ФОРМИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОКИСЛЕННОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ОКСИДА ТИТАНА ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Г. В. Белый, У. П. Лопато, В. П. Бондаренко, Н. Л. Гревцов*, Е. Б. Чубенко, В. А. Лабунов

УДК 535.375.5:537.222.2

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь; e-mail: hrautsou@gmail.com

(Поступила 25 апреля 2026, принята к печати 15 мая 2026)

Продемонстрирована возможность формирования диэлектрического материала на основе окисленного пористого кремния и оксида титана путем осаждения последнего в пористый кремний золь-гель методом и последующего высокотемпературного окисления. Полученный в результате реализации предложенной методики диэлектрический материал характеризуется увеличенным показателем преломления, что делает его перспективным для создания интегральных оптических канальных волноводов с низкими потерями в объемных микросборках электронных схем с оптическими соединениями.

Ключевые слова: *пористый кремний, оксид кремния, оксид титана, золь-гель метод, термическое окисление, показатель преломления, оптический волновод.*

The feasibility of forming a dielectric material based on oxidized porous silicon and titanium oxide by depositing the latter onto porous silicon using a sol-gel method and subsequent high-temperature oxidation is demonstrated. The resulting dielectric material is characterized by an increased refractive index, making it promising for the creation of low-loss integrated optical channel waveguides in bulk microassemblies of electronic circuits with optical interconnects.

Keywords: *porous silicon, silicon oxide, titanium oxide, sol-gel method, thermal oxidation, refractive index, optical waveguide.*

Введение. Для широкого внедрения мобильных телекоммуникационных сетей пятого и шестого поколений и беспилотных систем предъявляются беспрецедентно высокие требования к пропускной способности устройств обработки данных и быстродействию каналов связи. Одним из решений этой задачи является создание сложных электронных устройств, в которых кристаллы интегральных схем собраны в объемную конструкцию — микросборку. Для изготовления микросборок используются соединенные между собой пластины-интерпозеры со сквозными металлизированными отверстиями и кремниевые подложки разводки с металлическими соединениями. Согласно оценкам, дальнейшее развитие объемных микросборок неизбежно приведет к необходимости замены металлических соединений в микросборках на оптические, что требует разработки технологических подходов к формированию интегральных оптических волноводов [1, 2].

В настоящее время разработано несколько типов интегральных оптических волноводов на основе тонких пленок кремния, нитрида кремния и оксида алюминия, формируемых на поверхности кремниевых подложек. Такие волноводы находят применение в оптоэлектронных схемах и устройствах интегральной фотоники, однако их использование для оптических соединений в объемных микросборках представляет ряд сложностей. Так, для данного применения волноводы должны быть встроены в кремниевую подложку разводки и обеспечивать возможность ввода излучения светодиодов и его последующего вывода на фотодетекторы через отверстия в пластине-интерпозере. В волноводах на базе

FORMATION OF A DIELECTRIC MATERIAL BASED ON OXIDIZED POROUS SILICON AND TITANIUM OXIDE FOR INTEGRATED OPTICAL WAVEGUIDES

G. V. Bely, U. P. Lopato, V. P. Bondarenko, N. L. Grevtsov*, E. B. Chubenko, V. A. Labunov (*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus; e-mail: hrautsou@gmail.com*)

перечисленных выше материалов эта задача может быть решена только с помощью специальных микропризм или дифракционных решеток, что значительно усложняет конструкцию и процесс изготовления микросборок.

В работах [3, 4] продемонстрирована возможность создания канальных оптических волноводов на основе пористого кремния (ПК), получаемого электрохимическим анодированием, с последующим термическим окислением и формированием окисленного ПК (ОПК). Канальные волноводы на основе ОПК состоят из двух слоев — волноводного и барьерного, которые различаются показателями преломления. Волноводный слой должен иметь показатель преломления выше, чем барьерный, для чего исходные слои ПК формируются с различной пористостью: волноводный 55—60 %, барьерный 60—65 %. После высокотемпературного окисления волноводный слой ОПК имеет показатель преломления 1.445—1.458, барьерный 1.380—1.400 в видимом диапазоне на длинах волн 500—550 нм.

