

## АП-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ $\text{Er}^{3+}$ В КСЕРОГЕЛЯХ ТИТАНАТА БАРИЯ

Лашковская Е. И., Гога А.В., Парафинюк Д.А.

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

Гапоненко Н.В. – д-р физ.-мат. наук, проф.,

Плиговка, А. Н. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Представлены результаты люминесценции многослойных структур, легированных эрбием и иттербием, сформированных золь-гель методом на пористом анодном оксиде алюминия и монокристаллическом кремнии. Приведены спектры ап-конверсионной люминесценции эрбия для длины волны возбуждения 980 нм.

В настоящее время синтез материалов, демонстрирующих явление ап-конверсии, в частности, преобразование инфракрасного излучения в видимое, исследуется для различных применений (создание солнечных элементов и дисплейных устройств, чувствительных биосенсоров и др.) [1]. Люминесценция трехвалентного эрбия и других лантаноидов усиливается в присутствии сенсibiliзирующих ионов, в частности, иттербия для эрбия. В данной работе приведены результаты ап-конверсионной люминесценции многослойных покрытий с ксерогелем  $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$ , сформированном в пористом анодном оксиде алюминия (ПАОА) на кремнии, а также в виде многослойных покрытий и с чередующимися слоями  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на монокристаллическом кремнии.

Формирование ПАОА осуществляли анодированием тонкой пленки алюминия 1300 нм, нанесенной методом магнетронного распыления на кремниевую пластину  $p$ -типа с ориентацией поверхности  $\langle 111 \rangle$ . Анодирование проводилось в специальной двухэлектродной вертикальной электрохимической ячейке из политетрафторэтилена. Электрохимическая ячейка подключалась к программируемому источнику тока Keysight N5752A и мультиметру Keysight 34470A в режиме измерения тока, которые управлялись с ПК при помощи программного обеспечения, разработанного в среде LabView. Все процессы анодирования проводились при постоянном перемешивании электролита и задании начальной температуры электролита 21 °С. Все экспериментальные образцы были сформированы в гальваностатическом режиме при плотности тока  $6 \text{ mA/cm}^2$ . На рисунке 1 представлены кинетики формирования ПАОА в водных растворах щавелевой и винной кислоты. Первый образец формировали в 0,6 М водном растворе щавелевой кислоты. Продолжительность анодирования составляла 786 секунд, что соответствует времени оксидирования 1300 нм алюминия и толщине ПАОА – 1820 нм. Второй и третий образец анодировали в 0,6 М водном растворе винной кислоты. Продолжительность анодирования второго образца составляла 563 секунды, что соответствует времени оксидирования 940 нм алюминия и толщине ПАОА – 1310 нм. Продолжительность анодирования третьего образца составляла 680 секунд, что соответствует времени оксидирования 1133 нм алюминия и толщине ПАОА – 1590 нм. Для третьего образца проводили расширение пор в селективном травителе (1,1 М водный раствор ортофосфорной кислоты и 0,65 М хромовый ангидрид) при температуре 62 °С в течение 18 минут.

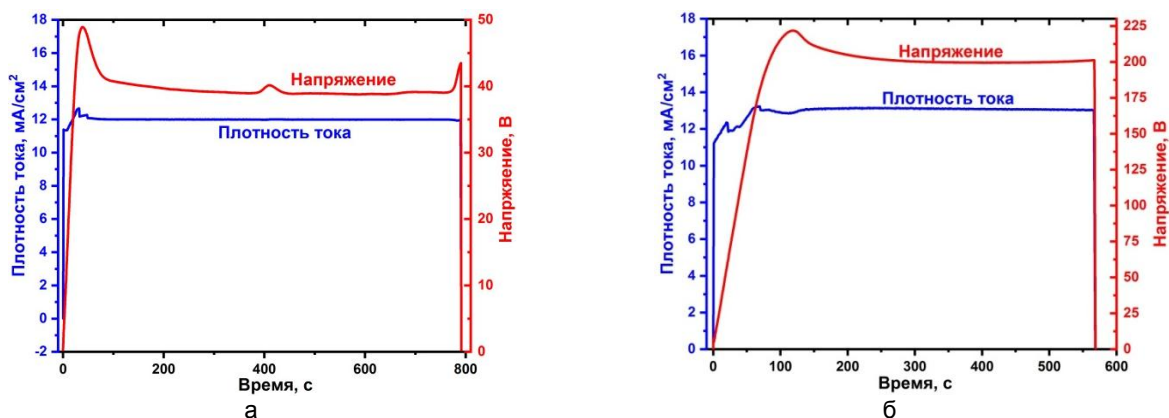


Рисунок 1 – Кинетики формирования ПАОА (а) – в водном растворе щавелевой кислоты, (б) – в водном растворе винной кислоты

Многослойные структуры на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  формировали методом центрифугирования из растворов, полученных золь-гель методом. Преимущество золь-гель

метода состоит в том, что он не требует энергозатратного вакуумного оборудования и, соответственно, может быть реализован на больших площадях при относительно низкой стоимости. Окончательная температура термообработки, после которой исследовали люминесценцию, составляла для образцов на ПАОА/Si – 800 °С, на монокристаллическом Si – 700 °С.

Все образцы демонстрируют при комнатной температуре регистрации ап-конверсионную люминесценцию для длины волны возбуждения 980 нм с полосами 410, 523, 546, 658, 800 и 830 нм, соответствующих переходам  ${}^2H_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  и  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  трехвалентных ионов эрбия (рис. 2).

