

УДК 537.9  
PACS 66.10.Cb

## О влиянии технологической маски на ионный пограничный слой в расплаве бензойной кислоты при создании канальных волноводов

М. И. Петухов<sup>†</sup>, Д. А. Дудин

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>†</sup>geniusmaxp@yandex.ru

Работа посвящена теоретическому исследованию влияния технологической маски, закрывающей часть поверхности кристалла ниобата лития, на формируемый вблизи него ионный пограничный слой в расплаве бензойной кислоты. В ходе протонного обмена со стороны чистой поверхности кристалла в расплав поступают ионы лития и бензоат-ионы. Их диффузия, электромиграция и рекомбинация описываются при помощи уравнений переноса. Электрическое поле, генерируемое за счет разности концентраций ионов, определялось при помощи уравнения электростатики. Как показали расчеты, наличие маски частично ограничивает направление переноса ионов в расплаве. А именно, непроницаемая маска с относительно большой толщиной не дает ионам активно распространяться в продольном к кристаллу направлении. Значительная часть ионов рекомбинирует внутри выемки, формируемой стенками маски и поверхностью кристалла. Лишь незначительная часть ионов успевает покинуть данную область до своей рекомбинации. В этом случае распределения концентрации с хорошей степенью точности являются однородными вдоль поверхности пластины ниобата лития. Помимо этого, активное распространение ионов вглубь расплава предотвращает генерируемое вблизи кристалла электрическое поле. Уменьшение толщины маски приводит к тому, что часть ионов при движении от кристалла успевает выйти из области, ограниченной стенками маски. Из-за этого распределения концентрации принимают более сложную форму. В частности, по мере уменьшения размеров маски в распределении бензоат-ионов все сильнее проявляется разреженная область в центре выемки.

**Ключевые слова:** протонный обмен; пограничный слой; численное моделирование

Поступила в редакцию 20.02.2026; после рецензии 06.03.2026; принята к опубликованию 10.03.2026

## On the influence of a technological mask on the ionic boundary layer in molten benzoic acid in channel waveguides production

M. I. Petukhov, D. A. Dudin

Perm State University, Perm, Russia

<sup>†</sup>geniusmaxp@yandex.ru

This work is devoted to a theoretical study of the influence that a technological mask covering a portion of the surface of a lithium niobate crystal has on the ion boundary layer formed near it in a benzoic acid melt. During proton exchange, lithium ions and benzoate ions enter the melt from the clean surface of the crystal. Their diffusion, electromigration, and recombination are described using transport equations. The electric field generated by the difference in ion concentrations was deter-

mined using the electrostatic equation. Calculations have shown that the presence of the mask partially limits the direction of ion transport in the melt. Specifically, an impermeable mask with a relatively large thickness prevents ions from actively propagating longitudinally to the crystal. A significant part of the ions recombine within the cavity formed by the mask walls and the crystal surface. Only a small part of the ions manage to leave this region before recombination. In this case, the concentration distributions are uniform, with a good degree of accuracy, along the surface of the lithium niobate plate. Furthermore, the active propagation of ions into the melt is prevented by the electric field generated near the crystal. Reducing the mask thickness results in some of the ions, as they move away from the crystal, escaping the region bounded by the mask walls. This results in concentration distributions taking a more complex shape. Specifically, as the mask size decreases, the sparse region in the center of the cavity becomes increasingly visible in the benzoate ion distribution.

**Keywords:** proton exchange; boundary layer; numerical simulation

*Received 20 February 2026; revised 06 March 2026; accepted 10 March 2026*

doi: 10.17072/1994-3598-2026-1-52-59

## 1. Введение

Технология протонного обмена, используемая для создания оптических волноводов, имеет большое количество модификаций [1,2]. В качестве пластины, на базе которой может быть изготовлен волновод, выступают различные кристаллы, в частности, ниобат или танталат лития. Особенности той или иной технологии создания волноводов проявляются уже на этапе подготовки кристалла. К примеру, перед протонированием кристаллы могут быть обработаны плазмой [3] или отполированы [4].

Из-за сложного строения кристаллической решетки приходится учитывать, какая именно сторона кристалла будет протонироваться. Как показывают эксперименты, различия между обогащенными водородом  $X$  и  $Z$ -срезами или между  $+Z$  и  $-Z$ -срезами кристалла проявляются при анализе свойств конечного продукта [5, 6].

Основной этап технологии – это выдерживание кристалла в расплаве кислоты. Одной из наиболее часто используемых является бензойная кислота [7]. В зависимости от того, какими характеристиками должен обладать волновод, меняется время выдержки, температура расплава, концентрация дополнительных примесей в расплаве или кристалле и пр. [8, 9].

