Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 4, с. 201 – 207

Полупроводниковый дисковый лазер на гетероструктуре GaInP/AlGaInP с внутрирезонаторной накачкой в квантовые ямы

*А. А. Елшербини+, В. И. Козловский*1), Я. К. Скасырский*, М. П. Фролов**

+*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

**Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 3 июня 2025 г.
После переработки 16 июля 2025 г.
Принята к публикации 17 июля 2025 г.

Исследован впервые реализованный импульсный полупроводниковый дисковый лазер на гетероструктуре GaInP/AlGaInP с 25 квантовыми ямами, излучающий на длине волны 642.5 нм при внутрирезонаторной накачке в квантовые ямы излучением лазера на красителе с длиной волны 614.5 нм. Достигнута импульсная мощность ~ 80 Вт при длительности импульса ~ 0.5 мкс. Мощность ограничивается процессом разрушения структуры. Обнаружена временная модуляция излучения лазера на красителе с гетероструктурой внутри резонатора с периодом ~ 6 нс равным времени обхода резонатора.

DOI: 10.31857/S0370274X25080148, EDN: LGDZUF

Полупроводниковые дисковые лазеры (ПДЛ) с оптической накачкой отличаются высокой мощностью и эффективностью при высоком качестве лазерного пучка [1–4]. При накачке в квантовые ямы (КЯ) уменьшаются тепловыделения в гетероструктуре за счет уменьшения квантового дефекта, а также не возникают проблемы с эффективным сбором неравновесных носителей в КЯ, наблюдаемые при накачке в барьерные слои [5]. Однако при этом снижается эффективность накачки. Для повышения этой эффективности используют сложные многопроходные системы накачки [6, 7]. В настоящей работе впервые предложено для повышения эффективности накачки использовать схему, в которой гетероструктура размещается внутри резонатора лазера накачки.

Использовалась гетероструктура GaInP/AlGaInP с 25 КЯ, рассчитанная на достижение резонансно-периодического усиления на длине волны 640 нм. Параметры гетероструктуры представлены в табл. 1 [8]. Гетероструктура была выращена компанией Bandwidth Semiconductor Company методом металлоорганической парофазной эпитаксии (MOVPE) на подложках из GaAs, разориентированных на 10° от плоскости (001) к плоскости (111)A.

На поверхность гетероструктуры наносилось диэлектрическое зеркало с расчетным коэффициентом отражения 99.6 % в спектральной области 600–650 нм. Этим зеркалом гетероструктура приклеивалась к сапфировой подложке клеем EPOTEK-301. Ростовая подложка GaAs затем шлифовалась до толщины 80 мкм и окончательно стравливалась вместе с буферным слоем в водном растворе NaOH и H_2O_2. Для накачки гетероструктуры использовался импульсный лазер на красителе Родамин 6G с ламповой накачкой. Спиртовой раствор красителя прокачивался через кварцевую кювету с внутренним диаметром 3 мм и длиной 100 мм. Оптическая схема внутрирезонаторной накачки представлена на рис. 1.

Резонатор лазера на красителе образован сферическим зеркалом M1 с коэффициентом отражения $R > 99.9\,\%$ в области $\lambda = 600{-}620$ нм и радиусом кривизны $r = 750$ мм, фокусирующей линзой L с просветленными поверхностями и фокусным расстоянием $F = 80$ мм и выходным сферическим зеркалом M2 с коэффициентом пропускания $T = 1.8\,\%$ в области $\lambda = 600{-}620$ нм и радиусом кривизны $r = 75$ мм. Гетероструктура с зеркальным покрытием располагалась на расстоянии 85 мм от линзы L и на расстоянии 75 мм от зеркала M2, являясь поворотным зеркалом. Угол падения пучка излучения лазера на красителе составлял 45° относительно нормали к поверхности гетероструктуры. Для уменьшения размеров пятна лазера накачки на поверхности гетероструктуры перед линзой размещалась диафрагма D диаметром в 1 мм.

