

# Инфракрасные спектры пропускания фотолуминесцентных пленок оксидов с Si-, Ge-квантовыми точками, сформированных импульсным лазерным осаждением

© И.П. Лисовский, С.А. Злобин, Э.Б. Каганович<sup>¶</sup>, Э.Г. Манойлов, Е.В. Бегун

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

(Получена 27 июня 2007 г. Принята к печати 21 августа 2007 г.)

Изучается состав фотолуминесцентных пленок низкоразмерных кремния и германия. Пленки оксидов кремния, германия и алюминия, содержащие Si-, Ge-квантовые точки, получены импульсным лазерным осаждением. Измерены инфракрасные спектры пропускания в диапазоне волновых чисел  $650\text{--}1400\text{ см}^{-1}$  и спектры фотолуминесценции с временным разрешением в диапазоне энергий  $1.4\text{--}3.2\text{ эВ}$  при комнатной температуре. Установлены взаимосвязи между условиями формирования пленок, их фотолуминесцентными свойствами и валентными колебаниями связей Si–O–Si, Ge–O–Ge, Al–O.

PACS: 78.55.-m, 78.55.Ap, 78.67.Bf, 78.67.Hc

## 1. Введение

Пленки оксидов с Si-, Ge-нанокристаллами (НК) являются объектами изучения Si-, Ge-квантовых точек (КТ) и разработки на их основе новых наноструктур излучателей на кремнии, устройств энергонезависимой памяти и др. Как правило, Si-, Ge-НК погружены в матрицы их оксидов ( $\text{SiO}_x$ ,  $\text{GeO}_x$ ,  $1 < x \leq 2$ ). Сегодня предложено использование „high K“ диэлектриков [1] со значением относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , большей, чем у  $\text{GeO}_2$  ( $\epsilon = 2.59$ ) и  $\text{SiO}_2$  ( $\epsilon = 3.9$ ), в частности — оксид алюминия ( $\epsilon = 10$ ) в качестве матрицы Si-, Ge-НК [2]. Это связано прежде всего с задачами дальнейшего уменьшения размеров подзатворного туннельного диэлектрика. С увеличением значения  $\epsilon$  диэлектрика увеличивается и возможность повышения концентрации Si-, Ge-НК без ухудшения условий их пространственного ограничения.

Si-, Ge-КТ обладают фотолуминесценцией (ФЛ) в видимой области спектра при комнатной температуре, природа ФЛ обусловлена излучательной аннигиляцией экситонов в Si-, Ge-НК [3,4]. Интенсивность видимой экситонной ФЛ определяется размерами НК, высотой потенциального барьера НК/оксид, эффектом диэлектрического усиления кулоновского взаимодействия электронно-дырочных пар и в значительной мере степенью подавления безызлучательной рекомбинации. Основными центрами безызлучательной рекомбинации являются оборванные, ненасыщенные связи кремния, германия, которые расположены как на поверхности НК, так и в  $\text{SiO}_x$ -,  $\text{GeO}_x$ -матрицах. От стехиометричности состава матрицы зависит не только увеличение высоты потенциального барьера НК/диэлектрик, но и уменьшение плотности центров безызлучательной рекомбинации. С увеличением значения  $\epsilon$  матрицы уменьшается проявление эффекта диэлектрического усиления, а следовательно, интенсивности экситонной ФЛ Si-, Ge-КТ. От-

сюда важность влияния барьерной фазы на фотолуминесцентные свойства Si-, Ge-КТ. Одним из эффективных способов контроля состава матрицы является измерение спектров инфракрасного (ИК) пропускания [5–7].

Среди различных способов формирования фотолуминесцентных пленок с Si-, Ge-КТ обосновано выделяется метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО) благодаря низкотемпературности, одностадийности процесса, гибкости управления его параметрами [3–6]. Цель данной работы — используя метод ИЛО для формирования пленок оксидов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с Si-, Ge-НК и методы ИК-, ФЛ-спектроскопии, изучить взаимосвязи между условиями формирования Si-, Ge-КТ, составом их барьерной фазы и фотолуминесцентными свойствами пленок.

