

УДК 537.9:621.315.61

ФОРМИРОВАНИЕ БИДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ПЛАСТИНАХ НИОБАТА ЛИТИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ БЕТА–ВОЛЬТАИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

© 2015 г. М. Д. Малинкович, А. С. Быков, И. В. Кубасов, Д. А. Киселев,
С. В. Ксенич, Р. Н. Жуков, А. А. Темиров, Н. Г. Тимушкин, Ю. Н. Пархоменко

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119991, Россия

Рассмотрена возможность увеличения эффективности бета–вольтаического генератора за счет применения в качестве пьезоэлектрического преобразователя монокристаллического биморфного элемента из ниобата лития. Известные бета–вольтаические генераторы переменного напряжения состоят из пьезоэлектрического кантилевера и источника β –электронов. Причем кантилевер представляет собой упругий элемент, например из кремния, на который приклеен пьезоэлемент из пьезокерамики PZT. Предложено заменить структуру из кремниевой балки с пьезоэлементом на однородный кантилевер, представляющий собой тонкую пластину из бидоменного монокристалла ниобата лития. За счет этого одновременно увеличивается эффективность преобразования механических колебаний в электрическую энергию и добротность системы, стабильность рабочих параметров, а также существенно увеличивается (на несколько сот градусов) температурный диапазон функционирования. Подробно рассмотрено решение основной задачи — формирование бидоменной структуры в тонкой пластине ниобата лития. Предложен метод высокотемпературного отжига образца в неоднородном электрическом поле. Продемонстрирована возможность прогнозирования доменной структуры на основе разработанной модели. Получены образцы с глубиной залегания междоменной границы 120—150 мкм. При этом показано, что четкость границы зависит от разности потенциалов между полосчатыми электродами технологической ячейки и внешним электродом. Метод является эффективным для создания бидоменной структуры в пластине толщиной примерно до 300 мкм.

Ключевые слова: ниобат лития, сегнетоэлектрик, доменная структура, пьезоэлектрический преобразователь, бета–вольтаический генератор.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется созданию долговременных необслуживаемых источников питания, предназначенных для устройств и приборов, расположенных в труднодоступных местах технологических объектов, а также в районах на поверхности Земли, в водных акваториях, космосе и т. д., где обслуживание невозможно или затруднено. К числу наиболее перспективных источников такого рода относятся бета–вольтаические элементы питания, основанные на превращении энергии β –распада в электрическую.

Большинство выпускаемых бета–вольтаических генераторов функционируют как полупроводниковые преобразователи постоянного тока, которые обладают малой мощностью и выходным напряжением, лимитируемым шириной запрещенной зоны [1, 2]. Для преодоления этих ограничений используют импульсные источники питания. Так, в импульсном режиме бета–вольтаический ге-

нератор способен выдавать мощность вплоть до 1 мВт/см³. Импульсы большой мощности могут быть получены с использованием любого типа преобразователей путем использования конденсаторов или других элементов, накапливающих электрический заряд. Однако на практике конденсаторы обладают значительными токами утечки. Это делает практически невозможным использование бета–вольтаических генераторов мощностью меньше 1 мкВт для создания устройств, работающих в импульсном режиме. Проблема может быть решена с использованием механоэлектрического преобразователя, способного работать при низких удельных мощностях энергетического материала (0,1—1 мкВт/см² для ⁶³Ni) [3].

Принцип работы механоэлектрических генераторов основан на использовании пьезоэлектрических консолей (кантилеверов). Колебание этих консолей возбуждается за счет накопления зарядов на электродах, на одном из которых находится источник β –излучения, их электростатиче-

Малинкович Михаил Давыдович — кандидат физ.–мат. наук, доцент, e-mail: malinkovich@yandex.ru; **Быков Александр Сергеевич** — кандидат тех. наук, доцент, e-mail: xalex1349@mail.ru; **Кубасов Илья Викторович** — инженер 1–й категории; **Киселев Дмитрий Александрович** — кандидат физ.–мат. наук, старший научный сотрудник; **Ксенич Сергей Владимирович** — инженер 1–й категории; **Жуков Роман Николаевич** — инженер 1–й категории; **Темиров Александр Анатольевич** — инженер 1–й категории; **Тимушкин Никита Георгиевич** — инженер 1–й категории; **Пархоменко Юрий Николаевич** — доктор физ.–мат. наук, профессор, зав. кафедрой материаловедения полупроводников и диэлектриков.

