

## Полное поглощение инфракрасного излучения в тонких слоях металлической черни

А. Я. Бланк, Ф. К. Касумов, А. Я. Шаршанов

*Харьковский институт инженеров городского хозяйства, 310002, г. Харьков, ул. Революции, 12*

А. А. Шилиев

*Институт новых энергетических проблем химической физики Российской АН, 117829, г. Москва, Ленинский пр., 38*

Статья поступила в редакцию 12 августа 1992 г.

Показана возможность полного поглощения излучения ИК диапазона в тонких (менее длины волны) слоях малых металлических частиц. Поглощение имеет монотонный характер в полосе шириной  $\sim 1-10$  мкм. Указан механизм поглощения, обусловленный возбуждением поверхностных мод в квазидвумерных гранулах, агрегированных из малых частиц металла, и рассчитана длина затухания электромагнитной волны в рассмотренной высокодисперсной среде.

Показано можливість повного поглинання випромінювання ІЧ діапазону в тонких (менше довжини хвилі) шарах малих металевих частинок. Поглинання має монотонний характер у смузі завширшки  $\sim 1-10$  мкм. Указано механізм поглинання, зобов'язаний збудженню поверхневих мод у квазідвовимірних гранулах, агрегованих з малих частинок металу, та розраховано довжину загасання електромагнітної хвилі у розглянутому високодисперсному середовищі.

Создание хорошо поглощающих приемников светового и инфракрасного излучения чрезвычайно важно для практических применений. Эта проблема существует в области как низких, так и комнатных температур. Естественно, что механизмом, ответственным за поглощение, является в конечном счете электропроводность металла.

Известно, что обычный массивный металл поглощает лишь доли процента падающего излучения. В тонких пленках металлов (толщиной менее глубины скин-слоя) из-за конкуренции между высокой отражательной способностью металла и прозрачностью пленок поглощение может возрасти до половины всего падающего излучения.

В значительном количестве работ отмечено аномально большое поглощение излучения оптического и ИК диапазонов в высокодисперсной среде, состоящей из малых (до 100 Å) металлических частиц (обширная библиография приведена в [1, 2]). Характер поглощения в среде, состоящей из малых частиц металла, в ряде случаев близок к характеру поглощения в черном теле. Вместе с тем механизм многократного отражения, обычно привлекаемый для объяснения поглощения в черном теле, здесь не применим, поскольку длина волны падающего излучения много больше размеров частиц металла. Хотя оптические свойства малых частиц изучены достаточно хорошо, в вопросе о величине и механизмах поглощения в системе малых частиц нет полной ясности.

Характерным для высокодисперсной металлической среды является резонанс, связанный с возбуждением собственных поверхностных мод малых частиц. Существование резонанса было показано в классической работе Ми, посвященной рассеянию электромагнитных волн на малых сферических металлических частицах. Резонансная частота этой моды, отвечающая основной гармонике, равна

$$\omega_f = \omega_p \sqrt{f}, \quad (1)$$

где  $\omega_p$  — плазменная частота металла;  $f$  — поляризационный фактор, определяемый формой частицы. Для сферической частицы  $f = 1/3$ , и эта частица попадает в оптическую область. В общем случае одновременное возбуждение поверхностной моды на всех частицах одинаковой формы приводит к пику поглощения на частоте  $\omega_f$ .

Мы хотим обратить внимание на то, что указанный механизм может привести к аномально большому поглощению в достаточно широкой полосе частот ближнего ИК диапазона.

В самом деле, из формулы (1) следует, что резонансная частота благодаря фактору  $f$  зависит от формы частицы. В частности, для удлинённых частиц эллипсоидальной формы фактор  $f$  пропорционален квадрату отношения короткой и длинной полуосей эллипсоида. Отсюда следует, что для вытянутых частиц, например цилиндров, резонансная частота переходит в область больших длин

волн. Для  $f \sim 10^{-1} - 10^{-3}$  частота  $\omega_f$  попадает в ближнюю ИК область (длина волны  $\lambda \sim 1 - 10$  мкм).

Если среда представляет собой набор удлиненных частиц, характеризующихся различными величинами параметра  $f$ , то при падении на нее внешней электромагнитной волны с частотой  $\omega$  происходит резонансное возбуждение поверхностной моды на частицах, обладающих величиной параметра  $f$ , которая удовлетворяет условию  $\omega_f = \omega$ . Таким образом, внешняя электромагнитная волна производит отбор частиц, удовлетворяющих условию резонанса. Этот механизм обуславливает поглощение в полосе частот, ширина которой определяется распределением частиц по поляризационным факторам.

