



# Люминесцентная нанотермометрия с одиночными органическими молекулами: влияние электрон-фононного взаимодействия

А. О. Савостьянов<sup>1</sup>, И. Ю. Еремчев<sup>2,3</sup>, А. В. Наумов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева, Троицкое подразделение, Троицк, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский педагогический государственный университет (МПГУ), Москва, Россия

Люминесцентная термометрия – стремительно развивающийся научный метод, основанный на зависимости люминесцентных и спектральных характеристик наноразмерных излучателей от температуры. Точность данного метода существенным образом зависит от используемых теоретических моделей, описывающих температурное поведение спектров. В настоящей работе мы приводим краткий обзор наших недавних результатов, связанных с новыми подходами к описанию температурного уширения спектральных линий одиночных органических молекул в полимерной матрице как результата электрон-фононного взаимодействия. Мы полагаем, что рассматриваемый подход может быть успешно применен для разнообразных перспективных излучателей, используемых в люминесцентной термометрии

**Ключевые слова:** люминесценция, термометрия, полимеры, электрон-фононное взаимодействие

Статья получена: 05.10.2023

Статья принята: 31.10.2023

Люминесцентная термометрия на сегодняшний день является бурно развивающимся научным направлением, охватывающим широкий спектр областей от клеточной

# Luminescence Nanothermometry by Single Organic Molecules: Manifestation of Electron-Phonon Interaction

A. O. Savostianov<sup>1</sup>, I. Yu. Eremchev<sup>2,3</sup>, A. V. Naumov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch, Troitsk, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of spectroscopy RAS, Troitsk, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Moscow Pedagogical State University (MPGU), Moscow, Russia

Luminescent thermometry is a rapidly growing scientific method based on the dependence of the luminescent and spectral characteristics of nano-sized emitters on temperature. The accuracy of this method depends significantly on the theoretical models used to describe the temperature behavior of the spectra. In this paper, we provide a brief overview of our recent results related to new approaches to interpreting the temperature broadening of the spectral lines of single organic molecules in a polymer matrix as a result of electron-phonon interaction. We believe that the approach under consideration can be successfully applied to a variety of promising emitters used in luminescent thermometry.

**Keywords:** luminescence, thermometry, polymers, electron-phonon interaction

Article received: 05.10.2023

Article accepted: 31.10.2023

Luminescent thermometry today is a rapidly developing scientific field, covering a wide range of areas from cell biology [1] and teranostics [2] to catalytic chemistry [3] and microelectronics [4]. In fact, we are talking about a type of nanosensing: luminescent thermometry uses nano-sized fluorescent labels, which can be used in tasks where the use of traditional methods of temperature measurement is ineffective or completely impossible. The most widely used fluorescent labels are organic molecules in shells of biocompatible polymers [5, 6], nanoparticles containing lanthanide ions [7] and



биологии [1] и тераностики [2] до каталитической химии [3] и микроэлектроники [4]. Фактически речь идет о разновидности наносенсорики: в люминесцентной термометрии применяются наноразмерные флуоресцирующие метки, которые возможно использовать в таких ситуациях, когда применение традиционных методов измерения температуры малоэффективно или попросту невозможно. В качестве флуоресцирующих меток наибольшее распространение получили органические молекулы в оболочках из биосовместимых полимеров [5, 6], наночастицы, содержащие ионы лантаноидов [7] и ионы переходных металлов [8], центры окраски в алмазах и других кристаллах [9, 10], полупроводниковые [11] и углеродные квантовые точки [12].

Среди разнообразных методов измерения температуры при помощи люминесценции [13], к которым относятся вычисление интенсивности яркого пика в спектре, ратиометрия (изменение относительной интенсивности разных пиков в спектре), измерение времени флуоресценции и ее поляризации, значительное распространение получили подходы, связанные с измерением спектральных характеристик бесфононной линии (БФЛ) [14]: ее ширины и сдвига. Температурное поведение БФЛ в значительной степени определяется взаимодействием излучателя с фононами [15], что делает крайне актуальным поиск теоретических моделей, способных с высокой точностью предсказывать температурное поведение БФЛ.