Канальные волноводы на основе ОПК представляют особый интерес для использования в микросборках кристаллов интегральных схем с оптическими соединениями благодаря характерной совокупности свойств, не присущей ни одному из известных функциональных аналогов. Во-первых, такие волноводы встроены в кремниевые подложки, что позволяет сохранить планарность подложек и обеспечить их легкое соединение с пластинами-интерпозерами. Во-вторых, канальные волноводы на основе ОПК функционируют в широком спектральном диапазоне от видимого до ближнего ИК-излучения. Наконец, их наиболее важной особенностью является сферическая форма каналов на концах волноводов, обеспечивающая возможность прямого ввода и вывода света без применения специальных микропризм или дифракционных решеток.

Один из основных параметров интегральных оптических волноводов — потери на распространение света. Первые образцы канальных волноводов на основе ОПК были изготовлены с использованием кремниевых подложек акцепторного типа проводимости, а потери на распространение света в них составляли 3—5 дБ/см в видимом диапазоне длин волн [5]. Использование кремниевых подложек электронного типа проводимости позволило уменьшить потери вначале до 1 дБ/см [6], а затем до 0.5 дБ/см благодаря применению двухступенчатого процесса электрохимического анодирования [7]. Задача дальнейшего уменьшения потерь связана с проблемой отрицательного влияния ростовых, так называемых свирлевых дефектов в кремниевых подложках, полученных методом Чохральского. Свирлевые дефекты приводили к неоднородности структуры ПК и, как следствие, к неоднородности оптических характеристик ОПК. Подавить данные дефекты позволило проведение имплантации ионов сурьмы в кремниевые подложки перед электрохимическим анодированием, что обеспечило уменьшение потерь до 0.2 дБ/см в видимом (488 нм) и 0.8 дБ/см в ближнем ИК-диапазонах [8].

Для успешного применения канальных волноводов на основе ОПК в объемных микросборках потери на распространение света видимого диапазона должны быть <0.1 дБ/см, в связи с чем в настоящее время основные усилия по их дальнейшему совершенствованию направлены на уменьшение потерь ниже этого уровня. С этой целью проводится поиск путей увеличения разности показателей преломления (контраста показателей преломления Δn) волноводного и барьерного слоев ОПК. Эта задача решается разработкой специальных режимов формирования ПК и его предварительной обработки перед термическим окислением [9—11].

В настоящей работе изучена возможность увеличения показателя преломления волноводного слоя ОПК путем введения в каналы пор исходного слоя ПК оксида титана TiO_2 с применением золь-гель метода. Предполагается, что последующее термическое окисление ПК с содержанием TiO_2 позволит получить диэлектрический материал, состоящий из смеси ОПК (n = 1.445—1.458) и оксида титана (n = 2.5). Итоговый показатель преломления такого диэлектрического материала должен быть больше, чем у волноводного слоя на базе чистого ОПК, а его точное значение определяется количественным соотношением оксидов кремния и титана, которое в свою очередь задается пористостью ПК и выбранным методом осаждения оксида титана. Увеличение показателя преломления волноводного слоя обеспечит увеличение контраста показателей преломления волноводного и барьерного слоев ОПК, что позволит уменьшить потери на распространение света в интегральных оптических канальных волноводах на основе данного материала для объемных микросборок электронных схем с оптическими соединениями.

Эксперимент. Экспериментальные исследования включали в себя изучение возможности формирования ОПК с содержанием оксида титана, определение показателей преломления в слоях ОПК, изготовление канальных волноводных структур и определение потерь на распространение в них света.

В качестве исходных подложек использованы пластины монокристаллического кремния диметром 100 мм марки ЭКЭС-0.01 с кристаллической ориентацией поверхности (100). После химической обработки в перекисно-аммиачном растворе пластины разделены на прямоугольные образцы размерами 2.5×2.5 см. Слои ПК формировались путем электрохимического анодирования образцов во фторопластовой электрохимической ячейке. В качестве катода выступала сетка из платиновой проволоки, диаметр зоны анодирования 2 см. Применяемый электролит состоял из 48 %-ной фтористоводородной кислоты, деионизированной воды и изопропилового спирта, взятых в объемном соотношении 1:3:1. Электрические режимы анодирования задавались потенциогальваностатом Metrohm Autolab PGSTAT302N. Анодирование проводилось в гальваностатическом режиме, время процесса изменялось для получения слоев ПК различной толщины от 1 до 10 мкм.

