

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ/а.е.м.

Д.В.Акиншин, А.Ю.Дидык, В.А.Скуратов

Описана экспериментальная методика исследования люминесценции кристаллов, вызываемой облучением тяжелыми ионами с энергией 1 МэВ/а.е.м. Обсуждаются возможности высокоэнергетической ионOLUMИНЕСЦЕНЦИИ в сравнении с традиционными методами люминесцентной спектроскопии. Представлены результаты измерений спектрального состава и температурная зависимость ионOLUMИНЕСЦЕНЦИИ кристаллов LiF под действием облучения ионами  $^{11}\text{B}$  и  $^{40}\text{Ar}$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

## Luminescence Crystals Irradiated by Heavy Ions with 1 MeV/a.m.u. Energy

D.V.Akinshin, A.Yu.Didyk, V.A.Skuratov

The experimental method of investigation of crystal luminescence, which is caused by irradiation of heavy ions with energy of 1 MeV per nucleon, is presented in the paper. The possibilities of high energy luminescence in comparison with traditional methods of luminescence spectroscopy are discussed. The results of measuring of spectral composition and the temperature dependence of ion luminescence of crystals LiF, irradiated by  $^{11}\text{B}$  and  $^{40}\text{Ar}$  are shown.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Для получения информации о радиационных дефектах в твердых телах широко применяется люминесцентная спектроскопия. Изучение кристаллов после их облучения проводится с помощью фото-, катодо-, рентгено-, термolumИНЕСЦЕНЦИИ, т.е. методов, практически не приводящих в процессе их использования к образованию новых дефектов. В отличие от классических методов возбуждение люминесценции пучками тяжелых заряженных частиц позволяет изучать структуру материала непосредственно в процессе образования и последующей эволюции радиационных дефектов. В таких экспериментах использовались, как правило, пучки ионов с энергиями в десятки и сотни кэВ, в результате чего исследуемый слой об-

разца ограничивается толщиной менее 1 мкм. Кроме того, для исключения процессов распыления поверхности материала, играющих существенную роль при указанных энергиях, необходимо использовать для возбуждения люминесценции легкие ионы —  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{D}$ ,  $^4\text{He}^{1+}$ . Увеличение энергии ионов, применяемых для возбуждения центров высвечивания до 1 МэВ/а.е.м. и выше, позволит снизить распыление и, за счет увеличения ионизационных потерь энергии, повысить выход люминесценции. Кроме того, исследуемые области образцов (более 10 мкм) можно считать макроскопическими. Известно<sup>12</sup>, что потери энергии тяжелых ионов на возбуждение электронной подсистемы кристаллов имеют максимальное значение при энергии налетающей частицы как раз  $\sim 1$  МэВ/а.е.м. Эти обстоятельства позволяют выделить высокоэнергетичную ионOLUMИнесценцию (ИЛ) как один из немногих источников "структурной" информации при исследовании свойств твердых тел на пучках тяжелых ионов, в частности, при совместном действии облучения и поля механических напряжений.

В настоящей работе дано описание методики, разработанной для изучения ИЛ в процессе облучения высокоэнергетичными тяжелыми ионами, приведены результаты экспериментов по ИЛ щелочно-галогидного кристалла (ЩГК) LiF, облучаемого ионами с энергией 1 МэВ/а.е.м.

#### Методика экспериментов

Исследования люминесценции кристаллов проводились на пучках ионов  $^4_0\text{Ar}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{11}\text{B}$  с энергией 1 МэВ/а.е.м., ускоренных на циклотроне ИЦ-100. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Пучок ионов через диафрагму попадает на образец (1), установленный под углом  $45^\circ$  к направлению падения пучка. Температура образцов при облучении может изменяться от температуры жидкого азота до комнатной. Возбуждаемое излучение после прохождения кварцевого окна (3) фокусируется линзой (4) на входной щели монохроматора.

Монохроматор (МСД-1) имеет рабочий диапазон длин волн от 200 до 800 нм и разрешение 1,5 нм при ширине щели 0,2 мм. Фотокатоды используемых для регистрации излучения фотоумножителей (ФЭУ-79, ФЭУ-100) с целью уменьшения числа фоновых импульсов охлаждались до температуры  $-30^\circ\text{C}$  микрохолодильником Пельтье.

