

Заключение. Проведено исследование микрорезонатора мод шелпущей галереи с тонкой оболочкой J-агрегатов молекул псевдо-изоцианина и нанокристаллами серебра. Экспериментальные результаты подтверждают сильную оптическую связь J-агрегатов с модами резонатора и плазмонами металлических наночастиц. Подтверждена возможность управления оптическими характеристиками подобных гибридных систем в сочетании с применением фотонных пучков. Показана возможность создания новых устройств, использующих как резонансные, так и нерезонансные процессы в системах из оптически связанных микросфер.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Joannopoulos, J. D. Photonic crystals: putting a new twist on light / J.D. Joannopoulos, P.R. Villeneuve, S. Fan // Nature. – 1997. – Vol. 386. – No 6621. – P. 143–149.
2. Vahala, K.J. Optical microcavities / K.J. Vahala // Nature. – 2003. – No 6950. – Vol. 424. – P. 839–846.

3. Matsko, A.B. Optical hyperparametric oscillations in a whispering-gallery-mode resonator: Threshold and phase diffusion / A.B. Matsko, A.A. Savchenkov, D. Strekalov, V.S. Ilchenko, L. Maleki. // Phys. Rev. A. – 2005. – Vol. 71. – No 3. – P. 033804-1/10.
4. Spano, F.C. Nonlinear susceptibilities of molecular aggregates: Enhancement of $\chi(3)$ by size / F. C. Spano, S. Mukamel // Phys. Rev. A. – 1989. – Vol. 40. – No 5783. – P. 5783–5801.
5. Rakovich, Y.P. Whispering Gallery Mode Emission from a Composite System of CdTe Nanocrystals and a Spherical Microcavity / Y.P. Rakovich, L. Yang, E.M. McCabe, J.F. Donegan, T. Perova, A. Moore, N. Gaponik, A. Rogach // Sem. Sci. Techn. – 2003. – Vol. 18. – No 11. – P. 914–918.
6. Melnikau, D. Whispering gallery mode resonators with J-aggregates / D. Melnikau, D. Savateeva, A. Chuviilin, R. Hillenbrand, Y.P. Rakovich // Opt Express. – 2011. – Oct 24. – Vol. 19. – No 22. – P. 22280–22291.

Материал поступил в редакцию 03.03.14

RUSAKOV K.I., RAKOVICH Y.P., GLADYSHCHUK A.A., MELNIKAU D.G., SAVATEEVA D.I., RUSAKOVA Z.V., CHUGUNOV S.V. Optical properties of microcavities with shell of J-aggregates

We report on development of active whispering-gallery microcavities integrated with shell of organic dye TTBC molecules in a J-aggregate state and Ag nanocrystals. We demonstrate that the emission intensity can be further enhanced by depositing a hybrid layer of J-aggregates and Ag nanoparticles onto the spherical microcavity. Owing to the concerted action of WGMs and plasmonic hot spots in the Ag aggregates, we observe an enhanced Raman signal from the J-aggregates. Microcavities covered by J-aggregates and plasmonic nanoparticles could be thus useful for a variety of photonic applications in basic science and technology.

УДК 536 (075.8)

Гладковский В.И., Пинчук А.И.

ЛЕКЦИОННАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Введение. Как известно, радиометрическим эффектом называют явление спонтанного движения твердых тел, находящихся в атмосфере разреженных газов и имеющих разную температуру поверхностей. Джеймс Клерк Максвелл, проводя анализ радиометрического эффекта, обнаруженного в 1874 году английским физиком и химиком Вильямом Круксом [1], выдвинул гипотезу, заключающуюся в том, что одной из возможных причин этого эффекта могут быть температурные напряжения [2].

Радиометрический эффект имеет место в том случае, когда одна сторона твердого тела имеет более высокую температуру, чем другая. Неравенство температур обеих сторон одного и того же твердого тела достигается, как правило, путем нанесения на него светлого и темного покрытия. В результате, темная сторона обладает большей поглощательной способностью, чем светлая. Таким образом, темная сторона лопасти крыльчатки радиометра Крукса имеет более высокую температуру по сравнению со светлой стороной.

