

## Спектральная зависимость оптического поглощения в легированных медью кристаллах ниобата лития

А. А. Колмаков, Т. А. Журин, Э. В. Комов, С. М. Шандаров, М. Г. Кистенева

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия,  
e-mail: [kolmakov.sasha1@mail.ru](mailto:kolmakov.sasha1@mail.ru)*

Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных зависимостей оптического поглощения в легированных медью кристаллах ниобата лития Z- и X-среза. Показано, что эти зависимости характеризуются широкими полосами поглощения в спектральных диапазонах 390 – 460 нм и 750 – 1100 нм для образца Z-среза и в спектральных диапазонах  $\lambda < 530$  нм и  $\lambda = 800 - 1100$  нм для образца X-среза. Спектральные зависимости оптического поглощения аппроксимировались в рамках модели, учитывающей вклад процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров и внутрицентровые переходы.

**Ключевые слова:** ниобат лития; оптическое поглощение; спектральная зависимость, диффузия.

## Spectral dependence of optical absorption in copper-doped lithium niobate crystals

A. A. Kolmakov, T.A. Zhurin, E.V. Komov, S.M. Shandarov, M.G. Kisteneva

*State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk, Russia,  
e-mail: [kolmakov.sasha1@mail.ru](mailto:kolmakov.sasha1@mail.ru)*

The results of experimental studies of the spectral dependences of optical absorption in copper-doped Z- and X-cut lithium niobate crystals are presented. It is shown that these dependences are characterized by wide absorption bands in the spectral ranges of 390 – 460 nm and 750 – 1100 nm for the Z-cut sample and in the spectral ranges  $\lambda < 530$  nm and  $\lambda = 800 - 1100$  nm for the X-cut sample. The spectral dependences of optical absorption were approximated within the framework of a model that takes into account the contribution of both the processes of photoexcitation of electrons into the conduction band from deep donor centers and intracenter transitions.

**Keywords:** lithium niobate; optical absorption; spectral dependence, diffusion.

### Введение

Кристаллы ниобата лития сочетают в себе электрооптические и нелинейно-оптические свойства, что делает их уникальным материалом для фотонных и оптоэлектронных систем, а также для систем оптической обработки и передачи информации. Одной из важных особенностей ниобата лития является возможность управления его свойствами путем легирования различными примесями. Объемно-легированные кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ , где ионы железа обеспечивают высокий фото-вольтаический отклик [1, 2], используются в оптических пинцетах. К материалам с хорошими фотовольтаическими свойствами относятся и легированные медью кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  [3]. Диффузионное легирование ниобата лития медью, позволяющее управлять фотовольтаическими и фотопроводящими параметрами для создания

микроструктур на основе этих кристаллов [3, 4], в то же время оказывает влияние и на оптические свойства кристаллов ниобата лития.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований спектральной зависимости оптического поглощения в диффузионно-легированном кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ . 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 внутрицентровый переход с гауссовым видом спектральной зависимости [5].

## 1. Экспериментальные результаты

В экспериментах использовались оптически полированные пластины из конгруэнтного ниобата лития Z-среза, имеющие размеры  $6,5 \times 11,4 \times 2,0 \text{ мм}^3$ , и X-среза, имеющие размеры  $1,33 \times 10,22 \times 12,42 \text{ мм}^3$  по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , соответственно. Перед напылением медной пленки измерялся спектр оптического пропускания образцов в диапазоне  $200 \div 1100 \text{ нм}$  с помощью спектрофотометра GENESYS 2. Диффузионное легирование проводилось путем нанесения металлической пленки меди толщиной  $400 \text{ нм}$  для образца Z-среза и толщиной  $600 \text{ нм}$  для образца X-среза методом магнетронного распыления. Диффузия производилась для образца Z-среза при температуре  $T_{\text{диф}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 5 часов и для образца X-среза при температуре  $T_{\text{диф}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 9 часов. Затем происходил последующий процесс естественного охлаждения за время порядка 12 часов. Все операции по отжигу образцов проводились в воздушной атмосфере. Далее проводились повторные измерения спектра оптического пропускания легированных образцов.

