

Индукционные процессы в молекулярных нанокластерах в ИК-полях

В. В. Комаров^{1,2}, А. М. Попова^{1,2,a}, Л. Шмидт², Х. Юнгклас^{2,b}

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Филиппс-университет, химический факультет. D-06421, Марбург, Германия.

E-mail: ^a am.popova@yandex.ru, ^b jungclas.staff@uni-marburg.de

Статья поступила 19.09.2014, подписана в печать 13.01.2015.

Рассматривается донор-акцепторный нанокластер в поле ИК-излучения ($\lambda = 16-18$ нм). Молекула донор в нанокластере содержит полярную подструктуру C_nH_{2n} , являющуюся ИК-антенной для указанного излучения. Акцептором служит димер неполярных молекул пирена. Исследуются индуцированные дипольные моменты молекул пирена, которые возникают в поле дипольного момента ИК-антенны. Предполагается, что индуцированный дипольный момент каждой молекулы пирена в димере создает дополнительное электростатическое поле, действующее на сопутствующую молекулу пирена в димере. Получены аналитические формулы для расчета индуцированных моментов молекул пирена в димере и проведен анализ возникающих при этом динамических процессов. Показано, что присутствие молекул димера пирена в акцепторе нанокластера существенно увеличивает значение их индуцированных дипольных моментов. Это приводит к возрастанию вероятности индукционных процессов в нанокластерах в сравнении с аналогичными процессами в нанокластерах, акцепторы которых содержат одну молекулу пирена.

Ключевые слова: донор-акцепторный нанокластер, ИК-радиация, индукционные процессы.

УДК: 539.19+539.2. PACS: 34.10.+x, 36.40.-c.

Введение

В последнее время наблюдается значительный успех в экспериментальных и теоретических исследованиях молекулярных слабосвязанных донор-акцепторных нанокластеров, в которых взаимодействие между молекулами обусловлено дальнедействующими силами. Интерес к этим нанокластерам объясняется тем, что они играют важную роль в жизнедеятельности живых клеток [1], их свойствами определяются процессы молекулярного распознавания [2], упаковка молекулярных кристаллов [3], а также динамические процессы в биологических системах [4].

Ранее в работе [5] мы обосновали возможность явления флуоресценции особого вида донор-акцепторных нанокластеров в поле ИК излучения ($\lambda = 16-18$ нм). Было показано, что эти явления объясняются особыми свойствами молекул, составляющих нанокластер. Акцептор в этом нанокластере должен быть нейтральной неполярной ароматической молекулой, имеющей электронно-возбужденные состояния в нанометровой видимой части спектра поглощения, релаксирующие по каналу флуоресценции. Молекула донор должна содержать углеводородную подструктуру C_nH_{2n} , являющуюся ИК-антенной для указанного выше ИК-излучения [6]. В этой ИК-антенне, в пикосекундный интервал времени возможно аккумулярование значительной величины вибрационной энергии за счет улавливания ИК фотонов внешнего облучения [7]. В случае если накопленная в доноре энергия равна энергии электронного возбуждения акцептора, приводящего к флуоресценции, эта энергия может быть передана в акцептор в результате резонансного взаимодействия диполя антенны μ_0 с индуцированным диполем акцептора D_{ind} , возникающим в электростатическом поле дипольного

момента μ_0 [8]. Направление дипольного момента D_{ind} должно совпадать с направлением дипольного момента μ_0 , а значение D_{ind} определяется по формуле

$$D_{ind}(R) = 2\mu_0 R^{-3}\alpha, \quad (1)$$

где α — среднее значение коэффициента поляризации акцептора [8], R — расстояние между центрами масс антенны и акцептора. В работе [5] были получены значения α для ряда ароматических молекул и рассчитаны функции $D_{ind}(R)$ для молекул бензола, нафталина, антрацена и пирена, а также вероятности электронного возбуждения акцепторов для пирена и нафталина. Поскольку в биофизических исследованиях приходится сталкиваться с более сложными донор-акцепторными нанокластерами, в которых акцептор содержит две ароматические молекулы, представлялось важным изучение индукционных процессов в этих нанокластерах.