Ниже мы приводим краткий обзор наших недавних результатов [16,17], связанных с поиском адекватных микроскопических моделей электрон-фононного (ЭФ) взаимодействия для примесных молекул в полимерных матрицах. Для этого нами были впервые измерены температурные зависимости ширины БФЛ в спектрах возбуждения флуоресценции одиночных молекул тетра-трет-бутилтеррилена (ТБТ) в полимерной матрице полиизобутилена (ПИБ) в температурном диапазоне 15–70 К, в котором вклад ЭФ взаимодействия является определяющим. Экспериментальные измерения проводились на уникальном криогенном эпилюминесцентном микроскопе-спектрометре (см. подробности в [18]), позволяющим при помощи CCD-камеры одновременно детектировать флуоресцентные изображения всех ОМ, находящихся в его поле зрения. В ходе эксперимента осуществлялось синхронное сканирование частоты перестраиваемого лазера в области поглощения примесных ОМ и детектирование флуоресцентных изображений. Впоследствии при помощи компьютерного анализа на флуоресцентных изображениях рас-

transition metal ions [8], color centers in diamonds and other crystals [9, 10], semiconductor [11] and carbon quantum dots [12].

Among the various methods for measuring temperature using luminescence [13], which include monitoring the intensity of a bright peak in the spectrum, ratiometry (changes in the relative intensity of different peaks in the spectrum), as well as measuring the fluorescence lifetime or its polarization, approaches related to measuring spectral characteristics of a zero-phonon line (ZPL) [14] (its width and spectral shift) are widespread. The temperature behavior of ZPLs is largely determined by the interaction of the emitter with phonons [15], which makes it extremely important to search for theoretical models capable of predicting the temperature behavior of ZPLs with high accuracy.

Below we provide a brief overview of our recent results [16, 17] related to the search for adequate microscopic models of electron-phonon (EP) interaction for impurity molecules in polymer matrices. To do this, we firstly measured the temperature dependences of the ZPL width in the fluorescence excitation spectra of single tetra-tert-butylterrylene (TBT) molecules (SMs) encased in the polymer matrix of polyisobutylene (PIB) in the temperature range of 15–70 K, where the EP interaction is significant. Experimental measurements were carried out on a unique cryogenic epi-luminescent microscope-spectrometer (see details in [18]), which allows to simultaneously detect fluorescent images of all SMs located in the CCD camera field of view. During the experiment, synchronous detuning of the tunable laser wavelength in the region of absorption of impurity SM and detection of fluorescent images was carried out. Using computer analysis, individual SMs were recognized in the fluorescent images, after which the dependences of the integral luminescence intensity of the SM on the excitation wavelength were plotted. In this way, SM fluorescence excitation spectra were obtained, where the accuracy of the ZPL width determining depends on the parameters of the laser (laser linewidth, detuning step) and the signal-to-noise ratio in the experiment.

An example of temperature-dependent spectra for SM TBT in a PIB matrix is shown in Fig. 1. We approximated the data using either a Lorentz contour or the sum of two contours. The latter was due to the detection of the phonon sideband in the spectra at temperatures >40 K [14]. Since the true ZPL shape corresponds to the Voigt profile, we used computer simulation of the spectrum to determine the phonon contribution to the broadening  $\gamma_{ph}(T)$ . The contour of the spectral line  $I(\omega_{laser}, T)$  measured in the experiment was modeled as a convolution of the Gaussian laser profile and the Lorentzian ZPL shape,

