

УДК 535.37;631.378.35

ЛАЗЕР С ПРОДОЛЬНОЙ НАКАЧКОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ CdSSe/CdS, ВЫРАЩЕННОЙ ПАРОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИЕЙ ИЗ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В. И. Козловский, В. Ю. Бондарев, Д. А. Санников,
П. И. Кузнецов¹, Г. Г. Якушева¹

Квантово-размерная структура с 40 квантовыми ямами CdSSe/CdS была выращена методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на гексагональной подложке CdS, разориентированной на 12° относительно плоскости (0001) к направлению (1100). На основе этой структуры был изготовлен резонатор и получено спонтанное излучение на длине волны 614 нм и генерация на длине волны 570 нм при продольной накачке электронным пучком с энергией электронов 40 кэВ и при $T = 80$ К. Относительно высокий порог лазера и коротковолновый сдвиг линии генерации относительно максимума линии спонтанного излучения были объяснены особенностями зонной диаграммы использованной структуры.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в последнее время в области создания инжекционных лазеров на основе нитридных и фосфор-содержащих соединений A_3B_5 , излучающих в синей и красной областях спектра соответственно, большая часть видимого спектра остается неосвоенной. В этой связи развитие технологии получения

¹Институт радиотехники и электроники РАН.

квантово-размерных структур из широкозонных соединений A_2B_6 и разработка приборов на их основе по-прежнему остаются актуальными. Новым направлением развития технологии A_2B_6 является получение квантово-размерных структур с гексагональной кристаллической структурой. Предполагается, что это позволит решить проблему срока службы инжекционных лазеров, с которой пришлось столкнуться в лазерах на основе $ZnSe$ с кубической кристаллической решеткой [1, 2].

Устойчивая гексагональная модификация реализуется в монокристаллах CdS , $CdSe$ и их твердых растворов. Эти монокристаллы успешно используются в лазерных электронно-лучевых трубках [3]. Однако при эпитаксиальном росте пленок этих соединений существует определенная проблема, связанная с увеличением стабильности кубической модификации при низких температурах роста. Первые зеркальные гексагональные пленки CdS , $ZnCdS$ и квантово-размерные структуры $ZnCdS$ высокого структурного качества были получены путем использования гексагональных подложек CdS и $ZnCdS$ [4, 5]. В данной работе представлены результаты дальнейшего улучшения технологии выращивания гомоэпитаксиальных пленок CdS и квантово-размерных структур $CdSSe/CdS$ с использованием разориентированных подложек CdS и создание на основе этих структур первого лазера с продольной накачкой электронным пучком.

Ростовые подложки для эпитаксии изготавливались из пластин, вырезанных из монокристаллов CdS диаметром 50 мм. Монокристаллы были получены из паровой фазы методом свободного роста [6]. Плотность малоугловых границ составляла $10-15 \text{ см}^{-1}$, а плотность дислокаций вне этих границ не превышала 10^4 см^{-2} . Пластины были разориентированы от базисной плоскости (0001) на угол 12 градусов к одному из направлений $\langle 1100 \rangle$ (поворот вокруг оси $\langle 1120 \rangle$). После шлифовки пластины полировались механически с постепенным уменьшением диаметра алмазного порошка, а затем травились в полирующем растворе $CrO_3/HCl/H_2O$. Эпитаксиальный рост проводился в горизонтальном кварцевом реакторе методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ПФЭМОС) при атмосферном давлении. Использовались металлоорганические соединения: диметилкадмия ($DmeCd$), диэтилсульфида ($DetS$) и диметилселенида ($DmeSe$), и водород в качестве газа-носителя. Рост проводился при температуре подложки $370^\circ C$.

Было выращено несколько структур толщиной 3–4 мкм, содержащих 30–40 квантовых ям (КЯ) $CdSSe/CdS$, равномерно распределенных по толщине. Основываясь на опытах по росту толстых пленок $CdSSe$, предполагалось, что состав КЯ близок к $CdS_{0.5}Se_{0.5}$ а ширина КЯ равна 3–4 нм. Структуры имели зеркальную поверхность

и высокую интенсивность излучения с максимумом вблизи 630 нм при накачке излучением азотного лазера при комнатной температуре и интенсивности накачки менее 10^5 Вт/см^2 ($\lambda = 337 \text{ нм}$). Полуширина линии излучения составила 140 мэВ.