ского притяжения и затем, после контакта, разрядки. Консоль может быть как однослойной монокристаллической (униморф, мономорф), так и состоящей из двух противоположно поляризованных, соединенных между собой тем или иным способом слоев (биморф). При этом один слой испытывает деформацию сжатия, другой — растяжения [4, 5].

В первых бета-вольтаических генераторах был использован пьезоэлектрический рабочий элемент деформации в виде кантилевера [6] или его части, закрепленной на кантилевере из материала с приемлемыми механическими свойствами [7—9].

Основным материалом рабочего элемента пьезоэлектрических генераторов в настоящее время является пьезокерамика на основе цирконата-титаната свинца (**PZT**). Главное достоинство пьезокерамики — большие значения продольных и поперечных пьезоэлектрических модулей. Однако для пьезокерамики характерны такие недостатки, как значительный гистерезис (до 20 %), сильная зависимость пьезомодулей от температуры, низкая температура Кюри, ползучесть. Кроме того, наблюдается старение и деградация со временем пьезоэлектрических свойств керамики, что отрицательно сказывается на качестве генераторов, рассчитанных на длительный период эксплуатации. Следует также отметить, что пьезокерамический рабочий элемент соединяется с кантилевером при помощи клея, что является дополнительным фактором деградации [10].

Значительно более стабильными характеристиками обладают монокристаллические пьезоэлементы, в частности из кристаллов ниобата лития (LiNbO_3). У кристаллов LiNbO_3 практически отсутствует гистерезис электромеханической деформации, пьезоэлектрические модули слабо зависят от температуры в интервале от криогенных до нескольких сотен градусов Цельсия, а температура Кюри превышает 1000 °C, и их пьезоэлектрические характеристики стабильны во времени. Если найти способ создания биморфного рабочего элемента, причем без промежуточного электрода, т. е. сформировав бидоменную структуру в пластине монокристалла, то это приведет к значительному улучшению рабочих характеристик механоэлектрических бета-вольтаических генераторов.

Первый прототип механоэлектрического генератора с использованием бидоменного элемента деформации на основе монокристаллического LiNbO_3 продемонстрирован в работе [11]. Бидоменный элемент деформации изготавливали из образца LiNbO_3 с ориентацией $Y + 140^\circ$ размером $16 \times 1 \times 0,5 \text{ мм}^3$. Длина закрепления консоли составляла 3 мм, длина рабочей части консоли — 13 мм.

В сравнении с PZT-керамикой генератор на основе бидоменного монокристаллического LiNbO_3 показал эффективность, равную 78 %, в то время как PZT-биморф имел эффективность ~65 %. Более низкая эффективность PZT-генератора связана с

особенностями конструкции. В частности, монокристаллические пластины стыкуются в биморф посредством адгезивного слоя, который, если исключить влияние структуры пьезокерамики, является основным фактором, снижающим эффективность.

К настоящему времени известны несколько методов формирования заданной доменной структуры в пластинах монокристаллов сегнетоэлектриков без изменения их химического состава, в том числе длительный отжиг образцов в атмосфере Ar, импульсный фотонный отжиг и высокотемпературный отжиг в неоднородном электрическом поле [12, 13].

Ниже рассмотрен один из способов создания биморфного рабочего элемента из монокристаллического LiNbO_3 для механоэлектрических генераторов переменного тока, использующих энергию β -распада. Предложен метод формирования бидоменной структуры в пластине LiNbO_3 отжигом в неоднородном электрическом поле при температуре фазового перехода.

Экспериментальная часть

Если в электрическое поле поместить кристалл сегнетоэлектрика в парафазе (нагретый до температуры выше температуры Кюри), в нем под действием поля произойдет переход катионов Li в кристаллической ячейке с образованием полярного состояния, в соответствии с градиентом электрического потенциала, создаваемого электродом. При охлаждении кристалла в поле в процессе перехода в сегнетофазу это состояние сохраняется, образуя доменную структуру, определяемую конфигурацией электрического поля в кристалле [14]. В свою очередь, конфигурацию электрического поля можно сформировать с помощью специальным образом подобранной системы электродов.