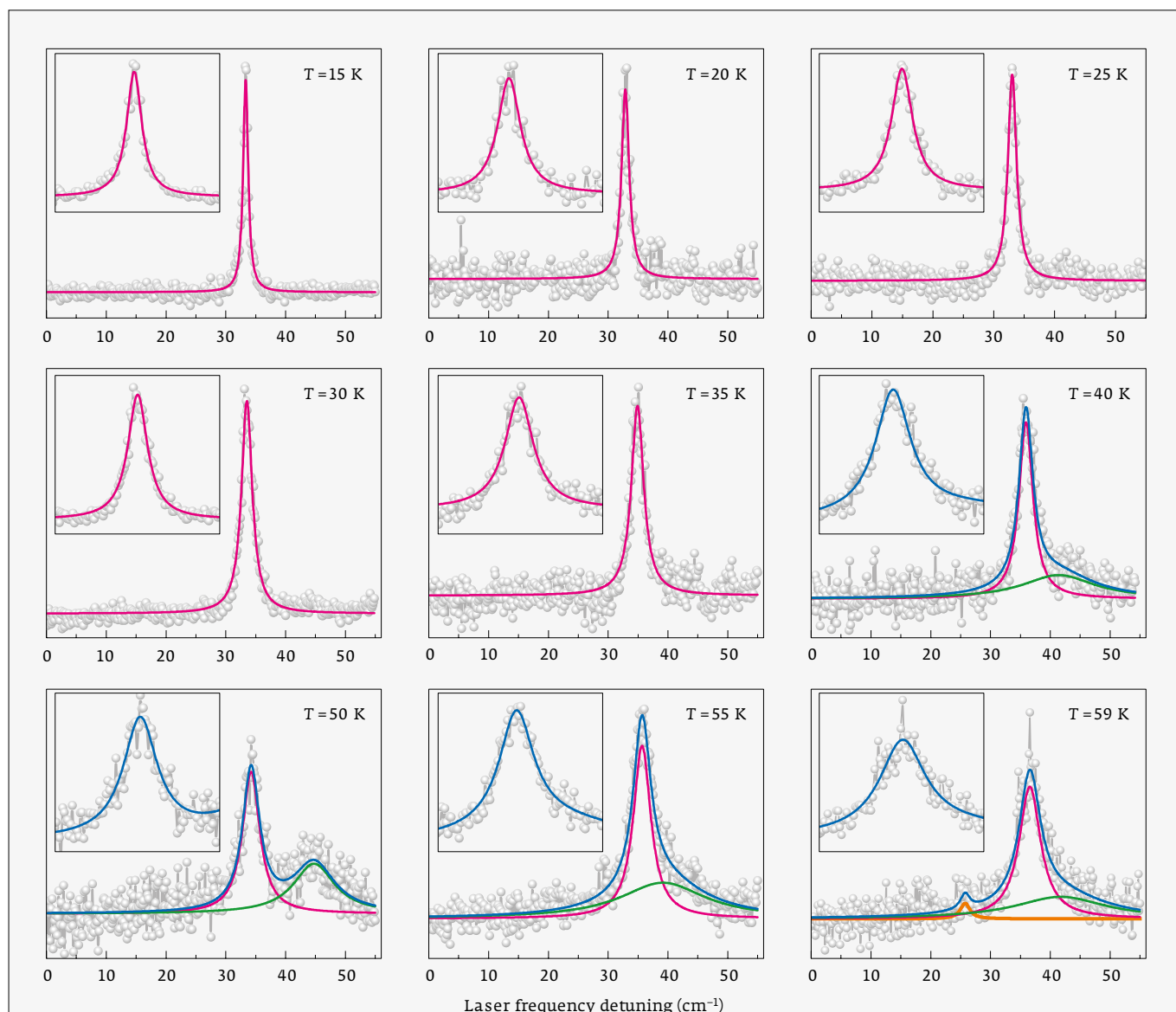
познавались отдельные ОМ, после чего для них строились зависимости интегральной интенсивности свечения ОМ от частоты возбуждения. Таким образом были сформированы спектры возбуждения флуоресценции, в которых точность определения ширины БФЛ определяется параметрами возбуждающего лазера (ширина лазерной линии, шаг перестройки) и соотношением сигнал/шум в конкретном эксперименте.

Пример температурно-зависимых спектров для ОМ ТБТ в матрице ПИБа приведен на рис. 1. Экспериментальные данные мы аппроксимировали при помощи либо контура Лоренца, либо суммы двух контуров. Последнее было обусловлено детектирова-

where integration was replaced by summation to simplify calculations:

$$I(\omega_{\text{laser}}, T) = \sum_{\omega} \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi\sqrt{\pi}\gamma_{\text{laser}}} \exp\left[4\ln 2\left(\frac{\omega - \omega_{\text{laser}}}{\gamma_{\text{laser}}}\right)^2\right] \left[ \frac{\gamma(T)/2}{(\omega - \omega_{\text{ZPL}})^2 + (\gamma(T)/2)^2} \right] \quad (1),$$

where  $\omega_{\text{laser}}$  corresponds to the laser frequency,  $\gamma_{\text{laser}}$  is the laser line width,  $\gamma(T)$  is the desired ZPL width,  $\omega_{\text{ZPL}}$  is its spectral position. Using the previously known values of  $\gamma_{\text{laser}}$  and  $\omega_{\text{ZPL}}$  in the calculations, we simulated spectral lines, which, like the experimentally measured ZPLs, were approximated by the Lorentz function. The value of  $\gamma(T)$  when the widths of two



**Рис. 1.** Спектры возбуждения флуоресценции одиночной молекулы ТБТ в матрице ПИБа при различных температурах.  
**Fig. 1.** Fluorescence excitation spectra of a single TBT molecule in a PIB matrix at different temperatures.



