

Бимпульсная гетеротермальная технология формирования доменных структур в сегнетоэлектриках

© В.В. Крутов¹, Э.А. Засовин¹, В.Г. Михалевич², А.С. Сигов¹, А.А. Щука¹

¹ Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

E-mail: v_krutov@mirea.ru

Предложена технология формирования одномерных и двумерных доменных структур с помощью интерферирующих волн (электромагнитных или акустических) и однородного электрического поля. Технология позволяет осуществлять перестройку пространственного периода структуры в процессе ее эксплуатации путем изменения частоты интерферирующих волн, а также соответствующих углов их падения на кристалл. Показано, что продолжительность технологического цикла незначительно превышает время переключения доменов. Технология применима к кристаллам LiNbO_3 , KTiOPO_4 (с высоким содержанием калия) и некоторым другим.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-07-00078).

Широкому применению фотонных кристаллов на основе регулярных доменных структур (РДС) в фотонике, нелинейной оптике, информационной и вычислительной технике препятствует большая продолжительность технологического цикла существующих методов их формирования. Метод формирования РДС, основанный на использовании неоднородного электрического поля, создаваемого с помощью структурированных электродов [1,2], метод „вычерчивания доменного рисунка“ с помощью электронного луча [3,4] и другие малоприменимы для массового производства фотонных кристаллов. Перспективными следует считать методы с минимальной продолжительностью технологического цикла, позволяющие „штамповать“ такие изделия.

Не решена также проблема управления размерами доменов в процессе эксплуатации РДС-устройств. Многократное формирование доменного рисунка заданной конфигурации с помощью методов, использующих фотолитографию, в процессе эксплуатации устройств не представляется возможным.

В 2007 г. нами был предложен термоинтерференционный принцип формирования РДС с помощью температурного поля, имеющего гетеротермальный характер (температурной решетки), позволяющий осуществлять локальное переключение доменов однородным электрическим полем [5]. Согласно данному принципу локальное стимулирование переключения доменов достигается с помощью температурной решетки, создаваемой импульсным воздействием интерферирующих волн. Такой подход позволяет существенно сократить время формирования РДС типа „голова к хвосту“ по сравнению с методами [1,3,6], а также избежать ограничений, связанных с дифракцией, присущих методу [7].

Термоинтерференционный принцип позволяет создать технологию, основанную на комбинированном воздействии на сегнетоэлектрик двух импульсов: интерферирующих волн (электромагнитных или акустических), создающих температурную решетку, и однородного элек-

трического поля, осуществляющего селективное переключение доменов (рис. 1). На базе данного принципа предложены и исследованы оптико-интерференционный [8] и акусто-интерференционный [9,10] методы создания РДС.

Селективное переключение доменов при наложении однородного электрического поля обеспечивается благодаря феномену уменьшения коэрцитивного поля сегнетоэлектриков с ростом температуры. Данный феномен наблюдался в ряде важнейших сегнетоэлектрических кристаллов: танталата лития LiTaO_3 , ниобата лития LiNbO_3 , ниобат лития с примесью магния $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$, ниобата бария-стронция $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$, титанил-фосфата-калия KTiOPO_4 с высоким содержанием калия (при низком содержании калия переключению

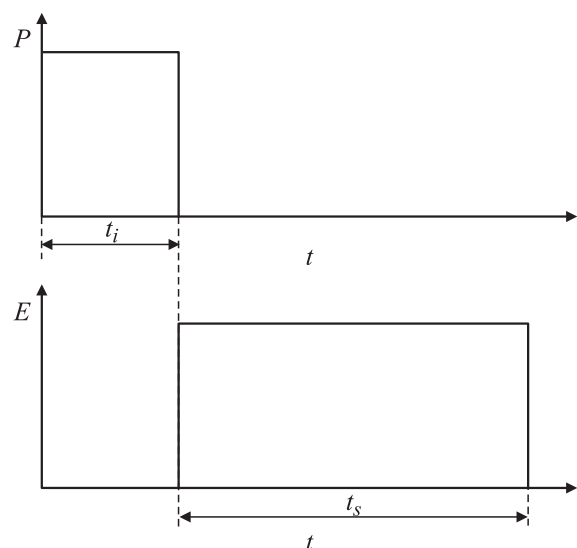


Рис. 1. Импульсы плотности мощности волнового воздействия P и напряженности инвертирующего электрического поля E .

доменов препятствует пробой при комнатной температуре).

