

06;07

Инжекционный ИК лазер на основе гибридной III–V/II–VI гетероструктуры с InSb субмонослойными вставками

© В.А. Соловьев, И.В. Седова, О.Г. Люблинская, А.Н. Семенов,
Б.Я. Мельцер, С.В. Сорокин, Я.В. Терентьев, С.В. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург

E-mail: vasol@beam.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 11 ноября 2004 г.

Продемонстрирована лазерная генерация на длине волны $3.075\ \mu\text{m}$ ($T = 60\ \text{K}$) при инжекционной импульсной накачке двойной гибридной AlGaAsSb/InAs/CdMgSe гетероструктуры с активной областью, представляющей собой субмонослойные InSb вставки в InAs. Исследовано поведение спектра электролюминесценции при различных уровнях токовой накачки вплоть до порога стимулированного излучения. Обнаружен коротковолновый сдвиг и изменение структуры полосы электролюминесценции с увеличением тока накачки, которые объясняются заполнением носителями более высоких состояний в InSb квантовых точках или окружающем слое InAsSb.

На протяжении последних десяти лет интенсивные усилия направлены на создание инжекционных лазеров среднего инфракрасного (ИК) диапазона с длиной волны $3\text{--}5\ \mu\text{m}$, обладающих широким спектром коммерческих применений (химический контроль выбросов в атмосферу, бесконтактное тестирование в медицине, ИК-спектроскопия, определение утечек, лазерная хирургия и т.д.) [1]. Однако до сих пор максимальная рабочая температура лазеров на основе $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ материалов для непрерывного режима накачки остается значительно ниже комнатной температуры. Одной из основных причин этого является существенная утечка инжекционного тока дырок через $p\text{--}n$ -переход из-за недостаточной высоты барьеров, ограничивающих активную область лазеров на основе узкозонных соединений $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$. Недавно нами был предложен новый подход к созданию лазеров среднего ИК диапазона, основанный на использовании гибридных AlGaAsSb/InAs/CdMgSe гетероструктур, выращиваемых псевдоморфно на InAs подложках и со-

держащих $A^{III}B^V/A^{II}B^VI$ гетеровалентный интерфейс на одной из границ InAs активной области [2,3]. Значительный (~ 1.5 eV) разрыв валентной зоны на интерфейсе InAs/CdMgSe блокирует дырки в InAs, предотвращая тем самым утечку носителей из активной области. Несмотря на наличие достаточно большой плотности дефектов на интерфейсе CdMgSe/InAs ($\sim 10^6 - 10^7$ cm $^{-2}$) и использование „объемного“ InAs в качестве активной области, в таких гибридных структурах, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на InAs подложках, была получена лазерная генерация на длине волны ~ 2.78 μ m (100 K) при импульсной инжекционной накачке с пороговой плотностью тока 3–4 kA/cm 2 [4,5]. Другое важное преимущество гибридных структур — это практически идеальное оптическое ограничение в InAs активной области вследствие большой разницы в показателях преломления для InAs и CdMgSe ($n_{InAs} = 3.5$, $n_{CdSe} = 2.55$). Таким образом, гибридные структуры обеспечивают такую комбинацию свойств, которая не может быть достигнута при использовании только соединений $A^{III}B^V$.

Для того чтобы получить более длинноволновое излучение, снизить потери на Оже-рекомбинацию и уменьшить пороговую плотность тока, мы предлагаем использовать в качестве активной области лазеров слой InAs с субмонослойными вставками InSb, обеспечивающими эффективный канал излучательной рекомбинации носителей. Такие структуры были выращены нами методом МПЭ и, несмотря на тип II гетероперехода InSb/InAs, демонстрировали интенсивную фотолюминесценцию (ФЛ) в широком интервале температур 77–300 K в диапазоне длин волн 3.4–4.3 μ m [6]. При этом формирование слоев InSb происходило за счет реакции замещения атомов мышьяка атомами сурьмы при экспонировании поверхности InAs под потоком Sb. Номинальная толщина InSb слоя увеличивалась от 0.6 до 1 монослоя (МС) при снижении температуры роста в интервале 485–400°С. Проведенные исследования субмонослойных InSb вставок методом просвечивающей электронной микроскопии позволили установить во вставках наличие квантово-размерных островков, обогащенных антимонидом индия, характерный латеральный размер которых составлял 2.5 ± 1.5 nm, а поверхностная плотность превышала значение 10^{12} cm $^{-2}$ [7].