Сбор, накопление и обработка информации, управление монохроматором осуществлялись при помощи измерительно-физического модуля на базе аппаратуры в стандарте КАМАК и персональной ЭВМ "Правец-16".

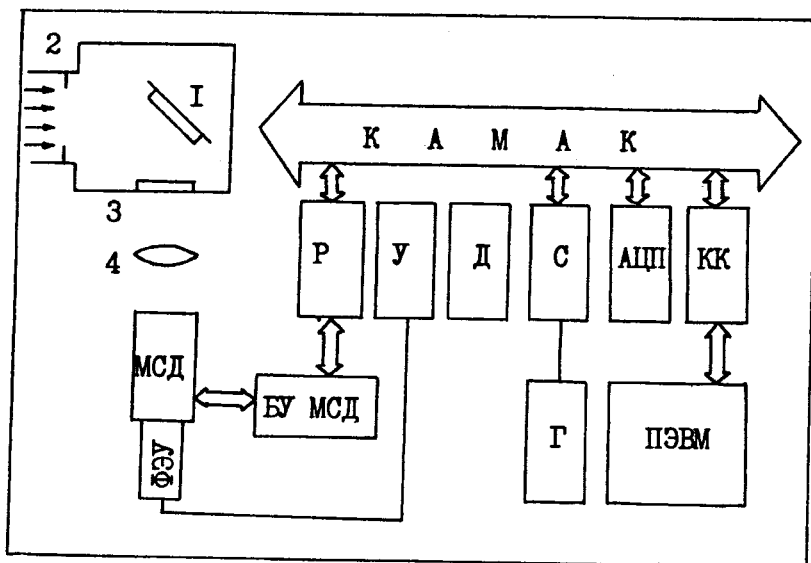


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 — исследуемый образец; 2 — камера облучения; 3 — кварцевое окно; 4 — кварцевая линза; Р — входной и выходной регистры; У — усилитель; Д — дискриминатор; С — счетчик; КК — контроллер крейта; МСД — монохроматор; БУ МСД — блок управления монохроматором; Г — генератор прямоугольных импульсов.

Спектрометрический тракт установки состоит из спектрометрического усилителя с активными фильтрами, интегрально-дифференциального дискриминатора и 16-разрядного двоичного счетчика. Для управления монохроматором использованы входной и выходной регистры. Камера с исследуемым образцом (2) представляет собой цилиндр Фарадея и позволяет регистрировать интенсивность пучка с использованием АЦП интегрирующего типа.

Циклотрон ИЦ-100 работает в импульсном режиме с частотой повторения импульсов 150 или 300 Гц (длительность импульсов от 0,3 до 2 мс), поэтому люминесценция кристаллов, вызванная облучением, также носит импульсный характер. Для получения информации о временной структуре этих процессов на управляющий вход счетчика подается стробирующий импульс необходимой длительности с генератора, запускаемого фронтом импульса тока дуги ионного источника. Варьируя длительность, а также задержку стробирующего сигнала относительно импульса пучка, можно получить достаточно полную картину динамики люминес-

