

ВЛИЯНИЕ ПРОТОНООБМЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ НА ДЕПОЛЯРИЗУЮЩЕЕ ПОЛЕ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ

М. В. Спирин, А. Н. Смирнова, М. Е. Белокрылов
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Сегнетоэлектрические кристаллы, например ниобат лития, используются в интегральной оптике путем формирования на их поверхности волноводов. Одним из способов модификации поверхности сегнетоэлектриков является метод протонного обмена.

Из результатов работы [1] следует, что наличие планарного $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волновода на подложке ниобата лития (Z -срез) приводит к увеличению внешнего электрического поля (приблизительно на $0,5 \text{ кВ/мм}$), необходимого для реполяризации (“полинга”) исследуемой области.

Следовательно предположить, что деполяризирующее поле, препятствующее “полингу”, имеет большее значение при наличии планарного $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волновода на Z -срезе. Увеличение деполяризирующего поля может иметь несколько причин.

Во-первых, возможно изменение характеристик диэлектрического зазора (ДЗ) ниобата лития: толщины и диэлектрической проницаемости, влияющих на величину деполяризирующего поля [2]. Также при формировании волноводов возможно появление в приповерхностном слое образцов дефектов, затрудняющих переключение поляризации.

Цель: проверить гипотезы увеличения деполяризирующего поля, связанные с наличием планарного $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волновода на подложке ниобата лития.

Распределение электрических полей в сегнетоэлектрике. Макроскопическое локальное электрическое поле в объеме сегнетоэлектрика \vec{E} определяется как сумма следующих полей: $\vec{E} = \vec{E}_{ex} + \vec{E}_b + \vec{E}_{dep} + \vec{E}_{scr}$,

где \vec{E}_{ex} - внешнее электрическое поле. Деполяризирующее поле \vec{E}_{dep} противоположно направлено полям \vec{E}_{ex} , \vec{E}_b , \vec{E}_{scr} и обусловлено наличием спонтанной поляризации P_s у сегнетоэлектрика:

$$E_{deps} = \frac{P_s}{\epsilon_0(\epsilon - 1)}. \quad (1)$$

Внешнее экранирование (\vec{E}_{scr}) происходит за счет перераспределения зарядов во внешней среде. Происхождение поля объемного экранирования (\vec{E}_b) обусловлено как дефектностью кристалла (переориентация дефектных комплексов), так и формированием объемных зарядов [2].

Влияние характеристик диэлектрического зазора (ДЗ) на деполяризирующее

поле. Для того, чтобы учесть наличие ДЗ при распределении полей в ниобате лития рассмотрим короткозамкнутый диэлектрический конденсатор, находящийся в монодоменном состоянии (рис. 1).

Введя в рассмотрение остаточное деполяризующее поле $E_{rd} = E_{dep} - E_{scr}$, пользуясь условием короткозамкнутости сегнетоэлектрического конденсатора $2EL + E_{rd}(d - 2L) = 0$ и условием на границе сегнетоэлектрик-ДЗ $\varepsilon E_{rd} - \varepsilon_L E = P_s / \varepsilon_0$, а также опираясь на выражение (1) при условии $L \ll d$, получаем:

$$E_{rd} \approx \frac{2L\varepsilon E_{dep}}{\varepsilon_L d},$$

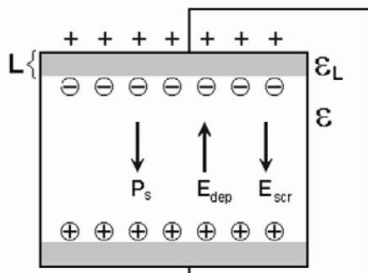


Рис. 1. Короткозамкнутый сегнетоэлектрический конденсатор с ДЗ (L – толщина ДЗ; ε , ε_L – диэлектрические проницаемости ниобата лития и ДЗ) [2]

откуда следует, что остаточное деполяризующее поле E_{rd} зависит от отношения L / ε_L , т.е. от диэлектрической проницаемости и толщины ДЗ. Для ниобата лития $L \approx 100$ нм, $\varepsilon \approx \varepsilon_L$ [2].

Расчет диэлектрической проницаемости ДЗ. Рассмотрим планарный $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волновод на подложке ниобата лития (Рис. 2).