Анодирование при плотности тока 60 мА/см^2 использовано для получения слоев ПК с пористостью 55—60 % — данная пористость обеспечивает после процедуры высокотемпературного окисления получение плотного слоя ОПК, близкого по оптическим характеристикам к термической двуокиси кремния. Такой материал в дальнейшем использован для изготовления волноводных областей канальных оптических волноводов. Для получения барьерных слоев между волноводными областями и кремниевой подложкой дополнительно сформирован слой ПК с пористостью 65—70 % путем анодирования при плотности тока 70 мА/см^2. Более подробно методика формирования слоев ПК с различными параметрами представлена в [12—14].

Осаждение оксида титана реализовано с применением золь-гель метода. Исходный золь, состоящий из 10 мл C_2H_5OH, 0.56 мл HCl, 2 мл CH_3COOH и 1 мл $Ti[OCH(CH_3)_2]_4$, подвергался перемешиванию при температуре 40 °С в течение 30 мин. Готовый раствор заливался в ячейку с подготовленным слоем ПК, после чего ячейка на 10 ч помещалась в сушильный шкаф с пониженным давлением для преобразования нанесенного золя в гель. Впоследствии образцы извлекались из ячейки и подвергались предварительной термообработке при температуре 350 °С в течение 60 мин в атмосфере воздуха. Избыток отвердевшего геля удалялся с поверхности образцов направленным потоком воздуха и последующей обработкой в ультразвуковой ванне с деионизированной водой. Основная термообработка образцов проводилась в муфельной печи Nabertherm 9L/330, где образцы подвергались последовательному окислению во влажном кислороде при температурах 1000 °С в течение 6 ч и 1100 °С в течение 1 ч. Такой многоступенчатый процесс обеспечивает предварительное “мягкое” окисление слоя ПК в сухом кислороде, позволяющее предотвратить его дальнейшее спекание, а впоследствии — полностью окислить ПК при более высоких температурах обработки во влажном кислороде и получить плотный беспористый ОПК.

Для изготовления канальных волноводов на основе ОПК использованы сильнолегированные подложки монокристаллического кремния диаметром 100 мм марки ЭКЭС-0.01 с ориентацией поверхности (100). Топология волноводов задавалась маской из пленки нитрида кремния толщиной 0.3 мкм, нанесенной на поверхность кремниевой подложки методом химического осаждения из паровой фазы. В пленке нитрида кремния методом плазмохимического травления через фоторезистивную маску изготовлены отверстия, имеющие форму канальных волноводов. Анодирование открытых участков поверхности кремниевых пластин проведено в гальваностатическом режиме последовательно при двух плотностях тока — 60 мА/см^2 в течение 175 с и 70 мА/см^2 в течение 45 с, что обеспечивает формирование двухслойного ПК с пористостью слоев 55—60 и 65—70 % и толщинами 7 и 2 мкм соответственно. В сформированные области ПК осаждали оксид титана с применением золь-гель метода, после чего образцы термически окислены в сухом кислороде при 350 °С в течение 1 ч, а затем во влажном кислороде при 1000 °С (6 ч) и 1100 °С (1 ч). Сформированные волноводы прямолинейные, шириной 25 мкм и длиной от 0.5 до 2.0 см (с шагом 0.5 см). Варьирование длины волноводов позволяло определить потери на распространение света: с этой целью кремниевая подложка раскалывалась перпендикулярно волноводам, обеспечивая за счет кристаллографической ориентации (100) получение зеркальных сколов на торцах волноводов. Расколотые образцы волноводов закреплялись вертикально на столике измерительного микроскопа МИИ-4. Излучение от “зеленого” лазера с длиной волны 532 нм вводилось в концевой участок волновода, у противоположного торца на сколе размещался кремниевый фотоприемник J&G Judson J16 Series. Потери определялись по разности в уровне сигналов, зарегистрированных на выходе волноводов различной длины. Более подробно методика описана в работе [8].