Ячейка для формирования доменной структуры представляет собой систему тонких электродов, расположенных на сапфировых подложках, между которыми находится пластина LiNbO_3 (рис. 1). Если

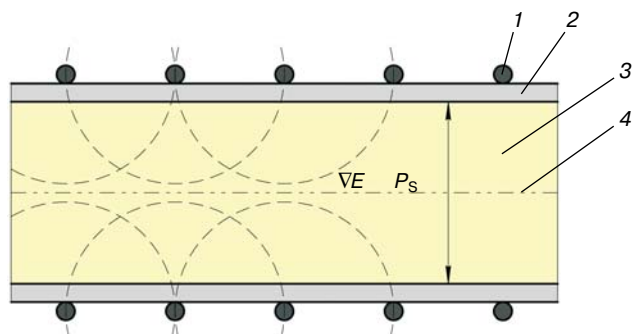


Рис. 1. Схема ячейки для формирования доменной структуры отжигом в неоднородном электрическом поле:

1 — полосовой электрод; 2 — сапфировая пластина; 3 — образец LiNbO_3 ; 4 — доменная граница

Fig. 1. Schematic of the Cell for Domain Structure Formation by Annealing in a Nonuniform Electric Field: (1) Strip Electrode, (2) Sapphire Plate, (3) LiNbO_3 Specimen and (4) Domain Boundary

электроды соединить между собой и подать на них один потенциал, а второй, например, на корпус печи, то в пространстве между электродами будет иметь место некоторое распределение электрического поля, определяемое положением электродов относительно друг друга. Если электроды находятся на одинаковом расстоянии друг от друга в каждом ряду и строго напротив друг друга в противоположных рядах, конфигурация поля будет следующей. В верхней и нижней частях пластины вертикальные составляющие результирующего поля будут направлены противоположно, а посередине пластины — взаимно скомпенсированы. Таким образом, в кристалле, помещенном между системой проводников (см. рис. 1), находящихся под одним потенциалом, в процессе охлаждения образуется доменная структура, состоящая из двух одинаковых по объему доменов с противоположно направленными векторами спонтанной поляризации (структура «хвост к хвосту» или «голова к голове»).

Однако даже при незначительном смещении относительно друг друга ряда электродов будет наблюдаться сильное искажение поля и междоменной границы.

Для определения доменной конфигурации в сегнетоэлектрических пластинах разработана программа расчета распределения электрического поля в пластине в зависимости от геометрических параметров электродов и образца, его диэлектрической проницаемости и разности потенциалов между электродами и корпусом печи.

Расчет проекции напряженности электрического поля E в точке r_i с координатами $x-y$ (в плоскости электродов, состоящих из n -струн или полос, и в перпендикулярном к ним направлении, см. рис. 1) проводили по формулам:

$$E_{ix} = \sum_{i=1}^n \frac{U}{r_i \varepsilon \ln \frac{b}{r_0}} \sin \alpha_i;$$

$$\sin \alpha = \frac{x - ai}{\sqrt{\left(\frac{d_2}{2} + d_1 + r_0 - y\right)^2 + (x - ai)^2}};$$

$$E_{iy} = \sum_i \frac{U}{r_i \varepsilon \ln \frac{b}{r_0}} \cos \alpha_i;$$

$$\cos \alpha = \frac{\frac{d_2}{2} + d_1 + r_0 - y}{\sqrt{\left(\frac{d_2}{2} + d_1 + r_0 - y\right)^2 + (x - ai)^2}},$$

где d_1 — толщина пластины сапфира; d_2 — толщина пластины LiNbO_3 ; r_0 — диаметр струны; a — расстояние между струнами; b — расстояние от кожуха печи до рабочей ячейки; U — напряжение, подаваемое

на рабочую ячейку; ε — диэлектрическая проницаемость.

Для экспериментов по формированию бидоменной структуры использовали образцы LiNbO_3 конгруэнтного состава ориентации Z и $Z + 37^\circ$, вырезанные параллельно осям X и Y из коммерческих пластин с двусторонней полировкой. В качестве электродов использовали нихромовую проволоку диаметром 0,15 мм или систему полосовых палладиевых электродов шириной 0,15 мм, сформированных на сапфировой подложке методом лазерной литографии. С каждой стороны было сформировано по 50 полосовых электродов. Проволока или полоски были соединены между собой и служили при подаче потенциала одним общим электродом. В качестве второго электрода применяли два металлических экрана, расположенных сверху и снизу от корпуса печи и электрически изолированных от него. Отжиг осуществляли в печи резистивного нагрева на воздухе с регулируемой скоростью нагрева и охлаждения. Напряжение подавали от высоковольтного (до 30 кВ) регулируемого источника.

