

## Технология создания фотонной интегральной схемы на подложке из ниобата лития

В.С. Соловьёв<sup>1</sup>, С.А. Дегтярев<sup>2,3</sup>, С.Н. Хонина<sup>2,3</sup>, С.П. Тимошенко<sup>1</sup>,  
А.С. Тимошенко<sup>1</sup>, Н.А. Расщепкина<sup>4</sup>, А.Е. Чалых<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1;

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт»,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

<sup>3</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

<sup>4</sup> Самарский государственный технический университет,  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244;

<sup>5</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,  
119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4

### Аннотация

Предложена новая технология изготовления фотонной интегральной схемы на подложке из ниобата лития. Показано, что необязательно легировать верхний слой ниобата лития для создания волноводной системы и управления излучением. Достаточно нанести на поверхность ниобата лития слой материала с большим, чем у ниобата лития показателем преломления. Таким образом, получается несимметричный волновод, излучение в котором в основном проникает в глубину ниобата лития. За счёт этого, проложив металлические электроды вдоль волноводного слоя, можно управлять скоростью распространения излучения в волноводе и, соответственно, создавать управляемые фотонные схемы, например амплитудный модулятор Маха–Цендера или фазовый модулятор. Экспериментально была создана и исследована технология напыления слоя двуокиси титана на поверхность ниобата лития. Также была отполирована торцевая сторона пластины ниобата лития и показано, что после финишной полировки излучение выходит с торцевого конца пластины. Это позволит создавать фотонные интегральные схемы с линейкой близкорасположенных волноводов, из которых излучение может быть выведено в пространство и попадать в объектив фото- или видеокамеры для дальнейшей обработки.

**Ключевые слова:** фотонная интегральная схема, планарный волновод, ниобат лития, диоксид титана, полировка тонкого среза.

**Цитирование:** Соловьёв, В.С. Технология создания фотонной интегральной схемы на подложке из ниобата лития / В.С. Соловьёв, С.А. Дегтярев, С.Н. Хонина, С.П. Тимошенко, А.С. Тимошенко, Н.А. Расщепкина, А.Е. Чалых // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 5. – С. 733-740. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1599.

**Citation:** Solovyov VS, Degtyarev SA, Khonina SN, Timoshenkov SP, Timoshenkov AS, Rascshepkina NA, Chalykh AE. Technology for creating a photonic integrated circuit on a lithium niobate substrate. Computer Optics 2025; 49(5): 733-740. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1599.

### Введение

В настоящее время фотонные технологии всё шире внедряются в области передачи и обработки информации. Актуальной является миниатюризация составляющих элементов фотонных устройств. Одними из основных элементов фотонной индустрии являются фазовые и амплитудные модуляторы излучения. Наиболее распространённым материалом для создания этих элементов является ниобат лития –  $\text{LiNbO}_3$ . Технология создания модуляторов на этом материале в основном строится на создании объёмных волноводов с помощью протонного – ионного обмена, а также методом диффузии титана в  $\text{LiNbO}_3$  для легирования материала и создания области с повышенным по-

казателем преломления [1 – 15]. Именно эта область с повышенным показателем преломления является волноводом, по которому распространяется излучение. В данной работе предлагается новый метод изготовления фотонных элементов для управления излучением, который был упомянут в [16]. Новый метод основан на том, что создаются поверхностные волноводы без легирования ниобата лития. По приведённым в этой работе расчётам, при распространении излучения по поверхностному волноводу оно проникает вглубь волновода, и поэтому возникает возможность управлять скоростью распространения излучения в волноводе, изменяя показатель преломления ниобата лития с помощью продольных электродов. Принципиально этот метод лучше в том плане, что любое ле-

гирование материала вносит потери, которые при больших мощностях излучения могут привести к деградации материала [17–23]. Нами была освоена технология нанесения и травления двуокиси титана –  $\text{TiO}_2$  – на подложки из ниобата лития, ввод излучения с помощью призмы в поверхностный слой двуокиси титана, вывод излучения с торца подложки. В данной работе подробно рассмотрен аспект вывода излучения с торца подложки ниобата лития. Сложность данного вопроса возникает из-за необходимости тщательной полировки торца подложки на специальном оборудовании.

### 1. Расчёт распространения ТЕ-моды по поверхностному несимметричному волноводу

Проведём теоретическое исследование модового состава излучения, распространяющегося в волноводе. Схема планарного волновода изображена на рис. 1. Мода распространяется вдоль оси  $z$ . Ширина волновода вдоль оси  $y$  обозначена на рис. 1 буквой  $W$  и стремится к бесконечности. Заданы следующие параметры: показатель преломления волноводного слоя  $n_1 = 2,6$ , показатель преломления подложки  $n_3 = 2,3$ , показатель преломления воздуха  $n_2 = 1$ , длина волны  $\lambda = 532$  нм, толщина волновода  $2a = 150$  нм.

$$n(x) = \begin{cases} n_2, & x \geq 0, \\ n_1, & -2a < x < 0, \\ n_3, & x < -2a. \end{cases} \quad (1)$$

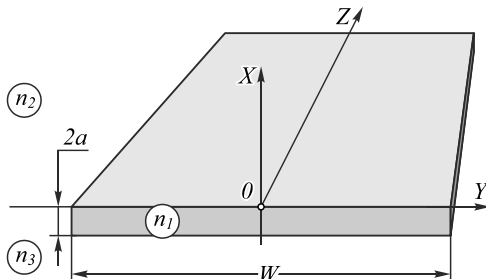


Рис. 1. Планарный волновод: схематическое изображение

Компонента электрического вектора ТЕ-волны будет удовлетворять следующему волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (\omega^2 \epsilon \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2) E_y = 0, \quad (2)$$

где  $\beta$  – константа распространения вдоль оси  $z$ ,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала волновода,  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – диэлектрическая и магнитная постоянные.

