

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КОРОТКОЖИВУЩИХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ, НАВЕДЕННЫХ В КРИСТАЛЛАХ LiF ИМПУЛЬСНЫМ МИКРОВОЛНОВЫМ РАЗРЯДОМ

Г.М.Батанов, В.А.Иванов, М.Е.Коныжев<sup>1)</sup>, А.А.Летунов

Институт общей физики РАН

117942 Москва, Россия

Поступила в редакцию 2 июля 1997 г.

Обнаружено новое явление – интенсивное свечение неокрашенных кристаллов фторида лития (LiF), возбуждаемых безэлектродным импульсным микроволновым разрядом на предпробойной стадии развития. Наблюдаемое свечение кристаллов LiF представляет собой люминесценцию короткоживущих агрегатных F<sub>2</sub>- и F<sub>3</sub><sup>+</sup>-центров окраски при комнатной температуре. Показано, что концентрация короткоживущих центров окраски, наведенных в приповерхностном слое кристаллов LiF микроволновым разрядом микросекундной длительности, достигает величины  $\sim (10^{19} - 10^{20}) \text{ см}^{-3}$ .

PACS: 52.90.+z, 61.72.Ji, 77.22.Jr, 78.60.Nk

**Введение.** Безэлектродный импульсный микроволновый разряд, развивающийся на поверхности диэлектрических кристаллов в вакууме, на предпробойной стадии развития представляет собой вторично-эмиссионный электронный разряд (ВЭР), который вызывает высокую плотность возбуждения тонкого приповерхностного слоя кристаллов. При этом в слое возникают наведенная электрическая проводимость и сильное поглощение мощности микроволнового излучения, приводящие к формированию контрагированного разряда и возникновению электрического пробоя диэлектрических кристаллов в поле микроволнового излучения [1, 2]. Воздействие на кристаллы последовательно импульсов микроволнового разряда (ВЭР) приводит к образованию оптически плотного окрашенного приповерхностного слоя, содержащего высокую концентрацию долгоживущих F-, F<sub>2</sub>- и F<sub>3</sub><sup>+</sup>-центров окраски, стабильных при комнатной температуре [3, 4]. Для объяснения наблюдаемых явлений нами была предложена концепция накопления и релаксации короткоживущих центров окраски, генерируемых в приповерхностном слое диэлектрических кристаллов в течение каждого импульса микроволнового разряда (ВЭР) [1, 2, 5]. Целью настоящей работы являлось экспериментальное обнаружение короткоживущих центров окраски и оценка их концентрации в приповерхностном слое неокрашенных и окрашенных кристаллов LiF по спектральным и динамическим характеристикам их люминесценции, возбуждаемой микроволновым разрядом (ВЭР).

**Условия и методика экспериментов.** Микроволновый разряд (ВЭР) инициировался на поверхности сколотых кристаллов LiF (выращенных в воздушной атмосфере и имеющих размеры 70×10×5 мм), которые помещались в максимум электрического поля стоячей волны типа TE<sub>10</sub>, возбуждаемой в металлическом волноводе прямоугольного сечения (120×57 мм) импульсным микроволновым излучением магнетрона (частота колебаний  $\nu = 1960$  МГц, мощность импульсов  $P_0 = 1.65$  МВт, длительность импульсов  $\tau$  – до 30 мкс, частота следования

<sup>1)</sup> e-mail: konyzhev@fpl.gpi.ru

импульсов  $f$  - до 2 Гц). Схема экспериментальной установки приведена в работе [1]. Волновод откачивался безмасляными насосами до давления  $10^{-4}$  Па. Спектральные и динамические характеристики свечения кристаллов LiF исследовались с помощью монохроматора МДР-2 (с дифракционной решеткой 600 штрихов/мм) и интерференционных светофильтров. Приемниками оптического излучения служили фотоэлектронные умножители ФЭУ-79. Временное разрешение регистрирующей аппаратуры составляло 50 нс. Относительная спектральная калибровка и оценка абсолютной чувствительности оптического измерительного канала МДР-2 и ФЭУ-79 в диапазоне длин волн 400-700 нм были проведены с использованием аттестованной вольфрамовой ленточной лампы СИ-8 и гелий-неонового лазера. Спектры оптического поглощения кристаллов LiF (как неокрашенных, так и окрашенных в микроволновом разряде) регистрировались с помощью спектрофотометра СФ-56. Ток электронов, эмитированных из области микроволнового разряда (ВЭР), контролировался с помощью многосеточного электростатического анализатора. Сигналы падающей и отраженной мощности микроволнового излучения регистрировались с помощью направленных волноводных ответвителей. Все эксперименты были выполнены при комнатной температуре.

