

Влияние толщины активной области на характеристики полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур AlGaAs/GaAs/InGaAs с расширенным волноводом

© Д.А. Винокуров[¶], В.В. Васильева, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов

Физико-технический институт А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 июня 2009 г. Принята к печати 30 июня 2009 г.)

Исследовано влияние толщины активной области на основные характеристики мощных полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения AlGaAs/GaAs/InGaAs, изготовленных методом МОС-гидридной эпитаксии. Показано, что пороговый ток, температурная чувствительность пороговой плотности тока, стимулированный квантовый выход и дифференциальная квантовая эффективность улучшаются с увеличением толщины активной области. Продемонстрировано, что максимально достижимая мощность оптического излучения полупроводникового лазера и внутренний квантовый выход фотолюминесценции наиболее чувствительны к возникновению дефектов в гетероструктуре и снижаются при превышении критической толщины напряженного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в активной области.

1. Введение

Статья продолжает цикл работ, посвященных исследованию лазерных гетероструктур раздельного ограничения и характеристик мощных полупроводниковых лазеров на их основе [1–7]. Основным положением концепции мощных полупроводниковых лазеров является тезис о снижении внутренних оптических потерь, что в основном достигается за счет расширения нелегированного волноводного слоя [8]. В активной области лазерной гетероструктуры при протекании рабочего тока пороговая концентрация носителей заряда достигает $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и более, что может вносить свой вклад во внутренние оптические потери всей лазерной структуры. Доля внутренних оптических потерь активной области лазерной структуры зависит от концентрации носителей заряда и фактора оптического ограничения, поэтому при конструировании лазерных гетероструктур, из общих положений, толщину активной области уменьшают. Как показали наши последние исследования [9], изменение толщины слоя активной области в гетероструктурах, излучающих на длине волны 1060–1150 нм, на основе системы твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs значительно влияет на параметры лазерной структуры. В частности, величина внутреннего квантового выхода имеет резко выраженный максимум и снижается как при увеличении, так и при уменьшении толщины активной области [9].

Данная работа была проведена с целью определения влияния толщины слоя активной области на основные параметры полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом, излучающих в диапазоне длин волн 1000–1150 нм, изготовленных методом МОС-гидридной эпитаксии.

2. Экспериментальные образцы

Все исследуемые структуры выращивались в идентичных условиях методом МОС-гидридной эпитаксии на установке EMCORE GS 3100 в вертикальном реакторе с резистивным нагревом подложкодержателя. Температура эпитаксии составляла 625°C , давление в реакторе 77 Торр, скорость вращения подложкодержателя 1000 об/мин. В качестве источников служили триэтилгаллий $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$, триметилалюминий $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$, триметилиндий $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ и арсин AsH_3 . В качестве легирующей примеси *p*- и *n*-типа проводимости использовались моносилан SiH_4 и бисциклодиенилмагний $\text{Mg}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ соответственно.

Для исследований выращивались лазерные гетероструктуры раздельного ограничения с эмиттерными и волноводными слоями, аналогичными лазерным гетероструктурам, изученным в работе [6]. Структуры состояли из легированных широкозонных слоев $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ толщиной ~ 2000 нм, нелегированного волноводного слоя GaAs толщиной ~ 1500 нм, в котором выращивалась сильно напряженная квантовая яма $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Толщина активной области варьировалась от 30 до 90 \AA и определялась путем расчета из известной скорости роста GaAs, состава твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и времени осаждения слоя. Скорость роста слоев GaAs в наших экспериментах составляла $200 \text{ \AA}/\text{мин}$. Состав твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ поддерживался постоянным ($x = 0.35$) и определялся методом рентгеноспектрального микроанализа на электронно-зондовом микроанализаторе CAMEBAX в тестовых образцах, содержащих одиночный слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ толщиной 1000 нм, выращенных при тех же технологических условиях и соотношениях элементов в газовой фазе, что и активные области в исследуемых структурах. Расчет критической толщины слоя твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ производился со-

[¶] E-mail: dmitry.vinokurov@mail.ioffe.ru

гласно работе [10] и для состава $x = 0.35$ составил $\sim 73 \text{ \AA}$ при температуре эпитаксии. Максимальная толщина активной области 90 \AA была выбрана из-за отсутствия генерации в лазерах во всем диапазоне токов накачки. По нашему мнению, это связано с большим количеством дефектов в результате релаксации упругих напряжений в гетероструктуре и обусловлено существенным превышением толщины активной области расчетного значения критической толщины. Минимальное значение толщины активной области 30 \AA было ограничено снижением квантового выхода в слое активной области и технологическими сложностями дальнейшего уменьшения толщины слоя.

