

Оптимизация легирования эмиттеров в лазерных гетероструктурах AlGaInP/GaInP

А.А.Чельный, А.В.Алуев, С.В.Маслов

Исследовано влияние уровня легирования эмиттеров на характеристики лазерных диодов, изготовленных на основе системы AlGaInP/GaInP/GaAs и излучающих на длине волны 670–680 нм. Экспериментально показано, что при увеличении отношения уровней легирования эмиттеров P/N наблюдается увеличение плотности тока инверсии J_0 и коэффициента дифференциального усиления β . Одновременно с этим монотонно увеличивается и характеристическая температура T_0 . Внутренний квантовый выход вынужденной рекомбинации η_0 имеет максимум при $P/N = 2.1$. Изготовлены лазерные диоды с шириной мезаполоски 100 мкм, на которых в непрерывном режиме достигнута мощность излучения до 1000 мВт при эффективности 1.55 Вт/А.

Ключевые слова: красный лазерный диод, гетероструктура AlGaInP/GaInP/GaAs.

Мощные лазерные диоды, излучающие в красном диапазоне спектра, представляют интерес для качества легированных хромом твердотельных сред, систем проекционного телевидения, а также для медицинских применений, прежде всего для фотодинамической терапии рака. Как известно, гетероструктуры для этих диодов изготавливаются на основе системы $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/Ga_yIn_{1-y}P$. Разрыв зон в гетеропереходах для данной системы сравнительно невелик [1, 2], что обуславливает относительно невысокое значение параметра T_0 , определяющего зависимость порогового тока от температуры. Это ограничивает предельную и рабочую мощности излучения диодов в непрерывном режиме генерации.

В структурах, где ограничение носителей за счет разрывов зон невелико, важнейшую роль приобретает оптимизация легирования эмиттеров. В большинстве работ отмечено, что на параметры диодов сильно влияет уровень легирования P-эмиттера (см., напр., [3, 4]). При этом указано, что с ростом уровня легирования акцепторной примесью увеличивается внешняя дифференциальная квантовая эффективность приборов и характеристическая температура порога генерации. В тоже время, с ростом легирования P-эмиттера, растут плотность тока инверсии J_0 и коэффициент дифференциального усиления β . Влияние уровня легирования N-эмиттера на параметры диодов изучено слабо. Однако анализ целого ряда работ, например [3–7], показывает, что все результаты получены при легировании эмиттера донорными примесями на уровне $(1.5–3) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

В работе [8] на примере системы AlGaAs/GaAs показано, что соотношение уровней легирования эмиттеров P/N существенным образом сказывается на внутренних параметрах гетероструктур. Обычно при увеличении отношения P/N наблюдается рост J_0 и β . Одновременно с этим увеличивается характеристическая температура T_0

и внутренний квантовый выход вынужденного излучения.

Таким образом, представляет интерес исследовать влияние отношения P/N на параметры лазерных диодов в системе AlGaInP/GaInP, что и было сделано в данной работе. Оптимизация отношения P/N позволила изготовить лазерные диоды с мощностью излучения до 1 Вт в непрерывном режиме.

Гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном кварцевом реакторе при пониженном давлении. В качестве источников компонентов III группы использовались триметилиндий, триметилалюминий и триэтилгаллий. В качестве источников компонентов V группы использовались арсин и фосфин. Для легирования слоёв применялись силан и бисциклопентадиенил магния, что позволило получать плёнки n- и p-типа электропроводности соответственно. В качестве подложки использовались пластины GaAs, выращенные методом направленной кристаллизации и имеющие ориентацию [100] с погрешностью $\pm 0.5^\circ$. Изготавливались гетероструктуры, имеющие следующие порядок слоёв и значения n- и p-концентраций носителей заряда для донорных и акцепторных примесей:

- подложка GaAs, $N = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$;
- буферный слой GaAs, $N = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина $d = 0.5 \text{ мкм}$;
- N-эмиттер $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$, $d = 1.3 \text{ мкм}$;
- нелегированный волноводный слой $(Al_{0.4}Ga_{0.6})_{0.5}In_{0.5}P$, $d = 0.1 \text{ мкм}$;
- активная область, состоящая из трёх квантовых ям толщиной 8.5 нм состава $In_{0.6}Ga_{0.4}P$, разделённых барьерными слоями состава $(Al_{0.4}Ga_{0.6})_{0.5}In_{0.5}P$ толщиной 12 нм;
- нелегированный волноводный слой $(Al_{0.4}Ga_{0.6})_{0.5}In_{0.5}P$, $d = 0.1 \text{ мкм}$;
- P-эмиттер $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$, $d = 1.3 \text{ мкм}$;
- слой $In_{0.5}Ga_{0.5}P$, $P = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $d = 0.1 \text{ мкм}$;
- P⁺-контактный слой GaAs, $P = 6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $d = 0.4 \text{ мкм}$.

