

Наносекундный полупроводниковый дисковый лазер с длиной волны излучения 496.5 нм

М.Р.Бутаев, В.И.Козловский, Я.К.Скасырский

Исследован полупроводниковый дисковый лазер с оптической накачкой на основе гетероструктуры, содержащей десять sdвоенных квантовых ям CdS/ZnSe с разрывами зон второго типа. Структура выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) на подложке GaAs. При комнатной температуре и продольной накачке излучением импульсно-периодического N₂-лазера достигнута пиковая мощность излучения полупроводникового дискового лазера 0.75 Вт на длине волны 496.5 нм при длительности импульса 3 нс и частоте следования 100 Гц. Дифференциальная эффективность дискового лазера составила 2.7%. При длине резонатора лазера 1.1 мм полный угол расходимости излучения изменялся от 5 мрад вблизи порога генерации до 15 мрад при максимальной мощности накачки.

Ключевые слова: ГФЭМОС, полупроводниковый дисковый лазер, CdS/ZnSe-гетероструктура, квантовые ямы, оптическая накачка.

1. Введение

Интенсивное развитие полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ) связано с их способностью генерировать излучение высокой мощности при высоком качестве пучка [1–4]. И хотя в настоящее время в ПДЛ применяются в основном гетероструктуры на основе соединений A₃B₅, излучающие в ближнем ИК диапазоне, возможность использования различных нелинейных эффектов внутри резонатора этих лазеров позволяет освоить УФ [5, 6], видимый [3, 4], средний ИК [7], а также субмиллиметровый диапазоны спектра [8]. Отметим, что использование третьей или четвертой гармоники излучения таких ПДЛ существенно понижает КПД лазерной системы в целом [5, 9].

Цель настоящей работы – создание ПДЛ с оптической накачкой на основе гетероструктур соединений A₂B₆, излучающего на основной частоте в сине-зеленом диапазоне спектра (~480–560 нм). В этом случае переход в наиболее востребованный для ряда применений средний УФ диапазон (~240–280 нм) можно осуществить относительно простым внутррезонаторным удвоением частоты. Для этого в качестве активной среды лазера необходимо использовать резонансно-периодические структуры из широкозонных соединений.

Для работы в сине-зеленом диапазоне спектра подходят гетероструктуры InGaN/GaN, а также хорошо изученные гетероструктуры соединений A₂B₆, такие как ZnCdSe/ZnSSe и ZnSe/ZnMgSSe. Использование гетероструктур InGaN/GaN в настоящее время затруднительно,

поскольку их трудно отделить от ростовой подложки (обычно сапфировой) и перенести на прозрачную подложку с высокой теплопроводностью, а также создать встроенное брэгговское зеркало.

Сложилось мнение, что упомянутые выше гетероструктуры соединений A₂B₆ ненадежны для лазерных применений, поскольку до сих пор не решена проблема деградации лазерных диодов на их основе [10–12]. Кроме факторов деградации, присущих инжекционным лазерам (необходимость создания p–n-перехода и надежных контактов), называются также недостаточная прочность химических связей атомов металла второй группы с селеном и внутренние упругие напряжения в квантовых ямах (КЯ) [10, 13, 14]. Очевидно, что для лазеров с оптической накачкой могут быть существенными лишь последние факторы деградации.

В работах [15, 16] нами была исследована возможность использования наноразмерной гетероструктуры на основе гетероперехода второго рода ZnCdS/ZnSSe в полупроводниковых лазерах с микрорезонатором и накачкой электронным пучком. Предполагалось, что эти гетероструктуры, в отличие от ранее изученных гетероструктур типа Zn(Cd)Se/Zn(Mg)SSe [10, 17], менее подвержены твердотельной диффузии при температурах эпитаксиального роста и интенсивном возбуждении из-за более прочных сульфидных химических связей в КЯ.