Резонатор ПДЛ был образован зеркальным покрытием, нанесенным на обратную поверхность гетероструктуры и внешним сферическим зеркалом M3 с радиусом кривизны 50 мм. Использовалось два раз-

1)e-mail: kozlovskiyvi@lebedev.ru

Таблица 1. Состав и толщины слоев гетероструктуры

Назначение слоев	Состав слоев	Толщина слоев, нм	Число слоев
Защитный слой	$Ga_{0.5}1In_{0.49}P$	6	1
Барьерный слой	$(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$	186	1
Квантовая яма	$Ga_{0.51}In_{0.49}P$	7	25
Барьерный слой	$(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$	186	25
Защитный слой	$Ga_{0.51}In_{0.49}P$	6	1
Буферный слой	GaAs	200	1
	GaAs подложка		

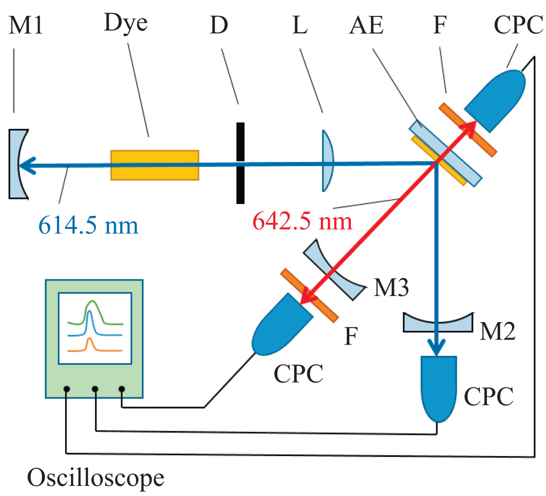

Рис. 1. (Цветной онлайн) Оптическая схема ПДЛ: M1 – глухое зеркало резонатора; Dye – активная среда лазера на красителе; D – диафрагма; L – фокусирующая линза; AE – активный элемент ПДЛ, содержащий на сапфировой подложке гетероструктуру с зеркальным покрытием; F – фильтр; CPC – фотоэлементы коаксиальные ФЭК-29; M2 – выходное зеркало резонатора лазера на красителе; M3 – внешнее зеркало ПДЛ

ных зеркала с коэффициентом отражения 99 и 97.3 % на длине волны вблизи 640 нм.

Осциллограммы импульсов излучения лазера накачки и ПДЛ регистрировались с помощью калиброванных коаксиальных фотоэлементов (ФЭК-29) и осциллографа Tektronix (1000 МГц) с временным разрешением $\sim$1 нс. Поскольку излучение ПДЛ частично выходило и через сапфировую подложку, то излучение регистрировалось с обеих сторон. Вместо ФЭК-29 могли размещаться измеритель энергии PE50-SH-V2 фирмы Ophir с дисплеем Nova-2, или приемная головка волоконного ввода спектрографа S-100 (Solar Laser Systems) для измерения спектра генерации, или цифровая камера типа Canon без объектива для измерения картины дальнего поля. При этом матрица фотодиодов размещалась на расстоянии 240 мм от структуры. Диаметр пятна возбуждения гетероструктуры оценивался по пятну фотолюминесценции, которое регистрировалось цифровой камерой в отсутствии внешнего зеркала M3.

Для достижения максимально высокой мощности излучения ПДЛ диафрагма удалялась из резонатора. При высоких уровнях накачки наблюдалась деградация поверхности гетероструктуры. Изображение деградированных участков регистрировалось с помощью оптического микроскопа Neophot 30.

На рисунке 2 представлены типичные спектры излучения лазера на красителе и ПДЛ.

