

## Излучательные свойства сильно легированных эпитаксиальных слоев нитрида индия

© Б.А. Андреев<sup>1</sup>, Д.Н. Лобанов<sup>1,¶</sup>, Л.В. Красильникова<sup>1</sup>, П.А. Бушуйкин<sup>1</sup>, А.Н. Яблонский<sup>1</sup>, А.В. Новиков<sup>1</sup>, В.Ю. Давыдов<sup>3</sup>, П.А. Юнин<sup>1</sup>, М.И. Калинин<sup>1</sup>, Е.В. Скороходов<sup>1</sup>, З.Ф. Красильник<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603087 Афонино, Кстовский район, Нижегородская обл., Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: dima@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 24 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2019 г.

Принята к публикации 29 апреля 2019 г.

Представлены результаты исследований спектров спонтанной фотолюминесценции и стимулированной эмиссии в эпитаксиальных слоях *n*-InN с концентрацией свободных электронов  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на сапфировых подложках с буферными слоями AlN и GaN. При росте InN в условиях обогащения азотом при повышении температуры роста до 470°C, близкой к началу разложения InN, наблюдалось улучшение кристаллического качества слоев и снижение порога возникновения стимулированного излучения. При переходе к условиям роста с обогащением металлом в спектрах спонтанной фотолюминесценции InN наблюдались две полосы эмиссии, разделенные интервалом в 100 мэВ. Для таких слоев отмечены значительное увеличение порога возникновения стимулированной эмиссии и в ряде случаев отсутствие перехода к ней. В работе приводится интерпретация наблюдаемых полос эмиссии и высказываются предположения об их природе.

**Ключевые слова:** нитрид индия, молекулярно-пучковая эпитаксия, фотолюминесценция, стимулированное излучение.

DOI: 10.21883/FTP.2019.10.48296.42

### 1. Введение

Интерес к исследованиям структур с нитридом индия в качестве активной среды определяется важными для развития электроники, фотовольтаики и оптоэлектроники в оптимальном для телекоммуникаций в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне свойствами этого материала: шириной прямой запрещенной зоны  $\sim 0.7 \text{ эВ}$ , высокой эффективностью излучательной релаксации, малой эффективной массой и высокой подвижностью электронов [1,2]. Одним из основных методов формирования структур с монокристаллическим InN является молекулярно-пучковая эпитаксия с плазменной активацией азота (МПЭПА) [3–5]. Развитие ростовых технологий позволило получить эпитаксиальные слои нитрида индия с концентрацией свободных электронов  $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [6] и нанопроволоки с  $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  [7]. Большинство из выращенных к настоящему времени эпитаксиальных слоев *n*-InN являются вырожденными полупроводниками с высокой концентрацией равновесных свободных носителей, что затрудняет исследование фотоэлектрических свойств [8]. Поэтому наиболее значимые результаты были получены в исследованиях оптических свойств нитрида индия. Была определена ширина запрещенной зоны [9], показана высокая эффективность спонтанной межзонной люминесценции [1], наблюдалась электролюминесценция диодных гетероструктур [10,11].

Недавно авторами настоящей работы получена стимулированная эмиссия на длинах волн  $\lambda = 1.9\text{--}1.6 \text{ мкм}$  при оптической накачке волноведущих гетероструктур InN/GaN/AlN/*c*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с активными слоями *n*-InN, содержащими от  $3.6 \cdot 10^{17}$  до  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  равновесных электронов [12].

Исследование связи ростовых и электрофизических параметров эпитаксиальных слоев с особенностями спектров спонтанной фотолюминесценции и с условиями возникновения стимулированной эмиссии InN представляет несомненный интерес. В данной работе при варьировании условий роста в ряде эпитаксиальных слоев InN, выращенных методом МПЭПА на сапфировых подложках с буферными слоями AlN и GaN, наблюдались спектры спонтанной фотолюминесценции (ФЛ/PL) с двумя полосами эмиссии, отличающиеся от приводимых ранее [1,13–16]. Для таких структур отмечено значительное увеличение порога возникновения стимулированной эмиссии и в ряде случаев отсутствие перехода к ней. В работе приводится интерпретация полос ФЛ и высказываются предположения об их природе.

