в работах [12, 13]. Образцы для исследований имели форму прямоугольных параллелепипедов $\approx 7 \times 6 \times 5$ мм³ с ребрами, совпадающими с кристаллофизическими осями X , Y , Z , где ось Z — полярная ось кристалла. Грани параллелепипедов тщательно полировались.

ФИРС возбуждалось лазером MLL-100 на $Y:\text{Al}$ -гранате ($\lambda_0 = 530$ нм). Рассеянное кристаллом излучение падало на полупрозрачный экран, размещенный за кристаллом, и регистрировалось цифровой фотокамерой на заданной секунде облучения. На экране имелась метрическая линейка, при помощи которой определялся геометрический размер индикатрисы ФИРС. При фиксированном расстоянии от кристалла до экрана b измерялся линейный размер a картины ФИРС. Крайней точкой, определяющей угол, считалась область на картине ФИРС, в которой интенсивность рассеянного излучения падает в e -раз. По формуле $\theta = \arctg(a/b)$ рассчитывался угол рассеяния θ [4, 5].

Каждый кадр обрабатывался для выделения слоев ФИРС программой GIMP 2.6.12. Цифровое изображение слоев ФИРС существенно различается по уровню освещенности. Поэтому на картине ФИРС с помощью цифровой обработки выделялись по уровню освещенности три характерных слоя ФИРС. Изображение каждого слоя выделялось и биномизировалось.

Для фрактального анализа картин ФИРС была выбрана размерность Минковского, для которой существует однозначный механизм получения [14]. Размерность Минковского D вычислялась по формуле:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N}{\ln r},$$

где N — минимальное число множеств диаметра r , которыми можно покрыть исследуемое множество.

Фрактальная размерность вычислялась в программе Fractalyse 2.4.1 по методу покрытия решеткой [8, 14], а именно, черно-белая картина слоя ФИРС покрывается решеткой с размером стороны в 1 пиксель, вычисляется количество непустых клеток решетки, затем сторона клетки решетки увеличивается. Когда сторона решетки достигает размера всей картины, строится зависимость количества непустых клеток от размера стороны квадрата решетки. График зависимости аппроксимируется формулой

$$y = a \cdot x^{-d} + c,$$

где y — размер клетки решетки, x — количество непустых клеток данного размера, a и c — подгонные коэффициенты, степенной показатель d — фрактальная размерность.

Изменение фрактальной размерности показывает изменение сложности системы [14]. Под увеличением сложности системы подразумевается такое изменение состояния системы, при котором происходит уменьшение производства энтропии [14—16]. Так как рассматриваемой системой являются все лазерно-индуцированные дефекты, принадлежащие исследуемому слою ФИРС, то это означает усложнение изображения слоя. Точки в картине ФИРС стоят отдельно или «слипаются» по две-три, или образуют большие связные области. Слои ФИРС ограничены в пространстве, их толщина определяется расстоянием от лазерного луча. Следовательно, перераспределение точечных лазерно-индуцированных дефектов в слое не приведет к существенному изменению общего вида картины или существенному изменению характеристик фрактала [14]. Наиболее вероятным представляется сопоставление изменения концентрации лазерно-индуцированных дефектов в слое изменению его фрактальной размерности. Преимуществом метода является то, что фрактальная размерность каждого слоя картины ФИРС отображает информацию о каждой точке картины, принадлежащей именно этому слою. Погрешность метода составила ± 5 %.

Результаты и их обсуждение

Из рисунка *б* видно, что с увеличением времени и мощности засветки происходит увеличение угла θ раскрытия индикатрисы ФИРС. Из сравнения рисунка *в* и *б* отчетливо видна общая корреляция между изменением во времени фрактальной размерности D третьего слоя картин ФИРС и угла θ раскрытия индикатрисы ФИРС. Это можно объяс-

нить тем фактом, что угол θ раскрытия индикатрисы ФИРС определяется по раскрытию третьего слоя картины ФИРС, формируемой фотоиндуцированными дефектами. Однако динамика изменения D третьего слоя картины ФИРС всех исследованных образцов при двух мощностях возбуждающего излучения имеет некоторые особенности, которые не отображаются на кривых зависимости θ от времени (рисунок *в* и *б*).

