

**Никитин А.А.<sup>1</sup>, Медведева А.А.<sup>1</sup>, Семенов А.А.<sup>1</sup>,  
Белявский П.Ю.<sup>1</sup>, Кожусь Н.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский имени В. Б. Бобкова филиал Российской  
таможенной академии

## **Перспективные материалы для изготовления электрооптических модуляторов: технология и свойства**

*Представлено сравнение оптических свойств материалов для электрооптических модуляторов с низкими управляющими напряжениями. Показаны перспективы использования и разработана технология создания пленок титаната бария для применения в электрооптических модуляторах. Технологический цикл реализован на основе метод реактивного ВЧ-катодного распыления на подложку оксида магния. Предложены методы формирования оптического волновода на основе нитрида кремния.*

**Ключевые слова:** электрооптический модулятор, титанат бария, нитрид кремния.

Одним из важнейших активных элементов оптических интегральных схем являются волноводные модуляторы и переключатели, которые необходимы для разработки устройств радиофотоники. Частным случаем таких устройств являются электрооптические модуляторы, которые используются для управления интенсивностью, фазой или поляризацией лазерного излучения под действием управляющего электрического сигнала. Основными характеристиками электрооптических модуляторов являются глубина модуляции, полоса пропускания, вносимые потери, потребляемая мощность и изоляция каналов.

Явление, на котором основано действие большинства электрооптических модуляторов, связано с изменением показателя преломления вещества под действием приложенного электрического поля (электрооптический эффект). В общем случае этот эффект является анизотропным и имеет линейную и нелинейную составляющие, называемые эффектами Поккельса и Керра, соответственно. Из работы [1] известно, что линейный электрооптический эффект существует лишь в кристаллах, которые не обладают инверсной симметрией. Таким образом, при проектировании электрооптических модуляторов необходимо тщательно выбирать как тип материала для волноводов, так и его ориентацию относительно приложенного внешнего электрического поля. Тем не менее большинство материалов, на основе которых можно изготавливать волноводы с малыми оптическими потерями, например, GaAs, GaP, LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> и кварц при определенной ориентации также имеет достаточно большие коэффициенты Поккельса [2]. Стоит отметить, что нелинейный электрооптический эффект Керра выражен сравнительно слабо у большинства материалов, используемых для изготовления волноводов. Нелинейная зависимость коэффициента преломления от электрического поля вводит нежелательное искажение в модулированный сигнал, что ограничивает использование данного эффекта во многих применениях интегральной оптики.

Целью разработки волноводного электрооптического модулятора для оптических интегральных схем является достижение большой ширины полосы пропускания при низком управляющем напряжении. Одним из возможных путей минимизации этого напряжения является использование перовскитных и перовскитоподобных сегнетоэлектрических материалов, которые обладают сильным электрооптическим эффектом. В оптических системах связи в настоящее время активно используется сегнетоэлектрик  $\text{LiNbO}_3$  [3]. Модуляторы на основе данного материала демонстрируют высокие быстродействие и скорость передачи данных, которая превышает 40 Гбит/с [4, 5]. Известно, что такие материалы как,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{KNbO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ , обладают большим электрооптическим коэффициентом и потенциально более высокой пропускной способностью, и низкими рабочими напряжениями. Сравнение оптических свойств различных материалов приведено в таблице 1.

С точки зрения применения сегнетоэлектрических материалов в интегральной оптике необходимо использование планарной технологии, что делает невозможным применение объемных монокристаллов. Таким образом, на практике используют тонкие пленки сегнетоэлектриков в качестве электрооптической среды [6, 7]. Одним из преимуществ таких структур является возможность осаждения на подложках с низким показателем преломления, что обеспечивает волноводный эффект распространения света, высокую оптическую плотность мощности, а также улучшает пропускную способность электрооптического модулятора [8].

