АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛЕГИРОВАННОМ МЕДЬЮ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Т.А. Журин, Э.В. Комов, С.М. Шандаров, М.Г. Кистенева
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
пр. Ленина 40, Томск 634050, Россия, timoxazh1@gmail.com, mazaratik777@mail.ru, stanislavshandarov@gmail.com, m-kisteneva@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных зависимостей коэффициента пропускания в легированном медью кристалле ниобата лития в спектральном диапазоне 300-1100 нм. Спектральные зависимости оптического поглощения в легированном медью кристалле ниобата лития, с его увеличенными значениями для $\lambda < 550$ нм и $\lambda > 800$ нм по сравнению с нелегированным образцом, аппроксимировались в рамках модели, учитывающей вклад как процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров с нормальным законом распределения концентраций по энергии ионизации, так и внутрицентровых переходов с гауссовым видом частотных зависимостей, для примесных ионов в зарядовых состояниях Cu^{+} и Cu^{2+} соответственно.

Ключевые слова: ниобат лития; оптическое поглощение; спектральная зависимость.

STUDY OF OPTICAL ABSORPTION SPECTRA IN A COPPER-DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

Timofey Zhurin, Eduard Komov, Stanislav Shandarov, Marina Kisteneva
State University of Control System and Radioelectronics,
40 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia, timoxazh1@gmail.com, mazaratik777@mail.ru, stanislavshandarov@gmail.com, m-kisteneva@mail.ru

The results of experimental studies of the spectral dependences of transmission coefficient in a copper-doped lithium niobate crystal in the spectral range 300-1100 nm are presented. Copper films were deposited on the optically polished surface of the plate from both sides by magnetron sputtering. Diffusion occurred at the temperature of 600 ºC for five hours, followed by natural cooling over a period about 12 hours. It is shown that copper doping leads to decrease in optical transmission at wavelengths $\lambda < 550$ nm and $\lambda > 800$ nm compared to the initial values for the undoped sample. Spectral dependences of optical absorption in a copper-doped lithium niobate crystal were approximated in the framework of the impurity absorption model, which takes into account the contribution of both photoexcitation of electrons to the conduction band from deep donor centers with a normal distribution law of concentrations in terms of ionization energy, and intracenter transitions with Gaussian type of frequency dependencies. We take into account one intracenter transition with Gaussian spectral characteristics with maxima at quantum energies equal to 1.22 eV. For the transitions of electrons to the conduction band two deep donor centers were taken into account with average ionization energies of 2.66 and 3.72 eV.

Keywords: lithium niobate; optical absorption; spectral dependence.

Введение

Кристаллы ниобата лития находят широкое применение в разнообразных оптических устройствах. Легирование кристаллов ниобата лития позволяет изменять его свойства в широких пределах. Объемно-легированные кристаллы $LiNbO_3$:Fe, где ионы железа обеспечивают высокий фотовольтаический отклик [1-3], используются в оптических пинцетах. К материалам с хорошими фотовольтаическими свойствами относятся и легированные медью кристаллы $LiNbO_3$:Cu [4], при этом они могут быть получены методом высокотемпературной диффузии Cu из металлических и оксидных пленок в нелегированные подложки ниобата лития [5]. Спектральные зависимости оптического поглощения кристаллов $LiNbO_3$:Cu определяются концентрацией примесных центров в зарядовых состояниях Cu^{+} и Cu^{2+}, играющих роль донорных и ловушечных центров, от которых зависит эффективность фотовольтаического формирования

электрических полей в оптических пинцетах [6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований спектральной зависимости оптического поглощения в диффузионно-легированном кристалле $LiNbO_3$:Cu. Полученные спектры аппроксимировались в рамках модели примесного поглощения, учитывающей вклад в него как процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров с нормальным законом распределения концентраций по энергии ионизации, так и внутрицентровых переходов с гауссовым видом частотных зависимостей [7].

Методика эксперимента

В экспериментах использовались оптически полированные пластины Z-среза из конгруэнтного ниобата лития, имеющие размеры 2×11.4×6.5 мм^3 по осям *x*, *y* и *z*, соответственно. Перед напылением медной пленки измерялся спектр оптического пропускания образца в диапазоне 200-1100 нм с помощью спектрофотометра GENESYS 2. Плёнки меди наносились на оптически полированную поверхность пластины с двух сторон методом магнетронного распыления и имели толщину 400 нм. Далее осуществлялся нагрев образца в электропечи на карбидокремниевых нагревателях со скоростью 300 К/ч (5 К/мин) до температуры 600 ºС. Диффузия происходила при данной температуре в течение 5 часов, с последующим естественным охлаждением за время порядка 12 часов. Все операции по отжигу образцов проводились в воздушной атмосфере. После диффузии остатки плёнки стравливались с помощью 70% раствора уксусной кислоты при температуре 80 °С. Далее проводились повторные измерения спектра его оптического пропускания.

