

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

УДК 621.315.61

LiTaO₃ — МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ОПТО– И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2013 г. О. А. Бузанов, С. А. Сахаров, Д. В. Рощупкин¹,
Е. В. Емелин¹, С. Д. Лавров²
ОАО «ФОМОС Материалс»,

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
²Московский государственный технический университет
радиотехники, электроники и автоматики

Представлены результаты возможного применения сегнетоэлектрических кристаллов LiTaO₃ в акусто– и опто–электронике. Высокие значения пьезоэлектрических констант позволяют создавать резонаторы на объемных акустических волнах. Возможность прямой электронно–лучевой переполаризации кристалла LiTaO₃ позволяет формировать доменные структуры с шириной доменов от десятков нанометров до десятков микрометров. Периодические сегнетоэлектрические доменные структуры в кристалле LiTaO₃ использованы в качестве оптической дифракционной решетки и для генерации второй гармоники оптического излучения.

Ключевые слова: сегнетоэлектрический кристалл LiTaO₃, электронно–лучевая переполаризация, ОАВ–резонаторы

Введение

Развитие современных телекоммуникационных систем связано с развитием акусто– и оптоэлектронных устройств, позволяющих передавать и обрабатывать акустические и оптические сигналы в режиме реального времени [1–6]. Большое значение имеет поиск соответствующих материалов, которые обладают хорошими оптическими и акустическими свойствами. В этом случае большие перспективы имеют сегнетоэлектрические кристаллы LiNbO₃ и LiTaO₃. Данные материалы обладают хорошими оптическими свойствами, большими значениями пьезоэлектрических констант, что позволяет использовать эти материалы для опто– и акустоэлектронных устройств. Большое значение имеет совершенство кристаллической структуры. Сегнетоэлектрические кристаллы LiNbO₃ и LiTaO₃ выращивают методом Чохральского, однако в процессе роста формируется полидоменный кристалл, что является энергетически выгодным состоянием для сегнетоэлектрического кристалла.

Для формирования монодоменного кристалла синтезированный полидоменный кристалл нагревают до температуры Кюри и прикладывая электрическое поле вдоль направления полярной оси Z, осуществляя процесс монодоменизации. Далее кристалл медленно охлаждают в условиях приложения внешнего электрического поля, что позволяет в итоге получить монодоменный монокристалл с равномерными оптическими и пьезоэлектрическими свойствами.

Большие перспективы применения кристаллов LiTaO₃ открываются с возможностью формирования доменных структур с заданными размерами от нескольких нанометров до нескольких миллиметров. Среди методов переполаризации и формирования сегнетоэлектрических доменных структур следует отметить метод послеростовой термоэлектрической обработки вблизи температуры Кюри в условиях приложения к кристаллу знакопеременного электрического поля [7], который позволяет получать объемные доменные структуры с шириной доменов от 10 мкм до нескольких

миллиметров, и метод прямой электронно–лучевой переполаризации [8], с помощью которого в тонких кристаллах можно формировать доменные структуры с размерами доменов от нескольких нанометров до нескольких микрометров. Возможность формирования периодических доменных структур с заданной шириной доменов позволяет находить новые перспективные виды применения в опто– и акустоэлектронике. Прежде всего это возможность удвоения частоты оптического излучения [9] и генерации поверхностных акустических волн [10].

Ниже представлены результаты исследования кристалла LiTaO_3 , выращенного методом Чохральского. Рассмотрена возможность применения пьезоэлементов из кристалла LiTaO_3 для резонаторов на объемных акустических волнах (ОАВ).

Для проведения исследований оптических свойств в кристалле LiTaO_3 сегнетоэлектрические доменные структуры сформировали методом прямой электронно–лучевой переполаризации. Эти доменные структуры использовали в качестве оптических дифракционных решеток и для генерации второй гармоники оптического излучения.