Таблица 1. Сравнительная таблица электрооптических свойств перспективных материалов для изготовления электрооптических модуляторов

Сегнетоэлектрический материал	Диэлектрическая проницаемость	Коэффициент Погкельса, пм/В	Показатель преломления
$\text{BaTiO}_3$	2300	11300	2.3
$\text{SrTiO}_3$	300	960	2.4089
$\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$	3400	16300	2.3117
$\text{KNbO}_3$	55	715	2.1815
$\text{KNbTaO}_3$	16000	1900000	2.2815
$\text{LiNbO}_3$	29	365	2.8

В качестве оптического материала для разработки электрооптического модулятора был выбран титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) с коэффициентом Погкельса и показателем преломления, равными 11300 пм/В и 2.3, соответственно [9]. Из таблицы 1 видно, что  $\text{KNbTaO}_3$  обладает большим линейным коэффициентом, однако титанат бария имеет ряд существенных преимуществ, а именно: большую электрическую управляемость диэлектрической проницаемости и высокие значения напряжения пробоя. Одним из наиболее распространенных и изученных методов получения титанат бария на подложке  $\text{MgO}$  является метод реактивного ВЧ-катодного распыления.

На следующем этапе был выбран материал для канального волновода, поддерживающий распространение оптического сигнала. Выбор этого материала определяется из условия согласования показателей преломления материала канального волновода и титанат бария. В таблице 2 представлены диэлектрические свойства оптических волноводов, применяемых в интегральной оптике. В качестве материала для канального волновода был выбран нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) благодаря высокой электрической прочности, который имеет показатель преломления 2.01.

Таблица 2. Сравнительная таблица диэлектрических свойств материалов для изготовления электрооптических модуляторов

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс диэлектрических потерь, $\cdot 10^{-3}$	Напряжение пробоя, кВ	Электрическая прочность, кВ/мм
$\text{Si}_3\text{N}_4$	7.62	2.26	14.85+4.46%	46.4
AlN	8.7	1.76	21.16+2.82%	33.6
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10.32	1.67	11.86+3.27%	37.1

Рассмотрим более подробно пошаговый процесс изготовления модулятора на основе плёнки титаната бария, представленный на рисунке 1.

На первом этапе методом реактивного ВЧ-катодного напыления на подложке MgO создается пленка сегнетоэлектрика BaTiO<sub>3</sub>. В рамках работы были подобраны следующие технологические параметры: давление рабочего газа (кислорода) – 12 Па; расстояние от мишени до подложки – 30 мм; удельная мощность ВЧ-разряда – 10 Вт/см<sup>2</sup>; температура подложки – 750 °С; скорость роста – 100 нм/час. Нагрев подложек осуществляется в результате совместного воздействия резистивного нагревателя и плазмы ВЧ тлеющего разряда.

На втором этапе, для изготовления канального волновода толщиной 2 мкм нитрид кремния напыляется методом магнетронного распыления на подготовленную пленку титаната бария. Далее с помощью ионного травления формируется полоса канального волновода.

На последнем этапе формируются управляющие электроды щелевой линии передачи. Для этого используется метод термического испарения в высоком вакууме. Толщина получаемых пленок определялась путем контроля массы испаряемых навесок. Для получения пленок толщиной 2 мкм использовались навески меди весом 500 мг, которые помещались в вольфрамовую спираль, разогретой посредством протекающего по ней тока до 1977 К. После нанесения металлизации с помощью методов фотолитографии и последующего химического травления на металлизированной поверхности формируется щель размером 10 мкм.

Таким образом, в ходе данной работы разработан технологический цикл создания электрооптических модуляторов на основе нитрида кремния и перовскитного сегнетоэлектрика титаната бария, в качестве подложек для которого использовался оксид магния.

