Полупроводниковый лазер на основе гетероструктуры CdS/ZnSe с продольной оптической накачкой излучением лазерного диода

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

Исследован полупроводниковый лазер с оптической накачкой на основе гетероструктуры CdS/ZnSe, содержащей 10 сдвоенных квантовых ям. Структура выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке GaAs. На ее основе изготовлен микрорезонатор с интерференционными диэлектрическими зеркалами. При комнатной температуре и продольной накачке микрорезонатора излучением импульсного лазерного диода на гетероструктуре InGaN/GaN с длиной волны 438 нм достигнута пиковая мощность излучения 110 мВт на длине волны 508 нм при длительности импульса 65 нс.

Ключевые слова: *газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, полупроводниковый лазер, CdS/ZnSe-гетероструктура, квантовые ямы, оптическая накачка.*

1. Введение

Полупроводниковые дисковые лазеры (ПДЛ), или поверхностно-излучающие полупроводниковые лазеры с внешним вертикальным резонатором, в частности с оптической накачкой, способны генерировать излучение большой мощности при высоком качестве пучка [1–4]. В настоящее время в ПДЛ используются в основном структуры на основе соединений A3B5, излучающие в ближнем ИК диапазоне. Конечной целью авторов настоящей работы является создание ПДЛ, 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 спектра (240–280 нм) можно осуществить относительно простым внутрирезонаторным удвоением частоты. В качестве активной среды лазера необходимо использовать резонансно-периодические структуры из широкозонных соединений, например, гетероструктуру CdS/ZnSe [5–8]. Преимущества и недостатки данной гетероструктуры по сравнению с другими известными гетероструктурами, излучающими в сине-зеленом диапазоне спектра, а именно ZnCdSe/ZnMgSSe и InGaN/GaN, уже обсуждались нами ранее в работах [6, 7]. В настоящее время нам удалось получить генерацию на гетероструктурах CdS/ZnSe при использовании как микрорезонатора [6], так и в ПДЛ [7] при накачке излучением импульсно-периодического N_2-лазера. Однако из-за малой длительности импульса N_2-лазера (~8 нс) длина резонатора ПДЛ не превышала 3 мм. Кроме того, слишком большое различие в энергиях квантов накачки (~3.7 эВ) и излучения (~2.5 эВ) существенно ограничивает КПД лазера. В настоящей работе представлены результаты исследования лазера с микрорезонатором при продольной накачке излучением коммерческого лазерного диода (ЛД) на основе гетероструктуры InGaN/GaN с длиной волны 438 нм (2.83 эВ) и длительностью импульса ~200 нс. На следующем этапе работы планируется исследование ПДЛ с накачкой таким диодом.

Ранее «синий» лазерный диод уже использовался для накачки лазера на основе гетероструктуры соединений A2B6, в частности гетероструктуры CdSe/ZnSe/ZnSSe [9]. Однако в этой работе использовалась поперечная накачка волноводной структуры, чей дизайн существенно отличается от дизайна структуры, предназначенной для продольной накачки.

2. Эксперимент

Выращивание наноразмерных гетероструктур CdS/ZnSe проводилось методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в потоке водорода при атмосферном давлении в кварцевом реакторе. В качестве исходных соединений для роста структур использовались диметил селенид $(CH_3)_2Se$, диметил кадмий $(CH_3)_2Cd$, диэтил сульфид $(C_2H_5)_2S$ и диэтил цинк $(C_2H_5)_2Zn$. Рост проводился на подложках GaAs, разориентированных от плоскости (001) к плоскости (111) A на 10°. Температура подложки составляла 440 °C. Структура содержала последовательно нарощенные буферный слой ZnS_xSe_{1-x} толщиной 190 нм и десять периодов, состоящих из слоев ZnSe толщиной 3 нм, CdS (2 нм), ZnSe (2 нм), CdS (2 нм), ZnSe (3 нм) и барьерного слоя ZnSSe (82 нм). Слои CdS являлись квантовыми ямами (КЯ) для электронов, а слои ZnSe – для дырок. Таким образом структура в области КЯ имела разрывы зон второго типа. Толщины слоев могли плавно изменяться по поверхности структуры из-за существующей в реакторе неоднородности потока водорода с исходными компонентами. Упругие напряжения, создаваемые КЯ, компенсировались повышением состава серы в барьерных слоях до 11%. Полная толщина

М.Р.Бутаев, В.И.Козловский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 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 РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 16 декабря 2021 г.