Опыты проводили с подачей положительного потенциала на рабочую ячейку для предотвращения дополнительной аудиффузии Li из образца. Печь нагревали равномерно со скоростью 5 К/мин до температуры 1165 °С, охлаждение проводили с той же скоростью. Напряжение на рабочую ячейку подавали при достижении температуры 800—900 °С, при охлаждении его снимали при той же температуре. Вследствие высокой инерционности печи контролируемое охлаждение осуществляли лишь до температур 600—700 °С, дальнейшее охлаждение до комнатных температур происходило за 5—7 ч. После охлаждения образцов делали косые шлифы на торцевых гранях под углом 30—40° к поверхностям больших граней, затем шлифы полировали и проводили селективное травление в кипящей смеси кислот HF и HNO_3 [15]. Морфологию доменной границы изучали на оптическом микроскопе Axio Imager D1 фирмы «Carl Zeiss» в неполяризованном свете на отражение.

Результаты и их обсуждение

Для проверки адекватности модели, прогнозирующей доменную структуру в образце, был поставлен эксперимент по формированию доменов двумя расположенными напротив друг друга электродами, но со смещением на 0,1 мм. На рис. 2 представлено распределение электрического поля, а на рис. 3 соответствующая доменная структура для этого случая. На рис. 4 показан косой шлиф образца LiNbO_3 со сформированной доменной структурой после селективного травления. Полученное в результате эксперимента реальное распределение доменов (см. рис. 4) полностью соответствует предсказанному моделию.

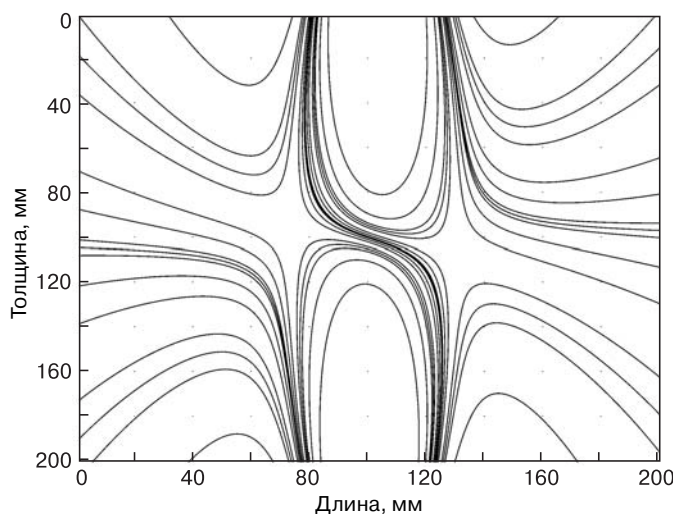


Рис. 2. Рассчитанное распределение напряженности электрического поля в образце, создаваемое двумя смещенными относительно друг друга электродами

Fig. 2. Calculated Distribution of Electric Field in the Specimen Produced by Two Displaced Electrodes

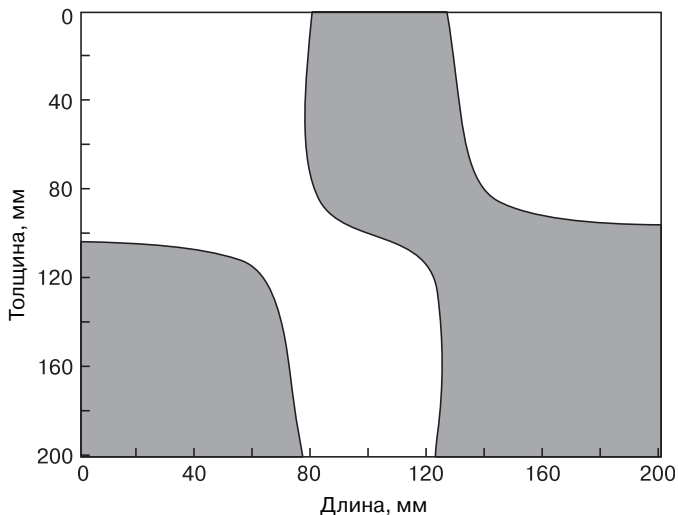


Рис. 3. Рассчитанная доменная структура в образце, формируемая высокотемпературным отжигом в электрическом поле, представленном на рис. 2

Fig. 3. Calculated Domain Structure in the Specimen Formed by High-Temperature Annealing in the Electric Field as Shown in Fig. 2

