

УДК 538.94;53.082

**ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ  
ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ****Здоровцев Г.Г., Карпец Ю.М., Лебедев В.А.***Дальневосточный государственный университет путей сообщения,  
Хабаровск, e-mail: tmeh@festu.kv*

Экспериментально исследована температурная зависимость электропроводности легированных железом кристаллов ниобата лития. Описана автоматизированная установка для измерения вольт-амперной характеристики высокоомных кристаллов при температурах от комнатной до 120°C (с точностью измерения температуры не ниже 0,5°C). Устройство позволяет автоматизировать процесс измерения температурной зависимости электропроводности образцов и повысить точность измерения по сравнению с ручным способом. Показано, что для малых концентраций примеси проводимость кристаллов имеет активационный характер. Для концентраций примеси железа более 0,3 вес. % температурная зависимость электропроводности имеет более сложный характер, требующий для описания более сложную модель механизма проводимости. Полученные результаты представляют интерес с точки зрения применения сильнолегированных кристаллов ниобата лития в тепловых приемниках излучения.

**Ключевые слова:** автоматизированная установка, температурная зависимость электропроводности, легированный ниобат лития, тепловые приемники излучения

**A TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY  
OF THE DOPED LITHIUM NIOBAT CRYSTALS****Zdorovtsev G.G., Karpets Y.M., Lebedev V.A.***Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: tmeh@festu.khv.ru*

A temperature dependence of the electrical conductivity of the Fe-doped lithium niobat crystals is experimentally investigated. The automatic setup for current-voltage characteristic measurement of high-resistance crystals at temperatures ranging from room temperature to 120°C (with temperature measuring accuracy not less than 0,5°C) is described. The device allows to automate the process of measuring the temperature dependence of the electrical conductivity. For concentration of an impurity of iron more than 0,3 % weight temperature dependence of the electrical conductivity has more difficult character demanding for the description more difficult model for the mechanism of conductivity. The received results are of interest from the point of view of application high-doped lithium niobat crystals in thermal receivers of radiation.

**Keywords:** the automatic setup, the temperature dependence of the electrical conductivity, high-doped lithium niobat, thermal receivers of radiation

В большинстве современных публикаций, посвященных исследованию температурной зависимости электропроводности кристаллов ниобата лития, приводятся результаты измерений, выполненных при  $T > 330$  К, а температурный диапазон 270–330 К, где существенный вклад в проводимость вносит предположительно поляронный механизм, исследован мало [1–2, 6, 8–10]. Обзор данных по электропроводности слаболегированных кристаллов ниобата лития представлен в работах [1, 2]. В работе [2] отмечается, что на раннем этапе исследований слаболегированных (0,05 % Cr, 0,05 % Co, 0,05 % Fe) и беспримесных кристаллов ниобата лития было установлено, что температурная зависимость темновой проводимости при  $T > 400$  К достаточно хорошо подчиняется экспоненциальному закону, а энергия активации имеет значение порядка 1,1 эВ [2]. Однако при исследовании температурной зависимости темновой проводимости в диапазоне 300–400 К были получены результаты, которые могут быть интерпретированы в рамках существования двух различных вкладов в темновую про-

воодимость [15]. В настоящее время считается, что в кристаллах ниобата лития в общем случае имеются две компоненты, вносящие вклад в темновую проводимость: ионная, связанная с ионами  $H^+$ , которые неконтролируемо входят в структуру ниобата лития в процессе роста и монодоменизации образцов, и электронная, проявляющаяся при более низких температурах [1, 2, 10].

Экспериментальные результаты, представленные в приведенных работах, свидетельствуют о необходимости дополнительного тщательного изучения темновой проводимости кристаллов ниобата лития разного состава в области температур, близких к комнатной.

**Целью данной работы** является экспериментальное исследование температурной зависимости электропроводности легированных железом кристаллов ниобата лития.

**Экспериментальная установка**

Измерения проводились с помощью автоматизированной установки для измерения температурной зависимости проводимости высокоомных кристаллов при температу-

рах от комнатной до 120°C (с точностью измерения температуры не ниже 0,5°C). Автоматизированная установка позволяет нагревать исследуемый образец со скоростью 0,1–10 К/мин, измерять ток в диапазоне  $10^{-6}$ – $10^{-12}$  А, напряжение на исследуемом образце в диапазоне от 10 до 1000 вольт.