Помимо этого, важным аспектом является тип формируемого на поверхности кристалла волновода. В случае, если требуется создание планарного волновода, в расплав погружают кристалл с полностью очищенной поверхностью. Если же требуется изготовление канального волновода, у которого, в отличие от планарного, профиль показателя преломления изменяется только в выделенной приповерхностной области пластины, то перед погружением в расплав на часть поверхности кристалла наносят технологическую маску [10]. Данная маска блокирует физико-химическое взаимодействие кристалла и расплава, вследствие чего протониру-

ется только та часть кристалла, которая не закрыта маской.

Зачастую после выдержки в расплаве образец подвергается отжигу, параметры которого также позволяют регулировать свойства конечного волновода [11].

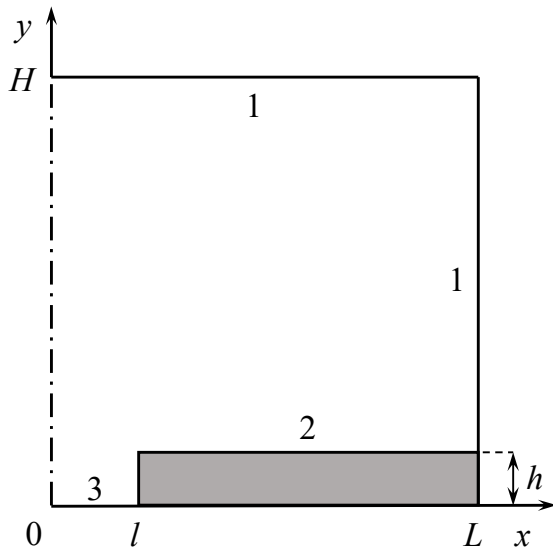
Особенности, проявляющиеся во время протонирования в тех или иных условиях, изучаются не только экспериментально, но и теоретически. Математическая модель, описывающая диффузию протонов в кристалле, была предложена в работе [12]. Затем, применительно к более реальной постановке, в ней была учтена анизотропия кристалла [13]. В работе [14] проанализирована роль нелинейных слагаемых в уравнении переноса, учет которых позволяет получить профили показателя преломления, по форме близкие к ступенчатым, получаемым на производстве.

Помимо диффузии протонов в кристалле, теоретические исследования проводятся и в отношении поведения продуктов реакции протонирования в расплаве во время технологического процесса. Диссоциативная адсорбция молекул бензойной кислоты приводит к тому, что со стороны поверхности кристалла в расплав попадают ионы лития и бензоат-ионы [15, 16]. Как показывают расчеты, данные ионы образуют вблизи межфазной поверхности пограничный слой, равномерно распределенный вдоль поверхности кристалла в случае, когда поверхность кристалла является однородной.

Очевидно, что при создании канального волновода поток ионов со стороны кристалла в расплав будет сильно локализован, из-за чего ионный пограничный слой будет претерпевать существенные изменения. Целью настоящей работы является изучение поведения продуктов реакции протонного обмена, попадающих в расплав со стороны кристалла. Осложняющим фактором транспорта ионов будет нанесенная на участок поверхности кристалла непроницаемая маска. Таким образом, в отличие от предыдущих работ [15, 16], ионы распространяются в области со сложной геометрией.

## 2. Математическая постановка

Рассмотрим расплав бензойной кислоты, находящийся в реакторе протонного обмена и взаимодействующий с кристаллом ниобата лития (рис. 1).



**Рис. 1.** Геометрия задачи и система координат. Штрих-пунктирная линия – ось симметрии, серая область – технологическая маска. 1 – стенки реактора, 2 – поверхность маски, 3 – поверхность кристалла

В двумерной осесимметричной постановке поверхность кристалла частично закрыта технологической маской, из-за чего протонируется только небольшой участок поверхности с размером  $l = 2.5$  мкм, расположенный вблизи начала координат. Соответственно,  $h$  – толщина технологической маски, нанесенной на кристалл, которая варьировалась в ходе расчетов. Размеры расчетной области определялись параметром  $L = H = 12.5$  мкм.