### 2. Методика эксперимента

Рост слоев InN проводился на подложках *c*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом МПЭПА на установке STE 3N3 (ЗАО „НТО“).

На сапфировых подложках диаметром 2", на обратную сторону которых был нанесен слой Ti толщиной 400 нм, последовательно выращивались буферные слои AlN (200 нм) и GaN (700 нм) при температурах 820 и 710°C соответственно. На таких буферных слоях GaN/AlN осуществлялся рост слоя InN толщиной ~ 700 нм. Температура роста InN варьировалась в диапазоне 440–480°C, а соотношение потоков индия и азота (III/V) менялось от 0.7 до 1.1. Выращенные образцы исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгенодифракционного анализа (РД), фотолюминесценции (ФЛ), спектроскопии отражения и пропускания, эффекта Холла.

Спектры спонтанной эмиссии регистрировались с поверхности образца при оптической накачке непрерывным лазером (длина волны возбуждения  $\lambda_{\text{EX}} = 0.8$  мкм, мощность до 500 мВт). Режим стимулированной эмиссии реализовывался при возбуждении импульсным оптическим параметрическим генератором, перестраиваемым в диапазоне  $\lambda = 0.45\text{--}2.3$  мкм, с энергией до 3 мДж в импульсе длительностью 10 нс при частоте повторения 10 Гц. Пятно накачки фокусировалось на поверхности образца в полосу шириной ~ 200 мкм и длиной до 10 мм, излучение собиралось от края образца и регистрировалось с помощью монохроматора Acton 2300i, с многоэлементным диодным детектором ОМА-V, диапазон работы которого  $\lambda = 0.8\text{--}2.1$  мкм. Структуры InN/GaN/AlN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> образовывали плоский асимметричный волновод с разностью показателей преломления активного слоя InN и буферного слоя GaN  $\Delta n = 0.6$ .

### 3. Результаты и обсуждение

Согласно данным СЭМ, слои InN, выращенные в условиях обогащения азотом ( $0.7 < \text{III/V} < 1$ ) при разных температурах, имеют сплошную, без видимых нанопор структуру, но обладают развитой морфологией поверхности (рис. 1). Изменения температуры роста слоев InN, выполненные для соотношения потоков III/V ~ 0.8, показали, что повышение температуры роста с 440 до 470°C приводит к улучшению кристаллического качества слоев InN и снижению плотности прорастающих дислокаций с  $4.2 \cdot 10^{10}$  до  $2.4 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. При этом наблюдается небольшое уменьшение остаточной концентрации электронов с  $1.2 \cdot 10^{19}$  до  $8 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Улучшение кристаллического качества слоев, по данным измерений эффекта Холла, приводит к увеличению подвижности электронов с 1000 до 1750 см<sup>2</sup>/В·с при комнатной температуре.

Несмотря на то что спектры спонтанной ФЛ InN не проявляли существенной зависимости от температуры роста, исследования стимулированного излучения показали падение пороговой мощности с увеличением температуры роста, и для образца с InN-слоем, выращенным при 470°C, и соотношении потоков III/V ~ 0.8, она составила ~ 60 кВт/см<sup>2</sup> при температуре 77 К

