

Лазерная генерация в гетероструктурах Cd(Zn)Se/ZnMgSSe при накачке излучением азотного и InGaN/GaN лазеров

© И.В. Седова[¶], С.В. Сорокин, А.А. Торопов, В.А. Кайгородов, С.В. Иванов, П.С. Копьев, Е.В. Луценко⁺, В.Н. Павловский⁺, В.З. Зубелевич⁺, А.Л. Гурский⁺, Г.П. Яблонский⁺, Y. Dikme^{*}, H. Kalisch^{*}, A. Szymakowski^{*}, R.H. Jansen^{*}, B. Schineller[≠], M. Heuken[≠]

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

⁺ Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Белоруссии, 220072 Минск, Белоруссия

^{*} Institut für Theoretische Elektrotechnik, RWTH, Aachen, Germany

[≠] AIXTRON AG, Aachen, Germany

(Получена 22 декабря 2003 г. Принята к печати 25 декабря 2003 г.)

Исследована фотолюминесценция и генерация Cd(Zn)Se/ZnMgSSe-лазеров с различным дизайном активной области, излучающих в зеленом спектральном диапазоне (длины волн $\lambda = 510\text{--}530\text{ нм}$) в широком интервале температур и интенсивностей накачки азотным лазером. Минимальный порог генерации 10 кВт/см^2 , максимальная внешняя квантовая эффективность 12% и максимальная выходная мощность 20 Вт были получены для структуры, активная область которой состояла из трех изолированных квантовых ям ZnSe с дробно-монослойными вставками CdSe. Лазеры имели высокую температурную стабильность порога генерации (характеристическая температура $T_0 = 330\text{ К}$ до 100°C). Впервые предложен и исследован интегральный конвертер, состоящий из зеленого Cd(Zn)Se/ZnMgSSe-лазера, оптически накачиваемого синим InGaN/GaN-лазером с множественными квантовыми ямами, выращенным на подложке Si (111).

1. Введение

В последние годы большое внимание уделяется созданию коммерческих полупроводниковых лазеров и светодиодов, излучающих в сине-зеленой области спектра, необходимых для систем проекционного лазерного телевидения, коротко-дистанционных волоконно-оптических линий связи, использующих пластиковые волокна, устройств высококачественной цветной печати и других лазерных применений. По-прежнему наиболее вероятными кандидатами для создания зеленых лазеров остаются гетероструктуры на основе широкозонных полупроводников $A^{II}B^{VI}$. Однако, несмотря на все предпринимаемые попытки, проблема создания промышленно используемого инжекционного лазера на основе соединений $A^{II}B^{VI}$ остается нерешенной на настоящий момент. Все усилия по оптимизации лазерных диодов на основе ZnSe не привели к сколь-нибудь заметному увеличению их времени жизни, и результат, полученный фирмой Sony Co, — 400 ч работы в непрерывном режиме при комнатной температуре — до сих пор остается непревзойденным [1].

Основными конкурентами соединениям $A^{II}B^{VI}$ для оптоэлектронных применений являются полупроводники $A^{III}N$. В 1996 г. на подложках из сапфира методом металлорганической газофазной эпитаксии были созданы лазерные диоды с множественными квантовыми ямами (МКЯ) InGaN с длиной волны излучения $\lambda = 417\text{ нм}$ и пороговой плотностью тока 4 кА/см^2 [2] в импульсном режиме генерации. В настоящее время максимальная длина волны излучения лазерных InGaN/GaN-диодов, работающих в непрерывном режиме,

составляет $\lambda = 460\text{ нм}$ при комнатной температуре [3]. Однако получение стимулированного зеленого излучения в полупроводниковых структурах на базе нитридов весьма проблематично из-за принципиальных трудностей формирования малodefekтных квантовых ям (КЯ) InGaN с большим содержанием индия, необходимых для получения требуемой длины волны излучения [4,5].

