

НАБЛЮДЕНИЕ СУРФОНОВ В СПЕКТРАХ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ (GaAs)

В.А.Зуев, Д.В.Корбуток, В.Г.Литовченко

Обнаружены две нуль-фононные полосы низкотемпературной близкраевой поверхностной фотолюминесценции GaAs (1,515 и 1,477 эв) и два фононных повторения последней. Определены энергия и среднее число эмитируемых поверхностных фононов (сурфонов), сдвиг Франка – Кондона и другие характеристики электрон-фононного взаимодействия на поверхности.

1. В последнее время большой интерес вызывает изучение поверхностных фононов (сурфонов) различных типов. В частности, для кристаллов с сильной долей полярной связи были теоретически предсказаны поверхностные поляритоны [1 – 3]. Благодаря наличию дальнедействующих кулоновских сил, изменяющих колебательный спектр поверхностных участков решетки, в этих кристаллах существенным оказывается вклад поверхностных осцилляторов. Для определения энергии сурфонов в обычных монокристаллах используют либо метод полного внутреннего отражения [4], либо метод комбинационного рассеяния [5, 6].

Обнаружение излучательной рекомбинации на поверхности полупроводников [7] дает новые возможности для изучения сурфонов методом фотолюминесценции, возбуждаемой лазерным источником света (ЛФЛ). В настоящей работе приводятся первые данные о проявлении сурфонов в спектрах ЛФЛ.

2. Линии фононного повторения наиболее хорошо разрешались среди полос примесей фотолюминесценции в легированных теллуром или кремнием образцах n -GaAs ($n_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3}$), покрытых слоем Si_3N_4 или Ge_3N_4 (нанесенным газотранспортным методом при $550 - 600^\circ \text{C}$), а также в эпитаксиальных пленках высокой чистоты ($n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$).

Образцы подвергались травлению, а также низкодозовому ($D = 10^7 \text{ рад}$) γ -облучению. Люминесценция возбуждалась с помощью стационарного гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$) с максимальной интенсивностью $10^{18} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{сек}$. Использование подобных лазерных источников света позволяет: 1) возбуждать весьма тонкий ($\leq 0,5 \text{ мкм}$) слой GaAs, что делает соизмеримым вклад в ЛФЛ объемной и поверхностной люминесценции, 2) детектировать свечение даже при малой плотности излучательных центров, 3) проводить измерения при отсутствии изгиба зон на освещенной поверхности, т.е. при существенной гомогенизации условий на поверхности.

Сигнал ЛФЛ фиксировался со стороны освещаемой поверхности образца и анализировался с помощью спектрометров ИКС-12, ИСП-51 и фотоумножителя ФЭУ-62. Измерения проводились в диапазоне T от 4,2 до 50° K .

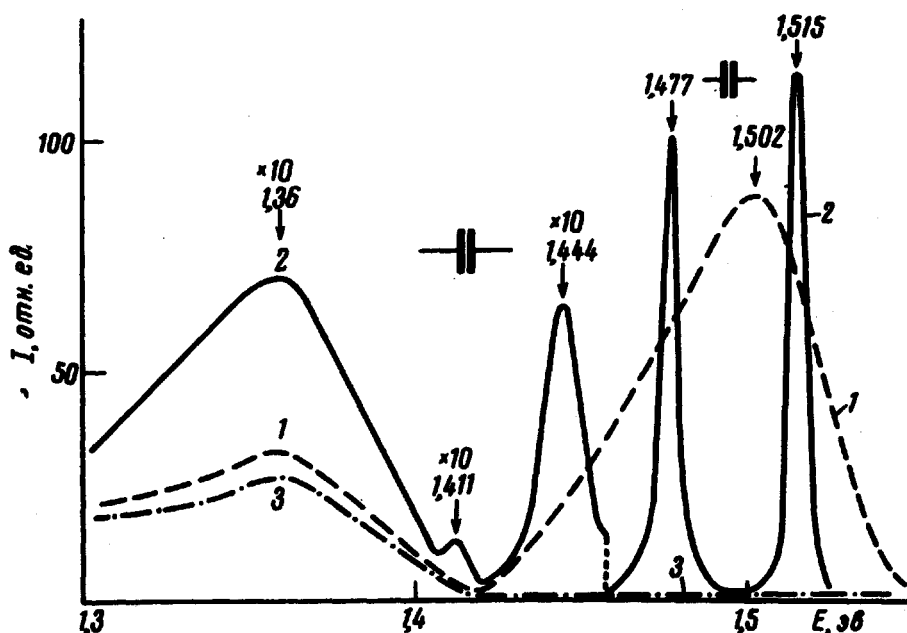


Рис. 1. Спектры ЛФЛ легированных образцов GaAs при $4,2^\circ \text{ K}$: 1 — до нанесения слоя Si_3N_4 ; 2 — после нанесения; 3 — после травливания пленки Si_3N_4 и слоя GaAs ($\leq 100 \text{ \AA}$)

3. На рис. 1 изображен спектр ЛФЛ, полученный для легированных образцов GaAs при $4,2^\circ \text{ K}$. До нанесения слоя Si_3N_4 наблюдаются две широкие полосы излучения $1,502$ и $1,36 \text{ эв}$, причем их спектральные характеристики не зависели от поверхностных обработок, что указывает на объемное происхождение этих полос, хорошо изученных в литературе.