Структурная схема установки представлена на рис. 1. Для проведения измерений необходимо установить параметры измерения: максимальное напряжение на исследуемом образце (формируется моду-

лем высоковольтного усилителя, сигнал на который поступает с модуля цифро-аналогового преобразователя), ширину шага выдаваемых напряжений (определяется временем нахождения образца под напряжением, задержку между временем выдачи напряжения и временем измерения тока и напряжения). Перед запуском установки в автоматическом режиме запускается программа приема данных на компьютере и устанавливается соединение с компьютером.

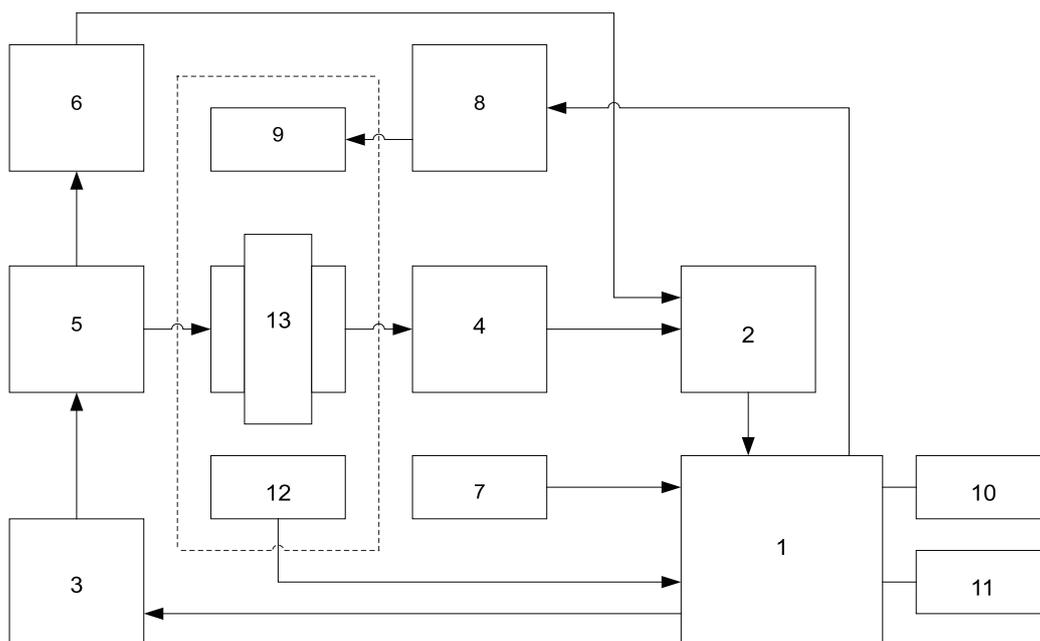


Рис. 1. Функциональная схема установки:

- 1 – устройство управления; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – цифро-аналоговый преобразователь; 4 – преобразователь ток-напряжение; 5 – источник напряжения; 6 – делитель напряжения; 7 – блок ввода информации; 8 – регулятор температуры; 9 – нагревательный элемент; 10 – система индикации; 11 – интерфейс цифровой связи; 12 – датчики температуры; 13 – образец

Исследуемый образец помещается между выводами высоковольтного источника постоянного напряжения. Последовательно в цепь включен измеритель тока, а параллельно измеритель напряжения. Измерители тока и напряжения представляют собой 12-разрядные АЦП с входными согласующими усилителями. Так как максимальное значение входного сигнала АЦП ограничено его техническими характеристиками, то делитель напряжения, датчик тока вместе с входными согласующими усилителями должны обеспечить изменение входного сигнала на входах АЦП в нужном диапазоне при изменении тока и напряжения от минимального до максимального значения. Делитель напряжения представляет собой цепь последовательно включенных резисторов. В данной системе для этой цели

использовался уже имеющийся стандартный делитель напряжения (ДНВ). Микроконтроллер согласно алгоритму работы в определенные моменты времени выдает команды на периферийные устройства для осуществления изменения напряжения источника высокого напряжения с заданным шагом. Он также осуществляет регистрацию на каждом шаге величины напряжения и тока на исследуемом образце. Регистрация осуществляется с помощью датчиков и измерителей тока и напряжения, значение которых преобразуется в цифровые сигналы с помощью аналого-цифровых преобразователей. Результаты преобразования считываются микроконтроллером через трехпроводной интерфейс SPI. Текущие значения напряжения и тока отображаются на жидкокристаллическом дисплее.