нием в спектрах при температурах  $> 40$  К фононного крыла [14]. Так как истинная форма БФЛ соответствует профилю Фойгта, для определения фононного вклада в уширение  $\gamma_{ph}(T)$  мы использовали компьютерное моделирование спектра. Контур измеряемой в эксперименте спектральной линии  $I(\omega_{laser}, T)$  моделировался как свертка Гауссового профиля лазера и Лоренцевой формы БФЛ, где интегрирование для упрощения расчетов было заменено на суммирование:

$$I(\omega_{laser}, T) = \sum_{\omega} \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi\sqrt{\pi}\gamma_{laser}} \exp\left[4 \ln 2 \left(\frac{\omega - \omega_{laser}}{\gamma_{laser}}\right)^2\right] \left[ \frac{\gamma(T)/2}{(\omega - \omega_{ZPL})^2 + (\gamma(T)/2)^2} \right] \quad (1),$$

где  $\omega_{laser}$  соответствует частоте лазера,  $\gamma_{laser}$  – ширина лазерной линии,  $\gamma(T)$  – искомая ширина БФЛ,  $\omega_{ZPL}$  – ее спектральное положение. Используя при вычислениях заранее известные величины  $\gamma_{laser}$  и  $\omega_{ZPL}$ , мы моделировали спектральные линии, которые так же, как и экспериментально измеренные БФЛ, аппроксимировались функцией Лоренца. Значение  $\gamma(T)$ , при котором ширины двух Лоренцевых профилей, соответствующих реально измеренному и модельному спектру, совпадали, брались за искомое.

Точность измерения температуры при помощи люминесцентной термометрии очевидно обусловлена используемыми теоретическими подходами для описания температурного поведения спектров. В случае, когда речь заходит об ЭФ взаимодействии, как правило, применяется традиционный подход, рассматривающий температурное уширение БФЛ как результат слабого взаимодействия излучателя либо с акустическими фононами (хорошо известный закон уширения  $\gamma_{ph}(T) \sim T^2$ ) [19], либо с отдельными квазилокализованными модами [20], когда прогнозируется квазиэкспоненциальный характер уширения. На наш взгляд, такой подход не может считаться до конца удачным. Во-первых, совершенно не очевидно, что имеет место именно слабое ЭФ взаимодействие, во-вторых, рассмотрение плотности колебательных состояний (ПКС) материала как в рамках модели Дебая, так и в виде единичной моды Лоренцевой формы кажется излишне упрощенным и не отражающим свойства реальных твердотельных излучателей.

Для объяснения наблюдаемого температурного уширения БФЛ ОМ ТВТ в ПИБе нами был предложен несколько иной вариант описания, основанный на применении общей теории ЭФ взаимодействия, разработанной И.С.Осадько [21]. Данный подход позволяет рассматривать ЭФ связь любой силы,

Lorentzian profiles corresponding to the actually measured and model spectra coincided, was taken as the desired one.

The accuracy of temperature measurements using fluorescent thermometry is determined by the theoretical approaches used to describe the temperature behavior of the spectra. For the case of EP interaction, a traditional approach is usually used: It considers the temperature broadening of the ZPL as a result of weak interaction of the emitter either with acoustic phonons (the well-known broadening law  $\gamma_{ph}(T) \sim T^2$ ) [19] or with individual quasi-localized modes [20], when the quasi-exponential law of the broadening is predicted. In our opinion, this approach cannot be considered completely comprehensive. Firstly, it is not at all obvious that it is the weak EP interaction that takes place; secondly, consideration of the density of vibrational states (VDOS) both within the framework of the Debye model and for the case of a single mode of the Lorentzian shape seems overly simplified and does not corresponds to the real solid-state emitters.

To unravel the observed temperature broadening for SMs of TBT in a matrix of PIB, we proposed another explanation, based on the general theory of EP interaction developed by I. S. Osadko [21]. This approach allows one to consider EP coupling of an arbitrary strength based on VDOS of arbitrary shape. By means this theory, we were able to give an acceptable explanation of all the experimental data obtained only by considering the so-called resonant vibrational modes [22]. In fact, such vibrations result from the hybridization of the eigenmodes of the impurity molecule and the normal modes of the matrix. We have shown that, taking into account the VDOS for solids under study, it is possible to explain various types of broadening  $\gamma_{ph}(T)$  using only two fitting parameters.

