

過渡的な 2 次の干渉の復元としての強度干渉とその応用

宮本 洋子

「光の干渉」という場合、光の強度に表れる干渉効果を指すことが多い。強度のように、場の振幅の 2 乗に比例する量に表れる干渉効果を、「2 次の干渉」と呼ぶ。

これに対して、場の振幅の 4 乗に比例する量に表れる干渉効果を、「4 次の干渉」と呼ぶ。このような 4 次の量の代表的な例として、2 つの異なる位置もしくは時刻における光強度の積がある。光強度の積に表れる干渉を強度干渉、それに附随する強度の相関を強度相関と呼ぶ。

量子力学的には、強度干渉および強度相関は、2 光子の干渉・相関として理解される。光の強度は、光検出器に到達する単位時間あたりの光子数に比例する量であり、強度の相関はこの光子の到達時刻の間の相関と解釈されるからである。このことは、光の強度が弱く、光検出器からの信号が離散的になる、光子計数の領域での実験を考えると理解しやすい。

光子計数においては、検出器が光子を検出するとパルス状の信号が観測され（このときの信号レベルを 1 としよう）、それ以外のときは信号はゼロである。単位時間あたりのパルスの数（計数率）が、時間平均された信号の強さのめやすとなる。このような離散的な信号を 2 つ用意し、その間の積をとることを考えよう。2 つの検出器が同時に光子を検出したときのみ信号レベル 1 が得られ、それ以外のときはゼロとなるから、この積の信号の時間平均としての強さのめやすは、2 つの光検出器の間の同時計数率ということになる。このように、光子計数の領域においては、光強度の積は 2 つの光検出器の間の同時計数率として測定されるのである。

Hanbury Brown と Twiss による最初の強度干渉実験¹⁾

電気通信大学情報通信工学科 (〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1)

E-mail: miyamoto@ice.uec.ac.jp

以来、古典的な波動光学で十分説明可能なものから、量子力学的な相関を扱ったものまで、強度相関・光子相関に関わるさまざまな研究が行われてきた²⁻⁴⁾。本稿ではその中から、過渡的な 2 次の干渉^{5,6)}の情報の復元として解釈されるものに焦点を絞り、古典的な領域にやや重きをおいて解説するとともに、文献²⁾で紹介された超短パルス測定その後の進展について紹介する。

1. 強度干渉と時間分解能

光強度を測定する検出器の時間分解能は、信号を増幅・処理する回路部分も考慮に入れると、応答の速いものでも数百 ps から数 ns 程度である。それに加えて、2 つの信号の「積」の演算がどのような時間分解能で行われるかについても考慮する必要がある。同時計数率として測定するなら、どの程度の信号間隔までを「同時」とみなすかが問題となるし、光電流をデジタル化して計算機で積を計算するのならば、デジタル化の方法が問題となる。一方の光検出器の信号をトリガーとしてゲート信号を生成し、このゲート信号が存在する間だけ他方の光検出器で光強度を記録する、というタイプの実験も、一種の強度相関測定と考えることができる。この場合は、ゲート信号の長さが問題となる。これらを総合したものとして、積の測定全体の時間分解能 T_R が決定される。

こうした有限の時間分解能は、強度干渉の測定にどのような影響を及ぼすだろうか。2 つの光検出器における光強度の積を長時間平均として測定するとき、もし 2 つの光強度のゆらぎに相関がなければ、それぞれの平均強度の積が得られる。正の相関があれば、この平均の値よりも大きな値が、負の相関があれば、小さな値が得られるはずである。問題は、この相関が有限の時間しか存在しないことにある。積の測定の時間分解能 T_R がゆらぎの相関時間 τ_c

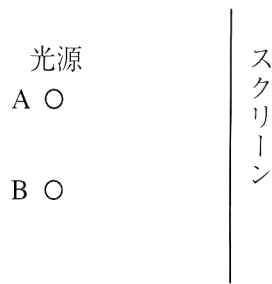


図1 光源とスクリーンの配置。

に対して十分細かければ、上述の相関を完全な形で測定することができるが、時間分解能のほうが粗ければ、われわれはその間隔で時間平均されたゆらぎをみることになる。

このとき、ゆらぎの相関関数の形状が正確に測れなくなるだけでなく、無相関の成分に対する相対的な寄与が減ってしまうことにも注意しなければならない。無相関の成分は平均化の行われる時間幅 T_R の全域にわたって存在するが、相関成分は τ_f の間しか存在しないので、後者の相対的な寄与は τ_f/T_R 倍に減少してしまうのである⁷⁾。 τ_f と T_R が何桁も異なる場合、測定のス/N比を相応に上げないと、相関の存在を示すことすら困難であることがわかる。