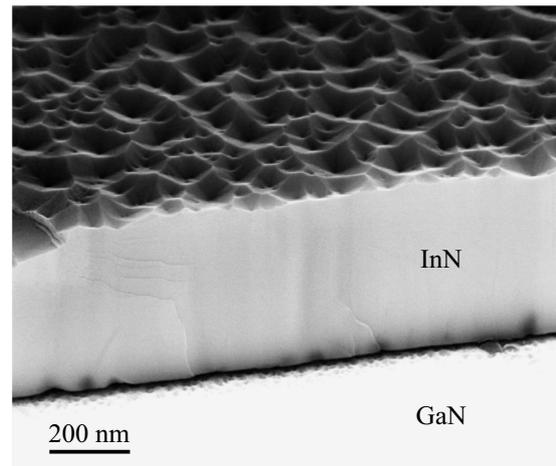
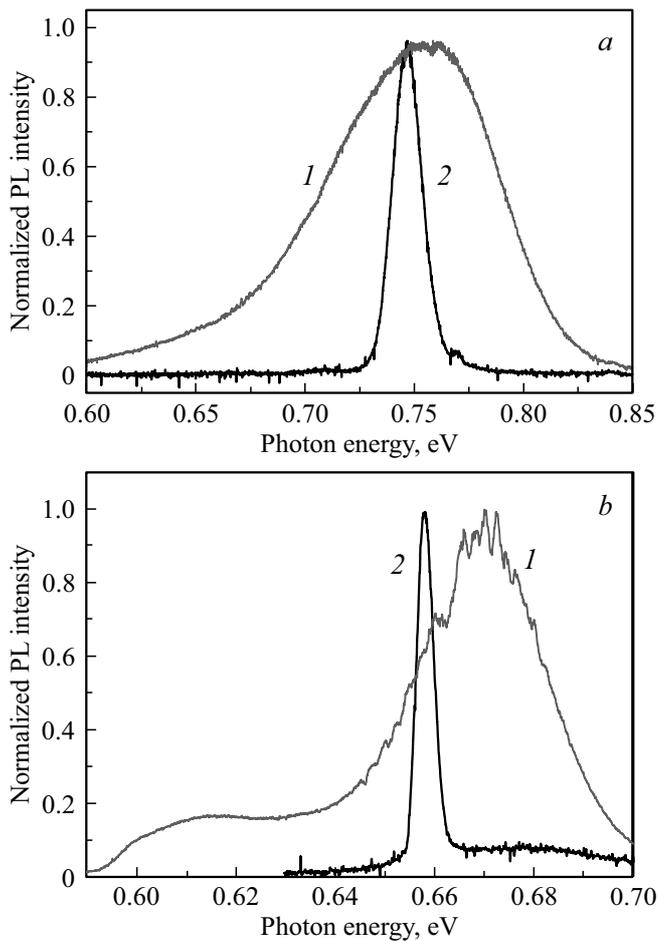


Рис. 1. Полученный методом СЭМ снимок поперечного скола структуры InN/GaN/AlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со слоем InN, выращенным при 470°C и соотношении потоков III/V ~ 0.8.

(рис. 2, а). На рис. 2, б приведены спектры спонтанной и стимулированной эмиссии образца CU1804, выращенного в Корнельском университете, который отличается от представленного на рис. 2, а более низкой концентрацией фоновых электронов ( $0.73 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>) и более низким порогом перехода к стимулированной эмиссии (~ 5 кВт/см<sup>2</sup> при температуре 77 К) [12]. Из сравнения спектров на рис. 2, а и б видно, что увеличение концентрации свободных электронов (и фоновых доноров) приводит к синему сдвигу в спектрах спонтанной и стимулированной эмиссии на ~ 120 и ~ 100 мэВ соответственно. Этот сдвиг определяется конкуренцией противонаправленных концентрационных эффектов сужения запрещенной зоны вследствие хартри-фокковского взаимодействия и поднятия уровня Ферми и показывает возможные изменения рабочего диапазона лазеров на объемных слоях монокристаллического InN при легировании в соответствии с известным соотношением  $E_g^* < h\nu < E_{Fn} - E_{Fp}$ , где  $E_g^*(n, T)$  — эффективная ширина запрещенной зоны,  $E_{Fn}$  и  $E_{Fp}$  — квазиуровни Ферми для электронов и дырок соответственно,  $h\nu$  — энергия фотона. Форма спектров спонтанной ФЛ определяется вкладами конкурирующих излучательных процессов: переходов „зона–зона“, „зона проводимости–хвост валентной зоны“ и „зона–акцептор“ [17]. Два первых типа переходов, близких по энергии, сливаются в общую полосу ФЛ и наблюдаются во всех спектрах образцов InN, выращенных при разных температурах и соотношениях III/V. В спектрах спонтанной ФЛ на рис. 2 доминирует полоса переходов „зона–зона“, а линии стимулированного излучения „отслеживают“ ее положение. Отметим также низкоэнергетическую полосу в спектре спонтанной ФЛ на рис. 2, б, сдвинутую на ~ 50 мэВ относительно переходов „зона–зона“. Эта полоса, согласно [1], связана с переходами „зона–акцептор“ и