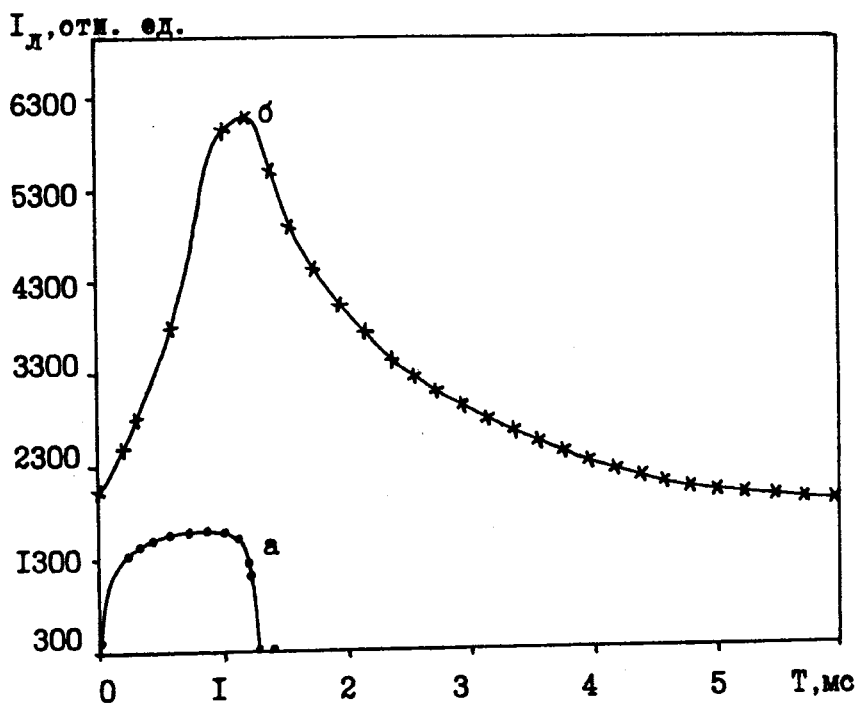


Рис. 2. Временная зависимость интенсивности люминесценции граната  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  при длительности импульса пучка ионов 1,1 мс. а —  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  с добавкой Cr; б —  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  с добавкой Cr.

ценции кристаллов с разрешением по времени компонент высвечивания  $>0,1$  мс.

Возможности разработанной методики для изучения ИЛ при облучении в импульсном режиме могут быть проиллюстрированы рис. 2, на котором приведены временные зависимости интенсивности люминесценции образцов алюминиевых гранатов с добавками хрома и хлора, характеризующихся различной длительностью послесвечения.

Разработанный программный пакет SPECTRLUM обеспечивает:

- управление монохроматором, сбор и накопление информации с ФЭУ, а также с устройства диагностики пучков ионов;
- интерактивное взаимодействие экспериментатора с ЭВМ в режиме меню с обширной информацией;
- широкое использование периферийных устройств: экспрессное отображение информации на экране дисплея, вывод данных

- в графическом и цифровом виде на принтер и экран дисплея, большие графические возможности при просмотре спектров;
- диагностику работы аппаратуры; выдачу сообщений при возникновении сбоев;
- предварительную обработку накапливаемой информации.

### Обсуждение результатов

На рис. 3 представлены спектры ИЛ беспримесного монокристалла LiF, облучаемого ионами  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 46,3 МэВ при комнатной температуре. Как видно из рисунка, наблюдаются три широкие полосы с  $\lambda_{\text{max}} = 320 \div 330 \text{ нм}$ ,  $520 \div 530 \text{ нм}$ ,  $660 \div 670 \text{ нм}$ . С увеличением флюенса ионов до  $\Phi t = 10^{14} \text{ см}^{-2}$  выход люминесценции значительно падает и в длинноволновых полосах снижается до уровня фона.

При возбуждении люминесценции в LiF низкоэнергетичными ионами регистрировались только две первые полосы<sup>11</sup>. Так, в случае бомбардировки протонами ( $E = 20 \text{ кэВ}$ ,  $\Phi = 1 \div 5 \text{ мкА см}^{-2}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ) наблюдались полосы с  $\lambda_{\text{max}} = 335$  и  $515 \text{ нм}$ . Однако, в отличие от облучения ионами  $^{40}\text{Ar}$ , интенсивность излучения в длинноволновой полосе значительно выше, чем в коротковолновой. Природа этих полос детально исследовалась в работах<sup>13, 41</sup>.

