

07

Оптическое усиление в сильнолегированных $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}:\text{Si}$ -структурах при непрерывной накачке

© П.А. Бохан¹, К.С. Журавлёв¹, Д.Э. Закревский^{1,2}, Т.В. Малин¹, Н.В. Фатеев^{1,3}¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: fateev@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 17 мая 2024 г.

В окончательной редакции 9 июля 2024 г.

Принято к публикации 12 июля 2024 г.

Измерены коэффициенты оптического усиления в сильнолегированных слоях $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}:\text{Si}$ при непрерывной накачке широкополосным излучением (190–330 nm) и комнатной температуре. Установлено, что при плотности мощности оптической накачки $3.2 \text{ mW}/\text{cm}^2$ значение коэффициента оптического усиления составляет 212 cm^{-1} , что хорошо совпадает с данными, полученными при импульсном возбуждении. Измеренное значение сечения излучательной рекомбинации при непрерывном оптическом возбуждении составляет $\sigma \approx 10^{-15} \text{ cm}^2$.

Ключевые слова: сильнолегированные структуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, оптическое усиление, сечение излучательной рекомбинации.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58958.19997

Полупроводниковые лазерные источники применяются во многих областях науки и техники благодаря широкому диапазону доступных длин волн, компактности, эффективности, надежности, низкой стоимости и простоте их использования. Гетероструктуры $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}:\text{Si}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ представляются перспективными материалами для активных сред устройств, излучающих в видимой и ультрафиолетовой (УФ) области спектра [1,2]. Слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x > 0.5$), сильнолегированные кремнием с концентрацией $n_{\text{Si}} \geq 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, характеризуются широким спектром люминесценции ($\lambda = 350\text{--}700 \text{ nm}$) и высоким квантовым выходом $\eta = 0.14\text{--}0.8$ [3,4], что в перспективе позволит создавать источники когерентного и некогерентного излучения от синего до ближнего инфракрасного диапазона спектра в едином излучающем образце. Ранее в работах [3,4] были исследованы механизмы оптического усиления, измерены абсолютные значения коэффициентов усиления, а также получена перестраиваемая по длине волны излучения стимулированная эмиссия в гетероструктуре $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}:\text{Si}$ в схеме с внешним оптическим резонатором при оптической накачке импульсным излучением с длиной волны $\lambda = 266 \text{ nm}$. Для многих практических приложений необходимы эффективные источники излучения, работающие при комнатной температуре в непрерывном режиме. Вследствие этого большой интерес представляет экспериментальное исследование оптического усиления в сильнолегированных гетероструктурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ при непрерывной оптической накачке.

Целью настоящей работы является измерение параметров оптического усиления широкополосного излучения в сильнолегированной гетерострукту-

ре $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}:\text{Si}$ при непрерывном оптическом возбуждении.

Слои $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}:\text{Si}$ толщиной $1.2 \mu\text{m}$ выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на сапфировых подложках толщиной 0.43 mm [4], на которых предварительно были выращены буферные слои AlN толщиной 350 nm . Легирование осуществлялось потоком SiH_4 до величины концентрации кремния $n_{\text{Si}} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Исследуемые образцы имеют гладкую поверхность со среднеквадратичной шероховатостью $\text{RMS} < 5 \text{ nm}$. Для оптической накачки использовалось излучение дуговой дейтериевой лампы (ДЛ) ДДС-30 с током разряда 250 mA . Спектры излучения измерялись дифракционным спектрометром с разрешением 0.5 nm , ввод излучения в который осуществлялся кварцевым световодом с диаметром сердцевины 1 mm . Абсолютные значения мощности накачки измерялись датчиком Thorlabs S401C. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Для измерения коэффициентов усиления использовались две оптические схемы: продольная и поперечная. В продольной схеме (рис. 1, а) измерялись интенсивности пробного излучения, прошедшего через гетероструктуру $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}:\text{Si}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$, при накачке непрерывным УФ-излучением дейтериевой лампы $I(\lambda)$ и при отсутствии накачки $I_0(\lambda)$. В качестве источника пробного излучения использовалась широкополосная лампа накаливания, для ограничения спектра которой в диапазоне $300\text{--}700 \text{ nm}$ использовался светофильтр СЗС-23. Излучение ДЛ фокусировалось на поверхность гетероструктуры сферической кварцевой линзой с фокусным расстоянием 5 cm в диафрагмированное пятно диаметром 2 mm . Излучение, прошедшее через гете-

роструктуру из лампы накаливания, фокусировалось в сердцевину световода, который располагался на расстоянии 11 см от структуры, что позволяло исключить попадание в него рассеянного видимого излучения и люминесценции. Коэффициенты интегрального усиления k_{int} и спектральные зависимости коэффициентов усиления от длины волны излучения $k(\lambda)$ определялись с помощью формул

$$S/S_0 = \exp(k_{int}l), \quad I(\lambda)/I_0(\lambda) = \exp(k(\lambda)l), \quad (1)$$

где l — длина возбужденной области в слое, S и S_0 — интегральные по спектру интенсивности излучения лампы накаливания в присутствии и в отсутствие излучения накачки соответственно.

