

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ МОНОКРИСТАЛЛА И ПЛЕНОК ФУЛЛЕРИТА C_{70}

Бусыгина Е.Л.

Камский институт гуманитарных и инженерных технологий, Ижевск, e-mail: nico02@mail.ru

Рассчитаны пять полных комплексов фундаментальных оптических функций для поликристаллических пленок и двух поляризаций монокристалла фуллерита C_{70} в области 0–40 эВ на основе известных спектров отражения, мнимой и реальной частей диэлектрической проницаемости, объемных характеристических потерь энергии электронов. Результаты расчетов сопоставлены с известными теоретическими данными. Интегральные спектры диэлектрической проницаемости разложены на элементарные компоненты. Определены три основных параметра каждой компоненты (энергия максимума и полуширина, сила осциллятора). Предложена схема природы этих компонент на основе известных теоретических расчетов переходов фуллерита C_{70} .

Ключевые слова: фуллерит, монокристалл, пленка, электронная структура, интегральный спектр, разложение

MODELING OF THE OPTICAL FUNCTIONS OF C_{70} FILMS AND SINGLE CRYSTAL

Busygina E.L.

Kama's Institute of Humanities and Engineering technologies, Izhevsk, e-mail: nico02@mail.ru

Full sets of the fundamental optical functions of the fullerite C_{70} films and single crystal were determined in the 0–40 eV energy range. The calculations were performed from the experimental reflectance spectra, imaginary and real parts of dielectric function, electron energy loss spectra. The results of calculations were compared with known theoretical dates. The dielectric function spectra were decomposed into elementary components. The main parameters of components were found (the energy values of the maxima and half-widths, and oscillator strengths). The general model of the nature of these components was supposed due to known theoretical transitions of fullerite C_{70} .

Keywords: fullerite, single crystal, film, electronic structure, integral specter, decomposition

В течение многих десятилетий исследования углерода ограничивались его самыми элементарными модификациями: алмазом и графитом [1]. За последние годы произошел настоящий бум всесторонней информации для третьей модификации – фуллерен (газ C_n), фуллерит (твердое беспримесное состояние C_n), фуллерид (твердое состояние C_n), интеркалированное различными атомами) [2]. Наиболее высокую стабильность имеют два представителя класса фуллеренов – это молекулы C_{60} и C_{70} . Молекула C_{60} высоко симметрична со структурой усеченного икосаэдра, поверхность которого составлена из непрерывных сот правильных 20 шестиугольников и 12 пятиугольников, причем каждый атом находится в вершинах двух шестиугольников и одного пятиугольника. Путем введения пояса из 10 атомов углерода в экваториальную область этой молекулы и последующим ее растяжением можно получить следующую по величине стабильную структуру – молекулу C_{70} , обладающую более низкой симметрией [3]. Фуллерит C_{70} является молекулярным кристаллом со слабым взаимодействием между молекулами типа сил Ван-дер-Ваальса и сильными внутримолекулярными межатомными связями, и при комнатных температурах обладает плотноупакованной структурой с упорядоченной ориентацией длинной оси молекулы, что приводит к зна-

чительной анизотропии его оптических свойств. Поэтому особый интерес представляют исследования электронного строения фуллерита C_{70} в широкой области энергии собственного поглощения [13–19].

Сложность этой проблемы проявляется в необходимости изучения полного комплекса фундаментальных оптических функций: мнимая ϵ_2 и реальная ϵ_1 части диэлектрической проницаемости, коэффициенты отражения R и поглощения k , показатели поглощения k и преломления n , функции характеристических объемных ($-\text{Im}\epsilon^{-1}$) и поверхностных ($-\text{Im}(1 + \epsilon)^{-1}$) потерь энергии электронов, количество валентных электронов $n_{\text{эф}}(E)$, участвующих в переходах до данной энергии E , эффективная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{эф}}(E)$, фаза отраженной волны θ , функция $E^2\epsilon_2$, пропорциональная объединенной плотности состояний при постоянной вероятности переходов. Хотя все они взаимосвязаны, каждая из этих функций имеет самостоятельное значение. Их взаимосвязь и физический смысл непосредственно вытекают из классической теории распространения электромагнитных волн в среде [4]. Связь между компонентами пар функций R и θ , ϵ_1 и ϵ_2 , n и k не имеет аналитического вида и определяется интегральными соотношениями Крамерса – Кронига [5, 6]. В работах рассматривают лишь немногие из этих функций:

R ; $-Im\epsilon^{-1}$; ϵ_1 , ϵ_2 (в ограниченной области энергии – до $5-7$ эВ). Поэтому первая задача состоит в определении всего комплекса оптических функций в широком энергетическом интервале.

