

Инжекционный ИК лазер ($\lambda = 2.775$ мкм) на основе двойной гибридной гетероструктуры AlGaAsSb/InAs/CdMgSe, выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии

© С.В. Иванов, К.Д. Моисеев, В.А. Кайгородов, В.А. Соловьев, С.В. Сорокин, Б.Я. Мельцер, Е.А. Гребенщикова, И.В. Седова[¶], Я.В. Терентьев, А.Н. Семенов, А.П. Астахова, М.П. Михайлова, А.А. Торопов, Ю.П. Яковлев, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров

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

(Получена 14 ноября 2002 г. Принята к печати 20 ноября 2002 г.)

Впервые продемонстрирована лазерная генерация в среднем ИК диапазоне при инжекционной накачке (длина волны $\lambda = 2.775$ мкм, пороговая плотность тока $J_{th} = 3-4$ кА/см² при 77 К) двойной гибридной гетероструктуры p -AlGaAsSb/ n^0 -InAs/ n -CdMgSe, выращенной методом двухстадийной молекулярно-пучковой эпитаксии и характеризующейся экстремально высокими асимметричными потенциальными барьерами (~ 1.5 эВ) для электронов и дырок в InAs активной области. Выходная мощность спонтанного излучения при 300 К составила не менее 0.3 мВт для светодиодов с круглой мезой.

Интенсивные усилия, направленные в последние годы на получение полупроводниковых лазеров, работающих в среднем ИК диапазоне 3–5 мкм при комнатной температуре, выявили основные типы перспективных материалов и гетероструктур. Максимальная рабочая температура для непрерывного режима накачки (230 К, $\lambda = 4.2$ мкм) была достигнута на лазерных диодах на основе PbSe [1], хотя относительно низкая теплопроводность этих материалов не позволяет надеяться на высокие выходные мощности излучения даже при криогенных температурах. Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) в системе AlInAs/GaInAs, продемонстрировавшие недавно стимулированную генерацию в непрерывном режиме вблизи 300 К на длине волны ~ 9 мкм [2], тем не менее в диапазоне 3–5 мкм достигли лишь $T_{max} = 175$ К [3]. Относительно высокие пороговые плотности тока и рабочие напряжения, вероятно, не позволят существенно расширить температурный диапазон непрерывной генерации для ККЛ типа I. Вместе с тем антимонидные $A^{III}B^V$ гетероструктуры типа II с W -образным расположением квантовых ям показали генерацию при 310 К на длине волны $\lambda = 3.25$ мкм при импульсной инжекционной накачке за счет оптимизации конструкции, позволившей существенно подавить безызлучательные потери на оже-рекомбинацию и внутризонное поглощение и обеспечить максимально возможное для этой системы электронное ограничение дырок, а также максимальное перекрытие волновых функций электронов и дырок, близкое к квантовым ямам типа I [4]. Но при этом T_{max} в непрерывном режиме составляет до сих пор только 195 К. Следует отметить, что ККЛ типа II на основе антимонидных гетероструктур несколько месяцев назад также продемонстрировали генерацию в импульсном режиме накачки при 300 К в диапазоне длин волн 3.3–3.5 мкм [5].

Основная, на наш взгляд, причина в столь медленном продвижении $A^{III}B^V$ лазеров в область высоких рабо-

чих температур обусловлена специфическим взаимным расположением энергетических зон узкозонных $A^{III}B^V$ материалов с параметрами кристаллической решетки, близкими к $a_{latt} \approx 6.1$ Å (AlSb, GaSb, InAs), когда наиболее узкозонный полупроводник InAs ($E_g = 0.41$ эВ при $T = 77$ К) имеет максимальную глубину залегания валентной зоны. Желание использовать его в качестве активной области лазерных гетероструктур сталкивается с проблемой сильной утечки инжекционного тока дырок через p - n -переход из-за недостаточной высоты барьеров при высоких температурах, даже при использовании в качестве барьеров твердых растворов AlAsSb или InAsSbP с предельно возможным рассогласованием параметров решетки, а в качестве активной области — напряженные слои InAsSb [6].