Выявленная доменная структура на образцах LiNbO_3 после отжигов под напряжением 2,5 и 10 кВ представлена на рис. 5. Из рис. 5 видно, что подаваемое напряжение слабо влияет на глубину залегания доменной границы, но ее четкость с увеличением напряжения заметно возрастает. Глубина залегания доменной границы составляет примерно 120–150 мкм. Из рис. 5 также видно, что между доменными границами имеется широкая полидоменная область. Ее происхождение можно объяснить тем, что, вероятно, происходит экранирование электрического поля свободными носителями заряда, концентрация которых при высоких температурах достаточно велика. Отсутствие такого эффекта при отжиге в поле, создаваемом двумя электродами, связано с тем, что в этом случае взаимная компенсация поля выражена значительно слабее, чем при большом числе электродов. В случае формирования бидоменной структуры большой площади без значительной полидоменной области в сегнетоэлектрическом кристалле создается заряженная граница с одноименным зарядом по краям. При превышении силами кулоновского взаимодействия предела прочности материала возможно разрушение кристалла, что ранее было показано в работе [16] на примере формирования бидоменной структуры методом фотонного отжига.

При использовании полученной бидоменной структуры в качестве механоэлектрического генератора преобразователь испытывает сложный спектр колебаний. При этом на доменной границе одновременно будет изменяться зарядовое состояние. Наличие переходной области заданной ширины будет компенсировать создаваемый заряд. В перспективе это обеспечит повышение срока службы преобразователя и механоэлектрического генератора в целом.

Тот факт, что ширина монодоменных областей составляет 100–150 мкм, является положительным для решения поставленной в данной работе задачи, поскольку толщина бидоменного кантилевера для механоэлектрического генератора должна составлять 200–300 мкм.

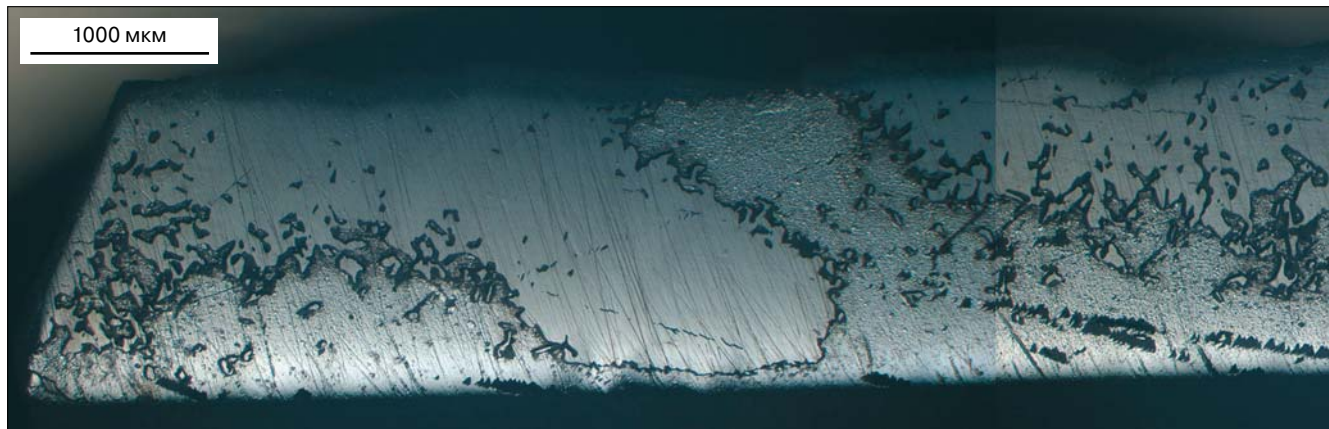


Рис. 4. Косой шлиф со сформированной доменной структурой, экспериментально полученной в пластине LiNbO_3 высокотемпературным отжигом в электрическом поле двух смещенных относительно друг друга электродов

Fig. 4. Angle Lap with Domain Structure Obtained Experimentally in LiNbO_3 Plate by High-Temperature Annealing in Electric Field of Two Displaced Electrodes

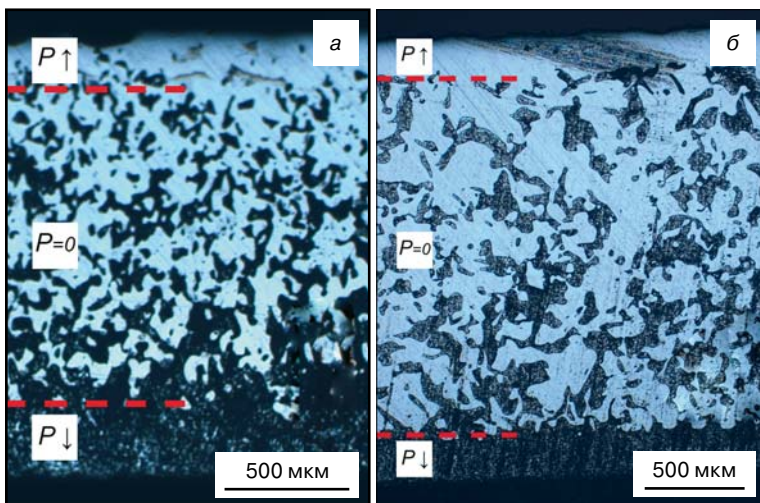


Рис. 5. Доменная структура, сформированная высокотемпературным отжигом при разности потенциалов 2,5 (а) и 10 (б) кВ