На рис. 1 приведены экспериментальные спектральные зависимости коэффициента пропускания  $T(\lambda)$  нелегированного и легированного медью кристалла ниобата лития Z-среза. Как видно из рис. 1 в образце  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  наблюдается уменьшение оптического пропускания в спектральных диапазонах  $\lambda < 550 \text{ нм}$  и  $\lambda > 800 \text{ нм}$ , по сравнению с исходными значениями, наблюдававшимися до проведения диффузии.

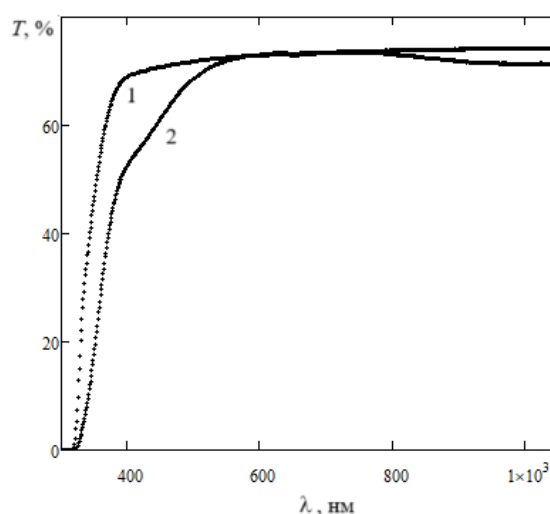


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента пропускания: 1 – нелегированного, 2 – легированного медью образца ниобата лития Z-среза

Для образца X-среза легирование медью приводит к значительному увеличению оптических потерь во всем исследованном диапазоне, при этом в спектральной области  $\lambda < 500$  нм пропускание уменьшилось на 70 %, а для  $\lambda > 850$  нм – более чем на 30 %, по сравнению с нелегированным образцом ниобата лития.

Из полученных данных по известной методике [6] были определены усредненные по толщине легированного образца спектральные зависимости показателя поглощения. Экспериментальные спектральные зависимости оптического поглощения для кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  Z-среза представлена на рис. 2, а, а для кристалла X-среза – на рис. 2, б.

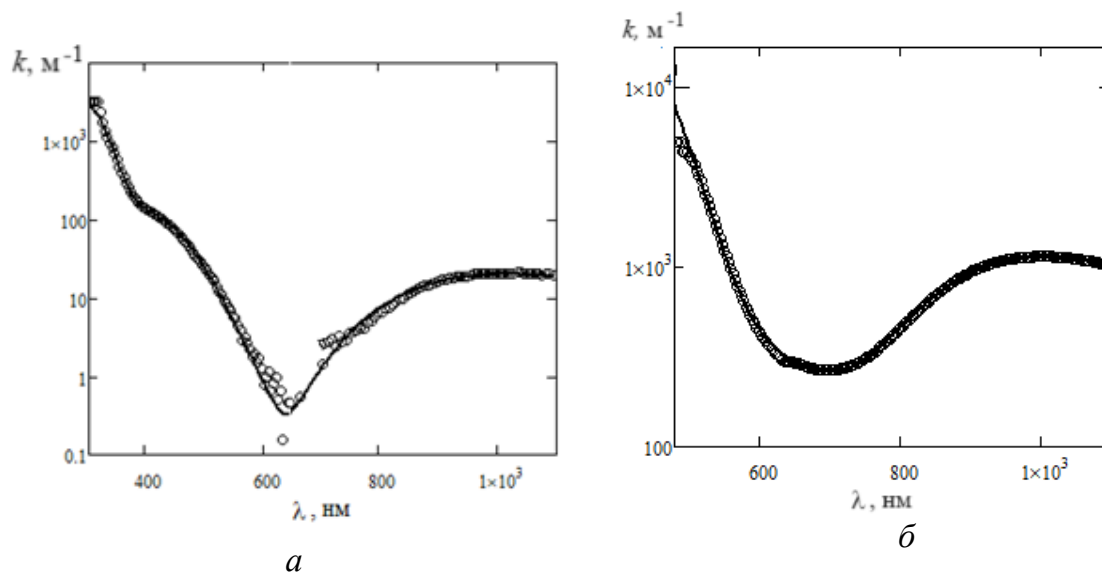


Рис. 2. Спектральные зависимости показателя оптического поглощения легированного медью образца ниобата лития: а – Z-среза, б – X-среза. Кружки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчетные зависимости