В данной работе сообщается о получении стимулированного излучения с длиной волны ~ 3.075 μ m ($T = 60$ K) при инжекционной импульсной накачке в двойной гибридной AlGaAsSb/InAs/CdMgSe ге-

тероструктуре с активной областью на основе субмонослойных InSb вставок в InAs.

Лазерная гетероструктура была выращена на подложке p^+ -InAs (001) последовательно в двух отдельных установках МПЭ. В отличие от ранее изученной нами структуры без InSb вставок [4] (назовем ее „референсной“), в качестве нижнего p -эмиттера использовался слой $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$:Ве толщиной $2.5\ \mu\text{m}$ с увеличенным содержанием алюминия, а волноводом служил слой InAs толщиной $0.6\ \mu\text{m}$, внутри которого располагалась трехпериодная структура, состоящая из ультратонких InSb слоев и InAs барьеров толщиной $20\ \text{nm}$. Область, включающая InSb вставки и часть волноводного слоя, формировалась при температуре 450°C , в то время как все остальные слои выращивались при 500°C . Номинальная толщина InSb вставок составляла $0.8\ \text{MC}$. Состав и особенности роста $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ части структуры были такими же, как в случае „референсной“ структуры, и подробно изложены в работах [4,5]. Однако для защиты поверхности InAs при передаче образца в камеру роста $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ вместо осаждения слоя поликристаллического мышьяка использовалась химическая пассивация InAs в водном растворе Na_2S [8]. Было показано, что такая обработка с последующим отжигом структуры под потоком мышьяка при 500°C приводит к образованию атомарно-гладкой $(2 \times 4)\text{As}$ -стабилизированной поверхности InAs, идеально подходящей для когерентного роста соединений $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. Исследования электролюминесценции и стимулированного излучения проводились на четырехсклоотых образцах.

Вольт-амперные зависимости лазерной гетероструктуры (вставка на рис. 1) имеют вид диодной характеристики с напряжением отсечки прямой ветви 0.37 и $0.16\ \text{V}$ при температурах 77 и $300\ \text{K}$ соответственно. Напряжение отсечки очевидно определяется шириной запрещенной зоны InAs. Это свидетельствует о том, что область объемного заряда p - n -перехода располагается полностью в волноводном слое InAs.

На рис. 1 представлены спектры низкотемпературной электролюминесценции (ЭЛ), полученные при разных уровнях токовой накачки вплоть до порога стимулированного излучения. При малых токах накачки спектр ЭЛ представляет собой широкий двоякий пик. Длинноволновая его часть в целом повторяет спектр ФЛ с энергией максимума излучения $\sim 0.35\ \text{eV}$, как и для нелегированной тестовой структуры с InSb-вставками, сформированными при температуре 450°C . Коротковолновая полоса излучения с максимумом вблизи

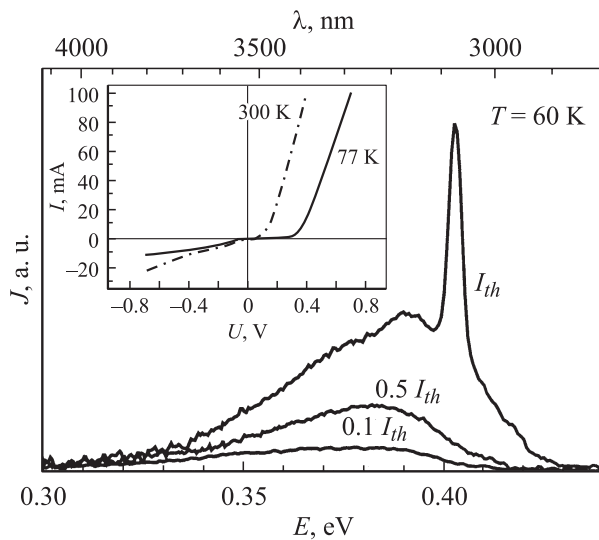


Рис. 1.