гетероструктуры с 10 КЯ составляла примерно 1.2 мкм. Гетероструктура имела зеркально гладкую поверхность.

Для изготовления активного элемента лазера с микрорезонатором на структуру наносилось первое диэлектрическое зеркало из 11 пар слоев HfO_2-SiO_2 с расчетным коэффициентом отражения 99% на длине волны 508 нм и пропусканием 73% на длине волны 438 нм. На это зеркало оптическим эпоксидным клеем EPOTEK-301 наклеивалась сапфировая подложка толщиной 5 мм. Далее ростовая подложка GaAs удалялась шлифовкой и селективным травлением, и на свободную поверхность структуры наносилось второе диэлектрическое зеркало из 12 пар слоев $Ta_2O_5-SiO_2$ с расчетным коэффициентом отражения 99.6% на длине волны 508 нм.

Структура с микрорезонатором возбуждалась продольно через сапфировую подложку излучением импульсного ЛД с λ = 438 нм. При этом изображение полоски ЛД фокусировалось мини-линзой на поверхность гетероструктуры. Область возбуждения представляла собой полоску длиной 150 мкм и шириной менее 15 мкм. Используемая конструкция активного элемента не позволяла исследовать лазер в непрерывном режиме накачки из-за низкой теплопроводности клеевого слоя, диэлектрического зеркала и сапфировой подложки. В связи с этим ЛД был запущен в импульсно-периодическом режиме с частотой 10–20 Гц и длительностью импульса по полувысоте 200 нс. Однако в будущем мы предполагаем, что непрерывный режим может быть достигнут путем зажатия гетероструктуры (без ростовой подложки) между двумя алмазными пластинами, как это уже реализовано в ПДЛ мембранного типа на основе гетероструктуры GaInAs/GaAs [10]. В качестве импульсного драйвера ЛД использовался драйвер для диода Шоттки (IXDD630CI). Схема лазера и регистрации импульсов накачки и генерации представлена на рис.1.

Структура возбуждалась со стороны сапфировой подложки, чтобы отдалить толстый буферный слой от области максимального поглощения излучения ЛД. Контроль импульса накачки осуществлялся путем регистрации излучения ЛД, частично отраженного от подложки и структуры, с помощью калиброванного фотоэлемента коаксиального ФЭК-29. Запуск развертки осциллографа производился этим импульсом. Лазерное излучение структуры выходило как через второе зеркало, так и через сапфировую подложку. Излучение с обеих сторон регистрировалось также калиброванными ФЭК-22. Чтобы отсечь рассеянное излучение накачки, перед этими фотоэлементами устанавливался фильтр ЖС-17, который пропускал 70% излучения с λ = 508 нм и менее 0.1% с λ = 438 нм.

Ближняя зона излучения лазера фотографировалась со стороны второго зеркала с помощью микрообъектива и

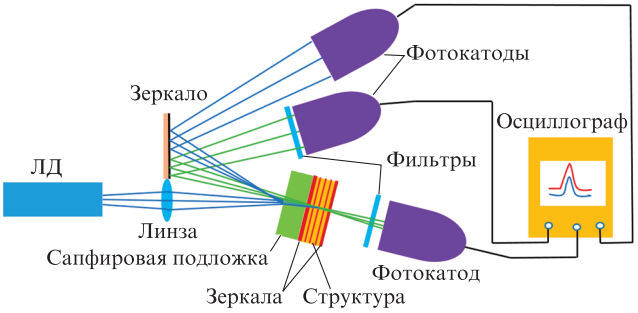

Рис.1. Схема лазера и регистрации импульсов накачки и генерации.