Оптические методы являются наиболее эффективными из экспериментальных методов исследования электронной структуры, но они всегда регистрируются в интегральном виде как сумма всех переходов, некоторые из которых могут структурно не наблюдаться из-за сильного перекрытия, но при этом они влияют на расположение максимумов интегральных кривых. Поэтому второй задачей является разделение интегрального спектра функции на составляющие его компоненты и определение основных параметров этих компонент: энергии, полуширины и силы осциллятора.

Целью настоящего сообщения является решение обеих рассмотренных задач для фуллерита C_{70} и сопоставление результатов расчетов с теоретическими данными.

Нами получены пять вариантов полных комплексов оптических функций кристалла фуллерита C_{70} на основе экспериментальных спектров $R(E)$ в интервале $1,5-28$ эВ (варианты №№ 1, 2) для двух поляризаций $E \perp c$, $E \parallel c$ (c – длинная ось молекулы) [7] для монокристалла (ГПУ); $\epsilon_1(E)$ и $\epsilon_2(E)$ в интервалах $1,5-7$ эВ (№ 4) [8], $1,5-5,3$ (№ 3) [9], $-Im\epsilon^{-1}(E)$ в интервале $0-40$ эВ (№ 5) [10] для пленок (ГЦК). Расчеты выполнены по известным методикам [5, 6].

Полученные полные комплексы оптических функций фуллерита C_{70} наглядно свидетельствуют о расположении их структур и их численных значениях (рис. 1–3). Кривая ϵ_2 , полученная нами на основе экспериментальных данных работы [10], в области $0-8$ эВ состоит из двух слабых при $2,44$ и $3,27$ эВ и одного интенсивного максимума при $4,82$ эВ и ступени при $5,65$ эВ, а в области $8-35$ эВ – из нескольких широких сильно перекрывающихся полос с максимумом при $\sim 12,1$ эВ и ступенями (рис. 2). Все особенности имеют аналоги в спектрах μ , k и $E^2\epsilon_2$ со смещением относительно максимумов ϵ_2 в сторону больших энергий примерно на $0,2-0,6$ эВ в интервале до 8 и $0,4-1,5$ эВ в области свыше 8 эВ. Спектр ϵ_1 в интервале $0-7$ эВ содержит три максимума при $1,99$, $3,13$ и $4,17$ эВ и ступень при $5,46$ эВ (рис. 3). Свыше 7 эВ кривая состоит из нескольких широких перекрывающихся полос с максимумом при $9,1$ эВ и особенностями в виде ступеней. Таким образом, максимумы ϵ_1 сдвинуты относительно аналогичных структур кривой ϵ_2 примерно на $0,15-0,65$ эВ. Между спектрами n и ϵ_1 наблюдается большое сходство во всем энерге-

тическом интервале со сдвигом максимумов n в область больших энергий, не превышающим $0,2$ эВ. Спектр отражения в области до 7 эВ также состоит из трех максимумов при $2,05$, $3,15$ и $4,49$ эВ и ступени при $5,65$ эВ, а в остальной области энергии из нескольких широких перекрывающихся полос с максимумами при $12,4$, $14,4$, $16,4$ эВ и ступенями. Сдвиг максимумов кривой ϵ_1 в сторону меньших энергий относительно особенностей R не превышает $0,25$ эВ. Спектры $\epsilon_{эф}$ и $n_{эф}$ имеют вид плавно растущих кривых. Кривая $n_{эф}$ не достигает насыщения и при 40 эВ имеет значение $225,5$. Это несколько ниже расчетных данных [10], где при 40 эВ $n_{эф}$ примерно равно 250 . Оба спектра содержат ступень в области $5-10$ эВ, где достигают значения ~ 20 . Спектры объемных и поверхностных потерь энергии электронов содержат в области до 8 эВ по одному максимуму при $6,61$ и $5,97$ эВ и ступень при $3,27$ и $3,66$ эВ соответственно, а в области свыше 7 эВ – по широкой полосе с максимумом при $25,0$ и $21,2$ эВ соответственно и несколько широких ступеней (рис. 1).

Прямое сопоставление результатов расчетов пяти комплексов позволило выявить наиболее точные оптические спектры (рис. 4–6). Ими являются спектры отражения монокристалла C_{70} [7], среди пленок – спектры ϵ_1 , ϵ_2 работы [8]. Для функций всех полученных комплексов определены энергии интенсивных максимумов и ступеней. Установленные различия в энергиях максимумов и интенсивностях полос-аналогов между спектрами функций трех полных комплексов для пленок, видимо, связаны с качеством поверхности образцов, а между спектрами пленок и монокристалла – с различной симметрией решетки.