Структура образцов изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-4800 (Япония), оснащенного приставкой Bruker QUANTAX 200 (Германия) для проведения элементного анализа методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Для изучения

фазового состава образцов использована спектроскопия комбинационного рассеяния света (КР). С этой целью применен 3D-сканирующий лазерный конфокальный КР-микроскоп SOL Instruments Confotec NR500 (Беларусь), оснащенный лазером с длиной волны излучения 633 нм. Для определения показателей преломления полученных слоев ОПК использована методика [15], основанная на анализе спектров отражения, зарегистрированных с помощью спектрофотометра Proscan MC122 (Беларусь) в диапазоне длин волн 350—1100 нм. Исходная толщина слоев ПК в структурах для измерения спектров отражения составляла 1.8—2.0 мкм для получения выраженных интерференционных экстремумов в спектрах отражения.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены СЭМ-изображения сколов слоя ОПК с осажденным оксидом титана. Изображение скола в свете отраженных электронов приведено на рис. 1, *а*. На аналогичные изображения наложены картограммы содержания кислорода, кремния и титана, полученные методом EDX (рис. 1, *б* и *в*). Слой ОПК имеет толщину 7 мкм, присутствие кремния, кислорода и титана фиксируется по всей толщине скола. Профили распределения элементов по глубине слоя ОПК получены методом EDX путем сканирования электронным лучом по сколу образца от поверхности до границы раздела пористый слой/подложка по диагонали под углом 45° (рис. 1, *г*).

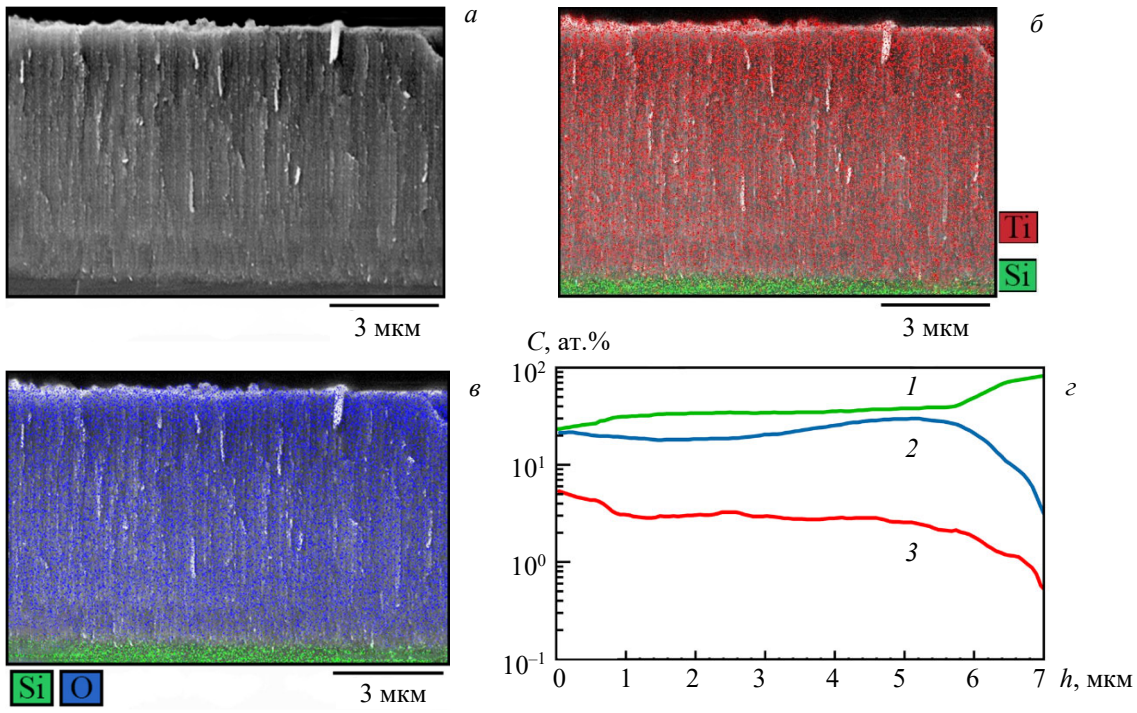

Рис. 1. СЭМ-изображения сколов образца ОПК с оксидом титана, осажденным золь-гель методом: *а* — изображение в отраженных электронах; *б* — EDX-картограммы кремния и титана; *в* — EDX-картограммы кремния и кислорода; *г* — EDX-профили распределения кремния (*1*), кислорода (*2*) и титана (*3*)

Полученные профили распределения показывают, что содержание титана на поверхности ОПК составляет ~5.3 ат.%, после чего уменьшается до 3 ат.% в основном объеме слоя и сохраняется на этом уровне до глубины 5—6 мкм, уменьшаясь впоследствии до 0.6 ат.% на границе раздела ОПК/подложка. В области границы раздела происходит захват сигнала от монокристаллической кремниевой подложки, и концентрация атомов кремния повышается. Наиболее высокая концентрация титана в верхней части слоя ОПК обусловлена применением метода введения титана, который не предполагает электрохимической обработки для повышения глубины залегания материала. Содержание кислорода в полученном слое ОПК ~20—30 ат.%, атомов кремния 30—40 ат.%, это несколько более равномерно по сравнению с распределением титана.