Для решения этой проблемы нами недавно была предложена оригинальная гибридная двойная гетероструктура AlGaAsSb/InAs/CdMgSe с гетероупругим интерфейсом $A^{III}B^V/A^{II}B^VI$ на границе активной области [7], обеспечивающим более чем 1.5 эВ барьер для дырок в InAs активной области за счет гигантского разрыва валентной зоны. К другим преимуществам такой структуры относятся идеальное согласование параметров решетки $Cd_{0.9}Mg_{0.1}Se$ и InAs, а также огромная разница показателей преломления ($n_{InAs} = 3.4$, $n_{CdSe} = 2.55$), позволяющая достичь сильного оптического ограничения излучения в InAs. Кроме того, такие гетероструктуры могут рассматриваться как ключевой элемент спинтроники — нового направления микроэлектроники, использующего спин электрона в качестве носителя информации вместо заряда, — в котором поляризованные по спину электроны инжектируются из полуметаллического полупроводника, например CdMnSe [8], в немагнитный полупроводник InAs, где производится детектирование спиновой ориентации посредством измерения циркулярной поляризации излучаемого света [9]. Подобные светодиодные гетероструктуры, демонстрирующие близкую к 80% циркулярную поляризацию излучения при 5 К

[¶] E-mail: irina@beam.ioffe.ru

и магнитном поле ~ 1 Тл, были недавно впервые созданы в системе ZnBeMnSe/AlGaAs [10]. Вместе с тем использование в активной области гетероэпитакциального интерфейса InAs/CdMgSe представляет собой серьезную технологическую проблему [11], поскольку накладывает жесткие ограничения на его структурное и электронное совершенство, определяемое концентрацией протяженных и точечных дефектов — электронных ловушек и центров безызлучательной рекомбинации. Первые структуры, содержащие лишь сравнительно тонкие барьеры p -AlAsSb и n -CdMgSe вокруг нелегированного слоя InAs толщиной 0.6 мкм, показали достаточно интенсивную фотолюминесценцию (ФЛ) в видимой и ИК областях спектра [12], а также интенсивную электролюминесценцию (ЭЛ) при 300 К на длине волны 3.12 мкм [13], при относительно высокой концентрации протяженных дефектов (дефектов упаковки и дислокаций) $\sim 10^7$ см $^{-2}$, рождающихся на InAs/CdMgSe-гетерогранице.

В данной работе впервые сообщается о получении лазерной генерации на длине волны ~ 2.78 мкм ($T = 77\text{--}100$ К) при инжекционной импульсной накачке в двойной гетероструктуре AlGaAsSb/InAs/CdMgSe с толстыми широкозонными эмиттерными слоями, выращенной методом двухстадийной молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

Лазерная гетероструктура выращивалась на подложке p^+ -InAs(100) последовательно в двух установках МПЭ. А $^{III}B^V$ часть структуры состояла из буферного слоя p -InAs:Be ($p \approx 10^{18}$ см $^{-3}$) толщиной 50 нм, p -эмиттера Al $_{0.5}$ Ga $_{0.5}$ As $_{0.12}$ Sb $_{0.88}$ Be ($p \approx 10^{17}$ см $^{-3}$) толщиной 2.3 мкм, состав которого плавно изменялся на последних 0.1 мкм для перехода к 20 нм AlAs $_{0.2}$ Sb $_{0.8}$, чтобы минимизировать барьер для прямого тока дырок в InAs, и заканчивалась нелегированным слоем n^0 -InAs ($n \approx 3 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$) толщиной 0.5 мкм. А $^{II}B^{VI}$ часть структуры включала в себя n -эмиттер CdMgSe:Cl толщиной 1 мкм с концентрацией электронов $n = (5\text{--}8) \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ и содержанием Mg 10%, которое соответствует тройному твердому раствору CdMgSe, изопериодному с InAs [12]. В качестве n -контактного слоя использовался сильно легированный слой n^+ -CdSe:Cl толщиной 100 нм ($n \approx 5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$).