Расположение ДЗ в волноводе подтверждается в [3], откуда также следует, что толщина диэлектрического зазора составляет $L_1 = 250$ нм. Для ДЗ, находящегося в ниобате

лития, $L_2 = 100$ нм, $\varepsilon_{L2} \approx \varepsilon_{HL}$ [2].

Для расчета диэлектрической проницаемости ДЗ рассмотрим следующие случаи (при этом считаем, что $d_B > L_1$, $\varepsilon_{L2} = \varepsilon_{HL}$):

1) $\varepsilon_{HL} = \varepsilon_B \neq \varepsilon_{L1}$. В этом случае диэлектрические проницаемости образца

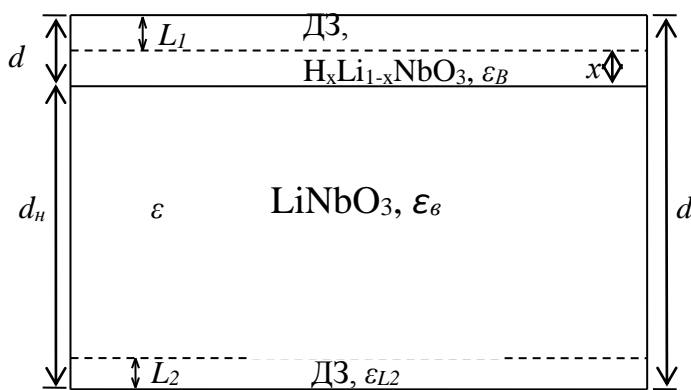


Рис. 2. Ниобат лития с планарным волноводом (ε , ε_{HL} , ε_B , ε_L – диэлектрические проницаемости представленного образца, ниобата лития, волновода и ДЗ)

(ε) и ДЗ (ε_{L1}) могут быть представлены в виде:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{L1}L_1}{d} + \frac{\varepsilon_{HL}(d - L_1)}{d},$$

$$\varepsilon_{L1} = \frac{d}{L_1}(\varepsilon - \varepsilon_{HL}) + \varepsilon_{HL}. \quad (2)$$

2) $\varepsilon_{HL} \neq \varepsilon_B = \varepsilon_{L1}$:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{L1}d_B}{d} + \frac{\varepsilon_{HL}(d - d_B)}{d};$$

$$\varepsilon_{L1} = \frac{d}{d_B}(\varepsilon - \varepsilon_{HL}) + \varepsilon_{HL}.$$

Исследуемые образцы. В ходе исследования использовались пластины конгруэнтного ниобата лития (Z-срез), имеющие размеры 15×10×0,5 мм. Характеристики образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры исследуемых образцов (ПО – протонный обмен)

№	Сторона Z+	Сторона Z-	Режим ПО	Режим отжига после ПО	Фазовый состав
Z-12	$H_xLi_{1-x}NbO_3$	$LiNbO_3$	190 °С, 2 часа	354 °С, 12 часов	α -фаза
Z-42	$H_xLi_{1-x}NbO_3$	$LiNbO_3$	190 °С, 2 часа	354 °С, 16 часов	α -фаза

Измерение электрической емкости плоского конденсатора. Были изготовлены конденсаторы, диэлектриком которых выступают исследуемые образцы, при этом в качестве обкладок использовались медные электроды, нанесенные методом катодного напыления.

Для плоского конденсатора справедливо выражение: $C = \epsilon\epsilon_0 S/d$, следовательно, измерив электрическую емкость C и воспользовавшись приведенной формулой можем найти ϵ .

Метод Лауэ. Методом Лауэ при помощи полученных рентгеновских пленок возможно обнаружить дефекты, обусловленные наличием $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волновода, путем сравнения с исходным ниобатом лития.

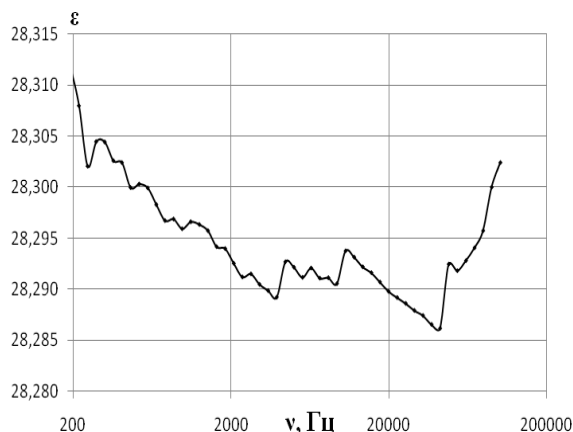


Рис. 3. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости для образца Z-12 (Z-срез, использовались напыленные медные электроды)

Была получена частотная зависимость диэлектрической проницаемости для образца Z-12 (Рис. 3).