Недавно мы сообщали о получении генерации на гетероструктуре с десятью КЯ CdS/ZnSe в лазере с продольной оптической накачкой микрорезонатора излучением импульсно-периодического N₂-лазера [18]. Микрорезонатор был образован диэлектрическими зеркалами, нанесенными на поверхности гетероструктуры толщиной 1.2 мкм. Диаметр области возбуждения превышал 500 мкм. Это приводило к тому, что в пределах области возбуждения одновременно возбуждалось несколько десятков когерентно-независимых лазеров с полным углом расходимости примерно 10°. Кроме того, из-за сильного влияния усиленного спонтанного излучения, распространяюще-

М.Р.Бутаев, В.И.Козловский. Физический институт им. П.Н.Лебедева, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: vikoz@sci.lebedev.ru
Я.К.Скасырский. Физический институт им. П.Н.Лебедева, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

гося в перпендикулярном оси резонатора направлении, эффективность лазера не превышала 0.3%.

В настоящей работе сообщается о получении генерации на похожей структуре, но при использовании внешнего зеркала обратной связи, что позволило впервые реализовать ПДЛ с оптической накачкой, излучающий в синне-зеленой области спектра.

2. Эксперимент

Выращивание наноразмерных гетероструктур CdS/ZnSe осуществлялось методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) в потоке водорода при атмосферном давлении в кварцевом реакторе. В качестве исходных соединений для роста структур использовались диметилселенид ($(\text{CH}_3)_2\text{Se}$), диметилкадмий $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$, диэтилсульфид $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{S}$ и диэтилцинк $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$. Рост проводился на подложках GaAs, разориентированных от плоскости (001) на 10° к плоскости (111) А. Температура роста подложки составляла 440°C . Толщины слоев контролировались в процессе роста путем измерения отражения излучения лазерного диода с длиной волны 650 нм, сфокусированного на ростовой подложке в пятно диаметром 2 мм.

Схема исследуемой гетероструктуры приведена на рис.1,а. Поскольку гетеропереход CdS/ZnSe имеет разрывы зон типа II, то в настоящей работе для увеличения интеграла перекрытия волновых функций электрона и дырки использовались сдвоенные КЯ. Таким образом, КЯ представляла собой пять тонких последовательно выращенных слоев – ZnSe (4 нм), CdS (2 нм), ZnSe (2 нм), CdS (2 нм), ZnSe (4 нм) – между широкими барьерными слоями ZnSSe (86 нм). Период структуры составлял ~ 100 нм, что должно соответствовать половине длины волны генерируемого излучения внутри структуры. Первый после подложки буферный слой ZnSSe имел толщину 193 нм, последний слой ZnSSe – 93 нм. Указанные значения соответствовали толщинам в месте оптического контроля. Однако толщины слоев могли плавно изменяться по по-

верхности структуры из-за существующей в реакторе неоднородности потока водорода с исходными компонентами.

Квантовая яма представляла собой W-конфигурацию, использованную ранее в лазерах на основе гетероструктур типа II для соединений A_3B_5 [19]. В этом случае слои ZnSe образуют неглубокие энергетические ямы для неравновесных дырок, а слои CdS – энергетические ямы для неравновесных электронов. Упругие напряжения сжатия частично компенсировались напряжениями растяжения в барьерных слоях ZnSSe, в которых содержание серы находилось в пределах 10%. Спектр излучения структуры исследовался при накачке электронным пучком с энергией электронов 10 и 30 кэВ, током 4 мкА и диаметром пятна возбуждения 1 мм.

Для изготовления активного элемента лазера (рис.1,б) на структуру, нагретую до 200°C , наносилось диэлектрическое зеркало из 11 пар слоев $\text{HfO}_2 - \text{SiO}_2$. Спектр пропускания данного зеркала (зеркало 1), рассчитанный на основе измеренного спектра пропускания зеркала на контрольной кварцевой подложке, представлен на рис.2. Структура приклеивалась со стороны этого зеркала к сапфировой подложке толщиной 5 мм оптическим эпоксидным клеем ЕРОТЕК-301. Поскольку толщина зеркального покрытия и клеевого слоя значительно превышали толщину структуры, это могло приводить к возникновению дополнительных упругих напряжений в структуре.