Отражение монокристалла C_{70} работы [7] сильно анизотропно. Кривая отражения при $E \perp c$ ($E \parallel c$) менее интенсивна, чем полученные нами спектры отражения пленок, в области энергии свыше $\sim 2,5$ (3) эВ, а длинноволновые структуры для $E \perp c$, наоборот, обладают более высокими численными значениями. Экспериментальный спектр ϵ_2 пленки C_{70} [9] занижен по интенсивности. Экспериментальная кривая $-Im\epsilon^{-1}$ [10] тоже занижена по интенсивности и отличается по расположению максимумов и ступеней от наших расчетных данных, полученных на основе кривых R и ϵ_1 , ϵ_2 . Наличие в экспериментальных спектрах особенностей, характерных для той или иной поляризации, указывает на возможную природу соответствующих переходов либо на ориентационное упорядочение молекул C_{70} в пленках фуллерита.

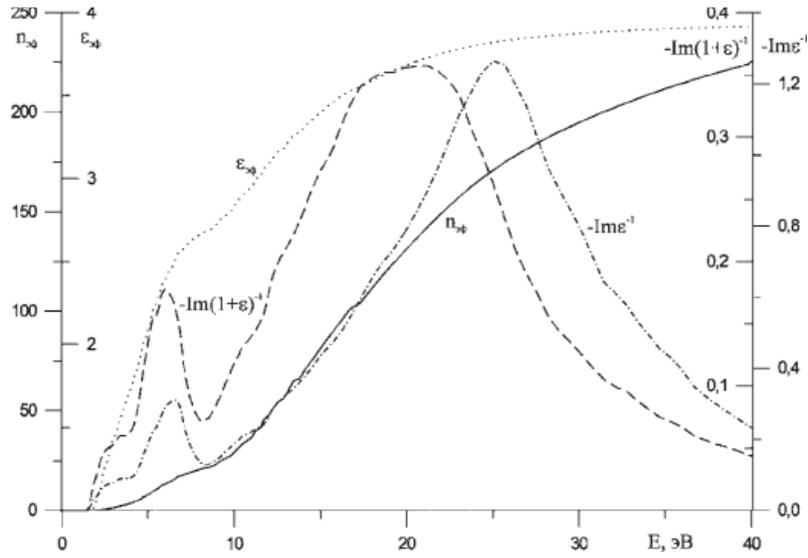


Рис. 1. Экспериментальный спектр $-Im\epsilon^{-1}$ [10] и рассчитанные спектры $-Im(1 + \epsilon)^{-1}$, $n_{эф}$, $\epsilon_{эф}$ поликристаллической пленки C_{70} (вариант 5)

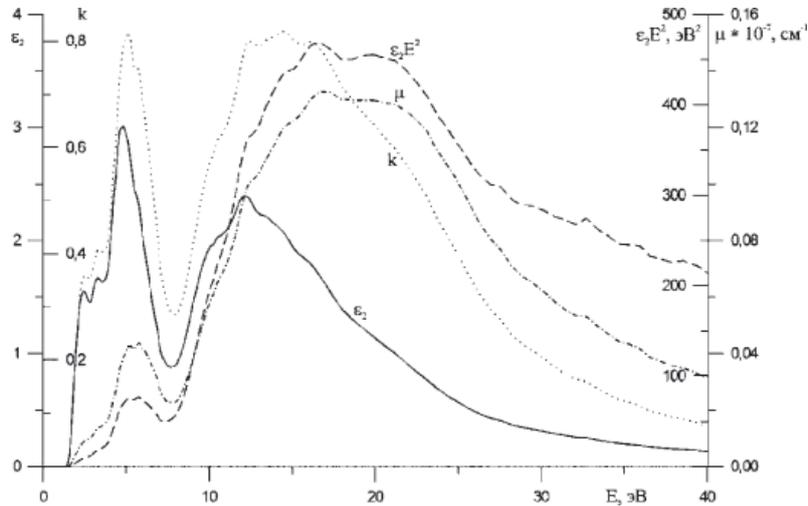


Рис. 2. Спектры ϵ_2 , k , μ , $\epsilon_2 E^2$ поликристаллической пленки C_{70} рассчитанные по $-Im\epsilon^{-1}$ [10] (вариант 5)