Спектральные измерения проводились с использованием двух оптических каналов. В первом (опорном) канале с помощью светофильтра регистрировалось свечение в области  $686 \pm 10$  нм, во втором (измерительном) канале с помощью МДР-2 регистрировалось свечение в области 400-700 нм с шагом 11 нм и разрешением 4 нм. Спектральная интенсивность свечения кристаллов LiF определялась в результате деления значений интенсивности свечения, регистрируемого одновременно в измерительном и опорном каналах. Усреднение проводилось по 5 импульсам. Контрольные измерения показали, что спектр свечения не изменялся за период времени, необходимый для его регистрации. Используемая методика позволяла проводить амплитудные измерения спектра свечения кристаллов с относительной погрешностью не более 5%.

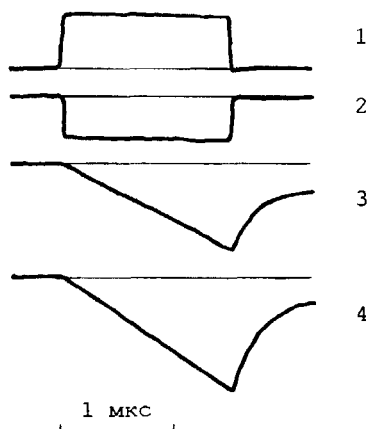


Рис.1. Осциллограммы сигналов при исследовании микроволнового разряда (ВЭР) ( $P_0 = 1.65$  МВт,  $\tau = 1.5$  мкс,  $f = 0.1$  Гц), развивающегося на поверхности неокрашенных кристаллов LiF: 1 - огибающая импульса падающего микроволнового излучения; 2 - электронный ток из области микроволнового разряда; 3, 4 - оптическое свечение кристаллов LiF в диапазонах длин волн  $540 \pm 2$  нм и  $670 \pm 2$  нм

**Экспериментальные результаты и их интерпретация.** На рис.1 представлены характерные осциллограммы сигналов. Для неокрашенных кристаллов LiF (с концентрацией дорадиационных стабильных  $F_2^-$  и  $F_3^+$ -центров окраски менее  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и концентрацией примесных кислородных центров окраски не более

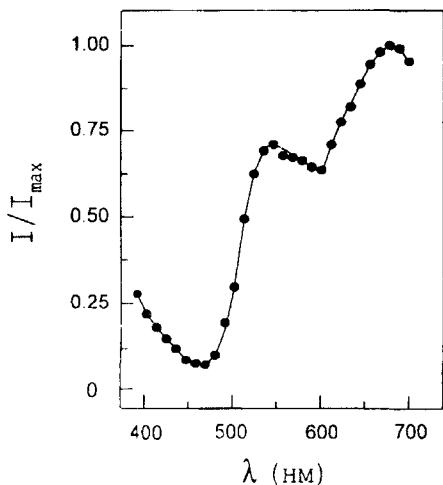


Рис.2. Спектр люминесценции неокрашенных кристаллов LiF, возбуждаемых импульсным микроволновым разрядом (ВЭР) ( $P_0 = 1.65$  МВт,  $\tau = 1.5$  мкс,  $f = 0.1$  Гц)