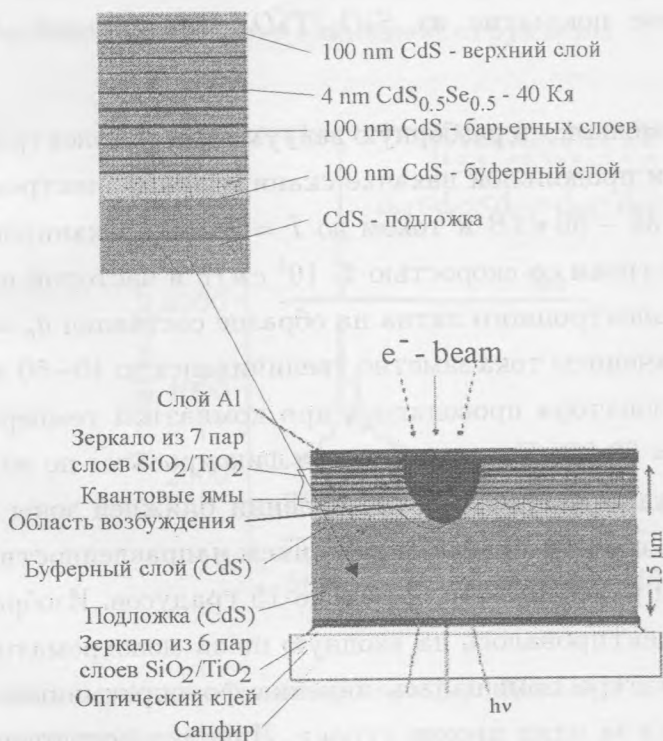


Рис. 1. Схема выращенной структуры $CdSSe/CdS$ и лазерного элемента, изготовленного на ее основе.

На основе одной из структур с 40 КЯ был изготовлен резонатор для лазера с продольной накачкой электронным пучком. Схема выращенной структуры и резонатора представлены на рис. 1. Использовалась следующая технология изготовления резонатора. Сначала структура была приклеена оптической смолой на вспомогательную стеклянную подложку. Шлифовкой и механической полировкой ростовая подложка CdS была практически вся удалена за исключением 15 – 20 мкм вблизи наращенной гетероструктуры. Далее полированная поверхность оставшегося слоя ростовой подложки травилась в полирующем растворе $CrO_3 + HCl + H_2O$ для удаления 3 – 5 мкм нарушенного слоя. На обработанную поверхность напылением в вакууме наносилось первое 12-слойное диэлектрическое зеркальное покрытие из чередующихся четвертьволновых слоев SiO_2 и TiO_2 с максимумом отражения при $\lambda = 620 \text{ нм}$. Поверхность с зеркалом

приклеивалась к полированной с двух сторон сапфировой подложке высокотемпературным оптическим клеем. Затем вспомогательная стеклянная подложка удалялась при нагреве получившейся сборки до температуры 100°C . Освободившаяся ростовая поверхность структуры очищалась от остатков оптической смолы, и на нее наносилось второе 14-слойное зеркальное покрытие из $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ слоев и слой Al толщиной 0.1 мкм .

Полученный резонатор помещался в разборную вакуумируемую электронно-лучевую установку и исследовался при продольной накачке сканирующим электронным пучком с энергией электронов $E_e = 35 - 50 \text{ кэВ}$ и током до $I = 1.5 \text{ мА}$. Сканирование осуществлялось вдоль выбранной строки со скоростью $4 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ и частотой повторения 50 Гц . Минимальный диаметр электронного пятна на образце составлял $d_e = 25 \text{ мкм}$ при минимальном токе, но с увеличением тока заметно увеличивался до $40 - 50 \text{ мкм}$ при токе $I = 1.5 \text{ мА}$. Исследования резонатора проводились при комнатной температуре и температуре жидкого азота ($T = 80 \text{ К}$). Порог генерации фиксировался по возникновению ярких точек вдоль строки сканирования при наблюдении ближней зоны в микроскоп МБС-9. Появление генерации сопровождалось появлением направленности излучения в дальней зоне с полным углом расходимости примерно 15 градусов. Изображение строки излучения резонатора проектировалось на входную щель монохроматора МДР-4, а на выходной щели монохроматора помещалась линейка фотоприемников. Спектр излучения резонатора измерялся за один проход строки. Линейка фотоприемников была собрана в Институте спектроскопии РАН.