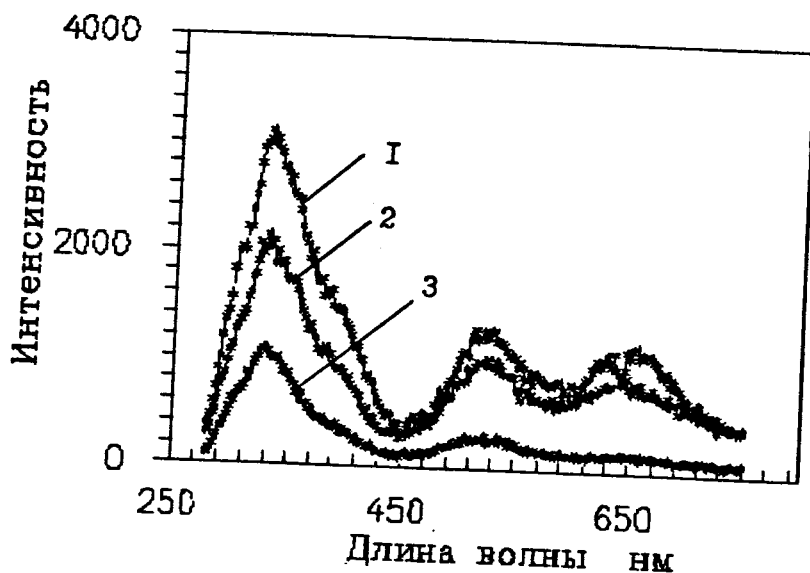


Рис. 3. Спектр люминесценции LiF при бомбардировке ионами  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 46,3 МэВ. 1 — исходный образец; 2 — флюенс  $\Phi = 3 \times 10^{13} \text{ ион/см}^{-2}$ ; 3 — флюенс  $\Phi = 10^{14} \text{ ион/см}^{-2}$ .

ИЛ отн. ед.

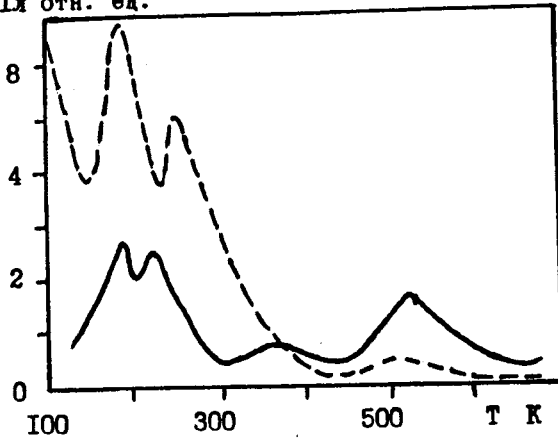


Рис. 4. Температурная зависимость интенсивности люминесценции LiF при облучении протонами с энергией 20 кэВ. ----  $\lambda = 335$  нм; —  $\lambda = 515$  нм.

Установлено, что люминесценция в беспримесных кристаллах осуществляется в результате рекомбинации дырочных центров

( $V_k$ ,  $V_F$ -центров) со свободными электронами и электронными центрами (F-центрами).

Сопоставление полученных спектров ИЛ с данными по оптическим характеристикам F-центров<sup>15</sup> позволяет сделать вывод о том, что излучение в ранее не наблюдавшейся полосе с  $\lambda_{\text{max}} = 660 \div 670$  нм обусловлено F2-центрами, т.е. парными ассоциациями анионных вакансий и электронов, образовавшихся в процессе облучения.

Различия низко- и высокоэнергетичного ионного возбуждения проявляются не только в спектральном составе люминесценции.

В работе<sup>11</sup> представлен график температурной зависимости интенсивности собственной ИЛ LiF, вызванной протонами с энергией 20 кэВ (см. рис. 4); из этого графика можно выделить два широких пика с максимумами при температурах 180 и 260 К для  $\lambda = 335$  нм (штриховая линия), а также 180 и 230 К для  $\lambda = 515$  нм (сплошная линия). На рис. 5 приведены графики температурной зависимости выхода люминесценции ( $\lambda = 330$  нм) LiF, облучаемого ионами  $^{40}\text{Ar}$  ( $E = 46,3$  МэВ,  $\Phi = 10^9$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>),  $^{22}\text{Ne}$  ( $E = 26,7$  МэВ,  $\Phi = 1,5 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>). Из рисунка видно, что облучение высокоэнергетичными ионами характеризуется наличием только одного, значительно более узкого максимума на кривой температурной зависимости. Наблюдаемые различия в температурных зависимостях интенсивности люминесценции связаны, по-видимому, с различиями процессов, происходящих в треках низко- и высокоэнергетичных ионов. Автолокализованные дырки ( $V_k$ -центры) в LiF начинают мигрировать при температуре выше 113 К<sup>13</sup>. Повышение выхода люминесценции, начиная с 140-150 К при низкоэнергетичном ионном облучении, а также воз-