Решение данного уравнения представляется в виде:

$$E_y = E_{y0} \exp(ik_x x). \quad (3)$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} k_1^2 &= k^2 n_1^2 - \beta^2, \\ \gamma_2^2 &= \beta^2 - k^2 n_2^2, \\ \gamma_3^2 &= \beta^2 - k^2 n_3^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив (4) в формулу (2) и затем полученное выражение в (3), получим решения в каждой из областей в следующем виде:

$$E_y = \begin{cases} A \exp(-\gamma_2 x), & x \geq 0, \\ B \exp(ik_1 x) + C \exp(-ik_1 x), & -2a < x < 0, \\ D \exp(\gamma_3 x), & x \leq -2a. \end{cases} \quad (5)$$

При этом должны выполняться граничные условия:

$$\begin{aligned} E_{y1}|_{x=0} &= E_{y2}|_{x=0}, & \frac{\partial E_{y1}}{\partial x}|_{x=0} &= \frac{\partial E_{y2}}{\partial x}|_{x=0}, \\ E_{y2}|_{x=-2a} &= E_{y3}|_{x=-2a}, & \frac{\partial E_{y2}}{\partial x}|_{x=-2a} &= \frac{\partial E_{y3}}{\partial x}|_{x=-2a}, \end{aligned} \quad (6)$$

из которых следует дисперсионное уравнение:

$$2k_1 a = \arctg \frac{\gamma_2}{k_1} + \arctg \frac{\gamma_3}{k_1} + \pi v, \quad (7)$$

где  $v$  – порядок моды.

Решение дисперсионного уравнения даёт точное значение константы распространения  $\beta$ , которое зависит от параметров волновода и длины волны излучения.

Для заданных параметров волновода было решено дисперсионное уравнение и найдено значение  $\beta = 0,0283846$ . Других решений нет. Рассматриваемый волновод является одномодовым. Все параметры решения для напряжённости электрического поля  $E_y$  могут быть выражены через значение  $\beta$ :

$$\begin{aligned} B &= \frac{A}{2} \left( 1 - \frac{\gamma_2}{ik_1} \right), \\ C &= \frac{A}{2} \left( 1 + \frac{\gamma_2}{ik_1} \right), \\ D &= \exp(2a\gamma_3) (B \exp(-2iak_1) + C \exp(2iak_1)). \end{aligned} \quad (8)$$

При этом  $A$  может быть произвольной константой.

При  $A = 1$  ТЕ-мода (5) показана на рис. 2, где также приведен график мод, рассчитанных численно с помощью программного пакета Comsol Multiphysics.

Найдём распределение удельной мощности по трём слоям волновода.

Уточним, что под удельной мощностью  $I$  мы понимаем интеграл вдоль оси  $x$  от усредненной по времени  $z$ -компоненты вектора Пойнтинга  $\langle S \rangle_z$ :

$$\begin{aligned} I &= \int_{-\infty}^{+\infty} \langle S \rangle_z dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} (E_x H_y - H_x E_y) dx, \\ I_{TE} &= \frac{\beta}{2\omega\mu_0} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y^2 dx, \\ I_{TM} &= \frac{\beta}{2\omega n(x)^2 \epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} H_y^2 dx, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $n(x)$  – показатель преломления, который, вообще говоря, зависит от координаты  $x$ ,  $I_{TE}$  – удельная

мощность  $TE$ -моды,  $I_{TM}$  – удельная мощность  $TM$ -моды. Отметим, что в данном случае удельная мощность – это мощность излучения, распространяющаяся в отмеренном вдоль оси  $y$  одном метре планарного волновода. Единицей измерения удельной мощности тогда будет Вт/м.

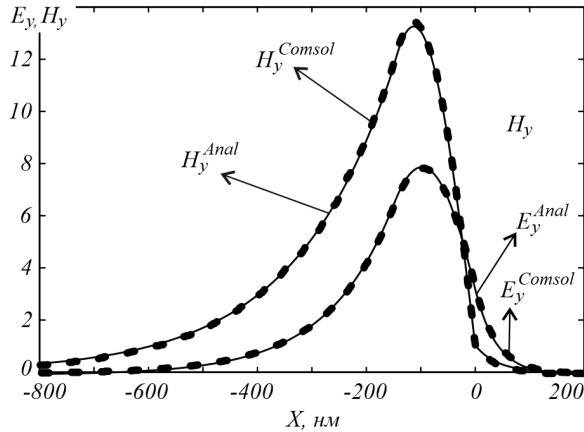


Рис. 2. Распределения вдоль оси  $X$  модуля  $y$ -компоненты напряжённости электрического поля нулевой  $TE$ -моды, рассчитанной на основе решения дисперсионного уравнения (7) (сплошная тонкая линия  $E_y^{Anal}$ ), а также с помощью ПО Comsol Multiphysics (жирная пунктирная линия  $E_y^{Cmsol}$ ); и модуля  $y$ -компоненты напряжённости магнитного поля  $TM$ -моды, рассчитанной на основе решения дисперсионного уравнения (14) (сплошная тонкая линия  $H_y^{Anal}$ ), а также с помощью ПО Comsol Multiphysics (жирная пунктирная линия  $H_y^{Cmsol}$ )

В каждом из слоёв  $TE$ -поляризованная электромагнитная волна имеет свою удельную мощность:

$$I_2 = \frac{1}{2} \frac{\beta}{\omega \mu_0} \int_0^{+\infty} E_y^2 dx, \quad I_1 = \frac{1}{2} \frac{\beta}{\omega \mu_0} \int_{-2a}^0 E_y^2 dx, \quad (10)$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \frac{\beta}{\omega \mu_0} \int_{-\infty}^{-2a} E_y^2 dx.$$

Таким образом, можно найти доли энергий, распространяющихся во всех трёх слоях:

$$\Gamma_1 = \frac{I_1}{I} = 0,72, \quad \Gamma_2 = \frac{I_2}{I} = 0,02, \quad \Gamma_3 = \frac{I_3}{I} = 0,26. \quad (11)$$

Таким образом, 72 % энергии распространяется внутри напылённого слоя, 26 % распространяется в подложке, 2 % распространяется вместе с затухающей волной в воздухе над волноводом.

## 2. Расчёт распространения $TM$ -моды по поверхностному несимметричному волноводу

Ниже приведены рассуждения, позволяющие получить  $TM$ -поляризованную моду волновода.

