

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ
КАЗАНСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 ГОДА**

По результатам Конкурса на лучшую научную работу студентов
Казанского федерального университета 2022 года

**КАЗАНЬ
2022**

УДК 001.1(082)

ББК 72я43

С23

*Печатается по рекомендации
редакционно-издательского совета
Казанского федерального университета*

Сборник научных статей казанского федерального университета 2022 года [Электронный ресурс]: по результатам Конкурса на лучшую научную работу студентов Казанского федерального университета 2022 года. – Электронные текстовые данные (1файл: 6,2 Мб). – **С23** Ка-зань: Издательство Казанского университета, 2022. – 350с. – Систем-ные требования: Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: https://kpfu.ru/portal/docs/F1152963945/Sbornik.KLNR_2022.pdf

DOI 10.26907/csa.2022

УДК 001.1(082)

ББК 72Я43

DOI 10.26907/csa.2022

©Издательство Казанского университета, 2022

Для оценки точности позиционирования электродвигателя, а также скорость выполнения ЦУ, электродвигателю в качестве ЦУ было задано движение по синусоиде:

$$y = A * \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \text{ где } A - \text{амплитуда, } T - \text{период.}$$

Таблица 1.

Оценка параметров позиционирования электродвигателя при задании ЦУ в виде синусоиды

| | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Время выполнения ЦУ | 30 мс |
| Точность позиционирования | 540 угловых секунд = 0,15 градуса |

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Аванесов Г.А. Принципы построения астроинерциальной системы авиационного применения / Г.А. Аванесов, Р.Б. Бессонов, А.Н. Куркина и др. – М.: Институт космических исследований РАН, 2013. – 21 с.
- 2) Столов Л.И. Моментные двигатели постоянного тока / Л.И. Столов, А.Ю. Афанасьев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.
- 3) Землянухин П.А. Видео- и радиосигналы в системах передачи информации / П.А. Землянухин. – Ростов-на-Дону; Таганрог: «Издательство Южного Федерального университета», 2017. – 119 с.
- 4) ШИМ. – URL: <https://www.joyta.ru/7532-shim-shirotno-impulsnaya-modulyaciya/> (дата обращения: 29.04.2022).
- 5) ПИД-регулятор. – URL: <https://drives.ru/stati/pid-regulyator/> (дата обращения: 29.04.2022).
- 6) TMS320F2837xD. – URL: <https://kazan.terraelectronica.ru/product/2084782/> (дата обращения: 29.04.2022).
- 7) TMS320F2837xD Dual-Core Microcontrollers [Text]:datasheet.– Texas Instruments. – 2013. – 2020. – 226 с. (дата обращения: 29.04.2022).

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ НАНО- И МИКРОЧАСТИЦ Nd^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Олейникова Е.И.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук, доцент Низамутдинов А.С.,

канд. физ.-мат. наук, ассистент Пудовкин М.С.

В современном мире существует потребность в бесконтактных способах измерения температуры с высоким пространственным разрешением для целей клеточной биологии, гипертермии [1] и сенсорики мироустройств [2]. Одним из таких способов является люминесцентная термометрия, где в качестве температурного зонда служит нано- или микро-люминофор, параметры сигнала люминесценции которого зависят от температуры. Дизайн таких люминофоров является очень актуальной задачей.

К задачам и цели данной работы можно отнести синтез и характеризацию наночастиц Nd^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$, а также исследование таких параметров их люминесценции, как форма спектра люминесценции и кинетики затухания люминесценции в зависимости от температуры.

Наночастицы Nd^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$ были синтезированы методом гидротермального синтеза. Фазовый состав был определен методом порошкового рентгенофазового анализа на дифрак-

тометре «Shimadzu XRD-7000S, $K\alpha$ ($\lambda = 0.15406$ нм), люминесцентные характеристики были исследованы методом лазерной абсорбционной спектроскопии. Оптическое возбуждение производилось лазером $\lambda = 790$ нм ($T=100$ мкс, $\tau=5$ мкс), переход $^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$ (Nd^{3+}). Регистрация спектров и кинетик люминесценции осуществлялась с использованием оборудования Stellarnet (разрешение 0,5 нм), криостат CRYO industries, МДР-23, ФЭУ-62 и Tektronix DPO 7354. Спектры люминесценции в диапазоне температур 80-320 К приведены на рис. 1.