Поведение положительных ионов лития и отрицательных бензоат-ионов описывается следующей системой уравнений [15,16]:

$$\frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} = D_{\pm} \Delta n_{\pm} \mp k_{\pm} \nabla (n_{\pm} \mathbf{E}) - k_R n_+ n_-, \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(\varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}) = e(n_+ - n_-), \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}$ ,  $\varphi$ ,  $n_{\pm}$  – поля напряженности электрического поля, электрического потенциала, и концентрации положительных и отрицательных ионов. Параметры  $e$ ,  $\varepsilon_0$ , и  $\varepsilon$  обозначают заряд электрона, электрическую постоянную и диэлектрическую проницаемость. Величины  $D_{\pm}$  и  $k_{\pm}$  определяют значения коэффициентов диффузии и подвижности соответствующих ионов, а  $k_R$  – коэффициент рекомбинации ионов:

$$k_R = \frac{e(k_+ + k_-)}{\varepsilon \varepsilon_0}.$$

Граничные условия на стенках реактора и на фотолитографической маске задавались по анало-

гии с [15]. Границы 1 и 2 должны быть непроницаемыми для ионов. С модельной точки зрения это означает, что на данных границах достаточно обратиться в ноль нормальные компоненты градиентов концентраций и электрического потенциала. Важно отметить, что в рамках такого подхода на указанных границах будет иметь место касательная компонента электрического поля, оказывающая влияние на распределения ионов. Условия на границах 1 и 2 выражаются следующим образом:

$$\left. \frac{\partial n_{\pm}}{\partial n} \right|_{1,2} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{1,2} = 0. \quad (3)$$

Со стороны межфазной поверхности 3 в расплав попадают ионы, плотность потока  $J$  которых определяет производные концентраций на границе:

$$\left. \frac{\partial n_{\pm}}{\partial y} \right|_3 = -\frac{J}{D_{\pm}}. \quad (4)$$

Относительно данной поверхности также определяется электрический потенциал:

$$\varphi|_3 = 0. \quad (5)$$

На оси симметрии производные также обращались в ноль:

$$\left. \frac{\partial n_{\pm}}{\partial n} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{x=0} = 0. \quad (6)$$

Задача решалась в безразмерных переменных. За единицу измерения расстояния, времени, концентрации и электрического потенциала были выбраны  $l$ ,  $l^2/D_+$ ,  $Jl/D_+$  и  $eJl^3/\varepsilon \varepsilon_0 D_+$ , соответственно.

После процедуры обезразмеривания система уравнений (1)–(2) и граничные условия (3)–(5) принимают следующий вид:

$$\frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} = A_{\pm} \left( \frac{\partial^2 n_{\pm}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_{\pm}}{\partial y^2} \right) \pm B_{\pm} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( n_{\pm} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( n_{\pm} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \right) - C n_+ n_- \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = n_- - n_+, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial n_{\pm}}{\partial n} \right|_{1,2,x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{1,2,x=0} = 0. \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial n_{\pm}}{\partial y} \right|_3 = -\frac{1}{A_{\pm}}. \quad (10)$$

$$\varphi|_3 = 0, \quad (11)$$

$$A_{\pm} = \frac{D_{\pm}}{D_+}, \quad B_{\pm} = \frac{k_{\pm} e J l^3}{D_+^2 \varepsilon \varepsilon_0}, \quad C = \frac{k_R J l^3}{D_+^2}.$$

Полученный в уравнении (7) набор безразмерных управляющих параметров  $A_{\pm}$ ,  $B_{\pm}$  и  $C$  характеризует, соответственно, безразмерные коэффициенты диффузии, подвижности и рекомбинации.

### 3. Метод решения

Краевая задача (7)–(11) решалась численно при помощи явной конечно-разностной схемы, реализованной на языке программирования C++. Уравнение Пуассона (8) решалось при помощи метода последовательной верхней релаксации [17].

В работе [18] показано, что молекулы бензойной кислоты и метанола обладают похожими значениями дипольного момента. Это позволяет оценить диэлектрическую проницаемость бензойной кислоты для температуры, близкой к протонному обмену  $T = 500$  К, как  $\epsilon = 10$ . Значения кинетических коэффициентов оцениваются через вязкость расплава и размеры ионов в [15]:  $k_+ = 1.5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с·В,  $k_- = 2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с·В,  $D_+ = 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,  $D_- = 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Величина плотности потока ионов со стороны кристалла определяется, исходя из времени протонного обмена и толщины обогащенного ионами водорода слоя кристалла [15]:  $J = 10^{18}$  с<sup>-1</sup>м<sup>-2</sup>. Таким образом, безразмерные параметры задачи принимали следующие значения:  $A_+ = 1$ ,  $A_- = 0.1$ ,  $B_+ = 42.37$ ,  $B_- = 5.650$ ,  $C = 48.02$ . Характерное значение толщины технологической маски составляет 300 нм [19,20]. В настоящей работе величина  $h$  варьировалась в интервале от 0 до 3 мкм. Начальными условиями служили нулевые поля концентраций и электрического потенциала.