Природа радиометрического эффекта. Радиометрический эффект имеет чисто молекулярно-кинетическую природу. Молекулы разреженного газа, отскакивающие от более нагретой поверхности твердого тела, получают при этом больший импульс, чем молекулы, отражающиеся от менее нагретой стороны. Поэтому, в соответствии с законом сохранения импульса, твердое тело движется в противоположном направлении. Действительно, при воздействии электромагнитного излучения на крыльчатку оно поглощается обеими сторонами. Но так цвет у разных сторон разный, то эти стороны, обладающие разной поглощательной способностью, нагреваются различным образом. При этом темная сторона нагревается сильнее

светлой. Так как температура темной стороны крыльчатки больше температуры светлой стороны, то темная сторона передает молекулам окружающего воздуха больший суммарный импульс, чем светлая. В результате действия закона сохранения импульса сама крыльчатка при этом получает больший импульс, направленный в противоположную сторону. В результате возникает закручивающий момент приблизительно в 1000 раз больше закручивающего момента, обусловленного световым давлением (что не было вначале учтено Максвеллом).

Еще одной причиной, вызывающей возникновение радиометрических сил, является движение приповерхностного слоя газа в направлении к более нагретой поверхности. Вязкость газа способствует распространению этого движения в отдаленные слои газа. В соответствии с законом сохранения импульса, твердое тело также движется в противоположном направлении [3]. В качестве подтверждающей иллюстрации этого явления можно упомянуть ситуацию, когда пыль собирается на более холодных сторонах отопительных систем. Но в случае разреженного газа этим явлением можно пренебречь. В случае же устройств, в которых присутствует температурный градиент, данным эффектом пренебрегать нельзя [4].

Если поместить пластину с различными температурами в атмосферу разреженного газа, то на нее действует сила F , равная

$$F = \frac{\rho A}{2} \left(\sqrt{\frac{\alpha_E T_H + (1 - \alpha_E) T_G}{T_G}} - \sqrt{\frac{\alpha_E T_C + (1 - \alpha_E) T_G}{T_G}} \right),$$

где ρ – давление газа, T_H и T_C – температуры горячей и холод-

Гладковский В.И., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Пинчук А.И., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Физика, математика, информатика

ной стороны соответственно, T_G – температура газа, A – площадь лопасти и α_E – коэффициент поглощения энергии [5]. Силы, заставляющие пластины двигаться, называются радиометрическими. Следует отметить, что средняя длина свободного пробега молекул газа должна быть больше, чем толщина пластины.

Радиометр Крукса обычно изготавливают в виде стеклянной колбы, из которой предварительно удаляется большая часть воздуха (т.е. создается частичный вакуум). Внутри колбы на специальном шпинделе, обеспечивающем небольшое значение силы трения, установлено несколько (как правило, четыре) вертикально расположенных лопастей из сплава легких металлов, размещенных на равном расстоянии от оси их вращения. Лопасты с одной стороны обычно либо полируют, либо красят светлой краской, с другой — их обычно зачерняют. Если на радиометр воздействует солнечный свет, освещение от электрической лампочки или инфракрасное излучение (причем в некоторых случаях может быть достаточно даже тепла от рук), то лопасти начинают вращаться без видимой движущей силы. Весьма характерным и значимым в данном случае является то обстоятельство, что затемненные лопасти удаляются от источника излучения, а светлые, наоборот, — приближаются.

Более того, если радиометр охлаждают, то это приводит к вращению лопастей в обратном направлении. Подобный эффект начинает проявляться после откачки воздуха при невысоком вакууме (несколько сотен паскалей) и становится максимальным при значениях давления близких к 1 Па. Радиометрический эффект исчезает совсем, когда вакуум достигает значения 10^{-4} Па.

Интересно также происхождение названия эффекта, которое происходит от латинского слова "radius", что в переводе означает «луч». В данном случае этот эффект связан с электромагнитным излучением. Следовательно, с помощью радиометра Крукса можно измерять интенсивность электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне. Для этого достаточно провести измерение скорости вращения лопастей, например, с помощью стробоскопа.

