

УДК 538.915

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР HgCdTe С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

© 2014 г. А. В. Войцеховский, Д. И. Горн

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Национальный исследовательский Томский государственный университет
E-mail: gorn_dim@sibmail.com

Приведен анализ экспериментальных данных по регистрации инфракрасной (ИК) фотолюминесценции (ФЛ) в гетероэпитаксиальных структурах на основе твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ), включающих множественные квантовые ямы на основании экспериментальных данных, полученных авторами различных работ. Проведен теоретический анализ энергий оптических переходов на основании модели самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шрёдингера для квантовой ямы. Проанализированы экспериментальные данные, полученные при различных температурах, мощностях накачки и длинах волн возбуждения.

DOI: 10.7868/S0367676514100238

ВВЕДЕНИЕ

Одна из фундаментальных задач при проектировании приборов ИК-нанопотоники — выяснение закономерностей формирования спектров фотолюминесценции в структурах КРТ с квантовыми ямами, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Фотолюминесценция полупроводниковых структур с наноразмерными включениями — это средство для определения параметров зонной диаграммы полупроводниковых структур и характеристик энергетического спектра носителей заряда. Наряду с этим исследования фотолюминесценции напрямую дают основу для разработки полупроводниковых светоизлучающих устройств. В настоящее время имеется ряд публикаций, посвященных исследованию фотолюминесценции и лазерной генерации в МЛЭ-структурах КРТ.

Большая часть из рассмотренных нами работ описывает эксперименты по наблюдению фотолюминесценции в структурах с множественными квантовыми ямами на основе КРТ с количеством периодов структуры от 4 до 50. Это, вероятно, связано с тем, что получить излучение в структуре с множественными КЯ (МКЯ) значительно проще, чем в структуре с одиночной КЯ (ОКЯ). Исключения составляют работы, в которых наряду с МКЯ-структурами рассматриваются также и одиночные квантовые ямы.

В данной работе нами приведены результаты оценочных расчетов энергий наблюдаемых пиков излучения в проанализированных экспериментальных работах. Для оценки энергий оптических переходов нами использована модель самосогла-

сованного потенциала полупроводниковой гетероструктуры, основанная на совместном численном решении уравнений Пуассона и Шрёдингера для структуры с КЯ с учетом непараболичности энергетического спектра в КРТ. Данная модель описана нами в [1].

В данной работе проведен анализ влияния на спектры фотолюминесценции таких факторов, как температура, мощность накачки, длины волны излучения, а также типа гетероструктуры.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦА

В работе [2] рассматривалась структура с множественными квантовыми ямами, состоящая из 50 периодов $\text{Cd}_{0.27}\text{Hg}_{0.73}\text{Te}/\text{Cd}_{0.85}\text{Hg}_{0.15}\text{Te}$ с толщиной ям 4.5 нм. На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции при комнатной температуре и температуре 2 К. Здесь и далее в обозначениях оптических переходов используются следующие обозначения: c_1, c_2 — 1 и 2 уровни размерного квантования электронов, hh_1, hh_2 — 1 и 2 уровни размерного квантования тяжелых дырок, hl_1, hl_2 — 1 и 2 уровни размерного квантования легких дырок.

В спектре при 2 К наблюдалась одна полоса излучения на энергии ~ 3.7 мкм (~ 330 мэВ), которая связывается авторами с размерным квантованием в квантовой яме. Это обоснованное предположение, поскольку энергия ширины запрещенной зоны для материала КРТ с составом 0.27 составляет 177 мэВ и соответствует рабочей длине волны 7.02 мкм, а в эксперименте наблюдается линия излучения в области более высоких энергий.