В начале 90-х годов наряду с широкозонными полупроводниками $A^{II}B^{VI}$ в качестве материала для приборов, излучающих в сине-зеленой области спектра, исследовались гетероструктуры на базе фосфидов элементов III группы. Минимальная достигнутая длина волны излучения лазерного диода на основе AlGaInP равна 555 нм в непрерывном режиме генерации при температуре $T = 77\text{ К}$ [6]. При комнатной температуре была получена длина волны 615 нм в непрерывном режиме [7], в импульсном — 607 нм [8]. Однако при получении лазерных диодов в системе AlGaP/AlGaInP возникает ряд проблем, основной из которых является специфическая зонная структура твердых растворов $(Al_xGa_{1-x})_{0.52}In_{0.48}P$, изопериодных с GaAs. При изменении x от 0 до 1 твердый раствор $(Al_xGa_{1-x})_{0.52}In_{0.48}P$ трансформируется из прямозонного полупроводника в полупроводник с непрямой запрещенной зоной, причем точка перехода соответствует значению $x \approx 0.50$. При этом ширина непрямоной запрещенной зоны составляет всего $E_g = 2.33\text{ эВ}$ [9] и практически не зависит от x , не позволяя увеличивать E_g активной области, вследствие чего резко ухудшается электронное ограничение в гетероструктурах AlGaInP/AlGaInP с КЯ.

Таким образом, несмотря на все проблемы, связанные в первую очередь с чрезвычайно низкой энергией активации дефектообразования, характерной для большинства

[¶] E-mail: irina@beam.ioffe.rssi.ru

широкозонных материалов $A^{II}B^{VI}$ [10], гетероструктуры на основе ZnSe остаются единственными кандидатами для создания промышленных лазеров, излучающих в зеленой области спектра.

В конце 90-х годов была предложена новая конструкция активной области лазерных структур на основе соединений $A^{II}B^{VI}$, направленная на увеличение их времени жизни и устранение основной причины быстрой деградации лазерных диодов, а именно — безызлучательной рекомбинации на дефектах активной области, способствующей дальнейшему росту их концентрации [11–13].

Механизм медленной деградации лазерных структур на основе ZnSe объясняется прежде всего наличием точечных дефектов, диффундирующих в активную область в основном из легированной верхней p -области [14] и связанных с компенсирующими донорными центрами — атомами азота в междоузлиях, ответственными за нестабильность электрических характеристик ZnSe:N [15]. Кроме того, мелкий азотный акцептор и сам проявляет метастабильную природу, трансформируясь при определенных условиях в межузельный центр, образующий подвижный заряженный комплекс с вакансией селена [16].

Поэтому полупроводниковые лазеры с импульсной оптической накачкой и лазеры с накачкой электронным пучком [17], не требующие p – n -перехода и омических контактов, что позволяет уйти от проблем, ограничивающих время жизни инжекционных лазеров, по-прежнему остаются в поле зрения исследований и дают возможность продвинуться в зеленую область спектра, для которой нет инжекционных лазеров на основе других соединений.

В настоящей работе представлены результаты исследования люминесцентных и лазерных свойств гетероструктур Cd(Zn)Se/ZnMgSSe с различным типом активной области. Определены основные лазерные параметры: пороговая плотность мощности накачки, внешняя квантовая эффективность, характеристическая температура, выходная мощность. Впервые произведена оптическая накачка гетероструктуры на основе ZnSe излучением оптически накачиваемого лазера InGaN/GaN.

2. Эксперимент

Структуры в системе (Zn,Mg)(S,Se) для лазеров с оптической накачкой были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) псевдоморфно на подложках GaAs (001) при температурах роста 270–280°C. Структуры содержат нижний и верхний ограничивающие слои $Zn_{0.9}Mg_{0.1}S_{0.15}Se_{0.85}$ толщиной 0.7 и 0.2 мкм соответственно, симметричный волновод в виде короткопериодной сверхрешетки (СР) $ZnS_{0.14}Se_{0.86}$ (15 Å)/ZnSe (18 Å) общей толщиной 0.2 мкм и активную область на основе квантовых дисков (КД) CdSe, самоорганизующихся при осаждении 2.5 монослоев (МС) CdSe на поверхность ZnSe вследствие уругой релаксации напряжений несоответствия

параметров решетки ($\Delta a/a \approx 7\%$). Структура *A* содержит одну плоскость КД CdSe в центре слоя КЯ ZnSe толщиной 10 нм. Структура *B* состоит из 3 изолированных КЯ ZnSe со вставками КД CdSe той же номинальной толщины, что и в структуре *A*, помещенных в расширенном до 0.4 мкм сверхрешеточном волноводе. Особенности выращивания активной области на основе КД CdSe методом МПЭ подробно описаны в [11,13]. Для сравнения была выращена аналогичная структура *C*, но с активной областью в виде обычной одиночной КЯ ZnCdSe. Использование переменного-напряженной короткопериодной СР позволяет увеличить электронное ограничение для дырок при оптимальном оптическом ограничении, повысить эффективность сбора носителей и стойкость всей структуры к механическим напряжениям, а также защитить активную область от проникновения и развития протяженных и точечных дефектов [12,17].