После окончания выращивания А $^{III}B^V$ части гетероструктуры при температуре $T_S = 480^\circ\text{C}$ на поверхность верхнего слоя InAs осаждался тонкий слой поликристаллического As при $T_S \approx 3^\circ\text{C}$ и стандартном потоке As $_4$. Затем эпитаксиальная структура через открытую атмосферу передавалась в камеру отжига, соединенную с ростовой камерой А $^{II}B^{VI}$ высоковакуумной системой передачи образца. Отжиг в потоке As $_4$ при $T_S = 500^\circ\text{C}$ приводил к десорбции слоя поликристаллического мышьяка и появлению четкой полосчатой картины дифракции быстрых электронов (ДБЭ) (2×4), соответствующей планарной As-стабилизированной поверхности. Далее структура передавалась в камеру роста соединений А $^{II}B^{VI}$. Инициация роста CdMgSe проводилась при пониженной температуре $T_S \approx 200^\circ\text{C}$

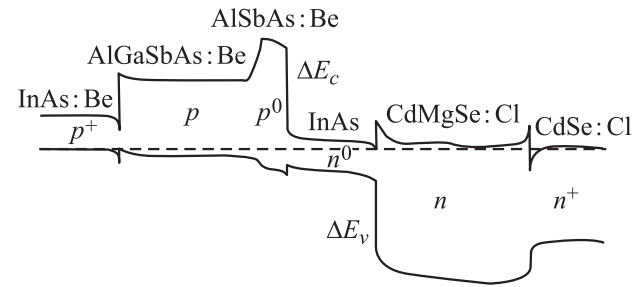


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма лазерной гетероструктуры p^+ -InAs/ p -AlGaSbAs/ n^0 -InAs/ n -CdMgSe/ n^+ -CdSe.

в режиме эпитаксии с повышенной миграцией атомов, как было описано ранее в работе [12]. Рост последующей (Cd,Mg)Se части гетероструктуры осуществлялся в режиме обычной МПЭ при $T_S = 280^\circ\text{C}$ в (2×1) Se-стабилизированных условиях.

Методом стандартной пост-ростовой обработки были созданы меза-полосковые лазерные структуры с двухканальным профилем, приготовленные путем химического травления. Длина резонатора лазера составляла $L = 500$ мкм, ширина полоска $d = 30$ мкм. Формирование омического контакта к p -InAs осуществлялось последовательным напылением трехслойного покрытия Cr/Au + Zn/Au. В качестве приемлемого омического контакта к n -CdMgSe использовался металлический In. Лазерные диоды монтировались на медный теплоотвод, который одновременно служил одним из контактов, а другой контакт осуществлялся с помощью золотой проволоки, припаянной к контактной площадке меза-полоска.

Схематическая зонная диаграмма гибридной лазерной гетероструктуры представлена на рис. 1. Как было установлено ранее на основе теоретических расчетов [13] и предварительных экспериментальных исследований [14], гетеропара InAs/CdSe, выращенная в соответствующих условиях, вероятнее всего является гетеропереходом типа II, в котором зона проводимости InAs лежит на ~ 60 мэВ выше, чем у CdSe. В то же время InAs/Cd $_{0.9}$ Mg $_{0.1}$ Se образует гетеропереход типа I, в котором зона проводимости твердого раствора располагается на 120 мэВ выше дна зоны проводимости InAs, согласно данным по разрывам зон в системе CdSe/CdMgSe [15], а разрыв в валентной зоне на границе раздела составляет $\Delta E_V \approx 1.6$ эВ. С другой стороны, разрыв зоны проводимости на гетерогранице InAs/AlSbAs составляет $\Delta E_C \approx 1.45$ эВ. Таким образом, в данной гетероструктуре с резко асимметричными разрывами зон на противоположных интерфейсах InAs активной области реализуются экстремально высокие потенциальные барьеры для электронов и дырок, что в перспективе должно приводить к резкому подавлению инжекционных потерь в режиме высоких температур и больших токов накачки, необходимых для создания мощных низкотемпературных ИК лазеров, работающих при комнатной температуре [16].