С применением стандартных постростовых операций из лазерных гетероструктур изготавливались многомодовые полупроводниковые лазеры с шириной мезаполоска 100 мкм [4]. В смонтированных на медном теплоотводе лазерах исследовались пороговые, спектральные, температурные и мощностные характеристики.

3. Результаты исследований

Исследования всех характеристик лазерных гетероструктур проводились в сравнении с полученными нами ранее зависимостями внутреннего квантового выхода фотолюминесценции при оптической накачке Ag^+ -лазером в зависимости от толщины активной области (рис. 1) [9]. Фотолюминесцентные исследования отличаются высокой степенью селективности по поверхности в связи с малостью площади пятна оптической накачки (диаметр $D = 100 \text{ мкм}$). В лазерах с большими длинами резонаторов $L = 3\text{--}3.5 \text{ мм}$ (с малыми внутренними оптическими потерями) происходит некоторое усреднение характеристик и зависимость приобретает вид наличия или отсутствия генерации.

В первую очередь были исследованы внутренние оптические потери в лазерных гетероструктурах в зависимости от толщины активной области. Было показано [9],

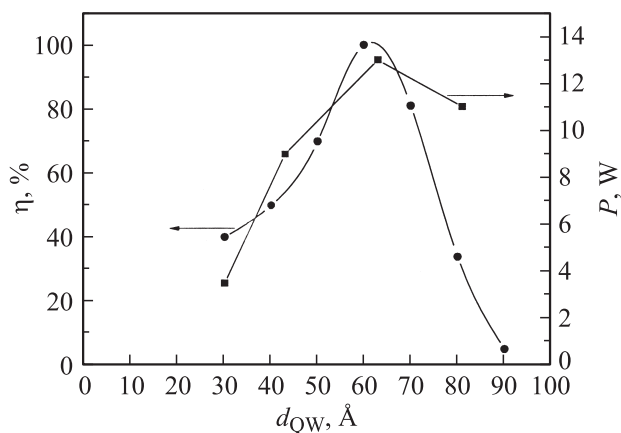


Рис. 1. Зависимости внутреннего квантового выхода фотолюминесценции (η) и максимальной оптической мощности излучения (P) от толщины активной области $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ (d_{QW}).

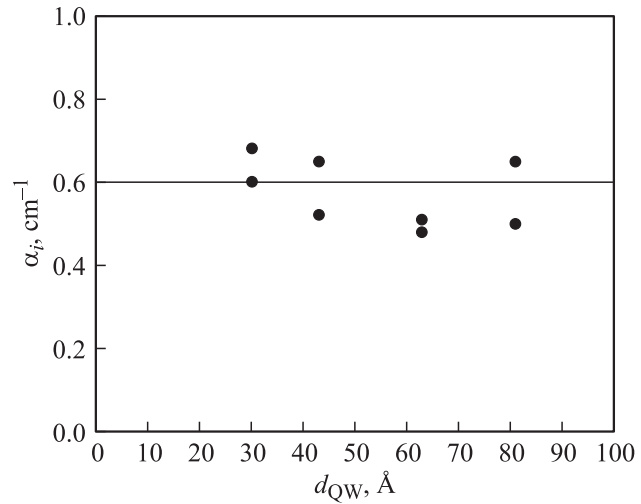


Рис. 2. Зависимость внутренних оптических потерь (α_i) от толщины активной области $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ (d_{QW}).

что при толщине квантовой ямы, формирующей активную область, выше критической наблюдалось резкое снижение величины квантового выхода, что мы связываем с возникновением дислокаций несоответствия. Минимальное значение толщины активной области было ограничено резким снижением величины внутреннего квантового выхода из-за увеличения времени излучательной рекомбинации и возрастания вклада безызлучательной рекомбинации на гетерограницах квантовой ямы и волновода (рис. 1). В исследуемом диапазоне внутренние оптические потери в лазерных асимметричных гетероструктурах отдельного ограничения не зависели от толщины активной области и составляли величину $\sim 0.6 \text{ см}^{-1}$ (рис. 2). Из чего следует, что доля внутренних оптических потерь в активной области в суммарных внутренних оптических потерях лазерной гетероструктуры незначительна. Изменения величины внутренних оптических потерь, связанные с вариациями толщины активной области, пропорциональные фактору оптического ограничения, не оказывают влияния на суммарные внутренние оптические потери. Излучательные свойства слоя активной области, характеризуемые внутренним квантовым выходом, не влияют на внутренние оптические потери, которые в асимметричных лазерных гетероструктурах с расширенным ($1.5\text{--}2 \text{ мкм}$) волноводом полностью зависят от уровня легирования и факторов оптического ограничения эмиттерных и волноводных слоев. Это обстоятельство открывает широчайшие возможности по оптимизации спектральных, температурных, пороговых и мощностных характеристик лазерных гетероструктур в зависимости от толщины активной области.