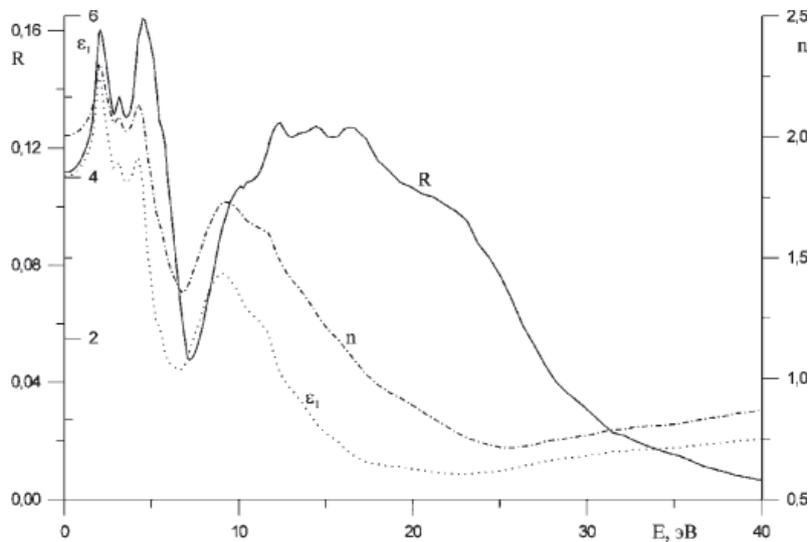


Рис. 3. Спектры R , n , ϵ_1 поликристаллической пленки C_{70} рассчитанные по $-Im\epsilon^{-1}$ [10] (вариант 5)

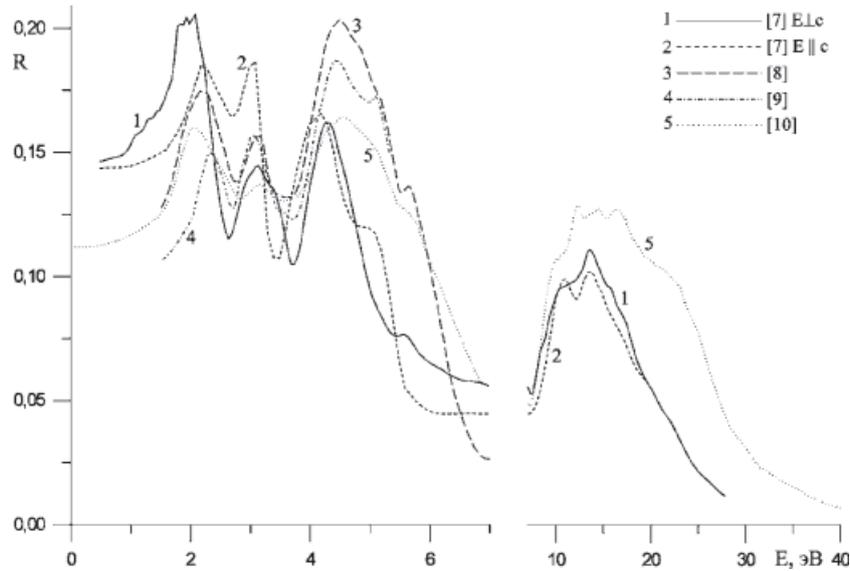


Рис. 4. Суммарные спектры $R C_{70}$: экспериментальные – [7] для $E \perp c$ (1) и $E \parallel c$ (2) и рассчитанные нами на основе ϵ_1, ϵ_2 [8] (3), [9] (4); $-Im\epsilon^{-1}$ [10] (5)

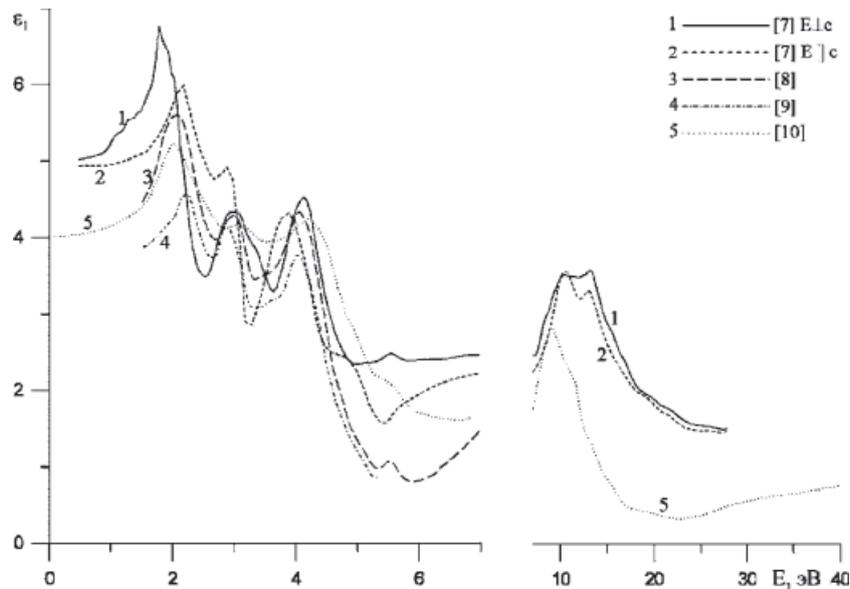


Рис. 5. Суммарные спектры $\epsilon_i C_{70}$: экспериментальные – [8] (3), [9] (4) и рассчитанные нами на основе R [7] для $E \perp c$ (1) и $E \parallel c$ (2); $-Im\epsilon^{-1}$ [10] (5)