1. Индуцированные дипольные моменты ароматических молекул димера, возникающие в электростатическом поле полярного донора в нанокластере

Целью настоящего исследования является описание индукционных взаимодействий в донор-акцепторном нанокластере, в котором акцептор содержит две или более ароматических молекул и донор содержит молекулярную полярную подструктуру вида C_nH_{2n} (ИК-антенну). Для выполнения этой задачи были определены индуцированные моменты ароматических молекул в акцепторе, образующих слабосвязанную систему. Был рассмотрен случай акцептора вида димера ароматических молекул, плоскости которых расположены параллельно одна над другой (в виде «сэндвича»). Ранее было показано, что расстояние R_d между центрами

масс двух ароматических молекул в «сэндвиче» должно иметь в состоянии равновесия значение $R_d \sim 3.7 \text{ \AA}$, т. е. равное сумме двух радиусов Ван дер Ваальса для ароматической молекулы [10]. Обозначим номером (I) ароматическую молекулу димера, находящуюся в наиболее близком расстоянии от ИК-антенны донора, и вторую молекулу номером (2). Наведенные дипольные моменты ароматических молекул (I) и (II) обозначим символами $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ и $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})$ соответственно, а расстояния между центрами масс молекулы (I) и ИК-антенны донора R_1 и между центром масс антенны и центром масс молекулы (II) $R_2 = (R_1 + R_d)$. Заметим, что дипольный момент $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ молекулы (I) индуцируется суммой электростатических полей дипольного момента μ_0 и индуцированного дипольного момента молекулы (II). В свою очередь дипольный момент молекулы (II) индуцируется полем дипольного момента μ_0 и дипольного момента молекулы (I). Отсюда для определения функций $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ и $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})$ может быть записана система уравнений

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I}) &= 2\mu_0\alpha R_1^{-3} + 2\alpha\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})R_d^{-3}, \\ \mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II}) &= 2\mu_0\alpha(R_1 + R_d)^{-3} + 2\alpha\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})R_d^{-3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Решение этой системы имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I}) &= 2\mu_0\alpha R_1^{-3} + \\ &+ 2\alpha[2\mu_0\alpha(R_1 + R_d)^{-3} + 2\alpha\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})R_d^{-3}]R_d^{-3}, \\ \mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II}) &= 2\mu_0\alpha(R_1 + R_d)^{-3} + \\ &+ 2\alpha[2\mu_0\alpha R_1^{-3} + 2\alpha\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})]R_d^{-3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Преобразование выражений в (3) приводит к аналитическим функциям для $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ и $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})$ вида

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I}) &= [2\mu_0\alpha R_1^{-3} + 4\mu_0\alpha^2 R_d^{-3}(R_1 + R_d)^{-3}] \times \\ &\times [1 - 4\alpha^2/R_d^6]^{-1}, \\ \mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II}) &= [2\mu_0\alpha(R_1 + R_d)^{-3} + 4\mu_0\alpha^2 R_d^{-3}R_1^{-3}] \times \\ &\times [1 - 4\alpha^2/R_d^6]^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Направление дипольных моментов $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ и $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})$ совпадает с направлением дипольного момента μ_0 подструктуры C_nH_{2n} в доноре нанокластера. Анализ аналитических формул для функций $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ и $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})$ показал, что только первое слагаемое в их числителях совпадает со значением наведенных дипольных моментов акцепторов, содержащих одну ароматическую молекулу, находящуюся на расстоянии R_1 или $(R_1 + R_d)$ соответственно. Присутствие в числителях формул (4) второго положительного слагаемого и наличие в формулах (4) знаменателей, значение которых меньше единицы, приводит к увеличению значений $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ и $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})$ в сравнении со значениями $\mathbf{D}_{\text{ind}}(R_1)$ и $\mathbf{D}_{\text{ind}}(R_1 + R_d)$, вычисленных по формуле (1). Для демонстрации этого эффекта нами был проведен расчет по формулам (4) значений функций $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ и $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})$ для димера пирена в зависимости от изменения параметра R_1 . В расчете были использованы значения параметров $\alpha = 24 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$ и $\mu_0 = 0.6 \text{ Д}$. Результаты расчета приведены на рис. 1. На этом рисунке приведена функция $\mathbf{D}_{\text{ind}}(R_1)$ для наведенного момента пирена в поле дипольного момента μ_0 . Следует отметить, что увеличение числа ароматических молекул