В поперечной схеме (рис. 1, *b*) для определения коэффициента усиления $k(\lambda_0)$ в максимуме спектра излучения с $\lambda_0 = 507.6$ нм использовался метод измерения зависимости интенсивности излучения $I(\lambda_0, L)$ из торца слоя от длины усиливающей области L [5]:

$$I(\lambda_0, L) = (I_s s / k(\lambda_0)) [\exp(k(\lambda_0)L) - 1], \quad (2)$$

где I_s — плотность мощности спонтанного излучения, s — площадь поперечного сечения возбужденной области.

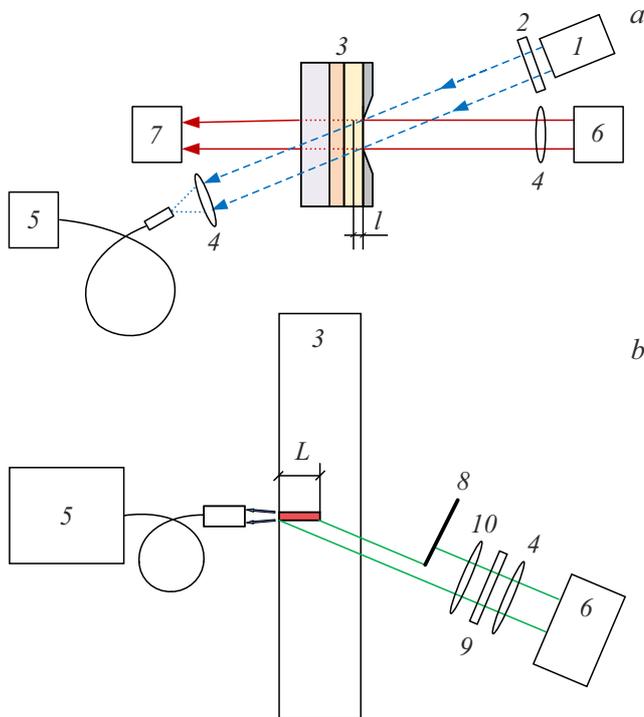


Рис. 1. Схема эксперимента. *a* — продольная схема, *b* — поперечная схема. 1 — лампа накаливания, 2 — светофильтр СЗС-23, 3 — гетероструктура $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}:\text{Si}$, 4 — сферическая кварцевая линза, 5 — спектрометр, 6 — дейтериевая лампа, 7 — измеритель мощности накачки, 8 — штorka, 9 — светофильтр УФС-5, 10 — цилиндрическая кварцевая линза.

На рис. 2, *a* представлен УФ-спектр излучения ДЛ в диапазоне 190–366 нм (зависимость I) с суммарной мощностью излучения $154 \mu\text{W}$. Для продольной схемы измерения (рис. 1, *a*) на основе спектра пропускания исследуемой структуры $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}:\text{Si}$ (зависимость 3) можно рассчитать величину поглощенной мощности $P_{abs} \approx 97 \mu\text{W}$, которая соответствует плотности мощности $W_1 \approx 3.2 \text{ mW/cm}^2$.

В поперечной схеме (рис. 1, *b*) величина поглощенной структурой мощности составляет $P_{abs} \approx 8.5 \mu\text{W}$. Сфокусированный с помощью сферической и цилиндрической линз пучок излучения на поверхности структуры, диафрагмированный щелью, составлял $10 \times 0.8 \text{ mm}$ с плотностью поглощенной мощности $W_2 \approx 0.17 \text{ mW/cm}^2$.

