



Title	多重散乱媒質におけるコヒーレント光波伝搬特性の解析：光の弱局在と拡散波分光
Author(s)	岩井, 俊昭; 岡本, 卓; 西村, 吾朗
Citation	電子科学研究, 3, 31-33
Issue Date	1996-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24339
Type	departmental bulletin paper
File Information	3_P31-33.pdf



多重散乱媒質における コヒーレント光波伝搬特性の解析 — 光の弱局在と拡散波分光 —

附属電子計測開発施設 岩井俊昭
光システム計測研究分野 岡本卓
超分子分光研究分野 西村吾朗

多重散乱が支配的となる散乱媒質からの後方散乱光がコヒーレント後方散乱ピークを生じる。この現象は、「光の弱局在」または「光のアンダーソン局在」と呼ばれ、この現象の多重散乱場における実験的発見を契機に、光の弱局在場の時空間特性の研究が急激に活発化した。本報では、弱局在場の空間と時間の統計的特性を、拡散近似に基づく理論解析、モンテカルロシミュレーションおよび実験によって詳細に検討する。

1. はじめに

ランダム媒質からのコヒーレント後方散乱光は、図1に示すような「光の弱局在」と呼ばれる特徴的な性質を有する。この現象は、媒質内で多重散乱された光波のうち、逆方向

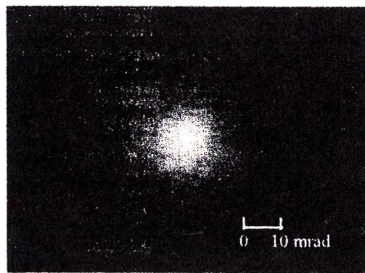


Fig.1 Intensity enhancement produced from coherent back-scatterings.

に伝播するものの散乱経路が全く同一であるような光波のコヒーレント干渉によって生じる。したがって、入射光のコヒーレンスや伝搬過程で生じる偏光状態の擾乱によって、強度エンハンスメント効果に変化することが予想される。また、このようなコヒーレント干渉が存在する「光の局在場」における時間特性も、単散乱で生じるそれとは大きく異なっていることが考えられる。

本報では、「光の弱局在場」の空間と時間に関する特性を、それぞれ後方散乱コヒーレントピーク強度分布と時間相関関数を用いて調べたので報告する。

2. 空間特性

コヒーレント後方散乱の研究では、入射光の時空間において完全なコヒーレント光であることを仮定しており、部分コヒーレント光照射の場合が未解決な問題であった。本章では、入射光のコヒーレンスの影響を調べる。

理論解析にあたり、入射光は方向 \vec{s} から媒質表面の \vec{r}_i の位置に入射され、複数回散乱された後、位置 \vec{r}_j から \vec{s}_j の方向に射出すると考える。このとき、遠方場の平均強度分布は次式なる。

$$\langle I(\vec{k}_f) \rangle = C^{-1} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} I_A(\vec{k}_i) I_0(\vec{k}_i, \vec{k}_f) dx dy \quad (1)$$

ここで、 (x, y) は散乱媒質の入射面における座標を表し、 C は規格化定数を表す。(1)式において、 $I_A(\vec{k}_i)$ は照射光の照射角スペクトル強度分布を表し、

$$I_A(\vec{k}_i) = \left(\frac{k}{2\pi}\right) \iint \mu(\vec{r}) \exp(-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}) d\vec{r} \quad (2)$$

で定義される。ここで、 $\mu(\vec{r})$ は複素スペクトルコヒーレンス度を表し、(2)式より照射角スペクトル強度分布は、媒質表面における部分空間コヒーレンス光強度分布を表す。一方、 $I_0(\vec{k}_i, \vec{k}_f)$ はコヒーレント平面波が照射されたときに生じるコヒーレント強度ピークを表

し、

$$I_0(\vec{k}_i, \vec{k}_f) = \iint P(|\vec{r}|) \{1 + \exp[i(\vec{k}_i + \vec{k}_f) \cdot \vec{r}]\} d\vec{r} \quad (3)$$