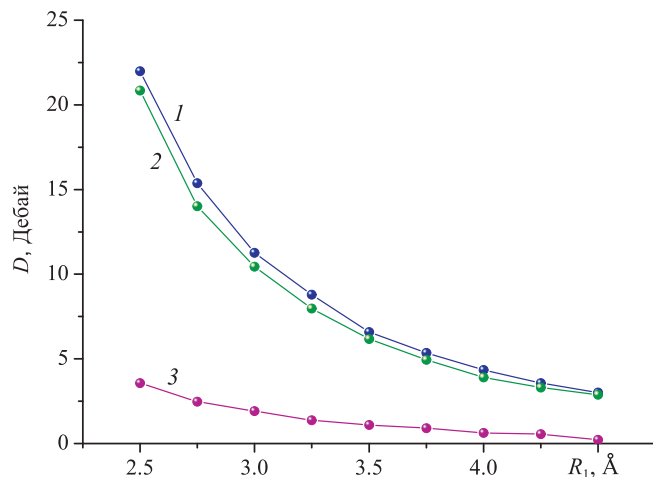


Рис. 1. Индуцированные дипольные моменты молекулы (I) пирена в димере $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{I})$ (кривая 1) и молекулы (II) пирена в димере $\mathbf{D}_{\text{ind}}(\text{II})$ (кривая 2) и индуцированный дипольный момент димера $\mathbf{D}_{\text{ind}}$ (кривая 3) как функции расстояния R_1 между центром масс молекулы (I) пирена в димере и ближайшим к ней диполем ИК-антенны

в акцепторе рассматриваемого нанокластера приводит к дальнейшему увеличению наведенных дипольных моментов в этих молекулах при условии их параллельного расположения. Заметим, что значение функции $\mathbf{D}_{\text{ind}}(R_1 + R_d)$ в рассматриваемой области изменения R_1 пренебрежимо мало и эта функция не представлена на рис. 1.

2. Электронные возбуждения молекулы (I) в акцепторе нанокластера в поле ИК-излучения

Как отмечалось во введении, в работе [5] рассматривались индукционные процессы в нанокластере, донор которого содержит ИК-антенну, и акцептором является одна ароматическая молекула. В частности, рассматривался процесс накопления вибрационной энергии в ИК-антенне вида C_nH_{2n} , а также процесс транспорта этой энергии в акцептор в результате взаимодействия постоянного дипольного момента ИК-антенны и индуцированного дипольного момента ароматической молекулы акцептора. В настоящей работе мы рассматриваем процессы, протекающие в донор-акцепторном нанокластере, в котором акцептор содержит димер ароматических молекул. Молекула донор содержит подструктуру C_nH_{2n} (ИК-антенну). Заметим, что процесс накопления энергии в ИК-антенне донора не зависит от свойств и числа молекул, содержащихся в акцепторе. Эта энергия определяется суммой поглощенных в ИК-антенне вида C_nH_{2n} вибрационных квантов. Энергия этих квантов $\varepsilon_{\text{ex}} = 0.07 \text{ эВ}$ соответствует энергии возбуждения низшего вибрационного коллективного состояния (эксимоля) в упорядоченной системе тождественных СН-диполей [11]. Время жизни эксимоля τ_{ex} , как показано в работе [12], равно 10^{-11} с . Эксимоль является нелокализованным возбужденным состоянием, перемещающимся от одного диполя СН к соседнему диполу ИК-антенны за время $\tau_{\text{tr}} = 6 \cdot 10^{-14} \text{ с}$ [8]. Если время облучения τ_R меньше τ_{ex} , но больше τ_{tr} , то каждый диполь в антенне может служить источником эксимоля $N = \tau_R/\tau_{\text{tr}}$ раз. Таким образом, в ИК-ан-

