

Таким образом, взаимодействие электромагнитных волн с колебаниями плотности магнитного момента приводит к модуляции электромагнитных волн с частотой прецессии Ω , причем глубина модуляции за счет непосредственного взаимодействия (первый механизм) не зависит от частоты электромагнитной моды и равна $\frac{2\pi g m}{\Omega}$. Модуляция же за счет спин-орбитального взаимодействия зависит от частоты, и ее глубина равна $\frac{\pi \zeta m \omega_n}{\varepsilon \Omega}$. Этот факт, по-видимому, дает возможность разделять вклады каждого из механизмов модуляции электромагнитных волн колебаниями плотности магнитного момента.

Выражение для электромагнитных мод (10) можно также представить в виде суперпозиции колебаний на комбинированных частотах

$$E_{\pm}^n = \sin k_n x \exp(-i\omega_n t) \sum_{l=-\infty}^{\infty} (\mp i)^l \mathcal{J}_l(a) \exp(\mp i l \Omega t). \quad (14)$$

Здесь $\mathcal{J}_l(a)$ — функция Бесселя, ее аргумент $a = 2\pi m \Omega^{-1} (g + \zeta \varepsilon^{-1} \omega_n)$ зависит от номера моды, амплитуды и частоты прецессии, поэтому и амплитуды колебаний на комбинированных частотах $\omega_n' = \omega_n + l\Omega$ зависят от соотношения частот ω_n и Ω и амплитуды возбуждаемой прецессии. Естественно, что при $a \ll 1$ модуляцией можно пренебречь, так как в этом случае функции Бесселя $\mathcal{J}_l$, за исключением $\mathcal{J}_0$, практически равны нулю. При $a \sim 1$ отличны от нуля амплитуды нескольких первых гармоник. Для того чтобы эти гармоники можно было наблюдать, необходимо, чтобы частота прецессии Ω значительно превосходила ширину резонансной линии γ , т. е. должно выполняться условие $\Omega \gg \gamma$ ($\gamma = \frac{\omega}{2\pi Q}$, Q — добротность резонатора). При $a \gg 1$ модуляция, очевидно, может наблюдаться и при частотах Ω , удовлетворяющих менее сильному неравенству, так как в этом случае отличными от нуля будут уже значения функций Бесселя $\mathcal{J}_l(a)$ с большими ($l \sim a$) значениями индекса.

Пользуюсь случаем поблагодарить А. С. Бакаю и М. И. Каганова за полезные дискуссии.

Л и т е р а т у р а

- [1] А. С. Бакай, Р. П. Янкелевич. ЖЭТФ, 56, 856, 1969.
[2] R. J. Elliot, R. Loudon. Phys. Lett., 3, 189, 1963.

Физико-технический институт АН УССР
Харьков

Поступило в Редакцию
3 июля 1969 г.

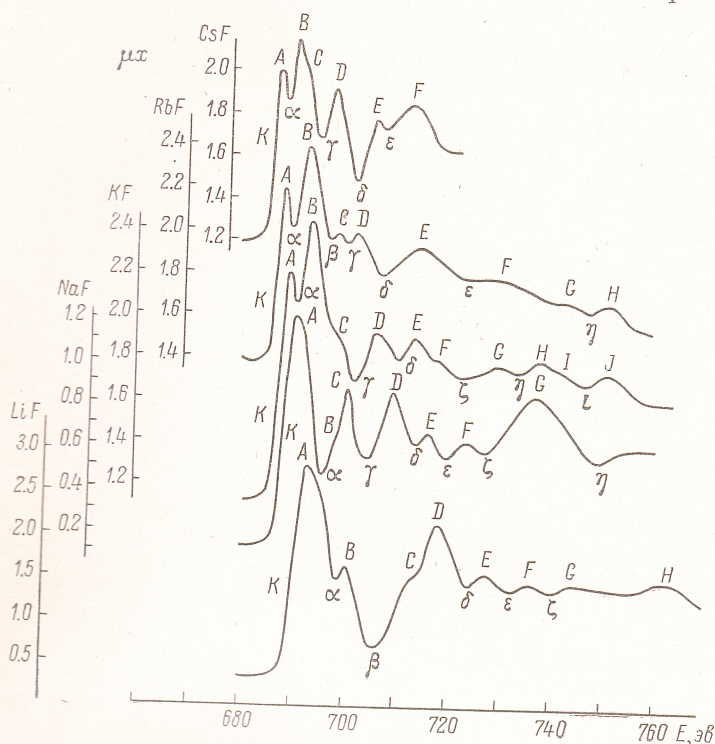
ТОНКАЯ СТРУКТУРА К-СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ФТОРА В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

А. С. Виноградов, Т. М. Зимкина и Ю. Ф. Мальцев

В последнее время появилось большое количество работ, в которых исследовались рентгеновские спектры поглощения щелочно-галогидных кристаллов в области мягкого рентгеновского излучения [1-6]. Однако до настоящего времени совершенно не было работ, в которых бы изучались К-спектры поглощения фтора, что, вероятно, связано со сложностью экспериментальной методики исследования спектров в области К-края поглощения фтора ($\lambda \approx 18 \text{ \AA}$).