0.38 eV доминирует в спектре ЭЛ и с повышением уровня накачки претерпевает достаточно резкий „голубой“ сдвиг. Мы полагаем, что наблюдаемый коротковолновый сдвиг и изменение структуры полосы ЭЛ с увеличением тока накачки объясняется заполнением носителями более высоких по энергии состояний в InSb квантовых точках (КТ) и, возможно, окружающем ультратонком слое InSbAs. Аналогичное поведение спектра ЭЛ наблюдалось в лазерных гетероструктурах на основе КТ типа I [9]. В случае КТ типа II эффект насыщения нижних по энергии состояний может быть выражен более ярко из-за увеличения времени излучательной рекомбинации носителей. Стимулированное излучение наблюдалось на длине волны $\lambda \sim 3.075 \mu\text{m}$ и определялось оптическими переходами с участием возбужденных состояний КТ либо состояний смачивающего слоя InSbAs. Спектр лазерной генерации при импульсной накачке (длительность импульса 200 ns, частота повторения 3.2 kHz) показан на рис. 2. Среднее расстояние между модами составляло 7.5 nm, а полуширина основного лазерного пика не превышала 4 nm и определялась аппаратной функцией системы регистрации. Отметим,

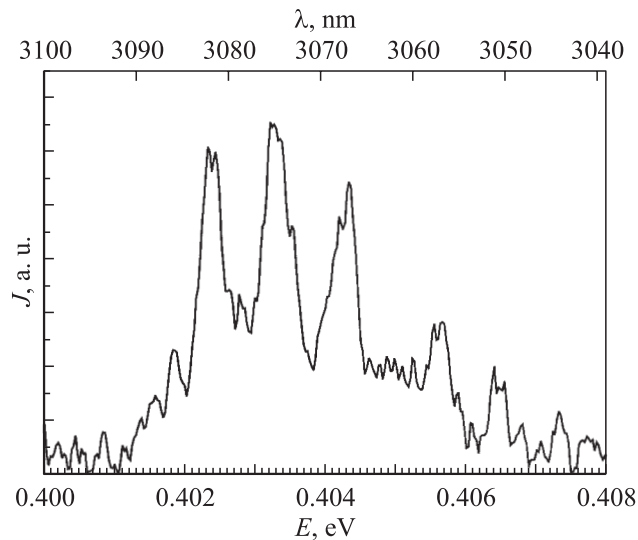


Рис. 2.

что сдвиг длины волны генерации в область более $3\mu\text{m}$ не привел к повышению пороговой плотности тока, которая, как и в случае референсной лазерной структуры, составила $3\text{--}4\text{ kA/cm}^2$.

Таким образом, использование в двойной гибридной $p\text{-AlGaAsSb/InAs}/n\text{-CdMgSe}$ гетероструктуре активной области, содержащей InSb/InAs КТ типа II вместо объемного InAs , позволило сдвинуть длину волны лазерного излучения с 2.78 до $3.075\mu\text{m}$ при низкой температуре без изменения порогового тока. Ожидается, что использование массива КТ большего размера, вертикального упорядочения КТ в структурах с множественными слоями КТ, а также оптимизация базовой гибридной лазерной структуры позволит продвинуться дальше в длинноволновую область спектра, снизить пороговую плотность тока и, возможно, получить генерацию при комнатной температуре.

Авторы выражают благодарность РФФИ (№№ 02–02–17643, 03–02–17566, 04–02–17653) и Фонду содействия отечественной науке за частичную поддержку исследований.

Список литературы

- [1] *Wagner J., Mann Ch., Rattunde M., Weimann G.* // Appl. Phys. A. 2004. V. 78. P. 505.
- [2] *Соловьев В.А., Седова И.В., Торопов А.А.* и др. // ФТП. 2001. Т. 35. С. 431.
- [3] *Ivanov S.V., Solov'ev V.A., Moiseev K.D.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 1655.
- [4] *Иванов С.В., Моисеев К.Д., Кайгородов В.А.* и др. // ФТП. 2003. Т. 37. С. 762.
- [5] *Ivanov S.V., Kaygorodov V.A., Sorokin S.V.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 3782.
- [6] *Семенов А.Н., Соловьев В.А., Терентьев Я.В.* и др. // Тез. VI Российской конф. по физике полупроводников. С.-Петербург, 2003. С. 322.
- [7] *Setenov A.N., Solov'ev V.A., Lyublinskaya O.G.*, et al. // Abstracts of 6th Int. Conf. on „Midinfrared Optoelectronic Materials and Devices“. St. Petersburg, 2004. С. 147.
- [8] *Ivanov S.V., Lyublinskaya O.G., Vasilyev Yu.B.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 4777.
- [9] *Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N.* // Quantum Dot Heterostructures. John Wiley & Sons. 1999. P. 279.