## 2. Методика эксперимента

Кремниевые и германиевые квантовые точки формировали импульсным лазерным осаждением пленок оксидов  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{GeO}_x$  ( $x \rightarrow 2$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , содержащих Si-, Ge-НК, на Si-подложку. В качестве мишени использовали монокристаллические Si, Ge,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (или Si + Ge), а также пластины Si, Ge с нанесенной пленкой алюминия, золота (около 100 нм), площадь поверхности которых составляла 2–20 и 1–2% от площади мишени соответственно. Подложку располагали в плоскости мишени. Пленка формировалась из обратного потока частиц эрозионного факела в атмосфере аргона при давлениях 13.5 Па. Луч ИАГ:  $\text{Nd}^{3+}$ -лазера (длина волны 1.06 мкм, длительность импульса 10 нс и их частота 25 Гц, энергия в импульсе 0.2 Дж), работающего в режиме модулированной добротности, сканировал мишень. Плотность энергии облучения Si-мишени составляла 20 Дж/см<sup>2</sup>, а Ge-мишени — 5–20 Дж/см<sup>2</sup>. Время осаждения пленок 30–60 мин, толщины пленок достигали 1 мкм.

ИК-спектры пропускания измеряли в диапазоне волновых чисел  $650\text{--}1400\text{ см}^{-1}$  на автоматизированном

<sup>¶</sup> E-mail: dept\_5@isp.kiev.ua

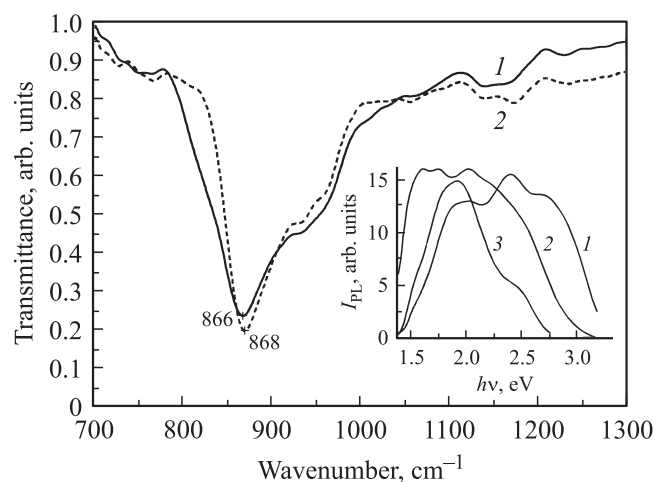
спектрометре ИКС-25М. Был проведен анализ формы полосы поглощения на валентных колебаниях атомов мостикового кислорода в осциллирующей молекуле Si–O–Si, который позволяет оценить содержание молекулярных комплексов Si–O<sub>y</sub>–Si<sub>4–y</sub> ( $1 \leq y \leq 4$ ). Для этого полоса поглощения (положение максимума в области 1050–1080 см<sup>-1</sup>) математически разлагалась на составляющие гауссовой формы, положение которых позволяло определить угол связи Si–O–Si и выделить указанные выше элементы структуры пленки в рамках модели случайной связи [7]. Среднеквадратичное отклонение суммы гауссовых профилей от экспериментальной кривой не превышало 10<sup>-2</sup>.

Спектр ФЛ с временным разрешением измеряли в диапазоне энергий 1.4–3.2 эВ при возбуждении излучением азотного лазера (длина волны 337 нм, длительность импульса 8 нс) и стробоскопической регистрации сигнала в режиме счета фотонов. Ширина строба составляла 250 нс. Стабильность ФЛ оценивали по изменению ее интенсивности как во времени хранения образцов на воздухе, так и в процессе облучения их азотным лазером.