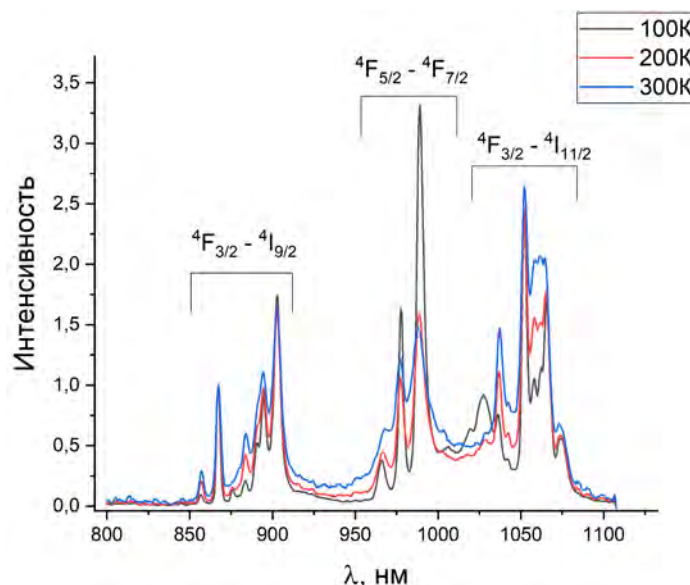


Рис. 1. Нормированные спектры люминесценции образца Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (0,1 мол.): YF_3 при температуре 100К (черный), 200К (красный), 300К (синий)

Видно, что их форма зависит от температуры. В качестве параметра, зависящего от температуры, выбран LIR (рис. 2), то есть отношение интегральных интенсивностей полос люминесценции $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$ (Nd^{3+}) и $^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}$ (Yb^{3+}). Видно, что данный параметр также зависит от температуры.

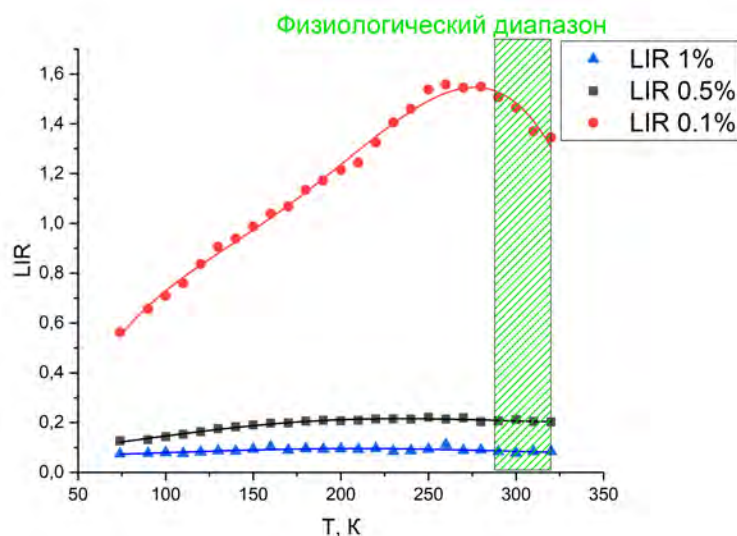


Рис. 2. LIR образцов Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (0,1 мол.): YF_3 (красный), Nd^{3+} (0,5 мол.), Yb^{3+} (0,5 мол.): YF_3 (черный) и Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (1,0 мол.): YF_3 (синий) аппроксимированный полиномом 4 порядка. Зеленым указан физиологический диапазон 290-320К

Очень важной характеристикой температурного сенсора является абсолютная температурная чувствительность S_a , которая является производной от функции LIR по температуре (рис. 3).

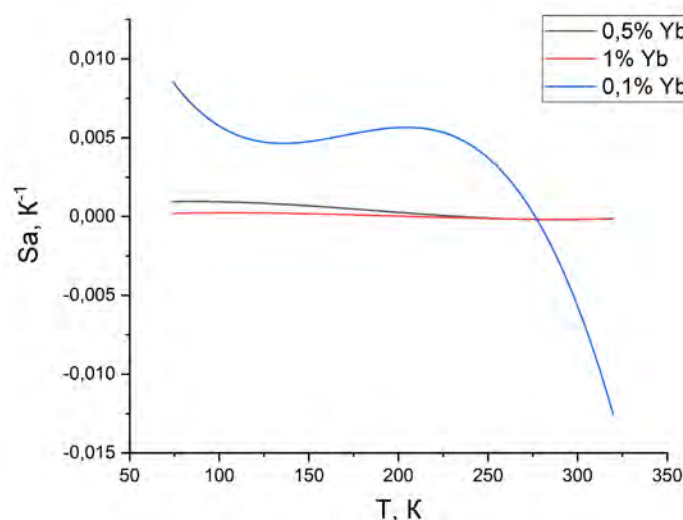


Рис. 3. Абсолютная температурная чувствительность S_a образцов Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (0,1 мол.%): YF_3 (красный), Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (0,5 мол.%): YF_3 (черный) и Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (1%): YF_3 (синий)

