

РАССЕЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЧЕРНЬЮ

М. Ю. Сахновский и М. Г. Кунецкий

Экспериментально определены значения элементов матрицы рассеяния от слоя серебряной черни. Обнаружено, что рассеяние излучения в видимой области спектра имеет преимущественно дипольный характер. Наблюдается существенная деполяризация излучения, которая связывается с проявлением кооперативных эффектов, выраженных в асимметрии дипольного момента. Объяснение экспериментальных результатов производится на основании модели слабо взаимодействующих диполей.

Металлическая чернь является широко используемым в практике материалом. По своей структуре она представляет собой достаточно толстый слой монодисперсных частиц малого размера. Исследованию оптических свойств металлической черни посвящен ряд работ [1-7].

Малый размер частиц в слое и малые расстояния между ними приводят к существенным особенностям распространения излучения [8, 9], в результате чего оптические свойства слоя металлической черни не могут быть выражены через оптические свойства отдельной частицы, определяемые формулами Ми [10]. В целом вопрос об оптических свойствах металлической черни остается еще мало изученным. Значительная информация в данном вопросе может быть получена на основании исследования матриц рассеяния.

В настоящей работе исследовались матрицы взаимодействия излучения с непрозрачным слоем металлической черни, образованным частицами серебра с радиусом $a \approx 25 \text{ \AA}$ и с разной плотностью упаковки.

Образцы были получены испарением серебра в атмосфере тщательно очищенных инертных газов при давлениях $0.1 \div 30$ тор. Вариации средних размеров частиц осуществлялась изменением температуры подложек, скорости испарения, давления газа. Плотность упаковки определялась на основании данных о геометрической толщине слоя и поверхностной плотности. Методика получения образцов описана в работе Лысенко и Мальнева [11].

На основании данных о взаимодействии излучения с металлической чернью определена среднестатистическая матрица рассеяния, которую обычно называют матрицей рассеяния элементарного объема.

Отражение излучения от слоя металлической черни формально может быть описано с помощью матрицы яркости

$$S_i(r) = \frac{1}{\pi} \sum_k R'_{ik}(r, r_0) S_k^0(r_0) \Delta\omega_0 \cos\theta_0, \quad (1)$$

где $R'_{ik}(r, r_0)$ — матрица яркости поверхности, $S_k^0(r_0)$, $S_i(r)$ — параметры Стокса облучающего и рассеянных пучков, имеющие размерность лучистой яркости, r , r_0 — единичные векторы, определяющие соответственно направления облучения и рассеяния, $\Delta\omega_0$ — телесный угол облучающего пучка, направления r и r_0 характеризуются полярными θ , θ_0 и азимутальными φ , φ_0 углами соответственно; в качестве плоскости референции выбрана плоскость рассеяния.

В общем случае матрица яркости слоя [8, 9] очень сложно зависит от свойств элементарного объема, характеризующихся матрицей рассеяния, показателями рассеяния σ , поглощения α и удельным поглощением $\beta = \alpha / \sigma$.

Для металлической черни удельное поглощение β оказывается очень большим и при определении поля рассеянного излучения от непрозрачного слоя можно ограничиться учетом только однократного рассеяния, причем значение $R'_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ определится через характеристики рассеивающего слоя выражением [8, 9]

$$R'_{ik}(\delta) = \frac{1}{4(1+\beta)} f'_{ik}(\delta) \frac{1}{\cos \theta + \cos \theta_0}, \quad (2)$$

где $f'_{ik}(\delta)$ — матрица рассеяния элементарного объема, которая в общем случае кооперативна, δ — угол рассеяния,

$$\cos \delta = \cos \theta \cos \theta_0 + \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0} \cos(\varphi - \varphi_0).$$

Выражение (2) может быть положено в основу определения величины $f'_{ik}(\delta)$ и удельного поглощения β на основании измерений матрицы яркости (коэффициентов яркости) слоя.