Составляющая напряжённости магнитного поля в каждой из областей волновода запишется в следующем виде:

$$H_y = \begin{cases} A \exp(-\gamma_2 x), & x \geq 0, \\ B \exp(ik_1 x) + C \exp(-ik_1 x), & -2a < x < 0, \\ D \exp(\gamma_3 x), & x \leq -2a. \end{cases} \quad (12)$$

При этом должны выполняться граничные условия:

$$H_{y1}|_{x=0} = H_{y2}|_{x=0}, \quad \frac{1}{n_1^2} \frac{\partial H_{y1}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{1}{n_2^2} \frac{\partial H_{y2}}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (13)$$

$$H_{y2}|_{x=-2a} = H_{y3}|_{x=-2a}, \quad \frac{1}{n_2^2} \frac{\partial H_{y2}}{\partial x} \Big|_{x=-2a} = \frac{1}{n_3^2} \frac{\partial H_{y3}}{\partial x} \Big|_{x=-2a},$$

из которых следует дисперсионное уравнение:

$$2k_1 a = \arctg \frac{n_1^2 \gamma_2}{n_2^2 k_1} + \arctg \frac{n_1^2 \gamma_3}{n_3^2 k_1} + \pi \nu, \quad (14)$$

где  $\nu$  – порядок моды.

Для заданных параметров волновода было решено дисперсионное уравнение и найдено значение  $\beta = 0,02771742$ . Других решений нет. Рассматриваемый волновод является одномодовым. Все параметры решения для напряжённости магнитного поля  $H_y$  могут быть выражены через значение  $\beta$ :

$$B = \frac{A}{2} \left( 1 - \frac{n_1^2 \gamma_2}{n_2^2 i k_1} \right), \quad C = \frac{A}{2} \left( 1 + \frac{n_1^2 \gamma_2}{n_2^2 i k_1} \right),$$

$$D = \exp(-\gamma_3 2a) \times$$

$$\times (B \exp(-ik_1 2a) + C \exp(ik_1 2a)). \quad (15)$$

При этом  $A$  может быть произвольной константой.

При  $A=1$   $TM$ -мода (12) показана на рис. 2 (сплошная линия). В каждом из слоёв  $TM$ -мода имеет свою удельную мощность:

$$I_2 = \frac{\beta}{2\omega n_2^2 \epsilon_0} \int_0^{+\infty} H_y^2 dx, \quad I_1 = \frac{\beta}{2\omega n_1^2 \epsilon_0} \int_{-2a}^0 H_y^2 dx, \quad (16)$$

$$I_3 = \frac{\beta}{2\omega n_3^2 \epsilon_0} \int_{-\infty}^{-2a} H_y^2 dx.$$

По следующим формулам можно найти доли энергий, распространяющихся во всех трёх слоях:

$$\Gamma_1 = \frac{I_1}{I} = 0,5068, \quad \Gamma_2 = \frac{I_2}{I} = 0,0044,$$

$$\Gamma_3 = \frac{I_3}{I} = 0,4888. \quad (17)$$

Таким образом, 50,7 % энергии распространяется внутри напылённого слоя, 48,9 % распространяется в подложке, 0,4 % распространяется вместе с затухающей волной в воздухе над волноводом.

На рис. 4в ясно видно, что введённое излучение, пройдя по волноводному слою всего 2 мкм от начала,

полностью сосредотачивается в нижнем слое под волноводом, т.е. в слое ниобата лития. Т.е. скорость распространения электромагнитной волны в данном случае будет определяться показателем преломления электрооптического материала – ниобата лития. Показатель преломления ниобата лития можно изменять с помощью продольно наложенных на волноводный слой электродов. Исходя из полученных распределений, можно заключить, что рассмотренный слой может эффективно поддерживать распространение электромагнитной моды, скоростью распространения которой можно управлять. На этом принципе можно построить модулятор Маха–Цендера, в котором можно управлять амплитудой выходящего излучения, или фазовый модулятор, в котором можно управлять фазой вышедшей из волновода волны.

Используя эту технологию, можно создать фотонную интегральную схему с серией близкорасположенных волноводов, излучение которых выходит в пространство, как показано на рис. 2, 4. Управляя фазой и амплитудой выходящих световых электромагнитных волн, можно решать разнообразные практические задачи.

### 3. Ввод излучения в волноводный слой и технология обработки края подложки ниобата лития

Для экспериментов с волноводными слоями была выбрана пластина из ниобата лития с размерами  $55 \times 9 \times 1$  мм. На пластине был сформирован слой двуокиси титана  $\text{TiO}_2$  толщиной 0,15 мкм с показателем преломления 2,6. Измерение показателя преломления производилось с помощью эллипсометра. Слой двуокиси титана для волноводного слоя был изготовлен нанесением  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  на подложку с помощью технологии электронно-лучевого распыления. В процессе осаждения слой доокислялся, и в итоге образовывался слой  $\text{TiO}_2$ .

Для введения излучения в волноводный слой с большим показателем преломления (2,6) необходимо было сделать призму с ещё большим показателем преломления. Таким материалом является рутил. У рутила, по справочным данным, показатель преломления для обыкновенного луча может достигать до 2,7, а для необыкновенного – до 2,9. Рутил имеет химическую формулу  $\text{TiO}_2$ . Название происходит от латинского слова «рутилус» – «красноватый». Он является наиболее устойчивой модификацией  $\text{TiO}_2$  как при высоких, так и при низких температурах. На рис. 3 показан луч зелёного лазера, введённый призмой в волноводный слой приготовленного образца ниобата лития. Первоначально пластина нужного размера была отрезана дисковой фрезой. Для сглаживания неоднородностей на торец пластины первоначально была нанесена полимерная композиция. Результат выхода излучения из волноводного слоя показан на рис. 1. Видно, что излучение рассеялось по всей поверхности вблизи расположенного экрана. Сглаживание неоднородностей с помощью полимерной композиции не помогло.

Далее торец пластины полировался на полировальной машине MetPrep 3™ производства США в Зеленоградском технологическом центре. MetPrep 3™ – шлифовально-полировальная машина, прекрасно подходит для обработки поверхностей простых предметов или при шлифовке маленьких образцов, используя ручную обработку. Она осуществляет цифровой контроль всех операций, включая пуск/остановку, скорость вращения шлифовального диска, направления движений вращающейся рабочей поверхности и регулирование расхода охладителя. Прочная конструкция и изолированный шпиндель исключают возможность вибраций. Точные шлифовальные диски гарантируют вертикальный износ менее 5 мкм. Скорость вращения шлифовального диска  $5 \div 350$  об/мин или  $1 \div 100$  об/мин по/против часовой стрелке с плавным последовательным крутящим моментом при низких частотах вращения. Электронный управляющий клапан активирует и регулирует расход охладителя.