Теоретический спектр поглощения μ [11], рассчитанный с учетом кулоновского взаимодействия и решеточных флуктуаций, согласуется с нашими расчетными кривыми и указывает на возможную причину уширения пиков спектра поглощения.

Энергии объемных плазмонов π -типа находятся при $E_1 = 6,6 \pm 1,5$ эВ (экспериментальные данные [10]) и в интервале $E_1 = (4,93 - 6,27) \pm 0,01$ эВ (наши расчетные данные пяти вариантов), а для плазмонов $(\pi + \sigma)$ -типа – при $E_2 = 25,0 \pm 1,5$ эВ (экспериментальные данные [10]) и в интерва-

ле $E_2 = (22,8 - 22,9) \pm 0,1$ эВ (наши данные пяти вариантов). Наши расчетные энергии максимумов полос плазмонов обоих типов определены точнее, чем по потерям, выделенным из экспериментальных кривых, но расположены ниже на $\sim 1,0$ эВ (E_1) и 2,2 эВ (E_2). Остальные максимумы и ступени функции объемных потерь энергии электронов являются продольными аналогами поперечных полос переходов других оптических функций и обусловлены экситонами и междузонными переходами.

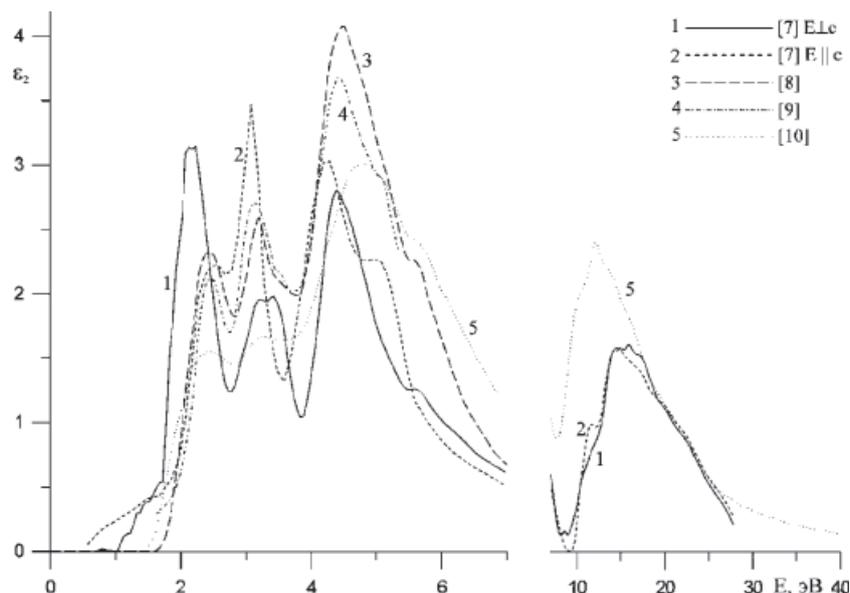


Рис. 6. Суммарные спектры $\epsilon_2 C_{70}$: экспериментальные – [8] (3), [9] (4) и рассчитанные нами на основе R [7] для $E \perp c$ (1) и $E \parallel c$ (2); $-m\epsilon^{-1}$ [10] (5)