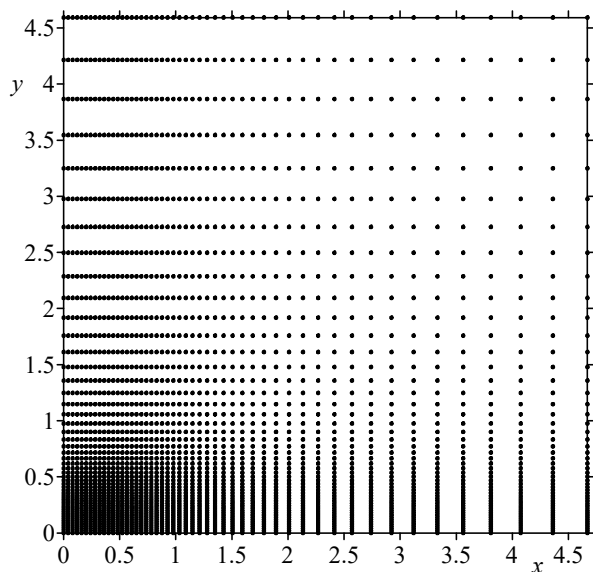


Рис. 2. Пример распределения вычислительных узлов для случая  $N = 51$

По аналогии с численной схемой, представленной в работе [16], в настоящей программной реализации производилось сгущение узлов вычислительной сетки вблизи межфазной границы 3. Процедура сгущения была реализована следующим образом. После задания размеров расчётной области  $L$  производилось формирование равномерной сетки, узлы которой располагались в точках с координатами  $x_i, y_j$ . Далее производилось вы-

числение переменного шага  $h_i$  и  $\bar{h}_j$  для неоднородной сетки:

$$h_i = a + bx_i^c,$$

$$\bar{h}_j = \bar{a} + \bar{b}y_j^{\bar{c}}.$$

При сгущении сетки вдоль осей  $x$  и  $y$  использовались различные требования к разложениям  $h_i$  и  $\bar{h}_j$ .

Сетка сгущалась в ортогональном к межфазной поверхности 3 направлении таким образом, чтобы на пограничный слой приходилось примерно 100 узлов. Для этого параметры  $a, b$  и  $c$  принимали значения 1.25,  $1.8 \cdot 10^{-5}$  и 8. Соответственно, при сгущении сетки в  $x$ -направлении параметры  $\bar{a}, \bar{b}$  и  $\bar{c}$  принимали такие значения, чтобы на выемку, формируемую стенками технологической маски, также приходилось 100 узлов: 5,  $1.7 \cdot 10^{-5}$  и 10.

В дополнение к этому, значения указанных параметров в разложениях выбирались таким образом, чтобы создать относительно равномерное разбиение расчетной области вблизи границы 3 (рис. 2). Число узлов вдоль каждого направления составляло  $N = 251$ . Сходимость реализованной разностной схемы анализировалась при помощи следующих интегральных характеристик:

$$I_{\pm} = \int_0^5 \int_0^5 n_{\pm} dx dy.$$

Результаты данного анализа изображены на рис. 3.