Спектры КР образцов с осажденным оксидом титана, зарегистрированные после различных стадий термообработки, приведены на рис. 2. Для сравнения также представлен КР-спектр для исходного образца ПК до осаждения оксида титана и термического окисления. Спектр КР образца исходного слоя ПК содержит одну основную полосу при $\nu = 521$ см$^{-1}$. Данный максимум соответствует трехкратно вырожденной оптической колебательной моде монокристаллического кремния в центре зоны Бриллюэна Si(LO). После осаждения оксида титана и термического окисления при 350 °С в сухом кислороде происходит смещение данной полосы в область меньших волновых чисел (519 см$^{-1}$), а также ее уширение, что является признаком окисления и аморфизации пористого материала и обусловлено соответствующим изменением длины связей в элементах кремниевого каркаса ПК и энергии их колебательных мод [16, 17]. При этом КР-максимумов, характерных для соединений титана, при данной температуре не наблюдается.

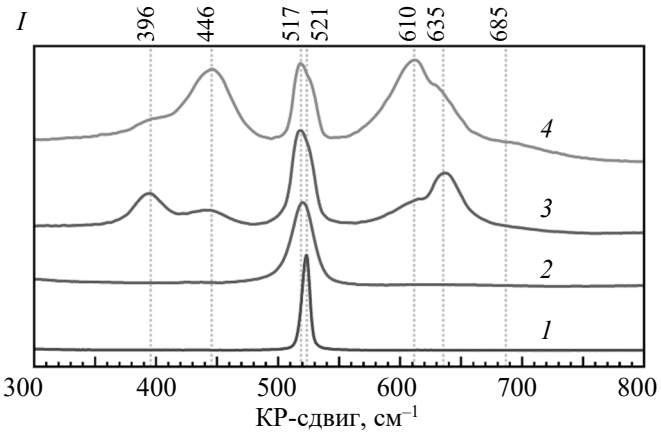

Рис. 2. Спектры КР поверхностью окисленного образца ПК с оксидом титана, осажденным золь-гель методом; окисление проведено последовательно: до окисления (*1*), при температурах 350 (*2*), 1000 (*3*) и 1100 °С (*4*)

Последующее окисление при температуре 1000 °С во влажном кислороде приводит к появлению группы полос с максимумами, характерными для двух различных полиморфных модификаций оксида титана — анатаза и рутила. Максимумы 396, 517 и 635 см$^{-1}$ характерны для анатаза и характеризуются большей интенсивностью по сравнению с свойственными для рутила пиками 446, 610 и 685 см$^{-1}$. Пик при 635 см$^{-1}$ связан с активной модой E_g, возникающей в результате симметричных колебаний O-Ti-O-связей в оксиде титана со структурой анатаза [18]. Мода E_g очень чувствительна к размеру частиц и обычно показывает коротковолновый сдвиг и уширение при исследовании наночастиц [19, 20]. Такое поведение, зависящее от размеров, объясняется трехмерным ограничением фононов в частицах конечного размера [21]. Полоса с максимумом при 396 см$^{-1}$ связана с модой B_{1g}, а пик при 517 см$^{-1}$ является результатом наложения полос 513 и 519 см$^{-1}$, первая из которых связана с симметричными колебаниями связей O-Ti-O, вторая — с антисимметричными [22]. Таким образом, анатаз является основной формой существования оксида титана в рассматриваемом материале после окисления при температуре 1000 °С.

После окисления во влажном кислороде при температуре 1100 °С в спектрах КР наблюдаются аналогичные полосы, отличающиеся, однако, существенно иным соотношением интенсивностей. Так, максимумы 446 и 610 см$^{-1}$, соответствующие рутилу, характеризуются большей интенсивностью по сравнению с максимумами 396, 517, 635 и 685 см$^{-1}$, относящимися к анатазу. Для рутила в том числе характерны максимумы вблизи 447 и 612 см$^{-1}$, соответствующие колебательным модам E_g и A_{1g} [23—25]. Для моды четвертого порядка B_{1g} характерна относительно слабая температурная зависимость и уширение, что объясняется ее ангармоничностью и аномальными фонон-фононными взаимодействиями [20]. Таким образом, после окисления при температуре 1100 °С оксид титана в основном переходит в вид рутила. Описанные взаимные преобразования полиморфных модификаций оксида титана согласуются с известными данными [26].

