

УДК 535.376:538.958:538.975:548.5

# Люминесценция в пленках $\text{GeO}_x$ , содержащих нанокластеры германия

К.Н. Астанкова<sup>1</sup>, Е.Б. Горохов<sup>1</sup>, В.А. Володин<sup>1,2</sup>, Д.В. Марин<sup>1</sup>, И.А. Азаров<sup>1</sup>, А.В. Латышев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: as-tankoff@ya.ru

Поступила в редакцию: 10.12.2015

Принята в печать: 15.02.2016

Метаустойчивые пленки  $\text{GeO}_x$  осаждались на Si-подложку путем электронно-лучевого испарения порошка  $\text{GeO}_2$  в высоком вакууме. Оптические свойства нанокластеров Ge в пленках  $\text{GeO}_x$  после серии отжига изучались методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, эллипсометрии, катодолюминесценции и фотолюминесценции. В пленках  $\text{GeO}_x$  после отжига впервые были обнаружены пики катодолюминесценции в видимом спектральном диапазоне (400 и 660 нм) при комнатной температуре. Катодолюминесценция может быть связана как с существованием в Ge-нанокластерах неосновных (возбужденных) уровней и разрешенных оптических переходов с возбужденного на основной уровень, так и поверхностных состояний на границе Ge/ $\text{GeO}_2$ -матрица либо дефектов внутри Ge-нанокластера. Наблюдаемые в нашей работе сигналы фотолюминесценции в желто-зеленой области (2.1–2.4 эВ) в пленках  $\text{GeO}_x$  после серии отжига можно объяснить квазипрямыми оптическими переходами в Ge-нанокластерах.

## LUMINESCENCE IN $\text{GeO}_x$ FILMS WITH GERMANIUM NANOCLUSTERS

Metastable  $\text{GeO}_x$  films were deposited onto Si-substrate by electron beam evaporation of  $\text{GeO}_2$  powder in a high vacuum. Optical properties of Ge-nanoclusters in  $\text{GeO}_x$  films after thermal annealings were investigated by Raman spectroscopy, ellipsometry, cathodo- and photoluminescence spectroscopy. The cathodoluminescence peaks were detected in the visible range (400 nm and 660 nm) at room temperature in  $\text{GeO}_x$  films after thermal annealings for the first time. Cathodoluminescence may be associated both with the existence of ground (excited) levels in Ge-nanoclusters and allowed optical transitions from the excited to the ground level and surface states on the boundary of the Ge-NC/ $\text{GeO}_2$ -matrix, or defects inside Ge-nanocluster. The experimentally observed yellow-green photoluminescence signal (2.1–2.4 eV) presumably originates due to quasi-direct optical transitions in Ge-nanoclusters.

## ВВЕДЕНИЕ

Ансамбли полупроводниковых наночастиц (квантовых точек), внедренных в широкозонную диэлектрическую матрицу, привлекают большой интерес как с фундаментальной точки зрения, так и ввиду возможного их практического применения в нанoeлектронике и нанопотонике. Важным обстоятельством является то, что за счет квантово-размерного эффекта в нанокластерах непрямозонных полупроводников наблюдается не свойственная им излучательная рекомбинация даже при комнатной температуре [1].

За последние несколько лет структуры с квантовыми точками стали применяться для производства солнечных батарей, светодиодов, сенсоров, дисплеев, биомаркеров для медицины. По сравнению с хорошо изученными полупроводниковыми квантовыми точками на основе соединений типа  $\text{A}_2\text{B}_6$ ,  $\text{A}_4\text{B}_6$ ,  $\text{A}_3\text{B}_5$  (например, CdSe, PbS, PbSe, PbTe, InAs, InP и др.) в коллоидных растворах [2] или в твердой матрице [3] Ge-нанокластеры (Ge-НК) в диэлектрике находятся на стадии интенсивных исследований [4, 5]. Более того, все чаще стала рассматриваться возможность замены токсичных полупроводниковых материалов из соединений тяжелых металлов на Si и Ge в устройствах массового потребления [6]. Сравнение полупроводников IV группы (Ge и Si) показывает, что для некоторых применений германий обладает рядом преимуществ по сравнению с кремнием [7]. Он имеет самую высокую подвижность дырок ( $1900 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ) среди всех полупроводников IV группы и соединений III–V групп элементной таблицы (GaAs, InSb, InP). В нанокристаллах германия квантово-размерный эффект должен проявляться ярче, чем в нанокристаллах кремния, так как радиус экситона в объемном германии в несколько раз больше радиуса экситона в объемном кремнии.

Возникновение светового излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра под действием

электронного облучения (катодолюминесценция) известно давно. Метод катодолюминесценции (КЛ), наряду с другими методами, такими, как фотолюминесценция (ФЛ), спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), заняли прочное место в исследовательской практике при изучении зонной структуры твердого тела (главным образом тех энергетических уровней, которые принимают участие в процессах излучательной рекомбинации).

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки твердого монооксида германия ( $\text{GeO}(\text{тв})$ ) являются метастабильными и легко распадаются на матрицу  $\text{GeO}_2$  с включенными в нее нанокластерами Ge согласно следующей химической реакции [8]:



В зависимости от условий роста можно получать либо однородные пленки  $\text{GeO}$  стехиометрического состава [9, 10], либо пленки  $\text{GeO}_x$  различного состава и структуры [11–13]. В данной работе был использован метод электронно-лучевого испарения порошка  $\text{GeO}_2$  в камере высокого вакуума ( $10^{-8}$  Тор). Под воздействием электронного луча происходит частичный распад  $\text{GeO}_2$  на Ge,  $\text{O}_2$  и GeO. Последние два компонента являются более летучими, но, в отличие от  $\text{O}_2$ , монооксид германия легко осаждается на холодную подложку ( $\sim 100^\circ\text{C}$ ), что приводит к образованию неразложившейся пленки  $\text{GeO}_x$  с параметром  $x = 1.2$  ( $x$  определялся из данных ИК-спектроскопии [12]). Исследовались Si-образцы как с толстой пленкой  $\text{GeO}_x$  ( $d = 100 \text{ нм}$ ), так и с мультислойной структурой из 10 пар тонких слоев  $\text{GeO}_x(2 \text{ нм})/\text{SiO}_2(4 \text{ нм})$ , полученных методом попеременного испарения порошка  $\text{GeO}_2$  и плавящего кварца электронным лучом в камере высокого вакуума. Осаждаемый оксид кремния по составу