

ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$

Амброс В. П., Бурдиян И. И., Георгицэ Е. И.,
Постолаки И. Т., Погорлецкий В. М.

Исследованы фотолюминесцентные свойства полупроводниковых твердых растворов четверных систем $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($0.75 \leq x \leq 1$), $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($0.80 \leq x \leq 1$) в области температур $2 \div 77$ К и магнитных полей до 6 Т. Концентрация носителей исследуемых сплавов при 77 К изменялась в пределах $3 \cdot 10^{16} \div 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Показано, что во всем температурном интервале при равных составах спектры фотолюминесценции как в магнитном поле, так и в отсутствие его имеют однополосную асимметричную структуру. Исследованы температурное смещение спектров, влияние магнитного поля и уровня накачки на излучательные переходы.

Вычислены параметры энергетического спектра сплавов $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ и их зависимости от состава, температуры и магнитного поля.

Приведенные исследования подтверждают перспективность новых полупроводниковых материалов $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ и $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$.

Материалы твердых растворов четверных систем $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ по особенностям энергетического спектра являются аналогами $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Твердые растворы $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ позволяют получить целое семейство новых полупроводниковых материалов, ширина запрещенной зоны которых изменяется в достаточно широких пределах — от бесщелевого состояния для теллурида ртути до 1.6 эВ для антимонида алюминия. Первые сведения о получении твердых растворов в системах $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ приведены в работах [1, 2]. Информация об исследовании электрофизических свойств этих материалов в литературе практически отсутствует.

В данной работе приведены результаты исследования излучательной рекомбинации в $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ и $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, на основе которых оценены параметры энергетического спектра твердых растворов. Фотолюминесцентные свойства измерены по стандартной модуляционной методике в интервале температур $2 \div 77$ К в магнитных полях до 6 Т. Возбуждение неравновесных носителей осуществлялось твердотельным лазером. Спектр излучения анализировался оптической системой на основе решеточного монохроматора типа МДР-2. Образцы различных составов $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($0.75 \leq x \leq 1$) и $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($0.8 \leq x \leq 1$) получены методом интенсивной технологии [1]. Технология включает в себя непосредственный синтез в сочетании с внешними механическими вибрациями и последующим зонным выравниванием. Гомогенизация осуществлялась в условиях, когда по слитку через границу расплава проходил электрический ток. Разработанная технология позволила расширить область растворения по сравнению с приведенной в работах [1, 2]. Образование твердых растворов в системах $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ в указанных областях растворения подтверждено рентгеноструктурным анализом.

Гальваномагнитные измерения проведены в интервале температур $77 \div 300$ К. Резкого изменения концентрации и подвижности носителей при переходе от комнатной температуры к азотной не наблюдалось. Концентрация носителей варада для исследованных составов при 77 К изменялась в пределах $3 \cdot 10^{16} \div$

$4 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Непосредственно перед измерением фотолюминесценции образцы травились в свежеприготовленном полирующем травителе состава $1\text{HF} + 9\text{HNO}_3$.

На рис. 1, а, б показаны спектры излучательной рекомбинации твердых растворов $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ (а) для четырех составов при 4.2 К в отсутствие магнитного поля при неполяризованном возбуждении и для двух составов $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ (б). Из представленных данных видно, что в отсутствие магнитного поля спектры фотолюминесценции имеют однополосную структуру. Все спектры асимметричны, с максимумами, смещенными к длинноволновому краю, и медленным спаданием интенсивности фотолюминесценции в коротковолновую сторону. Полуширина полосы излучения изменяется в пределах $30 \div 80$ мэВ с изменением содержания теллурида ртути в растворе. С увеличением содержания теллурида ртути в расплаве как для $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, так и для $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ полоса краевой фотолюминесценции смещается в область

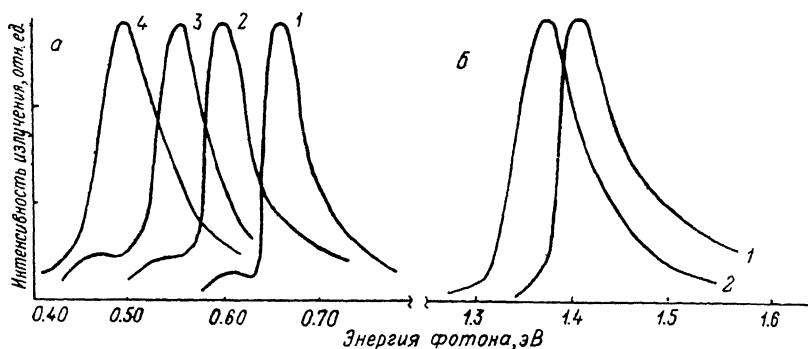


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ (а) и $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ (б) при 4.2 К в отсутствие магнитного поля.