Впервые интегральные спектры $\epsilon_2(E)$ пяти комплексов функций C_{70} разложены на элементарные составляющие. Для этого был применен беспараметрический метод диаграмм Арганда, позволяющий однозначно разложить кривую $\epsilon_2(E)$ на минимальный набор лоренцевских осцилляторов и получить параметры каждой компоненты: энергию, полуширину и площадь полосы, силу осциллятора перехода [5, 6]. Энергии максимумов полос E спектров ϵ_2 монокристалла и пленок фуллерита C_{70} , рассчитанные нами на основе экспериментальных спектров отдельных оптических функций работ [7] ($E \perp c$) (1) и ($E \parallel c$) (2), [8] (3), [9] (4), [10] (5), а также данные работы [8] и теоретические межзонные переходы [12] представлены в таблице. Всего выявлено 53 полосы в интервале 0–40 эВ. В том числе для пяти вариантов разложений получено 45 (вариант № 1, $E \perp c$, 1,5–28 эВ) и 23 (№ 2, $E \parallel c$, 1,5–28 эВ) для монокристалла, 14 (№ 3, 1,5–7 эВ), 12 (№ 4, 1,5–5,3 эВ) и 15 (№ 5, 0–40 эВ) лоренцевских осцилляторов для пленок. Из них не проявляются в интегральных кривых 28 (№ 1) и 9 (№ 2) для монокристалла, 10 (№ 3), 8 (№ 4) и 7 (№ 5) компонент для пленок. Различия первичных экспериментальных спектров и рассчитанных по ним других оптических функций проявились и в результатах разложений $\epsilon_2(E)$ на компоненты по количеству, энергетическому положению, силе осцилляторов. Причем, самые большие различия связаны с анизотропией монокристалла C_{70} . Так по нашим расчетам в области до 7 эВ в первом

варианте выявлено 25, а во втором – лишь 6 полос, то есть вчетверо меньшее количество полос, в области свыше 8 эВ – соответственно 20 и 15 полос. Кроме того, имеются различия между нашими данными по разложению интегральных кривых $\epsilon_2(E)$ пленок: до 7 эВ в третьем, четвертом и пятом вариантах выделено 14, 12 и 6 полос соответственно.

На рис. 7 изображены схемы энергий переходов для пленки C_{70} с решеткой зерен ГЦК типа (пятый вариант) и обеих поляризаций монокристалла C_{70} с решеткой ГПУ типа (варианты 1 и 2). Спектры переходов в области энергии до 8 эВ сильно поляризованы. Многие компоненты варианта 1 не имеют аналогов в наборах осцилляторов второго и пятого вариантов. При этом для энергий больше 10 эВ переходы поляризованы значительно меньше и в основном по силам полученных осцилляторов.

Известна попытка воспроизведения интегральной кривой ϵ_2 пленки C_{70} в интервале энергии 1,5–5,3 [9] при помощи 6-ти лоренцевских осцилляторов (табл.) с использованием 18 подгоночных параметров. По сравнению с нашими данными по разложению экспериментального спектра ϵ_2 работы [9] (вариант 4) полосы №№ 11, 18, 22 не содержатся в результатах [9], а №№ 33, 34 объединены в одну. Полоса № 26 введена авторами [9] искусственно. Применение большого количества произвольных параметров демонстрирует большую неоднозначность предложенной в работе [9] схемы воспроизведения.

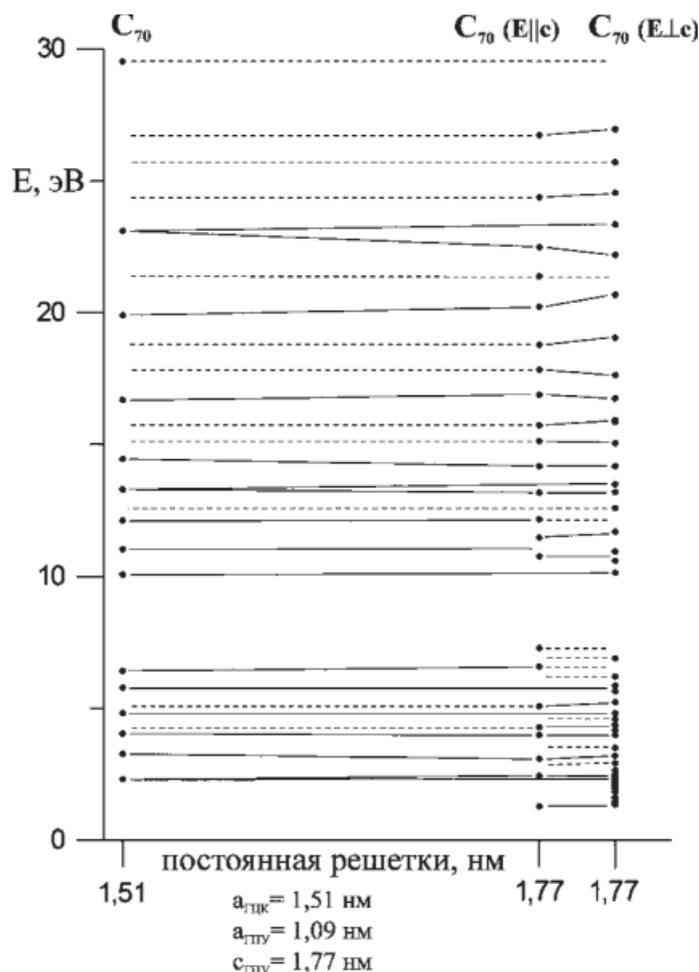


Рис. 7. Схема энергий осцилляторов для двух поляризации монокристалла (варианты 1 и 2) и пленки C_{70} (вариант 5) в зависимости от постоянной решетки

