

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ZnSe НА GaAs(100)

А. В. Коваленко, А. Ю. Мехекечко

В гетероэпитаксиальной структуре AnSe/GaAs(100) упругая деформация вызывается как рассогласованием параметров решетки слоя и подложки ($a_{0\text{ZnSe}} = 5.6684 \text{ \AA} > a_{0\text{GaAs}} = 5.6533 \text{ \AA}$), так и отличием коэффициентов термического расширения материалов ($\alpha_{\text{ZnSe}} = 6.84 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} > \alpha_{\text{GaAs}} = 5.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Если толщина эпитаксиального слоя ZnSe $d \sim 0.88 \text{ мкм}$, то параметр решетки пленки соизмерим с объемным кристаллом [1]. В этом случае деформационные напряжения отсутствуют, а валентная зона характеризуется вырожденным состоянием Γ_8 . Если $d < 0.15 \text{ мкм}$, то имеет место когерентный рост, при котором $a_{\perp\text{ZnSe}} > a_{0\text{ZnSe}}$. Двумерное напряжение, вызванное решеточным рассогласованием, обуславливает тетрагональное искривление решетки ZnSe и расщепляет мультиплет $P_{3/2}$ на зону тяжелых $hh - V_1$ ($J = 3/2$, $m_j = \pm 3/2$) и легких $Lh - V_2$ ($J = 3/2$, $m_j = \pm 1/2$) дырок с положительным сдвигом центра тяжести мультиплета, относительно зоны проводимости. Величина расщепления валентной зоны обозначена как $2\Delta_e$. В интервале толщин $0.15\text{--}0.88 \text{ мкм}$ отмечаются резкое снижение $a_{\perp\text{ZnSe}}$, уменьшение значения компоненты тензора деформации (e) и возникновение дислокаций несоответствия. При $d > 0.88 \text{ мкм}$ возникает деформация растяжения, обусловленная различием коэффициентов термического расширения, сдвигающая валентные зоны к зоне проводимости. Для двумерной деформации, параллельной (100) и (010), кубический материал ZnSe является оптически одноосным, а компоненты тензора деформации при этом могут быть представлены в виде [2,3]

$$-e_{xx} = -e_{yy} = e, \quad (1)$$

$$e_{zz} = (2C_{12}/C_{11})e, \quad (2)$$

$$e_{xy} = e_{yz} = e_{zx} = 0, \quad (3)$$

где e — компонента тензора деформации положительна для напряжения сжатия и отрицательна для напряжения растяжения; C_{12}, C_{11} — коэффициент жесткости.

Сказанное означает, что в зависимости от толщины слоя ZnSe на GaAs(100) величины $2\Delta_e$, e изменяются, что в свою очередь будет проявляться в изменении энергетического положения линий «тяжелых» E_{hh} и «легких» E_{Lh} экситонов в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) и в спектрах отражения (СО). При установлении такой зависимости может быть решена обратная задача — по данным оптических измерений определить $2\Delta_e$, e и толщину пленки d . В рамках используемого подхода для случая упругой деформации будем полагать, что энергии связи экситонов незначительно зависят от деформации и эффективных масс дырок вблизи $k = 0$. Тогда в виду допускаемой соизмеримости ридбергов $R(Lh)$, $R(hh)$

Оценка величин расщепления валентной зоны ($2\Delta_e$), толщины слоев ZnSe ($d_{\text{расч.}}$) на GaAs(100) по данным оптических измерений; расчет значений тензора деформации (e) и толщин слоев, измеренных с помощью электронного микроскопа $d_{\text{изм.}}$

Энергия, эВ	Спектральная хар-ка	$2\Delta_e$, мэВ	$e \cdot 10^{-3}$	$d_{\text{расч.}}$, мкм	$d_{\text{изм.}}$, мкм
$E_{hh} = 2.80452$	СО	11.73	2.77	0.006	0.006
$E_{Lh} = 2.81625$					
$E_{hh} = 2.80379$	ФЛ	1.73	0.3914	0.510–0.515	0.52
$E_{Lh} = 2.80552$					
$E_{hh} = 2.80315$	ФЛ	1.48	0.3486	0.545–0.55	0.55
$E_{Lh} = 2.80463$					
$E_{hh} = 2.8034$	ФЛ	1.5	0.3394	0.535–0.54	0.540
$E_{Lh} = 2.8049$					
$E_{hh} = 2.80351$	СО	1.5	0.3393	0.535–0.54	
$E_{Lh} = 2.8050$					
$E_{hh} = 2.8030$	ФЛ	1.4	0.3258	0.55	0.56
$E_{Lh} = 2.80440$					
$E_{hh} = 2.8030$	СО	1.41	0.319	0.555–0.56	
$E_{Lh} = 2.80441$					
$E_{hh} = 2.80256$	ФЛ	-1.28	-0.286	3.4–3.5	3.5
$E_{Lh} = 1.80129$					
$E_{hh} = 2.80237$	СО	-1.27	-0.287	3.4–3.5	
$E_{Lh} = 2.8011$					
$E_x = 2.8002$	ФЛ, СО	0	0	0.88	0.88

энергетическую разность $E_{Lh} - E_{hh}$ можно рассматривать как эквивалент расщепления валентной зоны $2\Delta_e$ [2]. Для двумерной деформации, параллельной (100) и (010) в кубическом ZnSe в первом приближении, линейные уравнения сдвига валентных зон могут быть представлены в виде [3]

$$\Delta E_0(1) = [-2a((C_{11} - C_{12})/C_{11}) + b((C_{11} + 2C_{12})/C_{11})] e, \quad (4)$$

$$\Delta E_0(2) = [-2a((C_{11} - C_{12})/C_{11}) - b((C_{11} + 2C_{12})/C_{11})] e, \quad (5)$$

где a — гидростатический деформационный потенциал; b — потенциал сдвига для тетрагональной симметрии; C_{11}, C_{12} — коэффициенты жесткости. Применение данных соотношений на практике затрудняет большой разброс в значениях коэффициентов жесткости, деформационных потенциалов и энергетического положения свободного экситона.