Из рис. 3 мы делаем вывод о хорошей температурной чувствительности образца с 0,1 мол.% Yb^{3+} (0,015 мкс/К при температуре 320 K), что значительно выше чем прямых конкурентов на основе ионов Pr^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} [1]. Характер температурной зависимости LIR можно объяснить следующим образом. Взаимодействие между Nd^{3+} и Yb^{3+} диполь-дипольное, существуют несколько процессов передачи энергии, зависящих от температуры: Nd^{3+} передает Yb^{3+} при участии фононов решетки, Yb^{3+} передает обратно Nd^{3+} , а также Yb^{3+} передает соседнему Yb^{3+} . Вероятности этих процессов зависят от концентраций ионов активаторов. Для уточнения механизма температурной чувствительности, были детектированы кинетики затухания люминесценции и определены эффективные времена затухания люминесценции τ_{eff} (рис. 4).

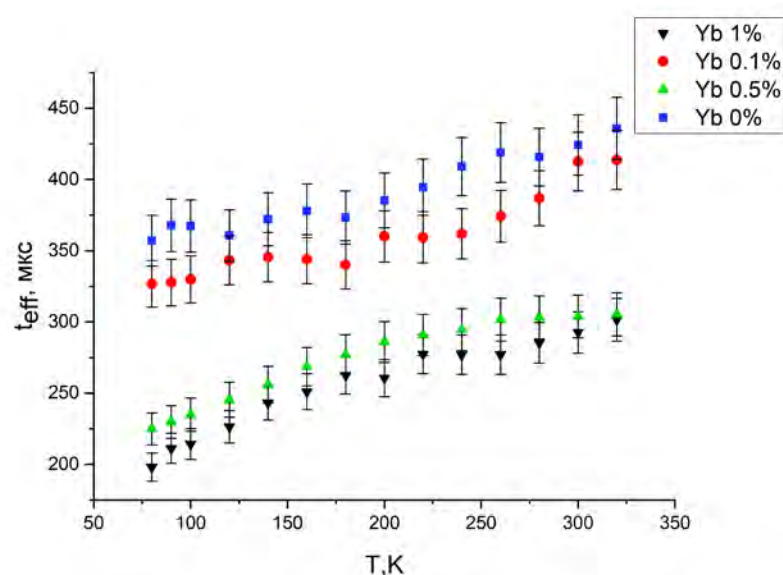


Рис. 4. График зависимости эффективного времени жизни люминесценции Nd^{3+} от температуры образцов с разной концентрацией Yb^{3+} (0; 0,1; 0,5 и 1,0 мол.%)

Видно, что τ_{eff} увеличивается с температурой, хотя по предполагаемой теории мы должны были увидеть уменьшение τ_{eff} ионов Nd^{3+} из-за увеличения вероятности передачи энергии на уровень Yb^{3+} . Мы выдвигаем гипотезу, что увеличение τ_{eff} Nd^{3+} с увеличением температуры связано со сжатием кристаллической решетки образца при понижении температуры (как следствие, уменьшаются расстояния между ионами активаторами), тогда вероятность передачи энергии на Yb^{3+} зависит от расстояния между атомами Nd^{3+} и Yb^{3+} . Для проверки данной гипотезы был проведен рентгенофазовый анализ образца при разных температурах, который подтвердил изменение параметров решетки. Было показано, что положения пика [001] при 100 и 300 К составляли $12,0395 \pm 0,0003$ и $12,0225 \pm 0,0004$ градуса соответственно (точность определения угла получена с помощью программы OriginPro9.0 при аппроксимации функцией GaussAmp). Таким образом, межплоскостное расстояние d_{hkl} для кристаллографической плоскости [001], определяемое с помощью уравнения Брэгга-Вульфа меняется на $\Delta d_{\text{hkl}} 0,0010 \pm 0,0002$ нм при изменении температуры с 100 до 300 К. Чтобы оценить, способны ли такие изменения в параметрах кристаллической решетки повлиять на кинетики люминесценции образцов, мы проводим оценку диполь-дипольного Ферстровского взаимодействия. Для этого мы по кинетикам люминесценции вычисляем критический радиус взаимодействия R_c , опираясь на статью [3]. Критический радиус взаимодействия – расстояние между донором и акцептором, при котором передача энергии и внутреннее затухание равновероятно. В статье [3] предлагается аппроксимировать кинетики люминесценции образца функцией (1) и далее по полученным из аппроксимации параметрам (2) и (3), входящим в функцию, определить критический радиус взаимодействия.

$$I = I_0 e^{(-\frac{t}{\tau_0} - \gamma \sqrt{t} - wt)}, \quad (1)$$

где $\gamma = 4/3\pi^{3/2} N_A (C_{DA})^{-1/2}$ – параметр переноса энергии от донора к акцептору (2), $w = \pi(2\pi/3)^{5/2} N_D N_A C_{DD} C_{DA}$ – параметр миграции (3).