Для определения показателей преломления полученных слоев ОПК использован метод построения и анализа огибающих интерференционных экстремумов на спектрах отражения [15]. На рис. 3 представлены спектры отражения для образцов с осажденным золь-гель методом оксидом титана, окисленные последовательно при температурах 350 °С (сухой кислород), 1000 и 1100 °С (влажный кислород). Для сравнения представлены спектр отражения от исходного слоя ПК до окисления и спектр отражения слоя ПК без осажденного оксида титана после многоступенчатого окисления при температурах 350 °С (сухой кислород), 1000 и 1100 °С (влажный кислород).

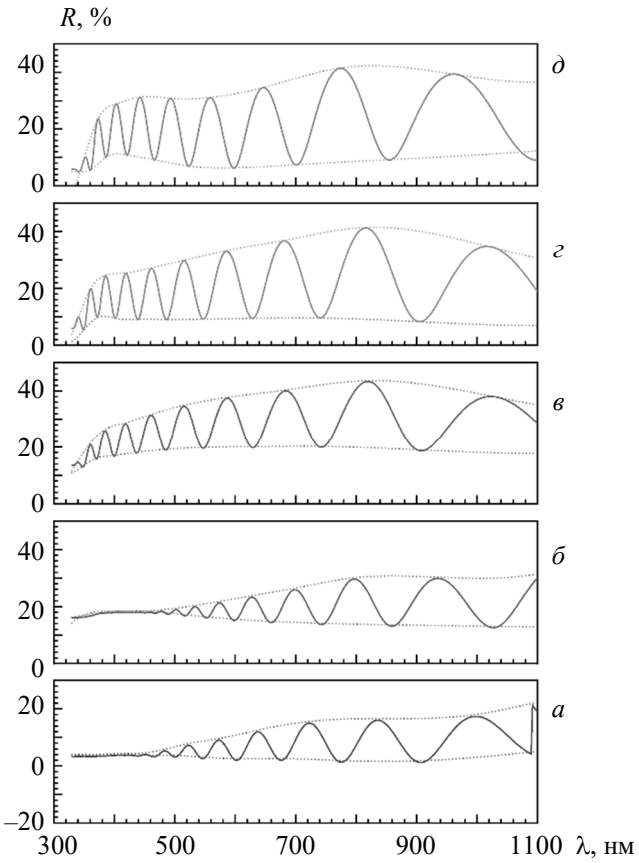

Рис. 3. Спектры отражения света поверхностью образцов ПК с осажденным оксидом титана: ПК до окисления (*а*); многоступенчатое окисление ПК (контрольный образец ПК без оксида титана) (*б*); окисленные при температурах 350 (*в*), 1000 (*г*), 1100 °С (*д*); пунктиром отмечены огибающие, использованные для расчета показателей преломления

В диапазоне длин волн $\lambda = 330$—440 нм коэффициент отражения для исходного ПК до окисления составляет всего 4 %, а многоступенчатое окисление этого же слоя ПК, не содержащего оксида титана, приводит к увеличению коэффициента отражения до 6—8 %. Выраженные интерференционные картины для исследуемых образцов исходного неокисленного ПК и слоя ОПК, не содержащего оксида титана, проявляются на $\lambda > 440$ нм, а их интенсивность возрастает при увеличении длины волны.

Для образцов окисленного ПК, содержащих оксид титана, интерференционные картины наблюдаются во всем исследуемом диапазоне длин волн 330—1100 нм, однако в длинноволновой области спектра (>800—850 нм) искажаются за счет наложения спектра второго порядка дифракции, в связи с чем корректное определение показателя преломления использованным методом для $\lambda > 800$ нм затруднено. Окисление во влажном кислороде при температурах 1000 и 1100 °С приводит к формированию слоев ОПК с яркими интерференционными картинами. Минимумы этих картин находятся при коэффициентах отражения 7—10 %, максимумы достигают 25—40 %.