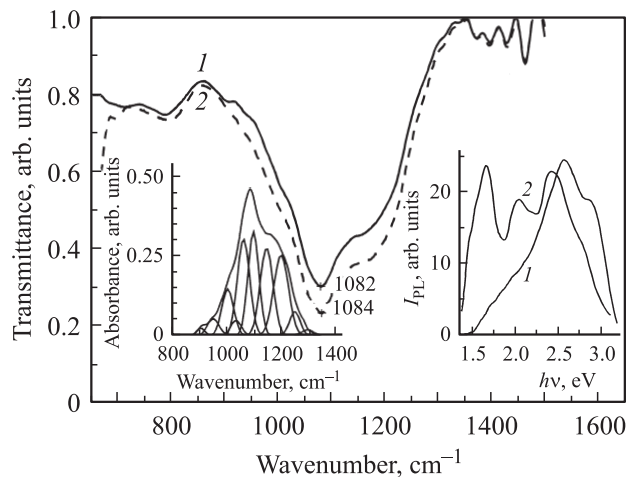
### 3. Результаты и их обсуждение

#### 3.1. Спектры ИК-пропускания

На рис. 1 представлены спектры ИК-пропускания пленок, полученных при облучении Ge-мишени. Сильная полоса поглощения с минимумом прозрачности при ~866 см<sup>-1</sup> связывается обычно с валентными колебаниями Ge–O-связей [8] и свидетельствует о том, что нанесенные пленки представляют собой оксид германия. Легирование золотом практически не влияло на положение полосы поглощения образца, однако существенно усиливало ее интенсивность в свеженанесенных пленках.



**Рис. 1.** Спектры ИК-пропускания пленок системы Ge-NK/GeO<sub>2</sub>: 1 — нелегированная; 2, 3 — легированная золотом. На вставке — их спектры ФЛ в диапазоне времен,  $\tau$ : 1 —  $0 < \tau < 150$  нс, 2 —  $0 < \tau < 250$  нс, 3 —  $250$  нс  $< \tau < 15$  мкс.



**Рис. 2.** Спектры ИК-пропускания пленок системы Ge-NK/SiO<sub>2</sub>: 1 — нелегированная; 2 — легированная золотом. На вставке справа — их спектры ФЛ в диапазоне времен,  $\tau$ : 1 —  $0 < \tau < 150$  нс, 2 —  $0 < \tau < 6$  мкс. На вставке слева — разложение полосы при 1082 см<sup>-1</sup> на составляющие.

Этот факт свидетельствует об увеличении концентрации связей Ge–O, иными словами, атомы золота в процессе формирования усиливают эффективность окисления атомов германия. Увеличение концентрации Ge–O-связей при практически неизменном составе оксида означает уплотнение оксидной матрицы. Аналогичный эффект был обнаружен нами ранее для случая систем Si-NK в SiO<sub>2</sub>-матрицы [5] и является, по-видимому, общим для всех рассматриваемых наноструктур. В легированных золотом пленках увеличение концентрации Si–O<sub>4</sub> и Ge–O<sub>4</sub> тетраэдров, локализация связей Si–O, Ge–O может приводить к увеличению размеров Si-, Ge-NK.

Со временем хранения пленок на воздухе, как следствие их значительной пористости, имеет место диффузия атомов кислорода из атмосферы в пленки. При этом нелегированные пленки более рыхлые, менее стехиометричного состава, окисляются сильнее, чем легированные золотом. На рис. 1 (кривая 1) дан ИК-спектр пропускания нелегированной пленки, измеренный после хранения на воздухе. Из рис. 1 видно, что основная полоса пропускания в нелегированной пленке сильнее, чем в легированной золотом (рис. 1, кривая 2), что свидетельствует о большем увеличении Ge–O-связей в нелегированной пленке при хранении на воздухе.

На рис. 2 представлены спектры ИК-пропускания пленок, полученных при использовании мишени состава Ge + Si. Интенсивная полоса поглощения при ~1082 см<sup>-1</sup> в спектре указывает на то, что пленка представляет собой оксид кремния. Положение минимума полосы пропускания свойственно стехиометричному оксиду кремния [9]. Однако математическое разложение полосы поглощения на составляющие гауссовой формы (см. вставку на рис. 2) демонстрирует, что наряду с гауссианами (1058 и 1095 см<sup>-1</sup>), присущими поперечной

