

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ В СЛОИСТОМ СУЛЬФИДЕ ГАЛЛИЯ

Е.Т.Алиев, В.С.Багаев, Г.Л.Беленький,
М.О.Годжаев, Э.Ю.Салаев

При температуре $T = 5$ К и плотностях возбуждения $\geq 0,2$ МВт · см⁻² в спектрах люминесценции GaS обнаружена линия эмиссии, обусловленная излучательной рекомбинацией e - h пар в электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ). Оценены параметры ЭДЖ в GaS: критическая температура $T_K \sim 130$ К, равновесная плотность $n_0 \sim 2,3 \cdot 10^{20}$ см⁻³, энергия связи ЭДЖ $E_{ж} \sim 117$ мэВ.

При высоких плотностях оптического возбуждения в Ge, Si и некоторых других полупроводниках в результате коллективного взаимодействия экситонов образуется новая фаза — электронно-дырочная жидкость¹. Критическая температура существования ЭДЖ обычно низка, в Si $T_K \sim 21$ К, Ge — $T_K \sim 8$ К, GaAs — $T_K \sim 5$ К, CdS — $T_K \sim 50$ К. Возможность образования высокотемпературной ЭДЖ наиболее вероятна в полупроводниках с большой энергией связи экситона, большим числом эквивалентных долин и сильной анизотропией электронного спектра. Такая ситуация может быть реализована в сильноанизотропных (двумерных) кристаллах, а также в кристаллах, обладающих большими электронными m_e^{\parallel} и дырочными m_h^{\perp} массами, малыми диэлектрическими проницаемостями ϵ_0 .

В этом смысле слоистые кристаллы являются удачным объектом для образования высокотемпературной ЭДЖ. Среди слоистых полупроводников группы A_3B_6 (InSe, GaSe, GaS) сульфид галлия выделяется тем, что является ярко выраженным непрямозонным полупроводником. В InSe и GaSe ширина прямой и непрямоугольной щели близки (их разность порядка десяти мэВ), что требует анализа специфических условий формирования ЭДЖ. Максимум валентной зоны в GaS лежит в точке Γ гексагональной зоны Бриллюэна, абсолютный минимум зоны проводимости расположен в точке M , что на 500 мэВ ниже минимума зоны проводимости в точке Γ ². В^{2,3} на основе анализа спектров дифференциального поглощения и фотолюминесценции, получены прямые доказательства существования в GaS не прямых экситонов, определено положение экситонной зоны $E_{экс} = 2594 \pm 2$ мэВ.

В настоящей работе исследовались монокристаллы GaS, выращенные методом Бриджмена. Кристаллы находились в парах жидкого гелия. Для возбуждения люминесценции GaS использовался азотный лазер (3371 Å) мощностью 100 кВт, длительностью импульса ~ 10 нс, частотой повторения 30 Гц. Запись спектров осуществлялась с помощью стробоскопической системы фотоэлектрической регистрации излучения и спектрометра ДФС-12 с дисперсией $5 \text{ \AA} \cdot \text{мм}^{-1}$. На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) сульфида галлия, зарегистрированные при различных плотностях оптического возбуждения. С увеличением уровня возбуждения в длинноволновой области спектра ФЛ появляется новая широкая полоса (K -линия с $h\nu_{\text{макс}} = 2,495$ эВ). Форма K -линии и положение максимума не зависят от уровня возбуждения. С момента возникновения этой линии интенсивность линии излучения свободных экситонов насыщается. Интенсивность K -линии, ее ширина обладают характерными температурными зависимостями (рис. 2). С ростом температуры наблюдается заметный сдвиг длинноволновой границы K -линии в коротковолновую область. Коротковолновые линии в спектре люминесценции GaS испытывают значительный длинноволновый сдвиг с ростом температуры, в то время как энергетическое положение максимума K -линии сдвигается в область высоких энергий, K -линия исчезает с температурой пороговым образом при $T_K \sim 130$ К. При более высоких температурах в спектре ФЛ остается одна широкая полоса излучения (L -линия), максимум которой сдвигается с температурой согласно изменению ширины запрещенной зоны.

Особенности поведения спектра излучения сульфида галлия: пороговое по плотности образование K -линии, ее исчезновение при $T_K \sim 130$ К, уменьшение ширины линии с ростом

температуры за счет фиолетового сдвига ее длинноволнового края, смещение максимума K -линии в коротковолновую область при увеличении температуры позволяют сделать вывод о том, что длинноволновая линия в спектре излучения GaS является результатом излучательной рекомбинации $e-h$ пар в ЭДЖ, образованной в системе непрямых экситонов.