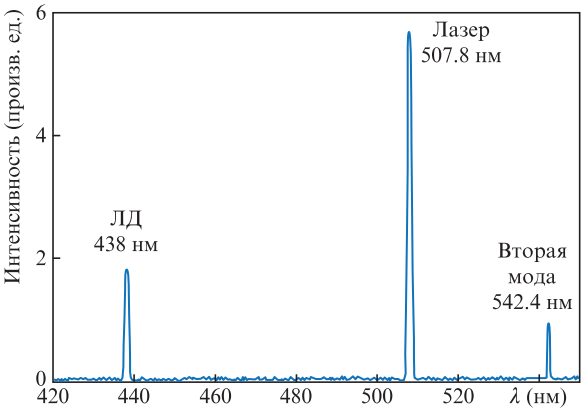

Рис.2. Спектры излучения ЛД и структуры с микрорезонатором.

цифровой фотокамеры. С этой же стороны регистрировалось распределение интенсивности излучения в дальней зоне путем фотографирования изображения пятна излучения на листе белой бумаги. Спектр излучения регистрировался с помощью спектрометра S-100 (Solar Laser Systems) с волоконным входом.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис.2 представлены спектры излучения структуры с микрорезонатором.

Лазерный диод излучал на λ = 438 нм. Основное излучение структуры приходилось на λ = 507.8 нм с шириной по полувысоте 1.2 нм. В спектре видна также вторая мода излучения на λ = 542.4 нм. Спектр слегка изменяется при смещении области возбуждения по поверхности структуры из-за неоднородности толщины структуры, и часто второй моды не видно. Ближняя и дальняя зоны излучения структуры представлены на рис.3. Ближняя зона соответствует изображению излучающей области ЛД, ее длина равна примерно 150 мкм. Ширину области измерить трудно. Она не превышает 15 мкм. Ближняя зона излучения лазера при небольшом превышении над порогом состоит из строки светящихся точек (рис.3,*а*), которые взаимно не когерентны. Поэтому направленность излучения определяется размером этих точек. Полный угол расходимости излучения лазера составил ~10°.

На рис.4 представлены осциллограммы импульсов излучения накачки и генерации. Пиковое значение импульса генерации приходилось на максимум импульса накачки. Сложная форма импульса излучения ЛД (накачки) обусловлена несовершенством использованного драйвера. Ширина по полувысоте импульса генерации микрорезонатора соответствовала 65 нс. Измерения показали, что

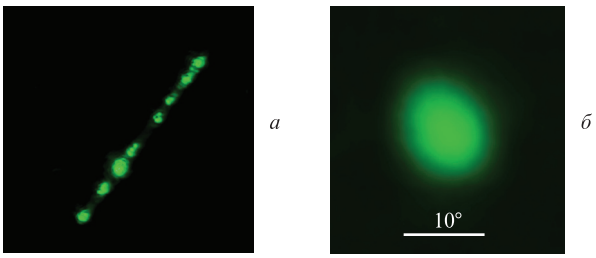

Рис.3. Ближняя (*а*) и дальняя (*б*) зоны излучения лазера.

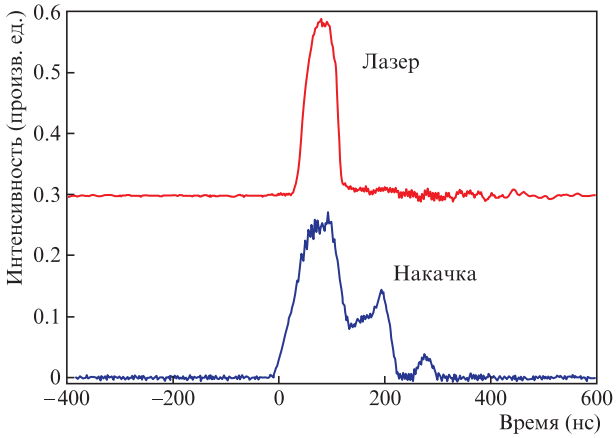

Рис.4. Осциллограммы импульсов излучения накачки и генерации лазера.