Для определения экспериментальных значений матрицы рассеяния нами использовался вектор — параметрическое представление, эквивалентное стоксовскому J_l, J_r, S_3, S_4 , где J_l, J_r — интенсивности линейно-поляризованного излучения, измеренные в плоскости рассеяния и перпендикулярно к ней.

Аналогично выражениям (1) и (2) будем иметь

$$\begin{pmatrix} I_l(\theta, \varphi) \\ I_r(\theta, \varphi) \\ S_3(\theta, \varphi) \\ S_4(\theta, \varphi) \end{pmatrix} = \frac{\cos \theta_0}{4\pi(1+\beta)(\cos \theta + \cos \theta_0)} \sum_k f_{ik}(\delta) \begin{pmatrix} I_l^0(\theta, \varphi) \\ I_r^0(\theta, \varphi) \\ S_3^0(\theta, \varphi) \\ S_4^0(\theta, \varphi) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $f_{ik}(\delta)$ — матрица рассеяния элементарного объема в используемом параметрическом представлении.

Справедливость выполнения выражения (3) для слоя металлической черни нами была проверена экспериментально. Для этого определялись элементы матрицы рассеяния $f_{ik}(\delta)$, исходя из выражения (3) при фиксированных углах рассеяния δ и различных углах θ и θ_0 (рис. 1). Полученные экспериментальные результаты свидетельствовали о том, что при фиксированных значениях δ в широком интервале изменения углов θ и θ_0 ($0 \div 80^\circ$) значения $f_{ik}(\delta)$ остаются практически постоянными с точностью $\sim 10\%$.

Таким образом, для слоев металлической черни использование выражений (2) и (3) вполне оправдано [6].

Учитывая малый размер частиц и значения комплексного показателя преломления серебра $m = n - ix$, можно ожидать, что рассеяние излучения отдельной частицей в слое должно быть преимущественно дипольным ($\rho = 2\pi a / \lambda \sim 0.025$ при длине волны $\lambda = 6000 \text{ \AA}$).

Если учесть, что для металлической черни основную роль играет дипольное рассеяние, то в используемом параметрическом представлении при наличии изотропных частиц (каковыми, в принципе, являются частицы серебра) элементы $f_{12}(\delta)$ и $f_{21}(\delta)$ матрицы рассеяния должны отсутствовать в том случае, когда рассеяние каждой частицей будет независимо.

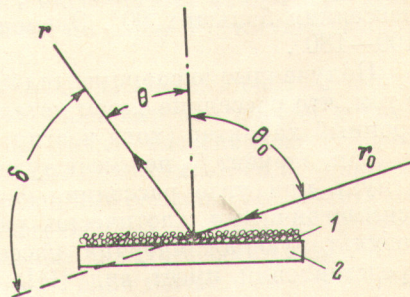


Рис. 1. Схема отсчета углов при определении элементов матрицы рассеяния металлической черни.

1 — стеклянная подложка, 2 — слой металлической черни; r_0 — направление облучения слоя, r — направление рассеяния, δ — угол рассеяния, нормаль к поверхности совпадает с плоскостью рассеяния (r, r_0).

Взаимодействие полей отдельных частиц как в ближней, так и в дальней зоне приводят к появлению кооперативных эффектов [6, 8, 9], в результате которых матрица рассеяния элементарного объема может существенно отличаться от матрицы рассеяния отдельной частицы. Для металлической черни характерной является плотная упаковка частиц на расстояниях порядка длины волны λ . Поэтому следует ожидать существенного отличия рассеивающих свойств ансамбля частиц от свойств отдельной частицы. Об этом различии можно судить, исходя из данных о матрице рассеяния слоя.

