

## О ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИМЕНЕНИЯХ НАНОТРУБОК, НАПОЛНЕННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ С ТЯЖЕЛЫМИ ФЕРМИОНАМИ

*К.А. Молдосанов*

---

Показано, что наночастицы из соединений с тяжёлыми фермионами – потенциальные поглотители электромагнитного излучения СВЧ и терагерцевого диапазона частот могут найти применение в качестве конвертеров излучения в теплоту в терагерцевых детекторах.

*Ключевые слова:* наночастица; нанотрубки; тяжёлый фермион; детектор терагерцевого диапазона; радиопоглощающее покрытие; поглощение; сверхпроводимость при комнатной температуре.

Простые оценки показывают, что в наночастицах соединений с тяжёлыми фермионами (СТФ) при комнатных температурах можно сохранить высокую интенсивность рассеяния электронов благодаря сохранению  $f$ -зоны тяжёлых электронов, если энергетическая щель между верхним краем  $f$ -зоны и ближайшим незанятым электронным уровнем в зоне лёгких электронов превышает величину  $kT = 2,6 \cdot 10^{-2}$  эВ. Поэтому наночастицы STF, введённые в соответствующую матрицу, могут найти применение в детекторах терагерцевого диапазона частот в качестве конвертеров электромагнитной энергии в теплоту, а также как поглотители СВЧ излучения в материалах для экранирования рас-

сеянного фона в электронике и в покрытиях для “стелс”-технологий. Возможно, что углеродные нанотрубки, наполненные наночастицами STF и “пришитые” к углеродной полимерной плёнке могли бы повысить критическую температуру сверхпроводящего перехода.

Нанотрубки, наполненные наночастицами STF, могут представлять интерес для научных работников и инженеров, разрабатывающих детекторы терагерцевого излучения и поглощающие покрытия для “стелс”-технологий.

Известно [1–3], что в объёмных соединениях с тяжёлыми фермионами из-за узкой и частично занятой  $f$ -зоны электронных состояний вблизи уровня Ферми  $E_F$ , при низких температу-

рах (~10-100 K) наблюдается очень интенсивное рассеяние электронов. При комнатных температурах это явление исчезает из-за размывания  $f$ -зоны фононами. Однако даже при комнатных температурах в СТФ частицах можно сохранить интенсивное рассеяние электронов и обуславливающую это рассеяние  $f$ -зону. Для этого СТФ частица должна иметь достаточно малые размеры с энергетической щелью  $E_g$  между верхним краем  $f$ -зоны и ближайшим незанятым электронным состоянием в зоне лёгких электронов (см. рис.), превышающей энергию теплового размывания  $kT = 2,6 \cdot 10^{-2}$  эВ (здесь  $k$  – постоянная Больцмана,  $T = 300$  K). Именно сохранение  $f$ -зоны обеспечивает эффекты, представляющие практический интерес.

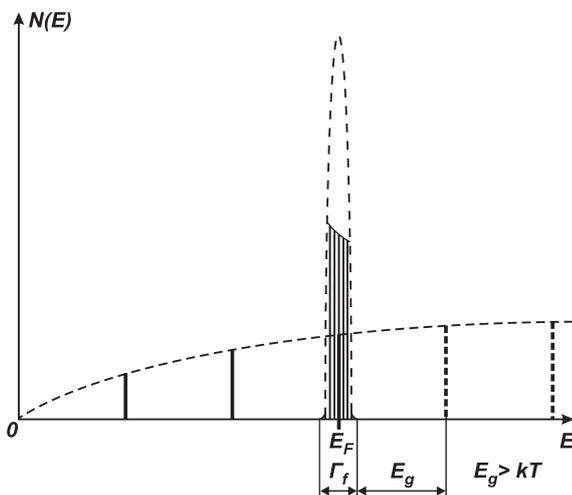


Схема плотности энергетических состояний электронов  $N(E)$  как функции энергии электронов  $E$  в частицах соединений с тяжёлыми фермионами. Незанятые состояния в зоне лёгких электронов выше уровня Ферми  $E_F$  показаны вертикальными штриховыми линиями. Плотность состояний электронов в узкой  $f$ -зоне схематически показана для комнатной температуры.

При комнатных температурах плотность энергетических состояний электронов  $N(E)$  в пределах  $f$ -зоны изменяется благодаря фононам, которые переносят электроны с состояний ниже  $E_F$  на уровни выше  $E_F$ . Поэтому плотность состояний  $N(E)$  в пределах  $f$ -зоны будет выглядеть так, как изображено на рисунке. Следовательно, фотоны смогут возбуждать  $f$ -электроны, если их энер-

гии кратны  $(\Gamma_f/N)$ , где  $N$  – число атомов в частице, то есть  $(\Gamma_f/N), 2 \cdot (\Gamma_f/N), 3 \cdot (\Gamma_f/N), \dots, \approx (\Gamma_f/2)$ .

