

ФИЗИКА. ХИМИЯ

УДК 621.315.592

С.К. Кадышев

**О МЕХАНИЗМАХ РАССЕЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ СЕЛЕНИДА СВИНЦА, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ЭПИТАКСИИ**

*В работе проведен анализ механизмов рассеяния носителей тока в эпитаксиальных слоях селенида свинца, выращенных методом лазерной эпитаксии.*

*Установлено, что в напряженных слоях преобладающим механизмом рассеяния является рассеяние на дислокациях несоответствия, а в наиболее совершенных слоях при  $T \geq 90^\circ\text{K}$  рассеяние на оптических колебаниях решетки.*

Процесс рассеяния в полупроводниках представляет собой искривление траектории носителей тока под влиянием сил, действующих на электрон или дырку со стороны рассеивающего центра. Природа таких центров различна, и к ним можно отнести ионизированные и нейтральные примеси, колебания атомов кристаллической решетки, вакансии, дислокации и др. дефекты. Кроме того, эффективное сечение рассеяния зависит от температуры полупроводника и от концентрации свободных носителей тока.

Следует отметить, что в отличие от монокристаллов механизм рассеяния носителей тока в эпитаксиальных слоях полупроводников зависит от свойств ориентирующих подложек, в особенности, когда речь идет о халькогенидах свинца (PbTe, PbSe, PbS), которые характеризуются низкой термодинамической стабильностью, что приводит к образованию больших концентраций собственных и примесных дефектов и микроскопических неоднородностей, обогащенных собственными и примесными компонентами [1].

Основные сведения о механизмах рассеяния носителей тока в халькогенидах свинца, являющихся одним из наиболее перспективных материалов ИК, оптоэлектроники и термоэлектрических устройств, можно получить из анализа температурных и концентрационных зависимостей холловской подвижности, теплопроводности и коэффициентов поперечного и продольного эффектов Нернста-Эттинсгаузена.

В настоящей работе приводятся результаты анализа механизмов рассеяния носителей тока в нелегированных и легированных марганцем и европием эпитаксиальных слоях PbSe, выращенных на подложках из щелочно-галогидных кристаллов (KCl, KBr, NaCl) методом лазерной эпитаксии [2, 3], который позволяет реализовать конгруэнтность испарения, а также значительно понизить температуру подложки.

В качестве источника – мишени использовались нелегированные и легированные марганцем и европием монокристаллы PbSe, выращенные из расплава методом направленной кристаллизации, концентрацией примеси  $N_i = 5 \cdot 10^{17} : 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Мишень

распылялась модулированным ИК-лазерным излучением ( $\hbar\omega = 0,118\text{эВ}$ ). Время действия лазерного излучения составляло  $\tau = 3 \cdot 10^{-3}$  сек., с частотой повторения  $f = 20$  Гц. Излучение водилось с помощью оптической системы фокусировки в вакуумную камеру с остаточным давлением паров  $P = 10^{-6}$  Торр. Слои, выращенные толщиной  $1 \cdot 10^{-2} : 3$  мкм, имели зеркальную поверхность независимо от материала подложки.

Как было показано в работе [3], в слоях халькогенидов свинца, выращенных модулированным лазерным излучением эпитаксией, тип проводимости и концентрация носителей тока в основном определяются плотностью мощности лазерного излучения на мишени-источнике и температурой подложки. Исследования электрофизических и структурных параметров слоев PbSe, выращенных этим методом, показали, что для получения совершенных слоев селенида свинца величина значений плотности мощности лазерного излучения, при одинаковых температурах подложек должна быть на порядок ниже, чем для теллурида свинца.

Для определения холловской подвижности носителей тока ( $\mu$ ) в интервале температур  $T = 77 : 320\text{К}$  проведены исследования эффекта Холла ( $R_H$ ) и удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ). Измерения удельного электрического сопротивления показали, что зависимость  $\rho(T)$  эпитаксиальных слоев PbSe не отличаются от  $\rho(T)$  наиболее совершенных монокристаллов. Исследования температурных зависимостей коэффициента Холла ( $R_H(T)$ ) слоев PbSe/KCl, выращенных при различных значениях плотности мощности лазерного излучения показывают, что качественно  $R_H(T)$  слоев на подложках KCl при одинаковых значениях концентрации и подвижности носителей тока подобны  $R_H(T)$  монокристаллов p- и n-PbSe [4]. Такое поведение  $R_H(T)$  в n-PbSe/KCl можно объяснить ионизацией уровня  $E_d$  дефектных состояний в запрещенной зоне [4]. Однако, как показывают расчеты, энергетическое положение уровня  $E_d$  в пленке оказалось ближе ко дну с-зоны, чем в монокристаллах, и составляет  $E_d = 0,035$  эВ.