$1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) динамика изменения электронного тока из области микроволнового разряда (ВЭР), является практически безынерционной по отношению к динамике изменения импульсной мощности падающего микроволнового излучения: наблюдаемые сигналы характеризуются резкими фронтами длительностью  $\sim 0.1$  мкс. В противоположность этому, нарастание и спад интенсивности свечения кристаллов происходят с характерными значениями времени  $\sim 1$  мкс. Таким образом, для неокрашенных кристаллов LiF в диапазоне длин волн 400–700 нм регистрируются только медленные (инерционные) компоненты свечения. Спектр свечения кристаллов представлен на рис.2. В области 400–500 нм наблюдается минимум свечения вблизи 450 нм, а в области 500–700 нм – две интенсивные широкие полосы свечения с максимумами около 540 нм и 670 нм. Опираясь на результаты работы [4] (в которой при возбуждении лазерным излучением были зарегистрированы спектры люминесценции стабильных  $F_2$ - и  $F_3^+$ -центров окраски, наведенных в приповерхностном слое кристаллов LiF при окрашивании в микроволновом разряде), мы заключаем, что изображенные на рис.2 полосы излучения с максимумами при 540 нм и 670 нм соответствуют люминесценции  $F_3^+$ - и  $F_2$ -центров соответственно. Из спектров оптического поглощения кристаллов LiF следует, что концентрация стабильных  $F_2$ - и  $F_3^+$ -центров, наведенных в течение времени измерения спектра люминесценции (150–200 импульсов разряда), по-прежнему, не превышает  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (то есть после измерения спектра люминесценции неокрашенный кристалл LiF остается неокрашенным). Оценка абсолютной интенсивности свечения, регистрируемого в наших экспериментах с  $1 \text{ см}^2$  площади поверхности неокрашенных кристаллов LiF, соответствует потоку  $\sim 2 \cdot 10^{17}$  фотонов/с, излучаемому в телесный угол  $4\pi$  стерадиан в полосах люминесценции  $F_2$ - и  $F_3^+$ -центров. Дальнейшие оценки показывают, что при возбуждении кристаллов LiF микроволновым разрядом (ВЭР) концентрация наведенных  $F_2$ - и  $F_3^+$ -центров окраски на несколько порядков величины превышает концентрацию дорадиационных стабильных  $F_2$ - и  $F_3^+$ -центров окраски. Таким образом, нами установлено, что наблюдаемый спектр свечения неокрашенных кристаллов LiF соответствует люминесценции наведенных короткоживущих  $F_2$  и  $F_3^+$ -центров, генерируемых в приповерхност-

ном слое кристаллов LiF в течение каждого импульса микроволнового разряда (ВЭР) микросекундной длительности.

После длительного окрашивания кристаллов LiF (с помощью последовательности импульсов микроволнового разряда) динамика люминесценции кристаллов, возбуждаемых микроволновым разрядом (ВЭР), сильно изменяется: на длинах волн 540 и 670 нм наряду с медленными компонентами свечения появляются также и быстрые (безынерционные) компоненты свечения с характерными значениями времени нарастания и спада интенсивности  $\sim 0.1$  мкс. Так, после воздействия на кристалл LiF 60 тысяч импульсов микроволнового разряда (ВЭР) ( $P_0 = 1.65$  МВт,  $\tau = 30$  мкс,  $f = 2$  Гц, внешнее постоянное магнитное поле  $H_0 \approx 0.5$  кГс) амплитуды медленных и быстрых компонент свечения становятся почти равными. Так как быстрые компоненты свечения обусловлены люминесценцией стабильных центров, а медленные компоненты – люминесценцией короткоживущих центров, то из равенства этих амплитуд мы заключаем, что концентрация стабильных  $F_2^-$ - и  $F_3^+$ -центров окраски (накопленных в приповерхностном слое кристалла в результате длительного окрашивания) соизмерима с концентрацией короткоживущих  $F_2^-$ - и  $F_3^+$ -центров (генерируемых в течение каждого импульса микроволнового разряда (ВЭР)). Соответствующая суммарная концентрация стабильных  $F_2^-$ - и  $F_3^+$ -центров окраски составляет величину  $\sim 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , рассчитанную по формуле Смакулы (формула (2.47) в [6]) с использованием спектра оптического поглощения окрашенного кристалла LiF. При этом оптическая плотность кристалла LiF в полосе поглощения с максимумом вблизи 450 нм (поглощение  $F_2^-$ - и  $F_3^+$ -центров) равна 0.07, а толщина окрашенного слоя по оценкам составляет 0.05 мкм.

Отметим, что после воздействия на кристалл LiF 30 тысяч импульсов микроволнового разряда (ВЭР) ( $P_0 = 1.65$  МВт,  $\tau = 30$  мкс,  $f = 2$  Гц,  $H_0 \approx 0.5$  кГс) спектр люминесценции окрашенного таким образом кристалла совпадает со спектром люминесценции неокрашенного кристалла в пределах погрешности измерений, а интенсивность люминесценции окрашенного кристалла уменьшается в 2.5 раза по сравнению с исходной интенсивностью люминесценции неокрашенного кристалла.

