

- [1] M u r p h y J.H., W a l k e r M.S., C a r r W.J. - IEEE Trans. Ser. Magn., 1974, v. 10, p. 868-871.
- [2] D u b o t s P., F e v r i e r A., R e n a r d J.C., T a v e r g n i e r J.P., G o v e r J., H o - a n g G i a K y. - IEEE Trans. Ser. Magn., 1985, v. 21, N 2, p. 177-180.
- [3] H l a s n i k I., T a k a c s S., B u r j a k V.P., M a j o r o s M., K r a j c i k J., K r e m - p a s k y L., P o l a k M., G e r g e l M., K o r n e e v a T.A., M i r o n o v a O.N., I v a n I. - Cryogenics, 1985, vol. 25, N 10, p. 558-565.
- [4] T a k a c s S. - Czechosl. J. Phys. B, v. 36, p. 524-536.
- [5] H s i a n g T.Y., F i n n e m o r e D.K. - Phys. Rev. B, 1980, v. 22, N 1, p. 154-163.
- [6] K i m Y.B., H e m p s t e a d G.F., S t r n a d A.R. - Phys. Rev. Lett., 1962, v. 9, p. 306-309.

Всесоюзный  
научно-исследовательский  
институт метрологической службы,  
Москва

Поступило в Редакцию  
31 августа 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 1

12 января 1988 г.

### ДЛИННОВОЛНОВОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОШЕНИЕ В $p$ -GaSb

А.Н. Б а р а н о в, П.Е. Д ы ш л о в е н к о,  
А.А. К о п ы л о в, В.В. Ш е р с т н е в

Антимонид галлия в настоящее время приобретает все большее значение, в том числе как основа семейства твердых растворов. Однако, несмотря на длительный период изучения, сведения об энергетическом спектре примесных состояний и дефектов в  $GaSb$  весьма ограничены [1]. Имеющиеся данные получены в основном из электрических измерений, а также из исследования спектров люминесценции вблизи края собственного поглощения. Исследование длинноволнового оптического поглощения с участием примесных уровней проводилось только в области спектра с энергией фотонов более 50 мэВ ( $\lambda < 25$  мкм) [2, 3].

В настоящей работе приводятся результаты исследования оптического поглощения в  $p$ - $GaSb$  в области спектра с длинами волн 16...500 мкм, проводившегося с целью получения информации об

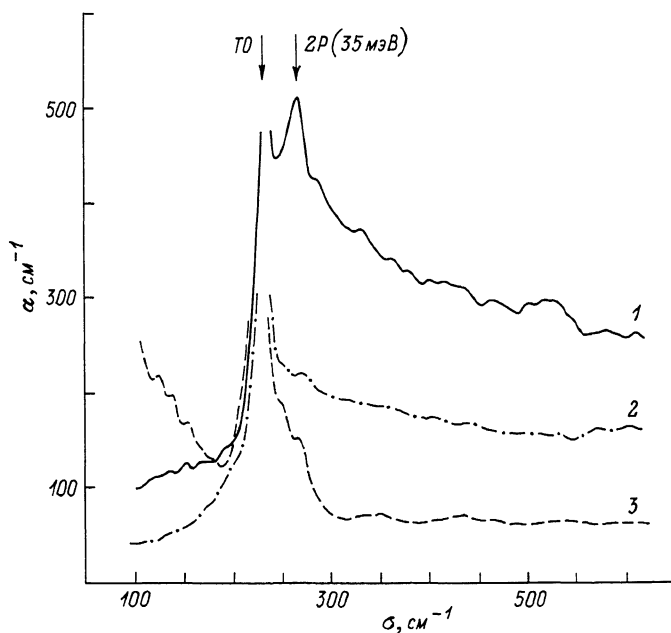


Рис. 1. Спектры оптического поглощения  $GaSb$ , полученного методом Чохральского. Температура, К: 1 - 10, 2 - 80, 3 - 295. Стрелками показано положение максимума спектра фотовозбуждения акцептора (2P), а также положение однофононной полосы (ТО).

энергетическом спектре мелких примесных уровней. Исследовались специально нелегированные образцы  $p-GaSb$  двух типов: выращенные методом Чохральского и эпитаксиальные слои, выращенные из стехиометрических растворов-расплавов  $GaSb$  в свинце.

Измерения спектров оптического пропускания проводились на длинноволновом фурье-спектрометре ЛФС-1000. Образцы приготавливались в форме плоскопараллельных пластинок толщиной 50...150 мкм с помощью шлифовки и обрабатывались в полирующем травителе. Для измерений использовался вакуумный гелиевый оптический криостат Р-118. Образцы приклеивались серебряным контактом на хладопровод криостата.