Далее ростовая подложка GaAs удалялась сначала шлифовкой, а затем химическим селективным травлением, и на свободную поверхность структуры уже без ее нагрева наносилось однослойное просветляющее покрытие из Al_2O_3 , снижающее коэффициент отражения от поверхности структуры до уровня менее 0.5%. Внешнее диэлектрическое зеркало представляло собой плоскогнутую стеклянную подложку (радиус кривизны 15 мм) с нанесенным диэлектрическим покрытием из пар слоев ZnS – Na_3AlF_6 (рис.1,б). Спектр пропускания этого зеркала также показан на рис.2. Видно, что в диапазоне длин волн

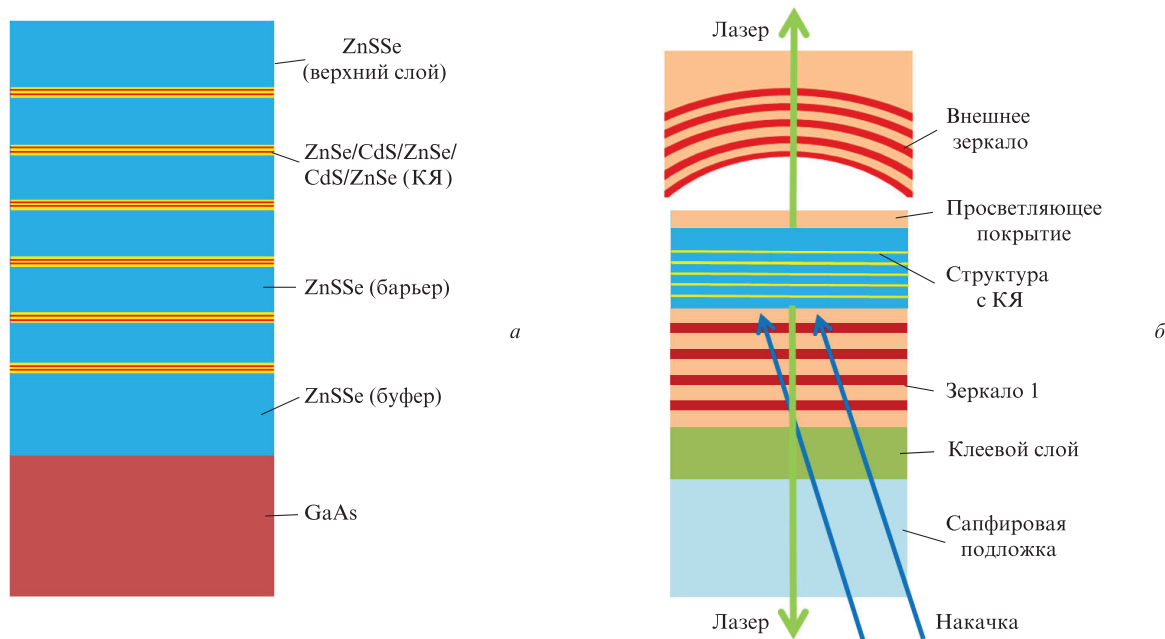


Рис.1. Схематическое изображение исходной структуры (а) и активного элемента с внешним зеркалом (б).

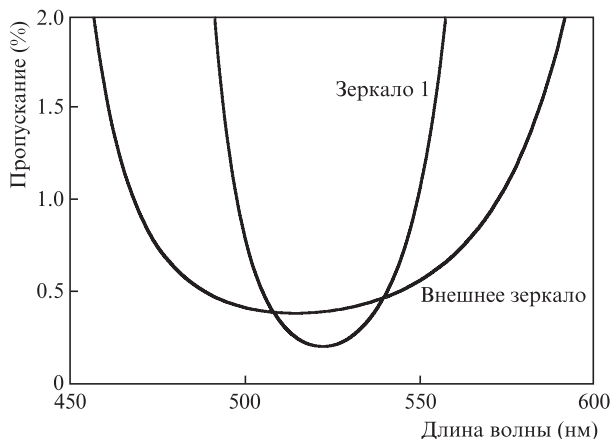


Рис.2. Спектры пропускания зеркала на структуре и внешнего зеркала.

496–497 нм, где наблюдается генерация, зеркало 1 пропускает примерно 1.2%, а внешнее зеркало – 0.45%. Суммарные потери на выход излучения составляют 1.65% за один обход резонатора.