Для предотвращения проникновения легкодиффундирующей акцепторной примеси в активную область

Табл.1. Параметры легирования эмиттеров исследуемых структур.

№ партии структуры	N (10^{17} см $^{-3}$)	P (10^{17} см $^{-3}$)	P/N
1431	1.5	6.8	4.53
1435	2.8	5.8	2.07
1025	6.0	5.8	0.97
1020	1.0	5.8	0.58
1021	1.5	4.0	2.66
1024	1.5	2.0	1.33
1026	1.5	1.0	0.67

часть P -эмиттера толщиной 0.25 мкм, прилегающая к волноводу, изготавливалась нелегированной. Параметры легирования эмиттеров гетероструктур представлены в табл. 1.

Слой твёрдых растворов выращивались изопериодическими к подложке GaAs. Рассогласование периода решётки не превышало 0.1 %. В то же время состав слоёв активной области задавался таким образом, чтобы обеспечить в них механическое напряжение сжатия.

На выращенных структурах формировались мезаполоски шириной $w = 100$ мкм, располагавшиеся вдоль направления [1–10]. Для создания токового ограничения использовалось заравнивание высокоомным ZnSe. С обеих сторон структуры напылялись омические контакты. Сколотые кристаллы монтировались на медный теплопровод p -стороной. В качестве припоя использовался индий толщиной 3 мкм.

В табл.2 представлены результаты измерений в импульсном режиме основных параметров изготовленных лазерных диодов: плотности порогового тока J_{th} для длины резонатора 1000 мкм, внешней дифференциальной квантовой эффективности 2η , коэффициента внутренних потерь α_0 , внутреннего квантового выхода стимулированного излучения η_0 , плотности тока инверсии J_0 , приведённого коэффициента дифференциального усиления $\beta\Gamma$ (Γ – фактор оптического ограничения) и характеристической температуры T_0 для различных соотношений концентрации носителей в эмиттерах. Для расчёта внутренних параметров использовались методики, изложенные, например, в [9].

Коэффициент внутренних потерь α_0 во всех структурах был примерно одинаковым и не превышал 2 см $^{-1}$. На рис.1,а представлены зависимости плотности порогового тока, плотности тока инверсии и приведённого коэффициента дифференциального усиления от уровня легирования P -эмиттера. Концентрация электронов в N -эмиттере поддерживалась постоянной и равной 1.5×10^{17} см $^{-3}$. Видно, что с ростом уровня легирования P -эмиттера и отношения P/N плотность тока инверсии J_0 и коэффициент дифференциального усиления β растут. Плотность порогового тока имеет минимум при $P = 2 \times 10^{17}$

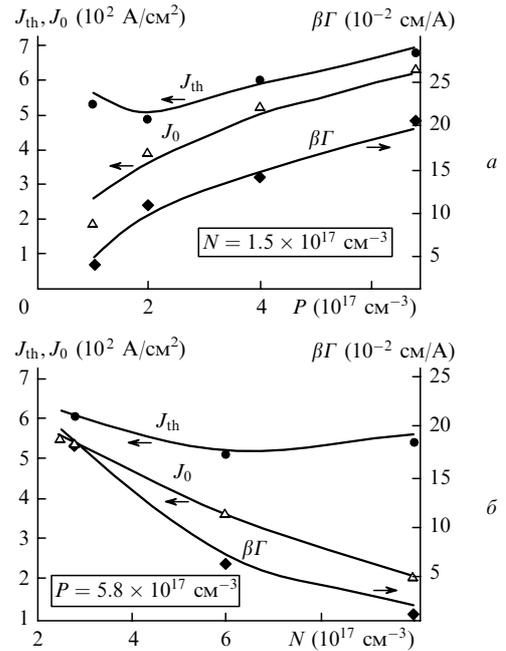


Рис.1. Зависимость плотности порогового тока J_{th} , плотности тока инверсии J_0 и приведённого дифференциального усиления $\beta\Gamma$ от концентрации дырок в P -эмиттере при $N = 1.5 \times 10^{17}$ см $^{-3}$ (а) и от концентрации электронов в N -эмиттере при $P = 5.8 \times 10^{17}$ см $^{-3}$ (б).