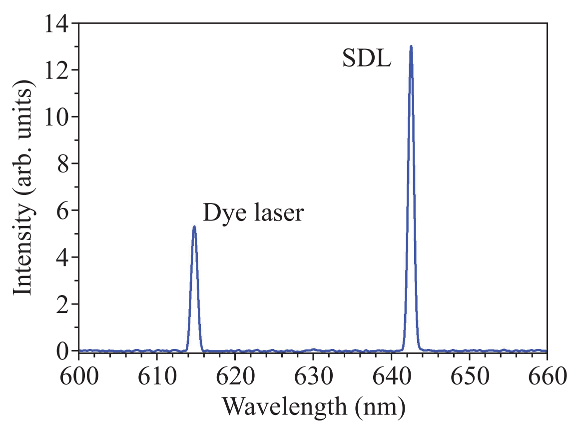

Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектр генерации лазера на красителе и ПДЛ

Лазер накачки излучает на длине волны 614.5 нм, а ПДЛ – на длине волны 642.5 нм. Ширины линий на полувысоте излучения обоих лазеров составляют примерно 1 нм, что сравнимо с разрешением спектрального прибора. Линия излучения лазера на красителе в основном определяются модами малодобротного резонатора, образованного гетероструктурой (свободной поверхностью гетероструктуры и обратной ее поверхностью с нанесенным зеркальным покрытием).

Зависимости полной (в обе стороны) мощности импульса ПДЛ от мощности импульса лазера на красителе при диафрагме с диаметром $D = 1$ мм (a) и

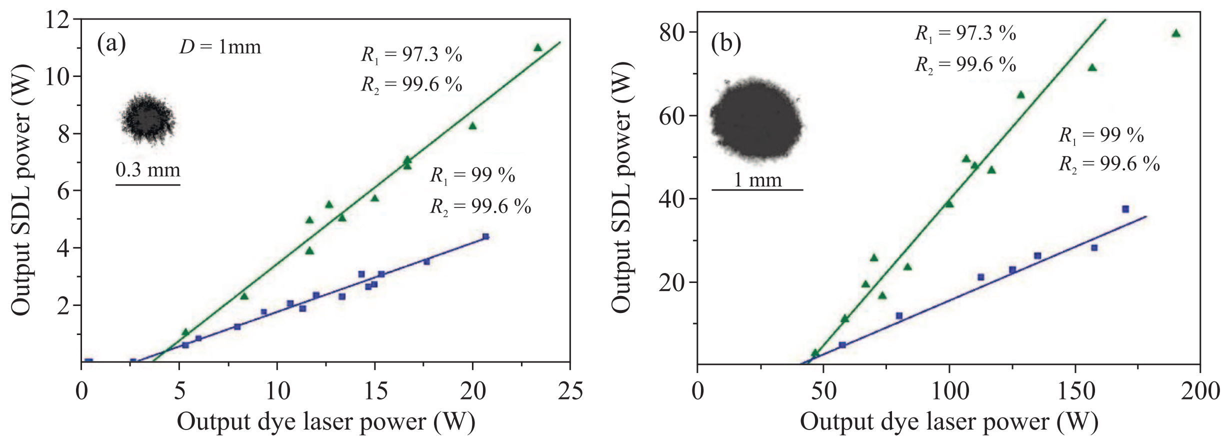

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимость мощности импульса ПДЛ от мощности импульса лазера на красителе при диафрагме с диаметром $D = 1$ мм (a) и без диафрагмы (b). R1 и R2 – коэффициента отражения соответственно внешнего зеркала ПДЛ и зеркального покрытия на гетероструктуре. На вставках – изображение нефотометрируемого пятна накачки

без диафрагмы (b) представлены на рис. 3. На вставках к рис. 3 представлены изображения пятен излучения структуры в отсутствие внешнего зеркала M3.

