

**СУПЕРСВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА
В СПЕКТРАХ ЭПР ИОНОВ Eu^{2+}
В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ PbTe**

Громовой Ю. С., Пляцко С. В., Костюнин Г. Е.

При получении тонких полупроводниковых пленок на основе узкозонных материалов с заданными электрофизическими, оптическими и структурными свойствами, являющихся основой целого ряда электронно-оптических приборов, возникает ряд проблем, связанных с условиями их выращивания. В частности, общепризнанными методами выращивания затруднительно получить легированные и нелегированные гетероэпитаксиальные слои, а тем более структуры с квантовыми ямами и сверхрешетки, обладающие резкой металлургической границей, однородностью распределения легирующих компонент (различие в давлении паров PbTe и MTe), высоким структурным совершенством, стабильными электрофизическими и оптическими параметрами в плоскости и по толщине слоев.

Развивающийся в последнее время метод лазерного эпитаксиального выращивания (ЛЭВ) различных полупроводниковых соединений позволяет в значительной степени разрешить упомянутые выше проблемы.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования электрофизических свойств и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) эпитаксиальных слоев $\text{PbTe} : \text{Eu}$ (давление паров EuTe на несколько порядков ниже давления паров PbTe [1]), выращенных методом ЛЭВ.

Эксперимент. Для эпитаксиального выращивания полупроводниковых слоев $\text{PbTe} : \text{Eu}$ был использован метод квазинепрерывного лазерного напыления ($\hbar\omega < E_g$), при котором достигается большая эффективность испарения мишени и высокая эффективная скорость роста пленок на относительно «холодных» гетероподложках ($T_{\text{п}} = 300 \div 450 \text{ K}$) с различной величиной рассогласования параметров решетки ($\Delta a/a_0 \sim 30 \%$) материала подложки и теллурида свинца ($a_0 = 6.46 \text{ \AA}$).

Пленки осаждались на естественные сколы (100) щелочно-галогидных кристаллов NaCl , KCl , KBr , NaF , LiF .

В качестве источника напыления был выбран монокристалл $\text{PbTe} : \text{Eu}$, p -типа проводимости с концентрацией дырок $P_{77} = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью носителей $\mu_{77} = 1 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, выращенный методом Чохральского. Плотность мощности лазерного излучения на источнике-мишени составляла $W = 10^4 \div 10^5 \text{ Вт/см}^2$. Осаждение слоев проводилось в вакуумной камере с остаточным давлением паров 10^{-6} Тор . Эффективная скорость выращивания слоев $\text{PbTe} : \text{Eu}$ составляла $v_{\text{эфф}} = 10^2 \div 10^3 \text{ \AA/с}$.

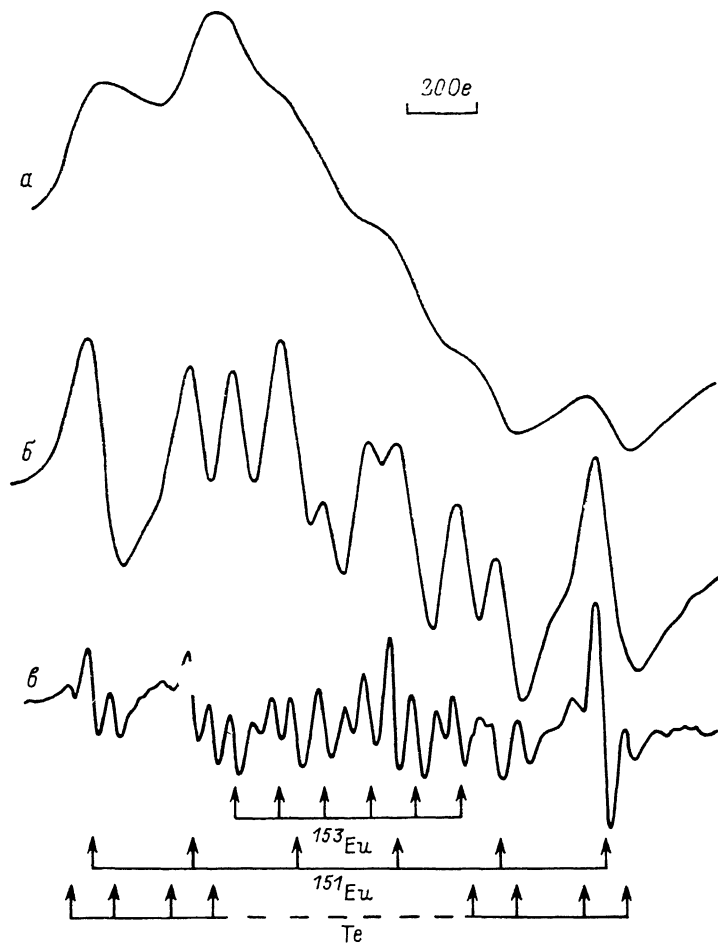
Выращенные слои толщиной $3 \cdot 10^{-3} \div 10 \text{ мкм}$ имели одинаковую толщину по всей площади подложки и зеркальную поверхность независимо от материала подложки.