Как отмечалось выше, рассеяние носителей тока зависит от их концентрации. Поэтому, при анализе механизмов рассеяния в целях исключения влияния зависимости подвижности от концентрации носителей тока подвижность в слоях сравнивалась с подвижностью в объемных монокристаллах при одинаковой концентрации носителей тока (Таблица 1). Как видно из таблицы, в области низких температур ( $T = 77\text{К}$ ) подвижность носителей тока в слоях практически всегда оказывается ниже, чем в наиболее совершенных монокристаллах или монокристаллах, подверженных воздействию ИК – лазерного излучения из области прозрачности матрицы кристалла  $\hbar\omega < E_g$  ( $E_g$  – ширина запрещенной зоны селенида свинца при  $T = 300^\circ\text{К}$ ) [4-6]. Это, по-видимому, обусловлено тем, что происходит рассеяние носителей тока в пленке нарушениями решетки, вносимых дислокациями несоответствия, возникающих из-за отличия постоянных решеток ( $\alpha$ ), а также из-за различия коэффициентов термического расширения ( $\beta$ ) слоя (пленки) и подложки [2, 3].

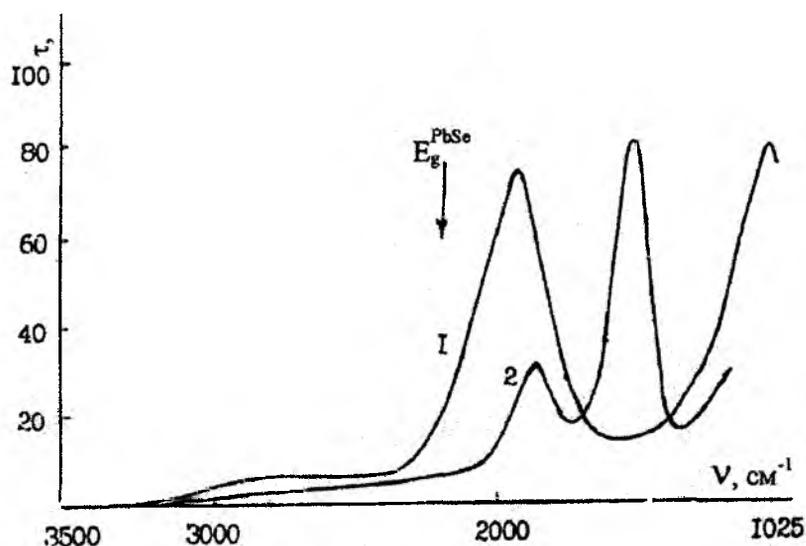
Как отмечалось в работе [7], различие в  $\alpha$  и  $\beta$  приводит к возникновению аксиальной деформации, проявляющейся в спектрах ЭПР ионов  $\text{Mn}^{2+}$  в PbSe. Кроме этого, исследования структурных и оптических свойств таких слоев показывают, что из-за этих различий происходит уширение линий кривых дифракционного отражения

(КДО) и сдвиг края собственного поглощения в длинноволновую область спектра (Рис.1).

Таблица №1.

Характеристики исследуемых образцов

№	Материал	$\rho_{77}, \text{см}^{-3}$	$n_{77}, \text{см}^{-3}$	$\mu_{77}, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	Примечание
1.	PbSe	$4,38 \cdot 10^{17}$		$2,85 \cdot 10^4$	
2.	PbSe/KCl	$4,60 \cdot 10^{17}$		$1,11 \cdot 10^4$	
3.	PbSe:Eu		$3,55 \cdot 10^{17}$	$3,06 \cdot 10^4$	после ЛО* [5]
4.	PbSe:Eu/KCl		$3,65 \cdot 10^{17}$	$1,37 \cdot 10^4$	после ЛО* [6]
5.	PbSe:Mn		$7,77 \cdot 10^{17}$	$2,465 \cdot 10^4$	после ЛО* [6]
6.	PbSe:Mn/KCl		$7,77 \cdot 10^{17}$	$1,34 \cdot 10^4$	
7.	PbSe		$2,59 \cdot 10^{18}$	$2,40 \cdot 10^4$	после (ТО)**
8.	PbSe/KCl		$2,63 \cdot 10^{18}$	$1,57 \cdot 10^4$	
9.	PbSe:Mn	$6,46 \cdot 10^{18}$		$4,53 \cdot 10^3$	
10.	PbSe:Mn/KCl	$1,39 \cdot 10^{18}$		$9,76 \cdot 10^3$	



\*ЛО – лазерное облучение, \*\*ТО – термический отжиг.

Рис. 1. Фрагменты спектров пропускания слоев PbSe/KCl, снятые при комнатной температуре, на спектрометре ИКС-25;

- 1 – после релаксации напряжений несоответствия;
- 2 – напряженная пленка.