моде валентных колебаний мостикового кислорода в тетраэдрах Si—O<sub>4</sub> [7,10], присутствуют и составляющие (999 и 1030 см<sup>-1</sup>), характерные для фазы SiO<sub>x</sub> и приписываемые молекулярным кластерам слабоокисленного кремния Si—O—Si<sub>3</sub> и Si—O—Si<sub>2</sub> соответственно [11,12]. Подобная ситуация встречалась ранее при исследовании структуры скрытого окисного слоя в системах кремний-на-диэлектрике [13]. Таким образом, пленка представляет собой смесь фаз SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>x</sub>. Об этом свидетельствует и наличие в спектре поглощения достаточно сильных составляющих при 1198 и 1249 см<sup>-1</sup>, обусловленных продольной модой валентных колебаний мостикового кислорода, которые проявляются в пленках стехиометричного или субстехиометричного ( $x \approx 2$ ) оксида кремния [10]. Фаза SiO<sub>x</sub> локализована, скорее всего, в переходных слоях, окружающих нановключения.

Данные ИК-спектроскопии, полученные нами ранее для нелегированной системы Si-НК/SiO<sub>2</sub> [5], свидетельствовали о том, что оксидная матрица представляет собой нестехиометрический оксид кремния. Из сказанного выше можно заключить, что присутствие атомов германия усиливает процесс окисления кремния. Объясняется это тем, что имеет место окислительно-восстановительная реакция взаимодействия Si + GeO<sub>2</sub> = Ge + SiO<sub>2</sub>, приводящая к усилению колебаний в тетраэдрах Si—O<sub>4</sub>.

Добавка золота усиливает процесс создания кремний-кислородных мостиков Si—O—Si. Действительно, как видно из рис. 2, наблюдается как слабый (2 см<sup>-1</sup>) сдвиг полосы пропускания в высокочастотную область, так и существенное (~24%) увеличение ее площади (т.е. концентрации Si—O-связей). В спектрах поглощения пленок, полученных при использовании мишени Ge + Si, проявляются также две составляющие с малой интенсивностью при 900 и 945 см<sup>-1</sup>. Их можно связать с поглощением на валентных колебаниях Ge—O-связи в фазе GeO<sub>2</sub> [14]. Составляющая 900 см<sup>-1</sup> характеризует стеклообразную GeO<sub>2</sub>-фазу, а полоса 945 см<sup>-1</sup> свойственна для тетрагональных кристаллов GeO<sub>2</sub> типа рутила. Вполне вероятно предположить, что германиевые нанокристаллы, встроенные в кремний-кислородную матрицу, непосредственно окружены очень тонким буферным слоем GeO<sub>2</sub>.

На рис. 3 представлены спектры ИК-пропускания пленок, полученных при Al-, Al + Ge-, Al + Si-мишенях. Спектр пропускания пленок, нанесенных при использовании Al-мишени (рис. 3, кривая 1), в измеренном диапазоне длин волн представляет собой плавную кривую, являющуюся правым крылом полосы пропускания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со слабыми пиками поглощения при ~680, 740, 780, 1000 и 1090 см<sup>-1</sup>, соответствующими его различным модификациям (аморфный окисел,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, лейкосапфир) [14]. Эта плавная кривая сохраняется в ИК-спектрах пропускания пленок, полученных при Al + Ge-, Al + Si-мишенях, что подтверждает присутствие в их составе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-фазы.

В спектрах пропускания образцов, полученных при использовании мишени состава Al + Si (рис. 3, кривая 5),

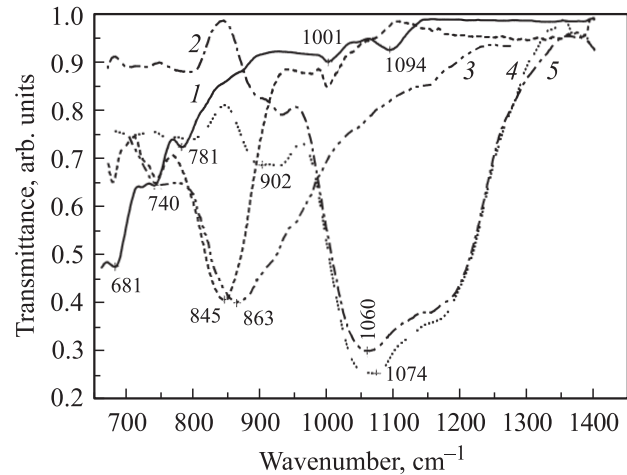


Рис. 3. Спектры ИК-пропускания пленок: 1 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2, 3 — системы Ge-НК/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4, 5 — системы Si-НК/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2, 4 — нелегированных, 3, 5 — легированных золотом.