で定義される。ここで、 $P(|\vec{r}|) = P(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|)$ は、位置 \vec{r}_i に入射した光波が位置 \vec{r}_j から出射する確率密度関数を表す。(1)式は、部分コヒーレント光後方散乱ピークはコヒーレント光照射の場合のそれに照射光のコヒーレントな光の成分の割合を重みとして付加することにより求まることを示している。

図2は、幅が σ であるガウス型空間コヒーレンス関数を入射光に仮定したときの(1)式の数値計算例を示す。この図は、コヒーレンス度が増加すると、部分コヒーレンス光を照射したときに生じる後方散乱ピークにおいてはエンハンスメント効果も増加し、ピーク強度も先鋭化することを示している。

3. 時間特性

多重散乱光は、散乱媒質内を多数回散乱されながら伝播していく。したがって、散乱粒子がブラウン運動すると、散乱光も時間的に定常な時間変動する。このような多重散乱光は、散乱を繰り返すたびに吸収により散乱振幅が減衰し、偏光が擾乱のため、単散乱のそれと比べ吸収と偏光の影響が大きく変化することが予想される。本節では、吸収と偏光の影響を拡散理論に

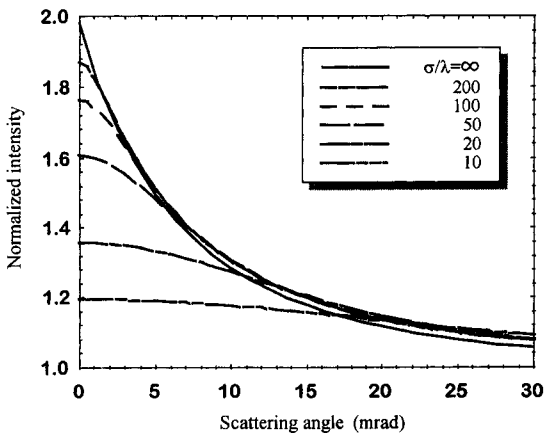


Fig.2 Normalized intensity distribution of the backscattered light plotted against the scattering angle for various values of the coherence interval. The value of the transport mean free path is 10λ .

基づく理論と実験、偏光に関しては拡散理論とモンテカルロシミュレーションを組み合わせた解析で検討する。

3.1 吸収の影響

光波が媒質内を伝搬するとき多数回散乱を受けるため、最短でも輸送平均自由行程だけ光波が伝搬した後、媒質外に射出すると仮定する。このとき、光波の伝搬に拡散近似が適用でき、遠方場における光強度ゆらぎの時間相関関数は次式で与えられる。

$$\gamma_{\Delta I}(\tau) = \left| \int_0^\infty P(s) \exp\left(-\frac{2}{\tau_0 \ell^*} \tau s\right) ds \right|^2 \quad (4)$$

ここで、 τ_0 、 ℓ^* および $P(s)$ は、それぞれ単散乱光の時間相関関数の緩和時間、輸送平均自由行程および規格化光路長密度関数を表す。この規格化光路長密度関数は、拡散近似のもとでは拡散輸送方程式のインパルス入力に対する解として導出され、次式を得る。

$$P(s) = C^{-1} P_0(s) \exp(-\mu_a s) \quad (5)$$

ここで、 μ_a と C^{-1} は、それぞれ吸収係数と規格化定数である。よって、媒質の吸収を考慮したときの多重散乱光の時間相関関数は、(5)式を(4)式に代入することにより、次式になる。

$$\gamma_{\Delta I}(\tau) = \gamma_{\Delta I}(\tau + \tau_s) \quad (6)$$

ここで、

$$\tau_s = -\tau_0 \ell^* \mu_a / 2 \quad (7)$$

を表す。(6)式は、吸収のある散乱媒質からの多重散乱光の時間相関関数は、吸収係数に比例した時間だけ負の方向に推移することを示している。したがって、この推移時間を特定できればその媒質の吸収係数を決定できることを示している。

図3は、硫酸銅溶液の吸収係数の変化に対する推移時間の変化を示す。推移時間は、(6)式のキュムラント関数の傾きをパラメータにしており、図の4種類の印は4種類のキュムラント関数の傾きに対する実験値を示す。実験結果は、(7)式で示されたように、キュムラント関数のどの傾きの点においても、推移時間は溶液の吸収係数に対して負の比例関係にあり、かつその傾きがほぼ等しいことが示された。この結果は、動的な拡散波を用いて、媒質の吸収係数を決定できる可能性を示唆するものである。