Изменение толщины активной области оказывает существенное влияние на пороговую плотность тока в асимметричных лазерных гетероструктурах отдельного ограничения (см. рис. 3). Это связано с тем, что рас-

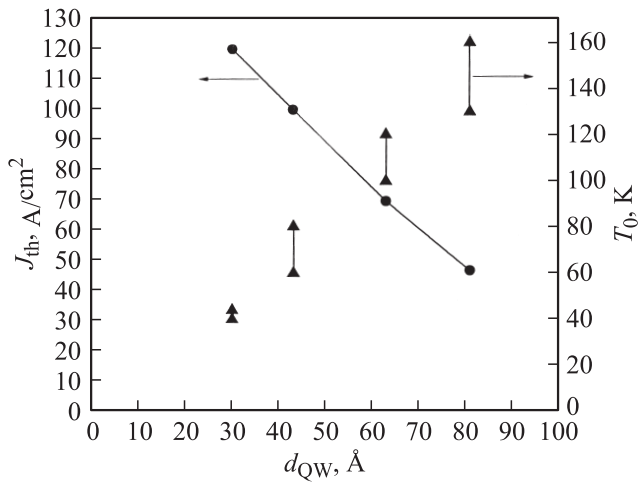


Рис. 3. Зависимости пороговой плотности тока (J_{th}) и характеристического параметра температурной чувствительности пороговой плотности тока (T_0) от толщины активной области $In_{0.35}Ga_{0.65}As$ (d_{QW}).

пределение основной моды излучения в расширенном волноводе гетероструктуры полностью определяется материальными и геометрическими параметрами эмиттерных и волноводных слоев. В этом случае фактор оптического ограничения активной области линейно зависит от толщины активной области и полностью определяет пороговую концентрацию носителей заряда в активной области лазерной структуры. В лазерной асимметричной гетероструктуре раздельного ограничения минимальное значение пороговой плотности тока достигается при максимальной величине толщины активной области.

Температурная чувствительность пороговой плотности тока в полупроводниковых лазерах оказывает огромное влияние на мощностные характеристики в непрерывном и импульсном режиме генерации. Температурный разогрев активной области лазерной структуры приводит к увеличению пороговой плотности тока и насыщению ватт-амперной характеристики лазеров при высоком уровне токовой накачки. Снижение температурной чувствительности пороговой плотности тока в полупроводниковых лазерах является одной из основных задач в борьбе за увеличение максимально достижимой оптической мощности, особенно в непрерывном режиме генерации. В работе [11] впервые было показано, что снижение пороговой концентрации носителей заряда в квантово-размерной активной области приводит к снижению температурной чувствительности пороговой плотности тока. В лазерах на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом с увеличением толщины квантово-размерной активной области наблюдается практически линейный рост характеристического параметра T_0 (рис. 3), что свидетельствует о снижении температурной чувствительности пороговой плотности тока. При максимальной исследуемой толщине активной области

($d_{QW} = 80$ Å) лазера достигается максимальное значение параметра T_0 , но при этом наблюдается достаточно сильный разброс T_0 , что, по нашему мнению, связано с возникновением дислокаций несоответствия, так как данное значение толщины активной области превышает критическое.

Важным параметром полупроводникового лазера является длина волны стимулированного излучения в режиме генерации. Управлять длиной волны генерации в довольно широких пределах возможно, изменяя толщину квантово-размерной активной области, тем самым сдвигая энергетическое положение электронного и дырочного уровня (рис. 4). В полупроводниковых лазерах на основе систем твердых растворов $AlGaAs/GaAs/In_xGa_{1-x}As$ при фиксированном составе твердого раствора слоя активной области ($x = 0.35$) удается менять длину волны генерации от 1000 до 1150 нм ($\Delta h\nu \approx 160$ мэВ). Максимальная длина волны генерации 1150 нм достигается в таких лазерах при толщине активной области $d_{QW} = 80$ Å.

