

РЕЗОНАНСНОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА НА  
ПОВЕРХНОСТНЫХ ФОНОНАХ В КРИСТАЛЛЕ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

В. С. Горелтик, В. Б. Дивак, М. М. Сушинский

УДК 535.361

Впервые обнаружено проявление поверхностных фононов в спектре комбинационного рассеяния света в кристалле фосфида галлия толщиной несколько миллиметров.

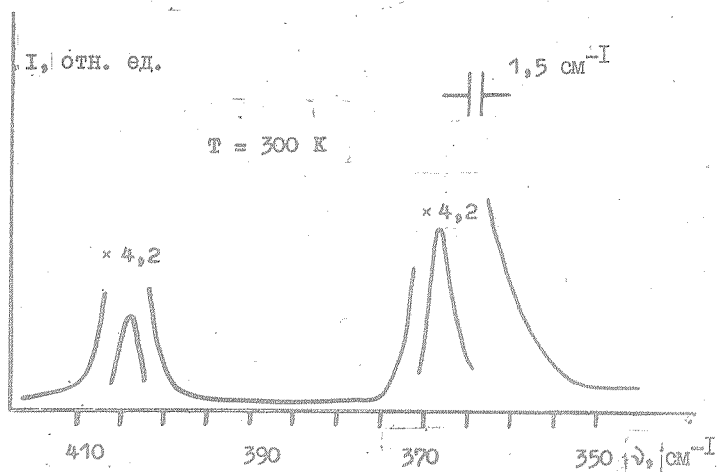
Метод комбинационного рассеяния света (КР) позволяет получить информацию о спектре поверхностных колебательных состояний как тонких пленок, так и достаточно крупных монокристаллических образцов. Однако к настоящему времени этим методом удалось исследовать лишь тонкие кристаллические пленки /1-4/.

В настоящей работе ставилась задача получения спектров КР на поверхностных фононах в макроскопическом образце фосфида галлия. Для возбуждения спектра КР использовалась линия 5105 Å лазера на парах меди, работающего с частотой следования импульсов 10 кГц. Эта линия попадает в область поглощения кристалла фосфида галлия, обусловленную непрямыми межзонными переходами (глубина проникновения света в кристалл составляет 20 - 30 мкм). В этом случае условия для наблюдения КР на поверхностных фононах улучшаются, так как при этом эффективное сечение рассеяния возрастает, а вклад в рассеяние от объема кристалла уменьшается вследствие малой глубины проникновения света в кристалл.

В экспериментах использовалась известная схема "на отражение". При этом рассеянное излучение собиралось в направлении, нормальном к поверхности кристалла. Лазерное излучение падало на поверхность кристалла под углом  $19^\circ$ . В соответствии с законом сохранения квазиимпульса, в этом случае волновой вектор квази-

частицы, возникающей в элементарном акте рассеяния,  $\bar{k} \approx 4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует фононному участку дисперсионной кривой поверхностных состояний. Регистрация спектров КР осуществлялась на спектрометре ДФС-12 с последующим усилением сигнала на резонансном усилителе У2-6 с синхронным детектором В9-2. Опорный импульс для синхронизации создавался частью лазерного излучения, направленного на фотоприемник.

Исследуемый кристалл представлял собой ориентированный образец размерами  $5 \times 5 \times 10 \text{ мм}^3$ , одна из плоскостей которого была (111). Для такой ориентации интенсивность КР на продольных фононах при исследовании по схеме "на отражение" оказывается существенно меньшей, чем для ориентации (100). Это позволяет улучшить условия для наблюдения КР на поверхностных фононах, так как частота КР на этих фононах в случае фосфида галлия очень близка к частоте LO-фонона. Лазерный луч фокусировался на поверхность кристалла в виде широкого вытянутого пятна для предотвращения разогревания образца и разрушения поверхности. Рассеянное излучение собиралось линзой с фокусным расстоянием 110 мм на щель спектрометра. Исследование КР проводилось при комнатной и низких температурах кристалла. При этом

