

нации на донорно-акцепторных парах. Тогда полосы N, P и K можно отнести к излучательной рекомбинации на донорно-акцепторных парах (DAP-рекомбинация). В частности возможными центрами излучательной рекомбинации могут быть собственные структурные дефекты кристаллической решетки CuInSe<sub>2</sub> – InCu (или Cui) для полосы M2, акцептор CuIn для полосы P [1].

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Mudryi, A.V.* Optical characterisation of high-quality CuInSe<sub>2</sub> thin films synthesised by two-stage selenisation process / A.V. Mudryi [et. al.] // Thin Solid Films. 2003. Vol. 431-432. P. 193.
2. *Jackson, P.* Compositional investigation of potassium doped Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with efficiencies up to 20.8% / P. Jackson [et. al.] // Phys. Status Solidi RRL. 2014. Vol. 8. № 3. P. 219.
3. *Tanino, H.* Raman spectra of CuInSe<sub>2</sub> / H. Tanino [et. al.] // Phys. Rev. B. 1992. Vol. 45. №23. P. 45.

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК InN, ОСАЖДЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

В. Д. Живулько<sup>1</sup>, А. В. Мудрый<sup>1</sup>, W. J. Schaff<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «НИЦ по материаловедению НАН Беларусь», vad.zhiv@gmail.com

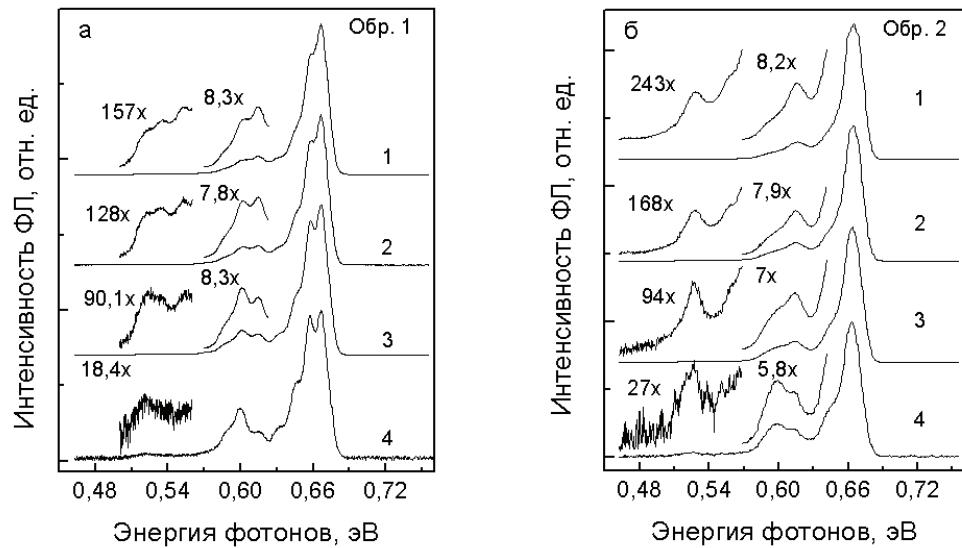
<sup>2</sup>Cornell University, New York, USA

В настоящее время нитридные соединения AlN, GaN и InN являются наиболее востребованными полупроводниками, обеспечивающими создание светоизлучающих диодов для широкого спектрального диапазона от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области спектра. Прежде всего, отметим, что наибольший интерес представляет твердые растворы AlGaN на основе более широкозонных полупроводников AlN с  $E_g \sim 6.2$  эВ и GaN с  $E_g \sim 3.4$  эВ для ультрафиолетовой области спектра. Однако, недавно найденное новое значение ширины запрещенной зоны  $E_g \sim 0.7$  эВ для нитрида индия InN, стимулирует исследователей для использования твердых растворов InGaN и расширения спектрального диапазона вплоть до инфракрасной области спектра (~2 мкм) [1]. Поэтому в последние годы уделяется все больше внимания изучению физических свойств InN [2].

В настоящей работе исследования фотoluminesценции (ФЛ) проводились на тонких пленках InN, осажденных на сапфировые подложки с использованием метода молекуллярно-лучевой эпитаксии. Толщина осажденных тонких пленок InN составляла ~ 7 – 12 мкм. Измерения, проведенные с использование эффекта Холла, показали, что материал обладает n-типов проводимости с концентрацией электронов для образцов 1 и 2 составляет  $n_e \sim 3.6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $n_e \sim 5.4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , соответственно. Следует отметить, что эти значения концентраций электронов для тонких пленок InN являются самыми низкими среди известных к настоящему времени.

