

06.3;07

## Особенности стимулированного излучения при оптической накачке в двойной гетероструктуре GaN/AlGaN

© М.В. Максимов, А.В. Сахаров, В.В. Лундин, А.С. Усиков,  
Б.В. Пушный, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев,  
Ж.И. Алферов, В.П. Розум

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Минский НИИ радиоматериалов, Минск

Поступило в Редакцию 15 апреля 1997 г.

Исследованы люминесцентные свойства двойной гетероструктуры GaN/Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N, выращенной газофазной эпитаксией из металлорганических соединений. При наблюдении люминесценции с торца обнаружен резко выраженный пороговый характер зависимости интенсивности излучения от плотности накачки. Пороговая плотность возбуждения при  $T = 77$  К составила  $\sim 40$  kW/cm<sup>2</sup>, длина волны стимулированного излучения  $\lambda = 357$  nm. Длинноволновый сдвиг линии излучения при высоких плотностях накачки может быть объяснен перенормировкой ширины запрещенной зоны, обусловленной многочастичными взаимодействиями в электронно-дырочной плазме.

В последние годы был достигнут значительный прогресс в разработке и исследовании светоизлучающих приборов в системе UnGaN–AlGaN в сине-зеленом оптическом диапазоне. В работах [1,2] была впервые продемонстрирована лазерная генерация в системе InGaN–AlGaN при инжекционной накачке.

Дальнейшее продвижение в более коротковолновую, т. е. ультрафиолетовую область спектра, может быть связано с использованием гетероструктур в системах GaN–AlGaN и Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N–Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N. В ряде работ была продемонстрирована лазерная генерация при оптической накачке в эпитаксиальных слоях GaN, а также двойных гетероструктурах AlGaN/GaN [3,4]. Пороговые плотности возбуждения составили 100 и 85 kW/cm<sup>2</sup> при комнатной температуре (50 kW/cm<sup>2</sup> при 77 К [4]) на двуслоистых структурах. Исследование процессов стимулированного излучения и лазерной генерации при оптической накачке представляется

чрезвычайно важным как для оценки качества структуры, ее геометрии и параметров роста, так и для изучения механизмов генерации.

В данной работе мы исследовали структурные и оптические свойства двойной гетероструктуры AlGaN–GaN. Структура была выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Рост производился в горизонтальном реакторе с индуктивным нагревом при давлении 200 mbar. В качестве газа-носителя использовался водород, в качестве источника элементов III группы — триметилгаллий и триметилалюминий, в качестве источника азота — аммиак. Подложкой служил полированный сапфир с ориентацией (0001) ± 30'. Перед загрузкой в реактор подложка была обезжирена в органических растворителях, обработана в травителе HF+HNO<sub>3</sub> (1:3), промыта водой и высушена. В качестве буферного слоя использовался GaN, осажденный при 510°C. Потоки триметилгаллия, аммиака и водорода составили 45 μm·mol/min, 1.5 и 4.5 L/min соответственно. После отжига буферного слоя при 1000°C в атмосфере аммиака началось осаждение эпитаксиального слоя GaN при температуре 1040°C. Потоки триметилгаллия аммиака и водорода составили 36 μm·mol/min, 2.5 и 4.5 L/min. При росте слоев AlGaN в реактор подавался триметилалюминий в количестве 1.5 μm·mol/min. Скорость роста составила 3 μm/h.

Структурное качество образца было исследовано методом просвечивающей электронной микроскопии. Светлопольные изображения, полученные на поперечных срезах образца, показали, что на границе слой/подложка дислокации, плотность которых превышает  $1.0 \cdot 10^{10}/\text{cm}^2$ , образуют скопления. Слои, прилегающие к границе, имеют блочную структуру, границы блоков очерчены дислокациями. По мере приближения к поверхности плотность дефектов существенно уменьшается. Интерфейсы верхних слоев GaN и AlGaN планарны, плотность дефектов на верхнем интерфейсе порядка  $5 \cdot 10^7 \text{cm}^2$ .

Исследования процессов стимулированного излучения проводились на образце с одной сколотой гранью. Накачка осуществлялась импульсным азотным лазером ( $\lambda = 337.1 \text{ nm}$ ) с помощью 1.5 kW в импульсе. С помощью цилиндрической линзы лазерный луч фокусировался в пятно размером  $5 \times 0.3 \text{ mm}$ . Снижение плотности накачки осуществлялось с помощью нейтральных фильтров. Спектры фотолюминесценции снимались со скола образца. Излучение детектировалось охлаждаемым фотоумножителем, работающим в режиме синхронного детектирования. Геометрия эксперимента и схема структуры представлены на рис. 1.