На рис. 1 показаны спектры поглощения нелегированного образца, полученного методом Чохральского. При комнатной температуре проявляется поглощение на свободных носителях заряда, а также решеточное поглощение: однофононная полоса с максимумом около  $230\text{ см}^{-1}$  и двухфононные полосы вблизи  $250$  и  $270\text{ см}^{-1}$ . Кроме того, проявляются более слабые двухфононные структуры в области  $320 \dots 360\text{ см}^{-1}$  и  $390 \dots 450\text{ см}^{-1}$ . Зависимость поглощения на свободных носителях заряда приблизительно описывается формулой  $\alpha \sim \lambda^{-40}$ .

При понижении температуры до азотной характер спектра резко изменяется. Отчетливо проявляется широкая полоса поглощения с

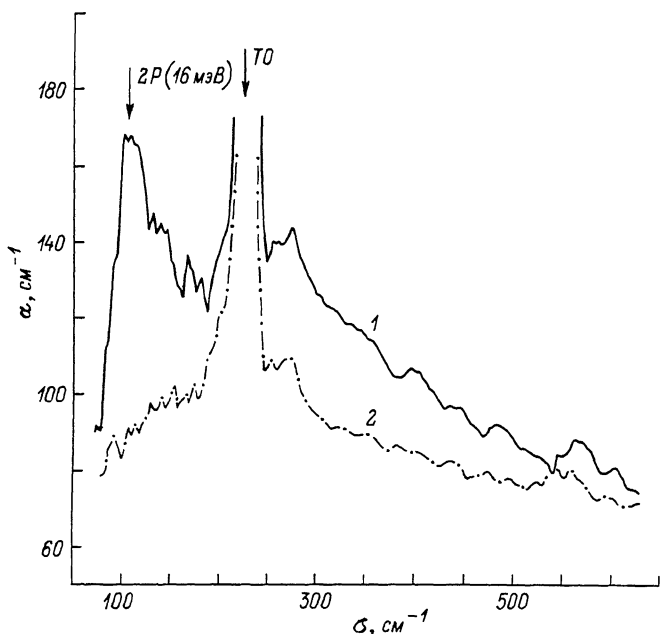


Рис. 2. Спектры оптического поглощения  $GaSb$ , полученного методом жидкофазной эпитаксии. Обозначения те же, что на рис. 1.

порогом около  $210 \text{ см}^{-1}$ . При гелиевых температурах край становится резче, а поглощение в полосе возрастает в  $1.5 \dots 2$  раза. Резкое увеличение поглощения при понижении температуры, а также характерная форма полосы говорят о том, что она обусловлена процессами фотоионизации и фотовозбуждения акцепторных уровней.

Для того чтобы определить энергию ионизации наблюдаемого уровня, воспользуемся результатами теоретического расчета [4]. Максимум спектра фотовозбуждения приходится на  $260 \text{ см}^{-1}$  (рис. 1), что соответствует  $\hbar\omega \approx 32 \text{ мэВ}$ . Известно, что наиболее сильные линии фотовозбуждения соответствуют переходам  $1S_{3/2} \rightarrow 2P_{5/2} (\Gamma_8)$  и  $1S_{3/2} \rightarrow 2P_{5/2} (\Gamma_7)$  (см., например, [4]). В соответствии с расчетом [4] энергии связи уровней  $2P_{5/2} (\Gamma_8)$  и  $2P_{5/2} (\Gamma_7)$  соответственно равны  $3.59$  и  $2.61 \text{ мэВ}$ . В полученных спектрах не удастся наблюдать отдельные линии фотовозбуждения, поэтому в качестве энергии связи  $2p$ -уровней выберем среднее указанных значений, что составляет  $3.1 \text{ мэВ}$  с неопределенностью  $0.5 \text{ мэВ}$ . Таким образом, энергия ионизации наблюдаемого акцептора  $E_A = 35 \pm 1 \text{ мэВ}$ .

На рис. 2 изображены спектры поглощения образца  $p$ - $GaSb$ , полученного методом жидкофазной эпитаксии. Наиболее важной особенностью данных спектров является появление при гелиевой температуре полосы поглощения в длинноволновой области с порогом вблизи  $80 \text{ см}^{-1}$ . Эта полоса характеризуется сильной температурной зависимостью и уже при температуре жидкого азота, как видно

на рис. 2, практически не проявляется. Характерная форма полосы, а также рост поглощения с понижением температуры свидетельствуют о том, что она обусловлена процессами фотовозбуждения и фотоионизации акцепторов. Энергию ионизации уровня, ответственного за полосу, определим исходя из тех же соображений, что и для уровня 35 мэВ. Поскольку максимум спектра фотовозбуждения приходится на  $105 \text{ см}^{-1}$ , то с точностью до расщепления уровней  $2 P_{5/2} (\Gamma_8)$  и  $2 P_{5/2} (\Gamma_7)$  получаем энергию ионизации  $E_A = 16 \pm \pm 1$  мэВ.