**Обсуждение результатов.** При возбуждении неокрашенных кристаллов LiF рентгеновским излучением или сильноточным электронным пучком [7] свечение кристаллов наблюдалось только в полосе излучения примесных кислородных центров с максимумом вблизи 440 нм, а люминесценция  $F_2^-$ - и  $F_3^+$ -центров не регистрировалась. В настоящей работе при возбуждении неокрашенных кристаллов LiF микроволновым разрядом (ВЭР), напротив, зарегистрирована сильная люминесценция наведенных короткоживущих  $F_2^-$ - и  $F_3^+$ -центров, а свечение примесных кислородных центров в области 420–460 нм не наблюдается. Обнаруженное нами новое явление – интенсивная люминесценция наведенных короткоживущих агрегатных  $F_2^-$ - и  $F_3^+$ -центров окраски в неокрашенных кристаллах LiF – обусловлено тем, что в приповерхностном слое кристаллов, возбуждаемых микроволновым разрядом (ВЭР), генерируются короткоживущие центры окраски с высокой концентрацией  $\sim (10^{19} - 10^{20}) \text{ см}^{-3}$ , которая на 3–4 порядка превосходит остаточную концентрацию примесных центров окраски. Поэтому, на фоне сильной люминесценции наведенных короткоживущих  $F_2^-$ - и  $F_3^+$ -центров окраски слабое свечение стабильных кислородных центров не наблюдается.

Проведенный анализ подтверждается сравнением оценок величин удельных энергокладов. Действительно, возбуждение приповерхностного слоя кристаллов LiF низкоэнергетичными электронами микроволнового разряда (ВЭР) с характерной энергией электронов 1 кэВ, концентрацией электронов  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , длительностью импульса микроволнового разряда 1 мкс характеризуется удельной плотностью энергоклада  $\sim 500 \text{ Дж/см}^3$ . Эта величина на два порядка превышает соответствующую величину  $\sim 5 \text{ Дж/см}^3$  при возбуждении кристаллов LiF импульсным электронным пучком с энергией электронов 200 кэВ, плотностью тока  $50 \text{ А/см}^2$  и длительностью импульса 5 нс [7].

**Заключение.** 1. Обнаружена интенсивная люминесценция наведенных короткоживущих агрегатных  $F_2^-$  и  $F_3^+$ -центров окраски в тонком приповерхностном слое неокрашенных кристаллов LiF, возбуждаемых импульсным микроволновым разрядом (ВЭР) при комнатной температуре.

2. Показано, что импульсный микроволновый разряд (ВЭР), развивающийся на поверхности кристаллов LiF, вызывает высокую плотность возбуждения приповерхностного слоя кристаллов. При этом суммарная концентрация короткоживущих  $F_2^-$  и  $F_3^+$ -центров окраски, генерируемых в слое, достигает величины  $\sim (10^{19} - 10^{20}) \text{ см}^{-3}$ .

Авторы признательны проф. Т.Т.Басиеву и проф. Д.И.Вайсбурду за полезные обсуждения и консультации, С.Н.Сатунину – за помощь при компьютерной обработке результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96-02-17647-а).

- 
1. Г.М.Батанов, В.А.Иванов, М.Е.Коныжев, Письма в ЖЭТФ 59, 655 (1994).
  2. G.M.Batanov, V.A.Ivanov, and M.E.Konyzhev. Proc. SPIE XXII 4, 143 (1995).
  3. Г.М.Батанов, В.А.Иванов, М.Е.Коныжев и др., Письма в ЖТФ 19, 42 (1993).
  4. V.V.Ter-Mikirtychev, T.Tsuboi, M.E.Konyzhev, and V.P.Danilov. Physica Status Solidi (b) 196, 269 (1996).
  5. G.M.Batanov, V.A.Ivanov, and M.E.Konyzhev, in: *Strong Microwaves in Plasmas*, vol. 1. Ed. A.G.Litvak, Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics, 1996.
  6. *Physics of Color Centers*. Ed. W.B.Fowler, New York – London: Academic Press, 1968.
  7. В.И.Барышников, Т.А.Колесникова, Е.Ф.Мартынович, Л.И.Шепина, Журн. прикл. спектр. 47, 301 (1987).