тенне, содержащей M диполей, может возбудиться $K = MN$ эксимолей. Накопленная энергия $E(K) = K \cdot \varepsilon_{ex}$ за время τ_R в ИК-антенне донора может быть передана молекулам пирина, составляющим димер. Как было показано в [5], транспорт энергии от донора к акцептору в рассматриваемом нанокластере осуществляется благодаря дальнедействующим силам притяжения Ван дер Ваальса. Основным условием этого процесса является равенство энергии эксимолей $E(K)$, накопленной в антенне, энергии E_{el} электронного возбужденного состояния из длинноволновой части спектра поглощения пирина в димере [13]. Силы Ван дер Ваальса действуют между двумя молекулами на расстояниях, при которых не пересекаются их электронные облака. Это значит, что при анализе межмолекулярного процесса с использованием потенциалов дальнедействующих сил Ван дер Ваальса интервал изменения расстояния R между центрами масс взаимодействующих молекул должен удовлетворять неравенству $R_0 \leq R$ [14]. Здесь значение R_0 есть сумма радиусов Ван дер Ваальса для пары взаимодействующих молекул. Потенциал, соответствующий дальнедействующим силам притяжения, есть сумма $V_{dd}(R) + V_{ind}(R) + V_{dis}(R)$, где $V_{dd}(R)$ — потенциал диполь-дипольного взаимодействия, а $V_{ind}(R)$ и $V_{dis}(R)$ — потенциалы индукционного и дисперсионного взаимодействий соответственно [15]. Учет отталкивания между взаимодействующими молекулами на расстояниях $R \leq R_0$ проводится умножением потенциала Ван дер Ваальса на демпфирующую функцию $f(R)$, подобранную для каждой пары взаимодействующих молекул. Функция $f(R)$ должна стремиться к нулю для малых R и к единице для больших R . Метод подбора демпфирующей функции можно найти в работе [16]. Благодаря указанному преобразованию потенциал Ван дер Ваальса приобретает вид потенциальной ямы, не имеющей барьеров [17]. Заметим, что динамические процессы, которые могут протекать в рассматриваемом нанокластере, являются следствием индукции дипольных моментов в нейтральных неполярных молекулах пирина, составляющих димер. Наведенные дипольные моменты $\mathbf{D}_{ind}(I)$ и $\mathbf{D}_{ind}(II)$ пиринов в нанокластере совпадают по величине для одинаковых значений R_1 . В результате транспорт энергии эксимолей $E(K)$ из ИК-антенны донора в акцептор [18, 19] происходит в процессе взаимодействия постоянного дипольного момента μ_0 с индуцированным дипольным моментом $\mathbf{D}_{ind}(I)$ молекулы (I) пирина в димере при условии, что $E(K)$ равна энергии электронного возбуждения пирина в димере. Так как в рассматриваемой геометрии нанокластера расстояние между центрами масс $(R_1 + R_d) \gg R_1$, то при расчете функции вероятности транспорта энергии $E(K)$ от донора к акцептору можно не учитывать электронное возбуждение молекулы (II) пирина в димере. Расчет функции вероятности транспорта энергии эксимолей $E(K)$, накопленной в ИК-антенне, в молекулу (I) пирина в димере можно провести по формуле

$$P_{el} = (4\pi^2/hc) \cdot (K^2 P_M^K P_{ex}) \cdot [e(D_0/r_0) \cdot (D_{ind}(I)/R_A)]^2 \times \\ \times (M_{01} \cdot M_{el})^2 \cdot R_1^{-6}. \quad (5)$$

Здесь M_{el} есть матричный элемент электронного перехода в молекуле-акцепторе, R_A — радиус π -элек-

трона относительно центра масс акцептора, P_M^K — вероятность возбуждения K эксимолей из M эффективных диполей в ИК-антенне, P_{ex} — вероятность возбуждения одного эксимолы в ИК-антенне. Множитель $e(D_0/r_0)M_{01}$ есть дипольный момент перехода, соответствующий возбуждению эксимолы [5]. Здесь значение K определяется по формуле $K = \hat{E}_{el}/\varepsilon_{ex}$, следующей из условия $E(K) = \hat{E}_{el}$, в случае если энергия эксимолей $E(K) = K \cdot \varepsilon_{ex}$. Энергия $\hat{E}_{el}$ электронного возбуждения молекулы (I) пирина в димере отличается от соответствующего значения энергии E_{el} пирина в газе. В рассматриваемом нанокластере потенциал взаимодействия дипольного момента $\mathbf{D}_{ind}(I)$ молекулы (I) пирина с дипольными моментами $\mathbf{D}_{ind}(II)$ и μ_0 является возмущением оператора энергии молекулы (I) пирина, что приводит к изменению энергии основного состояния пирина в димере на величину ΔE_0 и каждого из электронных состояний E_{el} на величину $-\Delta E_{el}$. Отсюда энергия электронного возбуждения пирина в димере оказывается равной $\hat{E}_{el} = E_{el} - (\Delta E_{el} - \Delta E_0)$. Величина $(\Delta E_{el} - \Delta E_0)$ соответствует красному сдвигу линии в спектре поглощения молекулы (I) пирина [20]. Для расчета величины ΔE_{el} и ΔE_0 в системе двух диполь-дипольно взаимодействующих молекул был развит метод [21], основанный на теории возмущений. Наш анализ величины ΔE_{el} в рамках указанного метода для известного уровня пирина 3.68 эВ, релаксация которого приводит к флуоресценции, дает энергию красного сдвига $(\Delta E_{el} - \Delta E_0) = -(0.9 \pm 0.1)$ эВ. Следовательно, изучаемое электронное состояние молекулы (I) димера пирина в рассматриваемом нанокластере имеет энергию 2.8 ± 0.1 эВ. Это значит, что при расчете вероятности возбуждения молекулы (I) пирина в димере величину K следует взять равной 40. Результат расчета функции P_{el} в зависимости от изменения R_1 в интервале 2.5–4.5 Å приведен на рис. 2. Сравнение результата этого расчета со значением, рассчитанным нами в работе [5] для случая транспорта энергии $E(K)$ от ИК-антенны донора к акцептору, содержащему одну молекулу пирина, показывает, что присутствие димера молекул пирина в акцепторе нанокластера существенно увеличивает вероятность процесса электронного возбуждения пирина и, следовательно, интенсивность его флуоресценции.