К сожалению, при комнатной температуре не удалось наблюдать режим генерации. Генерация была получена при $T = 80 \text{ К}$. Пороговый ток при $E_e = 40 \text{ кэВ}$ был равен $I_{th} = 0.2 \text{ мА}$, что соответствовало плотности тока примерно $j_{th} = 80 \text{ А/см}^2$. Спектр излучения резонатора при $E_e = 40 \text{ кэВ}$, $I = 1.5 \text{ мА}$ и различных значениях d_e представлен на рис. 2. По вертикальной шкале отложена спектральная плотность интенсивности излучения в относительных единицах. Ширина щелей монохроматора увеличивалась при расфокусировке электронного пятна, что приводило к уменьшению спектрального разрешения для слабых сигналов. При большом электронном пятне ($d_e = 1 \text{ мм}$) спектр излучения содержал одну линию спонтанного излучения с максимумом вблизи $\lambda = 614 \text{ нм}$. С уменьшением d_e , что соответствует увеличению интенсивности возбуждающего пучка, спектр уширяется с коротковолновой стороны до возникновения режима генерации. Генерация при небольшом превышении над порогом достигалась на одной продольной моде вблизи 570 нм . Сдвиг линии генерации относительно максимума излучения при

низком уровне накачки составил величину, примерно равную 165 мэВ . При максимальном превышении над порогом генерация наблюдается на двух-трех продольных модах резонатора (не показано на рис. 2). Максимум огибающей спектра генерации изменяется в зависимости от положения электронного пучка на образце в пределах $570 - 580 \text{ нм}$, что связано с неоднородностью выращенной структуры.

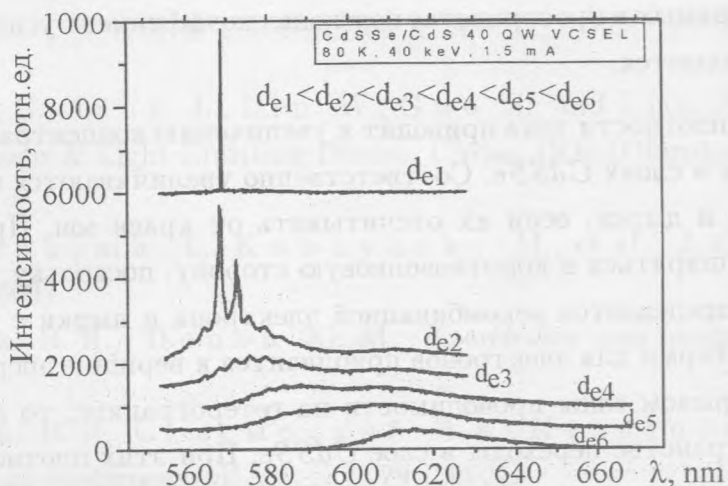


Рис. 2. Спектры излучения резонатора при $E = 40 \text{ кэВ}$, $I = 1.5 \text{ мА}$, $T = 80 \text{ К}$ и различных диаметрах электронного пучка d_e .

Возникновение генерации на коротковолновом крае спектра излучения КЯ, полученного при малых интенсивностях возбуждения, и относительно высокий порог генерации мы связываем с особенностью зонной диаграммы использованной гетероструктуры. Аналогичный сильный коротковолновый сдвиг линии излучения с увеличением интенсивности оптического возбуждения наблюдался ранее в многослойных структурах $CdSe/CdS$ с малым периодом (10 нм) [7, 8]. Полученные результаты были объяснены в предположении, что гетероструктура $CdSe/CdS$ является гетероструктурой II-го типа, причем слои $CdSe$ являются энергетическими ямами для дырок, а слои CdS – для электронов. Разрыв зоны проводимости был оценен величиной 230 мэВ . Следуя данным представлениям и предполагая линейное изменение разрывов зон с концентрацией Se в КЯ $CdSSe/CdS$, получаем, что разрыв зоны проводимости в использованной нами структуре с 50%-й концентрацией Se ожидается равным примерно $\Delta E_c = 115 \text{ мэВ}$, в то время как разрыв валентной зоны $\Delta E_v = 480 \text{ мэВ}$. При такой зонной диаграмме неравновесные носители, создаваемые электронным пучком, разделяются в пространстве

вдоль направления чередования слоев: электроны скапливаются в широких слоях CdS , а дырки – в узких слоях $CdSSe$. Излучательная рекомбинация идет вблизи гетерограницы при относительно малом перекрытии волновых функций электрона и дырки. В этих условиях высокая интенсивность излучения при малой плотности тока электронного пучка свидетельствует о высоком качестве полученной структуры, об отсутствии других каналов рекомбинации, связанных с возможными дефектами на гетерограницах. Однако при не прямых в пространстве переходах коэффициент усиления мал и генерация на них не наблюдается.

