

06:07:12

Лазерная генерация в вертикальном направлении в многослойных квантово-размерных InGaN/GaN гетероструктурах

© А.В. Сахаров, В.В. Лундин, В.А. Семенов, А.С. Усиков
Н.Н. Леденцов, А.Ф. Цацульников, М.В. Байдакова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 3 марта 1999 г.

Обнаружена лазерная генерация в направлении, перпендикулярном к поверхности в многослойных квантово-размерных структурах InGaN/GaN, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. При высоких плотностях возбуждения в спектре люминесценции, модулированном модами резонатора Фабри–Перо, образованного границей GaN–воздух и GaN–сапфировая подложка, одна из мод резко усиливается и начинает доминировать в спектре. Обнаружен резко выраженный пороговый характер зависимости интенсивности люминесценции от плотности накачки. Пороговая плотность возбуждения в вертикальном направлении в 5–6 раз превышает порог стимулированного излучения при наблюдении с торца структуры. Коэффициент усиления в активной области на пороге поверхностной генерации оценен как $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$. Обнаружен эффект взаимодействия мод резонатора и спектра усиления, заключающийся в смещении мод (до 2.6 nm) на коротковолновом краю спектра люминесценции в сторону больших энергий фотона. Характеристическая температура (T_0), измеренная в диапазоне от 16 до 120 К, составила 480 К. При более высоких температурах $T_0 = 70 \text{ К}$.

В последнее время ведутся интенсивные исследования структур на основе нитридов III группы, связанные с получением светодиодов и лазеров, работающих в ближней ультрафиолетовой, синей и зеленой областях спектра. На данный момент уже получены инжекционные лазеры с большим сроком службы на основе квантовых ям InGaN/GaN [1].

Известно, что вертикально излучающие лазеры имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными полосковыми лазерами (меньшая расходимость светового пучка, возможность создавать матрицы лазеров на одной ростовой подложке). Однако получение высокоотражающих брэгговских зеркал в системе GaN/AlGaN требует выращивания большого числа слоев (> 35 пар).

Следует также отметить, что удельный коэффициент усиления толстых слоев ($\sim 0.1 \mu\text{m}$) InGaN при больших плотностях возбуждения оказывается настолько велик, что рядом авторов наблюдалось стимулированное излучение в вертикальном направлении при оптической накачке [2], [3]. С другой стороны, известно, что использование плотных массивов квантовых точек в системе II–VI позволяет реализовать лазерную генерацию в направлении, перпендикулярном к поверхности, даже в случае, когда высокоотражающие брэгговские зеркала не используются [5].

В данной работе мы исследовали оптические свойства структуры с 12 квантовыми ямами InGaN/GaN. Структура была выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в условиях, когда наблюдается распад твердого раствора на InGaN нанодомены, обогащенные индием, которые могут рассматриваться как плотные массивы квантовых точек [6,7]. Рост производился в горизонтальном реакторе с индуктивным нагревом. В качестве газа-носителя использовался водород (при росте GaN) или аргон (при росте InGaN/GaN), в качестве источника элементов III группы — триметилгаллий (ТМГ) и триметилиндий (ТМИ), в качестве источника азота — аммиак. Подложкой служил полированный сапфир с ориентацией $(0001) \pm 30'$. Перед загрузкой в реактор подложка была обезжирена в органических растворителях. В качестве буферного слоя использовался AlGaIn, осажденный при 530°C . После отжига буферного слоя при 1010°C в атмосфере аммиака проводилось осаждение эпитаксиального слоя GaN толщиной $2.5 \mu\text{m}$ при температуре 1050°C и давлении 200 mBar. После этого температура подложки опускалась до 800°C , давление поднималось до 600 mBar и в атмосфере аргона выращивался тонкий ($\sim 24 \text{ nm}$) слой InGaN

с низким (7–8%) составом по индию. Структуры, выращенные без такого низкотемпературного подслоя, показывали низкую эффективность люминесценции, что было также отмечено другими авторами [4]. Квантовые ямы формировались изменением температуры подложки от 730 до 850°C (12 циклов) при постоянных потоках ТМИ и ТМГ. Такой метод формирования многослойной периодической структуры позволяет довольно просто совместить необходимость снижения температуры при выращивании InGaN слоев и необходимость подъема температуры для роста GaN барьерных слоев. При этом изменение потока ТМИ оказывается излишним, поскольку вхождение In в InGaN при низких скоростях роста (в данном случае ~ 0.1 nm/s) слоя сильно снижается с повышением температуры. После этого температура подложки повышалась до 1050°C и выращивался покрывающий слой GaN толщиной 0.1 μ m. По данным рентгеновской дифрактометрии были определены период многослойной структуры и средний состав по In в активной области, которые составили 12–13 nm и 8% соответственно. Эффективная толщина InGaN внедрения оценивается нами как 4–5 nm, исходя из профиля изменения температуры.

