

УДК 621.372.8

ФОРМИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКИСЛЕННОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ОКСИДА ТИТАНА

Белый Г.В., студент гр.242701, Лопато У.П., аспирант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Бондаренко В.П. – канд. техн. наук

Аннотация. Показана возможность формирования диэлектрических материалов путем осаждения гидроксида титана в пористый кремний с последующим термическим окислением. Проанализированы особенности электрохимического осаждения гидроксида титана и заключено, что этот метод обеспечивает получение гидроксида титана как на поверхности, так и в каналах пор пористого кремния. Полученный в результате окисления такого материала диэлектрик представляет собой смесь оксидов кремния и титана и характеризуется увеличенным (до 1,590–1,630) показателем преломления, что делает его перспективным для создания канальных волноводов с низкими потерями в объемных микросборках электронных схем с оптическими соединениями.

Ключевые слова. Пористый кремний, оксид кремния, оксид титана, электрохимическое осаждение, показатель преломления, оптические волноводы.

Настоящая работа направлена на исследование возможности увеличения показателя преломления n окисленного пористого кремния (ОПК) путем введения в каналы пор гидроксида титана. Предполагается, что это позволит после процедуры термического окисления получить диэлектрический материал, состоящий из смеси ОПК ($n = 1,456$, аналог оксида кремния) и оксида титана ($n = 2,5$). Конечный показатель преломления такого материала должен быть больше, чем у оксида кремния, что даст возможность его использования для создания оптических волноводов с низкими потерями в объемных микросборках электронных схем с оптическими соединениями [1].

В качестве исходных подложек использовались сильнолегированные кремниевые пластины электронного типа проводимости диаметром 100 мм марки КЭС-0,01 с ориентацией поверхности (100). Пластины были разрезаны на образцы размером 2,5×2,5 см с помощью алмазного резца. Слои пористого кремния (ПК) формировались путем электрохимического анодирования в электролите, состоящем из 48 % фтористоводородной кислоты, деионизированной воды и изопропилового спирта, взятых в объемном соотношении 1:3:1. Анодирование производилось в электрохимической ячейке из фторопласта в гальваностатическом режиме при постоянной плотности тока, а время процесса варьировалось для получения слоев ПК различной толщины. Анодирование при плотности тока 60 мА/см² использовалось для получения слоев с пористостью 55–60 % — данная величина пористости обеспечивала после процедуры высокотемпературного окисления формирование полностью окисленного плотного слоя ОПК, близкого по своим оптическим характеристикам к термической двуокиси кремния. Введение в ПК оксида титана осуществлялось электрохимической катодной обработкой в течение 30 мин в водном растворе соли треххлористого титана при плотности катодного тока 3 мА/см². Окисление ПК проводилось в течение 60 мин в атмосфере сухого кислорода последовательно при температурах 350, 900 и 1000 °С. Структура образцов изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-4800, оснащенного приставкой Bruker QUANTAX 200 для проведения элементного анализа методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Для изучения фазового состава образцов использовалась спектроскопия комбинационного рассеяния света — этой целью применялся 3D сканирующий лазерный конфокальный рамановский микроскоп Confotec NR500 3D (Республика Беларусь). Для определения величины показателей преломления полученных слоев использовали методику [2], основанную на анализе спектров отражения, которые регистрировалось с помощью спектрофотометра Proscan MC 122.

Анализ EDX-профилей распределения элементов, определенных путем сканирования электронного луча по сколу образца от поверхности до границы раздела пористый слой/подложка. Показал, что вдоль скола каждого из образцов отмечается присутствие сигнатур кремния, кислорода и титана. Последний фиксируется по всей толщине пористых слоев. Максимальное содержание титана на поверхности составляет 1,4 ат.% и уменьшается до величины менее 0,2 ат.% на границе слоя ОПК с кремниевой подложкой. Такое снижение концентрации, наблюдающееся для всех изученных образцов, характерно как для титана, так и для кислорода, сопровождается сравнимым повышением концентрации атомов кремния и связано с началом захвата сигнала от монокристаллической кремниевой подложки. Полученные распределения элементов по толщине изучаемых слоев удовлетворяет известным представлениям о количественном составе слоев оксида кремния с содержанием оксида титана.

Спектры комбинационного рассеяния света поверхностью образца с осажденным гидроксидом титана, последовательно окисленного при различных температурах, приведены на рисунке 1.