Нанесение слоя Si_3N_4 приводило к небольшому изменению интенсивности полосы $1,36 \text{ эв}$ и к гашению полосы $1,502 \text{ эв}$ (аналогичный результат был получен для системы $\text{SiO}_2\text{-GaAs}$ в [8]). Одновременно в области энергий $1,4 - 1,52 \text{ эв}$ появлялись новые полосы — I_1 ($1,515 \text{ эв}$),

I_2 (1,477 эв), I_3 (1,444 эв) и I_4 (1,411 эв). Стравливание слоя Si_3N_4 не влияло на форму спектра в то время как стравливание даже очень тонкого ($< 100 \text{ \AA}$) слоя GaAs приводило к гашению всех четырех полос, что указывает на их поверхностную природу. Полоса I_1 , связываемая нами с поверхностными экситонами, обсуждается в отдельной работе. Ниже обсудим поведение полос I_2, I_3, I_4 . Названные полосы, по-видимому, связаны с излучательной рекомбинацией через мелкий поверхностный центр структурного происхождения (типа комплекса "поверхностная вакансия + N"). На это указывает возрастание данных полос при низкодозовом γ -облучении, которое приводит к возникновению, главным образом, поверхностных структурных дефектов.

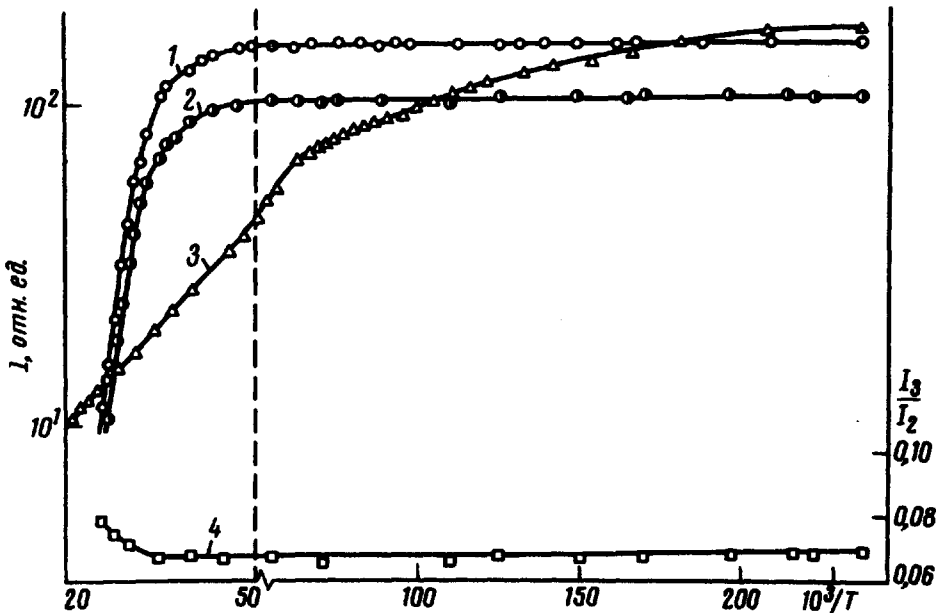


Рис. 2. Температурная зависимость интенсивности полос поверхностной люминесценции: 1 - I_2 (1,477 эв); 2 - I_3 (1,444 эв); 3 - I_1 (1,515 эв); 4 - I_3/I_2

На рис. 2 изображена температурная зависимость интенсивности полос I_2 (кривая 1), I_3 (кривая 2), I_1 (кривая 3), а также отношения I_3/I_2 (кривая 4). При увеличении T ослабление интенсивности пиков I_2 и I_3 происходило почти в одинаковой степени, в то время как температурная зависимость пика I_1 существенно отличалась от зависимости пиков I_2 и I_3 , причем, уже при $T \leq 20^\circ \text{K}$ имело место резкое температурное гашение пика I_1 при неизменности пиков I_2 и I_3 .

