

## РОСТ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ В $\text{MgF}_2$ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

А. П. Сергеев, П. Б. Сергеев

*Использование метода разложения на индивидуальные полосы спектров наведенного поглощения кристаллов  $\text{MgF}_2$  позволило построить зависимости интенсивности этих полос, а значит и концентрации собственных дефектов, от флюенса (плотности энергии) электронного пучка. Анализируются особенности этих зависимостей и возможные следствия из них.*

**Ключевые слова:**  $\text{MgF}_2$ , дефекты, наведенное поглощение, индивидуальные полосы, электронный пучок.

В работе [1] спектры наведенного электронным пучком (ЭП) поглощения в  $\text{MgF}_2$  были разложены на 14 индивидуальных полос, которые были привязаны к собственным дефектам кристалла. На рис. 1 показан типичный спектр наведенной ЭП оптической плотности в одном из образцов  $\text{MgF}_2$  и его реконструкция на основе выделенных полос.

Форма большинства индивидуальных полос ( $L\lambda_N(\lambda)$ ) поглощения  $\text{MgF}_2$  имела гауссовский профиль и, при использовании в качестве переменной длины волны ( $\lambda$ ), описывалась выражением:

$$L\lambda_N(\lambda) = K_N \exp\{-\ln 2[(\lambda_N + \Delta\lambda_N)/\Delta\lambda_N]^2[(\lambda_N - \lambda)/\lambda]^2\}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda_N$  – положение максимума  $N$ -ой полосы поглощения,  $\Delta\lambda_N$  – её полуширина на полувысоте,  $K_N$  – амплитудный коэффициент  $N$ -ой полосы в конкретном спектре. Для описания некоторых полос использовалось также выражение:

$$L\lambda_N = K_N \exp\{-\ln 2((\lambda_N - \lambda)/\Delta\lambda_N)^2\}. \quad (2)$$

Характеристики индивидуальных полос, входящие в выражения (1), (2), представлены в таблице 1. Полосы, описываемые выражением (2), отмечены в первой колонке

---

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: psergeev@sci.lebedev.ru.

звездочкой. Амплитудные коэффициенты ( $K_N$ ) в 4-й колонке получены при разложении спектра, показанного на рис. 1. Ошибка определения  $\lambda_N$  была  $< 3$  нм, а  $\Delta\lambda_N - 10\%$  [1].

Т а б л и ц а 1

*Характеристики индивидуальных полос поглощения в  $MgF_2$*

N	$\lambda_N$ [нм] / [эВ]	$\Delta\lambda_N$ [нм]	$K_N$	Центра окраски
1	117/10.7	5	4.5	$\alpha$
2	140/8.9	17	0.33	$I$
3	170/7.3	16	0.35	Примесная
4	202/6.2	22	0.33	$M^+$
5	217/5.7	33	1.35	$M_2$
6	250/5.0	28	3.53	$F_1$
7	259/4.8	17	2.63	$F_2$
8	276/4.5	12	0.01	$F_0$
9*	300/4.2	13	0.01	$H$
10	320/3.9	20	0.22	$M_4$
11*	370/3.37	13	1.85	$M_1$
12	400/3.1	23	0.42	$M_3$
13	465/2.7	33	0.02	$H$
14	517/2.4	35	0	Примесная ?

В последней колонке дается перечень центров окраски, ответственных за соответствующие полосы поглощения [1]. Такая привязка полос поглощения и центров окраски еще не устоялась и по ряду позиций нужны дополнительные доказательства.

За период изучения радиационных характеристик образцов  $MgF_2$  разного качества у нас накопилось много спектров наведенного поглощения этих кристаллов в цифровом формате [1, 2]. К настоящему моменту с использованием базисного набора полос была обработана еще одна группа спектров и построены зависимости интенсивности полос от флюенса ЭП. Эти зависимости и следствия из них и будут рассмотрены ниже.

*Экспериментальные результаты и их обсуждение.* Техника облучения образцов  $MgF_2$  ЭП описывалась ранее в [1, 2]. Образцы при облучении размещались в металлических нишах и прикрывались со стороны падения ЭП титановой фольгой в 14 мкм. Энергия электронов на образцах была около 280 кэВ. Плотность энергии ЭП за импульс 80 нс была  $\sim 2$  Дж/см<sup>2</sup>. За день делалось от 50 до 100 импульсов. Общий флюенс

ЭП на образцах ( $F$ ) является суммой флюенсов за все выстрелы к моменту очередного обследования образцов.