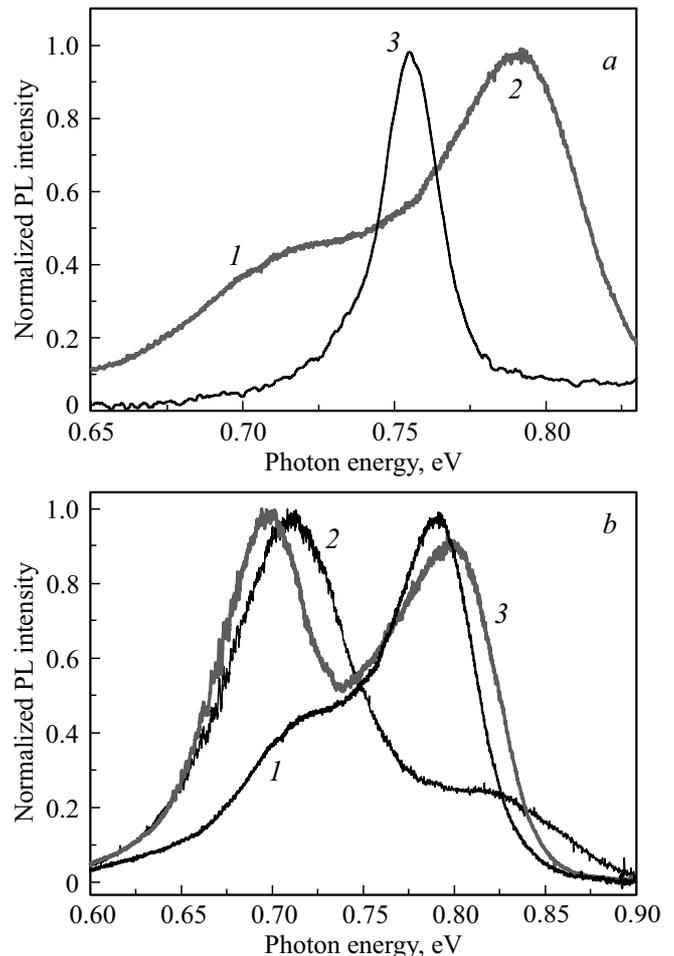
**Рис. 2.** Нормированные спектры спонтанной ФЛ (1) и стимулированной эмиссии (2) при  $T = 78$  К в структуре с InN-слоем, выращенным при  $470^\circ\text{C}$  и соотношении потоков III/V  $\sim 0.8$  (a), и в структуре CU1804 (b).

наблюдалась для слоев с относительно низкой концентрацией свободных электронов.

С увеличением соотношения потоков III/V и переходом к условиям с обогащением металлом при росте InN наблюдаются значительные изменения его структурного качества и электрофизических параметров. Увеличение соотношения потоков III/V приводило к значительному снижению шероховатости поверхности, важному для получения высококачественных волноводных слоев. Среднеквадратичная шероховатость слоя InN, выращенного при  $470^\circ\text{C}$  и соотношении потоков III/V  $\sim 1.1$ , составила  $\sim 3$  нм, в то время как при росте в условиях обогащения азотом, III/V  $< 1$ , шероховатость поверхности превышала 10 нм. Подвижность электронов при увеличении соотношения потоков III/V с 0.8 до 1.1 в образцах, выращенных при  $470^\circ\text{C}$ , выросла с  $1750$  до  $1820$   $\text{cm}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Этот рост наблюдался несмотря на то, что по данным рентгеноструктурного анализа плотность прорастающих дислокаций выросла с  $2.4 \cdot 10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$  для образца с III/V  $\sim 0.8$  до  $5.7 \cdot 10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$  для образца с

III/V  $\sim 1.1$ . Концентрация свободных электронов оставалась  $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$ . Интенсивность спонтанной ФЛ снижалась с увеличением соотношения III/V, и при этом существенно изменялась форма спектра (рис. 3, a, b).