Fig. 5. Domain Structure Formed by High-Temperature Annealing at a Bias of (a) 2.5 and (b) 10 kV

Заключение

Продemonстрирована возможность формирования бидоменной структуры в пластинах монокристаллов LiNbO_3 высокотемпературным отжигом в неоднородном электрическом поле. Бидоменные пластины предназначены для изготовления из них кантилеверов, которые являются рабочими элементами механоэлектрического генератора, функционирующего на основе β -распада. Доменная структура, формируемая таким способом, хорошо прогнозируется при помощи разработанной математической модели. Экспериментально показано, что глубина залегания междоменной границы составляет 120—150 мкм. Причем четкость границы зависит от разности потенциалов между полосчатыми электродами технологической ячейки и внешним электродом и с ее ростом повышается. Конфигурация электродов и разность потенциалов определяют распределение электрического поля внутри образца.

Предложенный метод является эффективным для создания бидоменной структуры в пластине толщиной ~300 мкм, которая требуется для изготовления кантилеверов. Толщина пластины обусловлена глубиной проникновения электрического поля в объем образца, помещенного между двумя рядами полосчатых электродов и нагретых до температуры, превышающей температуру Кюри. В рассматриваемом случае глубина проникновения составляет 120—150 мкм.

Библиографический список

1. Yurchuk, S. Yu. Simulation the beta power sources characteristics / S. Yu. Yurchuk, S. A. Legotin, V. N. Murashev, A. A. Krasnov, Yu. K. Omel'chenko, Yu. V. Osipov, S. I. Didenko, O. I. Rabinovich // J. Nano- and Electronic Phys. – 2015. – V. 7, N 3. – P. 03014–1–03014–5.
2. Murashev, V. N. Silicon betavoltaic batteries structures / V. N. Murashev, S. A. Legotin, O. I. Rabinovich, O. R. Abdulaev, U. V. Osipov // J. Nano- and Electronic Phys. – 2015. – V. 7, N 4. – P. 04034–1–04034–3.
3. Duggirala, R. Radioisotope thin-film fueled microfabricated reciprocating electromechanical power generator / R. Duggirala, R. G. Polcawich, M. Dubey, A. Lal // J. Microelectromechanical Systems. – 2008. – V. 17, N 4. – P. 837–849. DOI: 10.1109/JMEMS.2008.924854
4. Wang, Q.-M. Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuators / Q.-M. Wang, L. E. Cross // Ferroelectrics. – 1998. – V. 215, N 1. – P. 187–213. DOI: 10.1080/00150199808229562
5. Friend, J. A piezoelectric linear actuator formed from a multitude of bimorphs / J. Friend, A. Umeshima, T. Ishii, K. Nakamura, S. Ueha // Sensors and Actuators A: Physical. – 2004. – V. 109, N 3. – P. 242–251. DOI: 10.1016/j.sna.2003.10.040
6. Lal, A. Daintiest dynamos [nuclear microbatteries] / A. Lal, J. Blanchard // IEEE Spectrum. – 2004. – V. 41, N 9. – P. 36–41. DOI: 10.1109/MSPEC.2004.1330808
7. Lal, A. Pervasive power: a radioisotope-powered piezoelectric generator / A. Lal, R. Duggirala, H. Li // IEEE Pervasive Computing. – 2005. – V. 4, N 1. – P. 53–61. DOI: 10.1109/MPRV.2005.21
8. Duggirala, R. High efficiency β radioisotope energy conversion using reciprocating electromechanical converters with integrated betavoltaics / R. Duggirala, H. Li, A. Lal // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 92, N 15. – P. 154104–1–3. DOI: 10.1063/1.2912522
9. Funasaka, T. Piezoelectric generator using a LiNbO_3 plate with an inverted domain / T. Funasaka, M. Furuhashi, Y. Hashimoto, K. Nakamura // IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1998. – V. 1. – P. 959–962.
10. Uchino, K. Monomorph characteristics in $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ based ceramics / K. Uchino, M. Yoshizaki, A. Nagao // Ferroelectrics. – 1989. – V. 95, N 1. – P. 161–164. DOI: 10.1080/00150198908245196
11. Nakamura, K. Ferroelectric domain inversion caused in LiNbO_3 plates by heat treatment / K. Nakamura, H. Ando, H. Shimizu // Appl. Phys. Lett. – 1987. – V. 50, N 20. – P. 1413–1414. DOI: 10.1063/1.97838
12. Кубасов, И. В. Междоменная область в монокристаллических биморфных актюаторах на основе ниобата лития, полученных методом светового отжига / И. В. Кубасов, М. С. Тимшина, Д. А. Киселев, М. Д. Малинкович, А. С. Быков, Ю. Н. Пархоменко // Кристаллография. – 2015. – Т. 60, № 5. – С. 764–769. DOI: 10.7868/S002347611504013X
13. Antipov, V. V. Formation of bidomain structure in lithium niobate single crystals by electrothermal method / V. V. Antipov, A. S. Bykov, M. D. Malinkovich, Y. N. Parkhomenko // Ferroelectrics. – 2008. – V. 374, N 1. – P. 65–72. DOI: 10.1080/00150190802427127
14. Gopalan, V. Defect-domain wall interactions in trigonal ferroelectrics / V. Gopalan, V. Dierolf, D. A. Scrymgeour // Annu. Rev. Mater. Res. – 2007. – V. 37. – P. 449–489. DOI: 10.1146/annurev.matsci.37.052506.084247
15. Niizeki, N. Growth ridges, etched hillocks, and crystal structure of lithium niobate / N. Niizeki, T. Yamada, H. Toyoda // Jap. J. Appl. Phys. – 1967. – V. 6, N 3. – P. 318–327.
16. Bykov, A. S. Formation of bidomain structure in lithium niobate plates by the stationary external heating method / A. S. Bykov, S. G. Grigoryan, R. N. Zhukov, D. A. Kiselev, S. V. Ksenich, I. V. Kubasov, M. D. Malinkovich, Yu. N. Parkhomenko // Russian Microelectronics. – 2014. – V. 43, N 8. – P. 536–542. DOI: 10.1134/S1063739714080034