Для образца Z-среза на этой зависимости наблюдаются широкие полосы поглощения в спектральных диапазонах 390 – 460 нм и 750 – 1100 нм (рис. 2, а). Для образца X-среза полосы поглощения были зафиксированы в спектральных областях  $\lambda < 530$  нм и  $\lambda = 800 – 1100$  нм (рис. 2, б).

## 2. Анализ и обсуждение результатов

Полученные спектральные зависимости оптического поглощения для кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  были 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 внутрицентрального перехода [5].

Представленные на рис. 2, а расчетная сплошная кривая учитывает для исследуемого кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  Z-среза один внутрицентральной переход с гауссовской спектральной характеристикой с максимумом при энергии кванта, равной 1,22 эВ. Для описания поглощения, связанного с фотовозбуждением электронов в зону проводимости, были учтены два глубоких донорных центра со средними значениями

энергии ионизации 2,66 и 3,72 эВ. Для образца X-среза также был учтен один внутрицентровый переход с максимумом при энергии кванта, равной 1,23 эВ, и два глубоких донорных центра со средними значениями энергии ионизации 1,64 и 2,66 эВ. Внутрицентровый переход с максимумом при энергии кванта, равной 1,22 (1,23) эВ, предположительно относится к ловушечному дефектному центру  $\text{Cu}^{2+}$ . Глубокий донорный центр с энергией ионизации 3,72 эВ может быть связан с примесным дефектом в зарядовом состоянии  $\text{Cu}^+$ .

### **Заключение**

Таким образом, легирование медью кристаллов ниобата лития приводит к уменьшению оптического пропускания во всем спектральном диапазоне для образца X-среза и в спектральных диапазонах  $\lambda < 550$  нм и  $\lambda > 800$  нм для образца Z-среза, по сравнению с исходными значениями, наблюдавшимися до проведения диффузии. На спектральной зависимости оптического поглощения наблюдаются широкие полосы поглощения в областях 390 – 460 нм и 750 – 1100 нм для образца Z-среза, и в диапазонах  $\lambda < 530$  нм и  $\lambda = 800$  – 1100 нм для образца X-среза.

Полученные экспериментальные спектральные зависимости оптического поглощения в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  аппроксимировались и количественно сопоставлялись в рамках модели, учитывающей вклад в него процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с двух глубоких донорных центров со средними значениями энергии ионизации 2,66 и 3,72 эВ для образца Z-среза и 1,64 и 2,66 эВ для образца X-среза, а также одного внутрицентрового перехода с гауссовской спектральной характеристикой, с максимумом при энергии кванта, равной 1,22 эВ.

### **Благодарности**

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

### **Библиографические ссылки**

1. Highly reduced iron-doped lithium niobate for optoelectronic tweezers / M. Esseling [et al.]. // *Appl. Phys. B*. 2013. Vol. 113, iss. 2. P. 191–197.
2. Optimization of particle trapping and patterning via photovoltaic tweezers: role of light modulation and particle size / J. Matarrubia [et al.]. // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2014. Vol. 47, iss. 26. P. 265101.
3. Volk T., Wöhlecke M. *Lithium Niobate*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
4. Photorefractive properties of  $\text{LiNbO}_3$  crystals doped by copper diffusion / K. Peithmann [et al.]. // *Physical Review B*. 2000. Vol. 61, iss. 7 / P. 4615–4620.
5. Спектральные зависимости примесного поглощения в кристаллах силленитов / М. Г. Кистенева [и др.] // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45, № 7. С. 685 – 690.
6. Уханов Ю. И. *Оптические свойства полупроводников*. Под ред. В.М. Тучкевича. Москва: Наука; 1977. 366 с.