

## Микро- и нано-доменная инженерия в сегнетоэлектриках

В.Я. Шур

*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, 620000  
Екатеринбург, Россия  
e-mail: vladimir.shur@urfu.ru*

В последние десятилетия доменная инженерия превратилась в одну из самых важных областей сегнетоэлектрической науки и технологии. Основной целью доменной инженерии является изготовление стабильных доменных структур с заданной геометрией в коммерчески доступных сегнетоэлектриках, обладающих характеристиками, важными для применений. Возможность пространственной модуляции электрооптических, фоторефрактивных, пьезоэлектрических и нелинейно-оптических свойств за счет создания периодической сегнетоэлектрической доменной структуры открывает широкие возможности для изготовления новых устройств с рекордными характеристиками. Относительно невысокая цена устройств может быть получена при использовании литографических методов для создания прецизионной регулярной доменной структуры.

Ожидается, что совершенствование процесса создания регулярных доменных структур с использованием результатов фундаментальных исследований позволит изготавливать 1D и 2D структуры, в том числе и с субмикронными периодами, при этом удастся обеспечить воспроизводимость периода в соответствии со строгими требованиями фотонных приложений. Особый интерес представляет использование регулярных доменных структур для нелинейно-оптических устройств.

Идея улучшать свойства сегнетоэлектриков за счет создания стабильных специализированных доменных структур с определенной геометрией была сформулирована R.E. Newnham, L.E. Cross et al. в 1975 году [1]. Они предложили создавать доменные структуры определенной геометрии в пьезоэлектрических кристаллах и обсудили возможность изменения свойств путем создания «доменов, которые не будут переключаться во время работы устройства». В работе осуждалось в основном применение для пьезоэлектрических устройств. Было предложено рассматривать доменную структуру среди факторов, с помощью которых, наряду с граничными условиями и конфигурацией электродов, можно получать желаемый резонанс. «Изменение доменной структуры принято считать помехой, ухудшающей работу пьезоэлектрических генератора, но это не обязательно. Правильно созданная доменная структура позволит изменять резонансный частотный спектр и улучшать или исключать определенные режимы.» [1].

Следует отметить, что наиболее активно развивается независимая ветвь доменной инженерии, связанная с созданием нелинейно-оптических кристаллов с регулярной доменной структурой для преобразования частоты света (в первую очередь генерации второй гармоники, ГВГ) и производства нелинейных оптических устройств с использованием эффекта фазового квази-синхронизма.

Фазовый синхронизм является необходимым условием достижения высокой эффективности преобразования частоты света, поскольку фазовые скорости для взаимодействующих длин волн существенно различаются. Оригинальный метод получения фазового синхронизма путем изменения знака нелинейного коэффициента на каждой длине когерентности был предложен Armstrong, Bloembergen et al. [2]. Эта идея была экспериментально применена R.C. Miller к сегнетоэлектрической доменной структуре [3]. «Оптимальная доменная структура для ГВГ должна состоять из антипараллельных пластинчатых доменов с 180-градусными доменными стенками, перпендикулярными направлению пучка» [3].

Для создания таких устройств в основном используются монокристаллы  $\text{LiNbO}_3$  (LN) и  $\text{LiTaO}_3$  (LT), обладающие рекордными электрооптическими и нелинейно-оптическими свойствами. Кроме того, эти материалы идеально подходят для создания регулярных доменных структур, поскольку являются одноосными сегнетоэлектриками с 180-градусными доменными стенками, строго ориентированными в определенном кристаллографическом направлении.

Единственной проблемой являются чрезвычайно высокие значения пороговых полей (более 210 кВ/см), необходимых для переключения поляризации в наиболее доступных конгруэнтных кристаллах CLN и CLT, что ограничивает толщину пластин с регулярной доменной структурой, а значит и апертуру элементов для преобразования частоты излучения.

Первые кристаллы с регулярной доменной структурой (periodically poled crystals PPLN and PPLT) были изготовлены в Китае D. Feng, N.B. Ming et al. [4, 5] в CLN при выращивании легированных кристаллов в периодически изменяемых условиях. В этом случае искусственно создаваемые слои роста позволили сформировать регулярную доменную структуру с периодами до 2 мкм. Позднее для создания регулярной доменной структуры был использован ряд других методов, таких как диффузия, протонный обмен, сканирование электронным лучом, и ряд других, но все они не удовлетворяли высоким требованиям, предъявляемым к промышленным технологиям.

Важнейшим шагом в развитии доменной инженерии явилось создание в 1993 году в Японии M. Yamada et al. регулярной доменной структуры в CLN приложением внешнего электрического поля с помощью электродов, изготовленных с помощью фотолитографии [6]. Это достижение открыло путь к массовому производству нелинейно-оптических устройств, использующих эффект фазового квази-синхронизма. Революционный характер разработанной методики отмечал R.L. Byer [7]: «использование массового производства, которое стало возможным, благодаря изготовлению электродов с помощью литографии с последующим созданием регулярной доменной структуры привела к быстрому переходу от нелинейно-оптических кристаллов стоимостью в тысячи долларов на нелинейные микросхемы, изготовление которых при массовом производстве будет стоить менее одного доллара».

Понятно, что развитие доменной инженерии требует глубокого понимания основных физических механизмов формирования доменной структуры. Наши экспериментальные исследования переключения поляризации показывают, что доменная структура имеет кинетическую природу, и реальные устойчивые доменные структуры всегда далеки от равновесия, то есть являются метастабильными. Решающим фактором для доменной инженерии является тот факт, что доменная структура практически любой геометрии может быть стабилизирована в результате экранирования деполяризующего поля [8, 9]. Разработанный кинетический подход, основанный на аналогии между ростом кристаллов и сегнетоэлектрических доменов, позволяет выявить механизмы кинетики и стабилизации доменных структур и добиться существенного улучшения технологий формирования регулярных микро- и нанодоменных структур [8, 9].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00210). Использовано оборудование УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ.

1. R.E. Newnham, C.S. Miller, L.E. Cross, T.W. Cline, *Phys. Stat. Sol. (a)* **32**, 69 (1975).
2. J.A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, P.S. Perhsan, *Phys. Rev.* **127**, 1918 (1962).
3. R.C. Miller, *Phys. Rev.* **134**, A1313 (1964).
4. D. Feng, N.B. Ming, J.F. Hong, Y.S. Yang, J.S. Zhu, Z. Yang, Y.N. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **37**, 607 (1980).
5. D. Feng, N.B. Ming, D. Feng, *J. Mater. Sci.* **17**, 1663 (1982).
6. M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh, K. Watanabe, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 435 (1993).
7. R.L. Byer, *J. Nonlinear Opt. Phys. & Mater.* **6**, 549 (1997).
8. V.Ya. Shur, *Ferroelectric Thin Films: Synthesis and Basic Properties* (Gordon and Breach, New York), 153 (1996).
9. V.Ya. Shur, *Nucleation Theory and Application* (WILEY VCH, Weinheim), 178 (2005).