以上は連続光の場合であったが、パルス光の場合は若干事情が異なる。パルス光の場合は、無相関の成分も、パルス幅 τ_p の間しか存在しない。したがって、 τ_p が積の測定の実効的な時間分解能となり、相関成分の相対的な寄与は τ_f/τ_p 倍程度までしか悪化しない⁸⁾。

2. 独立2光源の干渉縞

2つの光源がスクリーン上に作る強度分布を考えてみよう(図1)。もし、この2光源が、単一の点光源によって照明された2つのスリットであれば、これはヤングの干渉実験であり、スクリーン上にはスリットの間隔に対応した干渉縞が観測されるはずである。一方、互いに位相の関係が固定されていない独立な2光源⁹⁾であれば、干渉縞は観測されない、というのが通常の解答である。

しかしながら、上述の解答は実は半分しか正しくない。独立な2光源であっても帯域が有限であれば、その逆数程度の時間(コヒーレンス時間)の間はそれぞれ位相の連続性が保たれているから、その間は互いの位相の関係も保持されているはずである。したがって、コヒーレンス時間内の信号だけを記録することができ、かつその間に十分なS/N比を与える数の光子が測定に掛かれば、互いに独立な2光源であっても干渉縞を観測することが可能である⁵⁾。コヒーレンス時間を過ぎると位相の関係が変わり、それにしたがってスクリーン上の干渉縞の山や谷もその位

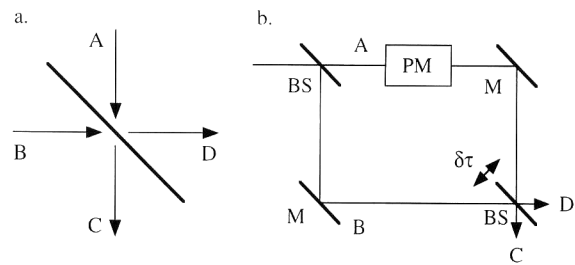


図2 a. ビームスプリッターと入出力. b. 干渉計配置(M:鏡, BS:ビームスプリッター, PM:位相変調器)。

置を変える。これが長時間にわたって積分されることにより、干渉縞が消去されるのである。このように、短時間しか安定に存在しない干渉縞を、「過渡的な干渉縞(transient interference fringe)」^{5,6)}と呼ぶ。

上の議論は強度分布、すなわち電場の2次の量に関するものであったが、過渡的な干渉縞の存在は、強度干渉の実験を行うことで比較的容易に検出できる。2次の干渉縞の周期の半分だけ離れた位置に、2つの光検出器を配置することを考えよう。干渉縞の位置が動いても、一方の検出器が干渉縞の山にあたる時は必ずもう一方の検出器が谷にあたるから、2つの検出器の信号の間には常に負の相関が存在することになる。したがって、この2つの検出器の信号の積の時間平均を測定すれば、過渡的な干渉縞の存在を示すことができる^{10,11)}。

あるいは、一方の検出器を固定しておいて、もう一方の検出器の位置を動かすか、もしくは感光材料等とゲートを組み合わせて、スクリーン全体の強度分布との相関を測定することもできる¹²⁾。固定した検出器に対して、干渉縞の周期の整数倍だけ離れば正の相関が、半整数倍だけ離れば負の相関が生じるから、積の信号もそれに合わせて増減を繰り返す、縞状のパターンが現れるはずである。これを「4次の干渉縞」と解釈してもよいし、固定した検出器上に2次の干渉縞の明るい部分がきた場合に限ってスクリーン上の強度を記録した結果である、と解釈することもできる。

これらの実験においては、コヒーレンス時間が検出するべき強度ゆらぎの相関時間(τ_f)であるから、それに対して積の時間分解能 T_R があまり長くないことが必要である。しかし、積の信号を蓄積する時間はコヒーレンス時間よりも十分長いことがむしろ望ましく、微弱な光源でも十分に測定が可能である。

3. 干渉計配置による強度干渉実験

2つの光源の光をスクリーン上で重ね合わせる代わりに、ビームスプリッターを使って重ね合わせることもでき

る。図 2a. のように、それぞれの光源の光をビームスプリッターの両側から入射し、同軸上に出力されるようにすると、ビーム断面内の過渡的な干渉縞は消えて、出力全体が明るくなったり暗くなったりする。そのとき、ビームスプリッターの 2 つの出力 C, D の間には、負の相関ができてはいるはずである。ビームスプリッターでの損失が無視できるとすれば、A, B から入射したエネルギーの和は 2 つの出力 C, D の和と等しい。干渉によって C の出力が明るくなれば、その分 D の出力が暗くなり、C が暗くなればその分 D が明るくなるのである。