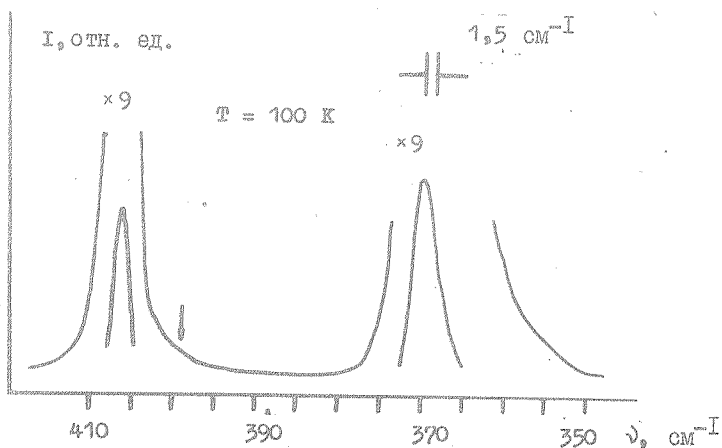


Р и с. 1. Спектр комбинационного рассеяния фосфида галлия, полученный при комнатной температуре

исследуемый образец помещался в одном случае в вакуумный азотный криостат, а в другом случае непосредственно в оптический дьюар с азотом.

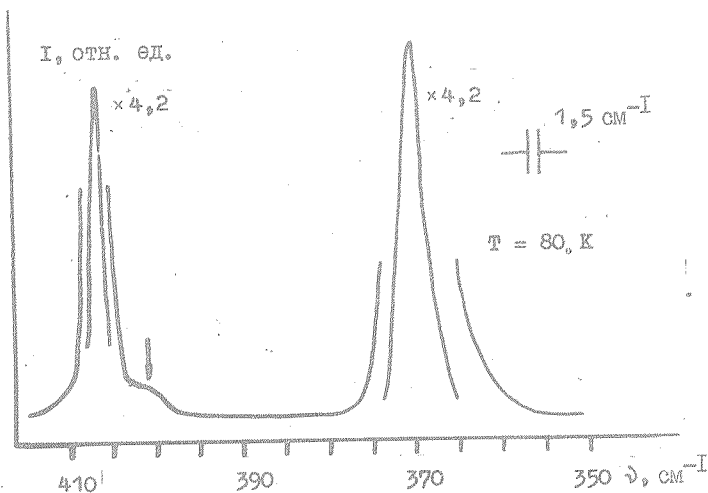
На рис. 1 показан вид спектрометра КР кристалла фосфида галлия, полученного при комнатной температуре, в области  $\Theta_0$ ,  $\Theta_0$ -фононов. При этом обнаруживаются два максимума, соответствующие объемным поперечным и продольным колебаниям кристаллической решетки. Контур  $\Theta_0$ -колебания оказывается довольно симметричным, и здесь не обнаруживается каких-либо признаков поверхностного состояния.

На рис. 2 показаны соответствующие спектры, полученные при низкой температуре кристалла ( $T \approx 100$  K), помещенного в вакуумный азотный криостат. На этом рисунке заметна небольшая асимметрия в области  $\Theta_0$ -колебания со стороны низких частот (показана стрелкой на рис. 2).



Р и с. 2. Спектр комбинационного рассеяния фосфида галлия, полученный при низкой температуре кристалла (100 K) в азотном криостате

Для кристалла, помещенного в дьюар с азотом, соответствующая спектрограмма показана на рис. 3. На этой спектрограмме, кроме максимумов  $\text{LO}$ ,  $\text{TO}$ -колебаний, присутствует дополнительный слабый максимум (показан стрелкой) в непосредственной близости от  $\text{LO}$ -максимума.



Р и с. 3. Спектр комбинационного рассеяния фосфида галлия для кристалла, помещенного в дьюар с азотом ( $T = 80$  К)

Перейдем к анализу полученных результатов. Согласно теории /5/, совместное решение уравнений Максвелла с учетом граничных условий на поверхности раздела двух сред дает закон дисперсии поверхностных поляритонов

$$K^2 = \frac{\Omega^2}{c^2} \frac{\epsilon_1 \epsilon_2(\Omega)}{\epsilon_1 + \epsilon_2(\Omega)}, \quad (I)$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2(\Omega)$  — диэлектрические проницаемости контактирующих сред. Уравнение (I) без учета запаздывания ( $c \rightarrow \infty$ ) позволяет получить значение частоты поверхностного фонона /5/ при больших значениях волнового вектора  $K$ :