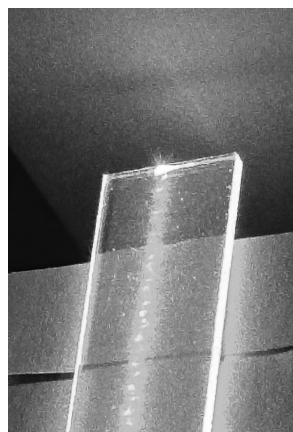


Рис. 3. Рассеяние излучения при выводе из волновода, состоящего из двуокиси титана, напыленного на ниобат лития на расстоянии 5 см. Виден сильно светящийся край на конце пластины, что говорит о сильном рассеянии

Размер зерна на последней стадии полирования составлял 1 мкм. Результат показан на рис. 4. Здесь на фоне рассеянного излучения уже видно две полосы излучения, выходящего из волновода и противоположной грани. Так же, как и на первом рисунке, видно яркую точку света на выходной грани. Это говорит о сильном рассеянии.



Рис. 4. Рассеяние излучения при выводе из волновода из двуокиси титана, напыленного на ниобат лития на расстоянии 2 см. Видно сильно светящийся край на конце пластины, что говорит о сильном рассеянии

Как видно из рис. 6, такая полировка удовлетворить не может.

Далее производили более тщательную полировку абразивом с размером зерна 0,1 мкм, нанесённым на полировальную плёнку. Также экспериментировали с направлением вращения обрабатываемого диска. Чтобы не было завала края, направление вращения делали по нормали к пластине и от ненапылённой грани к напылённой. На рис. 5 показан результат выхода излучения с края отполированной пластины из ниобата лития. Видно резкое пятно вышедшего из волноводного слоя излучения.

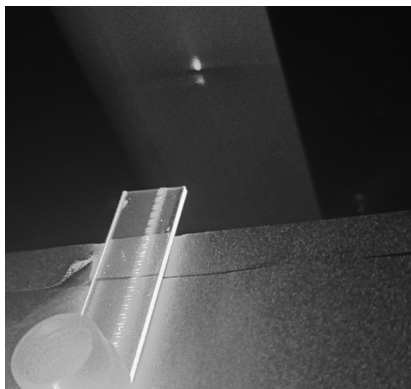


Рис. 5. Произведена финишная полировка торца пластины из ниобата лития. Излучение при выводе из волновода не рассеивается. Яркой точки на конце волновода нет.

На экране видно два световых пятна – излучение, вышедшее из волновода и переотражённое от нижней грани. Расстояние до экрана – 10 см

#### 4. Контроль поверхности и края подложки ниобата лития после полировки

После финишной обработки и проведения эксперимента по рассеянию были измерены параметры шероховатости торцевой поверхности. Измерения проводились на 3D оптическом профилометре поверхностей NewView™ 9000, который обеспечивает мощную универсальность в бесконтактном оптическом профилировании поверхностей. С помощью этой системы можно легко и быстро измерить широкий спектр типов поверхностей, включая гладкие, шероховатые, плоские, наклонные и ступенчатые. Все измерения являются неразрушающими, быстрыми и не требуют подготовки образца. В основе системы лежит технология когерентной сканирующей интерферометрии (CSI) компании ZYGO, которая обеспечивает субнанометровую точность при любом увеличении и измеряет широкий спектр поверхностей быстрее и точнее, чем другие коммерчески доступные технологии. Профилометр NewView 9000 предлагает исключительную ценность для таких разнообразных применений, как плоскостность, шероховатость и волнистость, тонкие плёнки, высота ступеней и многое другое.

На рис. 6–8 показаны измеряемые значения шероховатости,  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение

профиля. Среднеквадратическая шероховатость – это среднеквадратичное значение пиков и впадин поверхности. Индикатор RMS шероховатости является более точным, чем  $R_z$  шероховатость (высота неровностей профиля по десяти точкам), поскольку он использует больше математических расчётов и точек на поверхности.  $PV$  – это максимальное изменение профиля на измеряемой длине.

На рис. 6–7 отчётливо видны параллельные полосы – следы полировки по направлению вращения полировальной плёнки с нанесённым алмазным порошком. Несмотря на то, что зёрна порошка имеют размер 0,1 мкм (100 нм), глубина рисок на торцевой поверхности ниобата лития не превышает 3 нм. По сравнению с длиной волны зелёного лазера ( $\lambda = 532$  нм), на котором были произведены испытания при выводе излучения из волноводного слоя (рис. 3), это на два порядка меньше, поэтому мы видим чёткий луч с резкими краями.

На рис. 8 показан профиль в средней части торцевой поверхности. При стандартном методе полировки торцевой поверхности тонкую пластину ниобата лития с двух сторон обжимают брусочками из материала, который имеют такую же твёрдость, как ниобат лития, и после этого полируют.

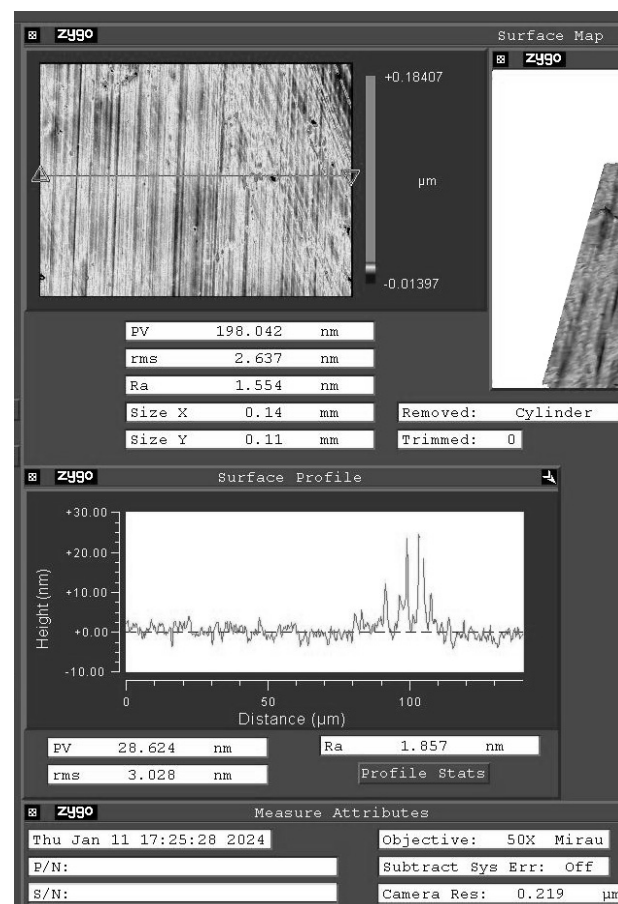


Рис. 6. Шероховатость торцевой поверхности ниобата лития после полировки, измеренная на интерференционном микроскопе ZYGO NewView 7300 с увеличением  $\times 500$