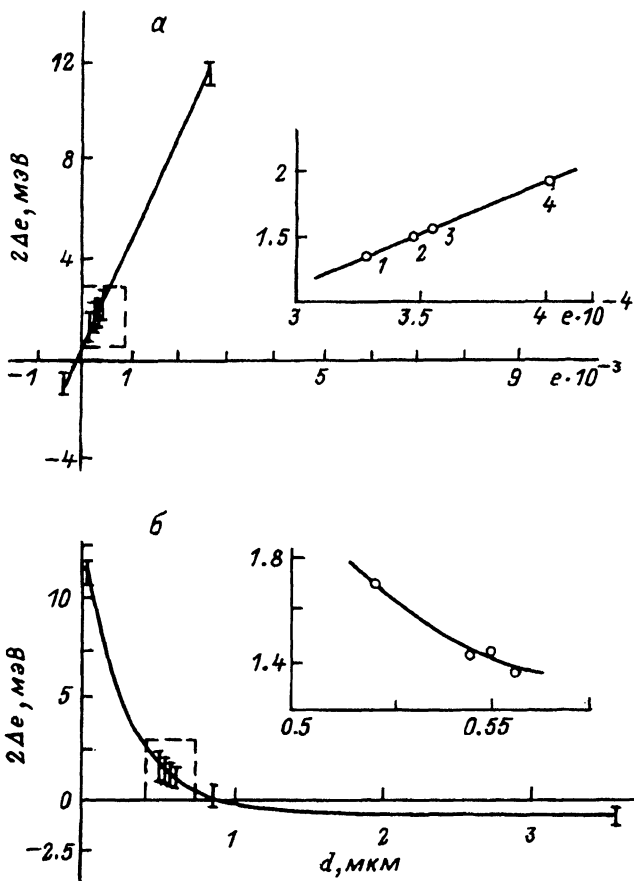
В качестве основного экспериментального параметра, учитывающего влияние деформационных процессов, выбрана величина $2\Delta_e$, которую можно оценить как

$$2\Delta_e = -2be(C_{11} + 2C_{12})/C_{11} = -Ae. \quad (6)$$

Для нахождения корректной величины A мы отталкивались от экспериментального параметра $2\Delta_e$, значение которого устанавливалось на

основе анализа СО и спектров ФЛ гетероструктур ZnSe/GaAs(100), выращенных методом фотостимулированной газофазовой эпитаксии. Энергетические положения экситонных термов определялись по максимумам излучения в спектрах ФЛ и уточнялись по данным СО [4]. Полученные результаты сведены в таблицу. На основе известных нам значений C_{11} , C_{12} и b был установлен диапазон изменения величины параметра A : 4.40367–5.73981. Для определения значения A проанализированы СО сверхтонких слоев ZnSe с $d < 0.15$ мкм, для которых $e = e_{\max} = 2.77 \cdot 10^{-3}$ [5]. Коррекция искомой величины дала значение $A = 4.4197$ при использовании $C_{11} = 8.10 \cdot 10^{10}$, $C_{12} = 4.9 \cdot 10^{10}$ Н/м², $b = -1$ эВ [6–8]. Зная величину константы A , по формуле (3) можно определить компоненту тензора деформации e , а по известной зависимости $e = f(d)$ для ZnSe/GaAs(100) [5] оценить d .

Наблюдается хорошая сходимость расчетных и экспериментальных значений d , полученных с помощью электронного микроскопа (см. таблицу). Рассчитанные функции $2\Delta_e = f(e)$ и $2\Delta_e = f(d)$ с соответствующими экспериментальными точками представлены на рисунке. Следует



Зависимость величины расщепления валентной зоны $2\Delta_e$ в пленке ZnSe, выращенной на GaAs(100), от тензора деформации (а) и толщины пленки (б).

На вставке а: 1 — $d = 0.56$, 2 — 0.55, 3 — 0.54, 4 — 0.52 мкм.

отметить хорошо проявившуюся линейную зависимость $e\Delta_e = f(e)$, проходящую через начало координат для пленки с $d = 0.88$ мкм ($e = 0$).

Список литературы

- [1] Yao T., Matsui S., Ishida K. // J. Cryst. Growth. 1987. V. 81. P. 518-523.
- [2] Сейсян Р.П. Спектроскопия диамагнитных экситонов. М., 1984. 272 с.
- [3] Asai N., Oe K. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N. 4. P. 2052-2056.
- [4] Коваленко А.В., Мекекечко А.Ю., Бондарь Н.В. // ФТП. 1992. Т. 26. № 7. С. 1251-1255.
- [5] Petruzello J., Greenberg B.L., Cammack D.A. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 7. P. 2299-2303.
- [6] Mohammed K., Cammak D.A., Dalby R. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. N 1. P. 37-39.
- [7] Fujiyasu N., Mochizuki K. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 8. P. 2960-2962.
- [8] Kanda T., Suemine I., Yamada K. // J. Cryst. Growth. 1988. V. 93. P. 662-666.

Днепропетровский государственный университет

Поступило в Редакцию
16 марта 1993 г.
В окончательной редакции
22 июня 1993 г.