Синие лазеры в системе InGaN/GaN ($\lambda \approx 455$ нм), используемые для оптической накачки лазеров на основе Cd(Zn)Se/ZnMgSSe, были выращены методом металлургической газофазной эпитаксии при низких давлениях на подложках n -Si (111) фирмой AIXTRON (Германия) [18]. Для релаксации возникающих напряжений использовались буферные слои GaN/AlGaIn/AlN. Активная область лазеров состояла из 10 КЯ InGaIn, которые затем зарастались слоем GaN толщиной 50 нм.

Для оптического возбуждения исследуемых структур использовалось излучение непрерывного He–Cd-лазера (длина волны $\lambda_{\text{exc}} = 325$ нм, интенсивность $I_{\text{exc}} = 0.5\text{--}20$ Вт/см²) и импульсного N₂-лазера ($\lambda_{\text{exc}} = 337.1$ нм, длительность импульса $\tau_p = 8$ нс, частота $\nu = 10^3$ Гц, $I_{\text{exc}} = 5\text{--}1500$ кВт/см²) в интервале температур от 77 до 593 К.

3. Результаты и обсуждение

Фотолюминесцентные свойства гетероструктур исследовались как при низком (5 Вт/см²), так и при высоком (от 6 до 400 кВт/см²) уровнях возбуждения при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Как и ожидалось [13], структуры со вставками КД CdSe показывают заметно более высокую эффективность спонтанного излучения по сравнению с контрольной структурой с КЯ (рис. 1). По соотношению интенсивностей излучения из активной области и волноводных слоев, $I(QW)/I(SL) > 10^3$, можно судить о хорошем электронном ограничении неравновесных носителей при комнатной температуре. Даже при высоких уровнях возбуждения (выше 400 кВт/см²) люминесценция из активной области остается доминирующей.

Лазерные свойства исследуемых структур изучались в широких интервалах температур и интенсивностей возбуждения. Для лазеров с длинными резонаторами ($L \approx 400$ мкм и более) минимальная пороговая мощность генерации ($I_{\text{th}} = 10$ кВт/см²) зарегистрирована в структуре с активной областью, содержащей 3 КЯ ZnSe с КД CdSe. Структура с одной плоскостью

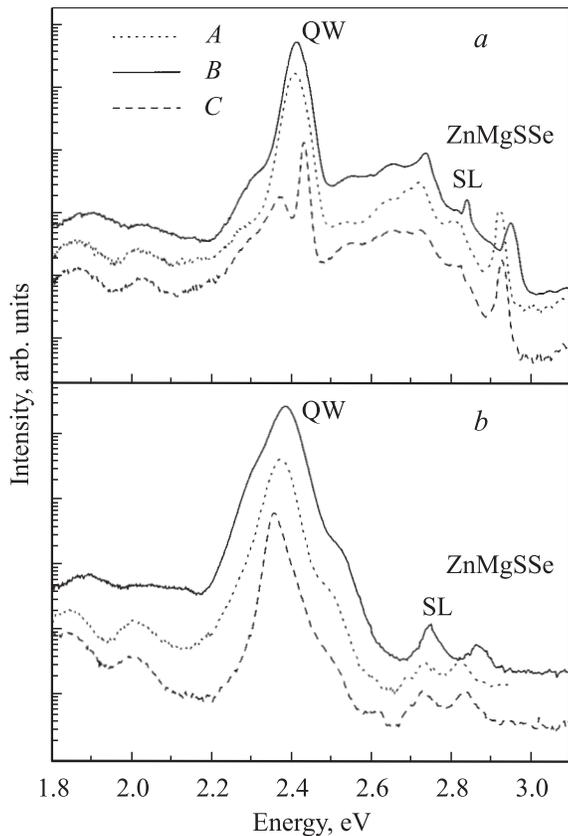


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции исследуемых гетероструктур *A*, *B*, *C* при низком уровне возбуждения непрерывным He-Cd-лазером при температурах жидкого азота (*a*) и комнатной (*b*). $\lambda_{\text{exc}} = 325$ нм, $I_{\text{exc}} = 5$ Вт/см².