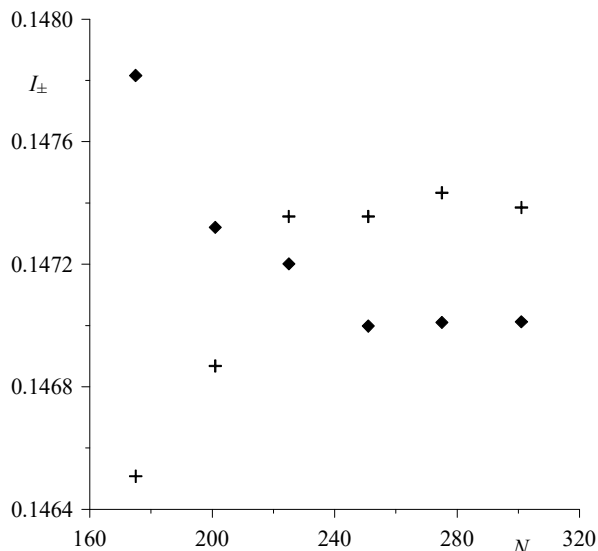
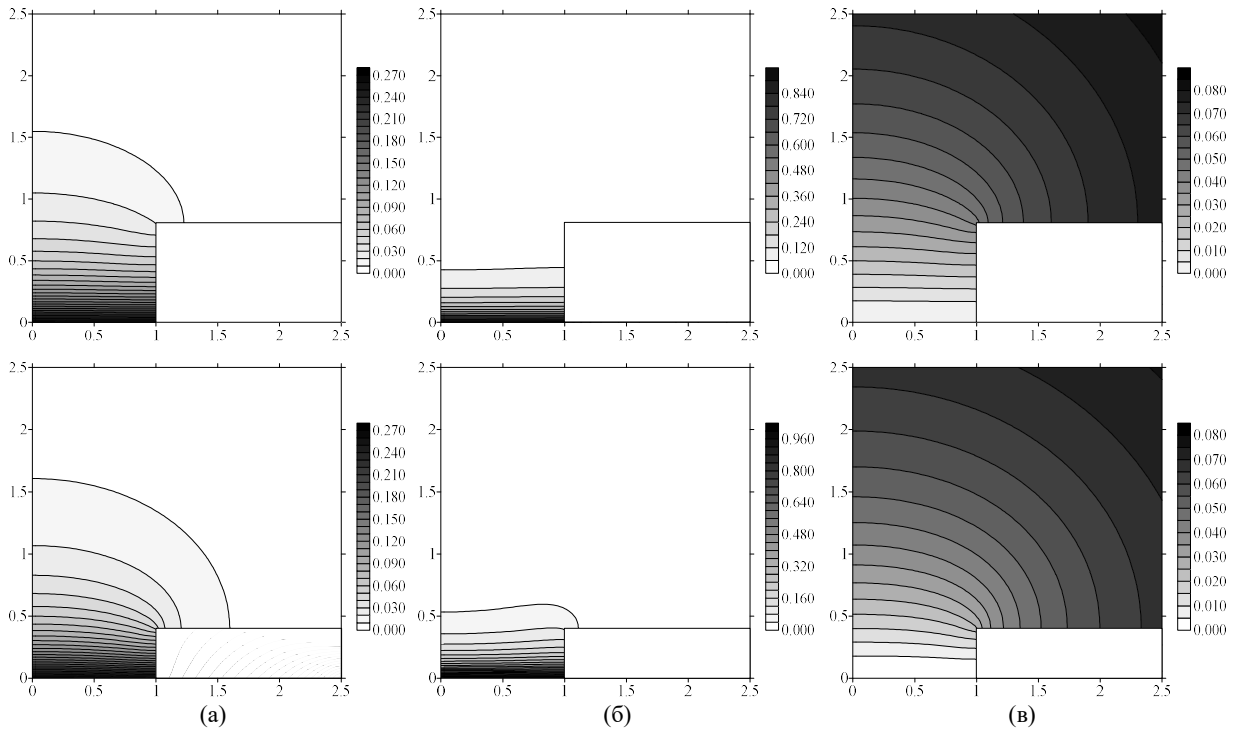


Рис. 3. Значения  $I_+$  (кресты) и  $I_-$  (ромбы) в зависимости от количества узлов

### 4. Результаты численного моделирования

Вне зависимости от значения толщины технологической маски в рассматриваемой системе формируются стационарные поля концентраций и электрического потенциала. Размерное время установления данных полей составляет  $\sim 0.05$  с.



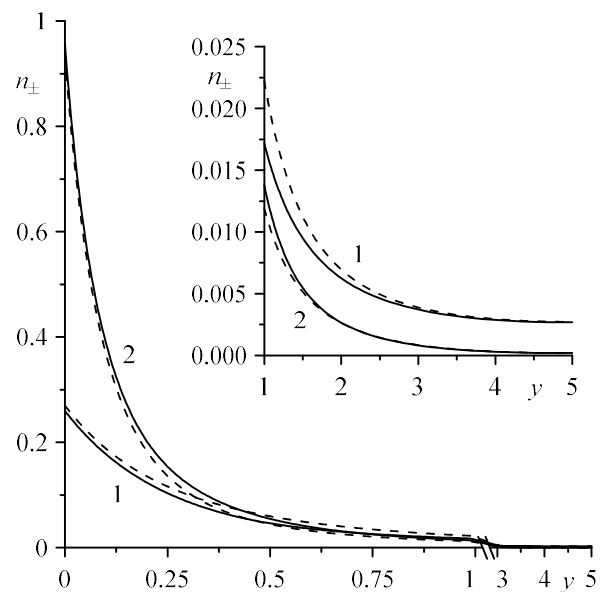
**Рис. 4.** Поля концентрации положительных (а) и отрицательных (б) ионов, а также электрического потенциала (в) при различных значениях толщины фотолитографической маски:  $h = 2$  мкм (верх) и  $h = 1$  мкм (низ)

Ионы, проникающие в расплав со стороны кристалла, стремятся заполнить всю расчётную область за счет диффузии, однако рекомбинация и сравнительно большие размеры расчётной области приводят к тому, что только малая часть ионов достигает стенок реактора. Различие в коэффициентах диффузии и подвижностях ионов приводит к тому, что в расплаве имеет место разность концентраций. Из-за этого в нём генерируется электрическое поле, направленное в сторону протонируемой поверхности и действующее на ионы. Данное поле вынуждает ионы лития мигрировать в сторону кристалла, а бензоат-ионы – вглубь расплава, что дополнительно интенсифицирует рекомбинацию и уменьшает размер области, занимаемой основной частью ионов [18]. Таким образом, вблизи межфазной границы формируется ионный пограничный слой.