Возбуждение фотолюминесценции (ФЛ) осуществлялось импульсным азотным лазером ($\lambda = 337.1$ nm) с мощностью 1.5 kW в импульсе. При наблюдении ФЛ с поверхности лазера луч фокусировался в пятно диаметром 400 μ m (плотность возбуждения 1 MW/cm²). Для наблюдения ФЛ с торца был выколот резонатор длиной 3 mm, на который с помощью цилиндрической линзы лазерный луч фокусировался в пятно размером 5 \times 0.3 mm (плотность возбуждения 100 kW/cm²). Снижение плотности накачки осуществлялось с помощью нейтральных фильтров. Излучение детектировалось охлаждаемым фотоумножителем, работающим в режиме синхронного детектирования.

На рис. 1 представлены зависимости интенсивности фотолюминесценции с поверхности от плотности возбуждения при 16 и 150 K (рис. 1, *a*) и спектры ФЛ при различных плотностях возбуждения при температуре 150 K (рис. 1, *b*). Как видно из рисунка, при высоких плотностях возбуждения (600 kW/cm², 150 K) в спектре люминесценции, модулированном модами микрорезонатора Фабри–Перо, образованного границей GaN–воздух и GaN–сапфировая подложка, одна из мод резко усиливается и начинает доминировать в спектре, причем пороговый характер зависимости интенсивности люминесценции от плотности накачки резко выражен. Выраженный одномодовый характер спектра излучения при больших плотностях накачки свидетельствует о наличии

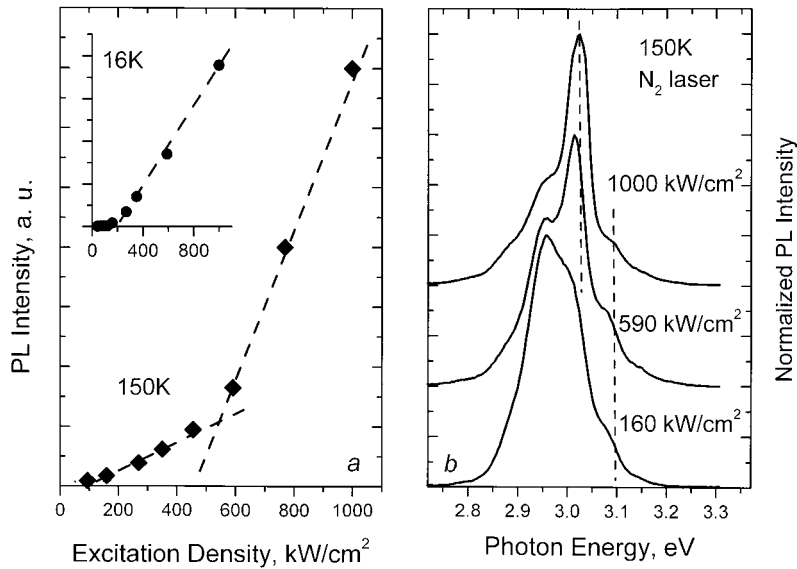


Рис. 1. Зависимость интенсивности фотолюминесценции с поверхности от плотности возбуждения при 150 К (на вставке приведена зависимость интенсивности фотолюминесценции с поверхности от плотности возбуждения при 16 К) (а). Спектры люминесценции с поверхности, снятые при различных плотностях возбуждения (б).

обратной связи в системе, и характер распределения дальнего поля [8] говорит о переходе в режим лазерной генерации. По нашим данным лазерная генерация с поверхности в многослойной структуре с квантово-размерными InGaN/GaN внедрениями наблюдается впервые.

Коэффициент усиления материала многослойной структуры на пороге генерации может быть оценен из условия равенства потерь на вывод излучения (α_{ext}) эффективному усилению системы (g_{Σ}):

$$\alpha_{ext} = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = g_{\Sigma}, \quad (1)$$

где R_1 и R_2 — коэффициенты отражения от поверхностей раздела GaN/Al₂O₃ (2.4%) и GaN/воздух (17%) и L — длина резонатора. С