КД CdSe имеет чуть более высокий порог генерации ($I_{\text{th}} = 12\text{--}15$ кВт/см²), тогда как порог генерации в контрольной структуре ZnCdSe/ZnSe с КЯ в 3–4 раза выше порога в структурах с КД CdSe (рис. 2). Такое различие в величинах пороговой мощности генерации объясняется прежде всего устройством активной области. В структурах с активной областью, состоящей из когерентных CdSe-обогащенных островков в матрице ZnSe, происходит эффективная локализация носителей в этих наноструктурах, что препятствует их миграции к дефектным областям, где они могут рекомбинировать безызлучательно и вызывать ускоренное размножение дефектов в активной области [13]. В результате увеличения числа вставок КД CdSe (структура *B*) улучшается оптическое ограничение в структуре и увеличивается общая толщина активной области, что приводит к дальнейшему снижению порога генерации. В спектрах генерации лазеров на основе образца с множественными вставками КД, имеющих достаточно короткий резонатор (длина резонатора $L < 150$ мкм), легко разрешается модовая структура спектра (см. вставку к рис. 2). Следует отметить, однако, что уменьшение длины резонатора до 100 мкм приводит к значительному увеличению порога генерации.

Все исследуемые гетероструктуры являются структурами с симметричным волноводом, для которых фактор оптического ограничения имеет максимальное значение для нулевой (фундаментальной) моды. Исследование спектрально-углового распределения лазерной генерации показало, что излучение всех структур в дальнем поле имеет одно центральное пятно, что говорит о генерации на фундаментальной моде волновода [19]. Уг-

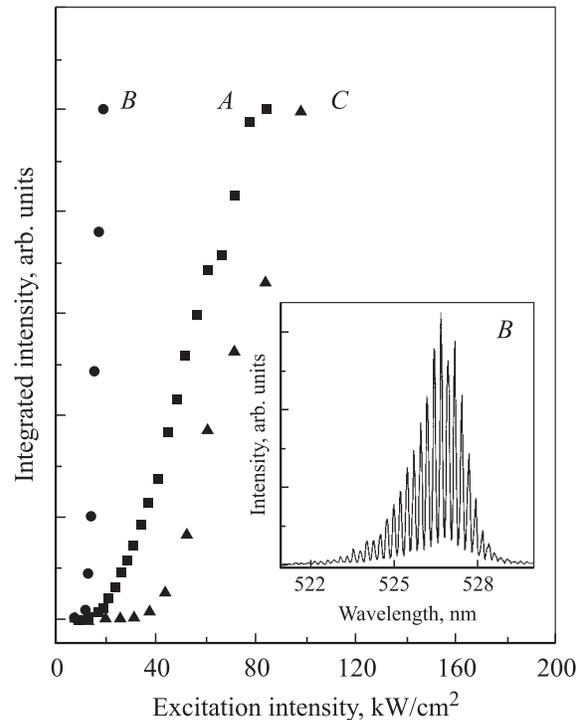


Рис. 2. Пороговые характеристики лазеров на основе структур *A*, *B*, *C* с длинными резонаторами при возбуждении N₂-лазером при комнатной температуре. *A*, *C*: $L = 430$ мкм; *B*: $L = 440$ мкм. На вставке — спектр генерации лазера на основе структуры *B* с коротким резонатором, $L = 100$ мкм.

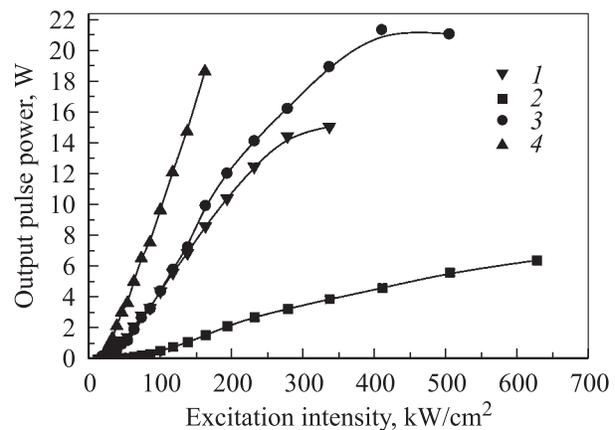


Рис. 3. Зависимость выходной мощности лазеров с разными длинами резонаторов от интенсивности возбуждения N₂-лазером при комнатной температуре. 1 — структура *A*, $L = 580$ мкм; (2–4) — структура *B*, $L = 185$ (2), 330 (3), 830 мкм (4).