Ou らはこの原理を利用して、蛍光のコヒーレンス時間 (τ_c) を測ることができることを示した¹³⁾。この実験では、2 つの独立な光源の代わりに 1 つの光源からの光をビームスプリッターで分けたものを用い、ランダムな位相 ϕ を付加する位相変調器を用いて位相の関係を断っている (図 2b.)。全体としてはマッハ・ツェンダー型の干渉計配置となっている。まず、位相変調器がオフになっている場合を考えてみよう。干渉計の 2 本の経路の伝搬時間の差 $\delta\tau$ を変化させると、 $\delta\tau < \tau_c$ の範囲で安定した 2 次の干渉による強度の変調が観測される。位相変調器をオンにすると、この強度の変調は一見消去されたようにみえるが、実は出力 C, D の強度間の負の相関として残っている。したがって、この 2 つの出力の間で同時計数率測定を行えば、 $\delta\tau < \tau_c$ の範囲で信号の減少 (同時計数率の「へこみ」) が観測されるのである。へこみの深さは、その元になる強度の変調が最大 (100%) のときにやはり最大値 50% をとる。この実験では、位相変調器の変調のタイムスケールが強度ゆらぎの相関時間 τ_f となるから、「同時」とみなす時間間隔 T_R をそれよりも短くとる必要があるが、測定の対象となる τ_c に対しては、 $\tau_c \ll T_R$ であっても構わない。

この配置を一部修正して、出力 C, D にそれぞれ異なる波長 λ_c と λ_D を透過させるフィルターを挿入すると、この 2 波長の間のビートを検出することができる。文献 14) はこれをアルゴンレーザーの 2 本のモードについて行ったものである。位相変調器によって付加される位相は、2 波長に対してほとんど変わらないとすると、両者の周波数差 $\Delta\omega = 2\pi(1/\lambda_c - 1/\lambda_D) \cdot c$ に対して、 $\Delta\omega \delta\tau = 0 \pmod{2\pi}$ であれば、2 次の干渉による強度の変調は、2 波長に対して同じ側の出力で同位相、反対側で逆位相になる。すなわち、 λ_c について C 側が明るいときは、 λ_D についても C 側が明るく、したがって D 側が暗くなるから、2 つの光検出器で測定される強度は負の相関をもつ。 $\Delta\omega \delta\tau = \pi \pmod{2\pi}$ であれば、変調は同じ側の出力で逆位相、反対側で同位相となり、光検出器での強度の相関は正となる。

これに対して同時計数率測定を行えば、 $\delta\tau$ の値によって正の相関が検出されたり、負の相関が検出されたりして、同時計数率は $2\pi/\Delta\omega$ の周期で増減を繰り返すのである。

上述の 2 タイプの実験を、パラメトリック蛍光のシグナル光とアイドラ光を入力 A, B として行ったのが、有名な文献 15) および 16) の実験である。パラメトリック蛍光による実験では、上述の 50% ではなく、100% 近い同時計数率のへこみが観測された。これは、上記のような古典的な強度変調では説明することができない。

通常の蛍光やレーザー光をビームスプリッターで分けて A, B のビームとした場合は、観測にかかる 2 光子が 2 個ともどちらか一方の経路を伝搬してくる確率は、1 個ずつそれぞれ異なる経路を伝搬してくる確率と同程度までしか小さくできない。干渉計の同じ経路を通ってきた光子対は伝搬時間差 $\delta\tau$ の情報をもたないから、強度干渉によるへこみには当然寄与しない。「古典的な」実験における同時計数率は、このへこみに寄与しない成分によって底上げされてしまっていて、そのためにへこみの深さは 50% を超えることができないのである。一方、パラメトリック蛍光では、常に A, B から 1 光子ずつが入力される状態で実験することができ、そのために 100% 近いへこみが得られるのである²⁾。

4. パルス光の強度干渉

Ou らの実験では、 $\delta\tau < \tau_c$ の範囲で生じる安定な 2 次の干渉を位相変調器で乱すことによって、人工的に過渡的な干渉を作り出した。しかし、干渉計の 2 本の経路の間に位相の相関がなくなる $\delta\tau > \tau_c$ の領域で、過渡的な 2 次の干渉はもともと自然に生じているはずである。

Ou らが用いたような連続光では、後者の干渉による強度相関を観測することは難しい。この相関は $\delta\tau$ によらないから相対測定ではなく絶対測定が必要となり、また $\tau_f = \tau_c$ であるため積の時間分解能 T_R に対する条件が厳しいからである。これらの問題はパルス光では比較的容易に解決される。2 本の経路を伝搬したパルスが重ならなくなれば ($\delta\tau > \tau_p$) 干渉は起きなくなるし、 τ_p が実質的な T_R となるからである。