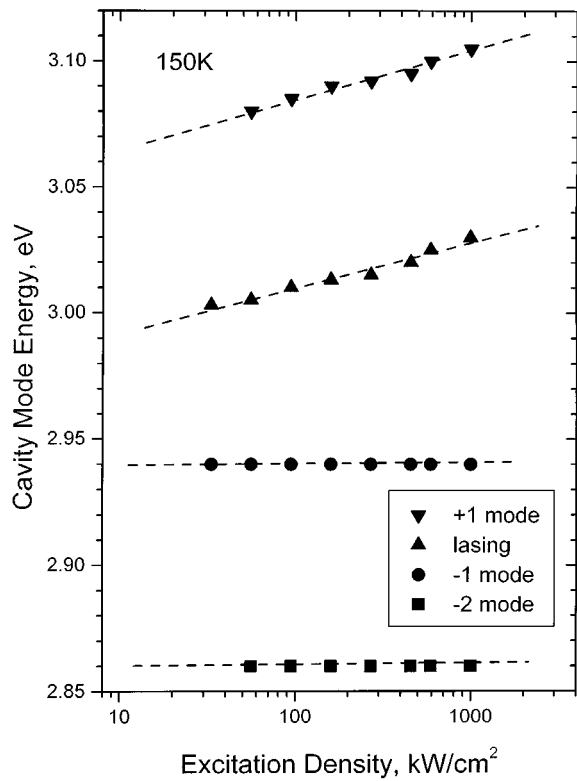


Рис. 2. Зависимость положения мод резонатора Фабри–Перо от плотности возбуждения при температуре 150 К.

учетом того, что активная область занимает лишь малую часть от полной толщины структуры, коэффициент усиления активной области должен быть не менее $2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$.

При увеличении накачки наблюдается коротковолновый сдвиг мод резонатора Фабри–Перо (так называемый ”чирп”), что обусловлено изменением показателя преломления в активной области. Наибольший сдвиг наблюдается для самой коротковолновой моды (рис. 2), в то время как длинноволновые моды практически не сдвигаются. Данный эффект может быть описан соотношениями Крамерса–Кронига, а его большая

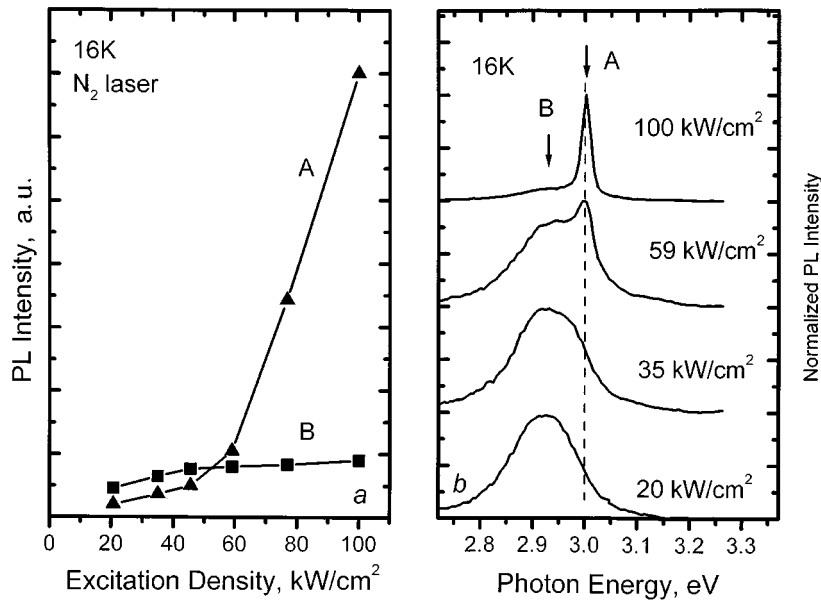


Рис. 3. Зависимость интенсивности фотолуминесценции с торца от плотности возбуждения для двух различных линий при 16 К. Положение линий показано стрелками на рис. 3, *b* (*a*). Спектры люминесценции с торца, снятые при различных плотностях возбуждения (*b*).

величина (2.6 nm) обусловлена гигантским изменением коэффициента поглощения (усиления) в активной области. Взаимодействие мод резонатора и спектра поглощения (усиления) активной среды отмечалось ранее для поверхностно-излучающих лазеров на основе InGaAs–GaAs квантовых точек [9].

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности фотолуминесценции с торца от плотности возбуждения для двух различных энергий излучения (рис. 3, *a*) и спектры ФЛ при различных плотностях возбуждения при температуре 16 К (рис. 3, *b*). Положение линии А (3.002 eV) соответствует энергии стимулированного излучения, положение линии В (2.924 eV) соответствует максимуму спонтанного излучения. При плотностях накачки порядка 50 kW/cm² линия ФЛ резко сужается, что