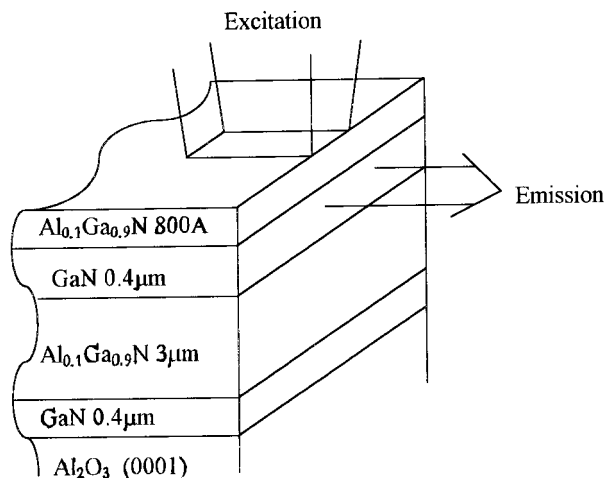
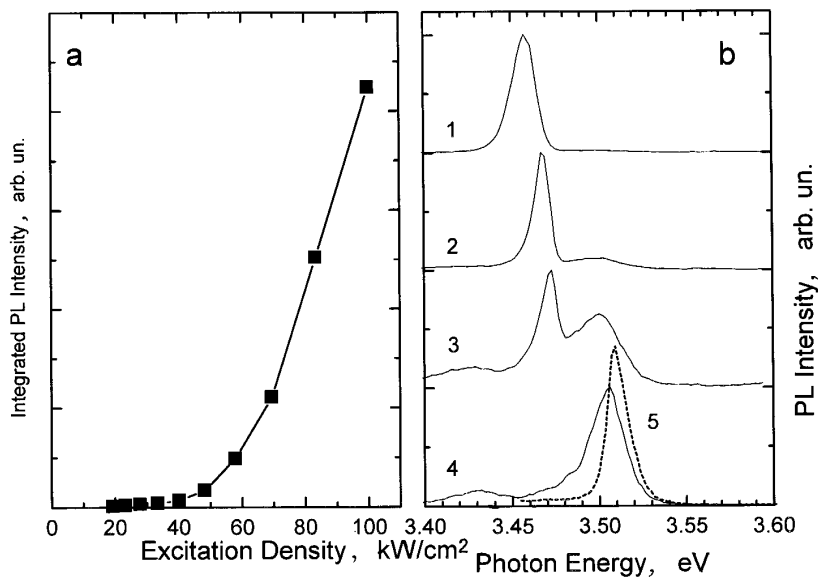


Рис. 1. Схематическое изображение структуры и геометрия эксперимента.

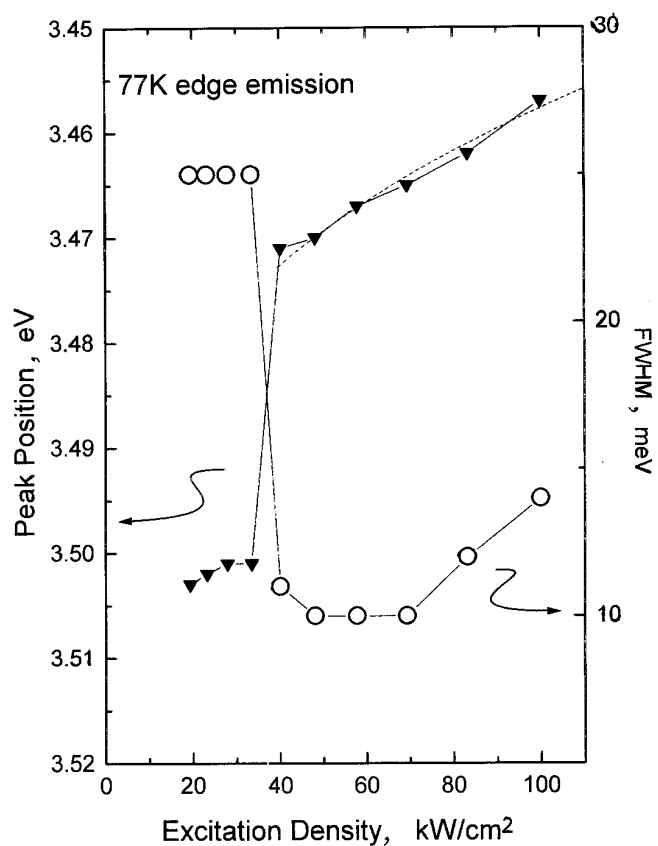
Спектры люминесценции при различных плотностях накачки представлены на рис. 2, *b*. На том же рисунке приведен спектр фотолюминесценции с поверхности образца, снятый при возбуждении He–Cd лазером ( $1 \text{ W/cm}^2$ ). Незначительное отличие в форме спектров фотолюминесценции с торца и с поверхности объясняется эффектом самопоглощения при выводе излучения с торца. Из рис. 2, *b* видно, что при плотностях накачки около  $40 \text{ kW/cm}^2$  на длинноволновом крыле линии спонтанного излучения возникает узкий пик стимулированного излучения. Зависимость интегральной интенсивности фотолюминесценции с торца от плотности накачки ( $P(I)$ ) представлена на рис. 2, *a*. Сверхлинейный рост интенсивности подтверждает факт возникновения стимулированного излучения. Интересным результатом, следующим из рис. 2, *a*, является наличие резко выраженного перегиба на графике зависимости интегральной интенсивности фотолюминесценции от плотности накачки. Данный эффект характерен, скорее, для лазерной генерации, чем для стимулированного излучения. Одно из возможных объяснений состоит в следующем. Для проведения оптических измерений структура раскалывается со стороны подложки на более мелкие куски. При раскалывании подложки в эпитаксиальном слое возможно возникно-



**Рис. 2.** *a* — зависимость интегральной интенсивности люминесценции с торца от плотности возбуждения; *b* — спектры люминесценции с торца, снятые при различных плотностях возбуждения: 1 — 100 kW/cm<sup>2</sup>, 2 — 58 kW/cm<sup>2</sup>, 3 — 40 kW/cm<sup>2</sup>, 4 — 19 kW/cm<sup>2</sup>, 5 — спектр фотолюминесценции с поверхности (плотность возбуждения 1 W/cm<sup>2</sup>).

