

УДК 535.34

В. А. Астапенко, А. В. Яковец

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Поглощение ультракоротких электромагнитных импульсов в оптических центрах в твердых телах

Статья посвящена теоретическому рассмотрению поглощения ультракоротких импульсов (УКИ) в оптических центрах твердых тел при наличии сильной электрон-фононной связи. Вычисления проведены для случая $4f - 5d$ перехода в ионе Eu^{2+} , помещенном в мультифазный фосфор $\text{SrGa}_2\text{S}_4 + \text{MgGa}_2\text{O}_4$. Рассчитаны спектры поглощения монохроматического излучения и ультракоротких импульсов, а также зависимость вероятности поглощения от длительности УКИ для различных значений параметров задачи.

Ключевые слова: ультракороткий электромагнитный импульс, оптические центры в твердом теле, сильная электрон-фононная связь.

V. A. Astapenko, A. V. Yakovets

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

Absorption of ultrashort electromagnetic pulses on optical centers in solids

The paper is devoted to the theoretical consideration of ultrashort pulses (USP) on optical centers in solids with account taken of strong electron-phonon coupling. Calculations are made for the case of $4f - 5d$ transition in Eu^{2+} ion placed in multiphase phosphor $\text{SrGa}_2\text{S}_4 + \text{MgGa}_2\text{O}_4$. Absorption spectra are calculated for monochromatic radiation and USP. The absorption probability as a function of pulse duration is calculated for different values of involved parameters.

Key words: ultrashort electromagnetic pulse, optical centers in solids, strong electron-phonon coupling.

В настоящей работе теоретически исследуется поглощение ультракоротких электромагнитных импульсов (УКИ) оптическими центрами в твердых телах с учетом электрон-фононной связи. Под оптическими центрами (ОЦ) понимаются примесные или дефектные центры, помещенные в твердотельную матрицу, и способные поглощать излучение в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Примером ОЦ могут служить F -центры в щелочно-галогенидных кристаллах, азот-вакансионные центры в алмазе (NV -центры), ионы редкоземельных элементов в фосфорах и так далее.

Отличительной чертой поглощения электромагнитного излучения в рассматриваемом случае является наличие сильного электрон-фононного взаимодействия, которое существенно модифицирует спектр поглощения ОЦ. Спектр поглощения излучения в фононном крыле без учета дисперсии фононов описывается следующей формулой (в системе единиц, в которой константа Больцмана и постоянная Планка положены равными единице) [1]:

$$G(\omega) = \exp\left[-\frac{a}{2} \coth\left(\frac{\omega_1}{2T}\right)\right] \sum_{p=-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{p\omega_1}{2T}\right) I_p\left(\frac{a}{2 \sinh(\omega_1/2T)}\right) \delta(\omega - \omega_0 - p\omega_1). \quad (1)$$

Здесь p — число фононов, испущенных/поглощенных в результате поглощения кванта света, ω_1 — энергия фонона, a — константа тепловыделения, T — температура, ω_0 — частота бесфононного перехода, I_p — модифицированная функция Бесселя.

В дальнейшем предполагаем, что электрон-фононный переход однородно уширен с константой фононной релаксации γ . Тогда дельта-функции в правой части формулы (1) нужно заменить на лоренцианы:

$$\delta(x) \rightarrow \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{x^2 + \gamma^2}. \quad (2)$$

Рассмотрим для примера поглощение излучения на переходе $4f - 5d$ в ионе Eu^{2+} , помещенном в мультифазный фосфор $\text{SrGa}_2\text{S}_4 + \text{MgGa}_2\text{O}_4$, перспективный для создания высокоэффективных светодиодов. Для этого случая имеем следующие численные значения параметров: $\omega_0 = 2.536$ эВ, $a = 8$, $\omega_1 = 34.5$ мэВ [2].

Спектр поглощения, рассчитанный по формулам (1) – (2) для данного фосфора, представлен на рис. 1 для комнатной температуры и различных значений константы фононной релаксации γ .