Измеренные значения тока и напряжения в заданном формате отправляются по последовательному порту на ЭВМ для дальнейшей обработки данных.

После запуска установки в автоматическом режиме происходит последовательное увеличение напряжения на опытном образце на величину шага с одновременной регистрацией тока и напряжения на каждом шаге и отправка измеренных данных по последовательному порту в компьютер в программу приема данных [7]. Программа осуществляет запись принятых данных в файл. Обработка данных осуществляется в математической среде Maple, в которой на основе этих данных можно построить графики и их обработку.

Устройство позволяет автоматизировать процесс снятия вольт-амперной характеристики и существенно повысить точность измерения по сравнению с ручным способом.

### Результаты экспериментальных измерений

На рис. 2–4 (а) представлены температурные зависимости удельного сопротивления кристаллов ниобата лития с разным содержанием примеси железа, полученные на автоматизированной установке. В экспериментах использовались беспримесные и легированные железом кристаллы ниобата лития с толщиной от 0,1 до 2 мм и площадью от 1 мм<sup>2</sup> до 3 см<sup>2</sup>. Металлические электроды наносились напылением в вакууме.

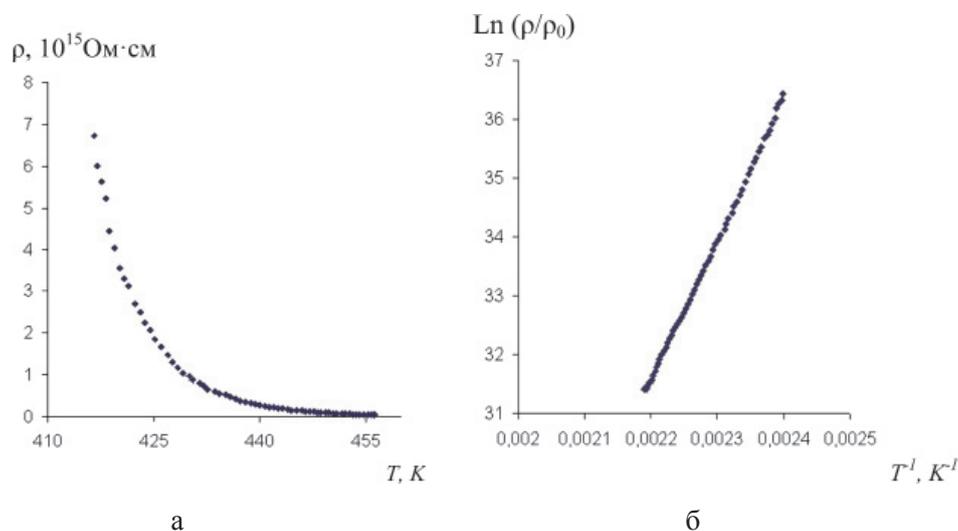


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления от температуры кристалла ( $\text{LiNbO}_3$ : Fe – 0,15 вес. %; Y – срез) – (а); зависимость логарифма сопротивления от обратной температуры кристалла – (б)

