

ИК люминесценция монокристаллов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при возбуждении электронным пучком

А.А.Гладилин, Э.С.Гулямова, В.П.Данилов, Н.Н.Ильичев, В.П.Калинушкин, И.Н.Один, П.П.Пашинин, Р.Р.Резванов, А.В.Сидорин, М.И.Студеникин, В.А.Чапнин, М.В.Чукичев

Исследованы спектрально-кинетические характеристики катодолуминесценции монокристаллов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при $T = 300$ и 80 К. Указанные характеристики соответствуют ИК спектру и кинетике люминесценции ионов Fe^{2+} в ZnSe при оптическом возбуждении кристаллов в область примесного поглощения. Полученные результаты открывают реальные перспективы реализации накачки $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеров горячими электронами.

Ключевые слова: кристаллы $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$, катодолуминесценция.

Кристаллы ZnSe , легированные железом ($\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$), используются в качестве активной среды перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона (4–5 мкм) [1–5]. Высокий коэффициент усиления [2] позволяет создавать на основе кристаллов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ низкопороговые [2] и мощные [5, 6] лазеры, работающие как в непрерывном [7], так и в импульсно-периодическом режиме [5]. Традиционным источником оптической накачки для $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеров стал освоенный в научных лабораториях и применяемый в медицине $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазер [8], работающий на длине волны $\lambda = 2.94$ мкм. Высокие импульсные энергии $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеров были получены при их накачке излучением НФ-лазеров [3, 6].

В полупроводниковых активированных матрицах ионы активатора могут возбуждаться горячими электронами, ускоряемыми электрическим полем (ударное возбуждение и ударная ионизация [9]). Такие процессы активно изучаются с целью разработки электролюминесцентных источников света [10]. Создание инверсной населенности между уровнями активатора в полупроводнике при воздействии на активный элемент лазера импульса напряжения представляет собой важную и перспективную научную и инженерно-технологическую задачу, поскольку этот метод накачки обеспечивает высокую эффективность преобразования электрической энергии в световую и позволяет получать большие коэффициенты усиления [11].

Применительно к лазерным кристаллам $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ первым шагом на пути реализации ударного возбуждения ионов активатора могло бы стать наблюдение и исследо-

вание ИК люминесценции (в области 4–5 мкм) ионов Fe^{2+} в ZnSe под действием высокоэнергетического пучка электронов, что и является целью настоящей работы.

Примесь Fe^{2+} вводилась в монокристалл ZnSe одновременно с двух сторон диффузионным методом в условиях термодинамического равновесия фаз. Затем кристалл полировался, причем с обеих его сторон снимался слой материала одинаковой толщины. Толщина слоя, обогащенного Fe^{2+} , была ~ 100 мкм со средней концентрацией в слое $C \approx 10^{19}$ см $^{-3}$.

Катодолуминесценция кристаллов возбуждалась импульсной электронной пушкой при энергии ускоренных электронов 36 кэВ и средней глубине проникновения электронов в образец ~ 3 мкм. Ток пучка электронов в импульсе варьировался от 0.01 до 0.2 А, диаметр пучка – от 1.5 до 10 мм, средняя скорость генерации электронно-дырочных пар в возбуждаемом слое изменялась в пределах 10^{25} – 10^{27} пар в секунду на 1 см 3 . Облучение и наблюдение люминесценции проводились под углом 45° к поверхности образца. Излучение катодолуминесценции выводилось из камеры через окно из CaF_2 и фокусировалось на входной щели монохроматора MS2004 (ООО «СОЛ инструментс»). В качестве приемника использовался диод PD42NB (ООО «ИюффеЛЕД») со спектральной чувствительностью в диапазоне 3.15–4.75 мкм. Сигнал с фотоприемника подавался на вход цифрового осциллографа непосредственно или после широкополосного усилителя УШ-10.

Спектр люминесценции монокристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при возбуждении электронным пучком при $T = 80$ К приведен на рис.1. Он соответствует спектрам излучения ионов Fe^{2+} в ZnSe , полученным ранее другими авторами при оптическом возбуждении кристаллов в области примесного поглощения [12]; в частности, совпадают максимум люминесценции (вблизи 3.9 мкм), а также коротковолновая и длинноволновая границы спектра.

Кинетика ИК фотолюминесценции кристаллов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ исследовалась в разное время рядом научных групп [1, 12, 13]. Время жизни лазерного перехода $^5\text{T}_2 \rightarrow ^5\text{E}$ характеризуется сильной зависимостью от температуры: оно варьировалось от 370 нс при комнатной температуре до 100 мкс при азотных температурах [1, 12, 13]. Кроме

А.А.Гладилин, Э.С.Гулямова, В.П.Данилов, Н.Н.Ильичев, В.П.Калинушкин, П.П.Пашинин, А.В.Сидорин, М.И.Студеникин, В.А.Чапнин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: agladilin@kapella.gpi.ru, gul@kapella.gpi.ru, danvp@yandex.ru, ilichev@kapella.gpi.ru
И.Н.Один, М.В.Чукичев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы
Р.Р.Резванов. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступило в редакцию 27 апреля 2016 г.