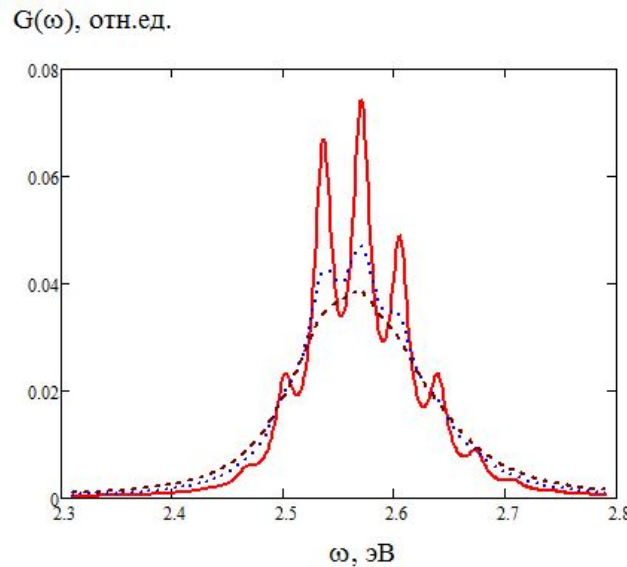


Рис. 1. Спектр поглощения фосфора $\{\text{SrGa}_2\text{S}_4 + \text{MgGa}_2\text{O}_4\}$: Eu^{2+} при комнатной температуре $T = 300$ К и различных константах фононной релаксации: сплошная кривая — $\gamma = 10^{-2}$ эВ, пунктир — $2 \cdot 10^{-2}$ эВ, штриховая кривая — $3 \cdot 10^{-2}$ эВ

Из приведенного рисунка видно, что для малых значений параметра γ в спектре поглощения проявляются максимумы, обусловленные вкладом поглощенных/излученных фононов в процесс. С увеличением константы релаксации эти максимумы уширяются, так что для больших γ спектр поглощения представляет собой гладкую колоколообразную кривую с максимумом, приходящимся на энергию фотона 2.57 эВ ($\gamma = 482.5$ нм).

Эволюция спектра поглощения с уменьшением температуры (для $T = 60$ К) показана на рис. 2.

Видно, что в данном случае спектр поглощения не претерпевает сильных изменений (особенно для больших значений параметра γ), увеличиваясь по амплитуде примерно на порядок величины. Для малых констант фононной релаксации при уменьшении температуры сглаживаются фононные максимумы в низкочастотном крыле спектра. Высокочастотное крыло при этом практически не изменяется.

На рис. 3 представлен спектр поглощения в пределе малой константы фононной релаксации $\gamma = 10^{-3}$ эВ для двух значений температуры $T = 300$ К и $T = 60$ К. В данном случае отчетливо видны пики, отвечающие поглощению фононов. Расстояние между двумя ближайшими пиками равно 0.034 эВ, что соответствует энергии фонона. Сплошная кривая на

этом рисунке умножена на 5. Видно, что с ростом температуры в низкочастотном крыле спектра поглощения появляются новые фоновые максимумы.