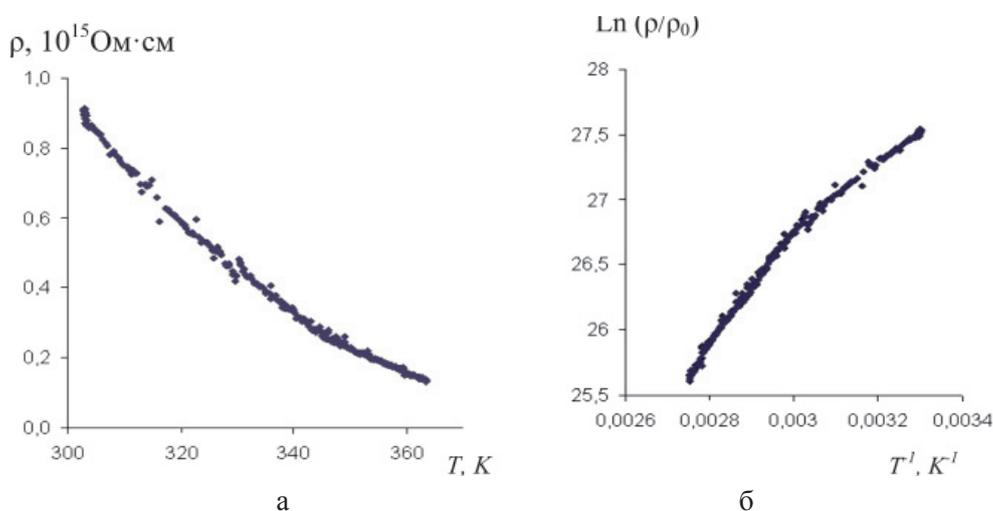


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления от температуры кристалла ( $\text{LiNbO}_3$ : Fe – 0,3 вес. %; Y – срез) – (а); зависимость логарифма сопротивления от обратной температуры кристалла – (б)

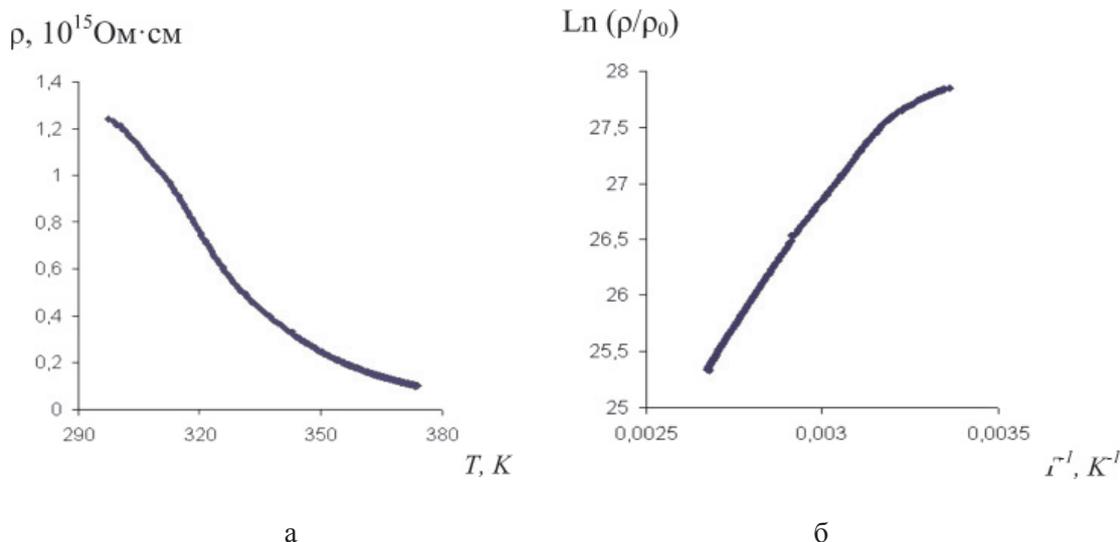


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления от температуры кристалла ( $\text{LiNbO}_3$ ; Fe – 0,5 вес. %; Y – срез) – (а); зависимость логарифма сопротивления от обратной температуры кристалла – (б)

На рис. 2–4 (б) построены соответствующие им зависимости логарифма сопротивления от обратной температуры кристалла  $\text{LiNbO}_3$ . Видно, что зависимости не носят простой активационный характер.

Как видно из графиков, чисто активационный характер температурной зависимости электропроводности наблюдается только для слаболегированных кристаллов ниобата лития (рис. 2). Для сильнолегированных кристаллов ниобата лития (рис. 3–4) уже при комнатных температурах наблюдаются значительно более сложные зависимости, плохо описываемые моделью двух активационных механизмов [15].