На мощностные характеристики полупроводникового лазера огромное влияние оказывает величина стимулированного квантового выхода, который определяет дифференциальную квантовую эффективность на пороге генерации. В исследуемых нами полупроводниковых лазерах величина стимулированного квантового выхода практически не зависела от толщины в диапазоне 40–80 Å и составляла величину 95–100%, что характеризует лазерные структуры с отсутствием токовых утечек (рис. 5). Столь высокие значения величины стимулированного квантового выхода свидетельствуют о том, что при достижении порога генерации весь ток накачки (95–100%) излучательно рекомбинирует в активной области. В лазерных структурах с толщиной активной области меньше 40 Å величина стимулированного квантового выхода снижается и при $d_{QW} = 30$ Å составляет 50–60%, что указывает на наличие токовых утечек безызлучательного и излучательного характера

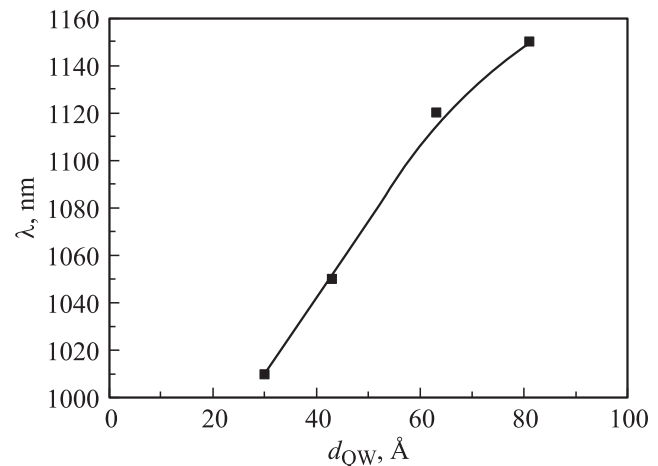


Рис. 4. Зависимость длины волны генерации (λ) лазерного диода от толщины активной области $In_{0.35}Ga_{0.65}As$ (d_{QW}).

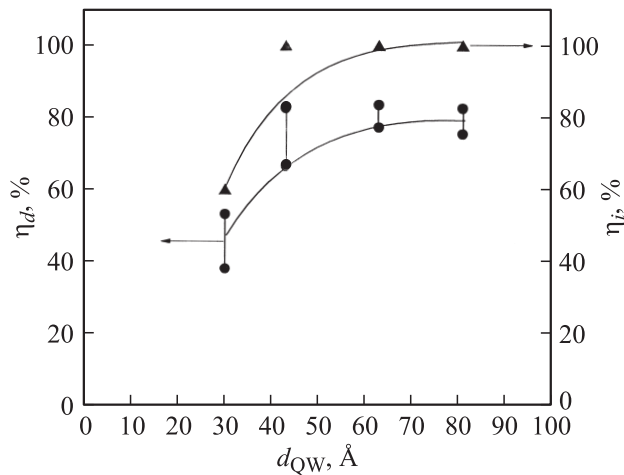


Рис. 5. Зависимости стимулированного квантового выхода (η_i) и дифференциальной квантовой эффективности (η_d) от толщины активной области (d_{QW}).

за пределами активной области лазерной структуры. По нашему мнению, это связано с уменьшением глубины залегания уровня квантования для электронов в активной области относительно волноводного слоя. В таких лазерных структурах зарегистрированы (качественно) излучательные токовые утечки в волноводном слое и безызлучательные токовые утечки носителей заряда в p -эмиттер. Аналогичная зависимость наблюдается и для дифференциальной квантовой эффективности от толщины активной области лазерной структуры (рис. 5).

Зависимость внешнего квантового выхода фотolumинесценции от толщины слоя активной области хорошо коррелирует с зависимостью максимально достижимой мощности оптического излучения в полупроводниковых лазерах, изготовленных для эксперимента с одинаковой длиной резонатора Фабри–Перо ($L \approx 3.2$ мм) (рис. 1). В зависимости наблюдается максимум мощности оптического излучения и величины внутреннего квантового выхода при толщине активной области $d_{QW} \approx 65$ Å. При больших толщинах активной области, превышающих критическую толщину напряженного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.35$), наблюдалось снижение максимально достижимой мощности излучения и величины внутреннего квантового выхода. По нашему мнению, это обусловлено релаксацией упругих напряжений в структуре, которая связана с образованием дефектов и дислокаций. При дальнейшем увеличении толщины возрастает степень релаксации упругих напряжений, что приводит к резкому ухудшению мощностных характеристик вплоть до отсутствия генерации в лазерном диоде при толщине активной области 90 Å. При уменьшении толщины активной области также наблюдается снижение максимальной мощности оптического излучения и величины квантового выхода. Особенно сильно оно происходит при толщинах меньше 40 Å, что, очевидно, связано с уменьшением глубины залегания уровня кван-

тования для электронов в активной области относительно волноводного слоя.