x (n_{77} , см⁻³) для спектров: а) 1 — 0.90 ($6.0 \cdot 10^{16}$), 2 — 0.85 ($2.0 \cdot 10^{17}$), 3 — 0.80 ($3.2 \cdot 10^{17}$), 4 — 0.75 ($6.2 \cdot 10^{17}$); б) 1 — 0.90 ($5.0 \cdot 10^{17}$), 2 — 0.80 ($5.8 \cdot 10^{18}$).

меньших энергий, изменяется ее форма, растет асимметрия, соответственно уменьшается интенсивность излучения. Например, согласно данным, приведенным на рис. 1, увеличение состава теллурида ртути в расплавах до 20 % в $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ приводит к уменьшению интенсивности фотолюминесценции в 100 раз. Зависимость интенсивности излучения от уровня возбуждения имеет для всех исследованных составов линейную форму во всем температурном интервале.

Спектры фотолюминесценции полупроводниковых твердых растворов $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ и $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ измерены при температурах 2, 4.2 и 77 К. С понижением температуры для всех исследованных составов растет интенсивность излучения. Например, при 77 К интенсивность рекомбинации примерно на 3 порядка меньше, чем при 2 К, для одного и того же состава. Общий вид спектра фотолюминесценции с понижением температуры в отсутствие магнитного поля практически сохраняется. Эксперименты подтверждают характер краевой фотолюминесценции. Для составов, обогащенных антимонидом галлия в $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($0.75 \leq x \leq 1$) или антимонидом алюминия в $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($0.80 \leq x \leq 1$), наблюдается смещение полосы краевой фотолюминесценции в область больших энергий.

Температурное смещение характерно для исходных бинарных соединений — антимонида галлия и антимонида алюминия.

Используя методику, описанную в работе [3], для легированного антимонида галлия определили энергетическое положение краевой люминесценции и ее смещение с составом и температурой. Из данных по температурному смещению краевой люминесценции определили температурный коэффициент изменения полосы излучения и его зависимость от состава. Температурный коэффициент смещения краевой фотолюминесценции для сплавов $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ изменяется в пределах $2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, а для материалов системы $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$

принимает значения $1.8 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-4}$ эВ/К в зависимости от состава расплава. Полученные данные по температурному коэффициенту смещения основной полосы фотолюминесценции рассматриваемого расплава имеют промежуточные значения между соответствующими температурными коэффициентами изменения ширины запрещенной зоны для каждой пары раствора — антимонида галлия—теллурида ртути, антимонида алюминия—теллурида ртути. Эксперименты подтверждают практически линейный характер зависимости температурного коэффициента смещения основной полосы фотолюминесценции от состава.

Как для $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, так и для $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ получены нелинейные зависимости положения полосы краевой люминесценции от состава. Экспери-

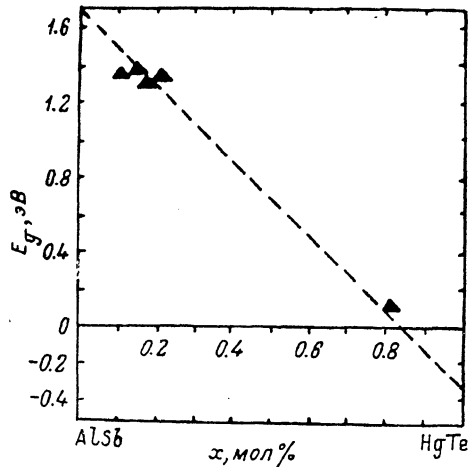


Рис. 2. Энергетическое смещение основной полосы фотолюминесценции с составом при 4.2 К для системы $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$.

Точки — эксперимент, пунктировая линия — экстраполяция относительно температурного коэффициента ширины запрещенной зоны бинарных соединений.

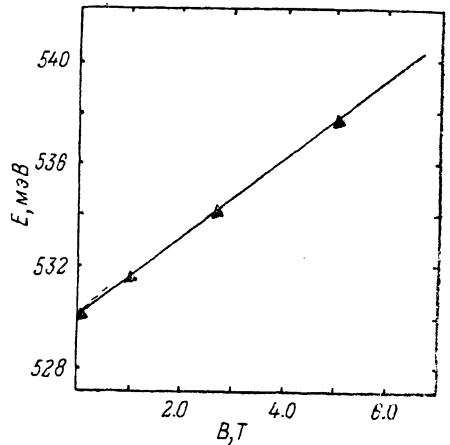


Рис. 3. Смещение основного максимума излучательной рекомбинации в магнитном поле при 4.2 К для сплава $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($x=0.80$).