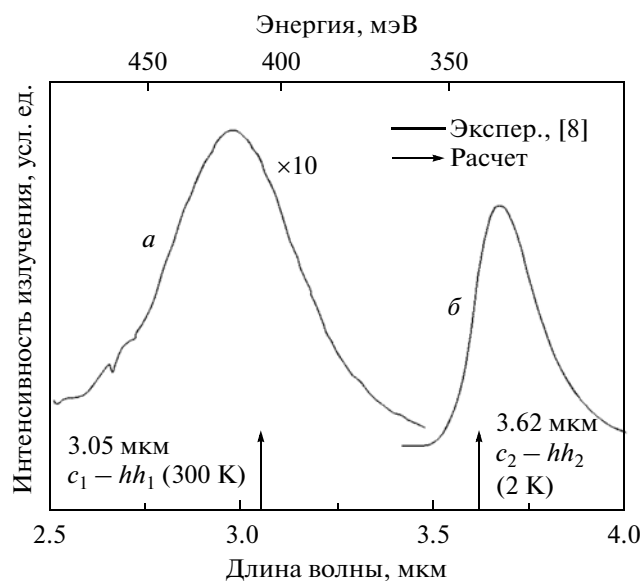


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции 50-периодной МКЯ-структуры $\text{Cd}_{0.27}\text{Hg}_{0.73}\text{Te}$ (4.5 нм)/ $\text{Cd}_{0.85}\text{Hg}_{0.15}\text{Te}$ при температурах 300 К (а) и 2 К (б). Кривые — экспериментальные данные [2], стрелки — расчет энергии переходов.

Полуширина наблюдаемого пика люминесценции составляет 18 мЭВ.

Согласно нашим расчетам, длина волны для перехода $c_1 \rightarrow hh_1$ составляет 3.62 мкм, что соответствует энергии 344 мЭВ. Остальные возможные переходы с учетом малой ширины КЯ дают значительно большие энергии оптических переходов.

Следует также отметить, что в данной работе авторам удалось получить люминесценцию даже при комнатной температуре, что свидетельствует о высоком качестве изготовленных гетероструктур. Центр линии излучения в данном случае находился на энергии ~2.9 мкм (~420 мЭВ), что исключает возможность того, что данная полоса соответствует излучению в барьерной области или буферном слое. Расчет при данной температуре дает значение длины волны 3.05 мкм (407 мЭВ) для перехода $c_1 \rightarrow hh_1$, что также хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В работе [3] приведены результаты экспериментальных исследований излучения структур с множественными КЯ $\text{Cd}_{0.45}\text{Hg}_{0.55}\text{Te}$ (2 нм)/ $\text{Cd}_{0.95}\text{Hg}_{0.05}\text{Te}$ (12 нм), состоящих из 10 периодов. Авторами были измерены спектры излучения и поглощения данных структур при различных температурах — от 5 К до комнатной (рис. 2). Согласно спектрам, приведенным на рисунке, увеличение температуры обуславливает сдвиг максимума полосы излучения $c_1 \rightarrow hl_1$ в область меньших энергий. Данный факт