Наблюдаемый сдвиг края собственного поглощения, уширение линий КДО и сдвиг уровня  $E_d$  к  $s$  – зоне, по-видимому, обусловлены тем, что напряжения несоответствия действуют в плоскости пленки аналогично действию напряжений перпендикулярно плоскости пленки, т.е. деформацию можно считать одноосной. Поэтому возникающие напряжения приводят к сжатию пленки по направлению роста, т.е. в пленке образуется область деформаций, в окрестности которой зависимость энергии от волнового вектора отличается от закона дисперсии в идеальном кристалле, что приводит к рассеянию свободных носителей тока.

Подвижность носителей тока в таких напряжениях слоях слабо зависит от температуры и в большей степени определяется плотностью дислокаций ( $N_D$ ), т.е.

$$\mu \approx \frac{T^{-0,5}}{N_D}$$

В условиях частичной релаксации напряжений несоответствия плотность дислокаций в тонких пленках n-p- PbSe может достигать  $N_D \cong 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , что и приводит к преобладающему рассеянию носителей тока на дислокациях при пониженных температурах.

На Рис. 2 в двойном логарифмическом масштабе приведены температурные зависимости подвижности носителей тока эпитаксиальных слоев селенида свинца на подложках KCl. Выбраны образцы с одинаковой концентрацией носителей тока. Анализ зависимостей и сравнение их с  $\mu(T)$  в  $\text{ок}$  их кристаллах (рис.3) показывает, что в напряженных пленках (рис.2, кривая 5) подвижность  $\mu(T) \sim T^{-0,5}$ , которую можно объяснить преобладающим механизмом рассеяния носителей тока на дислокациях несоответствия. В пленках p-PbSe, где частично произошла релаксация напряжений несоответствия (рис. 2, кривая 2 и 4), температурная зависимость подвижности  $\mu(T) \sim T^{1,7}$ , что указывает на увеличение вклада смешанного механизма рассеяния на вакансиях, оптических и акустических колебаниях решетки.

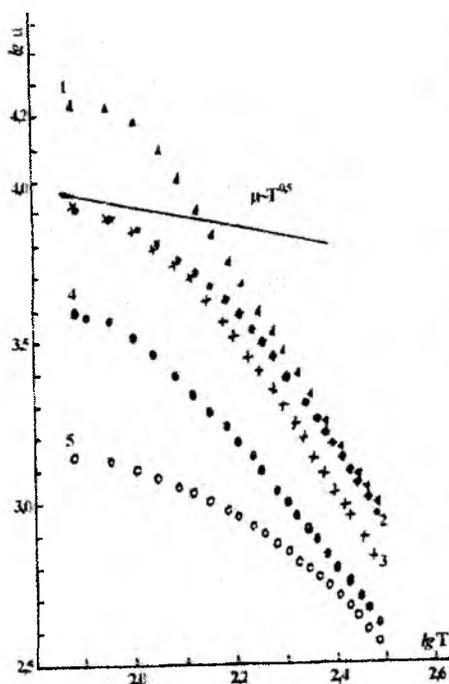


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей тока ( $\mu$ ) от температуры пленок PbSe:

- 1 – n – PbSe/KCl ( $n_{77}=7,17 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ );
- 2 – p – PbSe/KCl ( $p_{77}=5,65 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ );
- 3 – p – PbSe/KCl ( $p_{77}=6,05 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ );
- 4 – p – PbSe/KCl ( $p_{77}=6,65 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ );
- 5 – n – PbSe/KCl ( $n_{77}=6,65 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ).

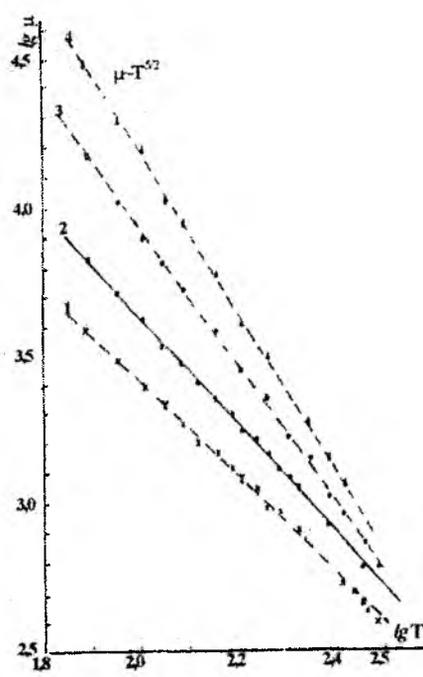


Рис.3. Динамика изменения температурных зависимостей подвижности носителей тока в монокристаллах PbSe под действием ИК – лазерного излучения ( $\hbar\omega=0,118 \text{ эВ}$ ,  $W=25 \text{ Вт/см}^2$ ): 1 – до облучения; 2 – после 8-ми часов; 3 – после 13 часов; 4 – после 18 часов облучения (до облучения p-тип проводимости; 2-4 – n – тип проводимости) [4-6].