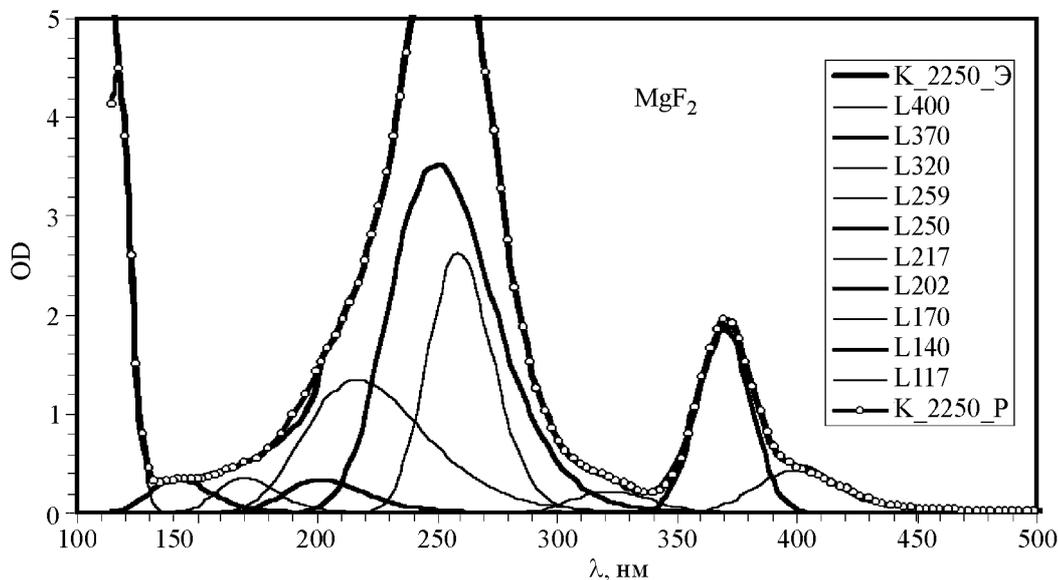


Рис. 1: Разложение спектра оптической плотности образца  $K_{2250}$  (образец из *Korth Kristalle*, облученный ЭП с флюенсом  $2250 \text{ Дж/см}^2$ ) на индивидуальные полосы ( $L\lambda_N$ ).  $K_{2250\_Э}$  – экспериментальный спектр,  $K_{2250\_Р}$  – расчетный спектр с учетом вклада от всех индивидуальных полос. Слабые полосы с  $K_N < 0.1$  на графике не представлены.

Спектры пропускания образцов в области 200–1000 нм в цифровом формате снимались на спектрофотометре Genesis-2 в день окончания очередного облучения, а в области 110–240 нм на спектрофотометрах ВМР-2 с задержкой после облучения в пределах месяца. Затем образцы повторно прописывались в видимой области и спектры “сшивались”. Полученные спектры  $T(\lambda)$  путем поточечного преобразования с учетом начального пропускания образцов ( $T_0$ ) преобразовывались в спектры наведенной оптической плотности ( $OD$ ) на основе выражения  $OD = \ln(T_0/T)$ . Такой спектр затем и раскладывался на индивидуальные компоненты с соответствующими  $K_N$ , что и показано на рис. 1. Здесь кривая  $K_{2250\_Э}$  есть экспериментальный спектр образца  $\text{MgF}_2$  из фирмы *Korth Kristalle* после облучения с флюенсом ЭП  $2250 \text{ Дж/см}^2$ , кривая  $K_{2250\_Р}$  есть расчетный спектр,  $L\lambda_N$  – вклады от соответствующих индивидуальных полос.

Полученные зависимости  $K_N(F)$  для группы высокочистых образцов  $\text{MgF}_2$  из ГОИ ( $\text{MgF}_2\text{-Г}$ ) толщиной 4 мм с содержанием примесей на уровне 20 ppm показаны в разных