Пример распределений концентраций и электрического потенциала для двух толщин фотолитографической маски представлен на рис. 4. В случае относительно большой величины  $h$  основная часть ионов не успевает отдалиться от кристалла на расстояние, большее, чем толщина маски, поэтому распределение концентраций внутри канавки с хорошей точностью является однородным вдоль поверхности кристалла.

Доля ионов, выходящих из области, ограниченной стенками маски, увеличивается с уменьшением  $h$ . Это приводит к тому, что диффузионный перенос ионов в области над маской становится более интенсивным. Так, ионы лития, обладающие существенно большим коэффициентом диффузии,

чем бензоат-ионы, начинают активно диффундировать не только вдоль оси  $y$ , но и вдоль поверхности маски, в направлении оси  $x$ . Распределение концентрации данных ионов теряет свою однородность вдоль оси  $x$  (рис. 4). Транспорт бензоат-ионов вдоль маски также интенсифицируется, однако менее выражен в сравнении с транспортом ионов лития.



**Рис. 5.** Сравнение профилей концентрации положительных (1) и отрицательных (2) ионов в двух точках:  $x = 0$  (штриховые линии) и  $x = 0.8$  (сплошные линии)

Несмотря на то, что после преодоления области, ограниченной стенками маски, у ионов появляется дополнительное пространство для диффузии, это практически никак не сказывается на толщине ионного пограничного слоя. Данная характеристика во всех расчётах составляет примерно 1 мкм.

Наличие касательных компонент электрического поля на поверхности маски приводит к тому, что бензоат-ионы начинают накапливаться вблизи её угла. Ионы лития, наоборот, стремятся отдалиться от данной области. Этот эффект проявляется по мере уменьшения  $h$  и прослеживается в полях концентраций (рис. 4). Тем не менее, нельзя сказать, что он значительным образом изменяет характеристики пограничного слоя.

Неоднородности, связанные с дополнительной миграцией ионов, можно проанализировать путём сравнения профилей концентраций, взятых в разных точках оси  $x$ . Из рис. 5 видно, что из-за миграции в сторону маски часть бензоат-ионов покидает центр канавки. Миграция ионов лития приводит к противоположному эффекту.

## 5. Заключение

Проведённые расчёты показывают, что наличие маски, нанесенной на поверхность кристалла ниобата лития, способно заметным образом оказывать влияние на распределение ионов лития и бензоат-ионов вблизи пластины в процессе её протонирования в расплаве бензойной кислоты. Несмотря на то, что ионы в расчётах отдалялись от кристалла на расстояние большее, чем толщина маски, это практически никак не изменяло характеристики ионного пограничного слоя.

Неоднородности, появляющиеся в распределениях концентраций ионов в продольном к кристаллу направлениях, связаны как с тем, что ионы способны выйти за пределы пространства, окружённого стенками маски, так и с продольными компонентами электрического поля, формируемыми на поверхности маски.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 121101300016-2.