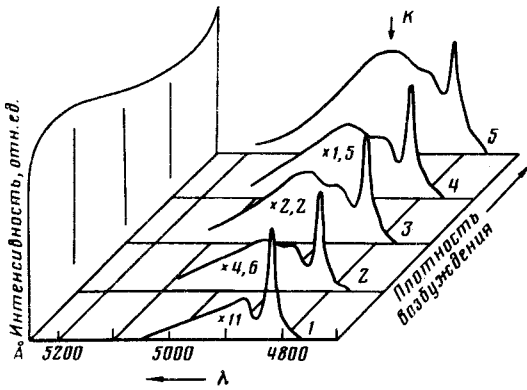


Рис. 1. Зависимость спектров люминесценции сульфида галлия от уровня возбуждения: 1 - $0,04I_0$; 2 - $0,07I_0$; 3 - $0,25I_0$; 4 - $0,5I_0$; 5 - I_0 . $I_0 \sim 3 \text{ Мвт} \cdot \text{см}^{-2}$

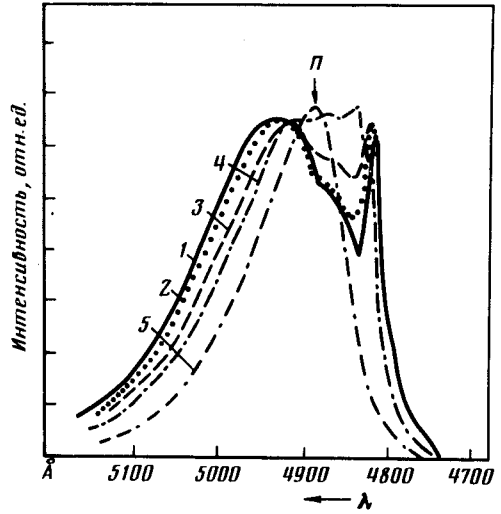


Рис. 2

Рис. 2. Температурная зависимость спектров люминесценции сульфида галлия. $I_0 \sim 3 \text{ Мвт} \cdot \text{см}^{-2}$. 1 - $T = 5 \text{ К}$, 2 - $T = 50 \text{ К}$, 3 - $T = 70 \text{ К}$, 4 - $T = 100 \text{ К}$, 5 - $T = 140 \text{ К}$

Учитывая многодолинность GaS ($\nu_e = 3$), можно оценить энергию связи ЭДЖ, рассчитав полную энергию $e-h$ пар ⁴:

$$E_{\Pi}^{e-h} = 0,3(3\pi^2 n \hbar^3)^{2/3} \left(\frac{1}{m_e^* v^{2/3}} + \frac{1}{m_h^*} \right) - \frac{4,8316 + 5,0879 r_s}{0,0152 + 3,0426 r_s + r_s^2} R,$$

где $m_{e,h}^*$ - эффективные массы плотности состояний для электронов и дырок, соответственно, R - постоянная Ридберга для экситона, $r_s = \left(\frac{3}{4\pi n} \right)^{1/3} \frac{\mu e^2}{\epsilon_0 \hbar^2}$ безразмерный параметр, μ - приведенная масса экситона. Для численных оценок использовались следующие параметры зонной структуры сульфида галлия: $m_e^* = 1,3m_0$ ⁵, $m_h^* = 2,3m_0$ ^{6,7}, $\epsilon_0 = 10,6$ ⁸. Энергия связи ЭДЖ определяется как минимум функции $E_{\Pi}^{e-h}(n)$. Результаты проведенных вычислений показали, что равновесная плотность $e-h$ пар в ЭДЖ $n_0 \sim 2,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а энергия связи $E_{\text{ж}} \sim 117 \text{ мэВ}$. Следует отметить, что приведенные значения $E_{\text{ж}}$ и n_0 надо рассматривать лишь как оценочные из-за недостаточной точности определения эффективных масс. В пользу разумности полученных значений $E_{\text{ж}}$ и n_0 свидетельствуют следующие факты: оценка энергии связи непрямых экситонов в GaS, основанная на приведенных выше значениях m_e^* , m_h^* и ϵ_0 , дает значение близкое к экспериментально определенному (см., например, ⁹). Не противоречит полученному значению $E_{\text{ж}}$ экспериментально установленная величина критической температуры: $10 kT_{\text{к}} \sim E_{\text{ж}}$ ¹⁰.

Авторы выражают благодарность Л.В.Келдышу и В.Б.Стопачинскому за интерес к работе и многочисленные обсуждения.

Литература

1. Ed. Keldysh L.V., Jeffries C.D. Electron-Hole Droplets in Semiconductors, 1983, Amsterdam, New York: North-Holland.
2. Belenkii G.L., Godzaev M.O. Phys. Stat. Sol., 1978, (b)85, 453.

3. *Беленький Г.Л., Годжаев М.О., Салаев Э.Ю.* Письма в ЖЭТФ, 1977, 26, 385.
4. *Vashista P., Kalia R.K.* Phys. Rev., 1982, B25, 6492.
5. *Manfredotti C., Murri R., Rizzo A., Vasenelli L.* Solid. State Comm., 1976, 19, 339.
6. *Kamimura H., Nakao K.* J. Phys. Soc. Jpn., 1968, 24, 1313.
7. *Kipperman A.H.M., Vermij C.J.* Nuovo Cim., 1969, 63 B, 29.
8. *Kuroda N., Nishina Y.* Phys. Stat. Sol., 1975, 72, 81.
9. *Abdullaeva S.G., Gadzhiev V.A., Kerimova T.G., Salaev E. Yu.* Nuovo Cim., 1977, B38, 459.
10. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Теоретическая физика, 1976, Том 5, Москва, Наука.

Институт физики
Академии наук Азербайджанской ССР

Поступила в редакцию
31 марта 1986 г.