Структура возбуждалась продольно через сапфировую подложку излучением азотного лазера ЛГИ-503 ($\lambda = 337$ нм), ослабленным из-за отражения от кварцевого клина ($R = 0.045$). Частота следования импульсов накачки была 100 Гц. Доля энергии излучения накачки, отраженная от активного элемента, составляла 15% от падающей, а доля энергии импульса накачки, прошедшего через активный элемент, не превышала 1%. Слой клея прозрачен для излучения с длиной волны накачки. Генерируемое излучение выходило как через сапфировую подложку (73%), так и через внешнее зеркало. Форма импульсов накачки и генерации, а также их пиковые мощности измерялись калиброванным фотоэлементом ФЭК-22. В качестве фильтра излучения лазера использовалось стекло ТФ-5 толщиной 10 мм, полностью отсекающее излучение накачки. Излучение N_2 -лазера фокусировалось кварцевой линзой с фокусным расстоянием 150 мм в пятно диаметром 100 мкм. Спектр излучения лазера регистрировался спектрографом МДР-4 с ПЗС-линейкой.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис.3 представлены осциллограммы импульса излучения накачки и лазерного импульса при вложенной

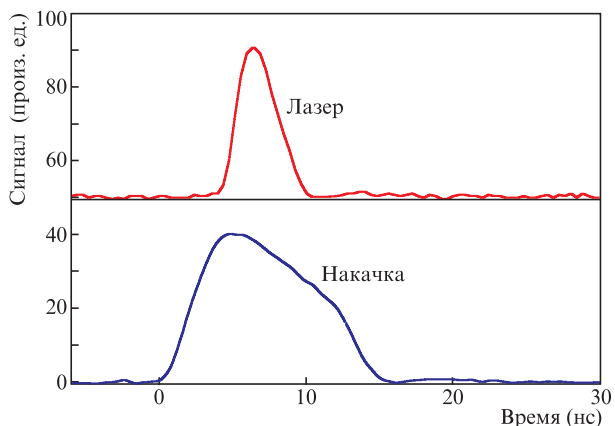


Рис.3. Осциллограммы импульсов накачки и лазера.

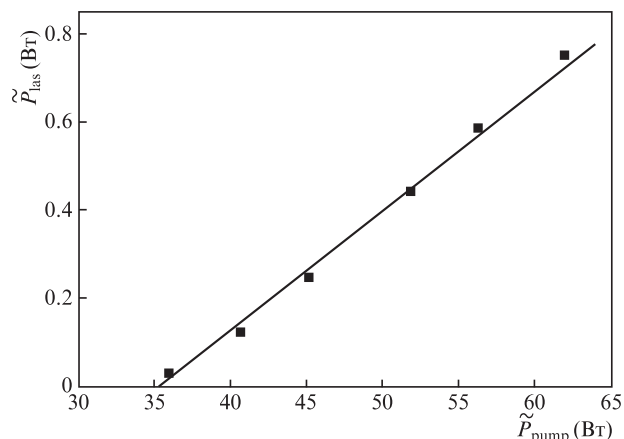


Рис.4. Зависимость пиковой мощности лазера от пиковой вложенной мощности накачки.

пиковой мощности накачки 62 Вт. Видно, что импульс лазера появляется с задержкой примерно 4 нс от начала импульса накачки и его длительность на полувысоте составляет чуть более 3 нс.

Зависимость пиковой мощности лазера от пиковой мощности накачки, вложенной в активный элемент, приведена на рис.4 для длины резонатора 1.1 мм (пиковая мощность лазера определяется как суммарная мощность, выходящая через сапфировую подложку и внешнее зеркало). Порог генерации составил 35 Вт, что соответствует пиковой интенсивности накачки 445 кВт/см^2 . Дифференциальная эффективность лазера равна 2.7%.