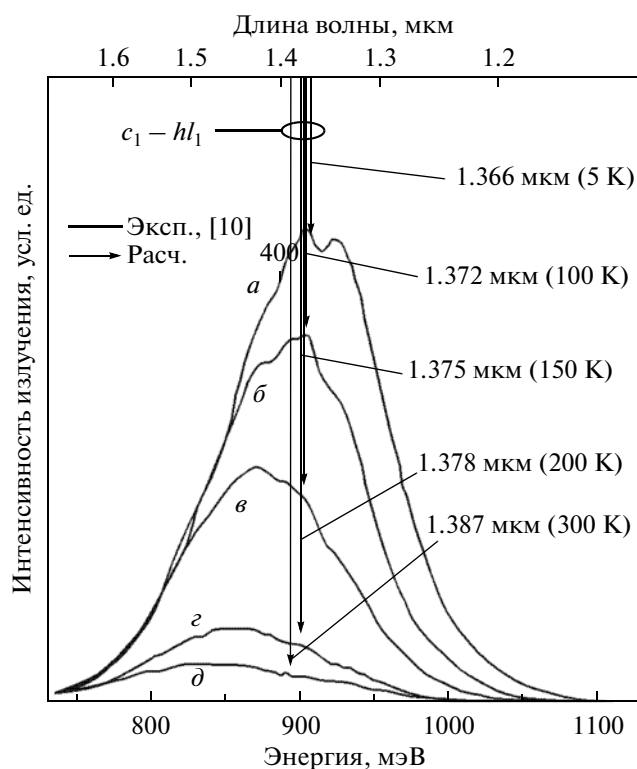


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции 10-периодной МКЯ-структуры $\text{Cd}_{0.45}\text{Hg}_{0.55}\text{Te}$ (2 нм)/ $\text{Cd}_{0.95}\text{Hg}_{0.05}\text{Te}$ (12 нм) при различных температурах. Кривые — экспериментальные данные [3], стрелки — расчет энергии переходов. Температура в эксперименте: а — 5 К, б — 100 К, в — 15 К, г — 200 К, д — 300 К.

подтверждается теоретическими оценками, однако расчет дает меньший сдвиг полосы при изменении температуры: 5 К — 1.366 мкм (908 мЭВ), 100 К — 1.382 мкм (904 мЭВ), 150 К — 1.375 мкм (902 мЭВ), 200 К — 1.378 мкм (900 мЭВ), 300 К — 1.387 мкм (894 мЭВ).

Работы [4–6], выполненные объединенной группой ученых из различных научных организаций Норвегии, посвящены исследованиям фотолюминесценции структуры с МКЯ, состоящей из четырех периодов $\text{Cd}_{0.36}\text{Hg}_{0.64}\text{Te}$ (яма)/ $\text{Cd}_{0.61}\text{Hg}_{0.39}\text{Te}$ (барьер). Структура была выращена методом МЛЭ на подложке CdZnTe (211)В с буферным слоем $\text{Cd}_{0.36}\text{Hg}_{0.64}\text{Te}$, толщиной 4 мкм. Ширина квантовых ям и барьеров составляла 9.2 и 29.7 нм соответственно.

В [4] для возбуждения фотолюминесценции использован лазер с длиной волны излучения $\lambda = 2.01$ мкм. В спектрах фотолюминесценции наблюдали две полосы излучения, отстоящие друг от друга на 70 мЭВ, при этом низкоэнергетический пик ассоциировался авторами с излучатель-

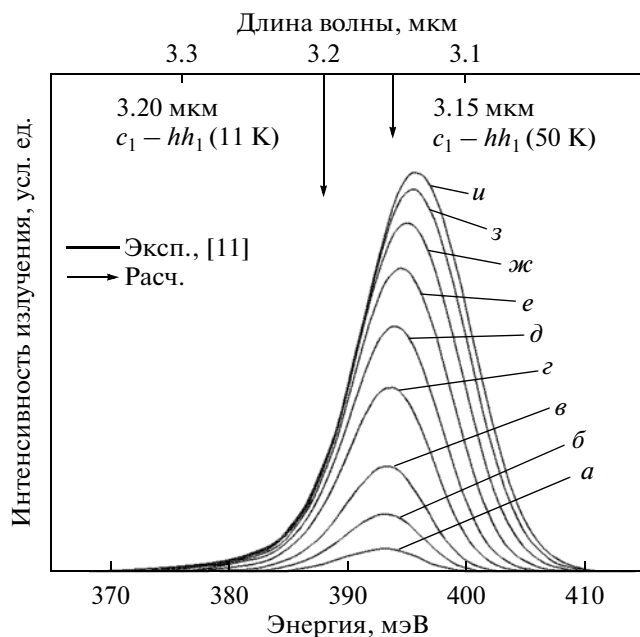


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции 4-периодной МКЯ-структуры $\text{Cd}_{0.36}\text{Hg}_{0.64}\text{Te}$ (9.2 нм)/ $\text{Cd}_{0.61}\text{Hg}_{0.39}\text{Te}$ (29.7 нм) при температуре 11 К. Кривые — экспериментальные данные [4], стрелки — расчет энергии переходов. Плотность мощности излучения накачки: $a - 1.3$, $b - 3.2$, $v - 5.2$, $z - 10.3$, $d - 13.7$, $e - 16.2$, $ж - 19.4$, $з - 22.4$, $u - 23.4$ Вт · см⁻².