Для расчета поглощения мы используем следующую модель металлической черни. Мы предположили, что чернь состоит из малых частиц размером  $\sim 50$  Å с плотностью массивного металла, агрегированных в протяженные гранулы. Мы покажем в настоящем сообщении, что такая модель позволит получить поглощение порядка единицы в слое высокодисперсной среды толщиной порядка  $\lambda$  — длины волны излучения в вакууме.

Систему малых частиц металла будем представлять в виде набора вытянутых гранул, длины которых много больше их поперечных размеров (в предельном случае, если угодно, цилиндров). Именно такая система зачастую реализуется в эксперименте и даже непосредственно наблюдается с помощью микроскопа [2]. Далее, предполагая сами гранулы достаточно плотными, будем считать систему гранул рыхлой, т.е. полагать, что гранулы соприкасаются только малой частью своей поверхности. Благодаря этому, во-первых, переменное поле свободно проникает в пространство между гранулами и, во-вторых, взаимодействие между гранулами оказывается пренебрежимо малым. Иными словами, рассеяние на системе гранул можно рассматривать как взаимодействие волны с независимыми рассеивателями. Наконец, сами гранулы будем предполагать достаточно тонкими по сравнению с толщиной скин-слоя в массивном металле. Это позволит считать электрическое поле волны однородным на толщине гранулы.

Перейдем к расчету поглощения. Исходя из того, что в такой системе сечение поглощения значительно превосходит сечение рассеяния, записываем коэффициент поглощения в виде

$$A = 1 - \exp\{-h/L\}, \quad (2)$$

где  $h$  — толщина слоя высокодисперсной среды;  $L$  — длина затухания волны, связанная с сечением поглощения на отдельной грануле  $\sigma_i$ :

$$L^{-1} = \sum_i \sigma_i$$

(суммирование производится по числу гранул в единице объема среды).

Используя известные выражения для электрических полей эллипсоидальных частиц в квазистатическом пределе [3], представляем длину затухания электромагнитной волны в среде в виде

$$\frac{1}{L} = kn_V \overline{\cos^2 \theta} \int_0^1 df g(f) \frac{\text{Im } \epsilon_{\text{eff}}}{|1 + f(\epsilon_{\text{eff}} - 1)|^2}. \quad (3)$$

Здесь  $\overline{\cos^2 \theta}$  — результат усреднения по углу  $\theta$  между наибольшей осью гранулы и вектором поляризации падающей волны;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $n_V$  — объемная доля частиц металла в слое;  $g(f)$  — плотность вероятности распределения гранул;  $\epsilon_{\text{eff}}(\omega)$  — эффективная диэлектрическая проницаемость гранулы. Предполагается, что объемная доля частиц в грануле близка к единице. При записи выражения (3) мы опустили аналогичные слагаемые, учитывающие составляющие полей поперек гранул. В интересующей нас ИК области их вклад оказывается малым.

Для значений  $f$ , отличных от нуля, формула (3) обнаруживает резонанс, связанный с возбуждением собственных поверхностных мод гранулы, определяемых из уравнения (см. [1])

$$1 + f[\text{Re } \epsilon_{\text{eff}}(\omega) - 1] = 0, \quad (4)$$

решением которого является резонансная частота  $\omega_f$  (см. (1)).

Выражению (3) можно придать резонансный вид

$$\frac{1}{L} = kn_V \overline{\cos^2 \theta} \int_0^1 df g(f) \frac{\Delta f}{[f - f_r(\omega)]^2 + [\Delta f]^2}, \quad (5)$$

где

$$f_r(\omega) = - \frac{\text{Re } \epsilon_{\text{eff}}(\omega) - 1}{|\epsilon_{\text{eff}}(\omega) - 1|^2};$$

$$\Delta f(\omega) = \frac{\text{Im } \epsilon_{\text{eff}}(\omega)}{|\epsilon_{\text{eff}}(\omega) - 1|^2}.$$

Величина  $L$  различна в зависимости от поведения подынтегральных множителей. Если более острым является резонансное слагаемое, то формула (5) принимает вид

$$L^{-1} = \pi kn_V \overline{\cos^2 \theta} g(f_r(\omega)), \quad (6)$$

т.е., как говорилось выше, происходит резонансное возбуждение поверхностной моды в группе гранул, обладающих поляризационными факторами  $f = f_r$ .

Принимая для оценки  $n_V \sim 10^{-1}$ , а  $g$  равным его среднему значению  $g = 1$ , получаем из (6), что полное поглощение поля происходит на толщине слоя порядка  $\lambda$ . Можно ожидать, что вытянутые гранулы составляют большую долю от общего их числа, тогда в формуле (6) при малых  $f$  в среднем функция  $g > 1$ , и поглощение в ИК области будет происходить на меньшей толщине слоя.