На рис. 1 представлены спектры ФЛ InN, снятые при 4.2 К со спектральным разрешением 3 мэВ для образцов 1 и 2. Как видно из рис. 1a, для спектров, снятых для различных плотностей мощности возбуждения, характерно присутствие нескольких полос. Приведенные спектры были нормированы на максимум интенсивности самой высокоэнергетической полосы с максимумом 0.663 эВ. На рис. 1a возле менее интенсивных низкоэнергетических полос указаны коэффициенты усиления по отношению к интенсивности высокоэнергетической полосы. Прежде всего отметим высо-

кую интенсивность люминесценции образца 1 и относительную малую полуширину  $\sim 23$  мэВ близкраевой полосы люминесценции 0.663 эВ.



*Rис. 1.* Спектры ФЛ тонких пленок InN с концентрацией электронов  $n_e \sim 3.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (а) и  $n_e \sim 5.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (б), снятые при 4.2 К для различной плотности мощности возбуждения ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ): 1 – 7.50, 2 – 2.92, 3 – 0.97, 4 – 0.11

Эти факты свидетельствуют об относительно высоком качестве кристаллической и электронной структуры, выращенных тонких пленок InN. Как правило, полуширина полос в области края фундаментального поглощения для InN с концентрацией электронов  $n_e \sim 5 \times 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$  по данным исследований составляет  $\sim 40 - 100$  мэВ. Такое большое значение полуширины полосы близкраевой люминесценции связывается с наличием внутренних напряжений в пленках и большой концентрации ростовых дефектов. Эксперименты показали, что в спектрах ФЛ в низкоэнергетической области от близкраевой полосы с максимумом  $\sim 0.663$  эВ наблюдаются менее интенсивные полосы с несколькими максимумами в области 0.600 эВ и 0.615 эВ и сопутствующая им широкая полоса  $\sim 0.524$  эВ. Учитывая энергетический зазор между обеими полосами  $\sim 76$  мэВ и их соотношение интенсивностей  $\sim 20$ , не изменяющееся от плотности мощности возбуждения, можно предположить, что полоса 0.524 эВ является фононным повторением основной полосы 0.600 эВ. Как известно, энергия продольных оптических фононов в соединении InN по данным измерения спектров комбинационного рассеяния света составляет  $\sim 73 - 75$  мэВ [2-4].

Таким образом, полоса в области энергий 0.600 эВ может быть отнесена к излучательной рекомбинации вырожденных электронов с дырками, захваченными на глубокие акцепторные уровни, а полоса 0.524 эВ является LO фононным повторением. Полоса близкраевой люминесценции 0.663 эВ может быть обусловлена излучательными переходами зона – мелкие акцепторы, т. е. рекомбинацией свободных электронов с дырками, локализованными на мелких акцепторах с энергией ионизации 5 – 10 мэВ. Проведенные эксперименты по зависимости спектров люминесценции от

плотности мощности возбуждения подтверждают такую интерпретацию. Как видно из рис. 1а, с уменьшением плотности мощности возбуждения интенсивность полосы 0.663 эВ уменьшается, при этом спектральное положение и полуширина не изменяются. Эти факты указывают на отсутствие заметного влияния флуктуаций потенциала в кристаллической решетке InN на энергетические состояния акцепторов и энергетическое состояние свободных электронов и дырок при уровне легирования  $n_e \sim 3.5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  для InN. Наиболее важным является перераспределение интенсивности сигналов люминесценции в области энергий  $\sim 0.600 - 0.614$  эВ, отнесенной нами к излучательной рекомбинации на глубоких акцепторных уровнях. Из рис. 1а видно, что при высоком уровне возбуждения (спектр 1) максимум полосы регистрируется в области  $\sim 0.614$  эВ. При уменьшении плотности мощности возбуждения интенсивность полосы в этой спектральной области начинает уменьшаться и уже при плотностях мощности возбуждения  $\sim 0.11 \text{ Вт/см}^2$  в спектрах ФЛ начинает доминировать полоса с максимумом  $\sim 0.600$  эВ, рис. 1а. При этом синхронно происходит перераспределение интенсивности в области максимума полосы LO-фононного повторения, что подтверждает связь обоих полос 0.600 эВ и 0.524 эВ с одним механизмом рекомбинации, т.е. полоса 0.524 эВ является фононным повторением полосы 0.600 эВ. Перераспределение интенсивности в области максимумов  $\sim 0.600$  эВ и 0.614 эВ следует отнести к наличию двух глубоких акцепторных уровней с энергетическим зазором между ними  $\sim 14$  мэВ.