Благодаря большому числу незанятых электронных состояний вблизи  $E_F$  в узкой  $f$ -зоне в частице, находящейся в электромагнитном (ЭМ) поле, электроны, возбужденные фотонами, будут интенсивно рассеиваться (с интенсивностью на два порядка величины выше интенсивности рассеяния в простых металлах). ЭМ энергия будет интенсивно преобразовываться в теплоту, и частица станет нагреваться. Этот эффект можно использовать для разработки конвертеров террагерцевого излучения в теплоту, а также для создания поглощающих покрытий СВЧ излучения в “стелс”-технологиях.

При уменьшении размера металлической частицы, то есть с уменьшением числа  $N$  атомов в ней, энергетическое расстояние между электронными уровнями в зоне лёгких электронов увеличивается. Поскольку число атомов в изолированной металлической частице мало, расстояние между энергетическими уровнями обычно [4] оценивается по приближённой формуле:

$$\Delta E \sim E_F/N, \tag{1}$$

в зоне тяжёлых электронов энергетическое расстояние между электронными уровнями также увеличивается:

$$\Delta E_f \sim \Gamma_f/N, \tag{2}$$

где  $\Gamma_f$  – ширина  $f$ -зоны,  $\Gamma_f \sim 10-100$  K, или в энергетических единицах:  $\Gamma_f \sim 8,7 \cdot 10^{-4} - 8,7 \cdot 10^{-3}$  эВ.

В соответствии с формулой (1) и рисунком, число  $N$  атомов в частице, которое она должна содержать, чтобы  $f$ -зона сохранилась, то есть, чтобы сумма энергий  $[E_g + (\Gamma_f/2)]$  превысила величину  $kT$ , определяется неравенством:

$$N < E_F/kT.$$

Для количественных оценок предположим, что  $E_F \approx 10$  эВ. Тогда  $N < 385$ . Далее, пусть частица представляет собой куб; тогда максимальное число атомов, которое должно содержаться в ребре, равно  $385^{1/3} \approx 7$  атомам, а максимальное число атомов в пространственной диагонали должно быть равно  $7 \cdot 3^{1/2} \approx 12$  атомам. Предположим для определённости, что размер атома равен  $4 \text{ \AA}$ , тогда оценочный “диаметр” частицы должен быть равен  $12 \cdot 4 \text{ \AA} = 48 \text{ \AA} \approx 5 \text{ нм}$ . Таким образом, частицы с сохранённой  $f$ -зоной вблизи уровня Ферми должны иметь размеры нанометрического масштаба.

Определим теперь, какому диапазону ЭМ спектра принадлежат фотоны, если их энергии преобразуются в теплоту вследствие интенсив-

ного рассеяния на тяжёлых электронах  $f$ -зоны. В соответствии с формулой (2), величина  $\Delta E_f$  лежит в пределах:

$$\Delta E_f \sim \Gamma_f / N \sim 2,3 \cdot 10^{-6} - 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ эВ.}$$

Таким образом,  $f$ -электроны могут поглощать фотоны с энергиями:  $2,3 \cdot 10^{-6}$ ,  $4,6 \cdot 10^{-6}$ ,  $6,9 \cdot 10^{-6}$  ...,  $\sim 4,3 \cdot 10^{-4}$  эВ (оценки для нижнего значения  $\Gamma_f$ ). Для верхнего значения  $\Gamma_f$  можно получить следующие величины поглощаемых ЭМ энергий:  $2,3 \cdot 10^{-5}$ ,  $4,6 \cdot 10^{-5}$ ,  $6,9 \cdot 10^{-5}$ , ...,  $\sim 4,3 \cdot 10^{-3}$  эВ. Пересчёт этих величин в длины волн показывает, что поглощаемые фотоны принадлежат диапазону ЭМ спектра с длинами волн от  $\sim 0,29$  мкм до  $54$  см (соответственно, их частоты лежат в пределах от  $\sim 1$  ТГц до  $555$  МГц). В этом диапазоне длин волн работают радарные устройства и системы сотовой связи, кроме того, этот диапазон содержит и терагерцевый поддиапазон.

Эти оценки означают, что потенциальные применения наночастиц из СТФ – следующие:

(а) поглотители излучения радаров в “стелс”-технологиях;

(б) поглотители излучения для экранирования рассеянного фонового излучения в электронике (например, в корпусах сотовых телефонов – вне зоны антенного участка), поглощающие материалы для защиты компьютеров и помещений от несанкционированного прослушивания; а также поглощающие покрытия для экранирования помещений от сигналов сотовой связи;

(в) конвертеры ЭМ излучения в теплоту в терагерцевых детекторах.