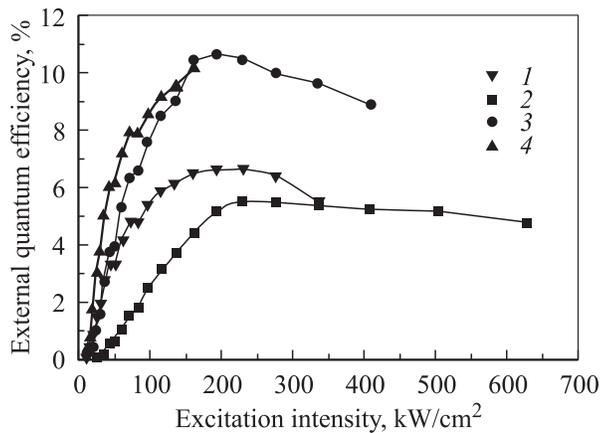


Рис. 4. Зависимость внешней квантовой эффективности лазеров с разными длинами резонаторов от интенсивности возбуждения N_2 -лазером при комнатной температуре. 1 — структура A, $L = 580$ мкм; (2–4) — структура B, $L = 185$ (2), 330 (3), 830 мкм (4).

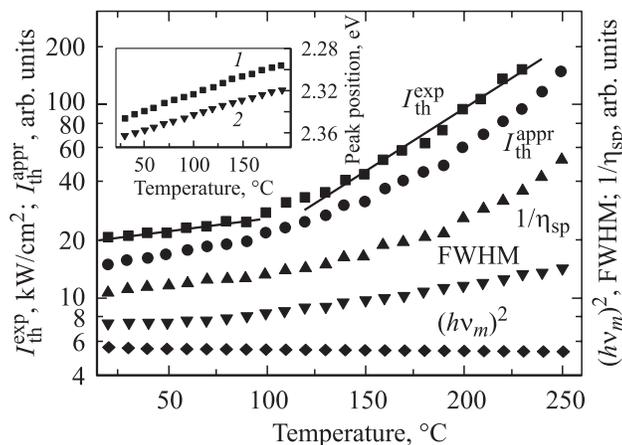


Рис. 5. Экспериментальная и аппроксимационная согласно [21] температурные зависимости пороговой мощности накачки (I_{th}^{exp} и I_{th}^{appr}) для лазера на основе структуры B, а также температурные зависимости обратной квантовой эффективности спонтанного излучения $1/\eta_{sp}$, ширины линии ФЛ на половине высоты FWHM, квадрата энергии испускаемых фотонов $(h\nu_m)^2$. На вставке — температурная зависимость положения пика излучения при низком уровне возбуждения He-Cd-лазером (1) и при пороговой плотности мощности накачки N_2 -лазером (2) для той же структуры.

ловая расходимость лазерного излучения на полувысоте интенсивности составила $20\text{--}25^\circ$ для всех структур.

На рис. 3 представлены зависимости выходной мощности лазеров с разными длинами резонаторов от интенсивности возбуждения. Лазерная генерация в структуре с тремя дробно-монослойными вставками CdSe наблюдалась до уровня интенсивности накачки, в 20–30 раз превышающей пороговую, без явных признаков деградации. Максимальная импульсная мощность (более 20 Вт) была получена для этой же структуры при длине резонатора 330 мкм.

Измерение выходной мощности в абсолютных единицах позволило оценить величину внешней квантовой эффективности, которая является одной из наиболее важных лазерных характеристик. Как видно из рис. 4, при преодолении порога генерации внешняя квантовая эффективность исследуемых структур довольно быстро увеличивается с накачкой и достигает при некотором значении своей максимальной величины (для структуры B более 11%). При дальнейшем увеличении накачки происходит ее уменьшение, которое вызвано увеличением потерь за счет рассеяния на свободных носителях заряда, перегревом активной области, насыщением процессов усиления и, возможно, деградацией.

Для структуры с множественными вставками КД CdSe генерация без заметных деградационных явлений наблюдалась до 230°C , что является чрезвычайно высокой рабочей температурой для полупроводниковых лазеров. Температурная зависимость порога генерации для структуры B представлена на рис. 5. Зависимость имеет стандартный для квантово-размерных лазеров характер с двумя экспоненциально возрастающими участками и перегибом в интервале температур $100\text{--}120^\circ\text{C}$. При этом характеристическая температура (T_0) для диапазона температур до 100°C равна 330 К, выше 120°C $T_0 = 68$ К. Как известно, температурная зависимость порога генерации полупроводниковых лазеров в сильной степени обусловлена квантовым ограничением носителей в активной области [20], что связано с уменьшением диапазона разрешенных состояний при уменьшении числа степеней свободы неравновесных носителей заряда (ННЗ). Высокое значение $T_0 = 330$ К характерно для квантово-размерных гетероструктур с трехмерным квантовым ограничением носителей, что свидетельствует об эффективной локализации ННЗ в обогащенных кадмием КД при температурах ниже 100°C .