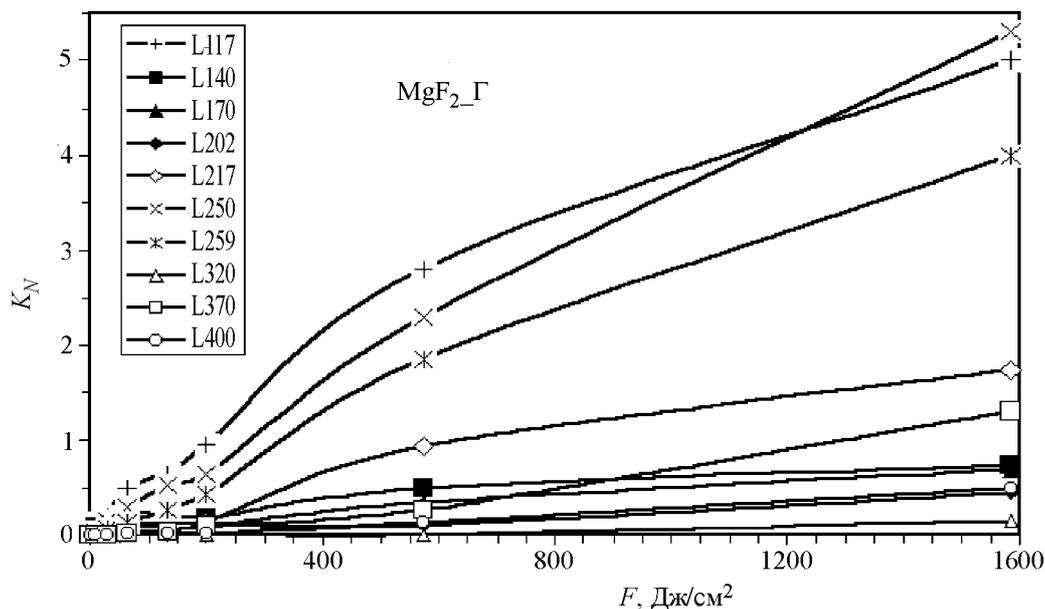


Рис. 2: Зависимости интенсивности индивидуальных полос поглощения ( $K_N$ ) в образцах  $MgF_2$  от флюенса ЭП ( $F$ ).

масштабах на рис. 2 и 3. Слабые полосы (L276, L300, L465 и L517) здесь не показаны. У них величина  $K_N$  была  $\sim 0.01$ , что не позволило установить искомые зависимости.

Самые сильные полосы, в соответствии с [1], принадлежат  $\alpha$  (L117) и  $F$ -центрам (L250 и L259). Их интенсивность почти линейно растет с  $F$ , достигая величины 2–3 у наиболее чистых образцов при  $F \sim 1000$  Дж/см<sup>2</sup>. Такого плавного роста интенсивности с ростом  $F$  не наблюдалось ни у одной другой из показанных на рисунках полос.

Странно ведут себя полосы с максимумами на 140 ( $I$ -центры) и 170 нм. Они быстро нарастают в самом начале облучения, но затем, после достижения величины  $K_N$  порядка 0.5 при  $F \sim 500$  Дж/см<sup>2</sup>, их рост затормаживается, сменяясь иногда у наиболее чистых образцов даже небольшим спадом. При этом, если полоса L140 хоть и слабо, но чувствует световое облучение образца в  $F$ -полосу, то L170 практически не чувствительна к разнообразным воздействиям [1]. Она может принадлежать или  $I$ -центрам, локализованным на примеси, или разным зарядовым состояниям доминирующей примеси кислорода. Вопрос остается открытым.

Следующая по интенсивности группа полос с максимумами на 217, 370, 320 и 400 нм принадлежит  $M$ -центрам [1]. Зависимости их интенсивности от флюенса ЭП после на-