Основные этапы биимпульсной гетеротермальной технологии (БИГ-технологии) перечислены ниже.

1. Формирование интерференционной картины в монодоменном сегнетоэлектрике с помощью волнового воздействия.

2. Импульсный нагрев с помощью термоинтерференционного импульса длительностью t_i (рис. 1). Создание температурной решетки, индуцированной интерферирующими волнами.

3. Воздействие однородного электрического поля длительностью t_s , инвертирующего домены нагретых участков температурной решетки. Напряженность поля $E \geq E_c$, где E_c — коэрцитивное поле.

4. Автоматическое отключение инвертирующего электрического поля при заданной глубине прорастания антипараллельных доменов, а также с целью предотвращения латерального сращивания антипараллельных доменов.

Другими словами, БИГ-технология основана на комбинированном воздействии на монодоменный сегнетоэлектрик электромагнитных или акустических (ультра или гиперзвуковых) интерферирующих волн, создающих температурную решетку, и однородного электрического поля.

Импульсный характер гетеротермального нагрева является принципиальным и продиктован необходимостью предотвращения растекания тепла за счет теплопроводности (диффузии тепла).

Для случая адиабатической температурной решетки длительность термоинтерференционного импульса t_i должна удовлетворять условию

$$t_i \ll \tau_d \approx d^2/\chi. \tag{1}$$

Здесь τ_d — время релаксации температурной решетки; $\chi = K/(\rho \cdot C)$ — коэффициент температуропроводности кристалла, где K — коэффициент теплопроводности, C — теплоемкость, ρ — плотность сегнетоэлектрика.

Оценим значения τ_d и t_i для кристалла LiNbO_3 . Принимая теплофизические параметры ниобата лития равными $\rho = 4.6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $C_\rho = 650 \text{ J/kg} \cdot \text{deg}$, $K = 4.6 \text{ W/m} \cdot \text{deg}$, получим следующие значения. Для РДС с периодом $d = 20 \mu\text{m}$ время релаксации составит $\tau_d = 260 \mu\text{s}$ и, следовательно, требуемая длительность термоинтерференционного импульса $t_i \ll 260 \mu\text{s}$. Для сравнения, время переключения доменов в LiNbO_3 составляет $t_s = 1\text{--}60 \text{ ms}$. Поэтому продолжительность технологического цикла БИГ-технологии определяется, в основном, временем переключения доменов сегнетоэлектрика t_s .

Использование коротких импульсов излучения не только существенно уменьшает продолжительность технологического цикла, но и снижает требования к механической стабильности технологической установки, что позволяет формировать РДС в условиях возможных вибраций.

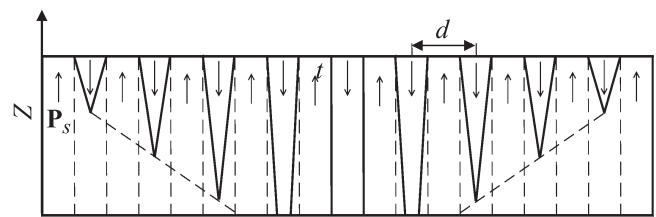


Рис. 2. РДС, сформированная с помощью однородного поля и интерферирующих пучков с гауссовым распределением.

Используя условие (1), легко показать, что для адиабатического нагрева плотность мощности интерферирующих волн P , необходимая для образования температурной решетки с перепадом температур ΔT_d , удовлетворяет неравенству

$$P \gg K \cdot \Delta T_d / d^2. \tag{2}$$

Полученное выражение для плотности мощности волнового воздействия не зависит от физической природы волн и применимо как для оптико-интерференционного [8], так и для акусто-интерференционного [10] методов создания РДС, основанных на термоинтерференционном принципе [5].

Например, полагая $\Delta T_d = 5 \text{ K}$, для РДС с периодом $d = 20 \mu\text{m}$ получим необходимую плотность мощности интерферирующих волн $P \ll 60 \text{ W/mm}^2$. Очевидно, что при формировании РДС в планарных световодах, глубина которых составляет несколько микрометров [11], энергозатраты минимальны.

Отметим, что для формирования РДС в указанных сегнетоэлектриках с помощью температурной решетки необходим импульсный нагрев интерферирующими волнами в условиях стабильной интерференционной картины с узловыми поверхностями, параллельными полярной оси Z . Интерференционная картина может быть получена суперпозицией двух-, трех- или четырехволновых пучков. При этом возможно соответственно формирование как одномерных доменных структур, так и двумерных 2D-структур (с треугольной и квадратной симметрией).