Были исследованы факторы, влияющие на увеличение порога генерации. Как известно, существует прямая зависимость величины пороговой мощности генерации от квадрата энергии кванта испускаемого света $(h\nu_m)^2$, ширины линии фотолюминесценции на полувысоте FWHM и обратной квантовой эффективности $1/\eta_{sp}$ [21]. Исследовались температурные зависимости положения пика ФЛ $h\nu_m$ при низком уровне возбуждения и при пороговой плотности мощности накачки (вставка к рис. 5). Обе зависимости отражают температурный сдвиг ширины запрещенной зоны активной области. Таким образом, вклад энергетического положения максимума ФЛ в увеличение пороговой плотности мощности довольно мал. Определенная непосредственно из спектров ширина полосы ФЛ FWHM также слабо увеличивается с ростом температуры, что указывает на малую дисперсию размеров КД CdSe, и мало влияет на порог генерации. Наибольший вклад в увеличение порога генерации с ростом температуры оказывает квантовая эффективность спонтанного излучения η_{sp} , определяемая как отношение интегральной интенсивности спектра ФЛ к плотности мощности накачки. Уменьшение внутренней эффективности происходит, очевидно, в результате уменьшения электронного ограничения, увеличения вероятности

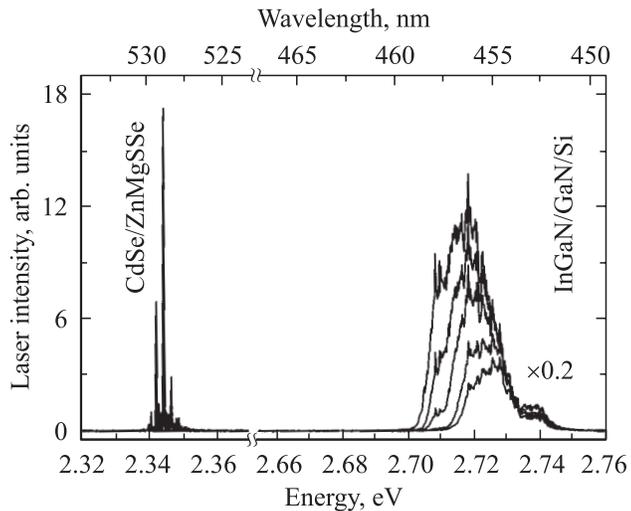


Рис. 6. Спектр генерации CdSe/ZnMgSSe-лазера при оптической накачке InGaN/GaN-лазером.

безызлучательной рекомбинации и внутренних потерь в структуре с ростом температуры.

Спектры возбуждения люминесценции гетероструктур с КД CdSe при комнатной температуре показали, что существует ярко выраженный максимум эффективности возбуждения в спектральном интервале 440–460 нм, что хорошо соответствует диапазону поглощения в волноводе ZnSe/ZnSSe, обладающем при 300 К высокой эффективностью транспорта носителей заряда к КД CdSe перпендикулярно слоям СР. Поглощение возбуждающего излучения в обкладочных слоях ZnMgSSe имеет намного меньшую эффективность как вследствие пространственной удаленности, так и вследствие значительных флуктуаций потенциала и захвата на центры безызлучательной рекомбинации. Поэтому оптическая накачка лазеров с КД CdSe в КЯ ZnSe излучением с длиной волны ~ 450 нм должна быть более эффективной и иметь меньший порог, чем накачка излучением азотного лазера ($\lambda = 337.1$ нм).

Для оптической накачки CdSe/ZnMgSSe-лазеров использовались InGaN/GaN-лазеры с множественными КЯ, выращенные на подложках из сапфира (Al_2O_3) и кремния (Si), накачиваемые излучением азотного лазера и излучающие в диапазоне длин волн 420–470 нм [22,23]. Лазерная генерация в структуре с активной областью в виде вставок CdSe в ZnSe при комнатной температуре была достигнута при использовании InGaN/GaN-лазера, выращенного на подложке Si (111) и имеющего длину волны излучения 452–458 нм. Лазеры на подложках Si обладают более высокой мощностью по сравнению с лазерами той же длины волны, выращенными на сапфире. Увеличение числа буферных слоев для релаксации напряжений, возникающих при росте на несогласованной по параметру решетки подложке, позволяет повысить качество активной области этих лазеров и понизить порог генерации до $I_{\text{th}} = 30$ кВт/см² при длине волны 455 нм. Лазеры характеризуются высокой

температурной стабильностью с $T_0 = 195$ К в диапазоне температур 20–225°С. При этом их максимальная квантовая эффективность и максимальная импульсная мощность составляют 5% и 30 Вт соответственно.