является мощная полоса с пиком 1074 см<sup>-1</sup>, свойственная субстехиометричным оксидам кремния (SiO<sub>x</sub>,  $x \approx 1.8$ ). Разложение указанной полосы на составляющие демонстрирует, как и в случае Si-мишени, наличие смеси фаз SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>x</sub>, однако присутствие Al усиливает вклад полос ~1000 и ~1030 см<sup>-1</sup>, характерных для фазы SiO<sub>x</sub>. Иными словами, атомы Al способствуют частичному уходу кислорода из тетраэдров Si—O<sub>4</sub>, в результате последние превращаются в молекулярные кластеры слабоокисленного кремния Si—O—Si<sub>3</sub> и Si—O<sub>2</sub>—Si<sub>2</sub> [11,12]. Подобный процесс наблюдался ранее [15] на границе раздела Al—SiO<sub>2</sub> в МДП-структурах при их прогревах. Отметим, что обнаруженный эффект влияния алюминия на степень окисления кремния проявляется как в нелегированных пленках, так и в пленках, легированных золотом.

Для образцов, полученных при использовании мишени Al + Ge, на фоне спектра Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> присутствует интенсивная полоса пропускания с пиком ~845 см<sup>-1</sup> (см. рис. 3, кривая 2). Ее низкочастотный сдвиг (на ~15 см<sup>-1</sup>) по сравнению со спектрами пропускания образцов состава Ge-НК/GeO<sub>x</sub> объясняется усилением нестехиометрии оксида германия. Атомы Al и в этом случае эффективно связываются с кислородом, приводя к образованию слабоокисленных германий-кислородных молекулярных комплексов.

Соотношение площадей полос поглощения на валентных колебаниях кислорода в связях Si—O—Si и Ge—O—Ge, в нелегированных и легированных золотом пленках систем Si-НК/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ge-НК/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, как и системы Ge/GeO<sub>2</sub> (см. выше), определяется естественно соотношением содержащихся в них атомов кислорода. Так, если в нелегированных пленках, хранящихся на воздухе, содержание кислорода выше, чем в пленках, легированных золотом, то это приводит к сдвигу полосы поглощения в высокочастотную область спектра и к

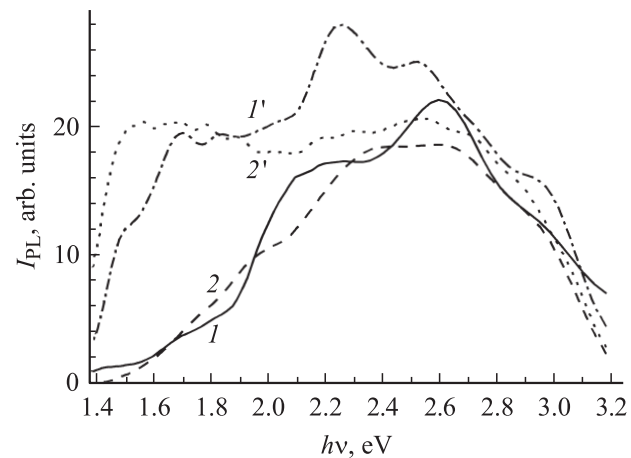
увеличению ее площади. Именно эта ситуация продемонстрирована для системы Si-НК/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 3, кривые 4, 5) для нелегированных пленок, спектр которых измеряли после хранения на воздухе. Так, в пленках, легированных золотом, концентрация кислорода в которых меньше, наблюдалось более эффективное формирование слабоокисленных комплексов Si—O—Si<sub>3</sub> и Si—O<sub>2</sub>—Si<sub>2</sub>. В результате положение максимума полосы поглощения смещается в низкочастотную область (от 1074 до 1060 см<sup>-1</sup>), характерную для фазы SiO<sub>x</sub>,  $x = 1.65$ , а также несколько (на 7%) уменьшается площадь полосы.