На рис. 2 приведены значения элементов матрицы рассеяния для металлической черни, образованной частицами серебра с плотностью упаковки 0.5 и 1.5%. Значения f_{ik} (δ) приведены относительно элемента f_{22} для соответствующих углов рассеяния. Значения f_{13} , f_{14} , f_{23} , f_{24} , f_{31} , f_{32} , f_{41} , f_{42} , а также f_{34} , и f_{43} равны нулю. Приведенные на рис. 2 результаты в це-

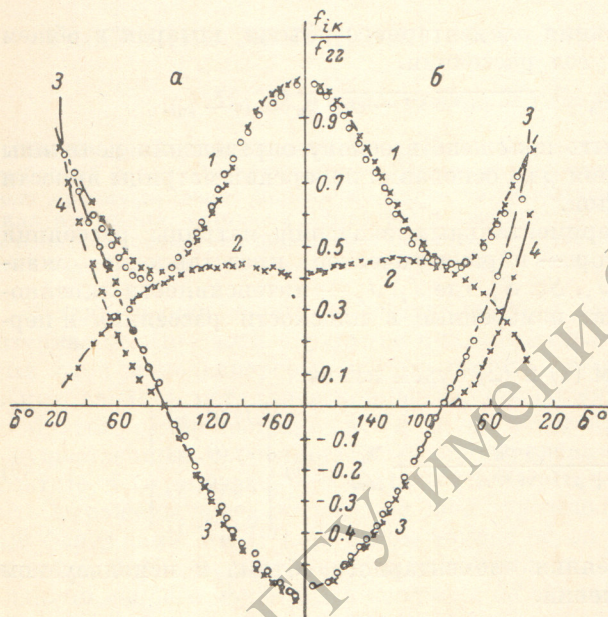


Рис. 2. Элементы матрицы рассеяния слоя металлической черни при $\lambda=6000 \text{ \AA}$. Угол облучения $\theta_0=70^\circ$.

а — образец с плотностью упаковки 0.5%, б — 1.5%. 1—4 соответствуют экспериментальным значениям элементов f_{11}/f_{22} , $f_{12}/f_{22}=f_{21}/f_{22}$, f_{33}/f_{22} и f_{44}/f_{22} ; кружками обозначены рассчитанные по формулам (5) и (6) значения элементов f_{11}/f_{22} и f_{33}/f_{22} .

лом соответствуют предположению о дипольном рассеянии [12]. Элемент f_{33} равен нулю при $\delta=90^\circ$, меняя знак на противоположный для углов рассеяния больших 90° . Элемент f_{44} мало отличается от нуля в области $100-180^\circ$.

Полученные экспериментальные результаты наглядно свидетельствуют о том, что рассеяние слоем металлической черни имеет существенно анизотропный характер (хотя частицы практически изотропны) [13].

Так, элемент f_{12} не имеет нулевых значений, а элемент f_{11} не обращается в нуль при угле рассеяния $\delta=90^\circ$. Известно, что в случае рассеяния асимметричными хаотически расположенными независимыми диполями результирующая матрица рассеяния в используемом параметрическом представлении имеет вид [12]

$$\begin{vmatrix} \cos^2 \delta + \gamma \sin^2 \delta & \gamma & 0 & 0 \\ \gamma & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \gamma) \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1 - 3\gamma) \cos \delta \end{vmatrix}. \quad (4)$$

В выражении (4) величина γ обусловлена асимметрией дипольного момента частицы и имеет смысл коэффициента деполаризации линейно-поляризованного излучения. Для случая изотропного рассеяния $\gamma=0$, а при максимальной асимметрии дипольного момента частицы $\gamma=1/3$ (т. е. $0 \leq \gamma \leq 1/3$). Полученные нами экспериментальные результаты говорят о том, что результирующая матрица рассеяния слоя металлической черни может быть аппроксимирована матрицей, близкой к выражению (4).

Анализ экспериментальных результатов показал, что для элементов $f_{11}(\delta)$, $f_{33}(\delta)$, $f_{44}(\delta)$ справедливы такие инвариантные соотношения:

$$f_{11}/f_{22} = (1 - f_{12}/f_{22}) \cos^2 \delta + f_{12}/f_{22}, \quad (5)$$

$$f_{33}/f_{22} = (1 - f_{12}/f_{22}) \cos \delta, \quad (6)$$

$$f_{44}/f_{22} = (1 - 3f_{12}/f_{22}) \cos \delta + \frac{2\Delta}{1 + \Delta} \cos \delta, \quad (7)$$

где величина $\Delta \ll 1$.