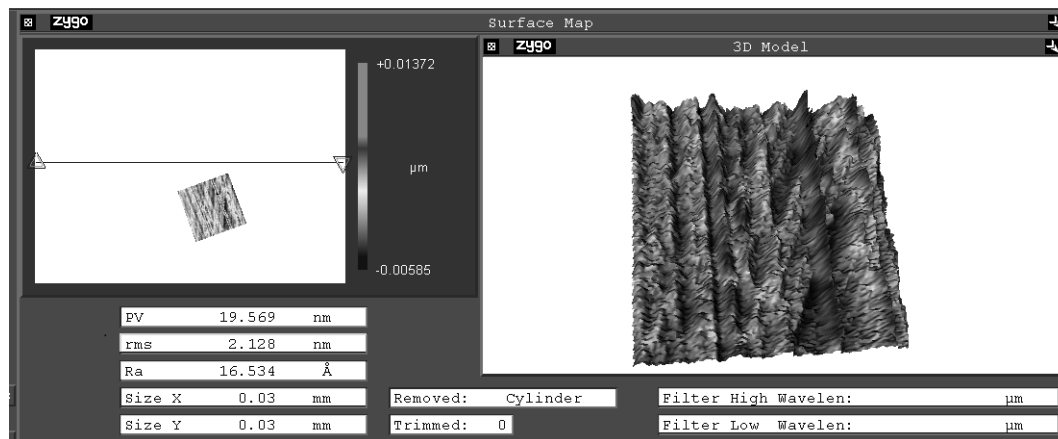


Рис. 7. 3D-измерение шероховатости торцевой поверхности ниобата лития после полировки, измеренная на интерференционном микроскопе ZYGO NewView 7300 с увеличением  $\times 500$ . Видны параллельные бороздки, которые идут параллельно направлению движения полировального круга. Максимальный период между бороздками – 50 мкм, минимальный – 1 мкм

При этом плоскость торца получается очень хорошей, с большим радиусом кривизны. Установка MetPrep 3™ позволяет избежать такого усложнения технологии. Используя параметры PV (рис. 10) как высоту дуги окружности 93,4 нм с длиной 400 мкм, рассчитали радиус кривизны окружности или плоскостность торца пластины. Значение радиуса кривизны в центре пластины составляет 0,2 м. На толщине пластины 1 мм это очень хороший результат.

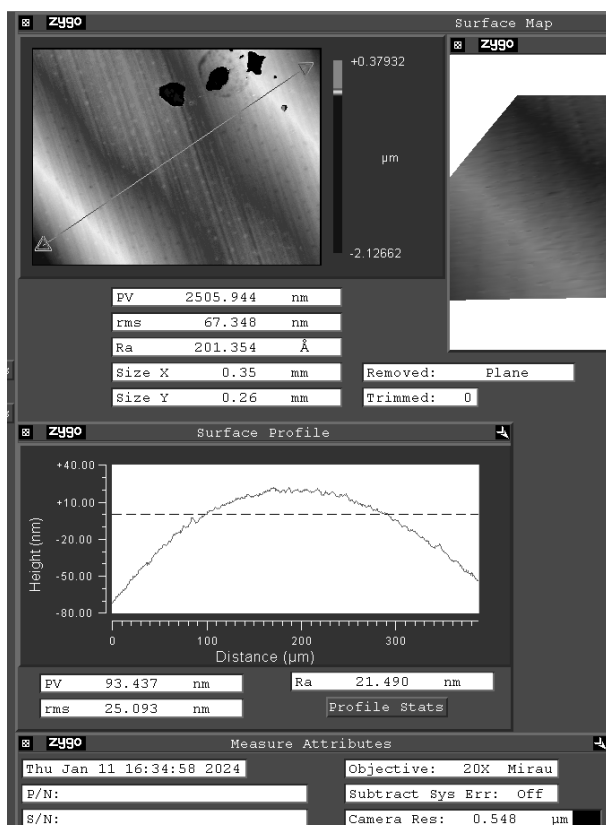


Рис. 8. Профиль торцевой поверхности в центре торцевой поверхности ниобата лития, измеренный на интерференционном микроскопе ZYGO NewView 7300 с увеличением  $\times 500$ . Радиус кривизны в центре торцевой пластины толщиной 1 мм составляет 0,2 м

На рис. 9 показаны измерения шероховатости полированной пластины ниобата лития там, где нет напылённого слоя. Первоначально, когда закупились пластины с ниобатом лития, было оговорено, что одна сторона полируется лучше, а другая – чуть хуже. Напылять волноводный слой нужно на более гладкую поверхность. Что и было сделано. Среднеквадратическая шероховатость RSM составляет 1,707 нм.

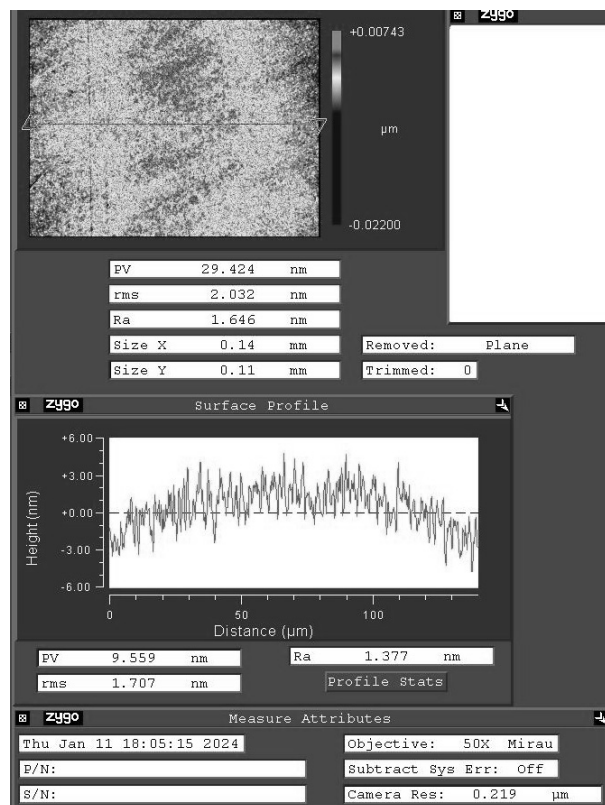


Рис. 9. Поверхность ниобата лития без напылённого слоя. Изменение профиля на дистанции 150 мкм составляет 9,559 нм. Среднеквадратическая шероховатость RSM составляет 1,707 нм

На рис. 10 показаны измерения шероховатости пластины ниобата лития на первоначально лучше об-

работанной стороне. На эту сторону и был напылён волноводный слой. Среднеквадратическая шероховатость RSM составляет 1,604 нм. Качество поверхности чуть лучше, чем на ненапылённой стороне.