В настоящей работе впервые получены К-спектры поглощения F в LiF, NaF, KF, RbF и CsF. Исследования проводились на рентгеновском

спектрометре-монокроматоре РСМ-500 [7] с покрытой золотом вогнутой дифракционной решеткой, имеющей 600 штр./мм и радиус кривизны 6 м. Излучение регистрировалось пропорциональным счетчиком с метилалевым наполнением. Поглощение изучалось на тормозном спектре вольфрамового анода рентгеновской трубки, работающей при режиме $U=5$ кв, $i=90$ ма. Использование специального катода с фокусирующей системой позволило увеличить светосилу прибора и получать интенсивность непрерывного спектра в области $\lambda \approx 18 \text{ \AA}$ до 10^3 квант./сек. при щелях спектрометра 10 мк.



Тонкая структура K -спектров поглощения фтора в щелочно-галогенидных кристаллах.

Ошибка в спектральном ходе поглощения не более 5%. За положение края K принято положение точки на середине первого резкого нарастания в поглощении.

Специальный отражатель с полистироловым покрытием, установленный под углом $1^\circ 26'$ к рентгеновскому пучку, исключал попадание в спектрометр излучения с длиной волны $\lambda < 9 \text{ \AA}$. Доказательством «чистоты» тормозного спектра (т. е. отсутствия фона за счет наложения высших порядков дифракции и рассеянного излучения) служило совпадение коэффициентов поглощения, полученных на тормозном спектре на монохроматических рентгеновских линиях NiL_α ($16.693 \text{ \AA}$), FeL_α ($17.59 \text{ \AA}$) и CoL_α ($18.292 \text{ \AA}$) [8]; эти же линии использовались для градуировки спектрометра. Образцы для исследования готовились внутри спектрометра вакуумным испарением веществ из кварцевого тигля на подложку из нитроцеллюлозы и выводились на рентгеновский пучок без нарушения вакуума. Толщины слоев были порядка $1000\text{--}5000 \text{ \AA}$.

На рисунке приведены K -спектры поглощения F в LiF, NaF, KF, RbF и CsF.¹ Результаты даются в относительных единицах μx , где μ —

¹ В спектре CsF в области энергий выше 720 эВ наблюдалось обусловленное $M_{IV,V}$ ($3d$)-электронами Cs интенсивное поглощение, которое на рисунке не приведено.

линейный коэффициент поглощения и x — толщина образца. Энергетическое разрешение спектрометра составляло в районе K -края поглощения фтора 0.9 эв для спектров LiF и NaF и 1.2 эв для остальных спектров. Такое разрешение получается при щелях спектрометра соответственно 7.5 и 10 мк. Положения характерных точек спектров даны в таблице; точность указываемого для этих точек положения оценивается в 0.3 эв.

Положение характерных точек тонкой структуры K -спектров поглощения фтора (эв)

	LiF	NaF	KF	RbF	CsF
K	690.7	688.2	687.1	686.3	685.0
A	692.8	690.5	688.8	687.6	686.3
α	698.8	695.6	690.1	689.0	687.3
B	700.5	697.8	692.8	692.9	689.2
β	705.9	—	—	696.4	—
C	713.1	700.1	697.4	697.7	690.5
γ	—	703.7	701.2	699.4	694.0
D	717.8	708.3	705.3	701.0	696.5
δ	723.4	712.7	709.2	706.1	700.8
E	726.6	714.8	712.4	713.1	704.4
ϵ	730.5	718.2	—	722.7	706.2
F	734.1	721.5	715.5	726.5	711.2
ζ	738.3	725.1	722.2	—	—
G	742.6	734.5	727.6	740.3	—
η	—	745.7	730.8	744.5	—
H	758.7	—	734.7	748.0	—
I	—	—	738.4	—	—
i	—	—	743.6	—	—
J	—	—	748.0	—	—

Во всех спектрах наблюдается протяженная тонкая структура с резким краем, ширина нарастания в районе края около 2 эв, что ненамного превышает суммарную ширину кривой искажения (1.1—1.4 эв).² Для спектров характерно длинноволновое смещение начала поглощения в ряду LiF $\rightarrow$ CsF, а также заметное усложнение структуры поглощения вблизи K -края в спектрах KF, RbF и CsF по сравнению со спектрами LiF и NaF. Такое изменение характера поглощения нельзя связать с изменением типа кристаллической структуры, так как все щелочные фториды имеют решетку типа NaCl.

Наблюдаемое длинноволновое смещение K -края поглощения коррелирует с ростом ионности соединений в ряду LiF $\rightarrow$ CsF [11] и свидетельствует, по-видимому, об уменьшении энергии связи K (1s) электрона F при увеличении отрицательного заряда на F. Усложнение структуры поглощения вблизи края поглощения при переходе к спектрам KF, RbF и CsF, на наш взгляд, естественно связать с усложнением структуры зоны проводимости в результате приближения d -состояний щелочного иона к дну зоны проводимости. Этот механизм был предложен Онодерой [12] для объяснения аналогичного явления, наблюдавшегося ранее в ультрафиолетовых спектрах щелочно-галогидных кристаллов [3].