An example of a successful description is shown in Fig. 2. To calculate, the following system of equations was used:

$$\begin{aligned} \gamma_{ph}(T) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \ln \left\{ 1 + 4n(\omega) [n(\omega) + 1] (U_1 - U_0)^2 \Gamma_0(\omega) \Gamma_1(\omega) \right\} d\omega, \\ n(\omega) &= \left[ \exp(\hbar\omega / kT) - 1 \right]^{-1}, \\ \Gamma_{0,1}(\omega) &= \Gamma_{PIB}(\omega) / \left( [1 - U_{0,1} \Omega_{PIB}(\omega)]^2 + [U_{0,1} \Gamma_{PIB}(\omega)]^2 \right), \\ \Omega_{PIB}(\omega) &= (2/\pi) \int_0^\infty v \Gamma_{PIB}(v) / (\omega^3 - v^2) dv, \\ \Gamma_{PIB}(\omega) &= \pi \omega D_{PIB}(\omega) / \int_0^\infty \omega^2 D_{PIB}(\omega) d\omega. \end{aligned} \quad (2)$$

Here  $\Gamma_{(0,1,PIB)}(\omega)$  are spectral phonon functions corresponding to the spectrum of resonant modes for the ground (0) and excited (1) electronic states of the SM, as well as the spectrum of normal modes of impurity-free PIB (PIB).  $D_{PIB}(\omega)$  – VDOS of pure PIB,  $U_{0,1}$  – quadratic cou-



причем используя ПКС произвольной формы. Мы пришли к выводу, что дать приемлемое объяснение всех полученных экспериментальных данных возможно только в рамках рассмотрения т. н. резонансных колебательных мод [22]. Фактически такие колебания являются следствием гибридизации собственных мод примесной молекулы и нормальных мод матрицы. Нами было показано, что, применяя при вычислениях известную ПКС для исследуемого материала, можно объяснить разнообразные типы уширения  $\gamma_{ph}(T)$ , используя лишь два подгоночных параметра.

Пример успешного описания показан на рис. 2. Для вычисления использовались следующая система уравнений:

$$\gamma_{ph}(T) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \ln \left\{ 1 + 4n(\omega) [n(\omega) + 1] (U_1 - U_0)^2 \Gamma_0(\omega) \Gamma_1(\omega) \right\} d\omega,$$

$$n(\omega) = \left[ \exp(\hbar\omega/kT) - 1 \right]^{-1},$$

$$\Gamma_{0,1}(\omega) = \Gamma_{PIB}(\omega) / \left( [1 - U_{0,1} \Omega_{PIB}(\omega)]^2 + [U_{0,1} \Gamma_{PIB}(\omega)]^2 \right),$$

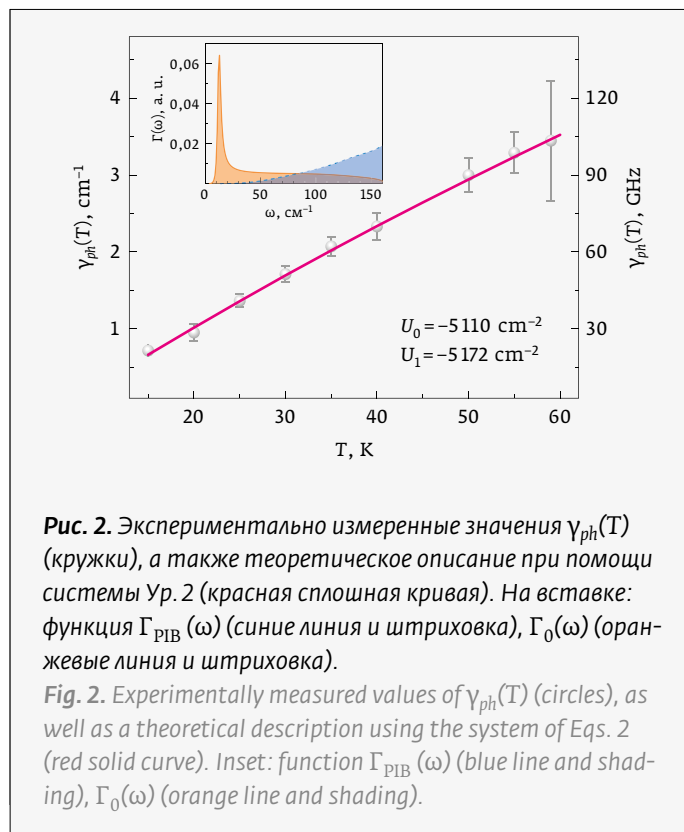
$$\Omega_{PIB}(\omega) = (2/\pi) \int_0^{\infty} v \Gamma_{PIB}(v) / (\omega^3 - v^2) dv,$$

$$\Gamma_{PIB}(\omega) = \pi \omega D_{PIB}(\omega) / \int_0^{\infty} \omega^2 D_{PIB}(\omega) d\omega. \quad (2)$$

Здесь  $\Gamma_{(0,1,PIB)}(\omega)$  – спектральные фоновые функции, соответствующие спектру резонансных мод для основного (0) и возбужденного (1) электронного состояний примесной ОМ, а также спектру нормальных мод беспримесного ПИБа (PIB).  $D_{PIB}(\omega)$  – ПКС беспримесного ПИБа,  $U_{0,1}$  – константы квадратичной связи. Из системы ур. 2 следует, что, зная  $D_{PIB}(\omega)$  и используя  $U_{0,1}$  в качестве варьируемых параметров, можно вычислить искомую зависимость  $\gamma_{ph}(T)$ .