При попадании теплового излучения на лопасти радиометра Крукса, он превращается в тепловой двигатель. Действительно, работа любого теплового двигателя связана с существованием разницы температур между нагревателем и холодильником. При этом полученная теплота трансформируется в механическое перемещение, т.е. тепловой двигатель может совершать работу. В данном случае лопасти с темной стороны нагревается сильнее светлой, в силу того, что черный цвет сильнее поглощает тепловую энергию по сравнению с отполированной или более светлой стороной. При соприкосновении молекул воздуха с черной стороной лопасти, их температура, а, значит, и их кинетическая энергия, при этом увеличиваются. Далее, поскольку нагретые стороны лопасти отдают свою тепловую энергию молекулам воздуха, то температура разреженного воздуха внутри колбы увеличивается. В свою очередь, сами молекулы воздуха также отдают полученную ими энергию молекулам стеклянных стенок сосуда. Температура стенок колбы совпадает с температурой окружающей среды.

Постоянный отток энергии изнутри через стенки сосуда создает такой тепловой режим, что разные стороны одной и той же лопасти оказываются нагретыми по-разному. При этом светлая сторона лопасти всегда холоднее темной за счет большей теплоотдачи. В то же время температура светлой стороны лопасти оказывается немного выше температуры воздуха, находящегося внутри стеклянного сосуда. Для усиления эффекта разные стороны лопастей желательно теплоизолировать друг от друга так, чтобы предотвратить самопроизвольное выравнивание температур. Если же лопасти сделаны из металла, тогда изолирующим материалом может служить сама краска (неважно черная или светлая). Более высокое внешнее давление воздуха помогает эффективнее отводить тепло от стенок сосуда.

Работа радиометра Крукса при различных режимах освещения (рис. 1–3).

Кроме того, величина воздушного давления внутри сосуда должна находиться в определенных пределах. При давлении меньше 1 Па внутри колбы будет недостаточно молекул воздуха для того, чтобы создавать воздушные потоки, способные вращать лопасти крыльчатки и передавать тепловую энергию наружу так, чтобы разные стороны лопастей не могли достигнуть состояния теплового равновесия за счет эффекта теплопроводности непосредственно через материал самих лопастей. При повышении давления свыше 400 Па разницы температур между разными сторонами лопастей будет не достаточно для создания вращающего момента по причине соответствующего увеличения сопротивления воздуха.

Нами разработана лекционная демонстрация, предназначенная для показа преобразования тепловой энергии в механическую. Основой созданной установки для изучения радиометрического эффекта является радиометр Крукса. Этот радиометр, известный как "световая мельница", впервые был сконструирован Круксом в 1873 году. Радиометр Крукса состоит из крыльчатки с четырьмя лопастями, сбалансированной на тонкой игле внутри стеклянной колбы с небольшим отрицательным (пониженным по сравнению с атмосферным) давлением.

К радиометру Крукса в нашей установке прилагаются различные источники электромагнитного излучения, работающие в следующих диапазонах длин волн электромагнитного диапазона: 1) оптический и инфракрасный диапазон; 2) только оптический диапазон; 3) только инфракрасный диапазон.

Из рисунков 1–3 видно, что радиометрический эффект имеет место, когда на крыльчатку падает излучение от лампы накаливания и теплового нагревателя. Когда крыльчатка освещается компактной люминесцентной лампой, то крыльчатка не вращается.

Заключение. Причина наблюдаемого явления заключается в том, что электромагнитные волны инфракрасного диапазона нагревают черную поверхность лопастей лучше, чем электромагнитные волны в оптическом диапазоне.

Учебно-методический эффект от использования данной лекционной демонстрации состоит в том, что он позволяет:

- избежать подмены внешне похожих эффектов, имеющих принципиально различную физическую природу;
- отвечать принципу научности демонстрационных опытов, сделать демонстрации выразительными;
- преодолеть научно-педагогическую трудность, заключающуюся в большой трудности демонстрации в условиях образовательного учреждения установки Лебедева, регистрирующей давление света.