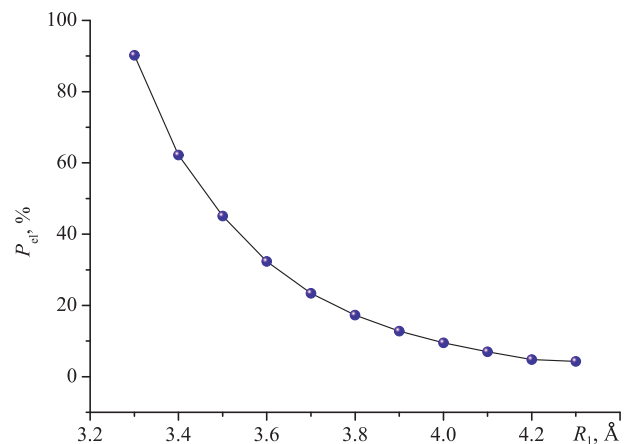


Рис. 2. Функция вероятности электронного возбуждения молекулы (I) пирина в димере P_{el} в зависимости от R_1

Заключение

В работе анализируются индукционные процессы, протекающие в донор-акцепторном нанокластере, в котором акцептором является димер неполярных ароматических молекул. Донор в этом нанокластере содержит полярную структуру C_nH_{2n} , имеющую дипольный момент μ_0 и являющуюся ИК-антенной. В неполярных ароматических молекулах (I) и (II), плоскости которых расположены параллельно в поле μ_0 , индуцируются дипольные моменты $D_{ind}(I)$ и $D_{ind}(II)$. Для функций $D_{ind}(I)$ и $D_{ind}(II)$, зависящих от расстояния R_1 и $R_2 = (R_1 + R_d)$ между ИК-антенны донора и молекулами (I) и (II) димера, были получены аналитические формулы. Здесь R_d — расстояние между ц.м. молекул в димере. Анализ этих формул показал, что значения дипольных моментов $D_{ind}(I)$ и $D_{ind}(II)$ совпадают и существенно превышают значение индуцированного дипольного момента мономера пирена, являющегося акцептором в нанокластере с тем же донором, что рассматривался выше. Большие значения индуцированных дипольных моментов приводят к значительной величине индукционного взаимодействия и как следствие к большой величине красного сдвига в спектрах энергий молекул (I) и (II). При этом также возрастает вероятность передачи энергии, накопленной в ИК-антенне, в ароматическую молекулу (I) димера в результате взаимодействия дипольного момента антенны донора с индуцированным дипольным моментом димера.

Список литературы

1. Hunter C.A., Singh J., Thornton J.M. // J. Mol. Biol. 1991. **218**. P. 837.
2. Vyas N.K., Vyas M.N., Quirocho F.A. // Nature (London). 1987. **327**. P. 635.