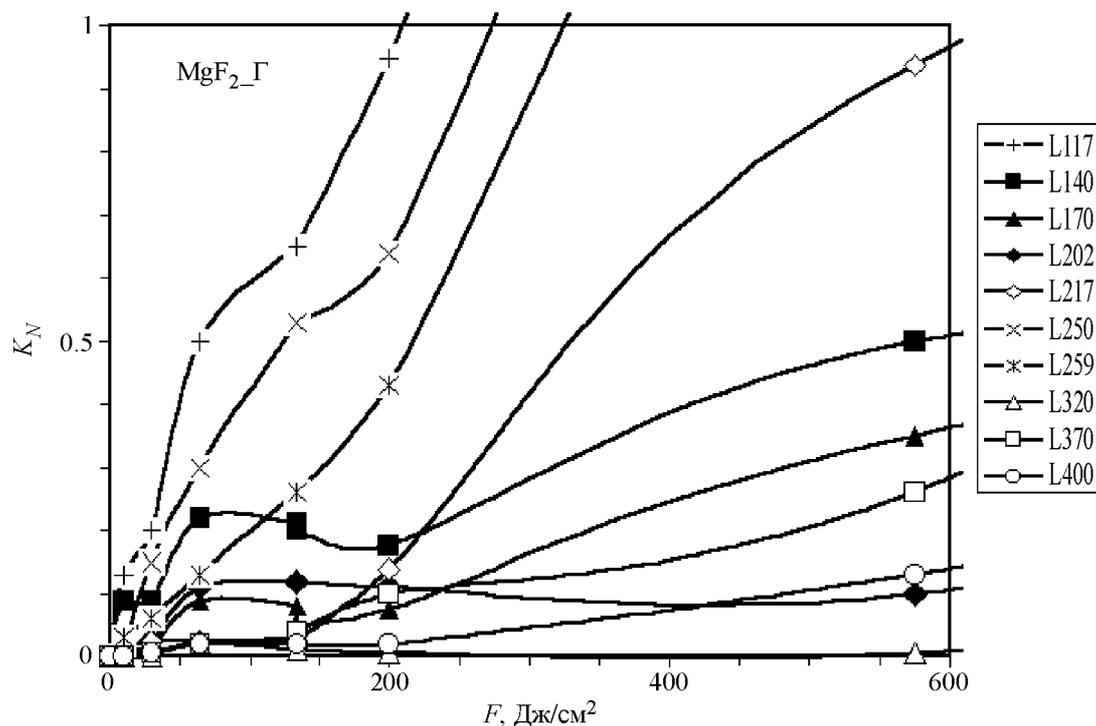


Рис. 3: Те же зависимости  $K_N(F)$ , что и на рис. 2, но в другом масштабе.

чального участка ( $F < 500$  Дж/см<sup>2</sup>) у всех обследованных образцов были практически линейными до предельно достигнутых  $F \sim 10$  кДж/см<sup>2</sup>. Согласно [3], при линейном росте  $F$ -центров концентрация их димеров,  $M$ -центров, должна расти квадратично! Это еще одна неясность в физике дефектообразования  $\text{MgF}_2$ . Далее отметим, что соотношения интенсивностей этих четырех полос сильно зависят от режимов световой подсветки при облучении и при хранении, а также температуры образцов. При облучении в темноте в этой группе превалирует полоса на 217 нм, достигающая 1 при  $F \sim 1000$  Дж/см<sup>2</sup>. Не намного от неё отстает и полоса L370. Полоса L320 примерно вдвое, а L400 почти на порядок слабее первых двух. Но даже небольшая световая подсветка облученных образцов может радикально поменять эти соотношения [1]. Сильно разнятся эти полосы и по временам релаксации, что сказывается на зависимости получаемых результатов от времени прописывания спектров образцов после облучения.

Необычно ведет себя и полоса L202. В [1] она была приписана  $M^+$ -центрам, т.е. паре из  $\alpha$ - и  $F$ -центров. Однако окончательный анализ поведения этой полосы при различных воздействиях можно будет проводить позже. В области 120–180 нм располагаются еще и слабые  $K$ - и  $L$ -полосы поглощения  $F$ -центров, но их присутствие при обработке

спектра пока не проявилось при использовавшейся методике разложения спектров на полосы.

Анализ полученных результатов показывает, что процесс наработки собственных дефектов в  $\text{MgF}_2$  при облучении электронным пучком на начальном этапе происходит с образованием  $\alpha$ ,  $I$  и  $F$ -центров. Но очень быстро основными нарабатываемыми дефектами становятся лишь  $\alpha$  и  $F$ -центры, а также их агломераты. Если приведенная в [1] привязка индивидуальных полос поглощения к собственным дефектам  $\text{MgF}_2$  верна, то объяснить слабое проявление междоузельных атомов фтора ( $H$ -центров с полосой L300) в спектрах можно или очень малым сечением поглощения этих центров, или тем, что в процессе облучения атомы фтора из кристалла уходят. Это может происходить через поверхность с дальнейшей диффузией анионных вакансий в объем. При этом кристалл может насыщаться и компонентами воздуха, в частности кислородом, что было отмечено в [1].

Выражаем благодарность Рейтерову В. М. за предоставление образцов  $\text{MgF}_2$ , а также Ставровскому Д. Б. за помощь в их прописывании.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. П. Сергеев, П. Б. Сергеев, Квантовая электроника **38**, 251 (2008).
- [2] П. Б. Сергеев и др., Оптический журнал **72**(6), 85 (2005).
- [3] А. А. Предводителев, Н. А. Тяпунина, Г. М. Зиненкова, Г. В. Бушуева, *Физика кристаллов с дефектами* (М., Изд-во МГУ, 1986).

Поступила в редакцию 9 декабря 2010 г.