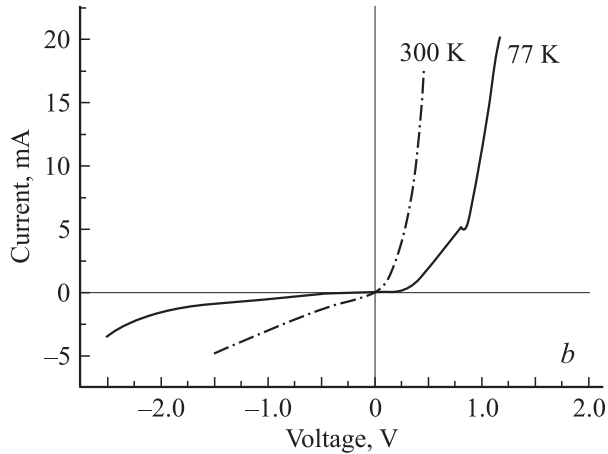
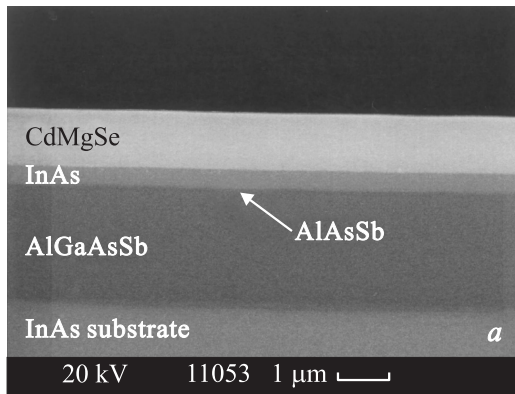


Рис. 2. *a* — изображение поперечного скола лазерной гетероструктуры, полученное методом СЭМ во вторичных электронах; *b* — вольт-амперные характеристики гибридного лазерного диода при 77 и 300 К.

На рис. 2, *a* представлено типичное изображение поперечного скола лазерной структуры, полученное во вторичных электронах методом сканирующей электронной микроскопии. Оно демонстрирует высокое качество и планарность гетерограниц структуры, а также хорошую воспроизводимость толщин эпитаксиальных слоев. Вольт-амперные (I - V) характеристики измерялись независимо для обоих гетеропереходов и для всей лазерной гетероструктуры в целом. Диодная I - V -характеристика была получена для гетероструктуры n -InAs/ p -AlGaAsSb с достаточной толщиной 0.7 мкм слоем AlGaAsSb, в то время как гетеропереход n -InAs/ n -CdMgSe характеризовался омической I - V -характеристикой. Из этого следует, что основная часть напряжения, прикладываемого к структуре, падает вблизи AlAsSb/InAs-интерфейса. Вольт-амперные характеристики лазерного диода p^+ -InAs/ p -(Al,Ga)AsSb/ n^0 -InAs/ n -CdMgSe/ n^+ -CdSe при двух температурах представлены на рис. 2, *b*. При комнатной температуре напряжение отсечки прямой ветви I - V -характеристики ($U_{300} \approx 0.25$ В) очевидно определяется шириной запрещенной зоны InAs, тогда как при 77 К оно возрастает до $U_{77} \approx 0.8$ В, что свидетельствует

о смещении слоя объемного заряда в широкозонный AlAsSb, видимо, вследствие его недостаточного легирования. Излом на прямой ветви при 77 К, вероятно, связан с наличием дополнительного барьера в широкозонных или контактных областях диода.

ЭЛ с накачкой в квазинепрерывном режиме наблюдалась в широком диапазоне температур от 77 до 300 К. Амплитуда импульсов тока накачки с продолжительностью $\tau = 1$ мс и частотой повторения $f = 500$ Гц варьировалась в диапазоне до 200 мА. При комнатной температуре ЭЛ наблюдалась в спектральном диапазоне 0.3–0.5 эВ (рис. 3, *a*). В спектре ЭЛ ярко выражена