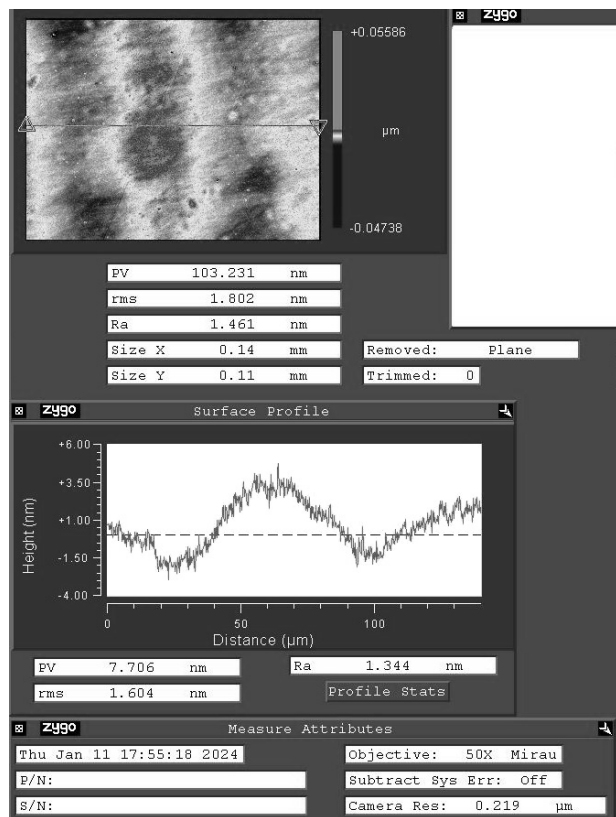


Рис. 10. Поверхность ниобата лития со стороны напыленного слоя. Изменение профиля на дистанции 150 мкм составляет 7,706 нм. Среднеквадратическая шероховатость RSM составляет 1,604 нм. Качество поверхности чуть лучше, чем на ненапылённой стороне

### Заключение

– Проведено моделирование прохождения излучения через плоский слой ниобата лития на основе решения волнового уравнения и в программном пакете Comsol Multiphysics. Аналитически и численно получены распределения энергии по слоям волновода для нулевых ТЕ- и ТМ-мод.

Доля энергии, переносимой в подложке из ниобата лития для ТМ-моды, почти в 2 раза больше, чем у ТЕ-моды, поэтому ТМ-мода предпочтительнее для применения в управляемых интегральных устройствах.

– Предложена новая технология изготовления фотонной интегральной схемы (ФИС) на подложке из ниобата лития.

– Показано, что необязательно легировать верхний слой ниобата лития для создания волноводной системы и управления излучением. Достаточно нанести на поверхность ниобата лития слой материал с показателем преломления выше, чем у ниобата лития. При этом получается несимметричный волновод, излучение в котором в основном проникает в глубину ниобата лития. За счёт этого, проложив металличе-

ские электроды вдоль волноводного слоя, можно управлять скоростью распространения излучения в волноводе и, соответственно, создавать управляемые фотонные схемы, например, амплитудный модулятор Маха–Цендера или фазовый модулятор.

– Экспериментально была создана и исследована технология напыления слоя двуокиси титана на поверхность ниобата лития. Также экспериментально была отполирована торцевая сторона пластины ниобата лития и показано, что после финишной полировки излучение выходит с торцевого конца пластины.

– Сделаны выводы, что предложенная технология позволит создавать ФИС с линейкой близкорасположенных волноводов, излучение которых будет выводиться в пространство и попадать в объектив фото- или видеокамеры для дальнейшей обработки.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-22-00044) <https://rscf.ru/project/24-22-00044/>.

### References

- [1] Petrov VM, Shamray AV. Interference and diffraction for information photonics [In Russian]. Saint-Petersburg: "Lan" Publisher; 2019.
- [2] Toney JE. Lithium niobate photonics. Boston, USA: Artech House; 2015. ISBN: 978-1-60807-923-0.
- [3] Bazzan M, Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: recent developments and applications. Appl Phys Rev 2015; 2(4): 040603. DOI: 10.1063/1.4931601.
- [4] Il'ichev IV, Kozlov AS, Gaenko PV, Shamray AV. Optimisation of the proton-exchange technology for fabricating channel waveguides in lithium niobate crystals. Quantum Electron 2009; 39(1): 98-104. DOI: 10.1070/QE2009v039n01ABEH013878.
- [5] Karavaev PM, et al. Polarization separation in titanium-diffused waveguides on lithium niobate substrates. Tech Phys Lett 2016; 42(5): 513-516. DOI: 10.1134/S1063785016050266.
- [6] Petrov MP, Stepanov SI, Homenko AV. Photorefractive crystals in coherent optics [In Russian]. Saint-Petersburg: "Nauka" Publisher; 1992.
- [7] Petrov MP, Shamrai AV, Petrov VM. Electrically controlled diffraction of light by reflection holograms in an LiNbO<sub>3</sub> crystal. Physics of the Solid State 1998; 40(6): 948-951. DOI: 10.1134/1.1130455.
- [8] Petrov MP, Shamray AV, Petrov VM, Sanchez-Mondragon J. Electric field selectivity of reflection volume holograms in LiNbO<sub>3</sub>. Opt Commun 1998; 153(4-6): 305-308. DOI: 10.1016/S0030-4018(98)00260-0.
- [9] Chamrai AV, Petrov VM, Petrov MP. Crosstalk caused by incoherence of the readout light in wavelength-division multiplexing of reflection holograms. Tech Phys 1999; 44(9): 1098-1102. DOI: 10.1134/1.1259480.
- [10] Breer S, Buse S. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate. Appl Phys B 1998; 66(3): 339-345. DOI: 10.1007/s003400050398.
- [11] Petrov VM, et al. Electrically controlled volume LiNbO<sub>3</sub> holograms for wavelength demultiplexing systems. Opt Mater 2001; 18(1): 191-194. DOI: 10.1016/S0925-3467(01)00165-3.