Возбуждение лазера на основе соединений A^{II}B^{VI} происходило в поперечной геометрии, при этом не использовалась какая-либо промежуточная оптика. При приближении CdSe/ZnMgSSe-лазера к резонатору InGaN/GaN-лазера наблюдается сначала интенсивная люминесценция, а при дальнейшем приближении (~ 200 мкм) с повышением плотности мощности накачки — генерация, при этом доля рассеянного излучения азотного лазера меньше 0.1% интенсивности излучения InGaN/GaN-лазера.

На рис. 6 представлен спектр генерации с четкой модовой структурой CdSe/ZnMgSSe-лазера при оптической накачке InGaN/GaN-лазером с МКЯ.

4. Заключение

Методом МПЭ выращены Cd(Zn)Se/ZnMgSSe-лазеры с оптической накачкой и различной конструкцией активной области. Во всех структурах была достигнута лазерная генерация в широком интервале температур и интенсивностей накачки без серьезных признаков деградации. Лучшие характеристики получены в структуре, активная область которой включает в себя три плоскости КД CdSe. Полученные величины внешней квантовой эффективности (12%), характеристической температуры (330 К в интервале температур до 100°С) и максимальной мощности излучения (20 Вт) являются одними из лучших среди опубликованных результатов для оптических лазеров на основе соединений A^{II}B^{VI}. Впервые для оптической накачки CdSe/ZnMgSSe-лазера использовался оптически накачиваемый InGaN/GaN-лазер с множественными КЯ, выращенный на подложке Si (111).

Полученные результаты позволяют рассматривать возможность применения инжекционных лазеров на основе GaN в качестве источника оптической накачки для получения компактного интегрального лазерного конвертора InGaN/GaN–Cd(Zn)Se/ZnMgSSe, излучающего в зеленой области спектра.

Работа выполнена при поддержке Программы министерства России „Физика твердотельных наноструктур“, ИНТАС, РФФИ (грант № 03-02-17563) и Белорусско-Российского проекта М-15. С.В. Иванов благодарит за поддержку Фонд содействия отечественной науке.

Список литературы

- [1] E. Kato, H. Noguchi, M. Nagai, H. Okuama, S. Kijima, A. Ishibashi. *Electron. Lett.*, **34**, 282 (1998).
- [2] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto. *Jap. J. Appl. Phys.*, **35**, L74 (1996).