Противоположная ситуация продемонстрирована на рис. 3 (кривые 2, 3) для свежеприготовленных нелегированных пленок системы Ge-НК/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В легированных золотом пленках концентрация атомов кислорода больше, что определяется проявлением каталитических свойств золота в процессе окисления атомов Ge при формировании GeO<sub>x</sub>-фазы. В этих пленках минимум полосы сдвинут в высокочастотную область спектра на 18 см<sup>-1</sup> (от 845 до 863 см<sup>-1</sup>), площадь полосы значительно (на 47%) увеличена.

### 3.2. Спектры фотолюминесценции

На рис. 1, 2, 4 представлены спектры ФЛ с временным разрешением пленок, спектры ИК-пропускания которых были рассмотрены выше. К общим свойствам фотолюминесцентных пленок относится следующее. При малых временах измерения ФЛ ( $0 < t < 250$  нс) диапазон энергий излучения составляет 1.4–3.2 эВ. Времена релаксации ФЛ лежат в диапазоне значений от десятков наносекунд до десятков микросекунд. Спектры многомодовые, содержат несколько полос с максимумами интенсивности ФЛ, расположенными обычно при 1.6–1.7, 1.9–2.1, 2.5–2.6 и 2.8–2.9 эВ. Спектры ФЛ, измеренные при больших (микросекундных) временах релаксации, сдвинуты в область более низких энергий излучения. Спектры ФЛ пленок, легированных золотом, также более низкоэнергетические. Наблюдаемые характеристики ФЛ аналогичны тем, что присущи детально исследованным пленкам системы Si-НК в SiO<sub>2</sub>-матрице [3,5]. Напомним, что их природа связана с излучательной аннигиляцией экситонов в НК.

В нелегированных пленках системы Ge-НК/GeO<sub>2</sub> спектр ФЛ характеризуется тремя полосами с максимумами интенсивности при 2.0, 2.5 и 2.9 эВ (см. вставку на рис. 1, кривая 1). Пленки получены при высокой (20 Дж/см<sup>2</sup>) плотности энергии облучения мишени, что определяет присутствие в эрозионном факеле Ge-наночастиц с широким диапазоном значений их размеров. Но давления аргона малы (13.5 Па), при этом примеси кислорода в аргоне недостаточно для пассивации ненасыщенных связей крупных Ge-НК. Поэтому спектр ФЛ находится в более высокоэнергетической области и характеризуется малыми временами релаксации ФЛ (< 150 нс).



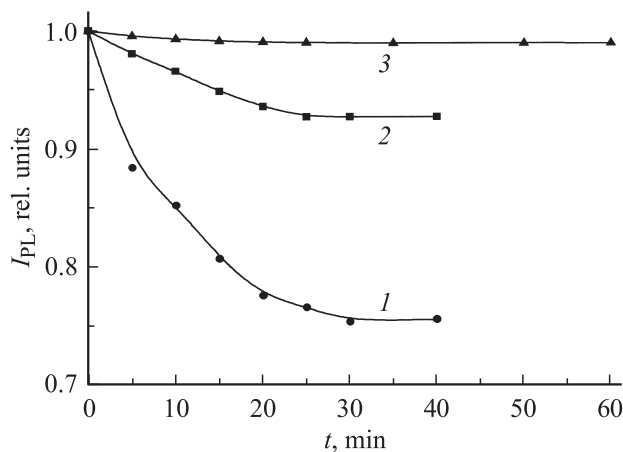
**Рис. 4.** Спектры ФЛ в диапазоне времен  $0 < \tau < 250$  нс пленок систем: 1, 1' — Ge-НК/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2, 2' — Si-НК/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1, 2 — нелегированной, 1', 2' — легированной золотом.