В спектрах на рис. 2 также проявляется поглощение, связанное с уровнем 35 мэВ, обсуждавшимся выше. Из сравнения спектров на рис. 1 и 2 видно, что концентрация оптически активных центров с уровнем 35 мэВ в эпитаксиальных образцах примерно на порядок меньше, чем в образцах, полученных методом Чохральского.

Известно, что дырочная проводимость нелегированного  $GaSb$  определяется наличием природного акцептора, представляющего собой по данным [5, 6] стабильный вакансионный центр типа  $V_{Ga}GaSb$ . Для энергии первого зарядового состояния этого акцептора приводятся значения 34 мэВ [2], 34.5 мэВ [7], 38 мэВ [6]. Наблюдаемый нами в образцах, выращенных по методу Чохральского, уровень  $35 \pm 1$  мэВ близок по энергии к указанным выше значениям и может быть отождествлен с первым зарядовым состоянием природного акцептора.

Наличие в образцах, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, уровня  $16 \pm 1$  мэВ свидетельствует о присутствии в них мелкого однозарядного акцептора. Природа этого акцептора до настоящего времени не установлена. Существование мелкого акцептора в  $p-GaSb$  отмечалось ранее в ряде работ. Так, в [8] приводятся данные по фотолуминесценции (ФЛ) образцов  $GaSb$ , нелегированных и легированных  $Ge$  и  $Si$ . Во всех трех случаях наблюдался пик ( $D^0, A^+$ ), соответствующий, по мнению авторов, излучательной рекомбинации на донорно-акцепторных парах. Получаемая из этих данных энергия ионизации акцептора составляет около 15.5 мэВ и близка к наблюдаемой нами. В [6] указывалось на отсутствие проявлений уровня мелкого акцептора в спектрах ЭПР образцов, выращенных из галлиевых расплавов, в то время как в спектрах образцов, выращенных из сурьмянистых расплавов, наблюдался пик, соответствующий энергии ионизации мелкого акцептора 17 мэВ. Появление мелкого акцептора связывалось с наличием избыточных галлиевых вакансий. По данным [9], в компенсированных образцах, выращенных из расплава, обогащенного  $Sb$ , в спектрах ФЛ наблюдалась полоса, соответствующая мелкому акцептору с энергией ионизации около 13 мэВ, причем присутствие акцептора связывалось с наличием  $Si$ . Отметим, что имеющаяся в настоящее время информация об уровне мелкого акцептора получена из данных по ФЛ. Надежная интерпретация этих данных часто затруднена. В то же время дополнение данных по ФЛ результатами исследования длинноволнового оптического поглощения позволяет со всей определенностью констатировать наличие уровня мелкого акцептора и установить для него достаточно

надежное значение энергии  $16 \pm 1$  мэВ. Приведенные результаты представляют собой первое прямое наблюдение мелких акцепторных уровней в *GaSb*, что позволило однозначно определить их энергетическое положение.

Авторы выражают благодарность Ю.П. Яковлеву за полезные обсуждения.

### Л и т е р а т у р а

- [1] L a n d o l t - B ö r n s t e i n. New Series, Group III, v. 17, Subvol. a, Physics of Group IV Elements and III-V Compounds (Edited by O. Madelung). Springer-Verlag, 1982.
- [2] J o h n s o n E.J., F a n H.Y. - Phys. Rev., 1965, v. 139, A1991.
- [3] J o h n s o n E.J., F i l i n s k i I., F a n H.Y. - Proc. Int. Conf. Phys. Semicond. Exeter, 1962.
- [4] B a l d e r e s c h i A., L i p a r i N.O. - Phys. Rev. B, 1974, v. 9, p. 1525.
- [5] V a n D e r M a u l e n Y.I. - J. Phys. Chem. Sol., 1967, v. 28, p. 25.
- [6] Б а г р а е в Н.Т., Б а р а н о в А.Н., В о р о н и н а Т.И., Т о л п а р о в Ю.Н., Я к о в л е в Ю.П. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 2, с. 117-121.
- [7] J a k o w e t z W., R ü h l e W., B r e u n i n g e r K., P i l k u h n M.N. - Phys. Status Solidi (a), 1972, v. 12, p. 169.
- [8] J a k o w e t z W., B a r t h r u f f D., B e n z K.W. - Inst. Phys. Conf. Ser., 1977, v. 33a, p. 41.
- [9] Б а р а н о в А.Н., В о р о н и н а Т.И., З и м о г о р о в а Н.С., К а н с к а я Л.М., Я к о в л е в Ю.П. - ФТП, 1985, т. 19, № 9, с. 1676-1679.

Ленинградский  
электротехнический институт  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию  
22 сентября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 1

12 января 1988 г.

### ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПОСТОЯННОЙ ЭДС ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Н.В. Д е ж к у н о в

Широко известны различные принципы преобразования переменных механических напряжений (например, ультразвуковых) в переменную ЭДС.