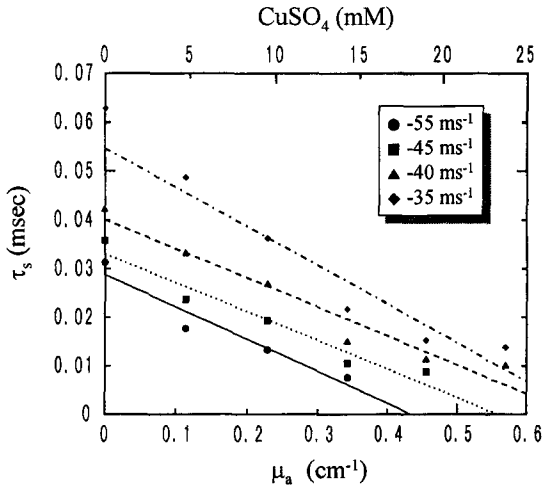


Fig.3 Calculated shifts of the autocorrelation functions with changing the absorption coefficient μ_a . The symbol is corresponding to each cumulant function. The lines are the best fits of the closed symbols.

3.2 散乱角依存性

後方多重散乱光の時間特性は、空間特性と同様にコヒーレント干渉と偏光との関わりが影響を生じることには特徴がある。前節の時間相関関数の解析では、光子拡散を仮定しているため、散乱光の波動性である偏光の影響を議論できない。したがって、モンテカルロシミュレーションによって得た、コヒーレント後方散乱光の散乱次数における平行と垂直それぞれの強度成分から、偏光とコヒーレント干渉の影響を受けた規格化光路長分布を算出できる。このようなモンテカルロシミュレーションで得た光路長分布を(4)式に適用し、時間相関関数の緩和時間の変化を散乱角の変化に対して示したのが図4である。ここで、散乱粒子半径が50 nm, 200 nm, 400 nmの4種類の粒子半径に対して、平行偏光成分(実線)と垂直偏光成分(破線)を示す。平行偏光成分は、逆反射方向において緩和時間が最小になり、散乱角が増加すると急激増加しピークを形成したのち、減少する。

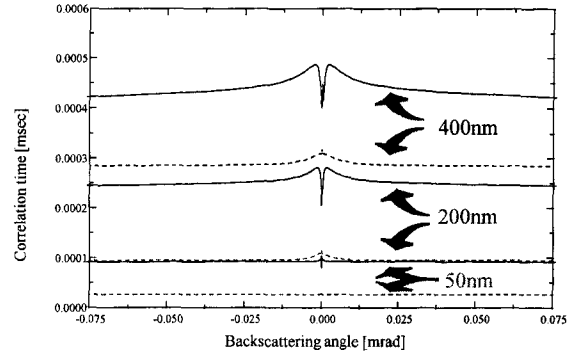


Fig.4 Correlation times of autocorrelation function for the time-varying intensity fluctuations in the field of "weak localization" as a function of the backscattering angle for three different particle radii of 50, 200 and 400 nm. The solid and broken lines denotes the co- and cross-polarized components, respectively.

一方、垂直偏光成分は、逆反射方向にわずかであるが緩和時間が増加し、ピークを形成し、逆反射方向から離れるにしたがって減少し、一定値をとる。粒子径が増加すると、緩和時間の値も増加し、平行偏光成分ではディップの深さが深くなり、かつその幅も広くなる。一方、垂直偏光成分でも、緩和時間のピークの幅と値が増加する。このような後方散乱光の散乱角に依存した偏光特性は、単散乱では観測されない、多重散乱現象における得意な現象である。今後、実験による詳細に検討を行う必要がある。

4. 結論

本研究では、「光の弱局在場」におけるコヒーレント後方散乱光の空間と時間に関する統計的特性をそれぞれ強度分布と時間相関関数を用いて調べた。その結果、照射光のコヒーレンスが散乱強度エンハンスメント効果に影響を与えること、動的な拡散波を用いて散乱媒質の吸収係数を計測できる可能性があること、多重散乱光のコヒーレント干渉が時間相関関数に影響を与えることを明らかにした。