На рис. 2 изображены также рассчитанные в соответствии с формулами (5) и (6) значения f_{11}/f_{22} и f_{33}/f_{22} на основании экспериментальных данных об элементах f_{12} и f_{22} . Аппроксимированные вышеуказанными формулами значения f_{11}/f_{22} и f_{33}/f_{22} оказались достаточно близкими к непосредственно измеренным. Инвариантные выражения (5) и (6) соответствуют анизотропному дипольному рассеянию. Выражение (7) отличается от случая рассеяния независимыми анизотропными дипольными частицами наличием величины Δ .

В соответствии с результатами, изображенными на рис. 2 и с учетом выражений (5)–(7), нормированная матрица рассеяния для слоя металлической черни может быть представлена в таком виде:

$$f_{ik}/f_{22} = \begin{vmatrix} \frac{\cos^2 \delta + \gamma \sin^2 \delta + \Delta}{1 + \Delta} & \frac{\gamma + \Delta}{1 + \Delta} & 0 & 0 \\ \frac{\gamma + \Delta}{1 + \Delta} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1 - \gamma) \cos \delta}{1 + \Delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - 3\gamma) \cos \delta}{1 + \Delta} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где величины γ и Δ характеризуют деполяризацию излучения при рассеянии. Рассмотрим смысл эмпирически полученных величин γ и Δ . В случае рассеяния малыми независимыми частицами величина γ может проявиться только при наличии асимметрии частиц. Частицы серебряной черни практически изотропны. Несмотря на это в области углов рассеяния 90 – 180° экспериментальные значения величины γ равны $1/3$. Это свидетельствует о том, что рассеяние в слое металлической черни имеет преимущественно асимметричный характер.

Появление асимметрии в рассеивающих свойствах металлической черни можно объяснить непостоянством плотности упаковки хаотически расположенных в слое частиц. Поэтому любую точку рассеивающего слоя можно охарактеризовать эффективным дипольным моментом со случайной ориентацией. Например, две близко расположенные («слипшиеся») частицы уже должны обуславливать появление существенной асимметрии в рассеянии. Таким образом, наличие значительной деполяризации при отражении линейно-поляризованного излучения от слоя металлической черни (величина γ) может быть связано с асимметрией дипольного момента, возникающего благодаря кооперативным эффектам в ближней зоне.

На рис. 3 приведены значения величин γ и Δ для слоев с разной плотностью упаковки. Характерно, что величина Δ , также определяющая деполяризацию, слабо меняется в широком интервале изменения углов рассеяния δ . Величину Δ можно связать с частью излучения, возмущенной вследствие влияния на эффективный диполь полей окружающих его частиц. Отметим, что для слоя с большей плотностью упаковки значение Δ (рис. 3) оказалось несколько большим.

Полученные экспериментальные результаты говорят о кооперативном характере рассеяния излучения в слое металлической черни. Наблюдаемые кооперативные эффекты в слое существенно зависят от направления рассеяния. Так, в области углов $\delta > 90^\circ$ величина деполяризации максимальна ($\gamma \sim 1/3$).

Сформировавшаяся индикатриса рассеяния слоя соответствует закономерностям типа Релея—Ганса. На рис. 4 в относительных единицах приведены значения элемента f_{22} в функции угла рассеяния δ . Характерно,

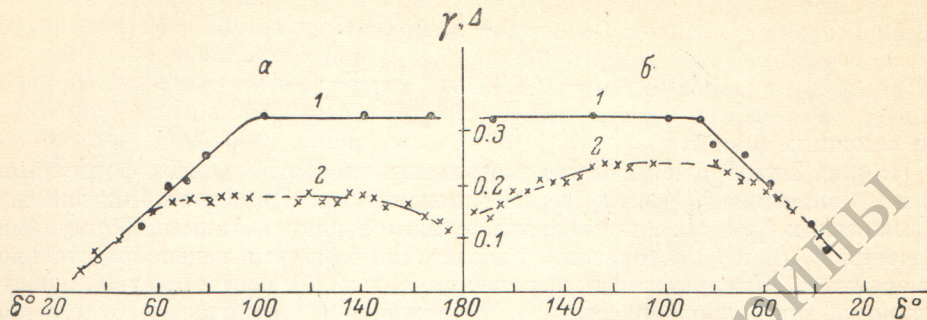


Рис. 3. Характеристики деполяризации для слоя металлической черни. а — образец с плотностью упаковки 0.5%, б — 1.5%. Кривая 1 соответствует величине γ , кривая 2 — величине Δ .