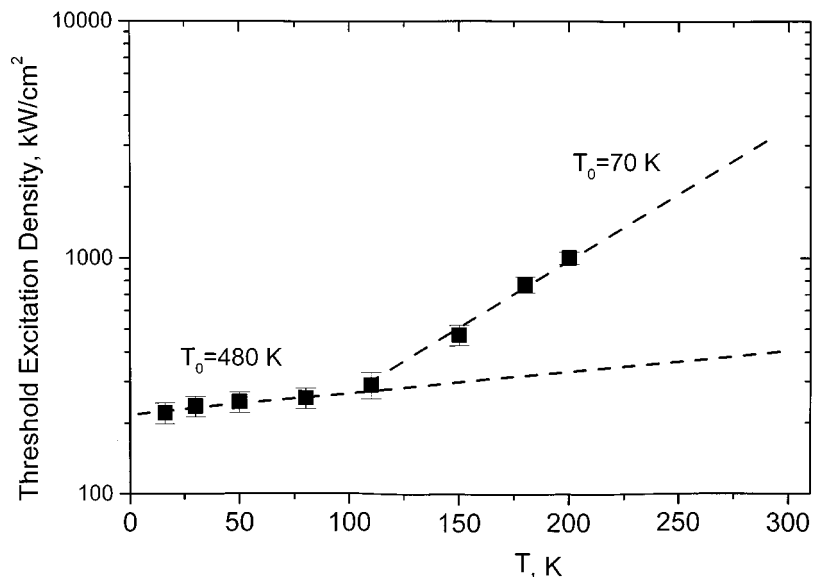


Рис. 4. Температурная зависимость пороговой плотности возбуждения при генерации с поверхности.

говорит о переходе в режим стимулированного излучения. При этом наблюдается резкий рост интенсивности линии A и замедляется рост интенсивности линии B (спонтанного излучения). Следует отметить, что стимулированное излучение в направлении, параллельном к поверхности, начинается при существенно меньших плотностях возбуждения, чем поверхностная генерация. При появлении стимулированного излучения в направлении, параллельном к поверхности, время излучательной рекомбинации уменьшается, что препятствует дальнейшему росту усиления для света, излучаемого в направлении, перпендикулярном к поверхности. При конструировании поверхностно-излучающих лазеров этот эффект должен быть учтен как паразитный и максимально подавлен.

На рис. 4 представлена зависимость пороговой плотности накачки от температуры при генерации в вертикальном направлении. При температурах до 120 К пороговая плотность накачки меняется незначительно и характеристическая температура (T_0) составляет 480 К. Такой характер

зависимости характерен для лазеров на основе структур с квантовыми точками (КТ) [10]. При более высоких температурах пороговая плотность накачки возрастает, что может быть связано как с термическим выбросом носителей из КТ, сопровождаемым их утечкой в матрицу GaN и безызлучательной рекомбинацией, так и с изменением времени излучательной рекомбинации с температурой [11]. При этом в диапазоне температур 100–200 К рост пороговой плотности возбуждения хорошо описывается эмпирической формулой

$$P_{th} = P_0 \times \exp\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

с характеристической температурой $T_0 = 70$ К.

В данной работе мы показали, что лазерная генерация в вертикальном направлении может быть реализована в структуре с несколькими квантово-размерными InGaN/GaN внедрениями даже в отсутствии высокоотражающих зеркал. Резонатор при генерации в вертикальном направлении формируется поверхностями раздела GaN/Al₂O₃ и GaN/воздух.

Список литературы

- [1] Nakamura S., Senoh M., Hagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 2014.
- [2] Kim S.T., Amano H., Akasaki I. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67 (2). P. 267.
- [3] Asif Kham M., Krishnankutty S., Skogman R.A., Kuznia J.N., Olson D.T., George T. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65 (5). P. 520.
- [4] Keller S., Keller B.P., Kapolnek D., Abare A.C., Masui H., Coldren L.A., Mishra U.K., Den Baars S.P. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68 (22). P. 3147.
- [5] Krestnikov I.L., Strassburg M., Caesar M., Shchukin V.A., Hoffmann A., Pohl U.W., Bimberg D., Ledentsov N.N., Malyshkin V.G., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Litvinov D., Rosenauer A., Gethsen D. // Proceedings ICPS24, Jerusalem, August 2–7, 1998 (World Scientific, 1998).
- [6] Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Sugimoto Y., Kiyoku H. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. P. 2753.
- [7] Vertikov A., Nurmikko A.V., Doverspike K., Bulman G., Edmond J. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 493; Tachibana K., Someya T., Arakawa Y. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 383; Martin R.W., Middleton P.G., O'Donnell K.P., Van der Stricht W. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 263.
- [8] Сахаров А.В., будет опубликовано.

- [9] *Ledentsov N.N., Bimberg D., Ustinov V.M., Maximov M.V., Alferov Zh.I., Kalosha V.P., Lott J.A.* // *Semiconductor Science and Technology*. 1999. V. 13. P. 99.
- [10] *Kirstaedter N., Ledentsov N.N., Grundmann, Bimberg D., Richter U., Ruvimov S.S., Werner P., Heydenreich J., V.M., Ustinov V.M., Maximov M.V., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I.* // *Electronics Letters*. 1994. V. 30. P. 1416.
- [11] *Cho Y., Gainer G.H., Fischer A.J., Song J.J., Keller S., Mishra U.K., Den Baars S.P.* // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73 (10). P. 1370.