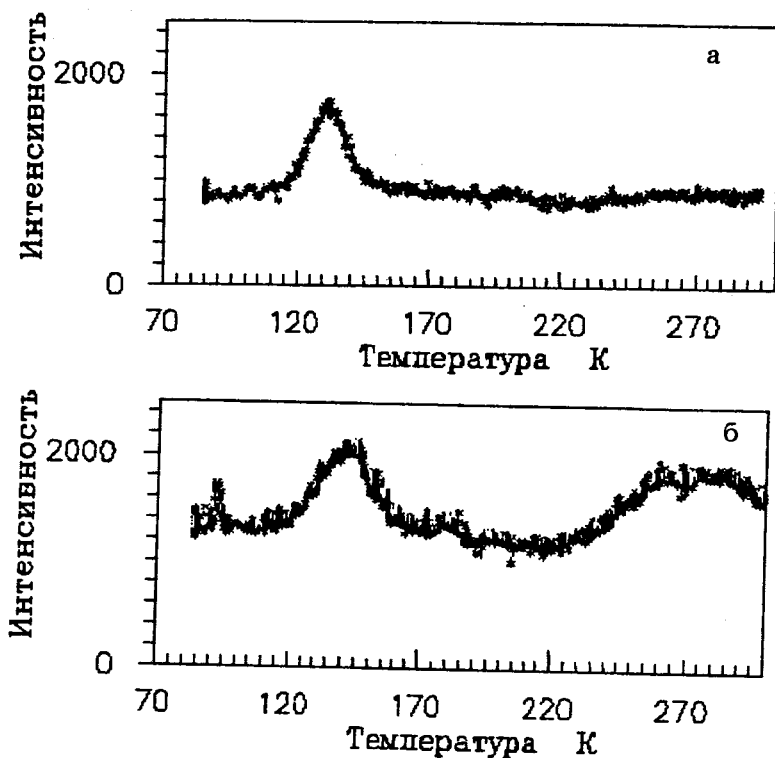


Рис. 5. Температурная зависимость интенсивности люминесценции LiF при облучении высокоэнергетичными ионами. а — облучение ионами  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 46,3 МэВ; б — облучение ионами  $^{20}\text{Ne}$  с энергией 26,7 МэВ.

буждении рентгеновскими лучами, связывают с миграцией автолокализованных дырок к электронным центрам, что приводит к реакции  $V_k + F \rightarrow h\nu_1$  [1, 3]. Максимальное свечение при этом соответствует 180 К.

Температура в области трека тяжелого иона с энергией 1 МэВ/а.е.м. (в частности, ионов Ne, Ar) значительно выше, чем в основной массе образца, поэтому в этой области происходят процессы, характерные для более высоких температур. Именно с этим можно связать тот факт, что наблюдаемый нами пик температурной зависимости смещен по сравнению с облучением протонами в сторону низких температур и значительно уже.

Подтверждением этому предположению может служить различие температурных зависимостей ИЛ, вызванной облучением ионами Ar (рис. 5а) и Ne (рис. 5б). В случае облучения более

легкими и менее энергетичными ионами Ne температурный пик несколько шире, а максимум его соответствует более высокой температуре.

Таким образом, разработана экспериментальная методика исследования спектрального состава люминесценции, вызываемой облучением высокоэнергетичными тяжелыми ионами. В результате проведенных экспериментов обнаружены значительные различия в спектрах ИЛ, генерируемой низко- и высокоэнергетичными ионами. В частности, обнаружена ранее не наблюдавшаяся длинноволновая (670 нм) полоса люминесценции, вызванная F2-центрами.

Вид температурной зависимости выхода люминесценции значительно отличается от ранее наблюдавшегося, что вызвано различием процессов, происходящих в треках низко- и высокоэнергетичных ионов.

### Литература

1. Бажин А.И., Конопелько Е.И. — Физика твердого тела. Донецк: изд-во ДГУ, 1984, вып.14, с.18.
2. Ziegler J.F. — Handbook of Stopping Cross-Sections for Energetic Ions in All Elements. New-York, Pergamon Press, 1980.
3. Раджабов Е.А., Непомнящих А.И. — Оптика и спектроскопия, 1980, т.49, №1, с.184.
4. Непомнящих В.И., Раджабов Е.А., Егранов А.В. — Центры окраски и люминесценции кристаллов LiF. Новосибирск: Наука, 1984.
5. Лущик Ч.Б., Лущик А.Ч. — Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М.: Наука, 1989.

Рукопись поступила 12 июля 1990 года.