Значения критических радиусов составили: $R_c^{\text{dd}} = 0,348 \pm 0,003$ нм (100К), $R_c^{\text{dd}} = 0,359 \pm 0,003$ нм (200К) и $R_c^{\text{dd}} = 0,362 \pm 0,002$ нм (300К). Мы замечаем, что полученные критические радиусы взаимодействия отличаются на 0,01 нм. Данная величина изменения R_c^{dd} на порядок выше полученной из эксперимента Δd_{hkl} . Однако, модель, описанная в [3], не учитывает, что перенос энергии между частицами происходит при участии фотонов. Таким образом, величина ΔR_c^{dd} , скорее всего, завышена. Можно предположить, что полученные значения Δd_{hkl} способны заметно влиять на параметры люминесценции образцов и гипотеза о том, что основной механизм температурной чувствительности Nd^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$ связан с эффектом температурного расширения матрицы YF_3 имеет место быть.

Для более глубокого обоснования правомерности данной гипотезы мы зарегистрировали кинетики люминесценции Nd^{3+} (0,01; 0,03; 0,3 и 1,0 мол.%): LiYF_4 при температурах 100 и 300 К. По литературным данным матрица LiYF_4 имеет меньший коэффициент теплового расширения по сравнению с матрицей YF_3 . Время затухания люминесценции ионов неодима для данного материала ведет себя иначе в зависимости от температуры, а именно, уменьшается при увеличении температуры, это связано с тем, что процессы тушения при участии фононов при низких температурах менее эффективны. Далее мы планируем провести для $\text{Nd}^{3+}:\text{LiYF}_4$ рентгенофазовый анализ при разных температурах и создать новую модель с учетом вклада процессов переноса энергии при участии фотонов.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Авторы выражают благодарность с.н.с. Коробдовой С.Л., Морозову О.А., и Киямову А.Г., Лукиной Е.В. за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Ximendes E.C. Unveiling in vivo subcutaneous thermal dynamics by infrared luminescent nanothermometers / E.C. Ximendes, W.Q. Santos, U. Rocha, U.K. Kagola, F. Sanz-Rodríguez, N. Fernández, ... & C.D. Brites // Nano letters. – 2016. – V. 16 (3). – PP. 1695–1703.
- 2) Aigouy L. Scanning thermal imaging of microelectronic circuits with a fluorescent nanoprobe / L. Aigouy, G. Tessier, M. Mortier, & B. Charlot // Applied Physics Letters. – 2005. – V. 87 (18). – PP. 184105.
- 3) Batalioto F. Optical measurements of Nd³⁺/Yb³⁺ codoped fluorindogallate glasses / F. Batalioto, D.F. de Sousa, M.J.V. Bell, R. Lebullenger, A.C. Hernandez, L.A.O. Nunes // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2000. – V. 273. – PP. 233–238.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ГРОССА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИЦЕЛЛ

Смолей Д.А.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Лунев И.В.

Введение

Существование таких молекулярных ассоциатов, как мицеллы, в растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ) было предсказано более сотни лет назад, однако исследования микроструктуры и процессов ассоциации мицелл начались значительно позднее в 1970-х годах. В настоящее время мицеллы представляют огромный интерес в различных областях науки и техники: от производства моющих и косметических средств до производства систем адресной доставки лекарств и модификации реагентов в физико-химических методах анализа веществ.

Исследования мицелл проводятся огромным числом как экспериментальных методов исследования (ЯМР, кондуктометрия, спектроскопия комбинационного рассеяния, малоугловое рассеяние нейтронов и т.д.), так и теоретических (метод классической молекулярной динамики). Из всех методов стоит выделить метод диэлектрической спектроскопии, который позволяет получить множество ценной информации о поведении молекул и их ассоциатов в растворе. Более того, существует ряд теоретических моделей, позволяющих по имеющимся диэлектрическим спектрам оценить ряд параметров, описывающих микроструктуру мицелл. Среди изученных моделей особенно выделяется модель Гросса, сочетающая в себе простоту расчётов и достаточно хорошее соответствие с экспериментом.

Экспериментальные методы для определения диэлектрических спектров водных растворов ПАВ

Для проверки модели Гросса в качестве объекта исследования был выбран водный раствор додецилсульфата натрия (SDS), так как данная система является модельной и наиболее изученной. Для нее известны значения критической концентрации мицеллообразования