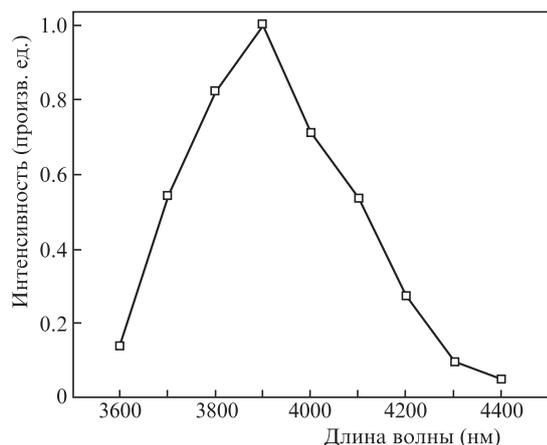


Рис.1. Нормированный спектр люминесценции (точки – эксперимент) кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при возбуждении электронным пучком; $T = 80 \text{ K}$.

того, в работе [12] отмечена заметная зависимость времени жизни от толщины активного слоя железа [12].

Мы провели измерения затухания люминесценции кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при возбуждении его электронным пучком. Импульс электронного пучка длительностью $\tau \approx 100 \text{ ns}$ имел прямоугольную форму при токе $I \approx 30 \text{ mA}$ и напряжении $U \approx 40 \text{ kV}$. На рис.2,*а* представлена временная зависимость сигнала люминесценции $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при возбуждении электронным пучком ($T = 80 \text{ K}$). Характер кинетики люминесценции является неэкспоненциаль-

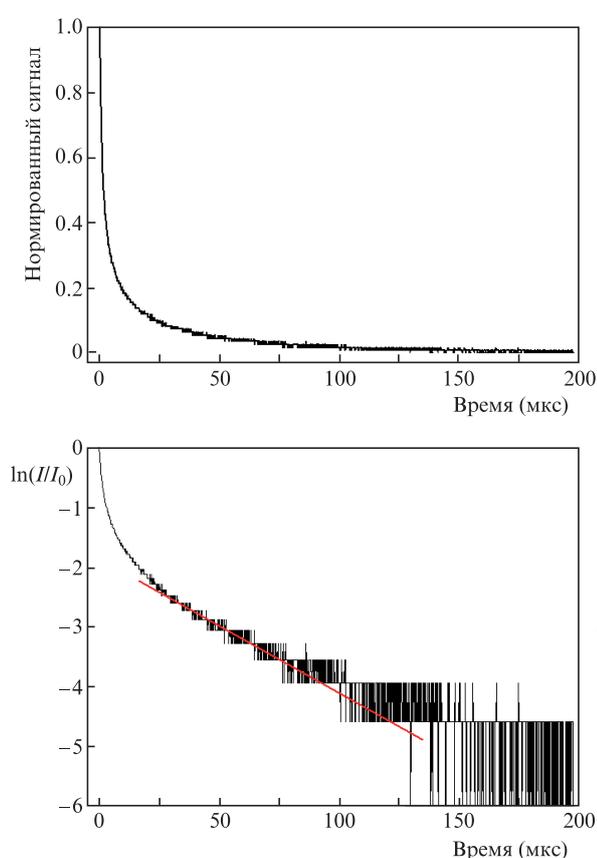


Рис.2. Зависимость от времени нормированного на максимум сигнала люминесценции $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+} I/I_0$ при возбуждении электронным пучком, $T = 80 \text{ K}$ (*а*); та же зависимость для логарифма сигнала (*б*).

ным, что видно из рис.2,*б*, где приведена зависимость логарифма сигнала от времени. При временах, больших 25 мкс, сигнал люминесценции можно описать функцией $\exp(-t/\tau)$ с характерным временем $\tau = 35\text{--}40 \text{ мкс}$, что показано прямой на рис.2,*б*. Это время согласуется с наблюдавшимся ранее временем затухания люминесценции при оптическом возбуждении ионов железа в кристалле ZnSe при азотной температуре (40–100 мкс [12, 13]). В целом, кривая распада хорошо описывается зависимостью $I(t) = I_0(1 + t/\tau)^{-1}$ с $\tau = 2.5 \text{ мкс}$, которая характерна для случая, когда вероятность излучения кванта люминесценции пропорциональна концентрации возбужденных центров.

На рис.3 приведены временные зависимости сигнала люминесценции при комнатной температуре и его логарифма. Кинетика люминесценции хорошо описывается функцией $\exp(-t/\tau)$ с $\tau = 250 \text{ ns}$ (рис.3,*б*). Это время близко ко времени затухания люминесценции $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при комнатной температуре при оптическом возбуждении ионов железа (355 нс [14]).