Хотя наши результаты напрямую относятся к органическим молекулам в полимерной матрице, мы полагаем, что они могут быть обобщены на широкий круг люминесцентных материалов. Так, например, при  $U_{0,1} \rightarrow 0$  и  $D(\omega) \sim \omega^2$  рассматриваемая модель сведется к хорошо известному закону  $\gamma_{ph}(T) \sim T^2$ . Куда больший интерес, однако, представляют случаи, когда  $D(\omega)$  может быть получена из первопринципных расчетов. Недавние публикации, посвященные анализу ЭФ взаимодействия для центров окраски в алмазах [23] и дефектам в гексагональном нитриде бора [24], показали, что такая задача принципиально реализуема.

Работа выполнена в рамках темы ГЗ МПГУ при поддержке Министерства просвещения РФ (AAAA-A20-120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы РФ (НШ-776.2022.1.2).



**Рис. 2.** Экспериментально измеренные значения  $\gamma_{ph}(T)$  (кружки), а также теоретическое описание при помощи системы Ур. 2 (красная сплошная кривая). На вставке: функция  $\Gamma_{PIB}(\omega)$  (синие линия и штриховка),  $\Gamma_0(\omega)$  (оранжевые линия и штриховка).

**Fig. 2.** Experimentally measured values of  $\gamma_{ph}(T)$  (circles), as well as a theoretical description using the system of Eqs. 2 (red solid curve). Inset: function  $\Gamma_{PIB}(\omega)$  (blue line and shading),  $\Gamma_0(\omega)$  (orange line and shading).

pling constants. From the system of Eqs. 2 follows that using  $D_{PIB}(\omega)$  and vary  $U_{0,1}$  we can calculate  $\gamma_{ph}(T)$ .

Although our results directly relate to organic molecules in a polymer matrix, we suppose that they can be generalized to a wide range of luminescent materials. So, for example, with  $U_{0,1} \rightarrow 0$  and  $D(\omega) \sim \omega^2$ , the model under consideration will be reduced to the well-known law  $\gamma_{ph}(T) \sim T^2$ . Of much greater interest, however, are cases where  $D(\omega)$  can be obtained from the first-principles calculations. Recent publications devoted to the analysis of EP interactions for color centers in diamonds [23] and defects in hexagonal boron nitride [24] have shown that such a task is fundamentally feasible.

Authors acknowledge support from Ministry of education of Russia (state task MPCU AAAA-A20-120061890084-9) and Project for leading scientific school of Russia (NSh-776.2022.1.2).

## AUTHORS

A. O. Savostianov, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch, Moscow, Troitsk 108840, Russia  
ORCID: 0000-0001-8815-8440

I. Yu. Eremchev, Institute of spectroscopy RAS, Moscow, Troitsk; Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0002-2239-5176

A. V. Naumov, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk Branch, Moscow, Troitsk; Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0001-7938-9802



**ИЛВСТ**  
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

## КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА



- Обрабатываемые материалы – стали нормальной и повышенной прочности (а также черные и цветные металлы и их сплавы, жаропрочные сплавы)
- Диапазон толщин обрабатываемых материалов – от 1 до 16 мм (при односторонней односторонней сварке)
- Скорость обработки – до 6 м/мин
- Комплекс лазерного оборудования. Мощность – 10 ... 15 кВт
- Комплекс дугового оборудования.
  - Сварочный ток – до 500 А.
  - Рабочий инструмент – Модуль лазерно-дуговой (ЛДМ)
- Система перемещения рабочего инструмента:
  - Робот манипулятор. Радиус досягаемости – 2500 мм
  - Линейная направляющая. Рабочий ход – 2300; 5000 мм
- Система позиционирования и перемещения обрабатываемого изделия:
  - Вращатель сварочный горизонтальный двухстоечный. Грузоподъемность – 500 кг. Длина поворотной рамы – 2500 мм
  - Вращатель сварочный универсальный (двухосевой). Грузоподъемность – 500 кг
  - Стол сварочный
- Размеры рабочей зоны (типовые) – 3 (6) x 2 x 1 м (возможно масштабирование)
- Система автоматического управления