В спектрах образцов с InN, выращенным при увеличении соотношения потоков III/V (рис. 3) до  $\sim 1$  и выше, появляется низкоэнергетическая полоса ФЛ, сдвинутая относительно переходов „зона–зона“ на  $\sim 100$  мэВ (рис. 3), что не совпадает с обнаруженным ранее [1] для переходов в локализованное акцепторное состояние с энергией  $\sim 50$  мэВ относительно потолка валентной зоны. С ростом температуры обе полосы в спектре ФЛ проявляют красный сдвиг, соответствующий температурному сужению запрещенной зоны InN. При перемещении пятна возбуждения по поверхности образца относительные интенсивности высоко- и низкоэнергетической полос в спектрах ФЛ незначительно изменяются

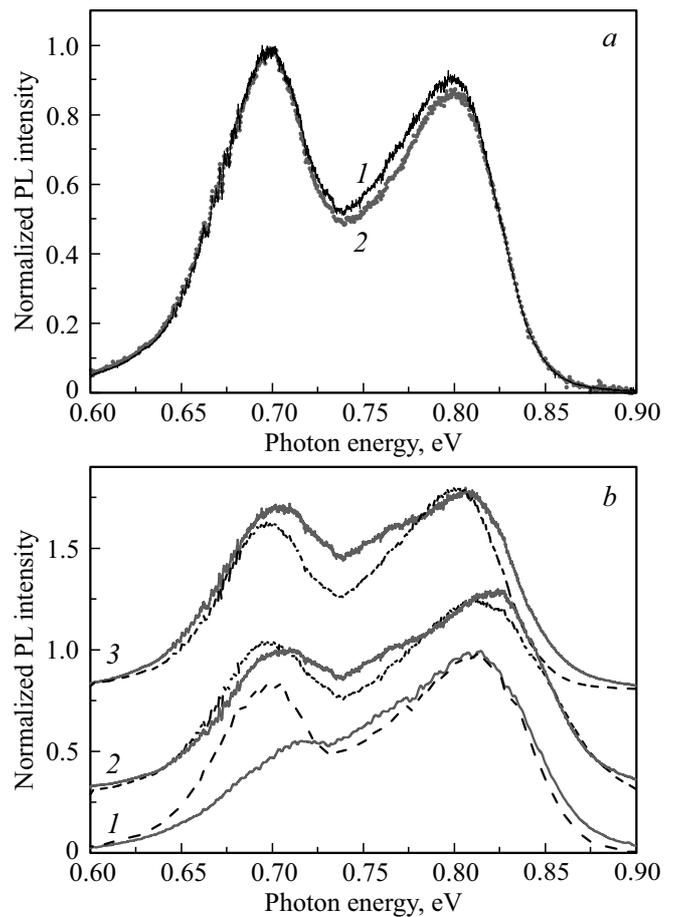


**Рис. 3.** a — спектры спонтанной ФЛ с низкоэнергетической (1) и высокоэнергетической (2) полосами эмиссии и линия стимулированного излучения (3) для образца с InN-слоем, выращенным при  $470^\circ\text{C}$  и соотношении потоков III/V  $\sim 0.9$ . b — нормированные спектры спонтанной ФЛ образцов с InN-слоем, выращенным при  $470^\circ\text{C}$  и соотношении потоков III/V  $\sim 0.9$  (1),  $\sim 1$  (2) и  $\sim 1.1$  (3). Температура измерения  $T = 78$  К.

при стабильном положении максимумов. Положение и форма высокоэнергетической полосы ( $\sim 0.8$  эВ) на рис. 3 при описании в рамках модели излучательной рекомбинации для переходов „зона–зона“ из работы [1] соответствуют InN с концентрацией электронов  $\sim 10^{19}$  см $^{-3}$ , что согласуется с результатом измерений эффекта Холла, спектров поглощения и отражения. Если, следуя данным работы [18] о влиянии на форму спектра ФЛ поверхностного аккумуляционного слоя с высокой концентрацией электронов или неоднородности образцов [16], предположить, что низкоэнергетическая полоса в этом спектре соответствует переходам „зона–зона“ в областях неоднородного слоя с низкой концентрацией электронов, то ее величина должна быть  $\sim 10^{18}$  см $^{-3}$ .