Требуя выполнения условия резонанса (4) в поясе  $\lambda \sim 1-10$  мкм, для характерных размеров гранул получаем следующие оценки: при толщинах гранул не более 0,1 мкм их длина оказывается порядка нескольких микрон.

В другом случае, когда достаточно острым в формуле (5) является распределение  $g(f)$ , можно считать, что все гранулы в слое обладают одним и тем же поляризационным фактором  $f_0$ . В этой ситуации, если  $f_0 \neq 0$ , то наибольшее поглощение реализуется на единственной частоте  $\omega_{f_0}$ , соответствующей возбуждению характерной поверхностной моды. Для сферических частиц это отвечает уже упомянутому резонансу в видимой области спектра.

Поглощение в случае одинаковых частиц описывается выражением

$$\frac{1}{L} = kn_V \cos^2 \theta \frac{\Delta f}{[f_0 - f_r(\omega)]^2 + [\Delta f]^2} \quad (7)$$

Если использовать обозначения формулы (5), то в случае предельно вытянутых гранул, когда  $f_0 \ll \Delta f$ , формула (7) имеет вид

$$L^{-1} = kn_V \cos^2 \theta \operatorname{Im} \varepsilon(\omega).$$

Эта ситуация фактически соответствует цилиндрическим гранулам ( $f_0 = 0$ ). Здесь продольные поляризационные поля отсутствуют, продольная составляющая электрического поля падающей волны свободно проникает в гранулу, и поглощение имеет нерезонансный монотонный характер. Поглощение в грануле фактически происходит так же, как в соответствующей сплошной металлической пленке. Отличие системы гранул от сплошной пленки заключается в отсутствии при малой плотности числа гранул характерного для пленок значительного отражения, связанного с существованием выделенного направления.

Используя для оценок значения  $\lambda \sim 1-10$  мкм,  $\operatorname{Im} \varepsilon \sim 10-100$ ,  $n_V \sim 10^{-1}$ , получаем, что поглощение происходит на длине  $L \sim (10^{-1}-10^{-2}) \lambda$ .

Отметим, что при  $f_0 \gg \Delta f$  длина затухания  $L$ , согласно (7), описывается соотношением

$$L^{-1} = kn_V \cos^2 \theta (\Delta f / f_0^2),$$

что при длинах волн  $\lambda \geq 10^3$  мкм и частотах столкновений электронов в металле  $\sim 10^{15} \text{ с}^{-1}$  дает

$$L^{-1} = C / \lambda^2, \quad (8)$$

где  $C \sim 10^{-6} / f_0^2$  см ( $L$  и  $\lambda$  измеряются в сантиметрах). Зависимость (8) в высокодисперсной среде неоднократно наблюдалась в экспериментах (см. [1]), причем множитель  $C$  имел величину  $C_{\text{exp}} \approx 10^{-3}$ . Большое количество теоретических работ основывались на поглощении на сферических частицах и (в полном соответствии с (8)) давали  $C \sim 10^{-6}$ , что оставляло проблему открытой. Формула (8) дает вариант ее решения, причем здесь возможны значения  $L \lesssim \lambda$  (например, при  $f_0 \sim 10^{-3}$  и  $\lambda \lesssim 1$  см).

В заключение отметим следующее. Представляется вероятным, что близкий механизм аномального поглощения может реализоваться в проводниках с пониженной размерностью — квазиодномерных проводниках и ВТСП.

1. Ю. И. Петров, *Физика малых частиц*, Наука, Москва (1982).
2. *Optical particle sizing: theory and practice*, G. Goesbet and G. Grehan (eds.) Plenum Press, New York (1988).
3. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, Наука, Москва (1982).

### Complete absorption of infrared radiation by thin layers of small metallic particles

A. Ya. Blank, F. K. Kasumov, A. Ya. Sharshanov, and A. A. Shilyaev

It is shown that IR radiation can be completely absorbed by thin (of thicknesses smaller than the radiation wavelength) layers of small metallic particles. The absorption is monotone in a 1-10  $\mu\text{m}$ -wide wavelength band. The mechanism of the absorption is disclosed; it is due to excitation of surface modes in quasi-one-dimensional granules aggregated from small particles of the metal. The electromagnetic wave attenuation length for the highly dispersed medium is calculated.

#### List of symbols

$\omega$ , frequency of wave;  $\lambda$ , wavelength;  $k$ , wave vector;  $n_V$ , filling factor;  $\sigma$ , absorption cross-section;  $L$ , damping length;  $\varepsilon(\omega)$ , complex dielectric function;  $h$ , thickness of layer;  $A$ , coefficient of absorption;  $f$ , polarization factor;  $g(f)$ , factor  $f$  probability density.