вление трещин, которые могут образовывать хорошо сколотые грани типа [0–110]. Две соседние трещины могут образовывать резонатор. Другое возможное объяснение наблюдаемого эффекта основано на том факте, что в GaN пленках, выращенных методом MOCVD, наблюдаются домены с характерным размером 0.1–0.3 μm [5]. Таким образом, размеры доменов близки к длине световой волны в кристалле. Наличие четко выраженного порога на зависимости  $P(I)$ , следовательно, может быть обусловлено эффектом, сходным с эффектом распределенной обратной связи.

Насколько нам известно, полученное нами значение пороговой плотности накачки (40 kW/cm<sup>2</sup>) сравнимо с лучшими результатами,



**Рис. 3.** Зависимость полуширины и максимума линии люминесценции от плотности возбуждения. Пунктирной линией показана аппроксимация в соответствии с выражениями (1) и (2).

опубликованными для двойных гетероструктур GaN/AlGaN при 77 K ( $50 \text{ kW/cm}^2$  [4]) и существенно меньше, чем пороговые плотности для слоев GaN ( $500 \text{ kW/cm}^2$  [6] при 10 K).

Зависимости полуширины и положения максимума линии люминесценции (стимулированного излучения) от плотности накачки предста-

влены на рис. 3. При плотностях накачки выше пороговой происходит резкое сужение линии фотолюминесценции, сопровождающееся изменением положения ее максимума. При дальнейшем увеличении интенсивности накачки линия несколько уширяется и начинает сдвигаться в сторону меньших энергий. Результаты аппроксимации экспериментальных данных (рис. 3, пунктирная линия) дают следующее выражение для зависимости величины сдвига линии стимулированного излучения от интенсивности накачки:

$$E = E_g - 0.93 \cdot 10^{-8} \left( n^{1/3} + p^{1/3} \right), \quad (1)$$

где  $n = p$  — плотность фотовозбужденных носителей, которая связана с плотностью накачки  $W$  следующим соотношением:

$$n = \left( \frac{W\tau}{d} \right) / \left( \frac{hc}{\lambda} \right), \quad (2)$$

где  $d$  — толщина слоя GaN ( $0.4 \mu\text{m}$ ),  $\tau$  — длительность импульса (5 ns),  $\lambda = 337.1 \text{ nm}$ .

Сходные зависимости были получены для GaAs [7] и были объяснены при учете электрон-электронного и дырочно-дырочного взаимодействия, которое ведет к понижению энергии основного состояния электронно-дырочной плазмы (т. е. уменьшению ширины запрещенной зоны). Теоретические расчеты [8] дают следующее выражение:

$$E = E_g - 1.6 \cdot 10^{-8} \left( n^{1/3} + p^{1/3} \right). \quad (3)$$

Хорошее соответствие теоретических расчетов и экспериментальных данных позволяет предположить, что стимулированное излучение осуществляется с участием переходов зона-зона, а за длинноволновый сдвиг линии стимулированного излучения ответственно электрон-электронное и дырочно-дырочное обменное взаимодействие.

*Выводы.* Продемонстрировано стимулированное излучение в двойной гетероструктуре AlGaIn/GaN при оптической накачке. Значение пороговой плотности накачки при 77 К составило  $40 \text{ kW/cm}^2$ , что сравнимо с лучшими результатами, полученными для аналогичных образцов при данной температуре.

## Список литературы

- [1] *Nakamura S.* // Proc. International Simposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes Chiba Univ. Japan, March 5–7 1996.
- [2] *Akasaki I.* // Jap. J. Appl. Phys. 1995. V. 34. 11B. L1517.
- [3] *Amano H., Watanabe N., Koide N., Akasaki I.* // Jap. J. Appl. Phys. 1993. V. 32. 7B. L1000.
- [4] *Aggarwal R.L., Maki P.A., Molnar R.J., Liau Z.L., Melngails I.* // J. Appl. Phys. 1996. V. 79(4). P. 2148.
- [5] *Ponce F.A., Bour D.P., Gotz W., Wright P.J.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 57.
- [6] *Yang X.H., Schmidt T.J., Shan W., Song J.J., Goldenberg B.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66(1). P. 1.
- [7] *Casey H.C., Stern Jr. and F.* // J. of Appl. Phys. 1976. V. 47. P. 631.
- [8] *Wolff P.A.* // Phys. Rev. 1962. V. 126. P. 405.