Подобные измерения не удалось провести для образцов Z-β и Z-42 из-за излома образцов, случившегося при пайке подводящих проводов к электродам.

Оценим величину $L\epsilon/\epsilon_L$ для ниобата лития неизменного и модифицированного $H_xLi_{1-x}NbO_3$ планарным волноводом (Z-12, $\epsilon_{НЛ} = \epsilon_B \neq \epsilon_{L1}$). Для этого примем

параметры, имеющие место при экспериментальном исследовании: $\nu=10^5$ Гц, $t=24$ °С, для которых $\epsilon=28,3$, $\epsilon_{НЛ} \approx 28$ [4]. Учитывая [2], для ниобата лития получаем: $L\epsilon/\epsilon_L = 100 \text{ нм} \cdot 23/23 = 100 \text{ нм}$, для образца Z-12, пользуясь (2) получаем ($L_1 = 250 \text{ нм}$ [3]):

$$\varepsilon_{L1} = \frac{d}{L_1} (\varepsilon - \varepsilon_{НЛ}) + \varepsilon_{НЛ} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \text{ нм}}{2,5 \cdot 10^2 \text{ нм}} (28,3 - 28) + 28 = 628$$

т.е. диэлектрическая проницаемость ДЗ на порядок больше наиболее разумного значения для этой величины.

Для получения достоверного значения величины ε_{L1} необходимо измерить электрическую емкость и рассчитать диэлектрическую проницаемость конгруэнтного ниобата лития, т.к. в [4] приведены значения диэлектрической проницаемости стехиометрического ниобата лития. Отклонение от стехиометрии может давать значительные отклонения в диэлектрические характеристики кристалла.

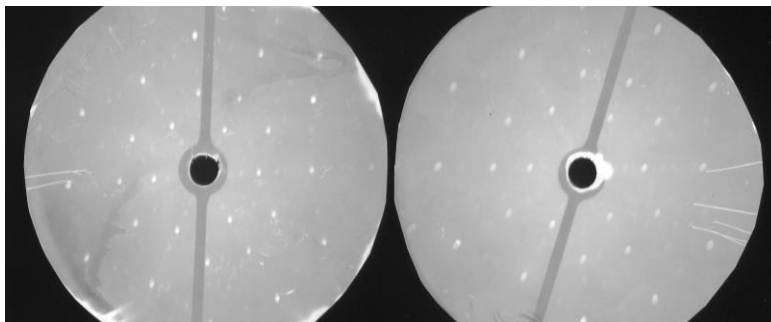


Рис. 4. Эпиграммы для образца Z-12, а) Z^+ -сторона ($H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волновод) б) Z^- -сторона (ниобат лития)

Методом Лауэ были получены эпиграммы для образца Z-12 (Рис. 4) и Z-42. Видно, что дифракционные картины для ниобата лития и $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волновода являются подобными.

Список литературы

1. Спирин М. В., Смирнова А. Н., Ахматханов А. Р. Влияние фазового состава протонообменных слоев в ниобате лития на кинетику доменной структуры // Физика для Пермского края. 2013. Вып. 6. С. 63–66.
2. Шур В. Я., Румянцев Е. Л. Исследование кинетики субмикронных и нано-доменных структур в сегнетоэлектрических монокристаллах при внешних воздействиях. // Учебное пособие. 2007. 105 с.
3. Smirnova A. N., Mushinskiy S. S., Baturin I. S., Azanova I. S., Shevtsov D. I., Akhmathanov A. R., Ievlev A. V., Shur V. Ya. Electric field poling of lithium niobate crystals after proton-exchanged channel waveguide fabrication // Ferroelectrics. 2012, V. 441. P. 9–16.
4. Кузьминов Ю. С. Кузьминов Ю. С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. 1987. 264 с.