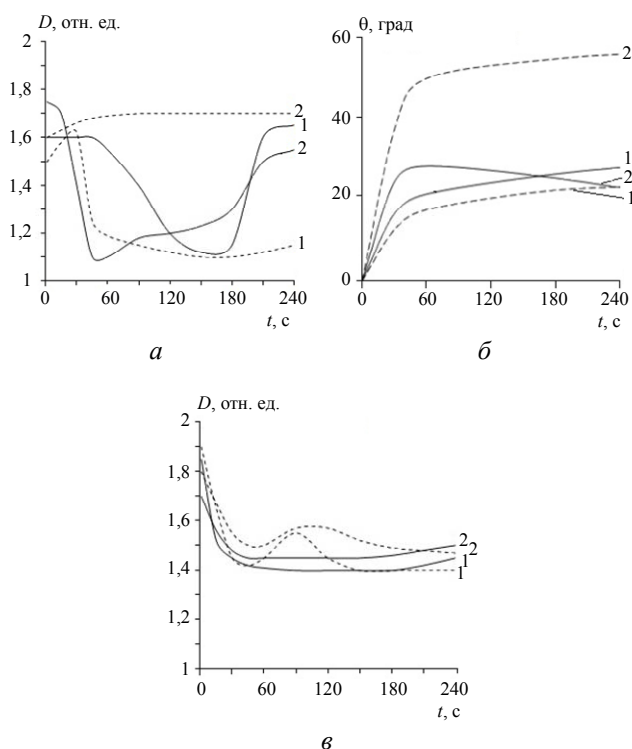


Рисунок *а, в* — динамика изменения фрактальной размерности D от времени t первого и третьего слоев спекл-структуры ФИРС, соответственно; *б* — зависимость угла θ раскрытия спекл-структуры ФИРС от времени. Монокристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:stex}$ — сплошные линии, монокристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:stex:K}_2\text{O}$ — пунктирные линии. $\lambda_0 = 530$ нм, мощность 35 мВт (1) и 160 мВт (2)

Также видно, что для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:stex:K}_2\text{O}$ под воздействием обеих мощностей возбуждающего лазерного луча (35 и 160 мВт) наблюдается перекачка энергии возбуждения лазерно-индуцированных дефектов из первого слоя картины ФИРС (пик на 30—60 с, рисунок *а*) в третий (пик на 90—120 с, рисунок *в*). Однако такая перекачка энергии между слоями не наблюдается для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:stex}$, что может быть связано с разными механизмами электронной проводимости (поляронным или прыжковым) и, соответственно, с разными подвижностями электронных носителей. Отсутствие отклика во втором слое картины ФИРС пока не имеет однозначного объяснения, но может быть связано с рекомбинацией фотоиндуцированных дефектов вследствие их вы-

сокой плотности во втором слое ФИРС. Резкое уменьшение концентрации лазерно-индуцированных дефектов в первом слое картины ФИРС на 60—180 секунде облучения (рис. *а*) для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:stex}$ при обеих мощностях возбуждения (35 и 160 мВт) и для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:stex:K}_2\text{O}$ при 35 мВт объясняется возбуждением и дрейфом заряженных лазерно-индуцированных дефектов. Отсутствие такого уменьшения для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:stex:K}_2\text{O}$ под действием лазерного излучения в 160 мВт можно объяснить наличием при таких условиях достаточного количества энергии, для того чтобы возбуждение лазерно-индуцированных дефектов в слое проходило без падения их концентрации, а также, как уже было сказано выше, отличной от кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:stex}$ подвижностью электронных носителей.

Зависимость фрактальной размерности D от времени для второго слоя ФИРС не приведена, так как эта зависимость представляет собой практически прямую линию для обоих исследованных образцов при обеих мощностях возбуждающего излучения. Это можно объяснить тем фактом, что возбуждение, возникающее в первом слое ФИРС и передающееся в третий слой, просто передается вторым слоем, не изменяя его.

Заключение

В работе показано, что, используя методы анализа фрактальной размерности, можно достаточно точно описать картину лазерно-индуцированных дефектов, проявляющихся в фотоиндуцированном рассеянии света и динамику изменения их концентрации во времени. Для кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:stex:K}_2\text{O}$ была зафиксирована перекачка энергии из более яркого слоя картины ФИРС (первого) в более тусклый (третий). Отсутствие отклика при такой передаче энергии второго слоя ФИРС пока не нашло абсолютно однозначного объяснения.

Отметим, что фрактальный анализ является также показательным методом, который может определять распределение дефектов в кристаллической решетке кристалла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Günter P. Photorefractive materials and their applications. 3. Applications. J.-P. Huignard. — NY.: Springer Science + Business Media, LLC, 2007.
2. Volk T. Lithium niobate. Defects, photorefracton and ferroelectric switching — Berlin: Springer, 2008.
3. Обуховский В. В., Лемешко В. В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. С. 1389.
4. Максименко В. А. Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