$$\Omega_S = \Omega_{TO} \left( \frac{\epsilon_1 + \epsilon_0}{\epsilon_1 + \epsilon_\infty} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Здесь  $\Omega_{TO}$  - частота поперечного колебания кристалла, а  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_\infty$  - его статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости. Для фосфида галлия при комнатной температуре имеет место:  $\epsilon_0 = 11,02$  и  $\epsilon_\infty = 9,075/6/$ . Частоты поперечного и продольного колебаний есть:  $\Omega_{TO} = 367 \text{ см}^{-1}$ ,  $\Omega_{LO} = 404 \text{ см}^{-1}$  (при этой же температуре). Формула (2) для рассеяния на границе воздух - фосфид галлия ( $\epsilon_1 = 1$ ) дает значение частоты поверхностного фонона  $\Omega_S = 401 \text{ см}^{-1}$ . Из приведенного спектра (рис. 1) следует, что наблюдаемая ширина контура линий КР, обусловленной LO-фононом, составляет около  $3 \text{ см}^{-1}$ , т.е. в данном случае расстояние от расчетного значения частоты поверхностного фонона до частоты LO-фонона оказывается сравнимым с наблюдаемой шириной LO-максимума. Это объясняет отсутствие проявления поверхностных фононов на обсуждаемом спектре.

При температуре жидкого азота для фосфида галлия имеет место:  $\epsilon_0 = 10,88$ ,  $\epsilon_\infty = 8,963/6/$ ,  $\Omega_{TO} = 370 \text{ см}^{-1}$  и  $\Omega_{LO} = 407 \text{ см}^{-1}$ . Для частоты поверхностного фонона из (2) получаем  $\Omega_S = 404 \text{ см}^{-1}$ . Наблюдаемая ширина LO-максимума в этом случае составляет  $2 \text{ см}^{-1}$ , что оказывается сравнимым с величиной  $\Delta = \Omega_{LO} - \Omega_S = 3 \text{ см}^{-1}$ . Наблюдаемая на рис. 2 слабая асимметрия в области LO-колебания может быть объяснена как проявление поверхностного состояния.

Для кристалла, непосредственно контактирующего с азотом ( $\epsilon_1 = 1,445/7/$ ), значение частоты поверхностного фонона  $\Omega_S = 402,5 \text{ см}^{-1}$ . Соответственно величина  $\Delta = \Omega_{LO} - \Omega_S = 4,5 \text{ см}^{-1}$  становится больше наблюдаемой ширины LO-максимума ( $1,8 \text{ см}^{-1}$  при 80 К). Как видно из рис. 3, в этом случае обнаруживается явная асимметрия линии LO-фонона, которую можно интерпретировать как проявление поверхностного фонона в спектре КР. Интенсивность рассеяния на поверхностном фононе составляет  $6 \cdot 10^{-3}$  от интенсивности соответствующего TO-максимума.

Таким образом, применение жидкого азота, диэлектрическая проницаемость которого выше диэлектрической проницаемости воздуха, улучшает условия для наблюдения КР на поверхностных фоно-

нах. В дальнейшем представляет интерес сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими выводами /8,9/ об относительной интенсивности поверхностного и объемного КР в схеме "на отражение".

Поступила в редакцию  
7 декабря 1981 г.

#### Л и т е р а т у р а :

1. D. J. Evans, S. Ushioda, J. D. McMullen, Phys. Rev. Lett., 31, 369 (1973).
2. J. Y. Prieur, S. Ushioda, Phys. Rev. Lett., 34, 1012(1975).
3. J. B. Valdez, S. Ushioda, Phys. Rev. Lett., 18, 1098(1977).
4. Е. А. Виноградов и др., ЖЭТФ, 78, 1030 (1980).
5. В. М. Агранович, УФН, 115, 199 (1975).
6. А. Н. Тиктин, В. Г. Прокопенко, А. Д. Яськов, ФТП, 10, 2053 (1976).
7. Таблицы физических величин, Справочник, Под ред. акад. И. К. Кикоина, Атомиздат, М., 1976 г., с. 326.
8. В. М. Агранович, Т. А. Лескова, ФТТ, 19, 804 (1977).
9. V. J. Chen, E. Burstein, D. L. Mills, Phys. Rev. Lett., 34, 1516 (1975).