

ФОТОЛУМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ И СТРУКТУР НА ОСНОВЕ $Pb_{1-x}Sn_xTe$

М.В.Валейко, И.И.Засавицкий, А.В.Матвеевко, Б.Н.Мацонашвили

Обнаружен квантово-размерный эффект в спектрах фотолюминесценции тонких слоев и многослойных гетероструктур (МГС) на основе $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Спектр, состоящий из большого числа линий, сдвинут в сторону больших энергий из-за упругих деформаций в образцах.

Первые сверхрешетки на основе $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($0 \leq x \leq 0,2$) были получены методом лазерного напыления¹ и методом "горячей стенки"^{2,3}, и на них изучались спектры пропускания и магнитосопротивление. Лазер на основе квантово-размерных слоев $PbTe$ был создан методом молекулярно-лучевой эпитаксии⁴.

В настоящей работе впервые наблюдалась фотолюминесценция (ФЛ) квантово-размерных эпитаксиальных слоев p - $PbTe$ и МГС типа p - $PbTe/p$ - $Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te$, выращенных на подложках (111) BaF_2 . Тонкие (200 ... 3000 Å) слои $PbTe$ приготавливались электролитическим травлением толстых ($L \cong 2$ мкм) слоев или выращивались методом "горячей стенки". МГС выращивали методом мгновенного испарения в вакууме. Они состояли из буферного слоя $PbTe$ толщиной 0,15 ... 0,3 мкм и имели 5 или 20 пар чередующихся слоев $PbTe$ и $Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te$ одинаковой толщины (~ 400 Å). Возбуждение производилось АИГ-лазером.

Фотолюминесценция наблюдалась как в тонких слоях, так и в МГС при относительно больших уровнях возбуждения ($\geq 10^5$ Вт/см²), при этом излучение было вынужденным. Его интенсивность была по порядку величины сравнима с интенсивностью ФЛ толстых пленок $PbTe$ и $Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te$ при тех же уровнях возбуждения. В спектрах ФЛ как тонких слоев (рис. 1), так и МГС (рис. 2) обнаружены большие (до 20 мэВ) сдвиги длинноволнового края излучения в сторону больших энергий. С ростом уровня возбуждения ширина спектров увеличивается, достигая 60 мэВ. При этом в спектрах наблюдается тонкая структура в виде отдельных линий.

Большие сдвиги в спектрах ФЛ объясняются наличием упругих деформаций в образцах такого типа. Квантование спектра также приводит к увеличению ширины запрещенной зоны E_g , но эти сдвиги гораздо меньше (1 ... 8 мэВ). Деформации возникают по двум причинам: из-за различия постоянных решетки (Δa) и коэффициентов линейного термического расширения (α) для BaF_2 , $PbTe$ и $Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te$. Большое ($\Delta a/a \sim 4\%$) рассогласование постоянных решетки $PbTe$ и BaF_2 устраняется в процессе роста в основном за счет образования дислокаций несоответствия на границе раздела тонкий слой – подложка. В случае МГС дислокации несоответствия остаются, в основном, в буферном слое. При этом небольшое ($\Delta a/a \sim 0,23\%$) рассогласование постоянных решетки в соседних полупроводниковых слоях устраняется за счет упругого растяжения слоев $Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te$ и упругого сжатия слоев $PbTe$.

Поскольку $\alpha(BaF_2) < \alpha(PbTe)$, то при охлаждении образцов до низких температур тонкие слои $PbTe$ на BaF_2 оказываются растянутыми. В МГС исходное сжатие в слоях $PbTe$ компенсируется растяжением при охлаждении, а в слоях $Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te$ растяжение становится еще больше. Действительно, дифрактометрические измерения в сверхрешетках при низкой температуре (25 К) показали³, что слои $PbTe$ являются практически ненапряженными, а слои $PbSnTe$ – растянутыми. Таким образом, при низкой температуре тонкие слои $PbTe$ на BaF_2 и слои $Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te$ в МГС оказываются растянутыми в плоскости слоев.