Большая часть спектра излучения накачки попадает в область межзонных переходов структуры, где величина коэффициента поглощения составляет $(1.0\text{--}1.5) \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ [6]. Это соответствует глубине возбуждения $l \approx 100 \text{ nm}$. На рис. 2, *b* представлены два усредненных спектра пробного излучения, прошедших через исследуемую структуру в присутствии и в отсутствие излучения накачки. После обработки 30 экспериментальных кривых по формулам (1) получены абсолютные значения коэффициентов усиления $k_{int} = 235 \pm 40 \text{ cm}^{-1}$ и $k(\lambda) = 212 \pm 35 \text{ cm}^{-1}$, которые в диапазоне спектра 500–650 нм не изменяются в пределах точности измерений. На краях спектра излучения из-за малого отношения сигнал/шум величины коэффициента усиления не были определены. На рис. 3 представлены результаты измерений изменения интенсивности $I(\lambda_0)$ от длины возбуждаемой области L при поперечной накачке активной среды. Из интерполяции этих экспериментальных результатов по формуле (2) получено значение коэффициента усиления $k(\lambda_0) = 6.2 \text{ cm}^{-1}$. Существенная разница между значениями $k(\lambda)$ и $k(\lambda_0)$ ($k(\lambda)/k(\lambda_0) \approx 34$) обусловлена несколькими причинами. Во-первых, это различие плотностей поглощенной мощности накачки $W_1/W_2 \approx 14$ из-за большой расходимости излучения накачки ДЛ, не позволяющей сфокусировать его в малый размер возбужденной области. Во-вторых, в работах [7,8] показано, что методика определения коэффициента усиления из измерений зависимостей интенсивности излучения от длины усиливающей области не всегда является корректной, так как не учитывает вытекающие моды — выход излучения из возбужденной области в пассивную часть исследуемого образца. В результате полученные значения коэффициентов усиления могут быть заниженными.

Проведем сравнение результатов для коэффициентов усиления при непрерывной накачке с аналогичными значениями, полученными при импульсном возбуждении [4]. В последнем случае при величине коэффициента усиления $k(\lambda) = 212 \text{ cm}^{-1}$ расчетная концентрация поглощенных фотонов составляет $N_p \approx 2.1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [4]. Концентрация поглощенных фотонов для непрерывного

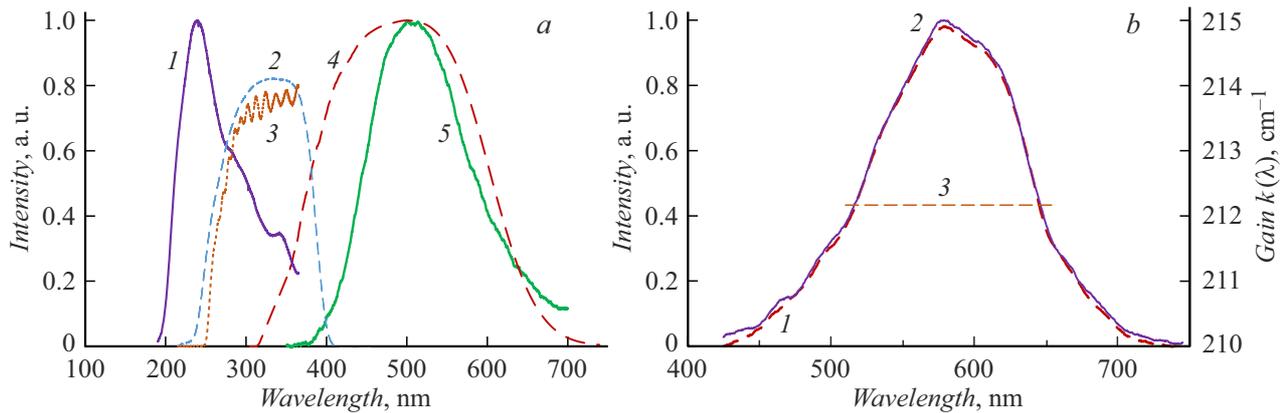


Рис. 2. Спектральные зависимости. *a)* 1 — спектр деитериевой лампы, 2 — спектр пропускания светофильтра УФС-5, 3 — спектр пропускания гетероструктуры $Al_{0.65}Ga_{0.35}N:Si$, 4 — спектр пропускания светофильтра СЗС-23, 5 — спектр излучения структуры $Al_{0.65}Ga_{0.35}N:Si$; *b)* 1 — спектр пробного излучения, 2 — спектр усиленного излучения, 3 — коэффициент усиления $k(\lambda)$.

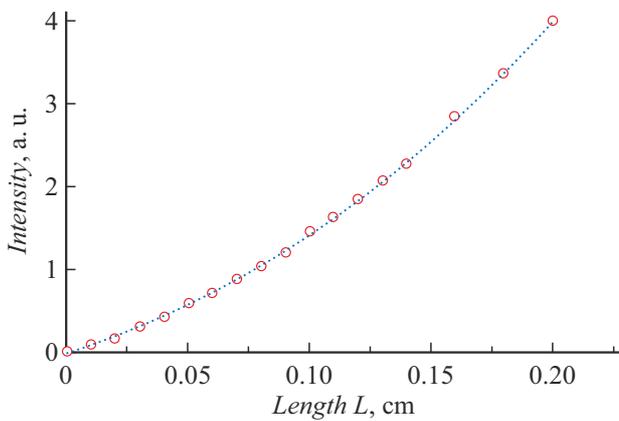


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения от длины усиливающей области L . Точки — экспериментальные результаты, пунктирная кривая — аппроксимация экспериментальных результатов по формуле (2).