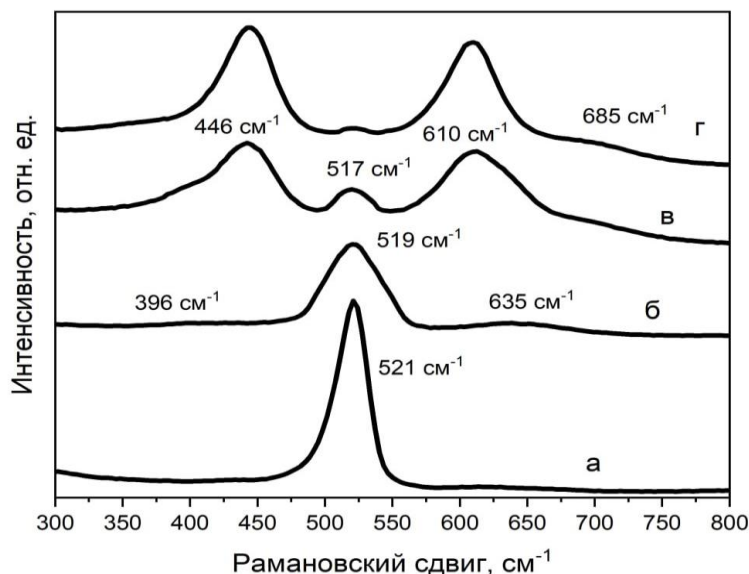


Рисунок 1 – Спектры комбинационного рассеяния света поверхностью окисленного при различных температурах образца ПК с оксидом титана. Окисление производилось последовательно при различных температурах: а – до окисления; б – 350 °С; в – 900 °С; г – 1000 °С

Спектр комбинационного рассеяния света поверхностью исходного слоя ПК содержит один пик при 521 см^{-1} , который соответствует трехкратно вырожденной колебательной моде кремния в центре зоны Бриллюэна Si(LO). После осаждения гидроксида титана и окисления при 350 °С происходит смещение данного пика в область меньших значений волнового числа 519 см^{-1} , а также уширение соответствующего максимума. При этом появляются очень слабые пики при 396 и 635 см^{-1} , характерные для соединений титана. Окисление при температуре 900 °С приводит к появлению семейства полос при волновых числах 396 , 446 , 517 , 610 , 635 и 685 см^{-1} , характеризующих две различные полиморфные модификации оксида титана — анатаз и рутил. Максимумы на 396 , 517 и 635 см^{-1} относятся к анатазу и характеризуются большей величиной интенсивности, чем таковые при 446 , 610 и 685 см^{-1} , которые характеризуют рутил. После окисления при температуре 1000 °С в спектрах наблюдаются пики при волновых числах 396 , 446 , 517 , 610 , 635 и 685 см^{-1} . Полосы при 446 и 610 см^{-1} относятся рутилу и характеризуются большей интенсивностью, чем максимумы на 396 , 517 , 635 и 685 см^{-1} , которые относятся к фазе анатаза. Это свидетельствует о том, что после окисления при температуре 1000 °С основной фазой оксида титана в материале является рутил. Установленные фазовые преобразования коррелируют с известными литературными данными, описывающими термическую обработку соединений титана при высоких температурах [3].

Для определения величины показателей преломления была использована методика [2], основанная на анализе интерференционных картин спектров отражения полученных слоев ОПК. Была установлена существенная разница в величинах показателей преломления полученных образцов. Для образцов ОПК, не содержащих оксид титана, показатель преломления изменялся от $1,460$ до $1,417$ в диапазоне длин волн от 400 до 900 нм . Для слоя ОПК, в который введен оксид титана, показатель преломления изменялся от $1,630$ до $1,590$ в диапазоне длин волн от 400 до 900 нм , что больше чем у ОПК ($n = 1,458$) и может быть объяснено содержанием в сформированном слое оксида титана.

Исследование выполнено 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», выполняемой по гранту Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № X25MЭ-008).

Список использованных источников:

1. Перспективные оптические и электронные межсоединения элементов интегральных микросхем / С. К. Лазарук [и др.] // Доклады БГУИР, 2024. – Т. 22. – № 2. – С. 7–19.
2. Спектрофотометрический контроль пленок борофосфоросиликатного стекла / Никуфоренко Н.Н. [и др.] // Вестник БГУ, 2008. - Сер. 1.- № 2. – С. 46-49.
3. Structural and Spectroscopic Characterization of TiO_2 Nanocrystalline Materials Synthesized by Different Methods / A. Podelinska [et al.] // Nanomaterials, 2025. – Vol. 15. – 498.