На рис. 1б представлены спектры ФЛ тонких пленок InN с концентрацией электронов  $n_e \sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (образец 2). Как видно, для образца 2 в спектрах ФЛ наблюдается полоса близкрайевой люминесценции с максимумом  $\sim 0.664$  эВ и полушириной  $\sim 20$  мэВ. Меньшее значение полуширины близкрайевой полосы  $\sim 20$  мэВ для образца 2 по сравнению со значением полуширины полосы  $\sim 23$  мэВ для образца 1 указывает на более высокое структурное совершенство образца 2. Как видно из рис. 1б при уменьшении плотности мощности возбуждения наблюдаются перераспределение интенсивности люминесценции между максимумами двух полос  $\sim 0.614$  эВ и  $\sim 0.598$  эВ и незначительное изменение спектральной формы полосы LO фононного повторения  $\sim 0.527$  эВ.

Проведенные эксперименты по анализу зависимости спектров ФЛ от плотности мощности возбуждения на образцах InN с относительно низкой концентрацией  $\sim 3.6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $\sim 5.4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  указывают на существование в запрещенной зоне двух энергетических уровней с энергией ионизации  $\sim 55 - 70$  мэВ с относительным расщеплением на уровне  $\sim 14$  мэВ. Обнаружение двух акцепторных уровней, по-видимому, связано с расщеплением валентной зоны соединения InN из-за спин-орбитального и кристаллического расщепления по аналогии со строением энергетической валентной зоны для нитридного полупроводникового соединения GaN, со структурой вюрцита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Davydov, V. Yu. Absorption and emission of hexagonal InN. Evidence of narrow fundamental band gap / V. Yu. Davydov [et. al.] // Phys. Stat. Sol. (b). 2002. Vol. 229. №3. P. R1.Боярская, Ю.С. Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость. Кишинев: Штиинца, 1972. 235 с.
2. Wu, J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives / J. Wu // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. №1. P. 011101.
3. Cusco, R. Raman scattering study of the long-wavelength longitudinal-optical-phonon-plasmon coupled modes in high-mobility InN layers / R. Cusco [et. al.] // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79. №15. P. 155210.
4. Давыдов, В.Ю. Резонансное рамановское рассеяние и дисперсия полярных оптических и акустических фонов в гексагональном InN / В.Ю. Давыдов [и др] // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. №2. С. 170.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК InN НА САПФИРЕ

В. Д. Живулько<sup>1</sup>, А. В. Мудрый<sup>1</sup>, W. J. Schaff<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «НПЦ по материаловедению НАН Беларусь», vad.zhiv@gmail.com

<sup>2</sup>Cornell University, New York, USA

Полупроводниковые твердые растворы  $In_xGa_{1-x}N$  являются одними из самых перспективных материалов современной оптоэлектроники для светодиодов видимой области спектра, а также лазеров с голубым свечением, в частности, генерирующих на длине волны  $\sim 405$  нм. Одной из важных характеристик светодиодов и лазеров, создаваемых на основе твердых растворов  $In_xGa_{1-x}N$ , является способность функционировать в широком диапазоне температуры. Изменяя содержание индия в кристаллической решетке  $In_xGa_{1-x}N$  в широком диапазоне составов  $0 \leq x \leq 1$  можно управлять основным фундаментальным параметром твердых растворов – шириной запрещенной зоны  $E_g$  в спектральном диапазоне от 0.63 эВ (InN) до 3.40 эВ (GaN) [1,2]. Это позволяет смещать спектральную область работы светодиодов, создаваемых на основе твердых растворов  $In_xGa_{1-x}N$  в видимой и ближней инфракрасной области спектра [2]. Наибольший интерес представляет изучение твердых растворов с  $x = 1$ , т.е. полупроводникового соединения InN, как перспективного материала для высокоэффективных светодиодов в инфракрасной области спектра 2.0 – 1.8 мкм [3].

В настоящей работе исследовались гетероэпитаксиальные тонкие пленки InN, осажденные на наноразмерные слои GaN и AlN, которые были предварительно сформированы на сапфировых подложках с толщиной  $\sim 300$  мкм. Создание промежуточных нанослоев GaN и AlN было необходимо для более лучшего согласования параметров элементарной ячейки и коэффициентов термического расширения нитрида индия и сапфира. Толщина осажденных пленок InN составила  $\sim 0.35 - 0.60$  мкм. Тонкие пленки InN по данным измерения эффекта Холла имели n-тип проводимости и концентрацию электронов в диапазоне  $1 \times 10^{18} - 7 \times 10^{18}$  см $^{-3}$ .

Спектры низкотемпературной ( $\sim 4.2$  К) люминесценции исследовались в зависимости от плотности мощности возбуждения в диапазоне от 7.50 Вт/см $^2$  до 0.03 Вт/см $^2$ , а также от температуры в диапазоне 4.2 – 300 К. Исследование спектров фотолюминесценции от уровня возбуждения проводилось при непосредственном погружении образцов в жидкий гелий, что обеспечивало охлаждение образцов до