ной рекомбинацией в буферном слое, а высокоэнергетический пик — с излучательной рекомбинацией в МКЯ-структуре (переход $c_1 \rightarrow hh_1$). Сдвиг пиков в коротковолновую область и их уширение с увеличением мощности накачки авторы объяснили разогревом образца излучением накачки.

Поскольку авторами работы не проводилось измерение фактической температуры при увеличении мощности накачки, мы провели оценку энергетического положения центра линии только для случая минимальной величины мощности накачки. Было получено, что в описанной структуре при температуре 11 К при энергии, близкой к наблюдаемой, осуществляется оптический переход в КЯ $c_1 \rightarrow hh_1$ на длине волны 3.20 мкм (388 мэВ). Тем не менее, имеет место незначительный сдвиг, который может быть связан с тем, что имеющееся излучение накачки все таки производит разогрев образца. Если ввести поправку на температуру, то необходимо разогреть образец приблизительно до 50 К, чтобы энергия перехода $c_1 \rightarrow hh_1$ имела значение 3.15 мкм (394 мэВ), наблюдаемое в эксперименте. Измеренные спектры фотолюминесценции при температуре 11 К, а также результаты проведенных расчетов представлены на рис. 3.

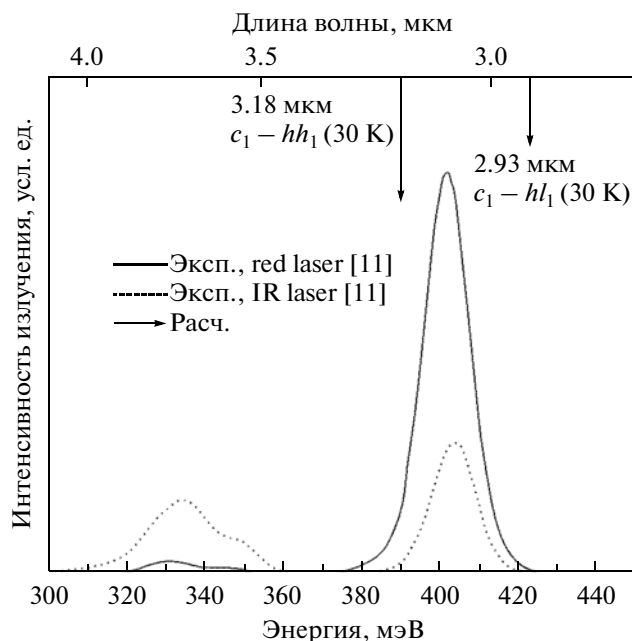


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции 4-периодной МКЯ-структуры $\text{Cd}_{0.36}\text{Hg}_{0.64}\text{Te}$ (9.2 нм)/ $\text{Cd}_{0.61}\text{Hg}_{0.39}\text{Te}$ (29.7 нм) при температуре 30 К при использовании различных лазеров накачки. Кривые — экспериментальные данные [5]: сплошная линия — “красный” лазер, пунктирная линия — ИК-лазер, стрелки — расчет энергии переходов

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Подобная же структура исследована в работе [5]. На рис. 4 видны оба пика люминесценции — от буферного слоя и от МКЯ-структуры, отстоящие друг от друга на 70 мэВ. В данном случае интерпретировать наблюдаемое излучение от КЯ, которым на графике является высокоэнергетический пик, сложнее, чем в предыдущем случае. Рассчитанная нами длина волны оптического перехода $c_1 \rightarrow hh_1$ при данных условиях имеет значение 3.18 мкм (390 мэВ), а перехода $c_1 \rightarrow hl_1 - 2.93$ мкм (423 мэВ). На наш взгляд, оба перехода могут обуславливать наблюдаемую полосу фотолюминесценции.