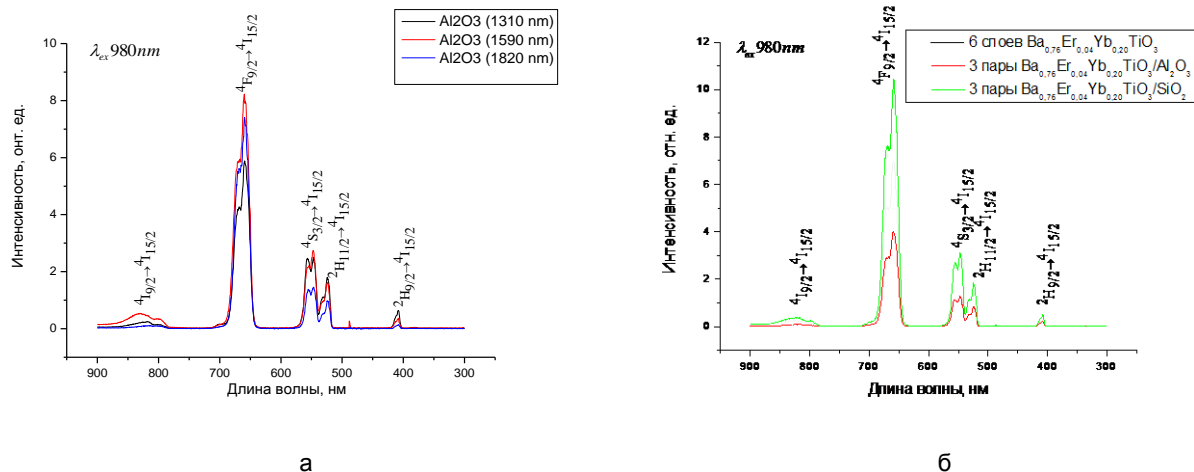


Рисунок 2 - Спектры ап-конверсионной фотолюминесценции ионов  $Er^{3+}$ : (а) – в ксерогеле  $Ba_{0,76}Er_{0,04}Yb_{0,20}TiO_3$  (8 слоёв) на ПАОА, (б) – в многослойных структурах, содержащих  $Ba_{0,76}Er_{0,04}Yb_{0,20}TiO_3$ . На вставках указана толщина  $Al_2O_3$  (а) и количество и тип слоев (б).

На рисунке 3 представлено РЭМ-изображение торцевой области сформированных структур. Морфологический анализ показал однородность поверхности ксерогеля, а также пористую структуру анодного оксида алюминия.

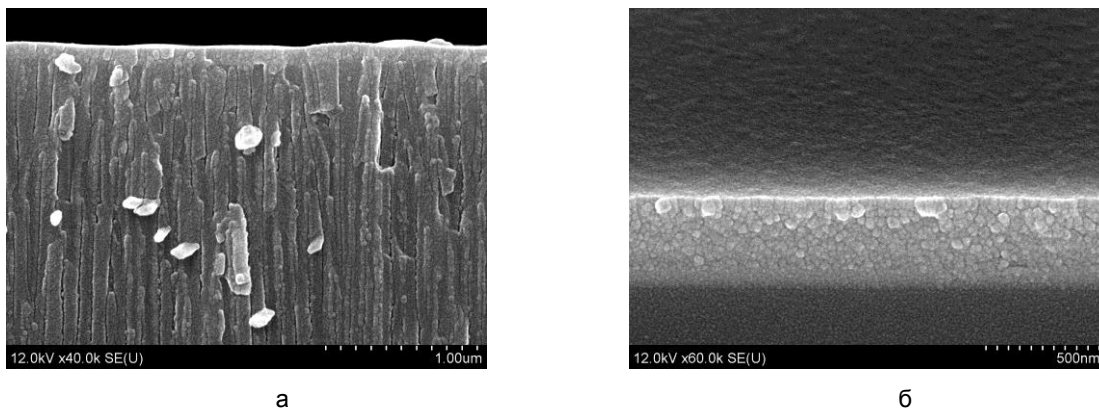


Рисунок 3 – РЭМ-изображения ксерогеля  $Ba_{0,76}Er_{0,04}Yb_{0,20}TiO_3$  (вид с торца): (а) - в ПАОА с толщиной  $Al_2O_3$  1820 нм, (б) – на подложке монокристаллического кремния

Можно ожидать, что изменение режимов анодирования и морфологии пористого анодного оксида алюминия приведет к изменению соотношения интенсивностей полос люминесценции за счет перераспределения оптических мод в пористом анодном оксиде алюминия по сравнению с пленками ксерогелей, сформированных без использования оптически анизотропных матриц.

**Список использованных источников:**

1. Гапоненко, Н. В. Излучательные свойства ап-конверсионных покрытий, формируемых на основе ксерогелей титаната бария, легированных эрбием / Н.В. Гапоненко, Ю.Д. Корнилова, Е.И. Лашковская, В.Д. Живулько, А.В. Мудрый, Ю.В. Радюш, Б.А. Андреев, М.В. Степихова, А.Н. Яблонский, С.А. Гусев, R. Subasri, D.S. Reddy // Физика и техника полупроводников. – 2021. – том 55, вып. № 9. – С. 713 – 718.