Результаты и их обсуждение

Полученный образец $LiNbO_3$:Cu характеризуется равномерной светло-жёлтой окраской и уменьшенным оптическим пропусканием на длинах волн $\lambda < 550$ нм и $\lambda > 800$ нм, по сравнению с исходными значениями, наблюдавшимися до проведения диффузии. Из полученных данных по известной методике [8] были определены усредненные по толщине легированного образца спектральные зависимости показателя поглощения. Экспериментальная спектральная зависимость оптического поглощения представлена на рис. 1.

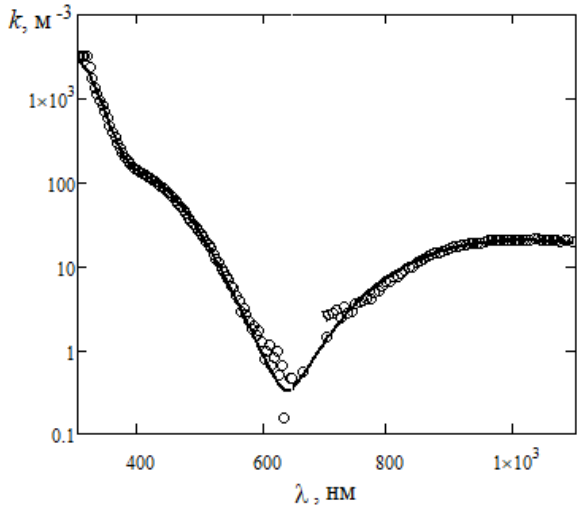

Рис. 1. Спектральные зависимости показателя оптического поглощения легированного медью образца ниобата лития. Кружки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчетные зависимости

На этой зависимости наблюдаются широкие полосы поглощения в спектральных диапазонах 390-460 нм и 750-1100 нм.

Представленная на рис. 1 зависимость была аппроксимирована в рамках модели, учитывающей вклад в примесное поглощение фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров с нормальным законом распределения концентраций по энергии ионизации и внутрицентровых переходов [7].

Представленные на рис. 1 расчетная сплошная кривая, полученная в рамках рассматриваемой модели [7], учитывает для исследуемого кристалла $LiNbO_3$:Cu один внутрицентровой переход с гауссовской спектральной характеристикой с максимумом при энергии кванта, равной 1.22 эВ, предположительно относящийся

к ловушечному дефектному центру Cu^{2+}. Для описания поглощения, связанного с фотовозбуждением электронов в зону проводимости, были учтены два глубоких донорных центра со средними энергиями ионизации 2.66 и 3.72 эВ. Последний из них может быть связан с дефектным центром в зарядовом состоянии Cu^{+}.

Заключение

Таким образом, легирование медью кристаллов ниобата лития приводит к уменьшению оптического пропускания на длинах волн $\lambda < 550$ нм и $\lambda > 800$ нм, по сравнению с исходными значениями, наблюдавшимися до проведения диффузии. На спектральной зависимости оптического поглощения наблюдаются широкие полосы поглощения в спектральных диапазонах 390-460 нм и 750-1100 нм.

Полученные экспериментальные спектральные зависимости оптического поглощения в кристалле $LiNbO_3$:Cu аппроксимировались и количественно сопоставлялись в рамках модели, учитывающей вклад в него процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с двух глубоких донорных центров, а также одного внутрицентрового перехода.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания FEWM-2023-012 на 2023 – 2025 г.

Библиографические ссылки

1. Esseling M., Zaltron A., Argiolas N., Nava G., Imbrock J., Cristiani I. et al. Highly reduced iron-doped lithium niobate for optoelectronic tweezers. *Appl. Phys. B.* 2013; 113 (2): 191-197.
2. Matarrubia J., Garcia-Cabanes A., Plaza J.L., Agullo-Lopez F., and Carrascosa M. Optimization of particle trapping and patterning via photovoltaic tweezers: role of light modulation and particle size. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2014; 47(26): 265101.
3. Blazquez-Castro A., Garcıa-Cabanes A., and Carrascosa M. Biological applications of ferroelectric materials. *Appl. Phys. Rev.* 2018; 5 (4): 041101.
4. Volk T. and Wöhlecke M. Lithium Niobate. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
5. Мамбетова К.М., Смаль Н.Н., Шандаров С.М. и др. Динамика формирования пропускающих голограмм в кристаллах ниобата лития, легированных медью методом высокотемпературной диффузии. *Изв. Вузов. Радиофизика* 2015; 57(8-9): 675-682.
6. Мамбетова К.М., Шандаров С.М., Орликов Л.Н. и др. Формирование динамических фоторефрактивных решеток в кристаллах $LiNbO_3$:Cu с поверхностным легированием. *Оптика и спектроскопия* 2019; 126(6): 856-861.
7. Кистенева М.Г., Худякова Е.С., Шандаров С.М., Акрестина А.С., Дю В.Г., Каргин Ю.Ф. Спектральные зависимости примесного поглощения в кристаллах силленитов. *Квантовая электроника* 2015; 45(7): 685-690.
8. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупрводников. Под ред. В.М. Тучкевича. Москва: Наука; 1977: 366 с.