ментальные данные по энергетическому смещению краевой фотолюминесценции с увеличением содержания теллурида ртути в растворе $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ представлены на рис. 2. Впервые на отклонение от линейного характера зависимости ширины запрещенной зоны от состава в $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ и $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, по данным оптического поглощения, указано в работе [4]. Значение E_g состава 0.2, представленного на рис. 2 для $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, получено из оптических измерений. Наблюдаемое отклонение зависимости ширины запрещенной зоны от линейного характера в области небольших концентраций теллурида ртути обусловлено образованием примесных зон, примыкающих к основным зонам. Это говорит о том, что в области содержания теллурида ртути до 2% в основной матрице GaSb или AlSb исследуемые материалы представляют собой не что иное, как примесные, сильно легированные, разбавленные растворы.

При температуре 4.2 К для всех исследованных составов $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ измерены спектры фотолюминесценции в магнитном поле в геометрии Фарадея. Индукция магнитного поля изменялась в пределах до 6 Т. Экспериментально обнаружены следующие особенности спектра фотолюминесценции в магнитном поле: линейное смещение основной полосы люминесценции в область больших энергий и небольшое увеличение интенсивности излучения с увеличением индукции магнитного поля. В магнитном поле наблюдается уменьшение полуширины краевой фотолюминесценции при данной температуре. Сказанное подтверждается результатами, представленными на рис. 3. На рис. 3 приведены данные смещения основной полосы в магнитном поле для $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($x=0.80$) при 4.2 К. Точки — экспериментальные результаты. По энергетическому смещению линии краевой фотолюминесценции в магнитном поле оценили эффективную массу электронов на дне зоны проводимости. Для состава $x=0.80$

($E_g=0.530$ эВ) получили $m_e=0.032 m_0$, где m_e — эффективная масса электрона в зоне проводимости, m_0 — масса свободного электрона. Общеизвестно, что эффективная масса электрона связана с параметрами Кейна соотношением, взятым из работы [5],

$$m_e = \left[1 + \frac{E_p}{3} \left(\frac{2}{E_g} + \frac{1}{E_g + \Delta} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны, m_e — эффективная масса электрона, E_p — матричный элемент взаимодействия, Δ — энергия спин-орбитального взаимодействия. Согласно с экспериментальными данными получается, если принять в выражении (1) $E_p=20$ эВ, $\Delta=0.80$ эВ. Подобранные значения для E_p и Δ в случае состава $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ ($x=0.80$) согласуются с параметрами энергетического спектра исходных бинарных соединений — антимонида галлия и теллурида ртути [5].

Результаты исследований зависимости интенсивности фотолюминесценции от температуры и уровня возбуждения, а также линейное смещение полосы излучения в магнитном поле свидетельствуют о том, что наблюдаемые излучательные переходы в четверных сплавах $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ и $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ имеют сложную интерпретацию.

Впервые полученные в данной работе результаты подтверждают перспективность четверных систем $(\text{GaSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$, $(\text{AlSb})_x(\text{HgTe})_{1-x}$ и позволяют считать, что при совершенствовании технологии можно получить новые полупроводниковые материалы с высокими значениями подвижности, квантового выхода и создать на их основе приборные структуры.

Авторы выражают благодарность В. И. Иванову-Омскому за постоянное внимание к работе.

Список литературы

- [1] Амброс В. П., Бурдиян И. И. // Уч. зап. Тираспольск. пед. инст. Физ.-мат. науки. 1970. № 21. Ч. I. С. 31—39.
- [2] Бурдиян И. И., Георгицэ Е. И. // Уч. зап. Тираспольск. пед. инст. Физ.-мат. науки. 1970. № 21. Ч. I. С. 3—5.
- [3] Тетков А. Н., Чайкина Е. В., Комова Э. М., Ермакова Н. Г. // Тр. XXVII совещ. по люминесценции. Рига, 1980. С. 211.
- [4] Бурдиян И. И., Георгицэ Е. И., Миронов И. Ф. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 7. С. 1402—1403.
- [5] Гельмонт Б. Л., Зегря Г. Г. // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1989. № 1331.

Тираспольский
государственный педагогический институт
им. Т. Г. Шевченко

Получена 21.12.1989
Принята к печати 30.03.1990