При легировании золотом в спектре проявляются более крупные Ge-НК. Это связано с тем, что, во-первых, атомы золота выступают как центры кристаллизации Ge-НК, а во-вторых, с тем, что, обладая большим значением электроотрицательности, они насыщают оборванные связи атомов Ge, количество которых пропорционально размерам НК. Поэтому спектр ФЛ смещается в низкоэнергетическую область и времена релаксации ФЛ возрастают до десятков микросекунд (рис. 1, кривые 2, 3).

В спектрах ФЛ пленок систем Ge-НК/SiO<sub>x</sub> ( $1 < x < 2$ ) и Ge-НК/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , легированных золотом, наиболее четко выражены несколько полос с максимумами при 1.7, 1.8–2.1, 2.2 и 2.5 эВ (см. вставку на рис. 2, кривая 2, и рис. 4, кривая 1'). Заметим, что обычно на спектрах ФЛ легированных золотом пленок системы Si-НК/SiO<sub>x</sub> наблюдали две полосы: низкоэнергетическую с максимумом при 1.6 эВ и высокоэнергетическую при 2.3–2.4 эВ с характерным провалом при 1.9 эВ [3]. На рис. 4, кривая 2', продемонстрировано, что для легированных золотом пленок системы Si-НК/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  тенденция бимодовости спектра ФЛ сохраняется. Спектры ФЛ нелегированных пленок систем Ge(Si)-НК/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 4, кривые 1, 2) сдвинуты в высокоэнергетическую часть спектра, отдельные полосы четче выражены для пленок системы Ge-НК/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Многомодовость спектра ФЛ пленок с Ge-КТ определяется многомодальным спектром размеров Ge-КТ при высоких уровнях плотности энергии облучения мишени. Топометрические исследования поверхности пленок методом сканирующей атомной микроскопии свидетельствуют в пользу этого предположения.

В то время как фотолюминесцентные свойства пленок, легированных золотом, стабильны при хранении их на воздухе, в нелегированных резко, на порядок по величине, увеличивается интенсивность ФЛ и времена релаксации ФЛ (от 10<sup>2</sup> до 10<sup>3</sup> нс). Это объясняется





**Рис. 5.** Нестабильность интенсивности ФЛ во времени при облучении пленок системы Ge-НК/GeO<sub>2</sub>: 1 — нелегированной, 2 — легированной золотом и 3 — нелегированной системы Ge-НК/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

пассивацией кислородом воздуха оборванных связей Si, Ge, подавлением безызлучательного канала рекомбинации. Наблюдаемое улучшение фотолюминесцентных свойств коррелирует с приведенными выше данными по измерениям спектров ИК-пропускания, свидетельствующими об увеличении степени стехиометричности состава оксидов.

На рис. 5 представлены результаты исследования нестабильности ФЛ во времени при воздействии лазерного облучения с длиной волны 337 нм пленок систем Ge-НК/GeO<sub>2</sub> и Ge-НК/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Из рис. 5 видно, что, как и в случае системы Si-НК/SiO<sub>2</sub> [3,5], при легировании золотом стабильность ФЛ пленок резко возрастает. Наибольшей стабильностью ФЛ обладают пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Поэтому, несмотря на то что введение Al снижает степень стехиометрии SiO<sub>x</sub>- и GeO<sub>x</sub>-фаз, не позволяет улучшить интенсивность ФЛ, использование матрицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для Si-, Ge-НК надежно обеспечивает стабильность фотолюминесцентных свойств пленок.

#### 4. Заключение

Методом импульсного лазерного осаждения из обратного потока частиц эрозионного факела с использованием мишеней состава Ge, Ge + Si, Ge(Si) + Al получены фотолюминесцентные пленки с Si-, Ge-квантовыми размерными нанокристаллами, погруженными в матрицы оксидов германия, кремния, алюминия. Спектр ФЛ пленок лежит в диапазоне 1.4–3.2 эВ, времена релаксации ФЛ составляют от десятков наносекунд до десятков микросекунд. Наибольшей стабильностью ФЛ характеризуются Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-пленки.