Для накачки авторы использовали два различных лазера накачки: ИК- и “красный” лазер. Изменение наблюдаемой картины фотолюминесценции при замене лазера накачки авторы работы объясняют следующим образом. При использовании для накачки ИК-лазера, кванты его излучения слабо поглощаются барьерными слоями, имеющими состав 0.61 мол. дол. и соответственно более широкую запрещенную зону, чем слои КЯ. В результате засветки структуры сверху часть излучения проходит сквозь область с МКЯ и поглоща-

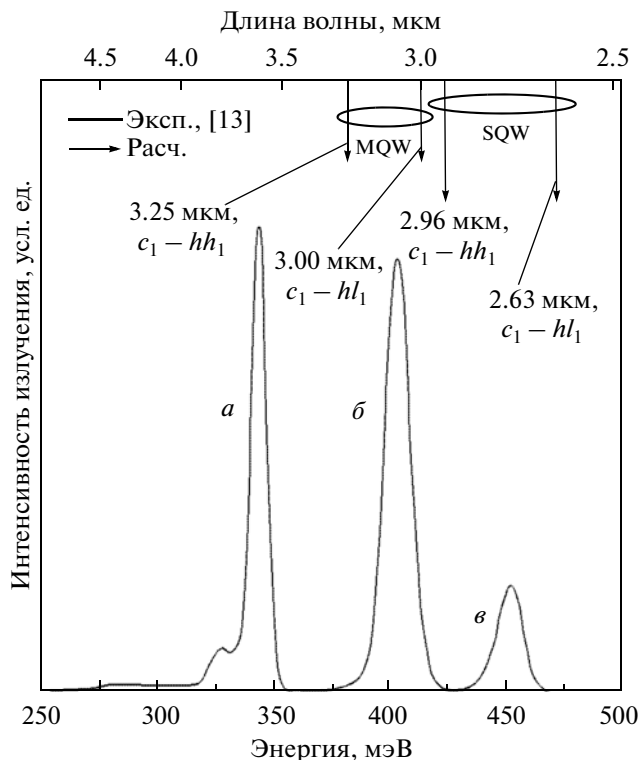


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции 4-периодной МКЯ-структуры $\text{Cd}_{0.36}\text{Hg}_{0.64}\text{Te}$ (10 нм)/ $\text{Cd}_{0.61}\text{Hg}_{0.39}\text{Te}$ (30 нм) с ОКЯ (6 нм) при температуре 10 К. Кривые – экспериментальные данные [6], стрелки – расчет энергии переходов. Пики ФЛ: *a* – буферный слой, *б* – МКЯ (MQW), *в* – ОКЯ (SQW).

ется в буферном слое с составом 0.39, имеющим большую толщину и, следовательно, высокую способность к поглощению. Излучение “красного” лазера, имеющего большую энергию кванта, чем ИК-лазер, поглощается в барьерных слоях, генерируя в них электронно-дырочные пары, которые в результате рассеяния “спускаются” в квантовые ямы и дают вклад в излучательную рекомбинацию. Результатом этого становится увеличение интенсивности полосы излучения, связанной с рекомбинацией в квантовых ямах.

ВЛИЯНИЕ ТИПА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Этой же группой авторов в работе [6] представлены результаты исследования фотолюминесценции структуры МКЯ, состоящей из четырех периодов $\text{Cd}_{0.36}\text{Hg}_{0.64}\text{Te}/\text{Cd}_{0.61}\text{Hg}_{0.39}\text{Te}$ с толщиной ям и барьеров 10 и 30 нм соответственно, отличающейся от уже рассмотренных тем, что на ее поверхности была выращена дополнительно одиночная КЯ толщиной 6 нм с такими же составами ямы и барьеров. Структура также выращена мето-

дом МЛЭ на подложке CdZnTe (211)В с буферным слоем $\text{Cd}_{0.36}\text{Hg}_{0.64}\text{Te}$, толщиной 3 мкм.