## Список литературы

1. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы // М.: Мир, 1980. 656 с.
2. Kuneva M. Optical waveguides obtained via proton exchange technology in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  – a short review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2016. Vol. 2, № 3. P. 40–50.
3. Петухов И. В., Кичигин В. И., Мушинский С. С., Сидоров Д. И., Семенова О. Р. Влияние плазменной обработки поверхности кристаллов ниобата лития на процесс протонного обмена в расплавах бензойной кислоты // Вестник Пермского университета. Химия. 2019. Т. 9. Вып. 4. С. 371–379. DOI: 10.17072/2223-1838-2019-4-371-379
4. Sosunov A. V., Ponomarev R. S., Mushinsky S. S., Minkin A. M., Volyntsev A. B. Influence of lithium niobate sublayer structure to refractive index of optical waveguides // Ferroelectrics. 2016. Vol. 494. P. 131–137. DOI: 10.1080/00150193.2016.1142333
5. Nekvindova P., Spirkova J., Cervena J., Budnar M., Razpet A., Zorko B., Pelicon P. Annealed proton exchanged optical waveguides in lithium niobate: differences between the X- and Z-cuts // Optical Materials. 2002. Vol. 19. P. 245–253.
6. Mushinsky S. S., Kichigin V. I., Petukhov I. V., Minkin A. M., Skachkov A. P., Salgaeva U. O., Malinina L. N., Shevtsov D. I., Volyntsev A. B. Structure and properties of proton exchanged layers in +Z cut and –Z cut lithium niobate // Ferroelectrics. 2013. Vol. 443. P. 20–34. DOI: 10.1080/00150193.2013.773856
7. Jackel J. L., Rice C. E., Veselka J. J. Proton exchange for high-index waveguides in  $\text{LiNbO}_3$  // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41, № 7. P. 607–608. DOI: 10.1063/1.93615
8. Mushinsky S. S., Minkin A. M., Petukhov I. V., Kichigin V. I., Shevtsov D. I., Malinina L. N., Volyntsev A. B., Neradovskiy M. M., Shur V. Ya. Water effect on proton exchange of X-cut lithium niobate in the melt of benzoic acid // Ferroelectrics. 2015. Vol. 476. P. 84–93. DOI: 10.1080/00150193.2015.998530
9. Kichigin V. I., Petukhov I. V., Mushinsky S. S., Oborin V. A., Minkin A. M., Malinina L. N., Shevtsov D. I., Volyntsev A. B. Structure and properties of proton exchange waveguides on Z cut of lithium niobate crystal fabricated in molten benzoic acid with the addition of lithium benzoate // Int. Conf. and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. 2012. P. 238–241. DOI: 10.1109/EDM.2012.6310225
10. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications // Appl. Phys. Rev. 2015. Vol. 2, 040603. DOI: 10.1063/1.4931601
11. Dorrer L., Tichel P., Huger E., Heller R., Schmidt H. Hydrogen diffusion in proton-exchanged lithium niobate single crystals // Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 129, 135105. DOI: 10.1063/5.0047606
12. Vohra S. T., Mickelson A. R., Asher S. E., Diffusion characteristics and waveguiding properties of proton-exchanged and annealed  $\text{LiNbO}_3$  channel waveguides // Journal of Applied Physics. 1989. Vol. 66. P. 5161–5174. DOI: 10.1063/1.343751
13. Демин В. А., Петухов М. И., Пономарев Р. С., Топова А. В. О роли анизотропии и нелинейных

- диффузионных эффектов при формировании волноводов в кристалле ниобата лития // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. №1. С. 49–58. DOI: 10.17072/1994-3598-2021-1-49-58
14. Demin V. A., Petukhov M. I., Sosunov A. V., Volyntsev A. B. On the nature of transport phenomena during proton exchange technological process // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2025. Vol. 89. Suppl. 3. P. S358–S363. DOI: 10.1134/S1062873825714643
  15. Demin V. A., Petukhov M. I., Ponomarev R. S., Kuneva M. Dynamics of the proton exchange process in benzoic acid interacting with lithium niobate crystals // Langmuir. 2023. Vol. 39. P. 10855–10862. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c00957
  16. Demin V. A., Petukhov M. I. Diffusion and electromigration of ions – products of the proton exchange reaction in a benzoic acid melt // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2025. Vol. 18, № 1. P. 100–108.
  17. Роуч П. Вычислительная гидродинамика // М.: Мир, 1980. 616 с.
  18. Demin V. A., Petukhov M. I., Ponomarev R. S., Kuneva M. K. Effect of permittivity on the ionic boundary layer upon protonation of lithium niobate // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2023. Vol. 16, № 5. P. 611–619.
  19. Сосунов А. В., Пономарев Р. С., Журавлев А. А., Мушинский С. С., Кунева М. Подавление дрейфа рабочей точки интегрально-оптических схем на основе ниобата лития // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 2. С. 5–13. DOI: 10.17072/1994-3598-2021-2-05-13
  20. Пономарев Р. С. Структурная модель дрейфовых явлений в интегрально-оптических схемах на основе  $H_xLi_{1-x}NbO_3$  канальных волноводов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Пермь, 2014. 148 с.
  4. Sosunov A. V., Ponomarev R. S., Mushinsky S. S., Minkin A. M., Volyntsev A. B. Influence of lithium niobate sublayer structure to refractive index of optical waveguides. *Ferroelectrics*, 2016, vol. 494, pp. 131–137. DOI: 10.1080/00150193.2016.1142333
  5. Nekvindova P., Spirkova J., Cervena J., Budnar M., Razpet A., Zorko B., Pelicon P. Annealed proton exchanged optical waveguides in lithium niobate: differences between the X- and Z-cuts. *Optical Materials*, 2002, vol. 19, pp. 245–253.
  6. Mushinsky S. S., Kichigin V. I., Petukhov I. V., Minkin A. M., Skachkov A. P., Salgaeva U. O., Malinina L. N., Shevtsov D. I., Volyntsev A. B. Structure and properties of proton exchanged layers in +Z cut and –Z cut lithium niobate. *Ferroelectrics*, 2013, vol. 443, pp. 20–34. DOI: 10.1080/00150193.2013.773856
  7. Jackel J. L., Rice C. E., Veselka J. J. Proton exchange for high-index waveguides in  $LiNbO_3$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1982, vol. 41, no. 7, pp. 607–608. DOI: 10.1063/1.93615
  8. Mushinsky S. S., Minkin A. M., Petukhov I. V., Kichigin V. I., Shevtsov D. I., Malinina L. N., Volyntsev A. B., Neradovskiy M. M., Shur V. Ya. Water effect on proton exchange of X-cut lithium niobate in the melt of benzoic acid. *Ferroelectrics*, 2015, vol. 476, pp. 84–93. DOI: 10.1080/00150193.2015.998530
  9. Kichigin V. I., Petukhov I. V., Mushinsky S. S., Oborin V. A., Minkin A. M., Malinina L. N., Shevtsov D. I., Volyntsev A. B. Structure and properties of proton exchange waveguides on Z cut of lithium niobate crystal fabricated in molten benzoic acid with the addition of lithium benzoate. *Int. Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, 2012, pp. 238–241. DOI: 10.1109/EDM.2012.6310225
  10. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications. *Appl. Phys. Rev.*, 2015, vol. 2, 040603. DOI: 10.1063/1.4931601
  11. Dorrer L., Tüchel P., Huger E., Heller R., Schmidt H. Hydrogen diffusion in proton-exchanged lithium niobate single crystals. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, 135105. DOI: 10.1063/5.0047606
  12. Vohra S. T., Mickelson A. R., Asher S. E. Diffusion characteristics and waveguiding properties of proton-exchanged and annealed  $LiNbO_3$  channel waveguides. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, pp. 5161–5174. DOI: 10.1063/1.343751
  13. Demin V. A., Petukhov M. I., Ponomarev R. S., Topova A. V. On a role of anisotropy and nonlinear diffusive effects during the construction of waveguides in the lithium niobate. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 1, pp. 49–58.