Для исследования возможной неоднородности слоя InN по толщине были проведены описанные далее эксперименты. На рис. 4, *a* приведены результаты измерения спектров ФЛ при возбуждении одной и той же области слоя InN, выращенного при 470°C и соотношении потоков III/V  $\sim 1.1$ , на длинах волн 800 и 440 нм, на которых, по данным [19], длина пути поглощения возбуждающего излучения уменьшается от 200 до 80 нм соответственно при толщине слоя InN 700 нм. Уменьшение вклада поверхностного слоя за счет увеличения толщины области возбуждения не приводит к каким-либо изменениям формы спектра (рис. 4, *a*). На рис. 4, *b* сопоставлены спектры той же структуры с исходным слоем InN толщиной 700 нм и уменьшенным до 300 нм ионным травлением. Приближение возбуждаемой и излучающей областей к границе с буферным слоем не смещает положения максимумов двух полос ФЛ. Отношение интенсивностей изменяется при перемещении пятна накачки по поверхности, что может быть связано с неоднородным распределением потоков осаждаемых материалов по подложке. Наличие двух полос эмиссии с близкими интенсивностями и шириной, а также стабильность их положения указывают на отсутствие связи наблюдаемых спектров ФЛ как с аккумуляционным поверхностным слоем, вклад которого в высокоэнергетическую часть спектра на порядки меньше [18], так и с известным неоднородным распределением относящихся к дислокациям донорных центров, плотность которых растет при увеличении плотности дислокаций к границе с буферным слоем [20].

Полученные экспериментальные данные и примененные ростовые условия позволяют высказать предположения о природе излучательных переходов, связанных с низкоэнергетической полосой ФЛ, возникающей в слоях InN с высокой концентрацией фоновых доноров. Появление низкочастотной полосы ФЛ в структуре со слоем InN, выращенным при соотношении потоков III/V  $\sim 0.9$  (рис. 3, *a*), приводит к росту пороговой мощности накачки до  $\sim 300$  кВт/см $^2$  по сравнению с  $\sim 60$  кВт/см $^2$  для структуры со слоем InN, выращенным при соотношении потоков III/V  $\sim 0.8$  (см. рис. 2, *a*), что может быть частично связано с ростом



**Рис. 4.** Спектры спонтанной ФЛ при  $T = 78$  К структуры с InN-слоем, выращенным при 470°C и соотношении III/V  $\sim 1.1$ , нормированные на максимальные значения. *a* — возбуждение на длинах волн 800 (1) и 440 нм (2). *b* — измерения в различных участках образца (1 — ближе к краю образца, 2 — между центром и краем, 3 — в центре) до (штриховые линии) и после травления (сплошные линии) при толщине слоя InN 700 и 300 нм соответственно.

концентрации свободных носителей ( $cn = 11 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  для III/V  $\sim 0.8$  до  $19 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  для III/V  $\sim 0.9$ ). Рост относительной интенсивности низкочастотной полосы (рис. 3, *b*) в спектрах InN сопровождается подавлением стимулированного излучения. Доминирование низкочастотной полосы ФЛ в структурах с InN, полученным в условиях III/V  $\sim 1$  и 1.1, приводит к отсутствию стимулированной эмиссии в этих образцах в доступном диапазоне плотностей мощности накачки. При этом концентрация свободных электронов в них не выше, чем в структурах с InN, выращенных в условиях III/V  $\sim 0.8$  и 0.9 ( $12 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  для III/V  $\sim 1$  и  $10 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  для III/V  $\approx 1.1$ ). Наблюдаемые особенности эмиссионных спектров можно объяснить в предположении о связи низкоэнергетической полосы ФЛ с переходами в локализованное состояние в нижней половине запрещенной зоны. В этом случае возникает конкуренция прямых переходов „зона–зона“, которые с ростом

интенсивности накачки переходят в режим стимулированного излучения и переходов „зона–локализованное состояние акцептора“ (низкоэнергетическая полоса ФЛ), насыщающихся с увеличением интенсивности накачки. Подобная закономерность наблюдалась, например, для спектров спонтанной ФЛ, содержащих полосу переходов в локализованное акцепторное состояние с энергией связи  $\sim 50$  мэВ [1], и в настоящей работе для образцов, в которых наблюдался переход к стимулированному излучению.