Рассчитанные показатели преломления (n) для слоев ОПК приведены на рис. 4. Для образцов двуокиси кремния, полученных в используемых режимах окисления, показатель преломления варьируется от 1.491 до 1.452 в диапазоне λ = 420—800 нм. Для образцов ОПК, не содержащих оксида титана, показатель преломления изменяется от 1.503 до 1.469, а при λ = 589 нм n = 1.475, что близко к значению для чистого оксида кремния (1.458). Образцы ОПК, в которые введен оксид титана, после заключительного этапа окисления демонстрируют показатель преломления в пределах от 1.742 до 1.704 с n = 1.715 при 589 нм. Контраст показателей преломления в изготовленных слоях ОПК без оксида титана и с оксидом титана составляет 0.240. Настолько высокое значение достигнуто впервые и показывает потенциальные возможности предлагаемого подхода для управления оптическими характеристиками слоев ОПК.

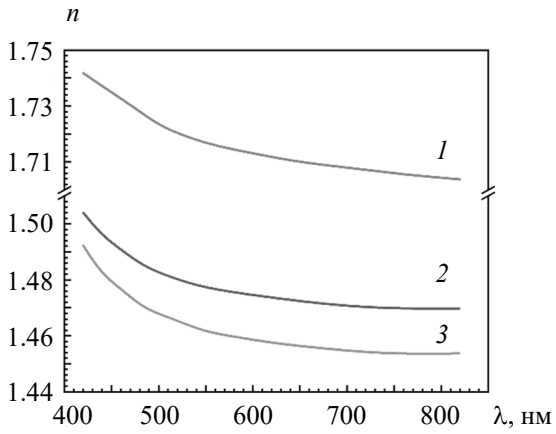

Рис. 4. Зависимости показателей преломления (n) слоев ОПК, окисленных при температуре 1100 °C, а также термического оксида кремния от длины волны падающего излучения; ОПК с TiO_2 (*1*), ОПК без TiO_2 (*2*) и SiO_2 (*3*)

Описанный подход использован для изготовления оптических канальных волноводов, встроенных в кремниевую подложку. Для волноводов, в которых волноводный слой изготовлен из ОПК без оксида титана с показателем преломления 1.490, потери на длине волны 532 нм составили 0.20—0.25 дБ/см, тогда как в волноводах на основе ОПК с оксидом титана с показателем преломления 1.715 потери составили 0.10—0.12 дБ/см.

Заключение. Показана возможность увеличения показателя преломления окисленного пористого кремния путем введения в него оксида титана. Получены слои окисленного пористого кремния, содержащие оксид титана в виде двух полиморфных модификаций — рутила и анатаза. Многоступенчатое высокотемпературное термическое окисление таких структур обеспечило формирование диэлектрического материала с увеличенным до 1.715 показателем преломления. С использованием этого материала изготовлены встроенные в кремниевые подложки канальные оптические волноводы с уменьшенными до 0.10—0.12 дБ/см потерями на распространение света в видимом диапазоне длин волн. Полученные волноводы перспективны для организации оптических соединений в микросборках электронных интегральных схем.

Авторы выражают благодарность Д. В. Жигулину за проведение структурных исследований с использованием сканирующей электронной микроскопии.

Конфликт интересов (Conflict of Interest). Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование (Funding). Работа выполнена в рамках НИР “Формирование диэлектрических материалов на основе окисленного микроструктурированного кремния и оксида титана для интегральных оптических волноводов с низкими потерями в объемных микросборках электронных схем с оптическими соединениями” по гранту Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Х25МЭ-008).

Вклад авторов (Author Contribution). Г.В.Б. — изготовление образцов и анализ данных, У.П.Л. — анализ данных, В.П.Б. — общее руководство и редактирование рукописи, Н.Л.Г. — изготовление образцов, анализ данных и подготовка рукописи, Е.Б.Ч. — анализ данных и подготовка рукописи, В.А.Л. — разработка концепции исследования.