режима возбуждения определяется по формуле

$$N_{st} = (W_1\tau)/(E_i l) \approx (3.9 \cdot 10^{-20} \tau) \text{ cm}^{-3},$$

где $E_i = 8.3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ — средняя энергия фотонов накачки с максимумом при $\lambda = 240 \text{ nm}$, τ — время медленного спада интенсивности люминесценции.

Экспериментально показано (см. работы [3,4]), что нестационарная излучательная рекомбинация характеризуется быстрым ($\sim 10 \text{ ns}$) и медленным (порядка сотни микросекунд) временным спадом; последний описывается гиперболической функцией с вкладом около 85% от общей рекомбинации.

Поскольку временная зависимость затухания интенсивности излучения пропорциональна концентрации фотонов, приводящих к излучательной рекомбинации, величину τ можно определить исходя из аппроксимации экспериментальных данных для времени затухания по гиперболической функции $I(t) = C/(t + t_m)$, где $I(t)$ —

временное затухание интенсивности люминесценции, C и t_m — параметры кривой затухания [3]. Вычисление отношения площади под кривой затухания интенсивности люминесценции до $\tau \approx 540 \mu\text{s}$ к общей площади под кривой затухания интенсивности люминесценции показывает, что 90% всех поглощенных в структуре фотонов накачки переходят в излучательную рекомбинацию. Равенство значений концентраций поглощенных фотонов N_p и N_{st} при импульсной и непрерывной накачке достигается при $\tau \approx 540 \mu\text{s}$. Полученная величина времени затухания τ подтверждает этот вывод и для непрерывного режима возбуждения. С помощью формулы $\sigma = k(\lambda)/N_{st}$ можно определить сечение излучательной рекомбинации, которое равно $\sigma \approx 10^{-15} \text{ cm}^2$ и совпадает с аналогичной величиной для импульсного режима [4]. Таким образом, измерения оптического усиления в сильнолегированных слоях $AlGaIn:Si$ продемонстрировали, что полученные значения коэффициентов усиления и большие значения сечений излучательной рекомбинации для непрерывного и импульсного режимов совпадают. Это делает возможным получение стимулированного излучения в широком диапазоне видимого спектра с высокой эффективностью при непрерывном оптическом возбуждении. Важным положительным свойством исследуемых структур является четырехуровневая оптическая схема возбуждения и излучательной релаксации для реализации лазера [4], при которой для достижения порогового усиления требуются небольшие мощности накачки.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания FWGW-2022-0012.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Li, K. Jiang, X. Sun, C. Guo, *Adv. Opt. Photon.*, **10**, 43 (2018). DOI: 10.1364/AOP.10.000043
- [2] Y. Huang, Y. Li, D. Xiang, *IEEE Access*, **11**, 1 (2023). DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3348273
- [3] P.A. Bokhan, N.V. Fateev, T.V. Malin, I.V. Osinnykh, D.E. Zakrevsky, K.S. Zhuravlev, *J. Lumin.*, **252**, 119392 (2022). DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.119392
- [4] П.А. Бохан, К.С. Журавлев, Д.Э. Закревский, Т.В. Малин, Н.В. Фатеев, *ФТП*, **57** (9), 731 (2023). DOI: 10.61011/FTP.2023.09.56987.5627
[P.A. Bokhan, K.S. Zhuravlev, D.E. Zakrevsky, T.V. Malin, N.V. Fateev, *Semiconductors*, **57** (9), 705 (2023). DOI: 10.61011/SC.2023.09.57433.5627].
- [5] K.L. Shaklee, R.F. Leheny, *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 475 (1971). DOI: 10.1063/1.1653501
- [6] J.F. Muth, J.D. Brown, M.A.L. Jonson, Z. Yu, R.M. Kolbas, J.W. Cook, J.F. Schetzina, *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **4** (Suppl. 1), 502 (1999). DOI: 10.1557/S1092578300002957
- [7] L. Cerdan, *Opt. Lett.*, **42**, 5258 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.005258
- [8] А.Г. Зверев, Р.Ф. Набиев, А.Н. Печенов, Ю.М. Попов, С.Д. Скорбун, *Квантовая электроника*, **7** (9), 2011 (1980). [A.G. Zverev, R.F. Nabiev, A.N. Pechenov, Yu.M. Popov, S.D. Skoribun, *Sov. J. Quantum Electron.*, **10** (9), 1163 (1980). DOI: 10.1070/QE1980v010n09ABEH010695].