

Создание сегнетоэлектрических доменных структур с использованием ультразвука вблизи нижней границы СВЧ-диапазона*В. В. Крутов, А. С. Сигов, А. А. Щука*

Найдено экономичное технологическое решение создания сегнетоэлектрических доменных структур с периодом $d \approx 40\text{--}100$ мкм. Определены значения частоты упругих волн и температуры жидких электродов. Полученные результаты могут быть применены к технологии, ориентированной на массовое производство устройств на основе доменных структур, в частности, при изготовлении акустических фильтров и резонаторов с улучшенными характеристиками. Технология обладает малой продолжительностью технологического цикла и в то же время обеспечивает необходимую глубину инвертирования доменов.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, доменные структуры, бимпульсная гетеротермальная технология, акустоинтерференционный метод, температурная решётка.

Ссылка: Крутов В. В., Сигов А. С., Щука А. А. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 60.

Reference: V. V. Krutov, A. S. Sigov, and A. A. Shchuka, Prikl. Fiz., No. 6, 60 (2018).

Введение

В последние годы активно исследуются методы создания фотонных и фононных кристаллов на основе сегнетоэлектриков и мультиферроиков. На современном этапе развития уже недостаточно разрабатывать устройства и технологии, ориентируясь только на физические аспекты решения задачи, а целесообразно идти к максимально экономичному технологическому решению, сокращая продолжительность технологического цикла и финансовые затраты, что особенно важно при массовом производстве изделий. В этой связи представляется перспективной предложенная нами бимпульсная гетеротермальная технология формирования регулярных доменных структур (РДС) в сегнетоэлектриках, обладающая рекордно малой продолжительностью технологического цикла среди аналогов и в то же время обеспечивающая необходимую глубину инвертирования доменов [1, 2].

Недавно группой французских учёных на основе РДС разработаны фильтры и резонаторы,

обладающие улучшенными характеристиками [3]. Ключевым элементом устройств являются структуры антипараллельных доменов с периодом $d \approx 40\text{--}100$ мкм. Указанные устройства были изготовлены по традиционной затратной технологии. Однако в случае массового производства таких устройств, предлагаемое нами технологическое решение, обеспечивающее рекордно малую продолжительность технологического цикла, представляется более конкурентоспособным.

Указанная технология даёт возможность формировать РДС без применения структурированных электродов, при этом локальное переключение поляризации осуществляется однородным электрическим полем с использованием, в частности, интерферирующих ультразвуковых волн [1].

Технология основана на комбинированном воздействии на сегнетоэлектрик двух импульсов:

- импульса интерферирующих волн, создающих температурную решётку;
- импульса однородного электрического поля, осуществляющего селективное переключение доменов на температурной решётке.

Как известно, стоимость электроакустических (ЭА) блоков резко возрастает при увеличении рабочей частоты пьезоизлучателя упругих волн. Учитывая высокую стоимость изготовления пьезоизлучателей гигагерцевого диапазона, в настоящей работе рассматривается экономичное технологическое решение, а именно, использование ультразвуковых волн на частотах, близких к нижней границе СВЧ-диапазона ($f \approx 300$ МГц). Предлагаемая технология позволяет, в частности, со-

Крутов Владислав Викторович, доцент, к.т.н.
Сигов Александр Сергеевич, президент РТУ МИРЭА, академик РАН, д.ф.-м.н.
Щука Александр Александрович, профессор, д.т.н.
 МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).
 Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.
 Тел. +7(499) 215-65-65. E-mail: v_krutov@mirea.ru

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2018 г.

здавать РДС с параметрами, соответствующими ключевым элементам устройств акустоэлектроники с улучшенными характеристиками [3], а также генераторов и детекторов терагерцевого излучения [4].

Цель работы

Целью настоящей работы является нахождение экономичного технологического решения создания РДС с периодом $d \approx 40\text{--}100$ мкм с помощью акустоинтерференционного метода [1].

Результаты компьютерного моделирования

Схема технологической установки формирования РДС с использованием интерферирующих упругих волн представлена в [1]. Там же представлена математическая модель технологического процесса и получены зависимости основных технологических параметров формирования РДС указанным методом. Можно показать, что если принять толщину δ жидкого электрода равной половине толщины приведённого скин-слоя, т. е. $\delta = (1/2\alpha)\cos\gamma$ (где α – показатель поглощения упругих волн в жидком электроде, γ – угол преломления на границе «кварц–жидкость»), то выражения для угла преломления и частоты f упругих волн принимают вид

$$\gamma = \arccos\left(1,154 \cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos\left(\frac{Av^2}{6,15d}\right)\right)\right), \quad (1)$$

$$f \approx \sqrt{\frac{4\cos\gamma}{dA}}, \quad (2)$$

где d – пространственный период РДС; v – скорость акустических волн в жидкости; A – коэффициент пропорциональности зависимости $\alpha = Af^2$.