см $^{-3}$. Хотя при $P = 1 \times 10^{17}$ см $^{-3}$ плотность тока инверсии J_0 минимальна, коэффициент дифференциального усиления β становится столь малым, что плотность порогового тока растёт.

На рис.1,б представлены зависимости тех же параметров от уровня легирования N -эмиттера. Концентрация дырок в P -эмиттере поддерживалась постоянной и равной 5.8×10^{17} см $^{-3}$. Вновь наблюдается увеличение J_0 и β с увеличением P/N . Плотность порогового тока J_{th} имеет минимум при $N = 6 \times 10^{17}$ см $^{-3}$. Таким образом, полученные результаты вполне коррелируют с результатами работы [8].

На рис.2 представлена типичная зависимость порогового тока I_{th} от температуры лазеров, изготовленных из партии структуры № 1431. Измерения проводились в импульсном режиме в диапазоне температур 15–65 °С. Установлено, что $T_0 = 150$ К в диапазоне температур 14–45 °С и $T_0 = 80$ К при температурах выше 45 °С. Излом зависимости $\ln I_{th}(T)$, имеющий место при $T = 45$ °С, является характерным для системы AlGaInP/InGaP, он отмечался во многих работах (см., напр., [1, 6, 10]). Считается, что низкотемпературный участок кривой на рис.2 обусловлен температурной зависимостью коэффициента усиления, а высокотемпературный отрезок определяется утечками носителей из активной области через барьер.

Табл.2. Основные параметры исследуемых лазерных диодов.

№ партии структуры	J_{th}^* (A/cm 2)	2η (Вт/А)	α_0 (см $^{-1}$)	η_0	J_0 (A/cm 2)	$\beta\Gamma$ (см/А)	T_0 (К)	P/N
1431	678	1.45	1.5	0.9	628	0.24	140	4.53
1435	604	1.6	1.38	0.98	538	0.179	124	2.07
1025	510	1.15	1.25	0.71	362	0.08	100	0.97
1020	540	0.8	1.3	0.49	203	0.035	60	0.58
1021	595	1.55	1.50	0.96	520	0.16	125	2.66
1024	490	1.34	1.5	0.84	390	0.12	110	1.33
1026	530	0.75	1.3	0.46	193	0.035	55	0.67

* $L = 1000$ мкм.

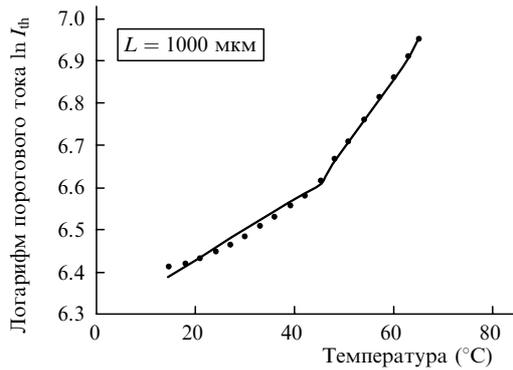


Рис.2. Зависимость порогового тока от температуры для лазерных диодов с длиной резонатора $L = 1000$ мкм, изготовленных из партии № 1431.

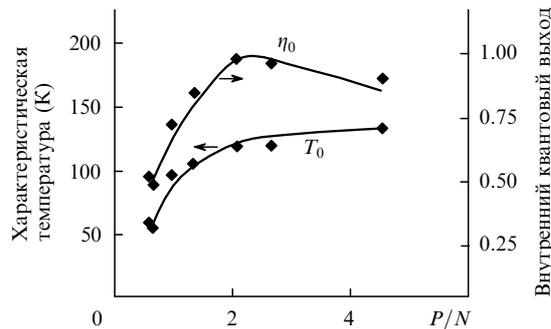


Рис.3. Зависимость характеристической температуры T_0 и внутреннего квантового выхода η_0 от отношения уровней легирования в эмиттерах P/N .

На рис.3 представлена зависимость T_0 от отношения P/N для низкотемпературной части кривой рис.2. Значение T_0 возрастает монотонно с ростом P/N . На рис.3 показано также поведение внутреннего квантового выхода η_0 с изменением P/N . Эта зависимость имеет максимум при $P/N = 2.1$. Вариации P/N как в сторону уменьшения, так и увеличения от этого значения ведут к снижению эффективности приборов.