Увеличение плотности тока приводит к увеличению концентрации электронов в слоях CdS и дырок в слоях $CdSSe$. Соответственно увеличиваются и квазиуровни Ферми для электронов и дырок, если их отсчитывать от краев зон. При этом спектр излучения должен уширяться в коротковолновую сторону, поскольку коротковолновая граница спектра определяется рекомбинацией электрона и дырки с квазиуровней Ферми. Когда уровень Ферми для электронов приблизится к вершине энергетического барьера, вызванного разрывом зоны проводимости на гетерогранице, то становятся возможны прямые в пространстве переходы в слое $CdSSe$. При этих плотностях тока создаются условия для достижения высокого коэффициента усиления и достижения генерации. Для объемного CdS с эффективной массой электрона $m_e = 0.205m_0$ заполнение зоны проводимости до уровня ΔE_c соответствует концентрации электронов $1.6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эта концентрация соответствует пороговому значению для плотности тока электронного пучка $j_{th} = 80 \text{ А/см}^2$ при разумном значении – 1 нс – для времени жизни электронов [3]. При такой же объемной концентрации дырок их слоевая плотность будет равна $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, если толщина слоя $CdSSe$ равна 4 нм , что в 25 раз меньше толщины слоя CdS . В этом случае уровень Ферми в $CdSSe$ слое опустится до $F_{h,th} = 73 \text{ мэВ}$ относительно потолка валентной зоны в предположении, что эффективная масса дырок равна $m_h = 1.07m_0$ (расчет был сделан аналогично [9]). При этом первый уровень для дырок отстоит от края зоны на энергию $E_{h1} = 18 \text{ мэВ}$. Таким образом мы получаем, что прямые переходы в КЯ начинают давать усиление при энергетическом сдвиге относительно максимума линии спонтанного излучения $\Delta h\nu = \Delta E_c + (F_{h,th} - E_{h1}) = 170 \text{ мэВ}$, что близко к экспериментально замеренной величине 165 мэВ .

Проведенный анализ показывает, что следует ожидать существенного уменьшения порога генерации при использовании гетероструктуры I-го типа, обеспечивающей эффективную локализацию в КЯ как дырок, так и электронов. В рамках использованной технологии такими структурами могут быть структуры $CdS/ZnCdS$ или

CdSSe/ZnCdS.

Авторы благодарят Я. К. Скасырского и Ю. В. Коростелина за помощь в работе. Работа выполнена при поддержке программой Президиума РАН "Низкоразмерные квантовые структуры", федеральной программой "Физика твердотельных наноструктур" и РФФИ, гранты 01-02-16409 и 01-02-17364.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tamargo M. C., Zeng L., Lin W., Guo S., and Luo Y. Y. Proc 2nd Int. Symp. Blue Laser & Light Emitting Diodes, Chiba, 1998 (Ohmsha, Tokyo, 1998), p. 703.
- [2] Jia A., Furushima T., Kobayashi M., et al. J. Crystal Growth, **214/215**, 1085 (2000).
- [3] Козловский В. И., Попов Ю. М. Квантовая электроника, **33**, N 1, 48 (2003).
- [4] Козловский В. И., Скасырский Я. К., Кузнецов П. И., и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 1, 29 (2002).
- [5] Kozlovsky V. I., Martovitsky V. P., Sannikov D. A., et al. J. Crystal Growth, **248**, 62 (2003).
- [6] Давыдов А. А., Ермолов В. Н., Неустроев С. В., Павлова Л. П. Неорг. матер., **28**, 42 (1992).
- [7] Halsall M. P., Nicholls J. E., Davies J. J., et al. Surface Science, **228**, 41 (1990).
- [8] Bradley I. V., Creasey J. P., and O'Donnell K. P. J. Crystal Growth, **184/185**, 728 (1998).
- [9] Kozlovsky V. I., Korostelin Yu. V., Popov Yu. M., et al. Phys. Stat. Solidi (B), **229**, 1033 (2002).

Поступила в редакцию 17 января 2003 г.