Решая систему уравнений (1–2), получим формулы для расчёта пространственного периода РДС и коэффициента A

$$d \approx \frac{0,81v}{f} \sqrt{\cos(\gamma) / \cos(\pi - 3 \times \arccos(0,867 \times \cos(\gamma)))}, \quad (3)$$

$$A \approx \frac{5}{vf} \sqrt{\cos(\gamma) \times \cos(3 \arccos(0,867 \times \cos(\gamma)) - \pi)}. \quad (4)$$

При этом угол преломления определяется по закону Снеллиуса:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{v}{v_{\text{ТТ}}} \sin\beta\right), \quad (5)$$

где $v_{\text{ТТ}}$ – скорость упругой волны в твёрдом теле ЭА-блока (например, в кварце); β – угол падения ультразвуковых волн на границу «кварц–жидкость».

С целью предотвращения разнонаправленности фазовой и групповой скоростей упругой волны целесообразно выбирать в качестве звукопровода ЭА-блока изотропный материал. Среди изотропных материалов наименьшим затуханием упругих волн обладает плавленый кварц.

Рассмотрим использование ЭА-блока из плавленого кварца ($v_{\text{ТТ}} = 5,96 \times 10^3$ м/с) в сочетании с жидким электродом со скоростью ультразвука в нём $v \approx 1,7 \times 10^3$ м/с. График зависимости периода d от частоты f , согласно (3) и (5), представлен на рис. 1 для трёх ЭА-блоков с фиксированными углами падения β : $\beta = 10^\circ$, $\beta = 12^\circ$, $\beta = 17^\circ$. Из рис. 1 видно, что для ЭА-блока с фиксированной частотой f при уменьшении угла падения β на границу «кварц–жидкость» период d формируемой РДС увеличивается. Очевидно, что при прочих равных условиях целесообразно использовать не слишком высокие частоты, ориентируясь на современный уровень развития техники ультразвуковых пьезоизлучателей.

Например, с помощью технологической установки с ЭА-блоком, работающим на частоте $f \approx 300$ МГц, как следует из рис. 1, при угле падения $\beta \approx 17^\circ$ существует возможность создания РДС с периодом $d \approx 38,0$ мкм. Подобные РДС применяются, в частности, при изготовлении оптических параметрических генераторов ИК-диапазона [5, 6], используемых в системах диагностики состава газовых смесей, в том числе атмосферы. Однако для создания такой РДС необходим соответствующий жидкий электрод.

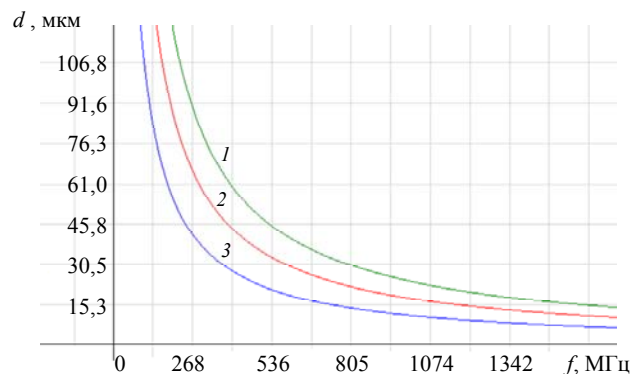


Рис. 1. Зависимость периода d от частоты f для трёх значений угла падения: 1 – $\beta = 10^\circ$, 2 – $\beta = 12^\circ$ и 3 – $\beta = 17^\circ$.

Зависимость коэффициента A жидкого электрода от частоты f , согласно выражениям (4) и (5), представлена на рис. 2 для тех же ЭА-блоков с уг-

лами падения $\beta = 10^\circ$, $\beta = 12^\circ$ и $\beta = 17^\circ$. Из представленных графиков (рис. 1 и рис. 2) видно, что для заданной частоты f при уменьшении угла падения β на границу «кварц–жидкость» требуемый коэффициент A жидкого электрода уменьшается, но увеличивается период РДС. Кроме того, используя полученные зависимости, для ЭА-блока с фиксированным значением угла падения β , можно определить, во-первых, период d формируемой РДС на заданной частоте f и, во-вторых, соответствующий коэффициент A жидкого электрода.