3. Hunter C.A., Sanders J.K.M. // J. Amer. Chem. Soc. 1990. **112**. P. 5525.
4. Kryger G., Silman I., Sussman J.L. // J. Physiol. (Paris). 1998. **92**. P. 191.
5. Комаров В.В., Попова А.М., Стурейко И.О. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 5. С. 3 (Komarov V.V., Popova A.M., Stureiko I.O. et al. // Moscow University Phys. Bull. 2013. **68**, N 5. P. 339).
6. Комаров В.В., Попова А.М., Шмидт Л., Юнгклас Х. // Mol. Phys. 1997. **91**, № 1. P. 139.
7. Jungclas H., Schmidt L., Popova A.M., Komarov V.V. // Europ. Phys. J. 1998. **1**. P. 193.
8. Jungclas H., Komarov V.V., Popova A.M. et al. // Z. Phys. Chem. 2007. **221**. P. 1075.
9. Stoum A.J. The Theory of Intermolecular Forces. L., 1996.
10. Intermolecular Forces / Ed. by P.L. Huyskens, W.A.P. Luck, T. Zeegers-Huyskens. B.; Heidelberg, 1991.
11. Jungclas H., Wieghaus A., Schmidt L. et al. // J. Amer. Soc. Mass Spectrom. 1999. **10**. P. 471.
12. Fritsch H.W., Jungclas H., Komarov V.V., Schmidt L. // J. Phys. II (France). 1994. **4**. P. 567.
13. Jungclas H., Komarov V.V., Popova A.M. et al. // Z. Naturforsch. 2007. **62a**. P. 324.
14. Dobson F., Dinte B.P. // Chem. Phys. Lett. 1996. **76**. P. 1780.
15. Волькенштейн М.В. Строение и физические свойства молекул. М.; Л., 1955.
16. Tang K.T., Toennies J.P. // J. Chem. Phys. 1984. **80**. P. 3726.
17. Zimmerly U., Parrinello M., Koumoutsakos P. // J. Chem. Phys. 2004. **120**. P. 2693.
18. Wieghaus A., Schmidt L., Popova A.M. et al. // J. Mass Spectrom. 1999. **34**. P. 1178.
19. Popova A.M., Komarov V. V., Jungclas H. et al. // Z. Naturforsch. 2010. **65a**, N 6/7. P. 568.
20. Shalev Eli, Ben-Horin N., Jortner J. // J. Chem. Phys. 1991. **95**. P. 1848.
21. Yoo S., Zahariev F., Soc S., Gordon M.S. // J. Chem. Phys. 2008. **129**. P. 144112.

Induction processes in molecular nanoclusters under IR fields

V. V. Komarov^{1,2}, A. M. Popova^{1,2,a}, L. Schmidt², H. Jungclas^{2,b}

¹ D. V. Skobel'tzin Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

² Philipps-University, D-06421 Marburg, Germany.

E-mail: ^a am.popowa@yandex.ru, ^b jungclas.staff@uni-marburg.de.

A donor-acceptor nanocluster under an IR radiation field ($\lambda = 16\text{--}18$ nm) is reported. The donor molecule in the nanocluster contains a polar C_nH_{2n} substructure that serves an IR antenna for this radiation. The acceptor is a dimer of nonpolar pyrene molecules. The induced dipole moments of the pyrene molecules that arise in the field of the IR antenna dipole moment is studied. It is assumed that the induced dipole moment of each pyrene molecule in the dimer produces an extra electrostatic field that affects the neighboring pyrene molecule in the dimer. The analytical expressions for this process are obtained and the relevant analysis of the dynamic phenomena is performed. It is established that the value of the induced molecular dipole moment in pyrene dimer is much larger than the same value in the pyrene monomer. This leads to the increasing probability of the induction processes in nanoclusters in comparison with the same processes in nanoclusters with a single pyrene molecule in accepters.

Keywords: donor-accepter nanocluster, IR radiation, induction processes.

PACS: 34.10.+x, 36.40.-c.

Received 19 September 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2015).

Сведения об авторах

1. Комаров Вячеслав Викторович — докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-39, e-mail: porovakomarov@mail.ru.
2. Попова Анна Михайловна — докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-39, e-mail: am.popowa@mail.ru.
3. Шмидт Лотар — доктор, сотрудник Филиппс-университета (Марбург, Германия); e-mail: jungclas.staff@uni-marburg.de.
4. Юнгклас Хартмут — доктор-профессор, сотрудник Филиппс-университета (Марбург, Германия); e-mail: jungclas.staff@uni-marburg.de.