5. Сидоров Н. В., Сюй А. В., Палатников М. Н. и др. // Оптика и спектроскопия. 2011. Т.110. № 6. С. 916.
6. Сидоров Н. В., Палатников М. Н., Калинин В. Т. // Доклады Академии наук. 2011. Т. 441. № 2. С. 209.
7. Сидоров Н. В., Сюй А. В., Палатников М. Н. и др. // Доклады Академии наук. 2011. Т. 437. № 3. С. 352.
8. Mandelbrot B. *The fractal geometry of Nature* — San-Francisco: W. H. Freeman, 1983.
9. Юдин В. В., Любченко Е. А., Полянский Д. А. и др. // Проблемы Эволюции Открытых Систем. 2005. Т. 1. С. 119.
10. Бобрышев А. Н. Физика и синергетика дисперсно неупорядоченных конденсированных композитных систем — СПб.: Наука, 2012.
11. Сидоров Н. В. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны — М.: Наука, 2003.
12. Палатников М. Н. Сегнетоэлектрические твердые растворы на основе оксидных соединений ниобия и тантала: синтез, исследование структурного упорядочения и физических характеристик — СПб: Наука, 2001.
13. Сидоров Н. В., Антонычева Е. А., Сюй А. В. и др. // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 6. С. 1079.
14. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах — М.: Постмаркет, 2000.
15. Климонтович Ю. Л. Введение в физику открытых систем — М.: Янус-К, 2002.
16. Хакен Г. Синергетика — М.: Мир, 1980.

Use of the fractal analysis for research of photoinduced light scattering pictures in lithium niobate crystals

D. V. Manukovskaya¹, N. V. Sidorov¹, M. N. Palatnikov¹, and A. V. Syuy²

¹Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials,
Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences
26a Akademgorodok, Apatity, Murmansk Region, 184209, Russia
E-mail: deenka@yandex.ru

²Far Eastern State Transport University
47 Seryshev str., Khabarovsk, 680021, Russia
E-mail: fizika@festu.khv.ru

Received November 6, 2014

In this paper, the method of determination of fractal dimension of photoinduced light scattering (PILS) pictures layers was developed. The dynamics of laser-induced defects in PILS layers was researched by this method in stoichiometric lithium niobate single crystals grown from different melts. The data on laser-induced defects obtained by fractal analysis were compared with the data obtained by measurement of PILS indicatrix opening angle.

PACS: 42.25.Bs, 42.30.Ms, 42.30.Va, 42.65.Sf, 42.70.Nq, 42.70.Mp, 05.45.Df

Keywords: lithium niobate, photoinduced light scattering, laser-induced defects, fractal dimension.

REFERENCES

1. P. Günter, *Photorefractive Materials and Their Applications*. (NY, Springer Science + Business Media, LLC, 2007).
2. T. Volk, *Lithium Niobate. Defects, Photorefraction and Ferroelectric Switching* (Berlin: Springer, 2008).
3. V. V. Obuckhovskij and V. V. Lemeshko, *Tech. Phys. Lett.* **11**, 1389 (1985).
4. V. A. Maksimenko, *Photoinduced Processes in Lithium Niobate Crystals* (Moscow, Fizmatlit, 2008) [in Russian].
5. N. V. Sidorov, A. V. Syui, M. N. Palatnikov, et al., *Opt. Spectrosc.* **110**, 864 (2011); DOI 10.1134/S0030400X11690026
6. N. V. Sidorov, M. N. Palatnikov, and V. T. Kalinnikov, *Dokl. Phys. Chem.* **441**, 215 (2011); DOI 10.1134/S0012501611110029
7. N. V. Sidorov, A. V. Syui, M. N. Palatnikov, et al., *Dokl. Phys. Chem.* **437**, 47 (2011); DOI 10.1134/S0012501611030067
8. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature* (San-Francisco: W.H. Freeman, 1983).
9. V. V. Yudin, E. A. Lyubchenko, D. A. Polyanskiy, et al., *Journal Problems of the Evolution of Open Systems* **1**, 119 (2005).
10. A. N. Bobryshev, *Physics and Synergetics of Disperse not Ordered Condensed Composite Systems*. (Saint-Petersburg: Nauka, 2012) [in Russian].
11. N. V. Sidorov, *Lithium Niobate* (Moscow: Nauka, 2003) [in Russian].
12. M. N. Palatnikov, N. V. Sidorov, and V. T. Kalinnikov, *Ferroelectric Solid Solutions Based on Oxide Compounds of Niobium and Tantalum* (Saint-Petersburg: Nauka, 2001) [in Russian].
13. N. V. Sidorov, E. A. Antonycheva, A. V. Syui, et al., *Cryst. Rep.* **55**, 1019 (2010); DOI 10.1134/S1063774510060192
14. R. M. Crownover, *Introduction to Fractals and Chaos* (USA, MA: Jones and Bartlett Publishers Inc., 1995).
15. Yu. L. Klimontovich, *Introduction to Physics of Open Systems* (Moscow, Yanus-K, 2002) [in Russian].
16. H. Haken, *Synergetics* (New York: Springer-Verlag, 1978).