Определенные нами компоненты переходов были сопоставлены с известными теоретическими расчетами переходов в модели молекулярных термов [12] (таблица). Вероятно, большинство интенсивных переходов происходит не столько между экстремумами зон, сколько между их параллельными участками. Это дает общее удовлетворительное объяснение весьма сложной структуре установленного спектра компонент переходов фуллерита C_{70} . Переходы до 8 эВ, а также большинство остальных максимумов интегральных спектров $\epsilon_2(E)$ и выявленные нами компоненты, вероятно, имеют экситонную природу в модели экситонов малого радиуса. В широкой области энергии фундаментального поглощения энергия связи экситонов может находиться в интервале 0,5–1 эВ. Это затрудняет детальное и однозначное сопоставление

экспериментальных спектров с теоретическими расчетами зон в общем случае существования метастабильных экситонов и междузонных переходов.

Выводы

В работе впервые получены пять полных комплексов фундаментальных оптических функций для монокристалла и пленок фуллерита C_{70} в широкой области энергии собственного поглощения, впервые интегральные спектры диэлектрической проницаемости без каких-либо подгоночных параметров разложены на элементарные компоненты и определены параметры каждой компоненты, выявлены различия, связанные с анизотропией кристалла C_{70} , предложена природа полос в модели экситонов Френкеля и на основе известных расчетов зон.

Результаты разложения спектров ε_2 монокристалла (м) и пленок (п) фуллерита C_{70}

Номер полосы	Энергии максимумов полос, эВ						Природа переходов [12]	
	1	2	3	4	5	[8]	$E \perp c$	$E \parallel c$
	м, $E \perp c$	м, $E \parallel c$	п	п	п	п		
1	1,34	1,28	–	–	–	–	–	–
2	1,46	–	–	–	–	–		
3	1,61	–	–	–	–	–		
4	1,83	–	–	–	–	–		
5	1,94	–	–	–	–	–		
6	2,04	–	2,07	–	–	–	$e_1'' \rightarrow a_1''$ $a_2'' \rightarrow e_1''$	–
7	2,11	–		–	–	–		
8	2,21	–	2,20	–	–	–	–	$a_2' \rightarrow a_1''$
9	2,30	–	2,29	–	2,31	–		–
10	2,40	2,43	2,41	2,38		2,41		
11	2,51	–	–	2,55	–	–	$e_2'' \rightarrow e_1''$	–
12	2,65	–	2,63	–	–	–	–	$e_1' \rightarrow e_1''$, $a_2'' \rightarrow a_1'$
13	2,92	–	–	3,00	–	–	–	$e_1'' \rightarrow e_1'$
14	3,20	3,08	3,18	3,12	3,27	3,10	$a_2' \rightarrow e_1'$	–
15		–		3,26			$e_2' \rightarrow e_1'$, $e_1' \rightarrow a_1'$	$e_1' \rightarrow e_1''$
16	3,50	–	3,58	3,56	–	3,50	–	–
17	3,99	3,98	–	–	4,04	–		
18	4,16	4,28	4,15	4,12	–	–		
19	4,37		4,47	4,41	–	4,45		
20	4,59	–	–	–	–	–		
21	4,81	–	4,84	4,75	4,82	–		
22	–	5,08	5,18	5,1	–	–		
23	5,23			–	5,13	–		
24		–	5,33	–				
25	5,65	–	5,71	–	5,78	–		
26	5,86	–		–	–	5,86		
27	6,20	–	6,10	–	–	–		
28	–	6,58	6,53	–	6,42	–		
29	6,89	–	–	–	–	–		
30	–	7,28	–	–	–	–		
31	10,15	–	–	–	10,08	–		
32	10,60	10,77	–	–	11,04	–		
33	10,95		–	–		–		
34	11,70		11,48	–		–		
35	–	12,18	–	–	12,13	–		
36	12,60	–	–	–	–	–		
37	13,20	13,18	–	–	13,29	–		
38	13,50	–	–	–		–		
39	14,18	14,18	–	–	14,45	–		
40	15,05	15,13	–	–	–	–		
41	15,85	15,73	–	–	–	–		
42	15,93		–	–	–	–		
43	16,75	16,88	–	–	16,69	–		
44	17,63	17,83	–	–	–	–		
45	19,05	18,78	–	–	–	–		
46	–	20,23	–	–	19,90	–		
47	20,68	21,38	–	–	–	–		
48	22,20	22,48	–	–	23,11	–		
49	23,35	–	–	–		–		
50	24,55	24,38	–	–	–	–		
51	25,70	–	–	–	–	–		
52	26,95	26,73	–	–	–	–		
53	–	–	–	–	29,53	–		