Такое растяжение эквивалентно одноосной деформации в направлении $[111]$. Одноосная деформация снимает междолинное вырождение, и четыре эквивалентные L -долины расщеп-

ляются (рис. 3) на основную долину [111] и три наклонные долины $[\bar{1}11]$, $[1\bar{1}1]$ и $[11\bar{1}]$. Используя величину сдвигов в спектрах ФЛ и деформационные потенциалы³, мы получили деформацию $\epsilon_{xx} = 3,4 \cdot 10^{-2}$ для тонкого слоя PbTe/VaF₂ и $\epsilon_{xx} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ для слоя Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te в МГС. В последнем случае напряжение частично снимается за счет буферного слоя. В тонком слое PbTe/VaF₂ значение E_g увеличивается с 189 до 245 мэВ в основной долине и до 211 мэВ в наклонных долинах. Значение E_g для слоя Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te в МГС увеличивается с 128 до 137 мэВ в основной долине и до 132 мэВ в наклонных долинах.

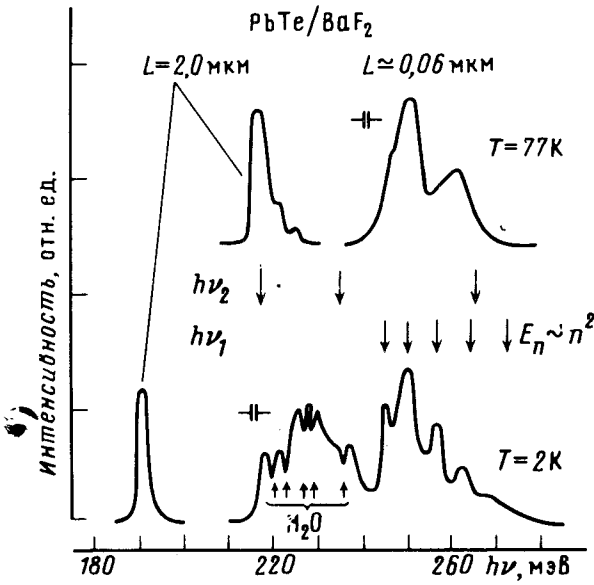


Рис. 1

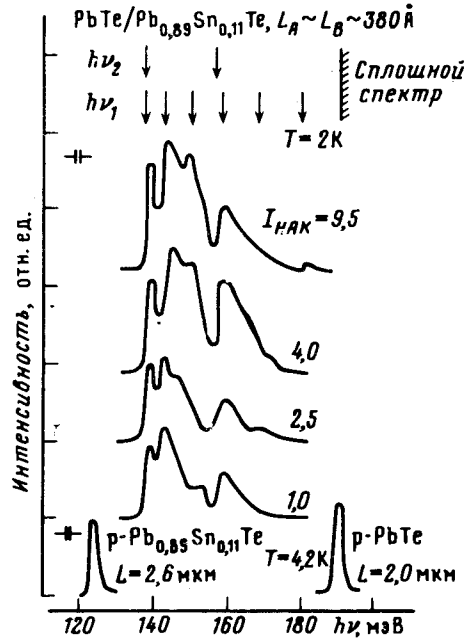


Рис. 2

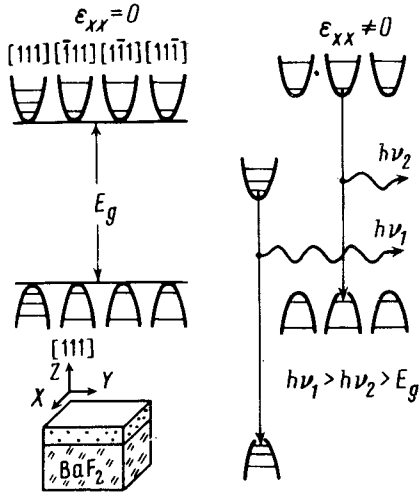


Рис. 3

Рис. 1. Спектры ФЛ тонкого ($L \approx 600 \text{ \AA}$) слоя PbTe/VaF₂ при 2 и 77 К. Слева для сравнения показаны спектры ФЛ толстого ($L = 2 \text{ мкм}$) слоя при тех же температурах. Стрелками показаны линии поглощения H₂O

Рис. 2. Спектры ФЛ многослойной гетероструктуры PbTe/Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te при 2 К в зависимости от уровня возбуждения, L_A, L_B – толщины слоев. Внизу для сравнения приведены спектры ФЛ толстых ($L \geq 2 \text{ мкм}$) слоев PbTe и Pb_{0,89}Sn_{0,11}Te при 4,2 К

Рис. 3. Влияние одноосной деформации на энергетический спектр Pb_{1-x}Sn_xTe ($0 \leq x \leq 0,2$). На вставке показана геометрия образца