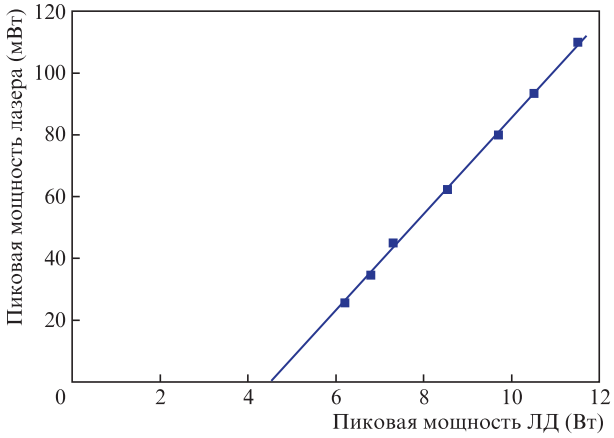

Рис.5. Зависимость пиковой мощности импульса генерации от пиковой мощности излучения накачки, поглощенного структурой.

амплитуда импульса генерируемого излучения, выходящего через сапфировую подложку, в три раза больше амплитуды импульса излучения, выходящего через второе зеркало.

На рис.5 представлена зависимость пиковой мощности излучения лазера от пиковой мощности излучения накачки, поглощенного структурой.

Максимальная пиковая мощность лазера, с учетом излучения в обе стороны, составила 110 мВт. Пороговая мощность поглощенного излучения накачки оценивается в 4.5 Вт. Достигнуто невысокое превышение над порогом. Дифференциальная эффективность составила 1.6%.

Относительно низкие мощность и эффективность лазера могут быть обусловлены рядом причин. Прежде всего, это несогласованность моды микрорезонатора с максимумом линии усиления. Из-за малой толщины структуры спектральное расстояние между модами может превышать ширину линии усиления. Период структуры (расстояние между КЯ) может не соответствовать периоду расположения пучностей моды резонатора, что приведет к уменьшению коэффициента модового усиления. Также требуется уменьшение внутренних потерь в структуре и оптимизация коэффициентов отражения зеркал. Кроме того, непонятно, насколько хорошо захватываются неравновесные электроны при высоких уровнях накачки в связи с возникновения барьеров на гетерограницах слоя CdS из-за искривления зон, и неравновесные дырки – из-за относительно малой глубины квантовых ям, образующихся в слоях ZnSe. Все эти вопросы требуют дальнейших исследований.

Таким образом, в настоящей работе впервые реализован полупроводниковый лазер на основе наноразмерной гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон второго типа, излучающий в зеленой области спектра, при продольной накачке излучением «синего» (438 нм) InGaN-ЛД. Полученные результаты позволяют надеяться на реализацию «зеленого» ПДЛ с оптической накачкой излучением ЛД. Причины недостаточно высоких характеристик лазера требуют дополнительных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-32-90022).

1. Kuznetsov M., Hakimi F., Sprague R., Mooradian A. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **9**, 1063 (1997).
2. Tropper A.C., Hoogland S. *Progr. 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. Butaev M.R., Kozlovsky V.I., Sannikov D.A., Skasyrsky Y.K. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1439**, 012017 (2020).
6. Бутаев М.Р., Козловский В.И., Скасырский Я.К. *Квантовая электроника*, **50** (7), 683 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (7), 683 (2020)].
7. Бутаев М.Р., Козловский В.И., Скасырский Я.К. *Квантовая электроника*, **50** (10) 895 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (10), 895 (2020)].
8. Butaev M.R., Kozlovsky V.I., Martovitsky V.P., Skasyrsky Y.K., Sviridov D.E. *J. Alloys Compounds*, **880**, 160555 (2021).
9. Lutsenko E.V., Sorokin S.V., Sedova I.V., Vainilovich A.G., Tarasuk N.P., Pavlovskii V.N., Yablonskii G.P., Gronin S.V., Kop`ev P.S., Ivanov S.V. *Phys. Stat. Sol. (b)*, **247**, 1557 (2010).
10. Phung Hoy-My, Kahle Hermann, Penttinen Jussi-Pekka, Rajala Patrik, Ranta Sanna, Guina Mircea. *Opt. Lett.*, **45**, 547 (2020).