По результатам серии экспериментов из структур партии № 1435 были изготовлены лазеры с нанесёнными на грани резонатора диэлектрическими зеркалами. С передней стороны напылялись просветляющие покрытия с коэффициентами отражения $R_1 = 12\%$, с задней — отражающие с $R_2 = 95\%$. Длина резонатора L равнялась 1000 мкм. Ватт-амперная характеристика такого диода в непрерывном режиме работы представлена на рис.4. Диод излучал на длине волны 679 нм. При комнатной температуре пороговый ток составил 538 мА, а внешняя квантовая эффективность — 1.55 Вт/А. Максимальная мощность в непрерывном режиме достигала 1020 мВт и ограничивалась деградационными процессами, имеющими катастрофический характер. Характеристическая температура T_0 была равна 145 К. На рис.5 представлены результаты ресурсных испытаний диодов, изготовленных из этой партии. Испытания проводились в режиме постоянного тока накачки. При температуре 45°C начальная мощность составляла 450 мВт. В течение 500 ч лазеры демонстрировали удовлетворительные деградационные характеристики, прогнозируемый среднemedианный ресурс превышал 10^4 ч.

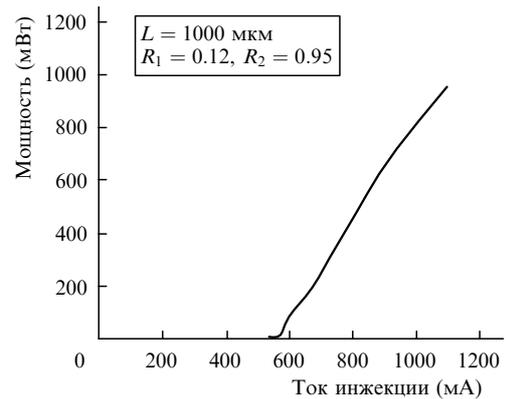


Рис.4. Ватт-амперная характеристика диода из партии № 1435 в непрерывном режиме.

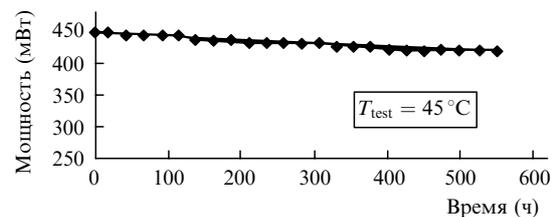


Рис.5. Зависимость выходной мощности диодов из партии № 1435 от времени наработки.

Таким образом, показано, как уровень легирования эмиттеров влияет на характеристики лазерных диодов, изготовленных на основе системы AlGaInP/GaInP/GaAs и излучающих на длине волны 670–680 нм. Эксперименты также показали, что с увеличением отношения P/N растёт плотность тока инверсии J_0 , коэффициент дифференциального усиления β и характеристическая температура T_0 . Внутренний квантовый выход вынужденной комбинации η_0 имеет максимум при $P/N = 2.1$.

Изготовленные лазерные диоды с шириной мезаполоски 100 мкм имели мощность излучения до 1000 мВт в непрерывном режиме при эффективности 1.55 Вт/А. При мощности 450 мВт прогнозируемый ресурс работы превышает 10^4 ч.

1. Bour D.P., Geels R.S., Treat D.W., Paoli T.L., Ponce F., Thornton R.L., Krusor B.S., Brigans R.D., Welch D.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 593 (1994).
2. Liedenbaum C., Valster A., Severens A., Hoofst G.T. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2598 (1990).
3. Hatakoshi G., Nitta K., Itaya K., Nishikawa Y., Ishikawa M., Okasima M. *Japan. J. Appl. Phys.*, **31**, 501 (1992).
4. Bour D.P., Treat D.W., Thornton R.L., Geels R.S., Welch D.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 718 (1992).
5. Aoyagi T., Kimura T., Yoshida N., Kadowaki T., Murakami T., Kaheno N., Seiya Y., Mizuguchi K., Susaki W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1219**, 6 (1990).
6. Sakaki F. *J. Crystal Growth*, **93**, 838 (1988).
7. Hatakoshi G., Itaya K., Ishikawa M., Dkajima M., Uematsu Y. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 1476 (1991).
8. Елисеев П.Г., Кобякова М.Ш., Симаков В.А., Чельный А.А. Патент № 2168249. *Изобретения. Бюллетень Российского Агентства по патентам и товарным знакам*, № 15, 494 (2001).
9. Елисеев П.Г. *Введение в физику инжекционных лазеров* (М.: Наука, 1983, с. 241).
10. Ishikawa M., Shiozawa H., Itaya K., Hatakoshi G., Uematsu Y. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 23 (1991).