Синтез кристаллов LiTaO_3

Сегнетоэлектрические кристаллы LiTaO_3 выращивают из расплава методом Чохральского при температуре $T_{\text{пл}} = 1660$ °С. В качестве материала тигля используют тугоплавкий Ir. Кристалл LiTaO_3 характеризуется температурой Кюри $T_C = 660$ °С, при которой происходит переход из парафазы в сегнетофазу. При комнатной температуре значение вектора спонтанной поляризации кристалла LiTaO_3 составляет $P_S = 60$ мкКл/см². На рис. 1 приведено изображение синтезированного кристалла LiTaO_3 . После процесса роста кристалл является полидоменным, так как такое состояние соответствует минимуму энергии полярного кристалла. В опто– и акустоэлектронике используют кристаллы с совершенной кристаллической структурой, поэтому необходимо осуществить процесс монодоменизации.

Для процесса монодоменизации кристалла LiTaO_3 на полярные Z –поверхности кристалла на-

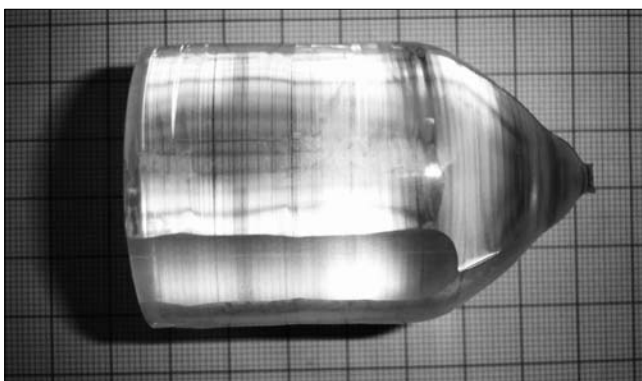


Рис. 1. Кристалл LiTaO_3 , выращенный вдоль полярной оси Z $\{00.1\}$

Рис. 2. РЭМ–микрофотография полоскового резонатора на основе X –среза кристалла LiTaO_3 ($f_0 = 15,3635$ МГц)

носят иридиевые (или платиновые) электроды и помещают кристалл в печь. В печи кристалл нагревают до температуры Кюри, прикладывают к кристаллу внешнее электрическое поле, которое превышает соответствующее значение спонтанной поляризации P_S и затем медленно охлаждают до комнатной температуры. Такой процесс монодоменизации позволяет получить монокристалл LiTaO_3 с практически совершенной кристаллической структурой.

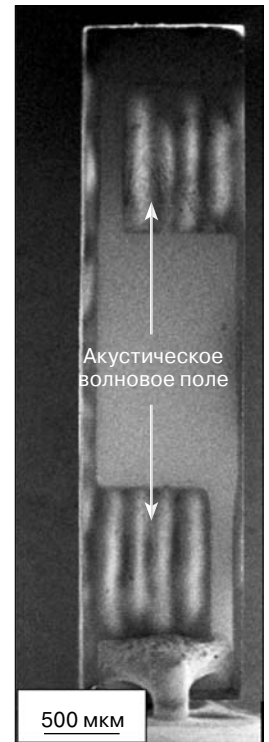
Резонаторы на объемных акустических волнах

Пьезоэлектрические константы кристалла LiTaO_3 на порядок превышают значения пьезоконстант в кристалле пьезокварца SiO_2 при хорошей термостабильности акустических свойств. Поэтому применение кристаллов LiTaO_3 весьма привлекательно для изготовления резонаторных структур на ОАВ. На рис. 2 приведена микрофотография полоскового ОАВ–резонатора на основе X –среза кристалла LiTaO_3 со специальной структурой Ag –электродов. Для визуализации акустического волнового поля в резонаторе в режиме реального времени использовали метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) в режиме регистрации низкоэнергетичных вторичных электронов [11–13].

На рис. 2 на свободной поверхности резонатора представлено изображение акустического волнового поля в резонаторе при возбуждении поперечной объемной волны на резонансной частоте $f_0 = 15,3635$ МГц.

Формирование периодических доменных структур в кристаллах LiTaO_3 и исследование их оптических свойств

Для исследования процесса переполаризации кристалла LiTaO_3 были изготовлены пластины 127° –ого Y' –среза (плоскости (104) параллельны поверхности кристалла) толщиной 300 мкм с двусторонней полировкой поверхности. В Y' –срезе кристалла LiTaO_3 полярная ось Z составляет 37° с поверхностью подложки. Процесс электронно–лучевой переполаризации осуществляют на $-Z'$ –поверхности подложки. На $+Z'$ –поверхность подложки напыляют слой Al толщиной 100 нм и данную поверхность заземляют.