Спектры фотолюминесценции данной структуры при температуре 10 К показаны на рис. 5. Различия в наблюдаемых спектрах связываются авторами с размерным квантованием в ОКЯ. Действительно, в спектре наблюдается три полосы излучения, две из которых наблюдались в предыдущих экспериментах [4, 5]. При этом следует отметить смещение полосы излучения одиночной КЯ (2.76 мкм – 450 мэВ) приблизительно на 50 мэВ в область высоких энергий относительно полосы МКЯ (3.10 мкм – 400 мэВ). Это смещение можно связать с различием в толщине квантовых ям. Одиночная КЯ имеет меньшую ширину и, следовательно, большее расстояние между уровнями размерного квантования. Судя по тому, что все наблюдаемые на рис. 5 линии излучения получены от слоев КРТ одинакового состава, можно сделать вывод о том, что полосы излучения из квантовых ям вызваны межзонными переходами носителей заряда в ямах.

Оценка энергий оптических переходов в ямах в данном случае также не дает однозначного ответа на вопрос, какой тип перехода ответствен за наблюдаемые пики фотолюминесценции. Для обеих ям, согласно нашим оценкам, могут проявляться следующие переходы: для МКЯ 10 нм – $c_1 \rightarrow hh_1$ (3.25 мкм – 382 мэВ) и $c_1 \rightarrow hl_1$ (3.00 мкм – 413 мэВ); для ОКЯ 6 нм – $c_1 \rightarrow hh_1$ (2.96 мкм – 424 мэВ) и $c_1 \rightarrow hl_1$ (2.63 мкм – 471 мэВ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в данной статье анализ работ по фотолюминесценции структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с множественными квантовыми ямами показал, что эксперименты по получению излучения при оптической накачке проводятся преимущественно в структурах с МКЯ, у которых толщина квантовых ям превышает толщину барьерных слоев, что при определенных условиях позволяет отнести данные структуры к сверхрешеточным. Вероятно, именно эффекты, свойственные сверхрешеткам, такие как туннелирование носителей между ямами, оказывали влияние на сравнение расчетных и экспериментальных данных, приводя в отдельных случаях к их несоответствию.

Во всех рассмотренных нами работах в экспериментальных спектрах излучения при оптической накачке наблюдали только одну полосу, связанную с различными типами переходов. При этом излучение наблюдалось при различных температурах – от 4 до 300 К. Авторами многих работ также

отмечается важность процессов оже-рекомбинации, которые в случае квантовых ям отличаются от таких процессов в объемном материале. Также следует указать, что во всех рассмотренных работах наблюдались только межзонные излучательные переходы. Сравнение экспериментальных данных, описанных в данной работе, с результатами проведенных расчетов подтверждает, что представленная физико-математическая модель обеспечивает хорошее согласование теории и эксперимента и может быть использована для моделирования оптических свойств структур КРТ с квантовыми ямами.

Работа выполнена в рамках Программы повышения международной конкурентоспособности ТГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войцеховский А.В., Горн Д.И., Ижнин И.И. и др. // Изв. вузов. Физика. 2012. № 8. С. 50.
2. Feldman R.D., Cesar C.L., Islam M.N. et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. V. 7(2). P. 431.
3. Monterrat E., Ulmer L., Magnea N. et al. // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. P. S261.
4. Tonheim C.R., Selvig E., Nicolas S. et al. // J. Physics: Conf. Ser. 2008. V. 100. 042024.
5. Breivik M., Selvig E., Tonheim C.R. et al. // J. Physics: Conf. Ser. 2008. V. 100. 042041.
6. Haakenaasen R., Selvig E., Tonheim C.R. et al. // J. Electron. Mater. 2010. DOI: 10.1077/s11664-010-1211-7. 10 p.