В работе [21] в сильно легированных слоях  $n$ -InN наблюдался рост концентрации акцепторов, который интерпретируется авторами как самокомпенсация с участием акцепторов, относящихся к вакансиям азота и многозарядным комплексам вакансий азота. Результаты этого исследования, по мнению его авторов, резко отличаются от результатов теоретических расчетов энергии формирования примесно-дефектных центров в InN, выполненных в [22,23] методом функционала плотности. Можно предположить, что низкоэнергетические полосы, наблюдаемые нами в спектрах ФЛ ряда сильно легированных слоев InN, относятся к переходам в акцепторные состояния с энергией связи  $\sim 100$  мэВ. Это предположение поддерживается ростовыми условиями: вклад этой полосы растет для слоев InN, выращенных в условиях обогащения металлом, способствующих образованию вакансий азота.

#### 4. Заключение

Для структур с высокой концентрацией электронов ( $\sim 10^{19}$  см $^{-3}$ ) при росте InN в условиях обогащения металлом характерно появление низкоэнергетической полосы оптических переходов в спектрах спонтанной ФЛ, которая может быть отнесена к рекомбинационным переходам в локализованное состояние акцептора с энергией  $\sim 100$  мэВ относительно валентной зоны. Формирование второго канала рекомбинации приводит к существенному повышению порога стимулированного излучения на переходах „зона–зона“ и в ряде случаев к его отсутствию независимо от кристаллического качества и фоновой концентрации электронов в этом материале.