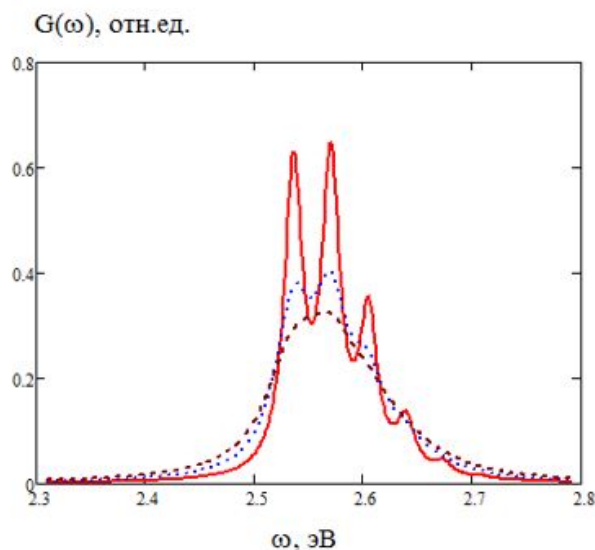


Рис. 2. То же, что на рисунке 1 для $T = 60$ К

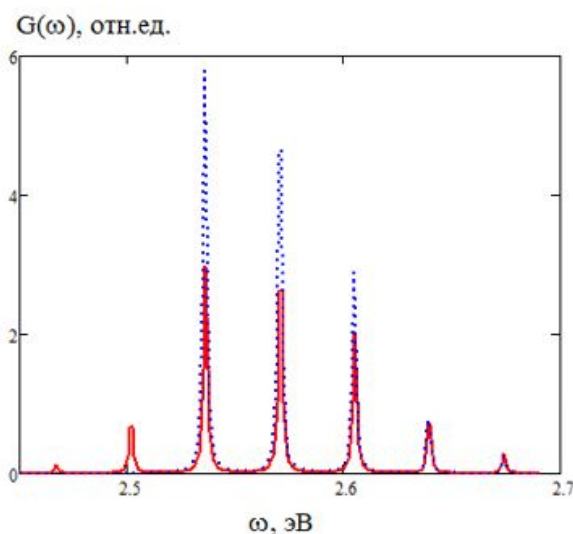


Рис. 3. Спектр поглощения фосфора $\{\text{SrGa}_2\text{S}_4 + \text{MgGa}_2\text{O}_4\} : \text{Eu}^{2+}$ при $\gamma = 10^{-3}$ эВ и различных температурах: сплошная кривая — $T = 300$ К, пунктир — $T = 60$ К

Рассмотрим поглощение на системе $\{\text{SrGa}_2\text{S}_4 + \text{MgGa}_2\text{O}_4\} : \text{Eu}^{2+}$ УКИ скорректированной гауссовской формы, фурье-образ которого имеет вид

$$E_{cor}(\omega', \omega, \tau, \varphi) = i\tau \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega'^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \left\{ e^{-i\varphi - (\omega - \omega')^2 \tau^2 / 2} - e^{i\varphi - (\omega + \omega')^2 \tau^2 / 2} \right\}, \quad (3)$$

здесь ω — несущая частота, ω' — текущая частота, τ — длительность импульса, φ — начальная фаза. Амплитуда импульса в формуле (3) положена равной единице.

Рассчитаем вероятность поглощения за все время действия импульса (3) как функцию его длительности τ по известной формуле [3]:

$$W(\tau, \omega) = \frac{c}{4\pi^2} \int_0^\infty \sigma(\omega') \frac{|E(\omega', \omega, \tau)|^2}{\hbar\omega'} d\omega', \quad (4)$$

где $\sigma(\omega')$ — сечение фотопоглощения. В дальнейшем мы будем интересоваться относительной величиной вероятности, поэтому в формуле (4) можно произвести замену $\sigma(\omega') \rightarrow G(\omega')$.

Результаты расчетов по формулам (1) – (4) представлены на нижеследующих рисунках для различных параметров задачи. Кривые на рисунках 4–7 нормированы так, чтобы при больших длительностях τ вероятности поглощения были близки друг к другу.

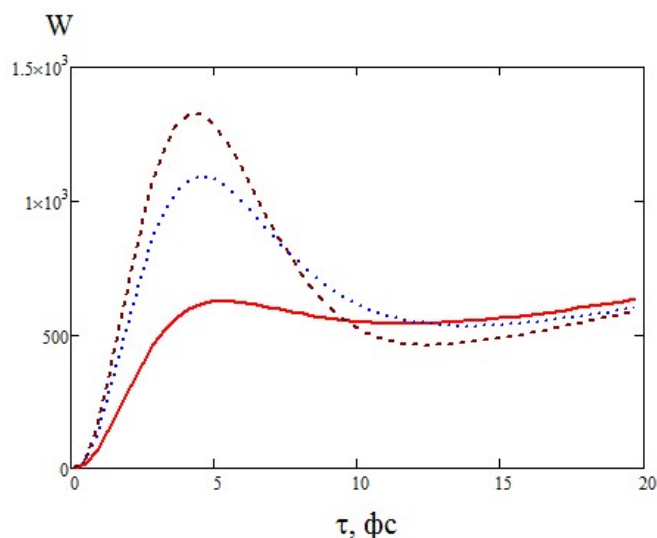


Рис. 4. Относительная вероятность поглощения УКИ в фононном крыле линии поглощения фосфора на несущей частоте $\omega = 2.4$ эВ для $\gamma = 0.01$ эВ и различных температур: сплошная кривая — $T = 300$ К, пунктир — $T = 600$ К, штриховая кривая — $T = 60$ К