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы») (ID проекта RFMEFI57815X0102).

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2015 г.

Formation of bidomain structure in lithium niobate wafers for betavoltaic alternators

Mikhail D. Malinkovich¹ — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Ass. Prof. (malinkovich@yandex.ru); **Alexander S. Bykov**¹ — Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. (xalex1349@mail.ru); **Ilya V. Kubasov**¹ — Engineer; **Dmitry A. Kiselev**¹ — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher; **Sergey V. Ksenich**¹ — Engineer; **Roman N. Zhukov**¹ — Engineer; **Alexsander A. Temirov**¹ — Engineer; **Nikita G. Timushkin**¹ — Engineer; **Yuri N. Parkhomenko**¹ — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Head of Department of the Material Science of Semiconductors and Dielectrics at the MISiS.

¹National University of Science and Technology «MISiS»,
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia

Abstract. This article discusses the possibility of increasing the efficiency of betavoltaic generators by using lithium niobate single-crystal bimorph as the piezoelectric transducer element. Existing betavoltaic alternating voltage generators consist of a piezoelectric cantilever and a β electron source, wherein the cantilever is a resilient member, for example silicon, to which a PZT ceramics piezoelectric element is connected. In this study we suggest changing the structure of the silicon cantilever with a piezoelectric element for a uniform cantilever which is a thin plate of bidomain lithium niobate single crystal. This increases the efficiency of converting mechanical vibrations to electrical power, Q of the system, and the stability of the working parameters, and furthermore significantly increases — up to several hundred degrees — the operation temperature range. We have considered in details the solution of the main task — formation of a bidomain structure in a thin lithium niobate plate. A method of the sample high-temperature annealing in a nonuniform electric field is proposed. The possibility of domain structure prediction on the basis of the developed model is shown. Samples with a domain boundary depth of 120–150 microns have been obtained, and we have shown that the clarity of the boundary depends on the voltage between the working cell strip electrodes and the external electrode. The method is effective for bidomain structure formation in plates of about 300 microns in thickness.