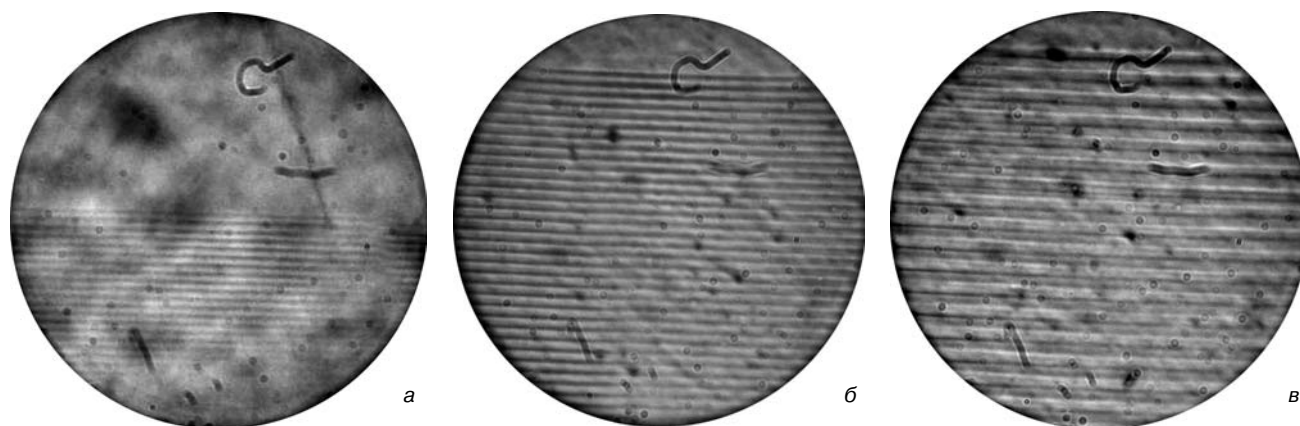


Рис. 3. Сегнетоэлектрические доменные структуры, сформированные методом прямой электронно-лучевой переполаризации в кристалле LiTaO_3 с различной шириной доменов: а — 1 мкм; б — 5; в — 10

Особенностью процесса электронно-лучевой переполаризации кристалла LiTaO_3 является то, что доменная структура прорастает от отрицательной поверхности к положительной, и процесс переполаризации является контролируемым. В кристаллах LiNbO_3 процесс переполаризации осуществляют также путем электронно-лучевой литографии на отрицательной поверхности подложки; процесс переполаризации начинают с положительной поверхности и идут к отрицательной поверхности.

На рис. 3 представлены сегнетоэлектрические доменные структуры, сформированные методом электронно-лучевой литографии в 127° -ном Y' -срезе кристалла LiTaO_3 с шириной доменов 1, 5 и 10 мкм. Площадь доменной структуры составляет 400×400 мкм². Следует отметить, что при формировании доменных структур в 127° -ном Y' -срезе кристалла LiTaO_3 домены прорастают не по нормали к поверхности подложки, а под углом 37° к поверхности вдоль направления вектора спонтанной поляризации P_S вдоль полярной оси Z . Небольшая величина P_S позволяет осуществлять контролируемый процесс электронно-лучевой переполаризации (контроль методом РЭМ в процессе переполаризации).

Для исследования сегнетоэлектрических доменных структур использовали оптические дифракционные методы. На рис. 4 представлена дифракция оптического излучения на сегнетоэлектрической доменной структуре при нормальном падении. В этом случае доменная структура является эффективной дифракционной решеткой.

Также исследовали процесс оптического излучения на сегнетоэлектрической доменной структуре с шириной доменов 5 мкм. Для исследования процесса



Рис. 4. Дифракция оптического излучения на доменной структуре с шириной доменов 5 мкм

генерации второй гармоники использовали фемтосекундный титан-сапфировый лазер с частотой повторения импульсов 100 МГц и шириной импульсов 90 фс. В ходе эксперимента использовали длину волны накачки 800 нм. Средняя выходная мощность с длиной волны 400 нм (вторая гармоника оптического излучения с длиной волны 800 нм) составляла 0,3 Вт (рис. 5).

