

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Андрянов А. В.

Полупроводниковые твердые растворы  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  уже значительное время интенсивно исследуются и интерес к этим материалам продолжает оставаться очень большим в связи с широкими перспективами использования этих материалов в твердотельной электронике.

Что касается твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ , то эта система изучена в настоящее время мало по сравнению с другими системами твердых растворов  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , как например соединение  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  и другие. Экспериментальное и теоретическое исследование оптических свойств твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x-y}$ .

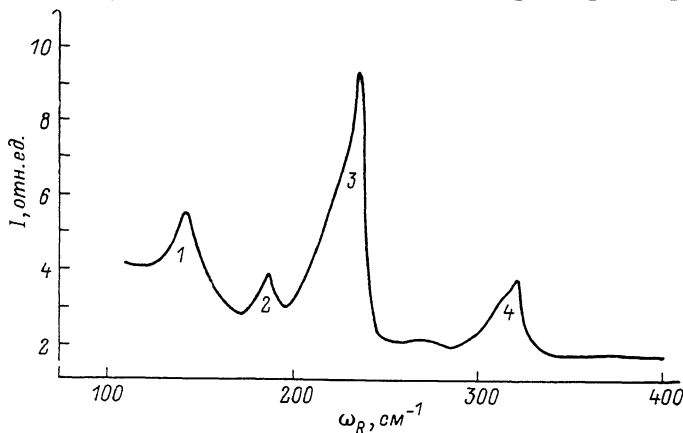


Рис. 1. Спектр КРС нелегированной эпитаксиальной пленки  $\text{InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$  ( $n=1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu=7600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $T=300 \text{ К}$ ).

Спектральная ширина щели  $6 \text{ см}^{-1}$ . Линии  $LO_1$ ,  $LO_2$ ,  $LO_3$  отнесены к  $LO$ -фононам, свойственным элементарным ячейкам трех типов  $\text{InSb}$ ,  $\text{InAs}$ ,  $\text{InP}$  соответственно. Конфигурация рассеяния  $Z \parallel [100]$ ;  $Y' \parallel [011]$   $[Z(Y'Y)Z]$ . 1—4 соответствуют фононам: 1 —  $DALA$  ( $X$ ,  $L$ ), 2 —  $LO_1$ , 3 —  $LO_2$ , 4 —  $LO_3$ .

$\text{Sb}_x\text{P}_y$  проводилось в очень небольшом числе работ, среди которых можно отметить [1, 2], где исследовались спектры отражения света в области решеточных и плазменных колебаний.

В данной работе экспериментально исследовано комбинационное рассеяние света (КРС) в этих материалах.

Были исследованы пленки состава  $\text{InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$ , выращенные методом жидкостной эпитаксии на подложках  $\text{InP}$  ориентации (100). Толщина пленок составляла  $1-5 \text{ мкм}$ . Исследовались нелегированные специально пленки с концентрацией электронов  $1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация свободных носителей измерялась по частоте плазменного резонанса, которая в свою очередь определялась из спектра отражения (методика изложена в [3]).

Исследование спектров КРС проводилось на двойном дифракционном монохроматоре ДФС-24. В качестве источника возбуждения использовался аргоновый лазер (линия  $5145 \text{ \AA}$ ). Мощность излучения на образце не превышала  $25 \text{ мВт}$ . Измерение спектра осуществлялось с помощью охлаждаемого ФЭУ-79, работающего в режиме счета фотонов. Поляризованное КРС исследовалось в геометрии обратного рассеяния.

На рис. 1 приведен спектр КРС нелегированной специально эпитаксиальной пленки состава  $\text{InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$  при  $T=300 \text{ К}$ . Спектр твердого раствора имеет трехмодовый характер, что согласуется с результатами [2]. Линии с максимумами при  $185$ ,  $233$ ,  $321 \text{ см}^{-1}$  обусловлены рассеянием на  $LO$ -фононах,

свойственных элементарным ячейкам трех типов: InSb, InAs, InP соответственно. В бинарных соединениях InSb, InAs, InP частоты  $LO$ -фононов в  $\Gamma$ -точке, согласно [4], близки к приведенным выше, что свидетельствует в пользу данной интерпретации. Относительные интенсивности линий 185, 233, 321  $\text{см}^{-1}$  определяются составом твердого раствора.