### Заключение

В работе описана автоматизированная установка для измерения вольт-амперной характеристики высокоомных кристаллов при температурах от комнатной до 120°C (с точностью измерения температуры не ниже 0,5°C), позволяющая автоматизировать процесс измерения температурной зависимости электропроводности образцов и повысить точность измерения по сравнению с ручным способом. Показано, что для малых концентраций примеси проводимость кристаллов имеет активационный характер. Для концентраций примеси железа более 0,3 вес. % температурная зависимость электропроводности отличается от активационной и требует для описания более сложную модель механизма проводимости [2]. Полученные результаты представляют интерес с точки зрения применения сильнолегированных кристаллов

ниобата лития в тепловых приемниках излучения [3–6, 8–14].

### Список литературы

1. Ахмадуллин И.Ш. Низкотемпературная электропроводность кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава / И.Ш. Ахмадуллин, В.А. Голинищев-Кутузов, С.А. Мигачев, С.П. Миронов // Физика твердого тела. – 1998. – Т. 40. – № 7. – С. 1307–1309.
2. Евдокимов С.В., Яценко А.В. Особенности темновой проводимости кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава // Физика твердого тела. – 2006. – Т.48. – вып. 2. – С. 317–320.
3. Здоровцев Г.Г. Термоэлектрические свойства несимметричной сэндвичной структуры металл-ниобат лития-металл / Г.Г. Здоровцев, В. И. Иванов, Ю.М. Карпец, С.В. Климентьев // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 103–105.
4. Здоровцев Г.Г. Характеристики приемника излучения на основе структуры металл-сегнетоэлектрик-металл / Г.Г. Здоровцев, В.И. Иванов, С.В. Климентьев В.В. Криштоп // Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 8. – С. 45–46.
5. Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Климентьев С.В., Криштоп В.В. Приемник излучения // Патент на полезную модель № 54128 / Приоритет от 07.03.2006 / Оpubл. – Бюллетень изобретений № 25 от 10.09.2006.
6. Здоровцев Г.Г., Иванов В. И., Марченков Н.В. Термостимулированная ЭДС в сэндвичной структуре металл – ниобат лития – металл // Информатика и системы управления. – 2005. – № 1 (09). – С. 55–60.
7. Здоровцев Г.Г., Кузин А.А. Система измерения электрофизических характеристик оксидных пленок // Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006613332. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. 2006.
8. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм в гетерогенных средах: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Хабаровск, 2006. – 36 с.
9. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Тепловые приемники излучения на основе тонкослойных структур металл – сегнетоэлектрик – металл: монография / Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 80 с.

10. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Термостимулированные токи в несимметричной сэндвичной структуре металл – сегнетоэлектрик – металл: монография. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. – 67 с.

11. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Термоэдс в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов // Изв. вузов, сер. физ. – 2001. – № 1. – С. 96–97.

12. Иванов В.И., Климентьев С.В., Корчевский В.В. Использование динамического пироэффекта в термовольтаическом приемнике излучения // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 2. – С. 013–018.

13. Сюй А.В., Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Климентьев С.В., Криштоп В.В. Координатно-чувствительный приемник излучения // Патент России № 2006117268/28, G01J5/00, 05.19. 2006.

14. Ivanov V.I. Thermo-EMF in LiNbO<sub>3</sub> crystals with different metal electrodes / V.I. Ivanov, Yu.M. Karpets, N.V. Marchenkov, G.G. Zdorovtsev // Fundamental problems of Optoelectronics and Microelectronics, Yuri N. Kulchin, Oleg B. Vitrik, Vladimir I. Stroganov, Editors, Proceedings of SPIE. – 2005. – Vol. 5851. – P. 415–419.

15. Pichugin V.F. Ion irradiation and reduction effect on the conductivity and optical absorption of heavily MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> single crystals / V.F. Pichugin, A.A. Bulycheva, V.Yu. Yakovlev, I.W. Kim // Physica status solidi (c) 2. – 2005. – № 1. – P. 208–211.

### References

1. Ahmadullin I.Sh. *Nizkotemperaturnaja jelektrprovodnost' kristallov niobata litija kongrujntnogo sostava*, I.Sh. Ahmadullin, V.A. Golenishhev-Kutuzov, S.A. Migachev, S.P. Mironov, Fizika tverdogo tela, 1998, T. 40, no. 7, pp. 1307–1309.