На рис. 2 показан примерный вид РДС, сформированной с помощью однородного поля и интерферирующих пучков с гауссовым распределением интенсивности (стрелками показан вектор спонтанной поляризации доменов \mathbf{P}_s). В центральной части кристалла, где перепад температур в температурной решетке ΔT_d выше, глубина прорастания доменов соответственно больше.

БИГ-технология позволяет принципиально по-новому решить проблему управления размерами доменов в одномерных и 2D-структурах типа „голова к хвосту“.

Действительно, период d интерференционной картины, создаваемой, например, двумя пучками волн равен [12]

$$d = \lambda / (2 \sin \gamma) \text{ для } \varphi = \pi, \tag{3}$$

где λ — длина волны в среде, γ — угол падения луча, φ — угол между плоскостями падения лучей.

Суперпозиция трех волновых пучков обеспечивает формирование максимумов интенсивности, расположенных в узлах треугольной решетки. Минимальное расстояние между максимумами определяется соотношением

$$d = (2/3)(\lambda / \sin \gamma) \quad \text{для} \quad \varphi = 2\pi/3. \quad (4)$$

Квадратная решетка создается интерференцией четырех пучков. Период структуры определяется условием

$$d = (\sqrt{2}/2)(\lambda / \sin \gamma) \quad \text{для} \quad \varphi = \pi/2. \quad (5)$$

Из приведенных выражений видно, что период температурной решетки, равный периоду интерференционной картины, задается частотой интерферирующих волн, их скоростью распространения, углом падения γ лучей на кристалл и углами φ между плоскостями падения лучей.

Таким образом, БИГ-технология позволяет осуществлять перестройку периода РДС путем изменения частоты интерферирующих волн (электромагнитных или акустических), а также соответствующих углов. Стирание предыдущей РДС осуществляется с помощью полевой монодоменизации с использованием той же пары однородных электродов. При этом технология позволяет управлять периодом РДС в процессе эксплуатации, не извлекая сегнетоэлектрический кристалл из корпуса РДС-устройства.

На эффективность формирования РДС однородным электрическим полем в условиях локального стимулирования переключения доменов указывают результаты экспериментов с использованием дистантной оптической маски [7], а также сканирующего лазерного луча [6].

Список литературы

- [1] M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh, K. Watanabe. Appl. Phys. Lett. **62**, 5, 435 (1993).
- [2] V.Ya. Shur, E.L. Rumyantsev, E.V. Nikolaeva, E.I. Shishkin, D.V. Fursov, R.G. Batchko, L.A. Eyres, M.M. Fejer, R.L. Byer. Appl. Phys. Lett. **76**, 2, 143 (2000).
- [3] H. Ito, C. Takyu, H. Inaba. Electron. Lett. **27**, 1211 (1991).
- [4] Л.С. Коханчик, М.В. Бородин, С.М. Шандаров, Н.И. Буриков, В.В. Щербина, Т.Р. Волк. ФТТ **52**, 8, 1602 (2010).
- [5] В.В. Крутов, Э.А. Засовин, В.Г. Михалевич, А.С. Сигов, А.А. Щука. Радиотехника **9**, 5 (2007).
- [6] V. Dierolf, C. Sandmann. Appl. Phys. Lett. **84**, 20, 3987 (2004).
- [7] M. Fujimura, T. Sohmura, T. Suhara. Electron. Lett. **39**, 719 (2003).
- [8] В.В. Крутов, В.Г. Михалевич, А.А. Щука. Нано- и микро-системная техника **3**, 71 (2007).
- [9] В.В. Крутов, Э.А. Засовин, В.Г. Михалевич, А.С. Сигов, А.А. Щука. В сб.: Междунар. конф. „Фундаментальные проблемы радиоэл. и оптоэл. приборостр.“ (INTERMATIC -2009). М. (2009). С. 109.
- [10] В.В. Крутов, Э.А. Засовин, В.Г. Михалевич, А.С. Сигов, А.А. Щука. Радиотехника и электроника **55**, 9, 1103 (2010).
- [11] T. Sugita, K. Mizuuchi, Y. Kitaoka, K. Tamamoto. Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1 **40**, 3B, 1751 (2001).
- [12] E.N. Leith. J. Opt. Soc. Am. **52**, 1123 (1962).