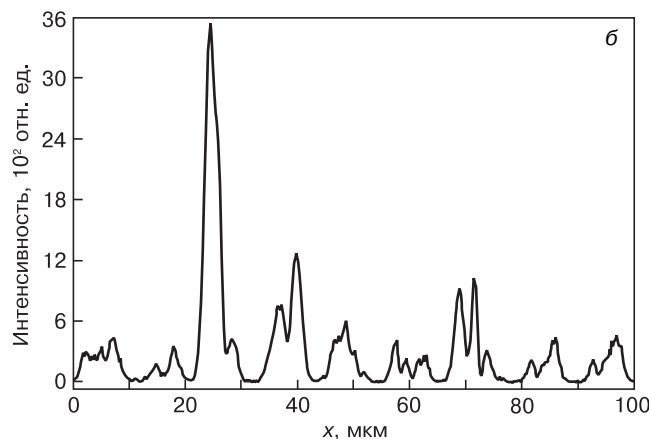
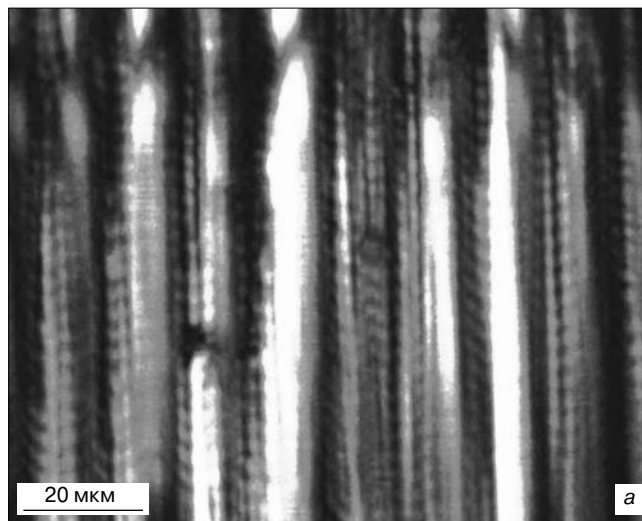


Рис. 5. Генерация второй гармоники оптического излучения с длиной волны 800 нм на доменной структуре в кристалле LiTaO_3 с шириной доменов 5 мкм: а, б — двухмерное и поперечное распределение выхода второй гармоники оптического излучения соответственно

Заключение

Представлены результаты синтеза и применения сегнетоэлектрического кристалла LiTaO_3 в опто- и акустоэлектронике. Показано, что кристаллы LiTaO_3 могут быть использованы при создании резонаторов на ОАВ. Продемонстрирована возможность формирования 180° -ных сегнетоэлектрических доменных структур в кристаллах LiTaO_3 методом прямой электронно-лучевой переполаризации. Показано, что метод электронно-лучевой переполаризации позволяет формировать большие массивы 180° -ных сегнетоэлектрических доменов с заданной шириной доменов. Сформированные доменные структуры могут быть использованы в качестве дифракционных решеток и для удвоения частоты оптического излучения (генерация второй гармоники оптического излучения).

Библиографический список

1. **Campbell, C.** Surface acoustic wave devices and their signal processing applications / C. Campbell. – L.: Acad. Press, 1989. – 470 p.
2. **Dieulesaint, E.** Ondes elastique dans les solides / E. Dieulesaint, D. Royer. – Paris: Masson, 1974. – 339 p.
3. **Oliner, A.** Poverhnostnye akusticheskie volny / A. Oliner. – M.: Mir, 1981. – 390 p.
4. **Rechickii, V. I.** Akusticheskie radiokomponenty / V. I. Rechickii. – M.: Radio i svyaz', 1987. – 193 p.