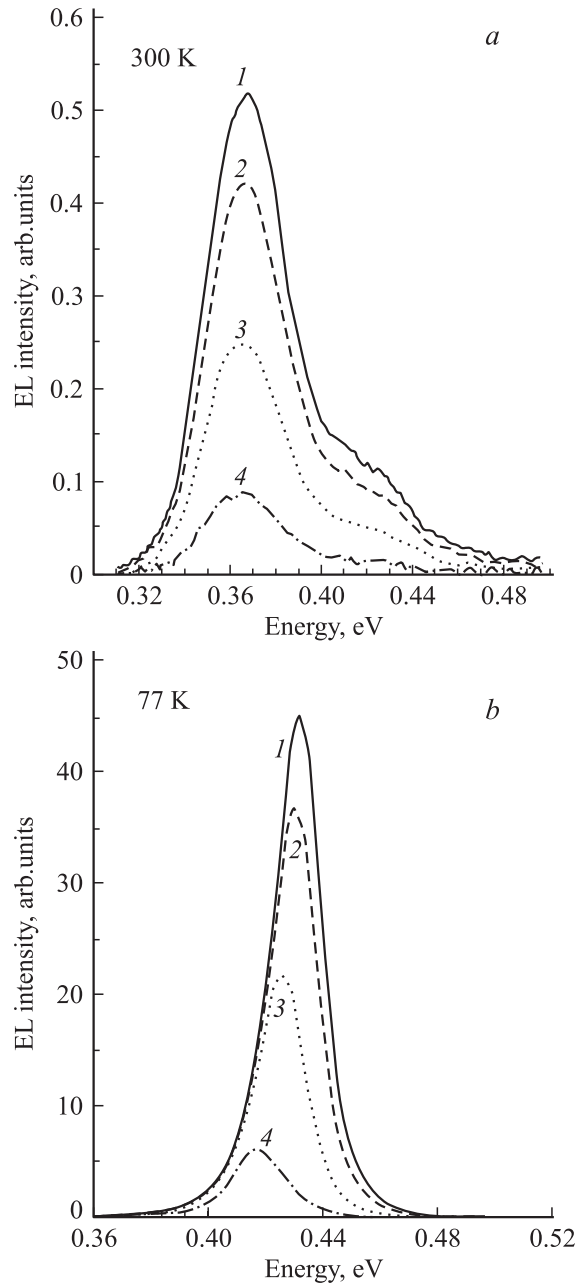


Рис. 3. Спектры ЭЛ гибридной лазерной гетероструктуры при 77 и 300 К и различных токах накачки, мА: 1 — 180, 2 — 150, 3 — 100, 4 — 50.

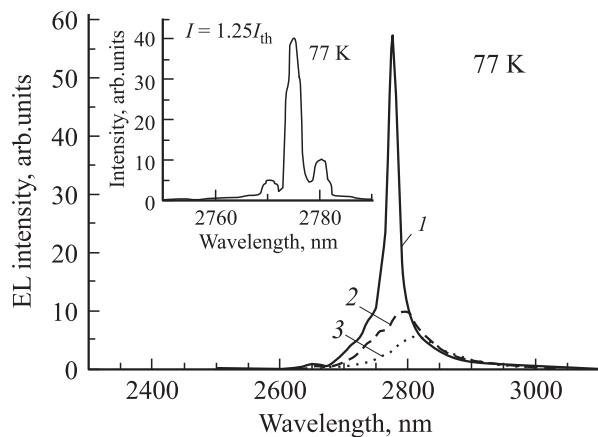


Рис. 4. Спектры ЭЛ на пороге стимулированного излучения полоскового диода ($d = 30$ мкм, $L = 500$ мкм) на основе гибридной гетероструктуры AlGaAsSb/InAs/CdMgSe, полученные при импульсной накачке ($\tau = 500$ нс, $f = 32$ кГц) и температуре 77 К. На вставке — спектр лазерной генерации при $I = 850$ мА. Ток накачки, мА: 1 — 820, 2 — 610, 3 — 488.