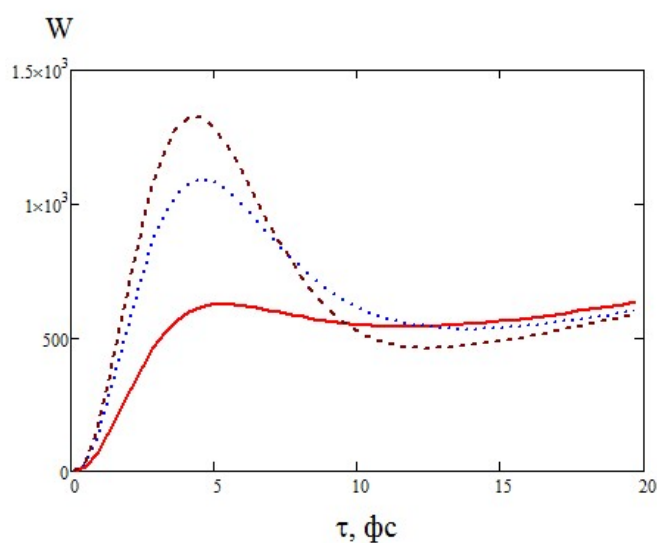


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для $\gamma = 0.03$

Из рис. 4, в частности, следует, что положение максимума в зависимости $W(\tau)$ слабо зависит от температуры. При этом с уменьшением температуры максимум становится более

явным. С ростом длительности импульса вероятность поглощения становится линейной функцией τ , как это следует из традиционного теоретического рассмотрения.

В рассматриваемом случае максимум приходится на длительность импульса порядка 5 фс, что соответствует примерно трем циклам на несущей частоте $\omega = 2.4$ эВ.