Такие же зависимости получены на эпитаксиальных слоях селенида свинца, легированных европием и марганцем, а также выращенных на подложках KBr и NaCl. В наиболее совершенных пленках плотность дислокаций несоответствия составляет  $\approx 10^6 \text{ см}^{-2}$ , а подвижность носителей тока в этом случае достигает значений  $\mu_{77} \approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В с}$ , близких к подвижности в совершенных объемных кристаллах. Сравнение температурных зависимостей  $\mu(T)$  таких пленок (рис. 2, кривая 1) и монокристаллов (рис. 3, кривая 4) показывает, что в совершенных слоях n-PbSe  $\mu$  пропорциональна  $T^{-2.5}$ . Следовательно, можно считать, что преобладающим механизмом рассеяния носителей тока в нелегированных и легированных слоях n-PbSe при  $T \geq 90^\circ \text{ К}$  как и в монокристаллах [8-11], становится рассеяние на оптических колебаниях решетки.

В заключение следует отметить. Что деформационные эффекты в эпитаксиальных слоях халькогенидов свинца необходимо принимать во внимание при исследовании их электрофизических, структурных, оптических, магнитных и других свойств, поскольку они являются следствием изменений зонной структуры и механизмов рассеяния под действием полей механического напряжения.

Автор выражает искреннюю признательность старшим научным сотрудником института физики полупроводников НАН Украины, кандидатом физико-математических наук Сергею Владимировичу Пляцко и Юрию Сергеевичу Громову за совместную работу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Breschi R., Cammanzi A., Fano V. Defects in PbTe single crystals //J. Crystal Growth. 1982, v. 58, N.2, p. 399-408.
2. Plyatsko S.V., Gromovoj Yu.S., Sizov F.F. Narrow-gap 4-6 thin films produced by quasi - contin - uous-wave CO<sub>2</sub> laser induced evaporation //Thin Solid Films. 1992, v. 218, -p. 151-156.
3. Пляцко С.В., Кадышев С.К., Кулумбетов Ж.Э. О лазерной эпитаксии соединений  $A^4B^6$  //Наука и новые технологии. -1999. -№2. -С.18-23.
4. Пляцко С.В., Громовой Ю.С., Климов А.А, Кадышев С.К. преобразование собственных и примесных дефектов в селениде свинца и твердых растворах на его основе лазерным излучением //Физика и техника полупроводников. -1994. -Т.28. -Вып.1. -С.138-143.
5. Громовой Ю.С., Пляцко С.В., Кадышев С.К. Положение и зарядное состояние примеси европия в решетке селенида свинца //Физика и техника полупроводников. -1992. -Т.26. -Вып.4. -С.778-782.
6. Громовой Ю.С., Кадышев С.К., Пляцко С.В. Фотостимулированное изменение положения ионов  $Mn^{2+}$  в кристаллической решетке селенида свинца //Физика и техника полупроводников. -1992. -Т.26. -вып.12. -с.2098-2102.
7. Ройцин А.Б., Пляцко С.В., Громовой Ю.С., Климов А.А., Кадышев С.К. Проявление механических напряжений в электронном парамагнитном резонансе гетеросистем на основе соединений  $A^{IV}B^{VI}$ , легированных примесью марганца //Физика и техника полупроводников. -1992. -Т.26. -Вып.12. - С.2091-2097.
8. Кадышев С.К., Пляцко С.В. Изменение механизмов рассеяния носителей тока в селениде свинца под действием ИК - лазерного излучения. Сборник научных трудов Технологического университета Дастан. -Бишкек, 1997. - С.64-67.

*Математика. Естественные науки*

---

9. Любченко А.В., Сальков Е.А., Сизов Ф.Ф. Физические основы полупроводниковой инфракрасной оптоэлектроники. –Киев: Наукова думка, 1984. –256с.
10. Вершигора В.К., Гуцуляк В.Т., Кондратенко М.М., Орлецкий В.Б. Рассеяние носителей тока в твердом растворе  $Pb_{0,83} Sn_{0,17} Se$  //Украинский физический журнал. –1977. –Т.22. -№9. –С.1549-1552.
11. Кучеренко И.В., Тактакашвили М.С., Шотов А.П. Исследование не параболичности валентной зоны и механизмов рассеяния дырок в кристаллах  $Pb_{0,94}Sn_{0,06}Se$  //Физика и техника полупроводников. –1974. –Т.8. –Вып. 3. – С.446-451.