- [12] Petrov VM, et al. Electric field selectivity and multiplexing of volume holograms in LiNbO<sub>3</sub>. Appl Phys B 2000; 71(1): 43–46. DOI: 10.1007/s003400050072.
- [13] Kuzminov YuS. Lithium niobate and tantalate. Materials for nonlinear optics. Moscow: "Nauka" Publisher; 1975.
- [14] Weiner JS, Miller DAB, Chemla DS. Quadratic electro-optic effect due to the quantum-confined Stark effect in quantum wells. Appl Phys Lett 1987; 50(13): 842–844. DOI: 10.1063/1.98008.
- [15] Jacques M, Samani A, Patel D. Modulator material impact on chirp, DSP, and performance in coherent digital links: comparison of the lithium niobate, indium phosphide, and silicon platforms. Opt Express 2018; 26(17): 22471–22490. DOI: 10.1364/OE.26.022471.
- [16] Petrov VM, Shamrai AV. Microwave integrated optical modulators. Theory and practice [In Russian]. Saint-Petersburg: ITMO University Publisher; 2021.
- [17] Azanova IS. Surface, structure and optical properties of proton-exchange waveguide layers on a lithium niobate single crystal [In Russian]. The thesis for the Candidate's degree in physical and mathematical sciences. Permian; 2006.
- [18] Azanova IS, et al. Formation of lamlet phases on the surface of X-cut lithium niobate single crystal during proton exchange [In Russian]. Fundamental'nyye problemy sovremennogo materialovedeniya 2005; 2(1): 98–102.
- [19] Korkishko YuA, Fedorov VA. Optical properties and crystal structure of annealed proton exchange fibers in LiNbO<sub>3</sub> [In Russian]. JETP 1996; 66(5): 86–98.
- [20] Ganshin VA, Korkishko YuN, Petrova VZ. Formation and properties of H:LiTaO<sub>3</sub> light guides. JETP 1989; 59(8): 69–71.
- [21] Ponomarev RS, Shevtsov DI, Karnaushkin PV. "Shutdown" of the proton exchange channel waveguide in the phase modulator under the influence of the pyroelectric effect. Appl Sci 2019; 9(21): 4585. DOI: 10.3390/app9214585.
- [22] Kostitskii SM, Korkishko YuN, et al. Electro-optic MZI modulators, utilizing different phases in proton-exchanged LiTaO<sub>3</sub> waveguides. Proc SPIE 2005; 5956: 595610. DOI: 10.1117/12.620459.
- [23] Juber M, et al. Photorefractive effect and optical damage thresholds in z-cut swift heavy ion irradiation LiNbO<sub>3</sub> waveguides. Source: <https://www.ecio-conference.org/wp-content/uploads/2016/05/2012/ECIO-2012\_ThP091.pdf>.

### Сведения об авторах

**Соловьев Владимир Степанович**, в 1981 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Радиотехника». В 1992 году защитил диссертацию кандидата физико-математических наук в ЦКБ Уникального приборостроения. В настоящее время старший научный сотрудник Института нано- и микросистемной техники (НМСТ) в составе Московского национального исследовательского университета электронной техники (МИЭТ). Специалист в области дифракционной оптики, технологии оптических полимерных материалов, лазерной физики, технологии новых материалов для создания фотонных элементов. E-mail: [solovjev@polly.phys.msu.ru](mailto:solovjev@polly.phys.msu.ru)

**Дегтярев Сергей Александрович**, научный сотрудник лаборатории интеллектуального анализа видеоданных Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», доцент кафедры технической кибернетики Самарского национального исследовательского университета. Область научных интересов: волновая и сингулярная оптика. E-mail: [sealek@gmail.com](mailto:sealek@gmail.com)

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: [khonina@ipsiras.ru](mailto:khonina@ipsiras.ru)

**Тимошенков Сергей Петрович**, в 1981 году окончил Московский институт электронной техники (МИЭТ) по специальности «Полупроводники и диэлектрики». В 1994 году защитил кандидатскую диссертацию «Синтез многокомпонентных стеклообразных материалов в высокочастотной индукционной плазме». В 2004 году защитил докторскую диссертацию «Технология кремний на изоляторе». В настоящее время является профессором, директором Института нано- и микросистемной техники (НМСТ) в составе Московского национального исследовательского университета электронной техники (МИЭТ). Специализируется в области МОЭМС (микро-опто-электромеханических систем). E-mail: [spt111@mail.ru](mailto:spt111@mail.ru)

**Тимошенков Андрей Сергеевич**, в 2005 году окончил Московский институт электронной техники (МИЭТ) по специальности «Биомедицинские системы», в 2008 году окончил МИЭТ по специальности «Менеджмент управление организаций». С 2005 года является сотрудником кафедры БМС МИЭТ. С 2015 года является ведущим специалистом оптической лаборатории института НМСТ МИЭТ. Является специалистом в области эксимерных лазеров. Область научных интересов: МОЭМС, сенсорики, кремниевая фотоника, нанофотоника. E-mail: [alfaromeo155@mail.ru](mailto:alfaromeo155@mail.ru)

**Расщепкина Наталья Афанасьевна**, в 1977 году окончила Куйбышевский государственный университет (КГУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Химия». В 1985 году защитила кандидатскую диссертацию в Уральском политехническом институте им. С.М. Кирова. В настоящее время доцент кафедры аналитической и физической химии Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Специалист в области физики и химии твердого тела. E-mail: [rasshhepkina.natalja@rambler.ru](mailto:rasshhepkina.natalja@rambler.ru)

**Чалых Анатолий Евгеньевич**, со 2 февраля 1968 работает в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина АН СССР (Российской академии наук), научное направление «Физикохимия нано- и супрамолекулярных систем». Зав. лабораторией, зам. директора по науке, в настоящее время — главный научный сотрудник Лаборатории структурно-морфологических исследований. Доктор химических наук с 1976 года, профессор по специальности № 02.00.04 «Физическая химия» с 12 декабря 1978 г. E-mail: [chalykh@mail.ru](mailto:chalykh@mail.ru)

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 26 августа 2024 г. Окончательный вариант – 17 марта 2025 г.