[1] **P. Yu, H. Xu, Z. Wang.** Integrated Nanophotonics: Platforms, Devices, and Applications, New Jersey, Wiley (2023) 1—52
[2] **С. К. Лазарук, В. П. Бондаренко, В. Е. Борисенко, Н. В. Гапоненко, Г. Г. Горох, А. А. Лешок, Д. Б. Мигас, Е. Б. Чубенко.** Докл. БГУИР, **22** (2024) 7—19
[3] **В. П. Бондаренко, В. С. Вариченко, А. М. Дорофеев, Н. М. Казючиц, В. А. Лабунов, В. Ф. Стельмах.** Письма в ЖТФ, **19** (1993) 73—76
[4] **V. P. Bondarenko, A. M. Dorofeev, N. M. Kazuchits.** Microelectron. Eng., **28** (1995) 447—450
[5] **M. Balucani, V. Bondarenko, L. Dolgyi, G. Lamedica, A. Ricciardelli, E. Viarengo, N. Vorozov, A. Ferrari.** Mater. Sci. Sem. Proc., **3** (2000) 351—355
[6] **N. Vorozov, L. Dolgyi, V. Yakovtseva, V. Bondarenko, M. Balucani, G. Lamerica, A. Ferrari, G. Vitrant, J. E. Broquin, T. M. Benson, H. F. Arrand, P. Sewell.** Electron. Lett., **36** (2000) 722—723
[7] **M. Balucani, V. Bondarenko, N. Vorozov, A. Ferrari.** Phys. E: Low-Dimentional Syst. Nanostruct., **16** (2003) 574—579
[8] **M. Balucani, V. Bondarenko, A. Klusko, A. Ferrari.** Opt. Mater., **27** (2005) 776—780
[9] **A. Kellarev, S. Ruschin.** J. Lightwave Technol., **37** (2019) 3439—3443
[10] **M. Jimenez-Vivanco, R. Herrera, L. Martinez, F. Morales, K. Misaghian, M. Toledo-Solano, J. Eduardo Lugo.** Photonics, **10** (2023) 1009
[11] **J. Fletcher, J. Dell, G. Parish, A. Keating.** Adv. Photon. Res., **6** (2024) 2400055
[12] **A. Chelyadinsky, A. Dorofeev, N. Kazuchits, S. La Monica, S. Lazarouk, G. Maiello, G. Masini, N. Penina, V. Stelmakh, V. Bondarenko, A. Ferrari.** J. Electrochem. Soc., **144**, N 4 (1997) 1463—1468
[13] **Н. Л. Гревцов.** Докл. БГУИР, **18** (2020) 59—66
[14] **У. П. Лопато, Д. Д. Лапутько, Н. Л. Гревцов, В. П. Бондаренко.** Докл. БГУИР, **22** (2024) 17—25
[15] **Н. Н. Никифоренко, А. А. Лабуда, П. Г. Юревич, А. А. Сидерко, П. А. Кедич.** Вестн. БГУ. Сер. 1, № 2 (2008) 46—49
[16] **R. Angel, M. Murri, B. Mihailova, M. Alvaro.** Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials, **234** (2019) 129—140
[17] **K. Sakurai, M. Mizusawa.** Anal. Chem., **82** (2010) 9
[18] **B. Taudul, F. Tielens, M. Calatayud.** Nanomaterials, **13** (2023) 1856
[19] **M. C. Ceballos-Chuc, C. M. Ramos-Castillo, J. J. Alvarado-Gil, G. Oskam, G. Rodriguez-Gattorno.** J. Phys. Chem. C, **122** (2018) 19921—19930
[20] **Y. Iida, M. Furukawa, T. Aoki, T. Sakai.** Appl. Spectrosc., **52** (1998) 673—678
[21] **V. Swamy, A. Kuznetsov, L. Dubrovinsky, R. Caruso, D. Schukin, B. Muddle.** Phys. Rev. B, **71** (2005) 184302
[22] **J. Vargas Hernández, S. Coste, A. Garcia Murillo, F. Carrillo-Romo, A. Hadi Kassiba.** J. Alloy Compd., **710** (2017) 355—363
[23] **U. Balachandran, N. Eror.** J. Solid State Chem., **42** (1982) 276—282
[24] **T. Lan, X. Tang, B. Fultz.** Phys. Rev. B, **85** (2012) 094305
[25] **O. Frank, M. Zukalova, B. Laskova, J. Kurti, J. Koltai.** Phys. Chem. Chem. Phys., **14** (2012) 14567—14572
[26] **A. Podelinska, E. Neilande, V. Pankratova, V. Serga, H. Bandarenka, A. Burko, S. Piskunov, V. Pankratov, A. Sarakovskis, A. Popov, D. Bocharov.** Nanomaterials, **15** (2025) 498—519