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
**ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38-а

Тел. +7 (812) 757-22-22, e-mail: [ilwt@ilwt.smtu.ru](mailto:ilwt@ilwt.smtu.ru) [www.smtu.ru](http://www.smtu.ru) [www.ilwt-stu.ru](http://www.ilwt-stu.ru)



## АВТОРЫ

- А. О. Севастьянов, аспирант, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение (ТОП ФИАН), 108840 Троицк, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0001-8815-8440
- И. Ю. Еремчев, Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва; Московский педагогический государственный университет (МПГУ), Москва, Россия  
ORCID: 0000-0002-2239-5176
- А. В. Наумов, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение (ТОП ФИАН), 108840 Троицк, Москва; Московский педагогический государственный университет (МПГУ), Москва, Россия  
ORCID: 0000-0001-7938-9802

## ЛИТЕРАТУРА

1. G. Kucsko, P. C. Maurer, N. Y. Yao, M. Kubo, H. J. Noh, P. K. Lo, H. Park, and M. D. Lukin, *Nanometre-Scale Thermometry in a Living Cell*, *Nature* 500, 54 (2013).
2. J. Zhou, B. del Rosal, D. Jaque, S. Uchiyama, and D. Jin, *Advances and Challenges for Fluorescence Nanothermometry*, *Nat. Methods* 17, 967 (2020).
3. R. G. Geitenbeek, A.-E. Nieuwelink, T. S. Jacobs, B. V. Salzman, J. Goetze, A. Meijerink, and B. M. Weckhuysen, *In Situ Luminescence Thermometry To Locally Measure Temperature Gradients during Catalytic Reactions*, *ACS Catal.* 8, 2397 (2018).
4. C. Mi, J. Zhou, F. Wang, G. Lin, and D. Jin, *Ultrasensitive Ratiometric Nanothermometer with Large Dynamic Range and Photostability*, *Chemistry of Materials* 31, 9480 (2019).
5. J. Qiao, X. Mu, and L. Qi, *Construction of Fluorescent Polymeric Nano-Thermometers for Intracellular Temperature Imaging: A Review*, *Biosens. Bioelectron.* 85, 403 (2016).
6. L. Meng, S. Jiang, M. Song, F. Yan, W. Zhang, B. Xu, and W. Tian, *TICT-Based Near-Infrared Ratiometric Organic Fluorescent Thermometer for Intracellular Temperature Sensing*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 12, 26842 (2020).
7. C. D. S. Brites, S. Balabhadra, and L. D. Carlos, *Lanthanide-Based Thermometers: At the Cutting-Edge of Luminescence Thermometry*, *Adv. Opt. Mater.* 7, 1801239 (2019).
8. M. Marciniak, K. Knies, K. Elzbiaciak-Piecka, K. Trejgis, J. Stefanska, and M. Dramićanin, *Luminescence Thermometry with Transition Metal Ions. A Review*, *Coord. Chem. Rev.* 469, 214671 (2022).
9. S. Choi, V. N. Agafonov, V. A. Davydov, and T. Plakhotnik, *Ultrasensitive All-Optical Thermometry Using Nanodiamonds with a High Concentration of Silicon-Vacancy Centers and Multiparametric Data Analysis*, *ACS Photonics* 6, 1387 (2019).
10. V. P. Dresvyansky, A. V. Kuznetsov, E. F. Martynovich, S. Enkbat, *Monitoring the Heat of a Material during the Laser Formation of Defects* // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2020. – Vol. 84, No. 7. – P. 811–814. – DOI 10.3103/S1062873820070084.
11. А. И. Аржанов, А. О. Савостьянов, К. А. Магарян, К. Р. Кримуллин, А. В. Наумов, *Фотоника полупроводниковых квантовых точек: прикладные аспекты* // *Фотоника.* – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 96–113. – DOI 10.22184/1993–7296.FRos.2022.16.2.96.112.
12. L. J. Mohammed and K. M. Omer, *Carbon Dots as New Generation Materials for Nanothermometer: Review*, *Nanoscale Res. Lett.* 15, 182 (2020).
13. M. D. Dramićanin, *Trends in Luminescence Thermometry*, *J. Appl. Phys.* 128, (2020).
14. A. V. Naumov, *Low Temperature Spectroscopy of Organic Molecules in Solid Matrices: From the Shpol'sky Effect to the Laser Luminescent Spectromicroscopy for All Effectively Emitting Single Molecules*, *Physics Uspekhi* 183, 633 (2013).
15. C. Gooijer, F. Ariese, and J. W. Hofstraat, editors, *Shpol'skii Spectroscopy and Other Site-Selection Methods: Applications in Environmental Analysis, Bioanalytical Chemistry, and Chemical Physics* (John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2000).
16. A. O. Savostianov, I. Y. Eremchev, T. V. Plakhotnik, and A. V. Naumov, *The Key Role of Chromophore-Modified Vibrational Modes on Thermal Broadening of Single-Molecule Spectra in Disordered Solids*, *Phys. Rev. B* to be published
17. A. O. Savostianov, I. Y. Eremchev, T. V. Plakhotnik, A. S. Starukhin and A. V. Naumov, *Manifestation of hybridization of intrinsic and induced resonant quasi-localized low-frequency vibrational modes of a polymer in low-temperature spectra of single impurity molecules*, *JETP Lett.* to be published
18. I. Yu. Eremchev, M. Yu. Eremchev, and A. V. Naumov, *Multifunctional Far-Field Luminescence Nanoscope for Studying Single Molecules and Quantum Dots*, *Physics Uspekhi* 189, 312 (2019).
19. D. E. McCumber and M. D. Sturge, *Linewidth and Temperature Shift of the R Lines in Ruby*, *J. Appl. Phys.* 34, 1682 (1963).
20. G. J. Small, *Comment on Frequency Shift and Transverse Relaxation of Optical Transitions in Organic Solids*, *Chem. Phys. Lett.* 57, (1978).
21. I. S. Osad'ko, *Optical Dephasing and Homogeneous Optical Bands in Crystals and Amorphous Solids: Dynamic and Stochastic Approaches*, *Phys. Rep.* 206, 43 (1991).
22. A. S. Barker and A. J. Sievers, *Optical Studies of the Vibrational Properties of Disordered Solids*, *Rev. Mod. Phys.* 47, (1975).
23. L. Razinkovas, M. W. Doherty, N. B. Manson, C. G. Van de Walle, and A. Alkauskas, *Vibrational and Vibronic Structure of Isolated Point Defects: The Nitrogen-Vacancy Center in Diamond*, *Phys. Rev. B* 104, 045303 (2021).
24. K. Sharman, O. Golami, S. C. Wein, H. Zadeh-Haghighi, C. G. Rocha, A. Kubanek, and C. Simon, *A DFT Study of Electron-Phonon Interactions for the C2CN and VNNB Defects in Hexagonal Boron Nitride: Investigating the Role of the Transition Dipole Direction*, *Journal of Physics: Condensed Matter* 35, 385701 (2023).