---

## Technology for creating a photonic integrated circuit on a lithium niobate substrate

V.S. Solovyov<sup>1</sup>, S.A. Degtyarev<sup>2,3</sup>, S.N. Khonina<sup>2,3</sup>, S.P. Timoshenkov<sup>1</sup>,  
A.S. Timoshenkov<sup>1</sup>, N.A. Raschepkina<sup>4</sup>, A.E. Chalykh<sup>5</sup>

<sup>1</sup> National Research University of Electronic Technology – MIET,  
Shokin Square, Bld. 1, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498;

<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute, NRC “Kurchatov Institute”,  
Molodogvardeyskaya Str. 151, Samara, 443001, Russia;

<sup>3</sup> Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, Samara, 443086, Russia;

<sup>4</sup> Samara State Technical University, Molodogvardeyskaya Str. 244, Samara, 443100, Russia;

<sup>5</sup> The Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS (IPCE RAS),  
Leninsky Prospekt 31, bld. 4, Moscow, 119071, Russia

### Abstract

We propose a new technology for manufacturing a photonic integrated circuit (PIC) on a lithium niobate substrate. It is shown that there is no need to dope the top layer of lithium niobate to create a waveguide system and control radiation. It will suffice to coat the lithium niobate substrate with a layer of a material with higher refractive index, thus creating an asymmetric waveguide, with the radiation mainly propagating deeper within the lithium niobate. In this way, placing metal electrodes along the waveguide layer, it is possible to control the velocity of wave propagation in a waveguide and create controlled photonic circuits, for example, an amplitude Mach-Zehnder modulator or a phase modulator. A technology of spraying a titanium dioxide layer onto the lithium niobate substrate is experimentally created and investigated. It is shown that after the finishing polishing of the end side of the lithium niobate plate, radiation exits from the plate output end. So, it becomes possible to create a PIC with an array of closely spaced waveguides, from which radiation can be output into space and coupled into the lens of a photo or video camera for further processing.

**Keywords:** photonic integrated circuit (PIC), planar waveguide, lithium niobate, titanium dioxide, optical polishing of a thin cutting.

**Citation:** Solovyov VS, Degtyarev SA, Khonina SN, Timoshenkov SP, Timoshenkov AS, Raschepkina NA, Chalykh AE. Technology for creating a photonic integrated circuit on a lithium niobate substrate. *Computer Optics* 2025; 49(5): 733-740. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1599.

**Acknowledgements:** This work was funded by the Russian Science Foundation under grant No. 24-22-00044 <https://rscf.ru/project/24-22-00044/>.

---

### Author's information

**Vladimir Stepanovich Solovyov**, in 1981 he graduated from the Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, now Samara National Research University named after Academician SP Korolyov) with a degree in Radio Engineering. In 1992 he defended the dissertation of the Candidate of Physical and Mathematical sciences at the Central Design Bureau of Unique Instrument Making. Currently, a senior researcher at the Institute of Nano- and Microsystem Technology (NMST) as part of the Moscow National Research University of Electronic Technology (MIET). Specialist in the field of diffraction optics, technology of optical polymer materials, laser physics, technology of new materials for creating photonic elements. E-mail: [solovjev@poly.phys.msu.ru](mailto:solovjev@poly.phys.msu.ru)

**Sergey Alexandrovich Degtyarev**, Researcher at the Laboratory of Intelligent Analysis of Video Data at the Institute of Image Processing Systems, NRC “Kurchatov Institute”, Associate Professor of the Department of Technical Cybernetics at Samara National Research University. Research interests: wave and singular optics. E-mail: [sealek@gmail.com](mailto:sealek@gmail.com)

**Svetlana Nikolaevna Khonina**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: [khonina@ipsiras.ru](mailto:khonina@ipsiras.ru)

---

---

**Sergey Petrovich Timoshenkov**, in 1981 he graduated from the Moscow Institute of Electronic Technology (MIET), specializing in Semiconductors and Dielectrics. In 1994 he defended his thesis on Synthesis of multicomponent glassy materials in high-frequency induction plasma. In 2004 he defended his doctoral dissertation “Silicon technology on an insulator”. He is currently a professor, director of the Institute of Nano - and Microsystem Technology (NMST) at the Moscow National Research University of Electronic Technology (MIET). Specializes in the field of MOEMS (Micro-optoelectromechanical systems). E-mail: [spt111@mail.ru](mailto:spt111@mail.ru)

**Andrey Sergeevich Timoshenkov**, in 2005 he graduated from the Moscow Institute of Electronic Technology (TU) with a degree in Biomedical Systems, in 2008 he graduated from MIET with a degree in Management of Organizations. Since 2005, he is an employee of the Department of BMS MIET. Since 2015, he is a leading specialist in the optical laboratory of the NMST Institute of Electronic Technology and Electronics. He is a specialist in excimer lasers. Fields of scientific interests: MOEMS, sensorics, silicon photonics, nanophotonics. E-mail: [alfaromeo155@mail.ru](mailto:alfaromeo155@mail.ru)

**Natalia Afanasevna Raschepkina**, in 1977 she graduated from Kuibyshev State University (KSU, now Samara National Research University named after Academician SP Korolyov) with a degree in Chemistry. In 1985 she defended her thesis at the Ural Polytechnic Institute. CM. Kirov. Currently, associate professor of the department of "Analytical and Physical Chemistry" of Samara State Technical University (Samara State Technical University). Specialist in the field of solid state physics and chemistry. E-mail: [rasshhepkina.natalja@rambler.ru](mailto:rasshhepkina.natalja@rambler.ru)

**Anatoly Evgenievich Chalykh** Since February 2, 1968 he has been working at the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry named after. A. N. Frumkin of the USSR Academy of Sciences (Russian Academy of Sciences), scientific direction “Physicochemistry of nano- and supramolecular systems”. Head laboratory, deputy Director for Science, currently - chief scientific employee of the Laboratory of Structural and Morphological Research. Doctor of Chemical Sciences since 1976, professor in specialty No. 02.00.04 Physical Chemistry since December 12, 1978. E-mail: [chalykh@mail.ru](mailto:chalykh@mail.ru)

---

*Received August 26, 2024. The final version – March 17, 2025.*

---