- [3] S. Nagahama, T. Yanamoto, M. Sano, T. Mukai. Appl. Phys. Lett., **79** (13), 1948 (2001).
- [4] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, S. Fujita, S. Fujita. Appl. Phys. Lett., **70** (8), 981 (1997).
- [5] P.G. Eliseev, M. Osinski, J. Lee, T. Sugahara, S. Sakai. J. Electorn. Mater., **29**, 332 (2000).
- [6] A. Valster, M.N. Finke, M.J.B. Boermans, J.M.M. Heijden, C.J.G.P. Spreuwenberg, C.T.H.F. Liedenbaum. Proc. 12th IEEE Int. Semiconductor Laser Conf. (Davos, 1990) PD-12.
- [7] H. Hamada, K. Tominaga, M. Shono, S. Honda, K. Yodoshi, T. Yamaguchi. Electron. Lett., **28**, 18 334 (1992).
- [8] Y. Kaneko, I. Nomura, K. Kishino, A. Kikuchi. J. Appl. Phys., **74** (2), 819 (1993).
- [9] D.J. Mowbray, O.P. Kowalski, M. Hopkinson, M.S. Skolnick, J.P.R. David. Appl. Phys. Lett., **65**, 213 (1994).
- [10] C.J. Verie. Electron. Mater., **27**, 782 (1998).
- [11] S.V. Ivanov, A.A. Toropov, T.V. Shubina, S.V. Sorokin, A.V. Lebedev, P.S. Kop'ev, G.R. Posina, J.P. Bergman, B. Monemar. J. Appl. Phys., **83**, 3168 (1998).
- [12] S.V. Ivanov, A.A. Toropov, S.V. Sorokin, T.V. Shubina, A.V. Lebedev, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, H.-J. Lugauer, G. Reuscher, M. Keim, F. Fischer, A. Waag, G. Landwehr. Appl. Phys. Lett., **73**, 2104 (1998).
- [13] S.V. Ivanov, A.A. Toropov, S.V. Sorokin, T.V. Shubina, I.V. Sedova, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, Z.I. Alferov, A. Waag, H.-J. Lugauer, G. Reuscher, M. Keim, G. Landwehr. Appl. Phys. Lett., **74**, 498 (1999).
- [14] D. Albert, J. Nurberger, V. Hock, M. Ehinger, W. Faschunger, G. Landwehr. Appl. Phys. Lett., **74**, 1957 (1999).
- [15] V.N. Jmerik, S.V. Sorokin, T.V. Shubina, N.M. Shmidt, I.V. Sedova, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev. J. Cryst. Growth, **214/215**, 502 (2000).
- [16] S. Gundel, D. Albert, J. Nürberger, W. Faschinger. Phys. Rev. B, **60**, R 16271 (1999).
- [17] M.M. Zverev, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, D.V. Peregodov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev. Phys. St. Sol. B, **229** (1), 1025 (2002).
- [17a] A.V. Ankudinov, A.N. Titkov, T.V. Shubina, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, H.-J. Lugauer, G. Reuscher, M. Keim, A. Waag, G. Landwehr. Appl. Phys. Lett., **75**, 2626 (1999).
- [18] E.V. Lutsenko, V.N. Pavlovskii, V.Z. Zubialevich, A.I. Stognij, A.L. Gurskii, V.A. Hryshanau, A.S. Shulenkov, G.P. Yablonskii, O. Schon, H. Protzmann, M. Lunenburger, B. Schineller, Y. Dikme, R.H. Jansen, M. Heuken. Phys. St. Sol. C, **0**, 272 (2002).
- [19] T. Asano, M. Takeya, T. Tojyo, T. Mizuno, S. Ikeda, K. Shibuya, T. Hino, S. Uchida, M. Ikeda. Appl. Phys. Lett., **80** (19), 3497 (2002).
- [20] Y. Arakawa, H. Sakaki. Appl. Phys. Lett., **40** (11), 939 (1982).
- [21] X. Кейси, М. Паниш. Лазеры на гетероструктурах (М., Мир, 1981) т. 1, с. 213.
- [22] G.P. Yablonskii, M. Heuken. In: *Towards the First Silicon Laser*, ed. by L. Pavesi, S. Gaponenko, and L. Dal Negro (Kluwer Academic Publishers, 2002) [*NATO Sci. Ser. II. Mathematics, Physics and Chemistry*, v. 93, p. 455].
- [23] G.P. Yablonskii, E.V. Lutsenko, V.N. Pavlovskii, I.P. Marko, A.L. Gurskii, V.Z. Zubialevich, A.V. Mudryi, O. Schön, H. Protzmann, M. Lünenbürger, B. Schineller, M. Heuken, H. Kalisch, K. Heime. Appl. Phys. Lett., **79**, 1953 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Lasing in Cd(Zn)Se/ZnMgSSe heterostructures pumped by emission of N₂ and InGaN/GaN lasers

I.V. Sedova, S.V. Sorokin, A.A. Toropov, V.A. Kaygorodov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, E.V. Lutsenko⁺, V.N. Pavlovskii⁺, V.Z. Zubialevich⁺, A.L. Gurskii⁺, G.P. Yablonskii⁺, Y. Dikme*, H. Kalisch*, A. Szymakowski*, R.H. Jansen*, B. Schineller[≠], M. Heuken[≠]

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
⁺ Stepanov Institute of Physics of NAS Belarus,
220072 Minsk, Belarus
^{*} Institut für Theoretische Elektrotechnik,
RWTH, Aachen, Germany
[≠] AIXTRON AG, Aachen, Germany

Abstract Laser generation and photoluminescence properties of green ($\lambda = 510\text{--}530$ nm) Cd(Zn)Se/ZnMgSSe heterostructure lasers with different designs of an active region have been investigated in wide temperature and excitation power ranges under pulsed optical excitation. The minimum laser threshold of 10 kW/cm^2 , maximum external quantum efficiency of 12% and maximum output power of 20 W have been achieved in heterostructures with multiple CdSe quantum disc sheets (MQDS) in the active region. The high temperature stability of threshold power densities ($T_0 = 330$ K up to 100°C) has been observed. An integral converter with efficiency of $\sim 1\%$, consisting of the green Cd(Zn)Se/ZnMgSSe MQDS laser optically-pumped by a blue InGaN/GaN quantum well laser grown on a Si (111) substrate, has been proposed and studied for the first time.