## References

- DOI: 10.17072/1994-3598-2021-1-49-58 (In Russian)
14. Demin V. A., Petukhov M. I., Sosunov A. V., Volyntsev A. B. On the nature of transport phenomena during proton exchange technological process. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2025, vol. 89, suppl. 3, pp. S358–S363. DOI: 10.1134/S1062873825714643
  15. Demin V. A., Petukhov M. I., Ponomarev R. S., Kuneva M. Dynamics of the proton exchange process in benzoic acid interacting with lithium niobate crystals. *Langmuir*, 2023, vol. 39, pp. 10855–10862, DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c00957
  16. Demin V. A., Petukhov M. I. Diffusion and electromigration of ions – products of the proton exchange reaction in a benzoic acid melt. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2025, vol. 18, no. 1, pp. 100–108.
  17. Roache P. *Computational Fluid Dynamics*. Albuquerque: Hermosa Publ., 1976. 616 p.
  18. Demin V. A., Petukhov M. I., Ponomarev R. S., Kuneva M. K. Effect of permittivity on the ionic boundary layer upon protonation of lithium niobate. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2023, vol. 16, no. 5, pp. 611–619.
  19. Sosunov A. V., Ponomarev R. S., Zhuravlev A. A., Mushinsky S. S., Kuneva M. Reduction of drift of operating point in lithium niobate-based integrated optical circuit. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 2, pp. 5–13. DOI: 10.17072/1994-3598-2021-2-05-13
  20. Ponomarev R. S. *Strukturnaia model' drejfovykh iavlenii v integral'no-opticheskikh skhemakh na osnove  $H_xLi_{1-x}NbO_3$  kanal'nykh volnovodov* [Structural model of drift phenomena in integrated optical circuits based on  $H_xLi_{1-x}NbO_3$  channel waveguides]. Diss. of Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Perm: Perm State University, 2014, 148 p.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Петухов М. И., Дудин Д. А. О влиянии технологической маски на ионный пограничный слой в расплаве бензойной кислоты при создании канальных волноводов // Вестник Пермского университета. Физика. 2026. № 1. С. 52–59. doi: 10.17072/1994-3598-2026-1-52-59

**Please cite this article in English as:**

Petukhov M. I., Dudin D. A. On the influence of a technological mask on the ionic boundary layer in molten benzoic acid in channel waveguides production. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2026, no. 1, pp. 52–59. doi: 10.17072/1994-3598-2026-1-52-59

**Сведения об авторах**

1. Петухов Максим Иванович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
2. Дудин Денис Анатольевич, студент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068

**Author information**

1. Maxim I. Petukhov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
2. Denis A. Dudin, Student, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia