

ИССЛЕДОВАНИЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ,
ЛЕГИРОВАННОГО ХРОМОМ, МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОПОГЛОЩЕНИЯ

В. С. Вавилов, В. Б. Стопачинский, Фан ба Нян

Как известно, кристаллы GaAs, полученные по методу Чохральского или Бриджмена без специального легирования, обычно содержат мелкие доноры, концентрация которых может достигать 10^{17} см⁻³. Поэтому эти кристаллы низкоомны. Известно также, что хром в GaAs является глубоким акцептором, и при легировании хромом может быть получена высокая степень компенсации доноров акцепторами. В силу этого введение хрома в GaAs позволяет получать высокоомные кристаллы, сопротивление которых близко к сопротивлению собственного GaAs в широком интервале температур (при комнатной температуре ρ может достигать $10^8 - 10^9$ ом. см).

Легированные хромом кристаллы GaAs исследовались в целом ряде работ /I-12/. Измерения фотолюминесценции однозначно показывали, что энергия максимума примесной полосы излучения, связанной с Cr, равна $\hbar\omega_{\max} \approx 0,8$ эв /2,6,7,10,11/, причем она слабо зависит от температуры /11/. Эти данные следует считать надежными. С другой стороны, энергия максимума примесного излучения всегда меньше энергии активации того центра (глубокого), который ответственен за это излучение /13/. Отсюда следует, что энергия активации*) хрома в GaAs должна быть больше 0,8 эв. Однако, по данным работ /1,3,4,5,7,8,9,10,12/, посвященных определению энергии активации Cr в GaAs, последняя равна $0,72 + 0,8$ эв.

*) Здесь и далее под энергией активации следует понимать разность между шириной запрещенной зоны E_g и энергией связи примеси: $E_A = E_g - |E_1|$.

Цель настоящей работы - исследование примесных уровней в $GaAs$, легированном Cr , методом электропоглощения. Важным преимуществом этого метода является то, что максимум в спектре электропоглощения соответствует энергии активации центра /14,15/, и что этот метод обладает высокой чувствительностью и разрешением. Все это позволяет точно определить энергию активации центра.

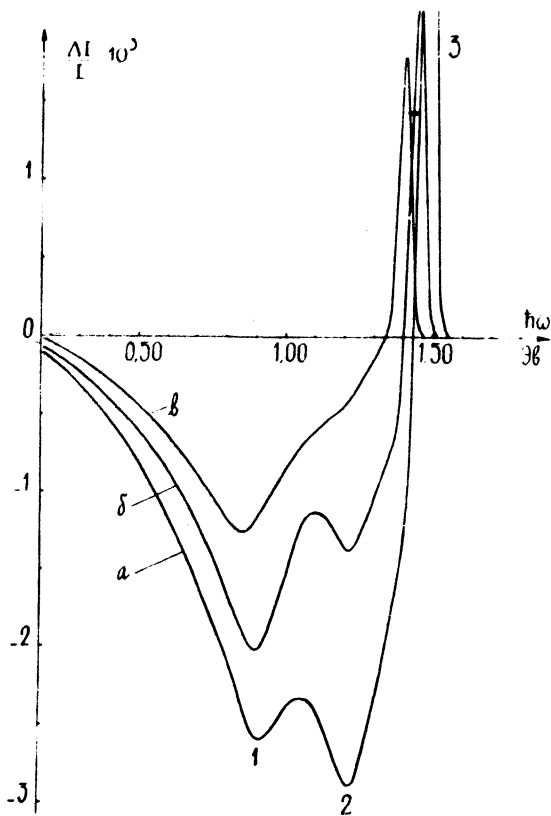
Для исследования использовались кристаллы $GaAs$, полученные по методу Бриджмена. При легировании хромом степень компенсации настолько велика, что кристаллы при $300^{\circ}K$ имеют удельное сопротивление порядка 10^8 ом.см. Тип проводимости электронный.

Измерения проводились на монохроматоре ИКС-12. Образец помещался между двумя кварцевыми пластинками, на которые была напылена пленка SnO_2 . Между пленкой и образцом прокладывалась полиэтилентерефталатная пленка ("Mylar"). Воздушные зазоры заполнялись силиконовым маслом. Свет от монохроматора проходил сквозь электроды (пленки SnO_2), в перпендикулярном к ним направлении, поэтому здесь вектор поляризации света \vec{e} всегда направлен перпендикулярно к электрическому полю.

На рис. 1,а представлен спектр электропоглощения, снятый при температуре жидкого азота. В области края собственного поглощения хорошо виден узкий максимум (3) при $\hbar\omega \approx 1,47$ эв. Он связан с переходами из валентной зоны на донорный уровень $E_c - 0,04$ эв. В области более низких энергий наблюдались отрицательные пики при $\hbar\omega = 0,92$ эв (пик 1) и $\hbar\omega = 1,23$ эв (пик 2).

Нами были проведены измерения при различных температурах от $77,3^{\circ}K$ до $300^{\circ}K$. Эти измерения показывают, что при повышении температуры амплитуда пиков уменьшается, что связано с уменьшением электрического поля в образце. Кроме того, изменяется и отношение амплитуд - пик 2 гораздо быстрее ослабляется, чем пик 1; рис. 1, б. Наряду с уменьшением величины сигнала наблюдается смещение пиков в длинноволновую сторону вследствие уменьшения ширины запрещенной зоны.

При комнатной температуре пик 2 лишь едва заметен, а пик 1 наблюдается при $\hbar\omega = 0,87$ эв (рис. 1, в). Увеличение температуры не вызывает значительного уширения спектра. Это объясняется тем, что полуширина пиков 1 и 2 (порядка 0,3 эв) намного больше kT ($kT = 0,025$ эв при $290^{\circ}K$).



Р и с. 1. Спектры примесного электропоглощения в GaAs, легированном Cr, при различных температурах.

а - $T = 77,3^{\circ}\text{K}$; б - $77,3^{\circ}\text{K} < T < 300^{\circ}\text{K}$; в - $T = 300^{\circ}\text{K}$.

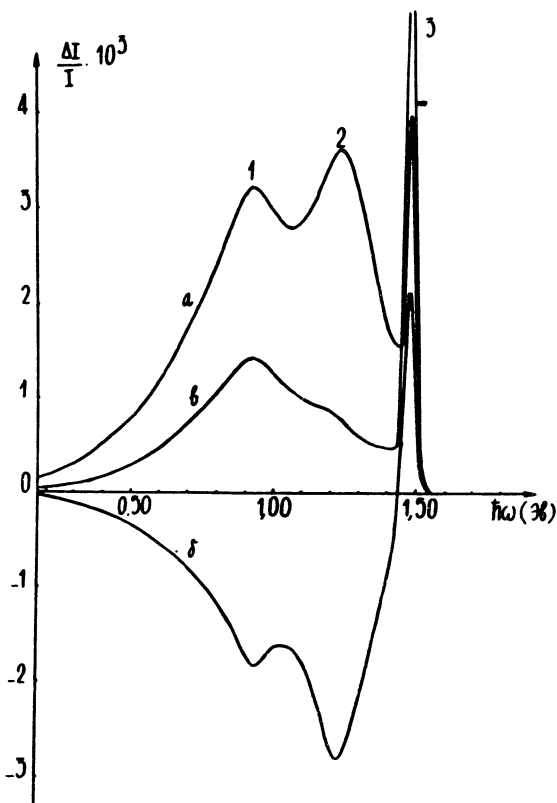
Из полученных результатов следует, что при температуре жидкого азота пик 1 связан с переходами с уровня $E_V + 0,59$ эв в зону проводимости, а пик 2 - с переходами из валентной зоны на уровень $E_C - 0,28$ эв. Действительно, в исследуемых образцах GaAs уровень Ферми расположен глубоко в верхней половине запрещенной зоны. Поэтому сигнал в области $\hbar\omega \approx 0,59$ эв при $77,3^\circ\text{K}$ и $\hbar\omega \approx 0,56$ эв при 300°K должен отсутствовать. Резкое уменьшение пика 2 при повышении температуры связано с заполнением электронами уровня $E_C - 0,28$ эв, что подтверждает предложенную интерпретацию.

В соответствии с литературными данными уровень $E_V + 0,59$ эв (при $77,3^\circ\text{K}$) или $E_V + 0,56$ эв (при 300°K) мы приписываем хрому. Природа уровня $E_C - 0,28$ эв не ясна. Отметим, что этот уровень при $77,3^\circ\text{K}$ дает большой сигнал, и что он наблюдается и в легированном GaAs /16/. По-видимому, этот уровень связан с дефектами решетки.

Нами были проведены измерения электропоглощения поляризованного света. Для этого достаточно пропускать свет не сквозь электроды, а параллельно им (т.е. в торце образца).

На рис. 2 представлены спектры электропоглощения; здесь $\alpha - \vec{e} \parallel \vec{F}$; $\delta - \vec{e} \perp \vec{F}$, ν - свет не поляризован. Как видно из рисунка, знак сигнала, связанного с мелким уровнем $E_C - 0,04$ эв, не зависит от относительной ориентации векторов \vec{e} и \vec{F} , и этот сигнал положителен. Иная ситуация в случае глубоких центров: при $\vec{e} \parallel \vec{F}$ пики 1 и 2 положительны, а при $\vec{e} \perp \vec{F}$ - отрицательны. Положительный знак пиков 1 и 2 говорит об их "аномальном" поведении в электрическом поле - коэффициент поглощения уменьшается под действием внешнего электрического поля. Наряду с изменением знака пиков наблюдается и изменение величины сигнала, что особенно заметно для пика 1: в случае $\vec{e} \parallel \vec{F}$ величина сигнала этого пика в полтора раза больше, чем в случае $\vec{e} \perp \vec{F}$. В результате наложения положительного и отрицательного сигналов при измерении на неполяризованном свете получается усредненная картина (кривая ν); при этом пики 1 и 2 положительны; пик 2 значительно слабее пика 1. Отметим, что несмотря на изменение знака и величины сигналов, энергетическое положение пиков сохраняется неизменным.

В работе /14/, посвященной теории примесного электропоглощения для электронных переходов в "свою" зону, было показано, что в случае $\vec{E} \parallel \vec{F}$ с ростом электрического поля основной



Р и с. 2. Спектры электропоглощения поляризованного света. а - $\vec{E} \parallel \vec{F}$; б - $\vec{E} \perp \vec{F}$; в - свет неполяризован.

пик в спектре электропоглощения смещается в коротковолновую сторону. Однако в нашем эксперименте (мы имеем дело с переходами в "чужую" зону) смещения основного пика не было обнаружено даже при увеличении электрического поля в несколько десятков раз.

В заключение отметим, что наши данные об энергии активации хрома в GaAs $E_A = 0,92$ эв (при 77,3°K) хорошо согласуются с данными по фотолуминесценции. Действительно, в пренебрежении электрон-фотонным взаимодействием энергия активации глубокого центра совпадает с коротковолновой границей полосы излучения /13/. Тогда расстояние $E_A - \hbar\omega_{\max}$ ($\hbar\omega_{\max}$ - энергия фотонов в максимуме излучения) должно быть порядка полуширины полосы излучения. В нашем случае $E_A - \hbar\omega_{\max} = 0,92 - 0,8 = 0,12$ эв. С другой стороны, полуширина полосы излучения, согласно работе /11/, равна $0,1 + 0,12$ эв, т.е. приблизительно равна $E_A - \hbar\omega_{\max}$.

Поступила в редакцию
2 марта 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. G. R. Cronin, R. W. Haisty. J. Electrochem. Soc., 111, 874 (1964).
2. W. J. Turner, G. D. Pettit. Bull. Amer. Phys. Soc., 9, 269 (1964).
3. R. W. Haisty, G. R. Cronin. Proc. 7-th Int. Conf. on Phys. of Semicond., 1161, Paris - Dunod, 1964.
4. C. E. Jones, A. R. Hilton, J. Electrochem. Soc., 113, 504 (1966).
5. R. F. Broom. J. Appl. Phys., 38, 3483 (1967).
6. E. W. Williams, D. M. Blacknall. Trans. Metall., AIME, 239, 387 (1967).
7. G. A. Allen. Brit. J. Appl. Phys. (Ser2), 1, 593 (1968).
8. P. R. Selway, J. Franks. Brit. J. Appl. Phys. (Ser.2), 1, 25, (1968).
9. D. R. Heath, P. R. Selway, C. C. Tooke. Brit. J. Appl. Phys. (Ser 2), 1, 29 (1968).
10. Г. А. Егiazарьян, В. И. Шурыгин, В. С. Руоин, В.И. Стафеев. ФТП, 3, 1652 (1969).
11. А. Т. Гореленко, Б. В. Царенкоя, Н. Г. Чиабринвили. ФТП, 5, 115 (1971).

12. Б. В. Корнилов, В. А. Вилькоцкий, Г. В. Александрова, Г. Н. Терешко, Т. П. Царевская. ФТП, 5, 144 (1971).
13. H. V. Webb, Phys. Rev., 185, 1116 (1969).
14. В. С. Виноградов. Препринт ФИАН № III, М., 1971 г.
15. В. С. Иванов, В. Б. Стопачинский, В. А. Чаплин. ФТП, 5, 101 (1971).
16. Е. В. Соловьева, Д. Ф. Лотов, В. М. Якуб. ФТП, 5, 163 (1971).