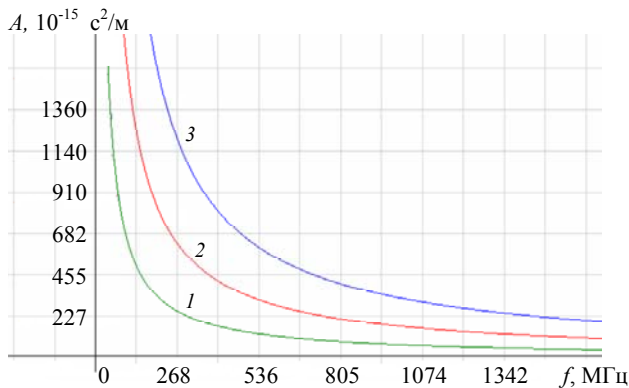


Рис. 2. Зависимость коэффициента A жидкого электрода от частоты f для трёх значений угла падения: 1 – $\beta = 10^\circ$, 2 – $\beta = 12^\circ$ и 3 – $\beta = 17^\circ$.

На частоте $f \approx 300$ МГц при $\beta \approx 17^\circ$ существует возможность создания РДС с периодом $d \approx 38,0$ мкм, однако, при этом необходим жидкий электрод с высоким значением коэффициента $A \approx 1060 \times 10^{-15} \text{ c}^2/\text{м}$ (рис. 2). Одной из хорошо изученных и доступных проводящих жидкостей является водный раствор хлористого лития LiCl. Как известно, на частоте $f \approx 300$ МГц у данного раствора LiCl (молярность $m = 7,7$) даже при его охлаждении до $T \approx -50$ С значение коэффициента A составляет $A \leq 550 \times 10^{-15} \text{ c}^2/\text{м}$ [7]. Поэтому для создания РДС с периодом $d \leq 40$ мкм на частоте, близкой к $f \approx 300$ МГц, водный раствор LiCl не применим.

Как отмечалось выше, РДС с пространственным периодом $d \approx 40\text{--}100$ мкм – это ключевой элемент акустических фильтров и резонаторов [3], обладающих улучшенными характеристиками, а также генераторов и детекторов терагерцевого излучения [4]. Создание таких РДС по предлагаемой технологии возможно, в частности, на частоте ультразвука, близкой к $f \approx 300$ МГц, при $\beta < 17^\circ$. Например, при $\beta \approx 10^\circ$ на данной частоте (как следует из рис. 1 и 2) период РДС составляет $d \approx 80$ мкм при использовании жидкого электрода с коэффициентом $A \approx 230 \times 10^{-15} \text{ c}^2/\text{м}$. Указанное значение коэффициента A реализуемо при охлаждении водного раствора LiCl до температуры $T \approx -32$ °С [7].

Для сравнения рассмотрим технологические параметры при использовании ЭА-блока с более высокой частотой, например, $f \approx 670$ МГц. Из рис. 1 видно, что на данной частоте при $\beta \approx 17^\circ$ существует возможность создания РДС с периодом $d \approx 16$ мкм, если применить жидкий электрод с коэффициентом $A \approx 470 \times 10^{-15} \text{ c}^2/\text{м}$. Водный раствор LiCl (7,7m) удовлетворяет этому требованию при охлаждении до $T \approx -40$ °С [7]. Приведённый пример указывает на принципиальную возможность создания РДС с малым периодом на частотах, близких к $f \approx 670$ МГц. Однако на таких частотах ЭА-блок из плавленого кварца имеет большее затухание упругих волн, что потребует (при прочих равных условиях) большей мощности ультразвука [1], а также существенно больших финансовых затрат на изготовление пьезоизлучателей.

Более доступными, с экономической точки зрения, являются ЭА-блоки, работающие на более низких частотах. Например, на частоте $f \approx 270$ МГц при $\beta \approx 10^\circ$ можно создавать доменные структуры с периодом $d \approx 90$ мкм, используя жидкий электрод с коэффициентом $A \approx 250 \times 10^{-15} \text{ c}^2/\text{м}$ (например, водный раствор LiCl (7,7m) при $T \approx -35$ °С [7]).

Важно отметить, что с одним и тем же ЭА-блоком (с фиксированным значением угла падения β ультразвука на границу «кварц–жидкость») путём перестройки частоты в определённых пределах можно создавать РДС с различным периодом d , используя при этом соответствующие жидкие электроды и/или разную температуру.

Заключение

Найдено экономичное технологическое решение создания с помощью акустоинтерференционного метода доменных структур с периодом $d \approx 40\text{--}100$ мкм. Полученные результаты могут быть использованы в технологии, ориентированной на массовое производство устройств на основе сегнетоэлектрических РДС, в частности, акустических фильтров и резонаторов с улучшенными характеристиками. Технология обладает рекордно малой продолжительностью технологического цикла и в то же время обеспечивает необходимую глубину инвертирования доменов.

Моделирование процесса воздействия упругих волн, падающих на сегнетоэлектрик через тонкий слой жидкого электрода толщиной δ , меньшей полупериода формируемой структуры, позволяет сделать следующие выводы.