2. Evdokimov S.V., Jacenko A.V. *Osobennosti temnovoj provodimosti kristallov niobata litija kongrujntnogo sostava*, Fizika tverdogo tela, 2006, T. 48, no. 2, pp. 317–320.

3. Zdorovtsev G.G. *Termojelektricheskie svojstva nesimmetrichnoj sjendvichnoj struktury metall-niobat litija-metall*, G.G. Zdorovtsev, V.I. Ivanov, Ju.M. Karpets, S.V. Kliment'ev, Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2007, T. 311, no. 2, pp. 103–105.

4. Zdorovtsev G.G. *Harakteristiki priemnika izluchenija na osnove struktury metall-segnetoelektrik-metall*, G.G. Zdorovtsev, V.I. Ivanov, S.V. Kliment'ev V.V. Krishtop, Priborostroenie, 2006, T. 49, no. 8, pp. 45–46.

5. Zdorovtsev G.G., Ivanov V.I., Kliment'ev S.V., Krishtop V.V. *Priemnik izluchenija*//Patent na poleznuju model' no. 54128, Prioritet ot 07.03.2006, Opubl, Bjulleten' izobretenij no. 25 ot 10.09.2006.

6. Zdorovtsev G.G., Ivanov V.I., Marchenkov N.V. *Termostimulirovannaja EDS v sjendvichnoj struktury metall – niobat*

*litija – metal*, Informatika i sistemy upravlenija, 2005, no. 1 (09), pp. 55–60.

7. Zdorovtsev G.G., Kuzin A.A. *Sistema izmerenija jelektrifizicheskikh karakteristik oksidnyh plenok*, Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programm dlja JeVM no. 2006613332. Zaregistrirovano v Reestre programm dlja JeVM. 2006 g.

8. Ivanov V.I. *Termoinducirovannye mehanizmy zapisi dinamicheskikh gologramm v geterogennyh sredah*: avtoref. dis. doktora fiz., mat. Nauk, Habarovsk, 2006, pp. 36.

9. Ivanov V.I., Karpets Ju.M., Kliment'ev S.V. *Teplovyje priemniki izluchenija na osnove tonkoslojnyh struktur metall – segnetoelektrik – metall: monografija* Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2008, pp. 80.

10. Ivanov V.I., Karpets Ju. M., Kliment'ev S.V. *Termostimulirovannye toki v nesimmetrichnoj sjendvichnoj struktury metall – segnetoelektrik – metall: monografija*, Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2007, pp. 67.

11. Ivanov V. I., Karpets Ju. M., Kliment'ev S. V. *Termoeds v legirovannyh kristallah niobata litija s jelektrodami iz razlichnyh metallov*, Izv. vuzov, ser. Fiz, 2001, no. 1, pp. 96–97.

12. Ivanov V.I., Kliment'ev S.V., Korchevskij V.V. *Ispol'zovanie dinamicheskogo pirojeffekta v termovol'taicheskom priemnike izluchenija*, Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2010, no. 2, pp. 013–018.

13. Sjuj A.V., Zdorovtsev G.G., Ivanov V.I., Kliment'ev S.V., Krishtop V.V. *Koordinatno-chuvstvitel'nyj priemnik izluchenija*//Patent Rossii no. 2006117268/28, G01J5/00, 05.19. 2006, 2 c.

14. Ivanov V.I. *Thermo-EMF in LiNbO<sub>3</sub> crystals with different metal electrodes*, V.I. Ivanov, Yu.M. Karpets, N.V. Marchenkov, G.G. Zdorovtsev, Fundamental problems of Optoelectronics and Microelectronics, Yuri N. Kulchin, Oleg B. Vitrik, Vladimir I. Stroganov, Editors, Proceedings of SPIE, 2005, Vol. 5851, pp. 415–419.

15. Pichugin V.F. *Ion irradiation and reduction effect on the conductivity and optical absorption of heavily MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> single crystals*, V.F. Pichugin, A.A. Bulycheva, V.Yu. Yakovlev, I.W. Kim, Physica status solidi (c) 2, no. 1, 2005, pp. 208–211.

### Рецензенты:

Крылов В.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика», ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный гуманитарный университет», г. Хабаровск;

Жуков Е.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Электроника и электротехника», ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск.

Работа поступила в редакцию 05.08.2014.