Лекционная демонстрация молекулярно-кинетической природы радиометрического эффекта внедрена в учебный процесс по кафедре физики БрГТУ в разделе "Молекулярная физика" курса "Физика".

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Patent, U.S. Crookes, William // Improvement In Apparatus For Indicating The Intensity Of Radiation. – Published 10 August 1876. – Issued 12 September 1876.
2. Maxwell, J.C. On stresses in rarified gases arising from inequalities of temperature // Phil. Trans. R. Soc. of London. – 1879. – № 170 – P. 231–256.
3. Einstein, A. Zur Theorie der Radiometrerkräfte // Zeitschrift fur Physik. – 1924. – № 27. – P. 1–5.
4. Scandurra, M. Gas kinetic forces on thin plates in the presence of thermal gradients / M. Scandurra, F. Iacopetti, P. Colona // Physical Review. – 2007. – V. E75. – P. 026308.
5. Gimelshein, S. Analysis and Applications of Radiometric Forces in Rarefied Gas Flows / S. Gimelshein, N. Gimelshein, A. Ketsdever, N. Selden // 27th International Symposium on Gas Dynamics, Monterey, CA. – 2010, July 10-15.

Режим освещения

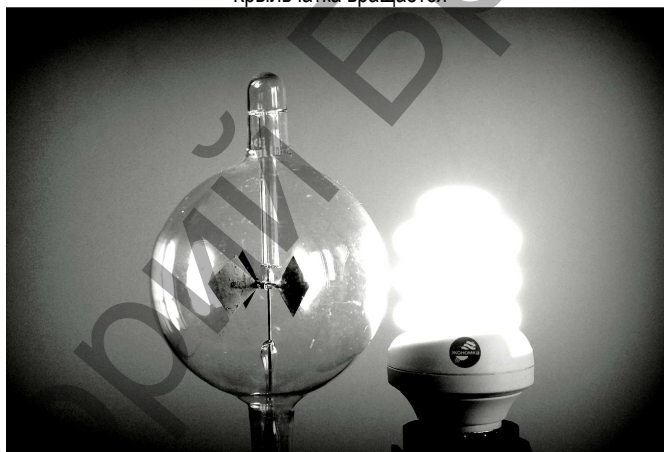
Работа радиометра

Рис. 1. Оптический и инфракрасный диапазон (лампа накаливания)



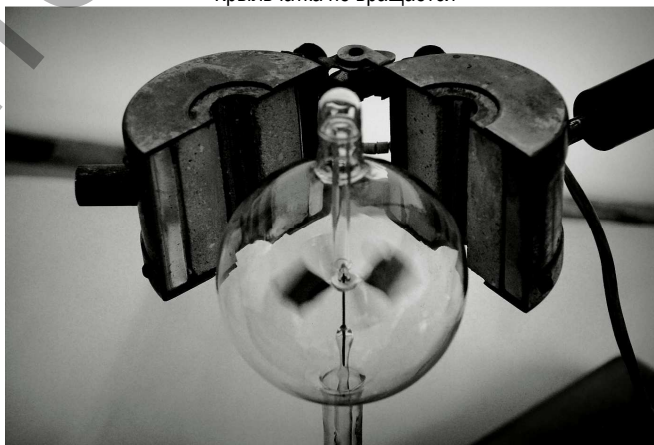
Крыльчатка вращается

Рис. 2. Только оптический диапазон (компактная люминесцентная лампа)



Крыльчатка не вращается

Рис. 3. Только инфракрасный диапазон (тепловой нагреватель)



Крыльчатка вращается

Материал поступил в редакцию 08.01.14

GIADKOVSKY V.I., PINCHUK A.I. A lecture demonstration to study molecular nature of the radiometric effect

We have developed a lecture demonstration to show the direct conversion of heat energy into mechanical energy. The main unit of the proposed facility to study the radiometric effect is the Crookes radiometer. The facility is supplied with the sources of electromagnetic radiation working in the different bands. The use of this facility during classes allow students to avoid misunderstanding of the wherefore for similar effects which have principally different physical nature.