Из-за малой толщины слоев рассматриваемые образцы являются квантово-размерными объектами. Тонкий слой PbTe/VaF₂ может служить хорошей моделью прямоугольной потенциальной ямы с бесконечными стенками. МГС из-за достаточно большой толщины барьеров ($\sim 400 \text{ \AA}$) представляют собой набор изолированных потенциальных ям. В приближении эффективной массы положение уровней энергии в квантовых ямах относительно экстремума зоны есть $E_n = \hbar^2 k_z^2 / 2m^*$, где волновой вектор в направлении квантования k_z

может принимать только дискретные значения $n\pi/L$ (n — номер уровня). Так как эффективная масса в направлении квантования $[111]$ в основной долине больше, чем в наклонных, то в каждой потенциальной яме имеется два набора уровней энергии с разным расстоянием между уровнями в каждом наборе. Таким образом получается две группы возможных оптических переходов, сдвинутых друг относительно друга из-за одноосной деформации. Действительно, в спектре ФЛ тонкого слоя PbTe/BaF_2 (рис. 1, $T = 2$ К) присутствуют две группы линий, причем правая группа хорошо удовлетворяет зависимости $E_n \sim n^2$ для правил отбора $\Delta n = 0$. Энергетическое положение линий ФЛ согласуется с результатами расчета, проведенного в рамках двухзонной модели.

При определении энергии оптических переходов в МГС необходимо учитывать конечную высоту барьеров, которая кроме того меняется при наложении деформаций. Для расчета высоты барьеров использовалась энергетическая диаграмма $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, приведенная в ³. Так же, как и в тонких слоях PbTe/BaF_2 , получается два набора оптических переходов, которые ввиду меньшей деформации слоев перекрываются сильнее. Результаты расчетов также удовлетворительно согласуются с положением линий ФЛ в спектрах (рис. 2).

Энергетическое положение линий ФЛ и близкие интенсивности излучения из основной и из наклонных долин свидетельствуют о том, что горячие ($h\nu_{\text{лазера}} \gg E_g$) неравновесные носители тока релаксируют как в основную, так и в наклонные долины. Поскольку ФЛ является вынужденной, с характерным временем $\tau \sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$ с, то носители не успевают перераспределиться за счет междолинного рассеяния, и не устанавливается единого квазиуровня Ферми в основных и наклонных долинах. Поэтому в спектрах ФЛ наблюдаются две группы оптических переходов.

Интегральная интенсивность ФЛ МГС сравнима с интенсивностью ФЛ толстых пленок PbTe и $\text{Pb}_{0,89}\text{Sn}_{0,11}\text{Te}$ при одинаковых уровнях возбуждения. Это свидетельствует в пользу контрвариантной диаграммы гетероперехода $\text{PbTe}/\text{PbSnTe}$, предложенной в работах ^{3, 5} и противоречит данным ⁶ о зависимости от состава в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ положения термов L_6^+ и L_6^- , образующих запрещенную зону.

Таким образом, в настоящей работе впервые наблюдалась фотолюминесценция квантово-размерных тонких слоев PbTe и МГС типа $\text{PbTe}/\text{Pb}_{0,89}\text{Sn}_{0,11}\text{Te}$. Наличие достаточно интенсивной ФЛ гетероструктур свидетельствует в пользу контрвариантной диаграммы гетероперехода $\text{PbTe}/\text{Pb}_{0,89}\text{Sn}_{0,11}\text{Te}$. Тонкие слои PbTe и МГС, выращенные на подложках BaF_2 , являются напряженными, что приводит к значительному сдвигу спектров ФЛ в сторону больших энергий.

Литература

1. Гапонов С.В., Лускин Б.И., Салащенко Н.Н. ФТП, 1980, 14, 1468.
2. Kinoshita H., Fujiyasu H. J. Appl. Phys., 1980, 51, 5845.
3. Kriechbaum M., Ambrosch K.E., Fantner E.J., Clemens H., Bauer G. Phys. Rev. B., 1984, 30, 3394.
4. Partin D.L. Appl. Phys. Lett., 1984, 45, 487.
5. Pascher H., Bauer G., Clemens H. Sol. St. Comm., 1985, 55, 765.
6. Ishida A., Aoki M., Fujiyasu H. J. Appl. Phys., 1985, 58, 1901.