Электроакустические блоки, работающие на частотах значительно более низких, чем $f \approx 300$ МГц, предпочтительны с экономической точки зрения,

однако требуют использования специальных жидких электродов с весьма высоким значением коэффициента пропорциональности A частотной зависимости $\alpha = Af^2$ показателя поглощения ультразвука.

Оптимальным технологическим решением поставленной задачи следует считать использование интерферирующих упругих волн на частотах, близких к нижней границе СВЧ-диапазона ($f \approx 300$ МГц), в сочетании с жидким электродом на основе водного раствора хлористого лития. Например, на данной частоте при угле падения $\beta \approx 10^0$ период РДС составляет $d \approx 80$ мкм при использовании водного раствора LiCl, охлаждённого до $T \approx -32$ °С.

На частотах, значительно превышающих $f \approx 300$ МГц, звукопровод электроакустического блока имеет большее затухание упругих волн, что требует (при прочих равных условиях) большей мощности ультразвука, а также более трудоёмкой

технологии изготовления пьезоизлучателей указанного диапазона частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krutov V. V., Sigov A. S., Shchuka A. A. // *Ferroelectrics*. 2015. Vol. 476. Issue 1. P. 69.
2. Крутов В. В., Сигов А. С., Щука А. А. // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 2. С. 3.
3. Bassignot F., Haye G., Henrot F., Ballandras S., Courjon E., Lesage J.-M. // *Frequency Control Symposium (IFCS)*. 2016. IEEE International. P. 1.
4. Kitaeva G. Kh., Kovalev S. P., Naumova I. I., Tuchak A. N., Yakunin P. V., Huang Y.-C., Mishina E. D., Sigov A. S. // *Laser Physics Letters*. 2013. Vol. 10. No. 5. P. 055404.
5. Andreeva M. S., Andreeva N. P., Barashkov M. S., Mitin K. V., Shchebetova N. I., Krymskii M. I., Rogalin V. E., Akhmatkhanov A. R., Chuvakova M. A., Shur V. Ya. // *Ferroelectrics*. 2016. Vol. 496. P. 128.
6. Myers L. E., Eckardt R. C., Fejer M. M., Byer R. L., Bosenberg W. R., Pierce J. W. // *J. Opt. Soc. Am. B*. 1995. Vol. 12. No. 11. P. 2102.
7. Kasper G., Tamm K. // *J. Chem. Phys.* 1980. Vol. 72. No. 9. P. 5279.

PACS: 81.16.Rf, 77.80.Fm

Creating for ferroelectric domain structures using ultrasound near the bottom of the UHF band

V. V. Krutov, A. S. Sigov, and A. A. Shchuka

MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia
E-mail: v_krutov@mirea.ru

Received November 26, 2018

An economical technological solution for the creation of ferroelectric domain structures with a period $d \approx 40\text{--}100$ μm is found. The values of frequency of elastic waves and temperature of liquid electrodes are determined. The obtained results can be applied to the technology focused on mass production of devices based on domain structures, in particular, in the manufacture of acoustic filters and resonators with improved characteristics. The technology has a short duration of the technological cycle and, at the same time, provides the necessary depth of domain inversion.

Keywords: ferroelectrics, domain structures, double-pulse heterothermal technique, acousto-interference method, temperature lattice.

REFERENCES

1. V. V. Krutov, A. S. Sigov, and A. A. Shchuka, *Ferroelectrics* **476** (1), 69 (2015).
2. V. V. Krutov, A. S. Sigov, and A. A. Shchuka, *Russian Technological Journal* **5** (2), 3 (2017).
3. F. Bassignot, G. Haye, F. Henrot, S. Ballandras, E. Courjon, and J.-M. Lesage, in *Proc. Frequency Control Symposium (IFCS)*, (IEEE International, 2016). P. 1.
4. G. Kh. Kitaeva, S. P. Kovalev, I. I. Naumova, A. N. Tuchak, P. V. Yakunin, Y.-C. Huang, E. D. Mishina, and A. S. Sigov, *Laser Physics Letters* **10** (5), 055404 (2013).
5. M. S. Andreeva, N. P. Andreeva, M. S. Barashkov, K. V. Mitin, N. I. Shchebetova, M. I. Krymskii, K. M. Krymskii, V. E. Rogalin, A. R. Akhmatkhanov, M. A. Chuvakova, and V. Ya. Shur, *Ferroelectrics* **496**, 128 (2016).
6. L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer, R. L. Byer, W. R. Bosenberg, and J. W. Pierce, *J. Opt. Soc. Am. B*. **12** (11), 2102 (1995).
7. G. Kasper and K. Tamm, *J. Chem. Phys.* **72** (9), 5279 (1980).