Обращает на себя внимание интенсивная широкая линия с максимумом при 142  $\text{см}^{-1}$ . В чистых InSb, InAs и InP нет оптических фононов, имеющих частоты в этой области. Мы полагаем, что обнаруженная линия с максимумом при 142  $\text{см}^{-1}$  обусловлена рассеянием света на акустических фононах с волновыми векторами на границе зоны Бриллюэна. Вследствие отсутствия трансляционной симметрии в твердом растворе в процессе КРС нарушается право отбора по импульсу. Поэтому в процессе КРС могут участвовать фононы практически с любыми волновыми векторами. Такие активированные беспорядком

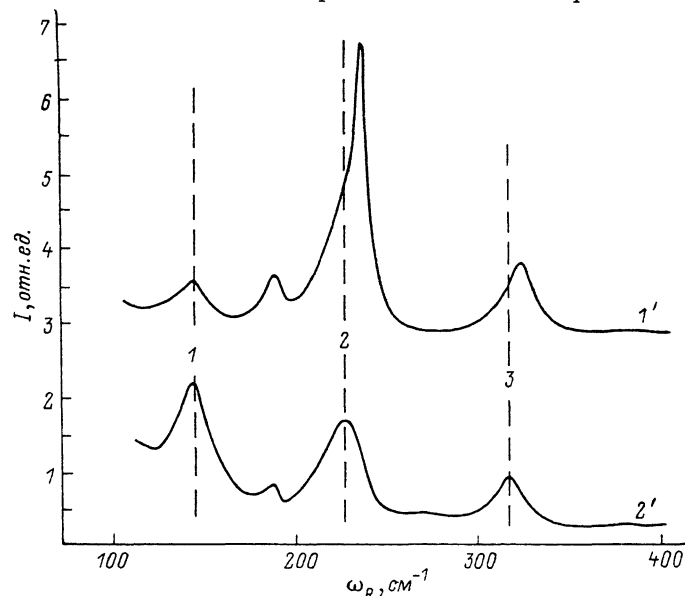


Рис. 2. Спектр КРС нелегированной пленки  $\text{InAs}_{0.83}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}$  ( $n=1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu=7600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $T=300 \text{ К}$ ).

Спектральная ширина щели 6  $\text{см}^{-1}$ .  $Z \parallel [100]$ ,  $Y \parallel [010]$ ,  $X \parallel [001]$ ; 1' —  $Z(YX)Z$ -конфигурация, 2' —  $Z(Y)Z$ -конфигурация. 1—3 соответствуют фононам: 1 —  $DALA(X, L)$ , 2' —  $DAO_2$ , 3 —  $DAO_3$ .

акустические и оптические фононы (так называемые  $DALA$ -,  $DATA$ -,  $DALO$ -,  $DATO$ -фононы) ранее наблюдались в спектрах КРС кристаллов  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  [5]. Используя данные [4] по частотам акустических фононов в InAs, InSb, InP, можно заключить, что обнаруженная линия с максимумом при 142  $\text{см}^{-1}$  обусловлена продольными акустическими фононами из  $X$ - и  $L$ -точек зоны Бриллюэна [ $DALA(X, L)$ -фононы].

Из рис. 1 видно, что линии InSb, InAs, InP имеют довольно большую ширину ( $\sim 18 \text{ см}^{-1}$ ). Кроме того, эти линии имеют асимметричную форму. Так, у линии InAs с максимумом 233  $\text{см}^{-1}$  видно низкочастотное плечо, которое можно связать с наличием дополнительной линии с максимумом 226  $\text{см}^{-1}$ . У линии InP с максимумом 321  $\text{см}^{-1}$  также наблюдается низкочастотное плечо, которое, как можно предполагать, обусловлено наличием в спектре КРС линии с максимумом  $\sim 315 \text{ см}^{-1}$ . Эти факты также могут быть объяснены нарушением трансляционной симметрии в твердом растворе и, как следствие этого, проявлением в процессе КРС оптических фононов из различных точек зоны Бриллюэна ( $DAO$ -фононы).