Keywords: lithium niobate, ferroelectric, domain structure, ferroelectric transducer, betavoltaic generator

References

1. Yurchuk S. Yu., Legotin S. A., Murashev V. N., Krasnov A. A., Omel'chenko Yu. K., Osipov Yu. V., Didenko S. I., Rabinovich O. I. Simulation the Beta Power Sources Characteristics. *J. Nano- And Electronic Physics*. 2015, vol. 7, no. 3, pp. 03014–1—03014–5
2. Murashev V. N., Legotin S. A., Rabinovich O. I., Abdulaev O. R., Osipov U. V. Silicon Betavoltaic Batteries Structures. *J. Nano- And Electronic Physics*. 2015, vol. 7, no. 4, pp. 04034–1—04034–3
3. Duggirala R., Polcawich R. G., Dubey M., Lal A. Radioisotope Thin-Film Fueled Microfabricated Reciprocating Electromechanical Power Generator. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, vol. 17, no. 4, pp. 837–849. DOI: 10.1109/JMEMS.2008.924854
4. Wang Q.–M., Cross L. E. Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuators. *Ferroelectrics*. 1998, vol. 215, no. 1, pp. 187–213. DOI: 10.1080/00150199808229562
5. Friend J., Umeshima A., Ishii T., Nakamura K., Ueha S. A piezoelectric linear actuator formed from a multitude of bimorphs. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2004, vol. 109, no. 3, pp. 242–251. DOI:10.1016/j.sna.2003.10.040
6. Lal A., Blanchard J. Daintiest dynamos [nuclear microbatteries]. *IEEE Spectrum*. 2004, vol. 41, no. 9, pp. 36–41. DOI: 10.1109/MSPEC.2004.1330808
7. Lal A., Duggirala R., Li H. Pervasive power: a radioisotope-powered piezoelectric generator. *IEEE Pervasive Computing*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 53–61. DOI: 10.1109/MPRV.2005.21
8. Duggirala R., Li H., Lal A. High efficiency β radioisotope energy conversion using reciprocating electromechanical converters with integrated betavoltaics. *Appl. Phys. Lett.* 2008, vol. 92, no. 15, pp. 154104–1–3. DOI: 10.1063/1.2912522
9. Funasaka T., Furuhashi M., Hashimoto Y., Nakamura K. Piezoelectric generator using a LiNbO₃ plate with an inverted domain. *IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1998, vol. 1, pp. 959–962.
10. Uchino K., Yoshizaki M., Nagao A. Monomorph characteristics in Pb(Zr,Ti)O₃ based ceramics. *Ferroelectrics*, 1989, vol. 95, no. 1, pp. 161–164. DOI: 10.1080/00150198908245196
11. Nakamura K., Ando H., Shimizu H. Ferroelectric domain inversion caused in LiNbO₃ plates by heat treatment. *Appl. Phys. Lett.* 1987, vol. 50, no. 20, pp. 1413–1414. DOI: 10.1063/1.97838
12. Kubasov I. V., Timshina M. S., Kiselev D. A., Malinkovich M. D., Bykov A. S., Parkhomenko Yu. N. Interdomain region in single-crystal lithium niobate bimorph actuators produced by light annealing. *Crystallography Reports*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 700–705. DOI: 10.1134/S1063774515040136
13. Antipov V. V., Bykov A. S., Malinkovich M. D., Parkhomenko Y. N. Formation of bidomain structure in lithium niobate single crystals by electrothermal method. *Ferroelectrics*, 2008, vol. 374, no. 1, pp. 65–72. DOI: 10.1080/00150190802427127
14. Gopalan V., Dierolf V., Scrymgeour D. A. Defect-domain wall interactions in trigonal ferroelectrics. *Annual Review of Materials Research*, 2007, vol. 37, pp. 449–489. DOI: 10.1146/annurev.matsci.37.052506.084247
15. Niizeki N., Yamada T., Toyoda H. Growth ridges, etched hillocks, and crystal structure of lithium niobate. *Jap. J. Appl. Phys.* 1967, vol. 6, no. 3, pp. 318–327.
16. Bykov A. S., Grigoryan S. G., Zhukov R. N., Kiselev D. A., Ksenich S. V., Kubasov I. V., Malinkovich M. D., Parkhomenko Yu. N. Formation of bidomain structure in lithium niobate plates by the stationary external heating method. *Russian Microelectronics*, 2014, vol. 43, no. 8, pp. 536–542. DOI: 10.1134/S1063739714080034

Acknowledgements. The work was carried out with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Federal Target Program for Study and Development of Top Priority Fields of Russian Research and Engineering Potential for 2014–2020) (Project ID RFMEFI57815X0102).

Received December 24, 2015