Видно, что при использовании диафрагмы размеры пятна возбуждения гетероструктуры уменьшаются более, чем в три раза, и почти на порядок величины уменьшается мощность лазера на красителе. Максимальная импульсная мощность ПДЛ при наличии диафрагмы составила 11 Вт. Пропускание выходного зеркала лазера на красителе равно 1.8 %. Поэтому выходная мощность лазера 20 Вт при диафрагме 1 мм (рис. 3a) соответствует внутрирезонаторной мощности $I_1 \approx 1.1$ кВт между гетероструктурой и выходным зеркалом M2. Аналогично можно оценить внутрирезонаторную мощность ПДЛ величиной $I_{\mathrm{SDL}} \sim 0.35$ кВт при той же выходной мощности лазера на красителе. Пусть данная гетероструктура за два прохода поглощает долю k_a от энергии падающей накачки. Тогда мощность излучения лазера на красителе, входящего в гетероструктуру с другой стороны будет равна $I_2 = I_1/(1-k_a)$. Суммарная мощность накачки, поглощенная в гетероструктуре, равна $k_a \cdot (I_1 + I_2) = I_1 \cdot k_a/(1-k_a)$ и эффективность ПДЛ равна $\eta = I_{\mathrm{SDL}} \cdot (1-k_a)/(k_a \cdot I_1)$. Используя полученное ранее при внешней накачке ПДЛ излучением лазера на красителе значение $k_a = 0.45$ [8], получаем оценку $\eta = 0.28$. Если учесть, что на пороге генерации ПДЛ выходная мощность лазера на красителе равна ~ 3 Вт, то дифференциальный КПД ПДЛ относительно вложенной энергии накачки можно оценить величиной 32 %. Эта оценка является оценкой снизу, поскольку при мощной внутрирезонаторной накачке возможно насыщение поглощения, что приводит к уменьшению параметра k_a. Полученная эффективность близка к рекордной для ПДЛ на гетероструктуре GaInP/AlGaInP. Учитывая, что диаметр возбуждения в этом случае равен ~ 0.3 мм, получаем оценки для интенсивностей внутри резонатора 0.58 МВт/см^2 и 1.56 МВт/см^2 соответственно для ПДЛ и лазера на красителе.

На пороге генерации ПДЛ внутренняя интенсивность лазера накачки составляет ~ 200 кВт/см^2. Только 45 % этой накачки поглощается в гетероструктуре и только малая доля $k = 1 - \lambda_{\mathrm{SDL}}/\lambda_{6\mathrm{G}} = 1 - 614.5/642.5 = 0.044$ принципиально идет на разогрев структуры из-за квантового дефекта. Поэтому нагревающая гетероструктуру интенсивность накачки составляет ~ 4 кВт/см^2, что сравнимо с порогами ПДЛ, работающих в непрерывном режиме [1].

Максимальная выходная мощность ПДЛ ~ 80 Вт была получена без диафрагмы внутри резонатора. При выходной мощности лазера на красителе 160 Вт внутрирезонаторная мощность составила почти 8.9 кВт. В этом случае выходная мощность ПДЛ ($R_1 = 99$ %) была равна 30 Вт, а внутри резонатора – 3 кВт. Но из-за большего диаметра возбуждения внутренние интенсивности излучения лазера на красителе и ПДЛ были сравнимы с интенсивностями, полученными при использовании диафрагмы, и равны соответственно 1.1 МВт/см^2 и 0.38 МВт/см^2. На пороге генерации ПДЛ внутрирезонаторная интенсивность лазера на красителе была ~ 280 кВт/см^2.

На рисунке 4 представлены характерные осциллограммы лазера накачки и ПДЛ при высоких уровнях возбуждения. Полная длительность импульса излучения накачки (по основанию) превышает 1.5 мкс. Длительность импульса излучения ПДЛ в

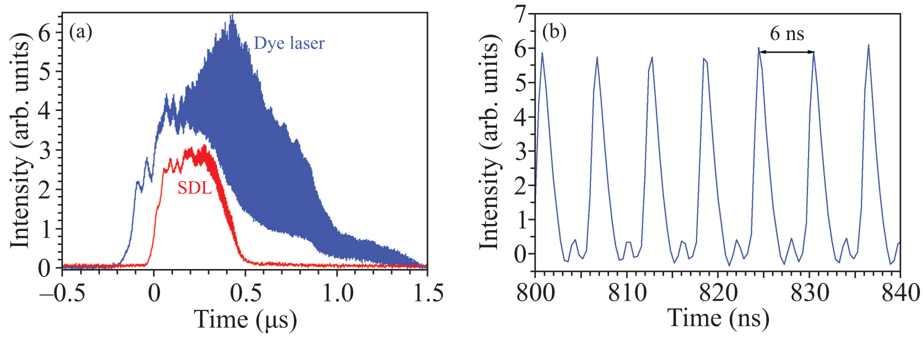

Рис. 4. (Цветной онлайн) Осциллограммы импульсов излучения лазера на красителе и ПДЛ (a) и фрагмент импульса излучения лазера на красителе с лучшим временным разрешением (b)

этом случае заметно меньше и составляет 0.5 мкс. На импульсе лазера на красителе видна модуляция излучения, глубина которой к концу импульса усиливается (см. рис. 4a).

Период модуляции излучения лазера на красителе, представленный на рис. 4b, равный 6 нм, соответствует времени обхода резонатора. Ширина временного пика на полувысоте, измеренная осциллографом Tektronix MSO-4104, составила 1.5 нс (разрешение ограничивается ФЭК-29). Модуляция заметна и на импульсе излучения ПДЛ, хотя глубина модуляции существенно меньше. Кроме того, наблюдается небольшой сдвиг (~ 2 нс) импульсов излучения ПДЛ относительно импульсов излучения лазера на красителе.

Мы предполагаем, что имеет место пассивная модуляция излучения лазера на красителе, а гетероструктура при этом работает как насыщающийся поглотитель. Поглощение уменьшается по мере увеличения концентрации неравновесных носителей в гетероструктуре и заполнения подзон КЯ до энергетических уровней, между которыми происходит поглощение на длине волны накачки. При достижении генерации в ПДЛ эта концентрация стабилизируется. Стабилизируется и поглощение излучения лазера на красителе в гетероструктуре. Таким образом, происходит частичное просветление. Однако по мере разогрева гетероструктуры увеличивается пороговая концентрация неравновесных носителей, просветление усиливается. После срыва генерации в ПДЛ концентрация неравновесных носителей уже не ограничивается сверху и может достигнуть достаточно высоких значений, необходимых для глубокого просветления гетероструктуры. Сброс концентрации происходит за счет люминесценции (время спада интенсивности ~ 1 нс), в том числе за счет усиленного спонтанного излучения вдоль гетероструктуры (< 1 нс).

На рисунке 5 представлены картины дальнего поля ПДЛ при диафрагме 0.3 мм внутри резонатора лазера на красителе и длине резонатора ПДЛ 46 мм. При небольшом превышении над порогом генерации возбуждается основная (не показана) или первая поперечная мода (рис. 5a). При высоком превышении порога наблюдается многомодовый режим генерации с полным углом расходимости примерно 15 мрад (рис. 5b). Следует отметить, что выходное зеркало нанесено на поверхность плоско-сферической подложки, которая представляет собой рассеивающую линзу, увеличивающую расходимость примерно в 1.5 раза. При увеличении пятна возбуждения до 1 мм и увеличении длины резонатора вплоть до $L_c = r$ (полуконцентрический резонатор) мощность увеличивалась, но увеличивалась и расходимость излучения из-за генерации большего числа поперечных мод.

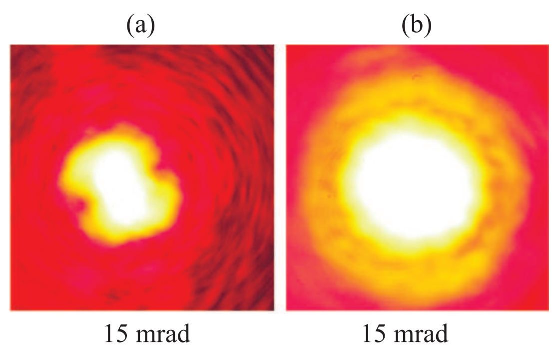

Рис. 5. (Цветной онлайн) Картины дальнего поля излучения ПДЛ при малом (a) и большом (b) превышении над порогом генерации. Внутри резонатора лазера на красителе стоит диафрагма 1 мм. Длина резонатора ПДЛ – 46 мм

К сожалению, при высоких уровнях накачки наблюдается деградация ПДЛ. Согласно предварительным оценкам повреждение структуры наблюдается при внутрирезонаторной интенсивности излучения лазера на красителе ~ 1 МВт/см^2. За порог деградации принималась интенсивность, при которой уже на втором импульсе накачки мощность ПДЛ падала на 30 %.

На рисунке 6 представлены фотографии области разрушения гетероструктуры при высоких уровнях накачки. Размеры разрушения примерно соответствуют размерам области возбуждения, определенным по изображениям свечения гетероструктуры (вставки к рис. 3). На рисунке 6а изображены следы от трех импульсов в разные области гетероструктуры при небольшом превышении над порогом разрушения и диаметре области возбуждения ~ 0.3 мм. Видна точечная структура разрушения.

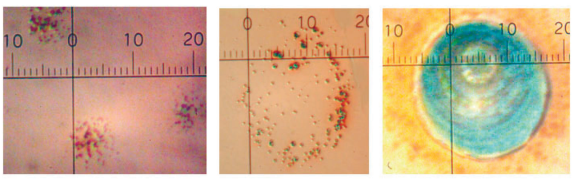

Рис. 6. (Цветной онлайн) Фотографии фрагментов гетероструктуры после их деградации при высоком уровне накачки с диафрагмой внутри резонатора (a) и без диафрагмы (b) и (c). Одно малое деление шкалы равно 40 мкм (a), (b) и 1 мкм (c)

Фотография на рис. 6b показывает разрушение при большом (~ 1 мм) пятне возбуждения. На этой фотографии хорошо видно точечное вспучивание гетероструктуры. Увеличенное изображение одного из таких вспучиваний представлено на рис. 6c с более высоким разрешением. Возможно, локальное вспучивание при невысоких превышениях над порогом разрушения связано с дефектностью гетероструктуры. Из рисунка 6b можно оценить концентрацию таких дефектов величиной 10^4–10^5 см$^{-2}$, вероятно, связанных с дислокациями в гетероструктуре. При предельно высоких уровнях накачки облучаемый участок гетероструктуры отскакивает от подложки. При этом зеркальное покрытие остается на клеевом слое.

Характер разрушений свидетельствует, что основным механизмом разрушения является термоупругие напряжения. Рассмотрим случай идеальной бездефектной гетероструктуры. При нагреве возбужденной области на всю глубину гетероструктуры возникают радиальные упругие напряжения сжатия, обусловленные давлением холодных областей гетероструктуры на нагретую область, и азимутальные напряжения растяжения на периферии области возбуждения. Когда эти напряжения превышают критические, происходит вспучивание гетероструктуры на поверхности.

При росте температуры гетероструктуры на величину ΔT радиальные упругие напряжения записываются следующим образом [9]:

$$\varepsilon = \frac{E}{1-\nu} \cdot k_\perp \cdot \Delta T, \tag{1}$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, $k_\perp$ – коэффициент температурного расширения вдоль гетероструктуры. Для оценки приращения температуры в течение импульса накачки пренебрежем отводом тепла вдоль гетероструктуры, поскольку диаметр пятна возбуждения значительно превышает толщину гетероструктуры, но учтем распространение тепла от гетероструктуры к подложке. Сначала предположим, что материал зеркального покрытия и клеевого слоя имеют одинаковый с гетероструктурой коэффициент температуропроводности $a^2 = \chi/C$, где χ – коэффициент теплопроводности, а C – объемная теплоемкость этого материала. Таким образом, среда в направление z однородна. Тогда зависимость приращения температуры выражается формулой [10]:

$$\Delta T(z,t) = \frac{I_h}{h \cdot C} \cdot \int_0^t \int_0^H \frac{f(z) \cdot \exp\left[-\frac{(z-\xi)^2}{4 \cdot a^2 \cdot (t-\tau)}\right]}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\pi \cdot (t-\tau)}} \cdot d\xi \cdot d\tau, \tag{2}$$

где I_h – интенсивность накачки, идущая на нагрев структуры, h – толщина структуры, $H \gg h$, $f(z) = 1$ при $0 \le z \le h$ и равна нулю при $z > h$, характеризует область возбуждения, $\partial T(z,t)/\partial z|_{z=0} = 0$ – граничное условие.

Однако коэффициент теплопроводности χ_1 зеркального покрытия и клея значительно ниже коэффициента теплопроводности гетероструктуры. В этом случае можно считать, что изменение температуры по толщине гетероструктуры незначительное, а основное изменение происходит в примыкающем к гетероструктуре материале. Тогда, устремив h к нулю, можно $f(z)/h$ заменить дельта-функцией, а для максимальной температуры на поверхности гетероструктуры получим выражение:

$$\Delta T(0,t) = \frac{I_h}{C} \cdot \int_0^t \frac{d\tau}{2 \cdot a\sqrt{\pi \cdot (t-\tau)}} = \frac{I_h}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{t}{C_1 \cdot \chi_1}}. \tag{3}$$

Подставляя ΔT из уравнения (3) в уравнение (1), считая, что $C_1 \approx C$ и приравнивая ε критическому значению $\varepsilon_{\rm cr}$, получим оценку для порога разрушения гетероструктуры $I_{h,\rm deg}$:

$$I_{h,\rm deg} = \varepsilon_{\rm cr} \cdot \frac{1-\nu}{E \cdot k_\perp} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot C \cdot \chi_1}{t}}. \tag{4}$$

Для исследуемой гетероструктуры $\varepsilon_{\rm cr}$ неизвестно, поэтому для оценки берем значение 10^4 Н/см^2, характерное для GaAs [9]. Упругие параметры гетероструктуры и ее теплоемкость заменяем на близкие параметры для $\mathrm{Ga_{0.5}In_{0.5}P}$ [11]: $E = 8.2 \cdot 10^6$ Н/см^2, $k_\perp = 5.3 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{K}^{-1}$, $\nu = 0.335$ и $C = 1.65$ Дж $\cdot$ см$^{-3} \cdot \mathrm{K}^{-1}$. Теплопроводность зеркального покрытия сильно зависит от способа изготовления, но не превышает $\chi_1 = 0.005$ Вт $\cdot$ см$^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1}$ [12]. Тогда получаем оценку $I_{h,\rm deg} = 25$ кВт/см^2. Из формулы (4) видно, что порог деградации растет с уменьшением длительности импульса. В реальной гетероструктуре со структурными дефектами следует ожидать более низкие значения для порога разрушения.

В наших предварительных экспериментах деградация наблюдалась при внутрирезонаторной интенсивности излучения лазера на красителе примерно 1 МВт/см^2. Однако доля этого излучения, которая поглощалась в гетероструктуре, составляла 0.45. Из поглощенной энергии непосредственно на нагрев гетероструктуры идет только малая часть 0.044 из-за квантового дефекта. По нашим оценкам, $\sim 30\,\%$ поглощенной энергии переходит в излучение ПДЛ. Остальные $\sim 65\,\%$ могут уноситься из активной области усиленным спонтанным излучением или рассеиваться на неоднородностях структуры, в частности, на шероховатостях гетерограниц. Часть этого излучения также переходит в нагрев возбужденной области. Если все же нагрев происходит только за счет квантового дефекта, то нижняя оценка интенсивности порога деградации равна $I_{h,\rm deg} \approx 20$ кВт/см^2. Эта оценка хорошо соответствует расчетному значению 25 кВт/см^2.

Из формулы (4) следует также, что порог деградации можно существенно повысить, если гетероструктуру пристыковывать на подложку с высоким коэффициентом теплопроводности, как это делается в современных ПДЛ. В этом случае зеркальное покрытие надо выносить на обратную сторону хладопроводящей подложки либо использовать более сложный резонатор как для ПДЛ, так и для лазера накачки. Если теплопроводность подложки будет превышать теплопроводность гетероструктуры, то толщину гетероструктуры следует уменьшать.

Выше мы пренебрегли оттоком тепла вдоль структуры. В обе стороны от центра возбужденной области тепло за время t будет распространяться на расстояние $(\chi \cdot t/C)^{0.5}$, приводя к увеличению диаметра нагретой области. При малых диаметрах возбужденной области относительное изменение диаметра нагретой области может быть сравнимо с относительным расширением глубины нагретой области, если гетероструктура закреплена на подложке с плохой теплопроводностью. В этом случае порог лазерной деградации будет зависеть от диаметра, увеличиваясь с уменьшением диаметра.

В заключение отметим, что в данной работе впервые реализована внутрирезонаторная накачка ПДЛ непосредственно в КЯ. Это позволяет увеличить эффективность накачки в КЯ без применения сложных многопроходных систем накачки. Достигнута рекордно высокая импульсная мощность ПДЛ в 80 Вт на длине волны вблизи 640 нм при длительности импульса 0.5 мкс. Однако мы столкнулись с проблемой деградации структуры при высоких уровнях накачки. Оценка пороговой интенсивности деградации бездефектной структуры соответствует экспериментальным данным. Повышение порога деградации возможно при непосредственном контакте гетероструктуры с подложкой с высокой теплопроводностью. Помещение гетероструктуры в резонатор лазера на красителе приводит к существенной модуляции его излучения с периодом, равным времени обхода резонатора. Частичная модуляция излучения наблюдается и в ПДЛ.

Результаты данной работы могут иметь практическое значение, если в качестве лазера накачки использовать лазерные диоды с внешней обратной связью. Гетероструктуры с внутриямной накачкой могут использоваться в качестве внутрирезонаторных нелинейных элементов.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института в рамках темы Государственного задания Физического института имени П. Н. Лебедева номер FFMR-2024-0017. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. *Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers. VECSEL Technology and Applications*, ed. by M. Jetter and P. Michler, Wiley-VCH, Weinheim, Germany (2021).
2. J. Hastie, S. Calvez, and M. Dawson, *Semiconductor disk lasers (VECSELs)*, in A. Baranov and E. Tournie (editors), *Semiconductor lasers: fundamentals and applications*, Woodhead Publishing Limited, Sawston, Cambridge (2013).
3. *Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology*, Ed. by O. G. Okhotnikov, Wiley-VCH Berlin, Germany (2010).

4. M. Guina, A. Härkönen, V.-M. Korpijörvi, T. Leinonen, and S. Suomalainen, Advances in Optical Technologies **2012**, 265010 (2012).
5. H. P. Kahle, M. Jetter, and P. Michler, *Optically Pumped Red-Emitting AlGaInP-VECSELs and the MECSEL Concept*, in *Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers*, ed. by M. Jetter and P. Michler, Wiley-VCH, Weinheim, Germany (2021).
6. D. Priante, M. Zhang, A. R. Albrecht, R. Bek, M. Zimmer, and C. L. Nguyen, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **28**(1), 1700407 (2022).
7. C. M. N. Mateo, U. Brauch, H. Kahle, T. Schwarzbäck, M. Jetter, M. A. Ahmed, P. Michler, and T. Craf, Opt. Lett. **41**(6), 1245 (2016).
8. В. И. Козловский, С. М. Женишбеков, Я. К. Скасырский, М. П. Фролов, Квантовая электроника **53**(12), 891 (2023) [Bull. Lebedev Phys. Inst. **51**(S3), S191 (2024)].
9. Y. Matsuoka, J. Phys. D: Appl. Phys. **9**, 215 (1976).
10. В. С. Владимиров, *Уравнения математической физики*, Наука, М. (1971), с. 260.
11. http://www.matprop.ru/GaInP.
12. S. D. Jacobs, D. G. Angeley, D. S. Smith, and J. C. Lambropoulos, *Thermal conductivity measurements of dielectric thin films on optical substrates. Annual Meeting Optical Society of America Technical Digest Series*, Optica Publishing Group, Seattle, Washington United States (1986), p. TUR4.