что эти значения не остаются постоянными, как это должно быть в случае рассеяния независимыми дипольными частицами.

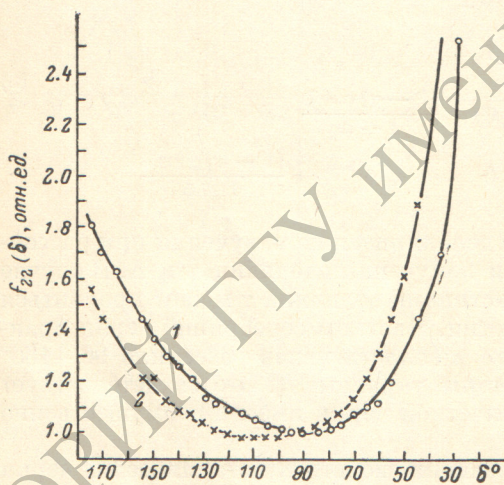


Рис. 4. Зависимость элемента f_{22} от угла рассеяния.

1 — образец с плотностью упаковки 1.5%, 2 — 0.5%.

В направлении «назад» ($\delta = 180^\circ$) наблюдается возрастание интенсивности излучения. Минимум значений для элемента f_{22} наблюдается при углах рассеяния $90-100^\circ$. По мере уменьшения угла рассеяния начиная с углов $\delta \sim 90^\circ$ значение f_{22} возрастает и при этом наблюдается существенное уменьшение величины γ . Характерно, что в направлении «вперед» наблюдается увеличение степени когерентности рассеянного пучка.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что для слоя металлической черни весьма характерным является кооперативный механизм рассеяния. Оптические свойства отдельной частицы оказываются не аддитивно связанными со свой-

ствами элементарного объема совокупного слоя. Рассеяние в целом имеет преимущественно дипольный характер с максимальной асимметрией в области углов $\delta \sim 90-180^\circ$.

Литература

- [1] L. Harris, J. K. Beasley. *J. Opt. Soc. Am.*, 42, 133, 1952.
- [2] L. Harris, A. L. Loeb. *J. Opt. Soc. Am.*, 43, 1114, 1953.
- [3] L. Harris, K. E. Cuff. *J. Opt. Soc. Am.*, 46, 160, 1956.
- [4] L. Harris. *J. Opt. Soc. Am.*, 51, 80, 1961.
- [5] В. С. Лысенко. *Ж. прикл. спектр.*, 12, 161, 1970.
- [6] Г. В. Розенберг. *Ж. прикл. спектр.*, 10, 954, 1969.
- [7] В. П. Захаров, В. С. Лысенко. *Ж. прикл. спектр.*, 13, 1090, 1970.
- [8] Г. В. Розенберг. *Усп. физ. наук*, 69, 57, 1959.
- [9] Г. В. Розенберг. *Усп. физ. наук*, 91, 599, 1967.
- [10] G. Mie. *Ann. Physik.*, 25, 377, 1908.
- [11] В. С. Лысенко, А. Ф. Мальнев. Сб. «Тепловые приемники излучения», 117. Изд. «Наукова думка», Киев, 1967.
- [12] Г. ван де Хюлст. *Рассеяние света малыми частицами*. ИЛ, М., 1961.
- [13] В. В. Боднар, В. С. Лысенко, А. Ф. Мальнев. *Физика металлов и металловедение*, 28, 799, 1969.

Поступило в Редакцию 28 мая 1973 г.