полоса излучения с энергией максимума при 0.365 эВ, что соответствует $E_g(\text{InAs})$. При увеличении уровня инжекции на коротковолновом краю проявлялось плечо с энергией максимума излучения 0.423 эВ. С увеличением тока накачки при 300 К наблюдался небольшой сдвиг (2–3 мэВ) спектрального положения пика $h\nu_1$ в направлении больших энергий, в то время как „голубой“ сдвиг максимума полосы излучения $h\nu_1$ при 77 К составлял уже 18 мэВ от 0.418 до 0.436 эВ. Следует подчеркнуть также, что спектр ЭЛ при 77 К содержал только одну ярко выраженную полосу излучения асимметричной формы, без дополнительных пиков даже при высоких уровнях инжекции (рис. 3, б). При понижении температуры от 300 до 77 К интенсивность спонтанной ЭЛ возрастала в ~ 70 раз. Нужно отметить, что для мезодиодной структуры с круглой мезой выходная мощность при 300 К составила не менее 0.3 мВт.

Стимулированное излучение было получено при температуре 77 К в импульсном режиме накачки (рис. 4). Длительность импульсов тока варьировалась в диапазоне от 125 нс до 2 мкс при частоте повторения 32 кГц. С повышением тока накачки наблюдался „голубой“ сдвиг основной полосы излучения $h\nu_1$ в диапазоне от 0.436 до 0.442 эВ, что свидетельствует об образовании самосогласованной квантовой ямы в зоне проводимости вблизи гетерограницы InAs/AlAsSb. Значение порогового тока при импульсах длительностью $\tau_1 = 500$ нс составило $I_{th} = 680$ мА, что дает значение пороговой плотности тока $j_{th} = 3\text{--}4$ кА/см². Лазерная генерация наблюдалась на длине волны $\lambda = 2.775$ мкм. Среднее расстояние между модами составляло 5 нм, а полуширина основного лазерного пика не превышала 3 нм (см. вставку на рис. 4). Относительно высокие значения пороговых токов, на наш взгляд, обусловлены недостаточным уровнем p -легирования широкозонного эмиттера, наличием относительно большой concentra-

ции протяженных дефектов, а также высоким уровнем безызлучательных потерь в объемном слое InAs вследствие оже-рекомбинации и внутризонного поглощения.

Таким образом, впервые продемонстрирована возможность лазерной генерации в среднем ИК диапазоне ($\lambda = 2.775$ мкм при 77 К) при инжекционной накачке двойной гибридной гетероструктуры (Al,Ga)SbAs/InAs/(Cd,Mg)Se с гетеровалентным интерфейсом A^{III}B^V/A^{II}B^{VI} на границе InAs активной области. Ожидается, что дальнейшая оптимизация МПЭ технологии всех компонентов структуры и ее конструкции с использованием в активной области квантовых ям типа II (например, (Ga,In)Sb/InAs) для подавления безызлучательных потерь позволит реализовать большие потенциальные возможности данного типа структур при создании мощных ИК лазеров, работающих в диапазоне 3–5 мкм вблизи комнатной температуры.

Работа выполнялась при поддержке грантов МНТЦ № 2044, ИНТАС № 01-2375, РФФИ №№ 00-02-17047 и 02-02-17643 и Фонда Фольксваген.