Отметим, что полученный порог генерации примерно соответствует значениям порога импульсных ПДЛ на основе других материалов. Так, пороговая интенсивность накачки ПДЛ на основе структуры InGaN/GaN (393 нм) при возбуждении наносекундными импульсами излучения N_2 -лазера составила 700 кВт/см^2 [20], а импульсного ПДЛ на основе структуры AlGaInAs/InP (1570 нм) – примерно 250 кВт/см^2 при длине волны накачки 1064 нм [21], что при пересчете на длину волны 337 нм эквивалентно 750 кВт/см^2 . При импульсном возбуждении ПДЛ на основе структуры GaInP/AlGaInP (625 нм) второй гармоникой Nd:YAG-лазера (532 нм) пороговая интенсивность накачки составила 760 кВт/см^2 [22]. В непрерывном режиме возбуждения пороги генерации обычно почти на порядок меньше, чем при импульсной накачке [23]. Это дает надежду на возможность получения в исследованных структурах непрерывного режима генерации.

Дифференциальная эффективность лазера зависит от длительности импульса накачки и времени жизни фотона в резонаторе. При длительностях ~ 100 нс и длине резонатора 10 мм она составляет примерно 10%–15% [21]. В нашем эксперименте длительность импульса накачки была 8–10 нс, длина резонатора – 1 мм и полезные потери на вывод излучения – 1.65% за один обход резонатора. Наиболее близка по условиям эксперимента работа, посвященная исследованию ПДЛ на основе структуры InGaN/GaN [20], где была получена дифференциальная эффективность 3.5% при длительности импульса накачки 2.7 нс, длине резонатора 2 мм и потерях на зеркалах 2.6% за один обход резонатора. Если учесть различие в энергиях генерируемых квантов (496.5 нм в настоящей работе и 393 нм в [20]), то квантовая эффективность лазеров в обоих случаях практически одинакова. Тем не менее полученная невысокая эффективность накачки может

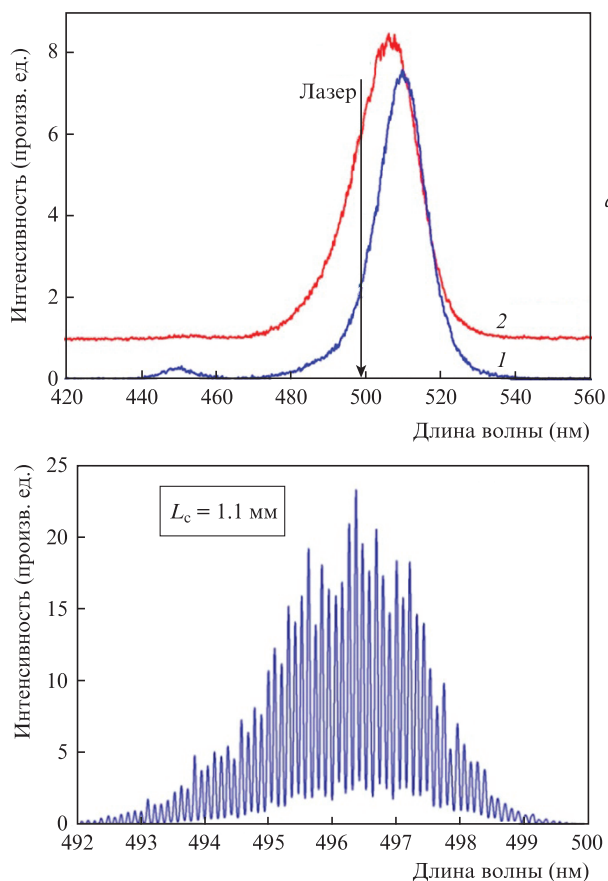


Рис.5. Спектры катодолуминесценции исходной структуры при энергиях электронов 10 (1) и 30 кэВ (2) и токе 4 мкА (а), а также спектр генерации лазера при длине резонатора $L_c = 1.1$ мм (б).

быть следствием не только импульсного режима накачки, но и больших внутренних потерь, неоднородности распределения накачки по глубине структуры, а также усиленного спонтанного излучения, распространяющегося вдоль структуры.

На рис.5,а представлен спектр катодолуминесценции исходной выращенной структуры при комнатной температуре и низком уровне электронной накачки. При использовании энергии электронов 30 кэВ структура накачивалась однородно по глубине, тогда как при энергии 10 кэВ возбуждались лишь две верхние КЯ. С увеличением энергии электронов наблюдается небольшое уширение линии излучения КЯ и смещение ее максимума от 510 до 508 нм. Возможно, это связано с небольшим изменением толщин слоев в процессе выращивания. На рисунке стрелкой отмечен максимум (496.5 нм) огибающей спектра лазера, созданного на данной структуре. Коротковолновый сдвиг линии генерации относительно максимума линии катодолуминесценции является характерной чертой лазера на гетероструктуре типа II. В спектре при энергии 10 кэВ хорошо видна линия люминесценции барьерных ZnSSe-слоев. Ее максимум при 450 нм свидетельствует о содержании серы в барьерных слоях на уровне 10%.

Спектр генерации лазера при длине резонатора ~ 1.1 мм показан на рис.5,б. Он состоит из множества тонких линий, соответствующих продольным модам резонатора этой длины. По межмодовому расстоянию можно контролировать длину резонатора с точностью 0.1 мм. В нашем эксперименте минимальная длина резонатора равна

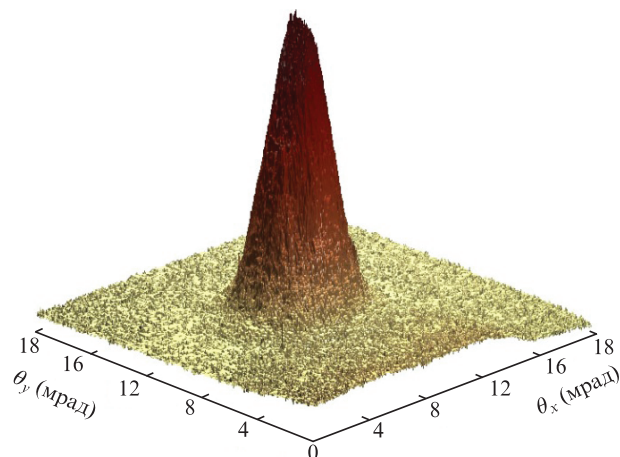


Рис.6. Диаграмма расходимости лазерного пучка в дальней зоне.

0.9 мм, поскольку центр зеркала с кривизной 15 мм и диаметром 10 мм не мог быть расположен ближе к плоской сапфировой подложке диаметром 20 мм, на которой была размещена структура. С увеличением длины резонатора характеристики лазера ухудшались, и при длине резонатора более 3 мм генерацию получить не удалось. Похожая зависимость наблюдалась в работе [20], где исследовался ПДЛ на структуре InGaN/GaN. Это связано с импульсным характером накачки обратного резонатора, когда длительность импульса накачки сравнима со временем жизни фотона в резонаторе.

На рис.6 приведена типичная диаграмма направленности лазерного излучения при небольшом превышении мощности накачки порога генерации и длине резонатора 1.1 мм. Диаграмма отвечает одному поперечному типу колебаний TEM_{00} с полным углом расходимости, равным ~ 5 мрад. Расчетное значение диаметра перетяжки основной моды резонатора $2\omega_0$ составляет 35 мкм. Полный угол расходимости гауссова пучка, оцененный по формуле $\theta = \lambda/(\pi 2\omega_0)$, составляет 4.5 мрад, что хорошо соответствует измеренному значению. При максимальном превышении порога генерации диаграмма направленности расширяется примерно в три раза из-за возбуждения нескольких поперечных типов колебаний, поскольку размер области накачки превышает размер основной моды.

4. Заключение

Впервые реализован полупроводниковый дисковый лазер с оптической накачкой, излучающий в зеленой области спектра на основной частоте. В лазере использовалась новая гетероструктура типа II с 10 сдвоенными КЯ CdS/ZnSe, имеющими W-конфигурацию. При продольной накачке излучением импульсно-периодического N_2 -лазера получены импульсы генерации с пиковой мощностью 0.75 Вт и длительностью 3 нс на длине волны 496.5 нм, следующие с частотой 100 Гц. Относительно низкую дифференциальную эффективность (2.7%) и высокий порог генерации (445 кВт/см²) мы связываем с неоднородным возбуждением КЯ по глубине структуры, высоким дефектом кванта накачки, импульсным характером возбуждения и усиленным спонтанным шумом, распространяющимся вдоль структуры. Оценка вклада этих факторов будет предметом дальнейших исследований. Полученные результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на разрывы зон типа II, исследуемая гетерострук-

тура перспективна для полупроводниковых дисковых лазеров сине-зеленого диапазона с оптической накачкой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-32-90022 и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (договор №02.а03.21.0005).

1. Kuznetsov M., Hakimi F., Sprague R., Mooradian A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 1063 (1997).
2. Tropper A.C., Hoogland S. *Prog. Quantum Electron.*, **30**, 1 (2006).
3. Okhotnikov O.G. *Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology* (Weinheim: Wiley-VCH, 2010).
4. Hastie J.E., Calvez S., Dawson M.D., in *Semiconductor Lasers* (Woodhead Publishing Limited, 2013, vol. 9, p. 341).
5. Shu Qi-Ze, Caprara A.L., Berger J.D., Anthon D.W., Jerman H. Spinelli L. *Proc. SPIE*, **7193**, 719319 (2009).
6. Rodríguez-García J.M., Paboeuf D., Hastie J.E. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **23** (6), 5100608 (2017).
7. Stothard D.J.M., Hopkins J.-M., Burns D., Dunn M.H. *Opt. Express*, **17** (13), 10648 (2009).
8. Scheller M., Yarborough J.M., Moloney J.V., Fallahi M., Koch M., Koch S.W. *Opt. Express*, **18** (26), 27112 (2010).
9. Kaneda Y., Wanga T.-L., Yarborough J.M., Fallahia M., Moloney J.V., Yoshimurab M., Morib Y., Sasaki T. *Proc. SPIE*, **7193**, 719318 (2009).
10. Ivanov S.V., Sorokin S.V., Sedova I.V., in *Molecular Beam Epitaxy* (Elsevier Inc., 2018, vol. 25, p. 571).
11. Haase M.A., Qiu J., DePuydt J.M., Cheng H. *Appl. Phys. Lett.*, **59** (11), 1272 (1991).
12. Kato E., Noguchi H., Nagai M., Okuyama H., Kijima S., Ishibashi A. *Electron. Lett.*, **34** (3), 282 (1998).
13. Waag A., Litz Th., Fischer F., Lugauer H.-J., Baron T., Schüll K., Zehnder U., Gerhard T., Lunz U., Keim M., Reuscher G., Landwehr G. *J. Crystal Growth*, **184–185**, 1 (1998).
14. Law K.-K., Baude P.F., Miller T.J., Haase M.A., Haugen G.M., Smekalin K. *Electron. Lett.*, **32** (4), 345 (1996).
15. Козловский В.И., Санников Д.А., Свиридов Д.Е. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 2, 4 (2008).
16. Butaev M.R., Kozlovsky V.I., Sannikov D.A., Skasyrsky Y.K. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1439**, 012017 (2020).
17. Козловский В.И., Кузнецов П.И., Свиридов Д.Е., Якушева Г.Г. *Квантовая электроника*, **42** (7), 583 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (7), 583 (2012)].
18. Бутаев М.Р., Козловский В.И., Скасырский Я.К. *Квантовая электроника*, **50** (7), 683 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (7), 683 (2020)].
19. Möller C., Fuchs C., Berger C., Ruiz Perez A., Koch M., Hader J., Moloney J.V., Koch S.W., Stolz W. *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 071102 (2016).
20. Debusmann R., Dhidah N., Hoffmann V., Weixelbaum L., Brauch U., Graf T., Weyers M., Kneissl M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **22** (9), 652 (2010).
21. Huang S.C., Chang H.L., Su K.W., Li A., Liu S.C., Chen Y.F., Huang K.F. *Appl. Phys. B*, **94**, 483 (2009).
22. Козловский В.И., Лаврушин В.М., Скасырский Я.К., Тиберы М.Д. *Квантовая электроника*, **39** (8), 731 (2009) [*Quantum Electron.*, **39** (8), 731 (2009)].
23. Hempler N., Hopkins J.-M., Kemp A.J., Schulz N., Rattunde M., Wagner J., Dawson M.D., Burns D. *Opt. Express*, **15** (6), 3247 (2007).