## НПП «Инжект» завоевал AMTEXPO AWARDS

В Москве с 15 по 17 ноября прошел первый форум-выставка новых материалов и технологий «AMTEXPO». В рамках деловой программы форума был проведен конкурс инновационных разработок. Главный приз в области «Научные разработки в области новых материалов и технологий» получил НПП «Инжект». Компания «НПП «Инжект» разработала и серийно выпускает отечественный полупроводниковый технологический лазер PLD-6 с мощностью лазерного излучения 6 кВт. Лазер используется в новых технологических процессах термообработки, модификации поверхности, в наплавке. Лазерный луч как технологический инструмент позволяет создавать на локальной поверхности детали

концентрацию тепловой энергии в широком диапазоне мощностей.

Среди различных способов повышения износостойкости деталей (легирование, объемная и плазменная закалка, различные методы напыления и т.д.) технология лазерного термоупрочнения занимает особое место. Технологии лазерного термоупрочнения имеют преимущества по сравнению с другими методами закалки. В отличие от классических процессов термоупрочнения нагрев при лазерной закалке является не объемным, а локальным поверхностным процессом, что минимизирует поводки и деформации обработанных деталей. Упрочнение лучом полупроводникового лазера осуществляется без



оплавления поверхности – это исключает изменение шероховатости и необходимость в последующей механообработке (шлифовке, полировке).

<https://amtexpo.ru>



Специализированный проект и конференция  
по аддитивным технологиям  
в промышленности



**Additive Minded**  
**23-26 ЯНВ**  
**2024**  
**Москва, Россия**

в рамках выставки:



Международная специализированная  
выставка пластмасс и каучуков

**RUPLASTICA**

Место проведения:

 **ЭКСПОЦЕНТР**  
МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНГРЕССЫ  
МОСКВА

Организатор:

  
**ЭКСПО  
ФЬЮЖН**