МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

УДК 621.315.61

$LiTaO_3$ — МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ОПТО– И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

© *2013 г.* О. А. Бузанов, С. А. Сахаров, Д. В. Рощупкин[1], Е. В. Емелин[1], С. Д. Лавров[2]

ОАО «ФОМОС Материалс»,

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,

[2]Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

Представлены результаты возможного применения сегнетоэлектрических кристаллов $LiTaO_3$ в акусто– и оптоэлектронике. Высокие значения пьезоэлектрических констант позволяют создавать резонаторы на объемных акустических волнах. Возможность прямой электронно–лучевой переполяризации кристалла $LiTaO_3$ позволяет формировать доменные структуры с шириной доменов от десятков нанометров до десятков микрометров. Периодические сегнетоэлектрические доменные структуры в кристалле $LiTaO_3$ использованы в качестве оптической дифракционной решетки и для генерации второй гармоники оптического излучения.

Ключевые слова: сегнетоэлектрический кристалл $LiTaO_3$, электронно–лучевая переполяризация, 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 $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$. 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 $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ 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 прикладывают 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 $LiTaO_3$ открываются с возможностью формирования доменных структур с заданными размерами от нескольких нанометров до нескольких миллиметров. Среди методов переполяризации 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 переполяризации [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 переполяризации. 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 $T_{пл}$ = 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/см^2. 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 наносят 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.

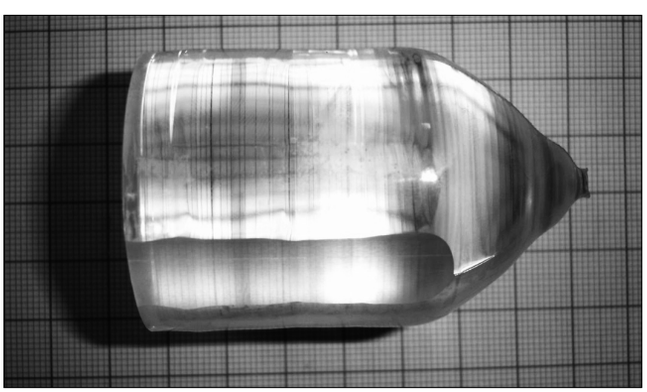

Рис. 1. Кристалл $LiTaO_3$, выращенный вдоль полярной оси Z {00.1}

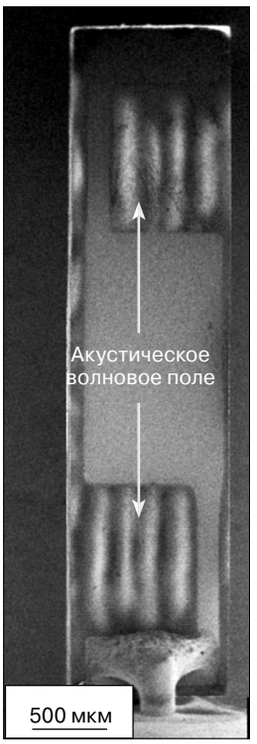

Рис. 2. РЭМ–микрофотография полоскового резонатора на основе X–среза кристалла $LiTaO_3$ (f_0 = 15,3635 МГц)

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 переполяризации 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 переполяризации осуществляют на $-Z'$–поверхности подложки. На $+Z'$–поверхность подложки напыляют слой Al толщиной 100 нм и данную поверхность заземляют.