Список литературы

- [1] U.P. Schliessl, J. Rohr. Infr. Phys. Techn. **40**, 325 (1999).
- [2] D. Hofstetter, M. Beck, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Ilegems, E. Gini, H. Melchior. Appl. Phys. Lett., **78**, 1964 (2001); S. Slivken, Z. Huang, A. Evans, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **80**, 4091 (2002).
- [3] C. Gmachl, A.M. Sergent, A. Tredicucci, F. Capasso, A.L. Hutchinson, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, S.N.G. Chu, A.Y. Cho. IEEE Photon. Technol. Lett., **11**, 1369 (1999).
- [4] W.W. Bewley, H. Lee, I. Vurgaftman, R.J. Menna, C.L. Felix, R.U. Martinelly, D.W. Stokes, D.Z. Garbuzov, J.R. Meyer, M. Maiorov, J.C. Connolly, A.R. Sugg, G.H. Olsen. Appl. Phys. Lett., **76**, 256 (2000).
- [5] R.Q. Yang, J.L. Bradshaw, J.D. Bruno, J.T. Pham, D.E. Wortman, R.L. Tober. Appl. Phys. Lett., **81**, 397 (2002).
- [6] G.G. Zegrya, M.P. Mikhailova, T.N. Danilova, A.N. Imenkov, K.D. Moiseev, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev. Semicond., **33**, 97 (1999).
- [7] S.V. Ivanov, K.D. Moiseev, A.M. Monakhov, I.V. Sedova, V.A. Solov'ev, M.P. Mikhailova, Ya.V. Terentyev, B.Ya. Meltzer, A.A. Toropov, Yu.P. Yakovlev, P.S. Kop'ev. Proc. 8th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“ (St. Petersburg, Russia, 2000) p. 109.
- [8] P. Grabs, G. Richter, R. Fiederling, C.R. Becker, W. Ossau, G. Schmidt, L.W. Molenkamp, W. Weigand, E. Umbach, I.V. Sedova, S.V. Ivanov. Appl. Phys. Lett., **80**, 3766 (2002).
- [9] А.Г. Аронов, Г.Е. Пикус. ФТП, **10**, 1177 (1976).
- [10] R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A. Waag, L.W. Molenkamp. Nature (London), **402**, 787 (1999).
- [11] N. Samarth, H. Luo, J.K. Furdyna, S.B. Qadri, Y.R. Lee, A.K. Ramdas, N. Otsuka. Appl. Phys. Lett., **54**, 2680 (1989).
- [12] В.А. Соловьев, И.В. Седова, А.А. Торопов, Я.В. Терентьев, С.В. Сорокин, Б.Я. Мельцер, С.В. Иванов, П.С. Копьев. ФТП, **35** (4), 431 (2001).

- [13] S.V. Ivanov, V.A. Solov'ev, K.D. Moiseev, I.V. Sedova, Ya.V. Terentyev, A.A. Toropov, B.Ya. Meltzer, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev, P.S. Kop'ev. *Appl. Phys. Lett.*, **78** (12), 1655 (2001).
- [14] S. Ivanov, S. Sorokin, K. Moiseev, V. Solov'ev, V. Kaygorodov, Ya. Terent'ev, B. Meltzer, A. Semenov, M. Mikhailova, Yu. Yakovlev, P. Kop'ev. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **692**, H8.8.1-6 (2002).
- [15] V.A. Kaygorodov, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, O.V. Nekrutkina, T.V. Shubina, A.A. Toropov, S.V. Ivanov. *Phys. St. Sol. (b)*, **229**, 19 (2002).
- [16] Yu.P. Yakovlev, S.V. Ivanov, K.D. Moiseev, A.M. Monakhov, V.A. Solov'ev, I.V. Sedova, Ya.V. Terent'ev, A.A. Toropov, M.P. Mikhailova, B.Ya. Meltzer, P.S. Kop'ev. *Proc. SPIE*, **4651**, 203 (2002).

Редактор Л.В. Беляков

Mid-IR Injection Laser ($\lambda = 2.775 \mu\text{m}$) Based on Hybrid AlGaAsSb/InAs/CdMgSe Double Heterostructure Grown by Molecular Beam Epitaxy

*S.V. Ivanov, K.D. Moiseev, V.A. Kaygorodov,
V.A. Solov'ev, S.V. Sorokin, B.Ya. Meltser,
E.A. Grebenshikova, I.V. Sedova, Ya.V. Terent'ev,
A.N. Semenov, A.P. Astakhova, M.P. Mikhailova,
A.A. Toropov, Yu.P. Yakovlev, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov*

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

Abstract The laser generation in a mid-IR range ($\lambda = 2.775 \mu\text{m}$, $J_{th} = 3-4 \text{ kA/cm}^2$ at 77 K) under the injection pumping of hybrid $p\text{-AlGaAsSb}/n^0\text{-InAs}/\text{CdMgSe}$ double heterostructure has been demonstrated for the first time. The structure is grown by two-stage molecular beam epitaxy technique and characterized by extremely high asymmetric potential barriers ($\sim 1.5 \text{ eV}$) both for electrons and holes in the InAs active region. The output power of spontaneous emission at 300 K is as high as 0.3 mW for the round-shape mesa diodes.