Установленные спектры комплексов оптических функций и параметры разложения $\epsilon_2(E)$ на компоненты кристалла C_{70} во всей широкой области энергии фундаментального поглощения позволяют наиболее детально и эффективно обсуждать оптические свойства и электронную структуру этого фуллерита, детально оценивать корректность теоретических расчетов зон, экситонов и его оптических спектров, а также предоставляют принципиально новую основу для выполнения существенно более точных теоретических расчетов.

Автор выражает признательность д-ру физ.-мат. наук, проф. В.В. Соболеву за научное руководство и канд. физ.-мат. наук А.И. Калугину за разработку программ расчетов.

Список литературы

1. Соболев В. В. Собственные энергетические уровни твердых тел группы A4. – Кишинев: Штиинца. 1978. – 207 с.
2. Елецкий А. В., Смирнов В. М. Фуллерены и структуры углерода // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – № 9. – С. 977–1009.
3. Iwasa Y. Solid state properties of C60 and its related materials // World Scientific. Singapore. – 1995. – P. 340–386.
4. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. – М.: Наука. 1978. – 616 с.
5. Соболев В.В., Алексеева С.А., Донецких В.И. Расчеты оптических функций полупроводников по соотношениям Крамерса – Кронига. – Кишинев: Штиинца, 1976. – 123 с.
6. Соболев В.В., Немощкаленко В.В. Методы вычислительной физики в теории твердого тела. Электронная структура полупроводников. – Киев: Наукова думка, 1988. – 423 с.
7. Iwasa Y., Yasuda T., Naito Y., Koda T. Optical Reflection Spectra of Fullerite Single Crystals. // Activity Report of Synchrotron Radiation Laboratory (ARSRL). – Tokyo. Institute for Solid State Physics (ISSP), 1992. – P. 32–33.

8. Kataura H., Endo Y., Achiba Y., Kikuchi K., Hanyu T., Yamaguchi Sh. Dielectric Constants of C60 and C70 Thin Films // Japanese Journal of Applied Physics. – 1995. – Vol. 34. – № 10B. – P. L1467–L1484.
9. Ren S.L., Wang K.A., Zhou P., Wang Y., Rao A.M., Meier M.S., Selegue J.P., Eklund P.C. Dielectric Function of solid C70 films // Applied Physics Letters. – 1992. – Vol. 61. – № 2. – P. 124–126.
10. Sohmen E., Fink J., Kratschmer W. Electron energy-loss spectroscopy studies on C60 and C70 fullerite // Zeitschrift für Physik B – Condensed Matter. – 1992. – Vol. 86. – P. 87–92.
11. Harigaya K., Abe S. Optical-absorption spectra in fullerenes C60 and C70: Effects of Coulomb interactions, lattice fluctuations, and anisotropy // Physical Review B. – 1994. – Vol. 49. – № 23. – P. 16746–16752.
12. Shumway J., Satpathy S. Polarization-dependent optical properties of C70 // Chemical Physics Letters. – 1993. – Vol. 211. – № 6. – P. 595–600.
13. Соболев В. В., Бусыгина Е. Л. Электронная структура пленок C60 // Журнал прикладной спектроскопии. – 1999. – Т. 66. – № 2. – С. 227–232.
14. Соболев В. В., Бусыгина Е. Л. Электронная структура пленок C60 // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. – № 1. – С. 31–35.
15. Соболев В.В., Бусыгина Е.Л. Электронная структура фуллерита C60 // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41. – № 6. – С. 1124–1125.
16. Соболев В.В., Бусыгина Е.Л. Оптические постоянные монокристалла фуллерита // Оптика и спектроскопия. – 1999. – Т. 86. – № 3. – С. 464–467.
17. Бусыгина Е.Л. Оптические функции монокристаллов и пленок фуллерита C60 // Химическая физика и мезоскопия. – 2010. – Т. 12. – № 3. – С. 417–424.
18. Sobolev V.Val., Busygina E.L., Sobolev V.V. Electronic Structure and Optical Function of Fullerite C60 Films // Physics of Low-Dimensional Structures. – 2003. – № 11/12. – P. 149–156.
19. Sobolev V.Val., Busygina E.L., Sobolev V.V. Fine Structure and Optical Transitions in C70 and C60 Fullerenes // Physics of Low-Dimensional Structures. – 2003. – № 11/12. – P. 137–148.