Структурное совершенство пленок изучено с использованием электронограмм на просвет и отражение и рентгеновского дифракционного отражения. Результаты исследования говорят о том, что пленки $\text{PbTe} : \text{Eu}$ /подложка обладают высоким структурным совершенством. Кривые рентгеновского дифракционного отражения исследованы для рефлексов 111 и 333. Полуширина пика дифракционного отражения зависела от толщины слоя и для наиболее толстых пленок составляла $\leq 2'$ и слабо зависела от рассогласования постоянных решеток пленки и подложки.

Полученные пленки имели n -тип проводимости с концентрацией электронов $N_{77} \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_{77} \approx (1 \div 3) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Из сопоставления электрофизических параметров источника и полученных пленок можно заключить, что пленки обладают меньшей дефектностью по сравнению с монокристаллами, выращенными из расплава.

Следует отметить, что пленки $\text{PbTe} : \text{Eu}$ и $\text{PbTe} : \text{Eu}$, выращенные в одинаковых условиях, не проявляли заметного отличия в электрофизических и структурных свойствах.

Исследование ЭПР пленок производилось на установке VARIAN-E-12 в трехсантиметровом диапазоне в области температур $20 \div 300 \text{ K}$. Спектры ЭПР снимались при различных ориентациях магнитного поля относительно плоскости пленки. В случае, когда магнитное поле было направлено параллельно нормали к плоскости пленки ($H_0 \parallel \langle 100 \rangle$), в спектрах ЭПР наблюдалось семь частично перекрывающихся пакетов линий тонкой структуры (ТС) $s=7/2$, со-



Фрагмент спектра ЭПР ионов Eu^{2+} в объемном монокристалле и пленке $\text{PbTe} : \text{Eu}$ при $T=20 \text{ K}$ (центральный переход $|+1/2\rangle \leftrightarrow |-1/2\rangle$) для $H_0 \parallel \langle 100 \rangle$.

а — в монокристалле $\text{PbTe} : \text{Eu}$, который использовался в качестве источника напыления; *б* — в монокристалле $\text{PbTe} : \text{Eu}$ после лазерного облучения; *в* — в пленке $\text{PbTe} : \text{Eu}$ при направлении магнитного поля перпендикулярно поверхности пленки ($H_0 \perp \langle 100 \rangle$).

стоящих из линий сверхтонкой структуры (СТС). При такой ориентации магнитного поля линии ТС максимально разнесены по полю.

Спектры ЭПР и их угловые зависимости, полученные на тонких пленках $\text{PbTe} : \text{Eu}$, аналогичны спектрам ЭПР и угловым зависимостям для монокристаллов $\text{PbTe} : \text{Eu}$, подвергнутых лазерному облучению, на которых впервые были проведены исследования ЭПР [2, 3], определено зарядовое состояние европия, его местоположение в решетке PbTe и получены константы спинового гамильтониана (СГ).

На рисунке, *а*—*в* приведены фрагменты спектров ЭПР узельного европия при $H_0 \parallel \langle 100 \rangle$, принадлежащих центральному электронному переходу $|+1/2\rangle \leftrightarrow |-1/2\rangle$ для монокристалла мишени, монокристалла, подвергнутого

лазерному облучению, и пленок $\text{PbTe} : \text{Eu}$, выращенных на подложках NaCl (KCl , KBr , NaF).

Отличительной чертой этих спектров является различие в полуширине линий СТС. Полуширины линий (ΔH) СТС в монокристаллах и пленках при температуре 20 К равны соответственно 10 и 4 Э.