4. Заключение

В данной работе было исследовано влияние толщины сильно напряженной квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.35$) в качестве активной области асимметричной лазерной гетероструктуры раздельного ограничения с расширенным волноводом на основные лазерные характеристики. Было показано, что в асимметричной лазерной гетероструктуре раздельного ограничения с расширенным волноводом толщина активной области не влияет на величину внутренних оптических потерь полупроводниковых лазеров. Это обусловлено малой долей оптических потерь активной области в суммарных внутренних оптических потерях лазерной структуры. С увеличением толщины активной области лазерной гетероструктуры при фиксированном составе твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ наблюдалось улучшение таких характеристик как пороговый ток, температурная чувствительность пороговой плотности тока, стимулированный квантовый выход и дифференциальная квантовая эффективность. Максимально достижимая оптическая мощность излучения возрастала при увеличении толщины активной области до значений меньше критической. Увеличение толщины активной области выше критической приводит к резкому снижению максимально достижимой оптической мощности излучения вплоть до отсутствия генерации излучения, что обусловлено релаксацией упругих напряжений в гетероструктуре.

Авторы благодарят Т.Б. Попову за проведение рентгеноспектрального микроанализа слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Работа поддержана грантом РФФИ № 07-02-00714, программами президиума Академии наук № 27 и отделения ОФН III-7, а также госконтрактом № 02.513.12.3011.

Список литературы

- [1] Д.А. Лифшиц, А.Ю. Егоров, И.В. Кочнев, В.А. Капитонов, В.М. Лантратов, Н.Н. Леденцов, Т.А. Налет, И.С. Тарасов. ФТП, **35** (3), 380 (2001).
- [2] П.В. Булаев, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Д.Б. Никитин, Д.Н. Николаев, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, А.Д. Бондарев, И.Д. Залевский, И.С. Тарасов. ФТП, **36** (9), 1144 (2002).
- [3] Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **38** (3), 374 (2004).
- [4] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. Electron. Lett., **40** (22), 1413 (2004).
- [5] В.В. Шамахов, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, В.А. Капитонов, С.А. Зорина, Д.Н. Николаев, А.В. Мурашова, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **31** (23), 1 (2005).

- [6] А.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов. *ФТП*, **40** (5), 628 (2006).
- [7] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщёв, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов. *ФТП*, **41** (8), 1003 (2007).
- [8] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **38** (12), 1477 (2004).
- [9] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. *ФТП*, **43** (10), 1374 (2009).
- [10] *Quantum Well Lasers*, ed. by P.S. Zory, jr. (Academic Press, 1993) p. 373.
- [11] И.С. Тарасов, Д.З. Гарбузов, В.П. Евтихийев, А.В. Овчинников, З.Н. Соколова, А.В. Чудинов. *ФТП*, **19** (8), 1496 (1985).

Редактор Т.А. Полянская

Influence of active region thickness on characteristics of semiconductor lasers based on asymmetric AlGaAs/GaAs/InGaAs heterostructures with broad waveguide

D.A. Vinokurov, V.V. Vasilyeva, V.A. Kapitonov, A.V. Lyutetskiy, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, A.L. Stankevich, V.V. Shamakhov, N.V. Fetisova, I.S. Tarasov

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Influence of active region thickness on basic characteristics of high power semiconductor lasers on asymmetric separate confinement AlGaAs/GaAs/InGaAs heterostructures grown by MOCVD epitaxy has been investigated. It has been shown, that threshold current, temperature sensitivity of threshold current density, internal quantum efficiency of stimulated emission and differential quantum efficiency are improving with active region thickness increase. It has been demonstrated that maximal attainable output optical power of semiconductor laser and internal quantum efficiency of photoluminescence are mostly sensitive to the defect formation in heterostructure and therefore reduce when thickness of strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layer in active region exceeds its critical value.