Известно, что часть тонкой структуры в спектрах поглощения может быть обусловлена рассеянием вырванного в процессе фотоионизации электрона в поле атомов ближайшего окружения [14, 15]. Для кубических кристаллов расстояние от края поглощения до структуры, обусловленной рассеянием, должно быть обратно пропорционально квадрату постоянной решетки. Используя это правило обратных квадратов, мы попытались отыскать соответствия в структуре спектров поглощения. Оказалось, что максимумы D , E и F в спектрах LiF и NaF приближенно подчиняются

² Ширина K -уровня F, по данным [9, 10], оценивается в 0.2 эв.

этому правилу, однако распространить это соответствие на остальные спектры не удалось, поэтому у нас нет твердой уверенности в том, что наличие этих максимумов обусловлено процессами рассеяния вырванного электрона в кристаллической решетке.

В работах [16, 17] утверждается возможность существования плазменных колебаний в LiF. Согласно этим данным, энергия плазмона в LiF равна 25.3 эв. Заметим, что в K -спектре поглощения F в LiF на расстоянии 25 эв от первого пика A находится интенсивный пик D , который, возможно, связан с вырыванием $1s$ -электрона F при одновременном возбуждении плазмона. Аналогично максимум E повторяет пик B , через энергию 26.4 эв приблизительно равную энергии плазмона.

Л и т е р а т у р а

- [1] Т. М. Зимкина, А. П. Лукирский. ФТТ, 7, 1462, 1965.
- [2] А. П. Лукирский, О. А. Ершов, Т. М. Зимкина, Е. П. Савинов. ФТТ, 8, 1787, 1966.
- [3] T. Sagawa, Y. Iguchi, M. Sasanuma, T. Nasu, S. Yamaguchi, S. Fujiwara, M. Nakamura, A. Ejiri, T. Masuoka, T. Sasaki, T. Oshio. J. Phys. Soc. Japan, 24, 2587, 1966.
- [4] R. Haensel, C. Kunz, B. Sonntag. Phys. Rev. Lett., 20, 262, 1968.
- [5] Т. М. Зимкина, В. А. Фомичев. ФТТ, 10, 1392, 1968.
- [6] R. Haensel, C. Kunz, T. Sasaki, B. Sonntag. Phys. Rev. Lett., 20, 1463, 1968.
- [7] А. П. Лукирский, И. А. Брытов, Н. И. Комяк. Сб. «Аппаратура и методы рентгеновского анализа», вып. 2, стр. 4, 1967.
- [8] J. A. Bearden. X-ray Wavelengths, Oak Ridge, Tennessee, 1964.
- [9] W. Mehlhorn, D. Stahlherm, H. Verbeek. Zs. Naturforsch., 23A, 287, 1968.
- [10] В. А. Фомичев. Изв. АН СССР, сер. физ., 31, 957, 1967.
- [11] Ч. Коулсон. Валентность, стр. 154—155. Изд. «Мир», М., 1965.
- [12] Y. Onodera, M. Okazaki, T. Inui. J. Phys. Soc. Japan, 21, 2229, 1966.
- [13] J. E. Eby, K. J. Teegarden, D. B. Dutton. Phys. Rev., 116, 1099, 1959.
- [14] А. И. Козленков. Изв. АН СССР, сер. физ., 25, 957, 1961.
- [15] Л. К. Израилева. ДАН СССР, 168, 777, 1044, 1966; 169, 1048, 1966.
- [16] M. Kreuzburg. Zs. Physik, 196, 433, 1966.
- [17] O. Sueoka. J. Phys. Soc. Japan, 19, 2239, 1964.

Ленинградский
государственный университет
им. А. А. Жданова

Поступило в Редакцию
3 июля 1969 г.

О ЗЕЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

А. М. Зыков и Б. Е. Саморуков

Известно, что красная ЭЛ p — n -переходов в GaP обусловлена присутствием в кристаллах цинка (или кадмия) и кислорода. Природа зеленой ЭЛ фосфида галлия изучена меньше.

В данной работе приводятся результаты исследования зеленого свечения p — n -переходов. Переходы создавались в вакууме или инертной среде (аргон) сплавлением олова в GaP p -типа электропроводности. Омические контакты получались сплавлением в кристаллы сплава In—Zn 5%. Пластинчатые кристаллы фосфида галлия выращивались медленным охлаждением расплавов в галлии. Для легирования кристаллов в расплав вводился цинк (0.05 и 0.1 ат.%) или кадмий (5 ат.%) и сера ($5 \cdot 10^{-4}$ мол.% ZnS) или теллур (0.01 ат.%).

Зеленая ЭЛ p — n -переходов исследовалась в интервале температур 80—300° K, спектры снимались с разрешением 0.002—0.006 эв.