Таким образом, нами наблюдалась люминесценция кристаллов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ в ИК области спектра при возбуждении электронным ударом. Максимум люминесценции при азотной температуре находится в районе 3.9 мкм. Зарегистрированы кинетики люминесценции при азотной и комнатной температурах. Обнаружено, что при азотной температуре кинетика люминесценции имеет неэкспоненциальный характер, особенно на начальных стадиях. При комнатной температуре затухание сигнала люминесценции описывается экспонентой с временем 250 нс, что

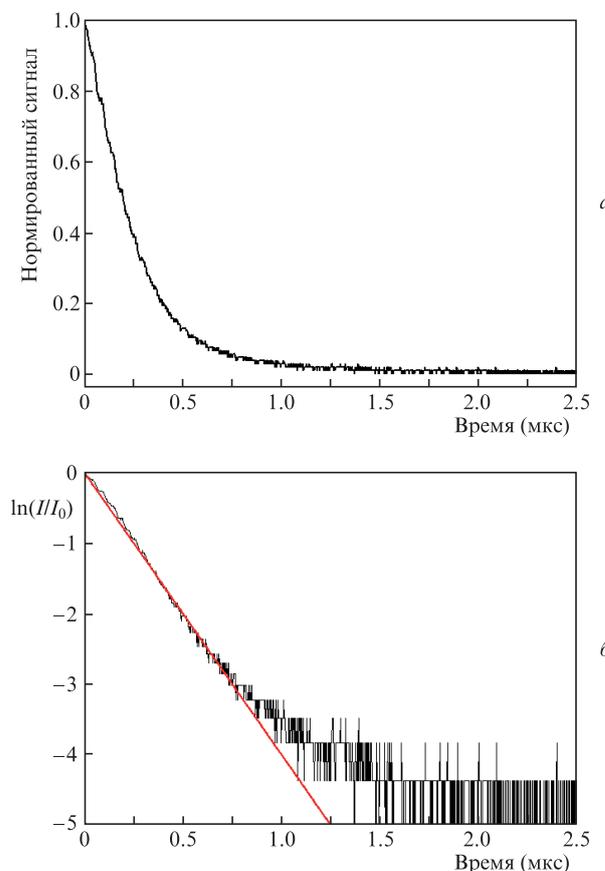


Рис.3. Зависимость от времени нормированного на максимум сигнала люминесценции $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+} I/I_0$ при комнатной температуре (*а*); та же зависимость для логарифма сигнала (*б*).

близко к известному из литературы времени при оптическом возбуждении люминесценции. Полученные результаты позволяют полагать, что метод накачки ИК лазеров на кристаллах ZnSe:Fe²⁺ импульсами электрического тока имеет реальные перспективы.

Настоящая работа поддержана РФФИ (гранты №16-02-00741а, 15-59-31817 РТ-оми и 15-52-45024 ИНД-а) и грантом Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-451.2014.2.

Работа выполнена в соответствии с Программой Президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности» (проект «Исследование возможности создания высокоэффективных лазеров ИК диапазона (4–5 мкм) на основе кристаллов ZnSe, легированных железом, при ударном возбуждении ионов активатора горячими электронами»).

1. Fedorov V.V., Mirov S.B., Gallian A., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**, 907 (2006).

2. Ильичев Н.Н., Данилов В.П., Калинушкин В.П. и др. *Квантовая электроника*, **38**, 95 (2008).
3. Великанов С.Д., Данилов В.П., Захаров Н.Г. и др. *Квантовая электроника*, **44**, 141 (2014).
4. Mirov S., Fedorov V., Martyshkin D., et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21**, 1 (2015).
5. Martyshkin D.V., Fedorov D.V., Mirov M., et al., in *CLEO: 2015, OSA Technical Digest (online)* (OSA, 2015, paper SF1F.2).
6. Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А. и др. *Квантовая электроника*, **46**, 11 (2016).
7. Evans J.W., Berry P.A., Schepler K.L. *Opt. Lett.*, **37**, 5021 (2012).
8. Багдасаров Х.С., Жеков В.И., Лобачев В.А. и др. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **48**, 1765 (1984).
9. Allen J.V. *J. Luminescence*, **48-49**, 18 (1991).
10. Верещагин И.К. *Электролюминесцентные источники света* (М.: Энергоатомиздат, 1990).
11. Власенко Н.А., Пухлий Ж.А. *Письма в ЖЭТФ*, **14**, 449 (1971).
12. Adams J.J. *PhD Theses* (Lawrence Livermore National Laboratory, 2002).
13. Adams J.J., Vibeau C., Page R.H., et al. *Opt. Lett.*, **24**, 720 (1999).
14. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И. и др. *Квантовая электроника*, **36**, 299 (2006).