По данным спектров ИК-пропускания определены колебательные моды связей Si–O–Si, Ge–O–Ge, Al–O барьерной фазы квантовых точек в зависимости от условий получения пленок. Показано, что введение золота в

процессе формирования SiO<sub>x</sub>- и GeO<sub>x</sub>-пленок приводит к увеличению степени их стехиометрии. При облучении Ge + Si-мишени состав пленок представляет собой смесь фаз SiO<sub>x</sub> и SiO<sub>2</sub>. В присутствии Ge состав пленок более стехиометричен. Доля GeO<sub>2</sub>-фазы незначительна.

Установлено, что при использовании мишеней состава Si(Ge) + Al атомы Al интенсивно связываются с кислородом, отбирая его от кремний (германий)-кислородных молекулярных комплексов, что усиливает нестехиометричность состава Si(Ge) оксидных фаз.

Обнаружено, что в нелегированных пленках GeO<sub>x</sub>, SiO<sub>x</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>x</sub>(GeO<sub>x</sub>), вследствие их пористости при хранении на воздухе, состав оксидных фаз Si(Ge) становится более стехиометричным, в то время как в легированных золотом пленках он не изменяется. Этим объясняется улучшение фотолюминесцентных свойств нелегированных пленок при хранении их на воздухе.

#### Список литературы

- [1] J. Robertson. Rep. Progr. Phys., **69**, 327 (2006).
- [2] P.P. Ong, Y. Zhu. Physica E, **15**, 118 (2002).
- [3] A.V. Sachenko, I.O. Sokolovsky, E.B. Kaganovich, E.G. Manoilov. Ukr. J. Phys., **51** (8), 800 (2006).
- [4] Э.Б. Каганович, Э.Г. Манойлов, Е.В. Бегун. ФТП, **41** (2), 177 (2007).
- [5] I.P. Lisovskii, V.G. Litovchenko, D.O. Mazunov, E.B. Kaganovich, I.M. Kizak, E.G. Manoilov. Ukr. J. Phys., **50** (6), 583 (2005).
- [6] Э.Б. Каганович, И.П. Лисовский, Э.Г. Манойлов, С.А. Злобин. ФТП, **40** (4), 449 (2006).
- [7] I.P. Lisovskii, V.G. Litovchenko, V.B. Lozinskii, G.I. Steblovskii. Thin Sol. Films, **213**, 164 (1992).
- [8] J.-Y. Zhang, X.-M. Bao, Y.-H. Ye. Thin Sol. Films, **323**, 68 (1998).
- [9] I.W. Boyd, J.B.L. Wilson. J. Appl. Phys., **53** (6), 4166 (1982).
- [10] A. Lehmann, L. Schumann, K. Huber. Phys. Status Solidi B, **117** (2), 689 (1983).
- [11] I.P. Lisovskii, V.G. Litovchenko, V.B. Lozinskii, H. Flietner, W. Fussel, E.G. Schmidt. J. Non-Cryst. Sol., **187**, 91 (1995).
- [12] G. Perez, J.M. Sanz. Thin Sol. Films, **416**, 24 (2002).
- [13] I.P. Lisovskii, A.G. Revesz, H.L. Hughes. Electronchem. Soc. Proc., **3**, 133 (1996).
- [14] *Инфракрасные спектры неорганических стекол и кристаллов*, под ред. В.А. Флоринской (Л., Химия, 1972).
- [15] Ф.Л. Эдельман. *Структура компонентов БИС* (Новосибирск, Наука, 1980).

Редактор Л.В. Беляков

## Infrared transmission spectra of oxide photoluminescent films with Si, Ge quantum dots obtained by pulsed laser deposition

*I.P. Lisovskii, S.A. Zlobin, E.B. Kaganovich,  
E.G. Manoilov, E.V. Begun*

V.E. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kiev, Ukraine

**Abstract** Composition of low-dimensional silicon and germanium photoluminescent films are studied. The films of silicon, germanium, aluminium oxides contained Si, Ge quantum dots have been obtained by pulsed laser deposition. Infrared transmission spectra in the range of wavenumbers  $650\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$  and time-resolved photoluminescence spectra in the range of radiative energy  $1.4\text{--}3.2\text{ eV}$  at room temperature have been measured. The relations between the conditions of films formation, their photoluminescent properties and the vibration of Si–O–Si, Ge–O–Ge, Al–O valent bonds were determined.