

06.1; 06.2; 06.3

© 1991

ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС
В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ n - $ZnCdHgTe$ А.М. Андрухов, В.И. Иванов - Омский,
К.Е. Миронов, Д.И. Цыпишка

В последнее время твердые растворы (ТР) $Zn_xHg_{1-x}Te$ (ЦРТ) рассматриваются как возможная альтернатива ТР $Cd_yHg_{1-y}Te$ (КРТ) - основного материала ИК-техники. Это связано со стабилизирующим действием атомов цинка в связях $Hg-Te$ и потенциально более совершенной структурой кристаллов в эпитаксиальных слоях (ЭС), полученных в системе ТР ЦРТ [1]. Использование четверных ТР $Zn_xCd_yHg_{1-x-y}Te$ (ЦКРТ), сочетающих в себе свойства ТР КРТ и ЦРТ, создает дополнительные возможности для плавного изменения основных физических параметров материала. Так как в литературе отсутствуют данные по параметрам энергетической зонной структуры ТР КРТ, в настоящей работе мы попытались частично восполнить этот пробел.

В данной работе приводятся результаты исследования энергетического спектра электронов зоны проводимости n - $Zn_xCd_yHg_{1-x-y}Te$ в магнитном поле. Исследовался циклотронный резонанс (ЦР) с использованием методики регистрации изменения фотопроводимости в магнитном поле под действием излучения.

Измерения проводились на лазерном магнитном спектрометре ($\lambda = 294.8 - 96.52$ мкм) [2]. Источником излучения служили субмиллиметровые CH_3OH и CH_3OO -лазеры с оптической накачкой CO_2 -лазером. Измерения проводились в геометрии Фарадея ($\vec{q} \parallel \vec{B} \perp \vec{E}$, где \vec{q} - направляющий вектор падающего излучения) в магнитных полях до 6.5 Т при температуре 4.2 К. Во время измерений использовалась постоянная подсветка из области фундаментального поглощения с целью уменьшения влияния возможной неоднородности распределения примесей.

Предметом исследования были ЭС $Zn_xCd_yHg_{1-x-y}Te$, полученные методом жидкофазной эпитаксии. Слои выращивались из растворов, обогащенных теллуром, на подложках $CdTe$ и $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$ в закрытой системе. Выращенные слои имели зеркально гладкую поверхность. Толщина составляла 10-20 мкм. Состав образцов контролировался методом количественного рентгеноспектрального микроанализа (КРСМА). После эпитаксии слои имели р-тип проводимости. Отжиг в насыщенных парах ртути дал возможность инвертировать тип проводимости образцов и получить концентрацию электронов по данным холловских измерений в пределах $2-3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при 77 К.

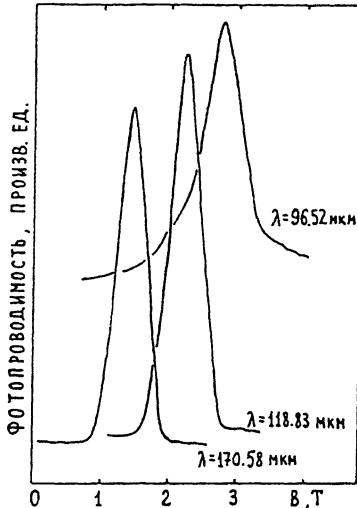


Рис. 1. Спектры фотопроводимости образца А-207, записанные при $T = 4,2$ К.

На рис. 1 приведены спектры фотопроводимости (ФП) образца А-207 для различных длин волн. Величина электрического поля при этом составляла $E = 0,4$ В·см $^{-1}$. В спектрах наблюдается одна ярко выраженная линия. Зависимость энергии переходов от магнитного поля представлена на рис. 2. Исчезновение переходов при $B = 0$ позволяет предполагать, что в данном случае наблюдаются переходы внутри зоны проводимости. Считая, что эти переходы – ЦР, была определена эффективная масса электронов m_e^* и оценена ширина запрещенной зоны E_g . Для подтверждения предложенной идентификации был выполнен расчет положения уровней Ландау в магнитном поле в рамках трехзонной модели Пиджена–Брауна [3] при $k_z = 0$ для узкозонных полупроводников. Из условий наилучшей подгонки экспериментально обнаруженных переходов к соответствующим переходам в выбранной модели были определены значения ширины запрещенной зоны E_g и матричного элемента импульса E_p . Нами произведен также расчет значений E_g для четверных составов исследуемых образцов по распространенной методике, применяемой для A^3B^5 -четверных соединений [4]. Согласно [4], ширина запрещенной зоны для четверного соединения $E_g(X, Y, Z)$ может быть интерполирована из соответствующих значений E_g для тройных соединений, из которых сформировано данное четверное соединение:

$$E_g(x, y, z) = \frac{xyE_g(Zn_{1-v}(Cd_vTe) + yzE_g(Hg_{1-w}Zn_wTe) + xzE_g(Hg_{1-u}(Cd_uTe))}{xy + yz + xz},$$

$$\text{где } u = \frac{1-z+x}{2}, \quad v = \frac{1-x+y}{2}, \quad w = \frac{1-z+y}{2}, \quad x+y+z = 1.$$

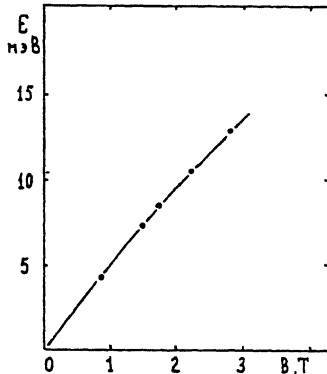


Рис. 2. Зависимость энергии наблюдаемых переходов от магнитного поля для образца А-207 при $T=4.2$ К.