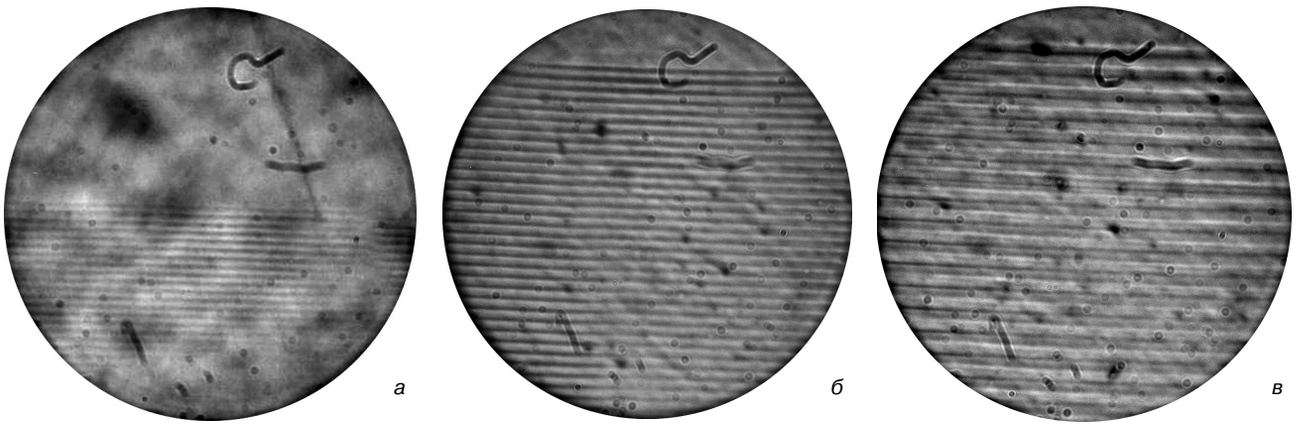

Рис. 3. Сегнетоэлектрические доменные структуры, сформированные методом прямой электронно–лучевой переполяризации в кристалле $LiTaO_3$ с различной шириной доменов:
а — 1 мкм; *б* — 5; *в* — 10

Особенностью процесса электронно–лучевой переполяризации кристалла $LiTaO_3$ является то, что доменная структура прорастает от отрицательной поверхности к положительной, и процесс переполяризации является контролируемым. В кристаллах $LiNbO_3$ процесс переполяризации осуществляют также путем электронно–лучевой литографии на отрицательной поверхности подложки; процесс переполяризации 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 мкм^2. 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 переполяризации (контроль методом РЭМ в процессе переполяризации).

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 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).

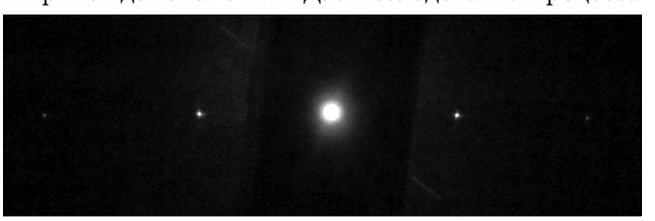

Рис. 4. Дифракция оптического излучения на доменной структуре с шириной доменов 5 мкм

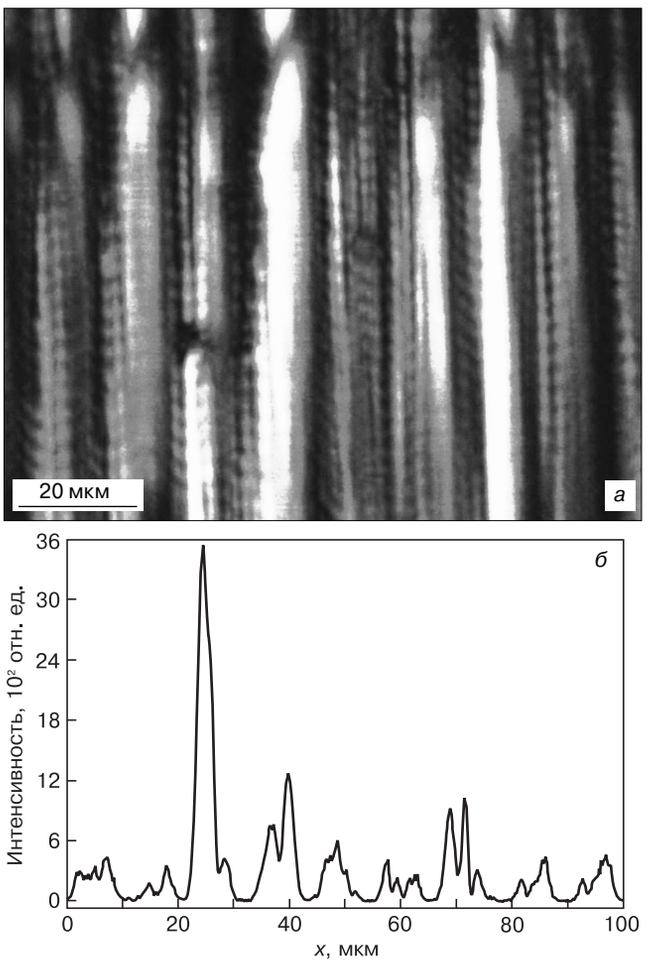

Рис. 5. Генерация второй гармоники оптического излучения с длиной волны 800 нм на доменной структуре в кристалле $LiTaO_3$ с шириной доменов 5 мкм:
а, б — двухмерное и поперечное распределение выхода второй гармоники оптического излучения соответственно

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 переполяризации. Показано, что метод электронно–лучевой переполяризации 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 solids / 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 $LiNbO_3$ wavequide 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. Roshupkin // 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 симметричная бидоменная структура с противоположно направленными векторами поляризации. Исследована зависимость изгибной деформации консольно 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.