Для сравнения был измерен спектр ЛФЛ для эпитаксиальной пленки GaAs . Наблюдались две полосы объемного происхождения 1,488 и 1,452 эв, параметры (энергетическое положение и интенсивность) которых не изменялись при использовании различных поверхностных обработок. Полученные величины отношения интенсивности этих полос ($\bar{N}_v = 0,044$) и расстояния между ними ($36 \pm 0,5 \text{ мэв}$), соответствующего энергии объемного LO фонона, совпадают с имеющимися в литературе.

4. Форма поверхностной полосы I_2 оказывается близкой к Лоренциану с полушириной 6 мэВ . В этом случае электрон-фоонное взаимодействие проявляется обычно в виде фоонного повторения нуль-фоонной полосы [9, 10]. Действительно, имеет место эквидистантность в энергетическом расположении пиков I_2, I_3, I_4 , независимость отношения I_3/I_2 от T при $T \leq 20^\circ \text{К}$ и слабая зависимость при $20^\circ < T \leq 40^\circ \text{К}$, а также последовательное уменьшение амплитуды пиков по закону, близкому к пуассоновскому [10, 9]:

$$W_n = W_0 (\bar{N}^n / n!). \quad (1)$$

Здесь W_0 — вероятность эмиссии фотона для нуль-фоонной полосы, W_n — вероятность эмиссии одного фотона и n фоонов, \bar{N} — среднее число эмитируемых фоонов, определяющее силу электрон-фоонного взаимодействия [10]:

$$\bar{N} = \frac{e^2}{a} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\hbar\omega_0} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right), \quad (2)$$

где ϵ_∞ и ϵ_0 — высоко- и низкочастотные диэлектрические константы вещества, a — борковский орбитальный радиус, $\hbar\omega_0$ — энергия фоона.

Если учесть изменения параметров формулы (2) на поверхности по сравнению с объемом, то оцененное по последней формуле значение $\bar{N}_s \sim 0,05 - 0,06$, оказывается близким к экспериментально определенному из отношения I_3/I_2 (0,063). Совокупность указанных данных доказывает факт фоонного повторения полосы поверхностного излучения 1,477 эВ и позволяет определить из расстояния между полосами I_2, I_3, I_4 энергию поверхностных фоонов, равную $33 \pm 0,5 \text{ мэВ}$. Эта величина качественно согласуется с предсказаниями теории [1 - 3], согласно которым энергия поверхностных поляритонов должна быть больше энергии объемного TO фоона (32 мэВ) и меньше энергии LO фоона (36 мэВ). Характерно также, что \bar{N}_s на 50% больше объемной величины \bar{N}_v для эквиэнергетического центра, а сдвиг Франка - Кондона, определенный по данным рис. 1 и рис. 2 ($\delta E_{FK}^s = 13 \text{ мэВ}$), на 20% больше на поверхности. Эти данные, наряду с уширенностью поверхностной экситонной полосы, указывают на существенное увеличение электрон-фоонного взаимодействия на поверхности.

Таким образом, исследование излучательной поверхностной рекомбинации позволило наблюдать проявление поверхностных фоонов в спектрах ЛФЛ и определить ряд важных характеристик электрон-фоонного взаимодействия на поверхности.

Поступила в редакцию
25 марта 1974 г.

После переработки
17 мая 1974 г.

Институт полупроводников
Академии наук Украинской ССР

Литература

- [1] R.Fuchs, K.L.Kliewer. *Phys. Rev.*, **140**, A2076, 1965.
 - [2] R.Englman, R.Ruppin. *J. Phys. Chem. Sol.*, **1**, 630, 1968.
 - [3] В.В.Брыксин, Ю.А.Фирсов. *ФТТ*, **11**, 2167, 1969; **14**, 1148, 1968.
 - [4] В.В.Брыксин, Ю.М.Гербштейн, Д.Н.Мирлин. *ФТТ*, **13**, 1603, 1971.
 - [5] D.L.Molls, A.A.Maradudin. *Phys. Rev. Lett.*, **31**, 372, 1973.
 - [6] В.М.Агранович. *Письма в ЖЭТФ*, **19**, 28, 1974.
 - [7] В.А.Зуев, В.Г.Литовченко, Г.А.Сукач, Д.В.Корбутяк. *Письма в ЖЭТФ*, **16**, 126, 1972; *Phys. Stat. Sol. (a)*, **17**, 353, 1973.
 - [8] V.V.Diyakov et al. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **1**, K45, 1970.
 - [9] М.А.Кривоглаз, С.И.Пекар. *Труды Института физики АН УССР*, **4**, 73, 1953.
 - [10] J.J.Hopfield. *J. Phys. Chem. Sol.*, **10**, 110, 1959.
-