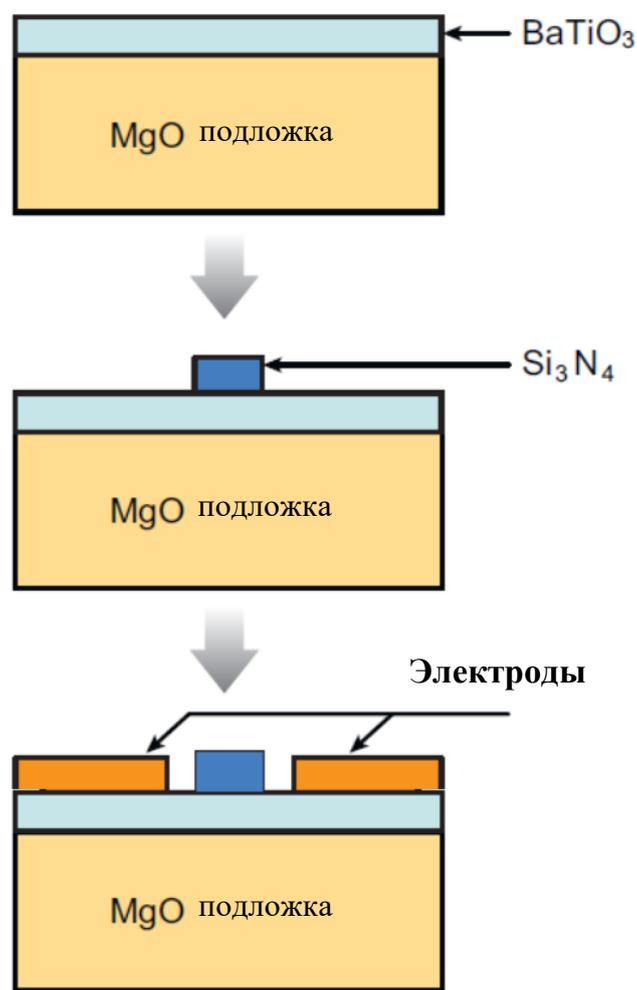


Рисунок 1. Пошаговый процесс изготовления электрооптического модулятора

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке в рамках гранта  
Российского Научного Фонда № 16-12-10440.

Библиографический список

1. Семенов А.С. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации / А.С. Семенов, В.Л. Смирнов, А.В. Шмалько. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.
2. Hunsperger R.G. Integrated optics: theory and technology. Second edition. Springer-Verlag, 1984. – 380 p.
3. Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yan A., Murphy E.J., Lafaw D.A., et al. A review of lithium niobate modulators for fiber optic communication systems. IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 2000. – V. 6. – P. 69-82.
4. Noguchi K., Mitomi O., Miyazawa H. Low voltage and broadband Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulators operating in the millimeter wavelength region. Proc. Optic Fiber Commun. 1996. – V. 205. – p. 6.
5. Gopalakrishnan G.K., Burns W.K., McElhanon R.W., Bulmer C.H., Greenblatt A.S., et al. Performance and modeling of broadband LiNbO<sub>3</sub> traveling wave optical intensity modulators. J. Lightwave Technol. 1994 – V. 12. – P. 1807–19.
6. Gill D.M., Conrad C.W., Ford G., Wessels B.W., Ho S.T. Thin film channel waveguide electro-optic modulator in epitaxial BaTiO<sub>3</sub>. Appl. Phys. Lett. 1997. – V. 71. – P. 1783-85.
7. Wessels B.W. Ferroelectric oxide epitaxial thin films: synthesis and nonlinear optical properties. J. Cryst. Growth. 1998. – V. 195. – P. 706–10.
8. Atsuki K., Yamashita E. Transmission line aspects of the design of broad band electro-optic traveling-wave modulators. J. Lightwave Technol. 1987. V. 5. – P. 316-19.
9. Zgonik M., Bernasconi P., Duelli M., Schlessler R., Gunter P. Dielectric, elastic, piezoelectric, electro-optic and elasto-optic tensors of BaTiO<sub>3</sub> crystals. Phys. Rev. B. 1994. – V. 50. – P. 5941-49.