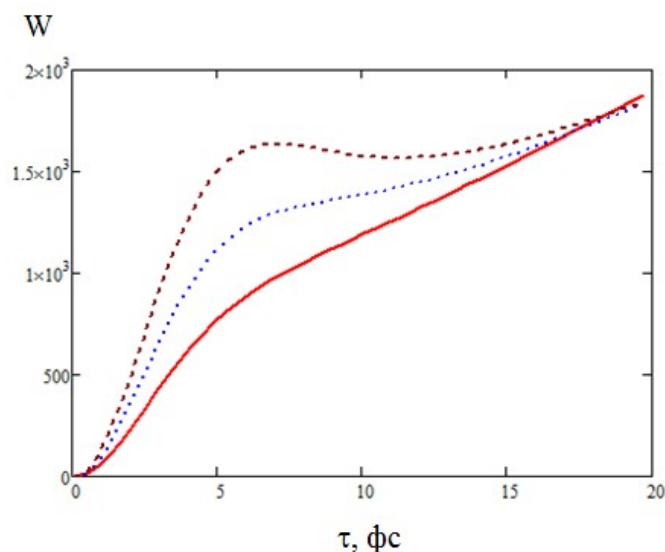


Рис. 6. То же, что на рис. 4, для несущей частоты $\omega = 2.55$ эВ

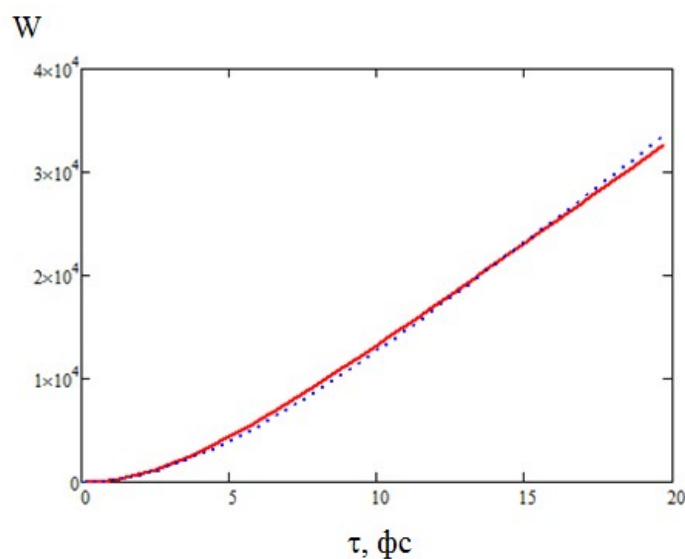


Рис. 7. То же, что на рис. 4, для несущей частоты $\omega = 2.7$ эВ

Из рисунков 4–7 следует, что нелинейная зависимость функции $W(\tau)$ для заданных значений параметра γ имеет место на краях фоновой полосы поглощения, то есть для $\omega = 2.4$ эВ и 2.7 эВ. При этом с уменьшением температуры нелинейность растет, так что появляется максимум и минимум, а с ростом параметра γ – нелинейность уменьшается. Для несущей частоты в центре линии поглощения $\omega = 2.55$ эВ. Функция $W(\tau)$ монотонно возрастает для всех длительностей импульса, причем при малых τ этот рост квадратичный, а при больших длительностях – линейный.

На рис. 8 представлена зависимость $W(\tau)$ для различных несущих частот УКИ при $T = 300$ К и для малого значения параметра $\gamma = 10^{-3}$ эВ. Видно, что в этом случае нелинейность имеет место и в центральной области частот спектра поглощения, что обусловлено квазилинейчатым характером спектра (рис. 3).

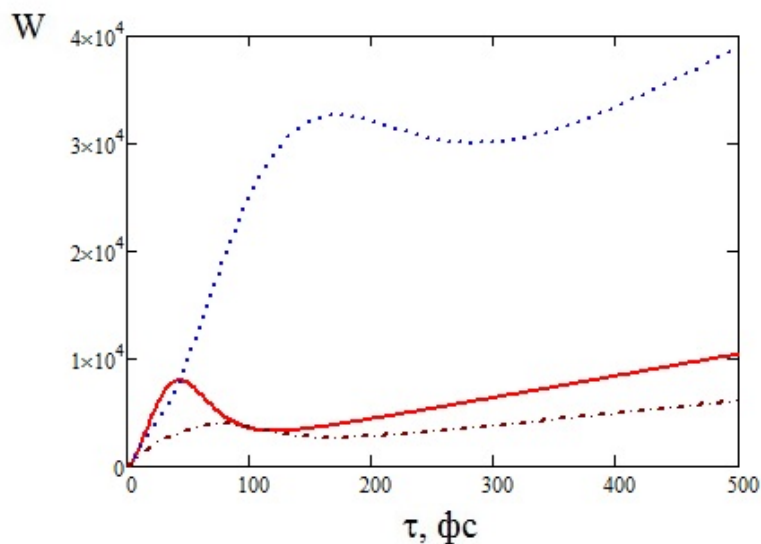


Рис. 8. Относительная вероятность поглощения УКИ в фоновом крыле линии поглощения фосфора $\{\text{SrGa}_2\text{S}_4 + \text{MgGa}_2\text{O}_4\}$: Eu^{2+} для $\gamma = 10^{-3}$ эВ, $T = 300$ К на различных несущих частотах: сплошная кривая – $\omega = 2.55$ эВ, пунктир – $\omega = 2.6$ эВ, штрихпунктирная кривая – $\omega = 2.63$ эВ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и образования РФ (задание № 3.9890.2017/8.9).

Литература

1. Лубченко А.Ф. Квантовые переходы в примесных центрах твердых тел. Киев: Наукова думка, 1978. 294 с.
2. Nazarov M., Tsukerblat B., Noh Do Young. New highly efficient green phosphor for LEDs // Indian Journal of Engineering and Material Sciences. 2009. V. 16. P. 147–150.
3. Astapenko V.A. Simple formula for photoprocesses in ultrashort electromagnetic field // Phys. Lett. A. 2010. N 374. P. 1585–1590.

Литература

1. Lubchenko A.F. Quantum transitions in impurity centers in solids. Kiev: Naukova dumka, 1978. 294 с. (in Russian)
2. Nazarov M., Tsukerblat B., Noh Do Young. New highly efficient green phosphor for LEDs. Indian Journal of Engineering and Material Sciences. 2009. V. 16, P. 147–150.
3. Astapenko V.A. Simple formula for photoprocesses in ultrashort electromagnetic field. Phys. Lett. A. 2010. N 374. P. 1585–1590.

Поступила в редакцию 27.01.2018