Последнее применение (детекторы терагерцевого диапазона) следует отметить особенно, в связи с возникшими вызовами террористических угроз и проблемой дистанционного обнаружения в аэропортах бомб и оружия, скрытых под одеждой пассажира. Очевидно, будучи соединённым с инфракрасной системой отображения, конвертер терагерцевого излучения в теплоту стал бы прибором для визуального обнаружения оружия. Кроме того, подобные приборы могли бы найти применение в медицине: в онкологии для раннего обнаружения опухолей и в терагерцевой томографии.

Чтобы сохранить необходимые свойства наночастиц СТФ на практике, требуется сохранить их размер  $\sim 5$  нм. Например, путём введения наночастиц в матрицу, прозрачную в терагерцевом диапазоне, которая предотвращает агломерацию наночастиц и изолирует их друг от друга. Очевидно, один из путей достижения этого – введение наночастиц СТФ в нанотрубки диаметром  $\sim 5$  нм. В связи с этим привлекательна технология

создания “ковра” из углеродных нанотрубок, состоящего из миллиардов пустых нанотрубок, выстроенных вертикально, “как упакованные спагетти” – её разработал профессор Аджаян (Р.М. Ajayan) [5-9] из Университета Райса (Техас, США). “Ковёр” из нанотрубок с наночастицами СТФ внутри (например, из соединений  $\text{CePd}_3$ ,  $\text{CeAl}_3$ ,  $\text{CeCu}_6$ , и других) мог бы стать двумерным конвертером терагерцевого излучения в теплоту для инфракрасного отображающего детектора.

Ещё одно, возможно, пока гипотетическое, применение нанотрубок, наполненных наночастицами СТФ, – экзотические сверхпроводники при комнатной температуре. В своих работах Гейликман [10,11] показал, что в сплаве с перекрывающимися вблизи уровня Ферми  $s$ - и  $d$ -зонами (или  $s$ - и  $f$ -зонами) могут возбуждаться акустические плазмоны, и благодаря им возможно спаривание электронов и возникновение сверхпроводимости при высоких критических температурах. Наночастицы с СТФ являются именно такими объектами. Возможно, в углеродных нанотрубках, наполненных ими, могли бы возбуждаться квазичастицы, подобные акустическим плазмонам. Тогда они могли бы играть роль резонансных боковых групп, рассмотренных в модели Литтла [12,13], если бы удалось “пришить” их к поверхности полимерных углеродных плёнок, например, подобных графену. Могла бы реализоваться сверхпроводимость при комнатной температуре в таком гибриде моделей Литтла и Гейликмана? Вопрос пока открыт...

### Литература

1. Хомский Д.И. Проблема промежуточной валентности // УФН. 1979. Т. 129. С. 443.
2. Хомский Д.И. Редкоземельные соединения с промежуточной валентностью: спектроскопические исследования // Спектроскопия кристаллов. Сб. научн. тр.; под ред. А.А. Каплянскогo. Л.: Наука, 1985. С. 118–149.
3. Stewart G.R. Heavy-fermion systems, Rev. Mod. Phys, 1984. Vol. 56, No. 4. P. 755.
4. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2001. 224 с.
5. Yang Z.-P., Ci L., Bur J.A., Lin S.-Y., and Ajayan P.M. Experimental observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array // Nano Letters. 2008. Vol. 8. No 2. P. 446.
6. Suhr J., Victor P., Ci L., Sreekala S., Zhang X., Nalamasu O., and Ajayan P.M. Fatigue resistance of aligned carbon nanotube arrays under cyclic

- compression // *Nature Nanotechnology*. 2007. Vol. 2. No. 7. P. 417.
7. *Ajayan P.M. and Tour J.* Nanotube Composites // *Nature*. 2007. Vol. 447. P. 1066.
  8. *Ge L., Sethi S., Ci L., Ajayan P.M., and Dhinojwala A.* Carbon nanotube-based synthetic gecko-tapes // *Proc. Nat. Acad. of Sci.* 2007. Vol. 104. P. 10792.
  9. *Talapatra S., Kar S., Pal S.K., Vajtai R., Ci L., Victor P., Shaijumon M.M., Kaur S., Nalamasu O. and Ajayan P.M.* Direct growth of aligned carbon nanotubes on bulk metals // *Nature Nanotechnology*. 2006. Vol. 1. P. 112.
  10. *Гейликман Б.Т.* // *ЖЭТФ*. 1965. Т. 48. С. 1194.
  11. *Гейликман Б.Т.* Исследования по физике низких температур. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
  12. *Little W.A.* Possibility of synthesizing organic superconductor // *Phys. Rev. A*. 1964. Vol. 134. No. 6A. P. 1416
  13. *Литтл У.* Сверхпроводимость при комнатной температуре // *УФН*. 1965. Т. 86. Вып. 2. С. 315.