5. **Kaino, G.** Akusticheskie volny / G. Kaino. – M.: Mir, 1990. – 652 p.
6. **Yariv, A.** Opticheskie volny v kristallah. / A. Yariv, P. Yuh. – M.: Mir, 1987. – 616 s.
7. **Antipov, V. V.** Formation of regular structures in the ferroelectric LiNbO_3 and LiTaO_3 near the phase transition / V. V. Antipov, A. A. Blistanov, N. G. Sorokin // Sov. Phys. Crystallogr. – 1985. – V. 30. – P. 428–430.
8. **Gupta, M. C.** Second-harmonic generation in bulk and waveguide LiTaO_3 with domain inversion induced by electron beam scanning / M. C. Gupta, W. Kozlovsky, A. C. G. Nutt // Ibid. – 1994. – V. 64, N 24. – P. 3210–3212.
9. **Yamada, N.** First-order quasi-phase matched LiNbO_3 waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation / N. Yamada, N. Nada, M. Saitoh, K. Watanabe // Ibid. – 1993. – V. 62, N 1. – P. 435–436.
10. **Roshchupkin, D. V.** Scanning electron microscopy observation of excitation of the surface acoustic waves by the regular domain structures in the LiNbO_3 crystals / D. V. Roshchupkin, Th. Fournier, M. Brunel, O. A. Plotitsyna, N. G. Sorokin // Ibid. – 1992. – V. 60, N 19. – P. 2330–2331.
11. **Roshchupkin, D. V.** Scanning electron microscopy observation of the interaction between the surface acoustic waves and regular domain structures in the LiNbO_3 crystals / D. V. Roshchupkin, Th. Fournier, M. Brunel, O. A. Plotitsyna, N. G. Sorokin // Scanning Microscopy. – 1992. – V. 6, N 4. – P. 993–996.
12. **Dremova, N. N.** Zaryadovyi mehanizm formirovaniya metastabil'nogo potencial'nogo kontrasta poverhnostnoi akusticheskoi volny v REM / N. N. Dremova, A. I. Erko, D. V. Roshchupkin // Zhurn. tehn. fiziki. – 1988. – T. 58, N 9. – S. 1763–1766.
13. **Roshchupkin, D. V.** Scanning electron microscopy visualization of surface acoustic wave propagation in a LiNbO_3 crystal / D. V. Roshchupkin, M. Brunel // Acustica. – 1995. – V. 81. – P. 173–176.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК № 16.513.12.3002).

УДК 621.318

ФОРМИРОВАНИЕ БИДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ПЛАСТИНАХ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ МЕТОДОМ СТАЦИОНАРНОГО ВНЕШНЕГО НАГРЕВА

© 2013 г. **А. С. Быков, С. Г. Григорян, Р. Н. Жуков, Д. А. Киселев, С. В. Ксенич, И. В. Кубасов, М. Д. Малинкович, Ю. Н. Пархоменко**
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Разработан метод создания бидоменной структуры в пластинах монокристаллов ниобата лития, основанный на формировании заданного распределения градиента температуры по толщине образца путем стационарного внешнего нагрева. Нагрев пластины LiNbO_3 , которая помещается между двумя пластинами кремния, осуществляют за счет поглощения кремнием световой энергии ламп установки светового отжига. Схема технологической ячейки позволяет формировать и регулировать мощности тепловых потоков, входящих в сегнетоэлектрическую пластину с обеих сторон, создавая

градиенты температур, необходимые для управляемого процесса образования двух доменов с направленными друг к другу векторами поляризации (доменная структура «голова к голове»). Экспериментально подтверждена эффективность применения светового поглощения для формирования внешних тепловых источников, при помощи которых можно осуществлять как симметричный, так и асимметричный нагрев, определяющий положение условной поверхности с нулевым температурным градиентом и, следовательно, положение междоменной границы. В пластине LiNbO_3 толщиной 1,6 мм и длиной 60 мм сформирована симметрич-

ная бидоменная структура с противоположно направленными векторами поляризации. Исследована зависимость изгибной деформации консолидно закрепленного образца от электрического напряжения в интервале от -300 до $+300$ В амплитуда деформации составила более 35 мкм. Показана высокая линейность и повторяемость характеристики «электрическое напряжение — изгибная деформация».

Ключевые слова: бидоменная структура, монокристалл ниобата лития, нагрев световым излучением, стационарные тепловые потоки, электромеханические актюаторы.