Данные по зависимости E_g от состава и температуры для тройных соединений взяты из [5-7]:

$$E_g(\text{Zn}_{1-\nu}\text{Cd}_\nu\text{Te}) = 2.389 - 1.003\nu + 0.22\nu^2 - 4.5 \cdot 10^{-4} T, \quad [5]$$

$$E_g(\text{Hg}_{1-w}\text{Zn}_w\text{Te}) = -0.3 + 3.24 \cdot 10^{-2} w^{1/2} + 2.731 w - 0.629 w^2 + 0.533 w^3 + 5.3 \cdot 10^{-4} T(1 - 0.76 w^{1/2} - 1.29 w), \quad [6]$$

$$E_g(\text{Hg}_{1-u}\text{Cd}_u\text{Te}) = -0.302 + 4.9 \cdot 10^{-4} T + (1850 - T) \cdot 10^{-3} u. \quad [7]$$

Экспериментальные и расчетные значения параметров исследованных образцов приведены в таблице. Принимая во внимание точность КРСМА (~ 0.003 ат. долей), отметим их хорошее совпадение.

Известно, что по ширине линии ЦР можно оценить время релаксации импульса электронов τ ($\tau = 2B_c / \Delta B \cdot \omega_c$, где ΔB - ширина линии ЦР на полувысоте [8]) и определить их подвижность $\mu = e\tau / m_e^*$. Эти данные также приведены в таблице.

В магнитных полях до 2.5 Т „добротность“ ЦР, определяемая из условия $\omega_c \tau \gg 1$, составляла 5.4 и 6.1 для образцов А-205 и А-207 соответственно, что свидетельствует о хорошем качестве исследуемых образцов с точки зрения однородности распределения состава и примесей. В больших магнитных полях ($B > 2.5$ Т) при увеличении энергии переходов наблюдается уширение линий ЦР, а значит, и уменьшение произведения $\omega_c \tau$. Это объясняется тем, что по мере приближения энергии квантов излучения к характерной энергии продольного оптического фонона ($\hbar \omega_{L0} \sim 17$ мэВ) увеличивается вклад механизма рассеивания электронов на фононах, приводящий к уширению линии ЦР.

Обра- зец	Состав	$\mu \cdot 10^{-4}$, см ⁻³	Эксп. E_g , эВ	Расч. E_g , эВ	E_p , эВ	$\frac{m_c^*}{m_0} \cdot 10^2$	$\mu \cdot 10^{-4}$, см ² /В·с
A-205	$Zn_{0.2}Cd_{0.07}Hg_{0.73}Te$	3.0	0.340	0.357	18.1±0.1	2.87	1.9
A-207	$Zn_{0.17}Cd_{0.08}Hg_{0.75}Te$	2.5	0.280	0.299	18.1±0.1	2.39	4.0

Таким образом, с помощью исследования ЦР, который впервые наблюдался в ТР $Zn_xCd_yHg_{1-x-y}Te$, удалось определить энергетические параметры зонной структуры. При этом оказалось, что характерная энергия ($S-p$) взаимодействия E_p электронов не отличается от таковой для КРТ, несмотря на существенное усложнение состава исследуемого соединения, а величина запрещенной зоны согласуется с ожидаемой для четырехкомпонентного соединения в приближении виртуального кристалла.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Sheez A., Shen A., Spicuz W., Shih C. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. V. 3. N 1. P. 105-111.
- [2] Голубев В.Г., Гореленок А.Т., Иванов-Омский В.И., Минервин И.Г., Осутин А.В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 50. В. 2. С. 282-285.
- [3] Pidgeon C., Brown R. // Phys. Rev. 1966. V. 146. N 2. P. 575-585.
- [4] Williams C., Glisson T., Hauser J., Littlejohn M. // J. Electron. Mat. N 7. P. 639-650.
- [5] Берченко Н.Н., Кревец В.Е., Средин В.Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение. М.: Воениздат, 1982.
- [6] Toulouse B., Granger R., Rolland S., Triboulet R. // J. Physique. V. 48. N 2. P. 247-251.
- [7] Dornhaus R., Nimtz G. Springer Tracts in Modern Physics. V. 78. P. 1; NY Springer. 1976. P. 1-120.
- [8] Fubai M., Kawamura H., Sekido K., Imaj I. // J. Phys. Soc. Jap. 1964. V. 19. N 1. P. 30-39.