Как было отмечено в работе [6], активированные беспорядком фононы проявляются особенно отчетливо в  $(YY)$  конфигурации рассеяния. На рис. 2 приведен спектр КРС в конфигурации  $Z(YX)Z$ , в которой разрешено  $LO$  ( $\Gamma$ )- и запрещено  $TO$  ( $\Gamma$ )-колебание. Приведен также спектр в конфигурации

$Z(Y\bar{Y})\bar{Z}$ , в которой запрещены как  $LO(\Gamma)$ - и  $TO(\Gamma)$ -колебания. Характерно, что в конфигурации  $Z(Y\bar{Y})\bar{Z}$  линия с максимумом при  $142\text{ см}^{-1}$  становится одной из наиболее интенсивных в спектре. Четко видна также линия с максимумом при  $226\text{ см}^{-1}$ , которая проявляется в спектре  $Z(YX)\bar{Z}$  (рис. 2) в виде слабого низкочастотного плеча линии с максимумом  $233\text{ см}^{-1}$ . Линия  $315\text{ см}^{-1}$ , слабо различимая в спектре  $Z(YX)\bar{Z}$  (рис. 2) на фоне линии  $321\text{ см}^{-1}$ , также проявляется в спектре  $Z(Y\bar{Y})\bar{Z}$ .

Таким образом, в эпитаксиальном твердом растворе  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$  наблюдается трехмодовый характер спектра КРС. Значительное уширение линий КРС на оптических фононах, соответствующих элементарным ячейкам трех типов  $\text{InSb}$ ,  $\text{InAs}$ ,  $\text{InP}$ , обусловлено нарушением правил отбора КРС по импульсу вследствие отсутствия трансляционной симметрии в твердом растворе. Обнаружена широкая интенсивная линия с максимумом при  $142\text{ см}^{-1}$ , обусловленная активированными беспорядком  $LA(X, L)$ -фононами [ $DALA(X, L)$ -фононы]. Наблюдались также линии с максимумами при  $226$  и  $315\text{ см}^{-1}$ , обусловленные, по-видимому, активированными беспорядком оптическими фононами ( $DAO$ -фононы). Эти факты свидетельствуют о существенном вкладе эффекта беспорядка в формирование спектра КРС твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ .

Автор выражает благодарность А. А. Копылову за предоставление образцов, а также А. М. Минтаирову за обсуждение результатов работы.

#### Список литературы

- [1] Зингер Г. М., Ипатова И. П., Рыскин А. И. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 24—48.
- [2] Белов А. Г., Зингер Г. М., Ильин М. А., Корчагин Ю. Н., Рашевская А. И., Рыскин А. И. // ФТТ. 1980. Т. 22. В. 5. С. 1439—1442.
- [3] Баранов А. Н., Васильев В. А., Копылов А. А., Шерстнев В. В. // Тез. докл. XII Всес. конф. по физике полупроводников. Киев, 1990. Ч. 1. С. 79.
- [4] Landolt-Börnstein. New Series / Ed. by O. Madelung. Heidelberg, 1982. Gr. 3. N. 17.
- [5] Jusserand B., Sapriel J. // Phys. Rev. 1981. V. B59. N 12. P. 7194—7205.
- [6] Wang Xiao-jun, Zhany Xiu-ju // Sol. St. Commun. 1986. V. 59. N 12. P. 869—872.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получено 30.01.1991  
Принято к печати 6.02.1991

ФТП, том 25, вып. 6, 1991

## ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $\text{CuInSe}_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ ИЗ ОДНОГО ИЛИ ДВУХ ИСТОЧНИКОВ

Магомедов М.-Р. А., Абдуллаев М. А., Амирханова Дж. Х.

Тонкие пленки тройного полупроводника диселенида индия меди перспективны в солнечной фотоэнергетике [1]. Наряду с публикациями по их оптическим и фотоэлектрическим характеристикам в литературе практически отсутствуют данные о тепловых и электрических свойствах при низких температурах [2, 3]. В работе предлагаются результаты измерений теплопроводности  $\kappa$  (Вт/мК), электропроводности  $\sigma$  ( $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ), магнитосопротивления и термоэдс  $\alpha$  (мкВ/К) пленок  $\text{CuInSe}_2$ , толщиной  $0.2\text{—}2.5\text{ мкм}$  в интервале температур  $4.2\text{—}350\text{ К}$ .

Пленки были получены термическим напылением в вакууме  $10^{-5}\text{—}10^{-6}$  мм рт. ст. из одного или двух автономных источников. Исходный материал готовился сплавлением в откачанных кварцевых ампулах очищенных компонент,