Впервые в спектрах ЭПР пленок $\text{PbTe} : \text{Eu}$ при ориентации магнитного поля $\mathbf{H}_0 \parallel \langle 100 \rangle$ удалось обнаружить по два четко разрешенных спутника при крайних линиях СТС, обусловленных суперсверхтонким взаимодействием (ССТВ) с ближайшими ядрами окружения изотопов ^{125}Te и ^{123}Te с природным содержанием 6.5 и 0.85 % соответственно, чего не удавалось наблюдать на монокристаллических образцах $\text{PbTe} : \text{Eu}$.

Более высокое разрешение спектра ЭПР Eu^{2+} в пленках (по сравнению с монокристаллами) позволило уточнить константы СГ и определить константу ССТВ.

Спектр ЭПР при 20 К характеризуется следующими параметрами: $g = 1.9975 \pm 0.00055$; $b_4 = (40.1 \pm 0.45) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$; $b_6 = (-0.63 \pm 0.45) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$; $A = (27.0 \pm 0.45) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ для изотопа ^{151}Eu ; $A = (11.9 \pm 0.45) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ для изотопа ^{153}Eu ; $a_{\text{Te}} = (11.8 \pm 0.45) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ для изотопа ^{151}Eu . Из-за сильного перекрытия линий ЭПР величину константы ССТВ изотопа ^{153}Eu установить не удалось.

Отношение констант СТ $A_{^{151}\text{Eu}}/A_{^{153}\text{Eu}}$, полученное из данных экспериментов, равно отношению магнитных моментов ядер этих изотопов.

Интенсивности линий ССТВ относительно линий СТС находятся в сильной зависимости от условий эксперимента — уровня мощности СВЧ и температуры — и не всегда соответствуют расчетным значениям 1 : 4 : 1.

Отметим, что спектр ЭПР на пленках $\text{PbTe} : \text{Eu}$ при ориентации магнитного поля параллельно плоскости пленки ($\mathbf{H}_0 \parallel \langle 100 \rangle$) совпадает со спектром ЭПР при ориентации магнитного поля перпендикулярно пленке ($\mathbf{H}_0 \perp \langle 100 \rangle$). Известно [2, 3], что спектр ЭПР Eu^{2+} в монокристаллах PbTe обладает сильной угловой зависимостью, поэтому проявление линий ССТВ при ориентации магнитного поля \mathbf{H}_0 перпендикулярно и параллельно плоскости пленки свидетельствует о высокой степени совершенства пленки в направлении роста и в плоскости слоя [4].

В заключение можно сделать следующие выводы.

Проведенные комплексные исследования пленок $\text{PbTe} : \text{Eu}$ показывают, что метод лазерной эпитаксии позволяет достигать высокой степени конгруэнтности испарения вещества мишени, получать слои, обладающие значительно большим совершенством, чем монокристаллы, производить легирование пленок различными примесями даже в том случае, когда давление паров примеси отличается на много порядков от давления паров основного вещества. Результаты, полученные из измерений электрофизических свойств и ЭПР, наличие линий СТ и линий ССТВ свидетельствуют о том, что в слоях, полученных этим методом, примесь Eu занимает узелное положение в состоянии Eu^{2+} . В отличие от спектров ЭПР Mn^{2+} на пленках $\text{PbTe} : \text{Mn}$ уширения линий в спектрах ЭПР пленок $\text{PbTe} : \text{Eu}$ при отклонении магнитного поля от нормали ($\mathbf{H}_0 \parallel \langle 100 \rangle$) к поверхности пленки не наблюдалось. Это, по-видимому, объясняется значительно меньшим влиянием напряжений, возникающих в пленках из-за различия постоянных решеток материала пленки и подложки, на более глубокие оболочки $4f^7$ европия, чем на $3d^5$ -оболочки марганца.

Список литературы

- [1] Nakamura T. // Thin Sol. Films. 1988. V. 161. P. 149—156.
- [2] Gromovoj Yu. S., Plyatsko S. V., Sizov F. F., Darchuk S. D. // J. Phys. Cond. Matter. 1989. V. 1. N 37. P. 6625—6631.
- [3] Громовой Ю. С., Дарчук С. Д., Коновалов В. И., Лакеенков В. К., Пляцко С. В., Сизов Ф. Ф. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1025—1031.
- [4] Громовой Ю. С., Костюнин Г. Е., Пляцко С. В. // Матер. III Всес. конф. по физике и технологии тонких полупроводниковых пленок. Ивано-Франковск, 1990. С. 181.