#### Благодарности

Авторы благодарны К.Е. Кудрявцеву за критические замечания и участие в экспериментах.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-29-03374\_офи-м и № 18-02-00711) с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] A.A. Klochikhin, V.Yu. Davydov, V.V. Emtsev, A.V. Sakharov, V.A. Kapitonov, B.A. Andreev, H. Lu, W.J. Schaff. *Phys. Rev. B*, **71**, 195207 (2005).
- [2] J. Wu. *J. Appl. Phys.*, **106**, 011101 (2009).
- [3] H. Lu, W.J. Schaff, J. Hwang, H. Wu, G. Koley, L.F. Eastman. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1489 (2001).
- [4] S.M. Islam, V. Protasenko, S. Rouvimov, H. Xing, D. Jena. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 05FD12 (2016).
- [5] Y.-H. Wang, W.-L. Chen. *Physica E*, **41**, 848 (2009).
- [6] X. Wang, S. Liu, N. Ma, L. Feng, G. Chen, F. Xu, N. Tang, S. Huang, K.J. Chen, S. Zhou, B. Shen. *Appl. Phys. Express*, **5**, 015502 (2012).
- [7] S. Zhao, O. Salehzadeh, S. Alagha, K.L. Kavanagh, S.P. Watkins, Z. Mi. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 073102 (2013).
- [8] P.A. Bushuykin, B.A. Andreev, V.Yu. Davydov, D.N. Lobanov, D.I. Kuritsyn, A.N. Yablonskiy, N.S. Averkiev, G.M. Savchenko, Z.F. Krasilnik. *J. Appl. Phys.*, **123**, 195701 (2018).
- [9] V.Yu. Davydov, A.A. Klochikhin, V.V. Emtsev, D.A. Kurdyukov, S.V. Ivanov, V.A. Vekshin, F. Bechstedt, J. Furthmüller, J. Aderhold, J. Graul, A.V. Mudryi, H. Harima, A. Hashimoto, A. Yamamoto, E.E. Haller. *Phys. Status Solidi B*, **234**, 787 (2002).
- [10] G.-G. Wu, W.-C. Li, C.-S. Shen, F.-B. Gao, H.-W. Liang, H. Wang, L.-J. Song, G.-T. Du. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 103504 (2012).
- [11] Y. Zhao, H. Wang, G. Wu, Q. Jing, H. Yang, F. Gao, W. Li, B. Zhang, G. Du. *J. Luminesc.*, **173**, 1 (2016).
- [12] B.A. Andreev, K.E. Kudryavtsev, A.N. Yablonskiy, D.N. Lobanov, P.A. Bushuykin, L.V. Krasilnikova, E.V. Skorokhodov, P.A. Yunin, A.V. Novikov, V.Yu. Davydov, Z.F. Krasilnik. *Sci. Rep.*, **8** (1), 9454 (2018).
- [13] B. Arnaudov, T. Paskova, P.P. Paskov, B. Magnusson, E. Valcheva, B. Monemar, H. Lu, W.J. Schaff, H. Amano, I. Akasaki. *Phys. Rev. B*, **69**, 115216 (2004).
- [14] M. Feneberg, J. Däubler, K. Thonke, R. Sauer, P. Schley, R. Goldhahn. *Phys. Rev. B*, **77**, 245207 (2008).
- [15] A. Mohanta, D.-J. Jang, M.-S. Wang, L.W. Tu. *J. Appl. Phys.*, **115**, 044906 (2014).
- [16] M. Kučera, A. Adikimenakis, E. Dobročka, R. Kúdela, M. Ťapajna, A. Laurenčíková, A. Georgakilas, J. Kuzmík. *Thin Sol. Films*, **672**, 114 (2019).
- [17] A.P. Levanyuk, V.V. Osipov. *Sov. Phys. Usp.*, **24**, 187 (1981).
- [18] V.V. Emtsev, V.Yu. Davydov, A.A. Klochikhin, A.V. Sakharov, A.N. Smirnov, V.V. Kozlovskii, C.-L. Wu, C.-H. Shen, S. Gwo. *Phys. Status Solidi C*, **4**, 2589 (2007).
- [19] J. Wu, W. Walukiewicz, S.X. Li, R. Armitage, J.C. Ho, E.R. Weber, E.E. Haller, H. Lu, W.J. Schaff, A. Barcz, R. Jakiela. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (15), 2805 (2004).
- [20] L.F.J. Piper, T.D. Veal, C.F. McConville, H. Lu, W.J. Schaff. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 252109 (2006).
- [21] C. Rauch, F. Tuomisto, P.D.C. King, T.D. Veal, H. Lu, W.J. Schaff. *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 011903 (2012).
- [22] X.M. Duan, C. Stampf. *Phys. Rev. B*, **79**, 035207 (2009).
- [23] X.M. Duan, C. Stampf. *Phys. Rev. B*, **79**, 174202 (2009).

Редактор Л.В. Шаронова

## Light-emission properties of heavily doped epitaxial layers of indium nitride

*B.A. Andreev<sup>1</sup>, D.N. Lobanov<sup>1</sup>, L.V. Krasil'nikova<sup>1</sup>,  
P.A. Bushuykin<sup>1</sup>, A.N. Yablonskiy<sup>1</sup>, A.V. Novikov<sup>1</sup>,  
V.Yu. Davydov<sup>3</sup>, P.A. Yunin<sup>1</sup>, M.I. Kalinnikov<sup>1</sup>,  
E.V. Skorohodov<sup>1</sup>, Z.F. Krasil'nik<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>3</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The paper presents the results of studies of spontaneous photoluminescence and stimulated emission spectra in *n*-InN epitaxial layers with a free electron concentration of  $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , grown by molecular beam epitaxy with plasma activation of nitrogen on sapphire substrates with AlN and GaN buffer layers. With the growth of InN in the nitrogen rich conditions with an increase in the growth temperature up to 470°C, close to the beginning of InN decomposition, an improvement in the crystalline quality and a decrease in the stimulated emission threshold were observed. During the transition to the metal rich growth conditions, two emission bands were observed in the spontaneous photoluminescence spectra of InN, separated by the 100 meV interval. For such layers, a significant increase in the threshold of stimulated emission was noted, and, in some cases, the absence of a transition to it. The paper provides an interpretation of different emission bands and makes assumptions about their nature.