この原理を応用して、不完全にモード同期した色素レーザーのパルス幅とコヒーレンス時間を測定することができた^{17,18)} (図 3)。基本的な配置は Ou らの実験と本質的に変わらない。強度相関の測定は光電子増倍管を用いた同時計数率測定によって行い、 T_R は、 τ_c や τ_p よりも十分長く、パルス間隔 $T_0 = 12 \text{ ns}$ よりもやや短くとして、同一パルス内の 2 光子のみが測定に掛かるようにした。位相変調器の

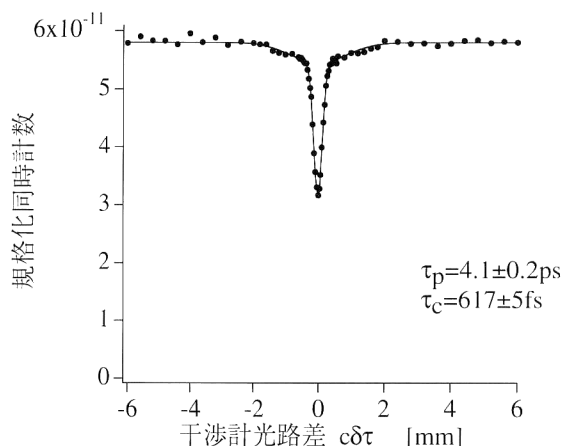


図3 色素レーザーの同時計数測定結果. レーザーの平均出力の変化の影響を除去するため, 2つの光検出器の計数の積で割って規格化している.

変調タイムスケールは $10^{-1} \sim 10^{-2}$ s 程度なので, $\delta\tau < \tau_c$ の領域の負の強度相関はほぼ完全に同時計数率に反映されるが, $\tau_c < \delta\tau < \tau_p$ の領域では時間分解能の問題により τ_c/τ_p 倍に減衰し, それぞれ幅と深さの異なる2成分のへこみとして現れる. この測定法は, パルス励起による蛍光にも適用できることがわかっており¹⁹⁻²¹⁾, 散乱体によって拡がったレーザーパルスについても, 理論とよい一致が得られている²²⁾.

レーザーパルスのパルス幅がコヒーレンス時間よりも長くなるケースとしては, 上の議論で想定したインコヒーレントなパルス幅拡がりの他に, 中心周波数がパルス内でシフトするが位相の連続性は保たれる, コヒーレントなパルス幅拡がりが存在する. 強度干渉による測定法は, 両方の現象が混在する場合にはインコヒーレントなパルス幅拡がりのみを反映する, という興味深い特徴をもつ^{17,18)}. 一方, τ_c に関しては, 周波数シフトの影響も含めた「正しい」値を示す. これは, 一般に普及している第二高調波発生 (SHG) による測定法²³⁾ と対照的である. 単純に SHG 法による測定が困難な場面 (適当な非線形媒質がなかったり, 強度が微弱だったり) での代替手段と考えるのではなく, 上記の特徴を生かして分散媒質を伝搬してきたインコヒーレントパルスの測定を行ったり, SHG 法との併用によって測定対象の光についてより詳しい情報を得たり^{8,24)}, といった応用が考えられる.

上述の色素レーザーによる実験は, フィルターを用いて全体の光強度を下げ, 各光電子増倍管での光子計数率を毎秒 10^5 カウント程度として行った. 量子効率を計算に入れても, パルスあたり $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 個程度の光子しか存在しないことになるが, 測定結果は古典論で十分説明可能である. ということは, より強い強度で光電流による測定を行

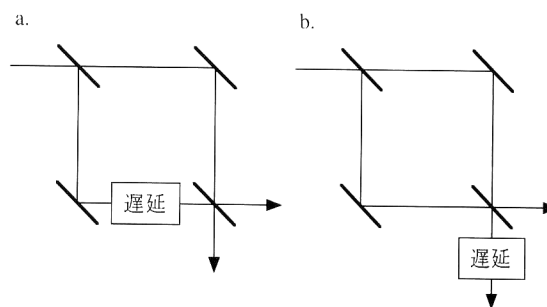


図4 2種類の遅延挿入位置.

っても, 同様の結果が得られるはずである.

山本はシリコンフォトダイオードの光電流を用いて, 実際に測定を行った²⁵⁾. ボックスカー積分器で 1 ms ごとに 10 ns 間光電流を積分し, これを各時点の光強度として記録したものを, 計算機で処理して積の時間平均を求めている. 測定対象としたモード同期チタンサファイアレーザーはインコヒーレントなパルス幅拡がりをほとんどたないため, 残念ながら2成分のへこみの観測には至っていないが, $\delta\tau = 0$ を中心にスペクトル幅の逆数程度のへこみが得られている.

5. 隣接パルス間の強度干渉

パルス光の実験においては, 隣接するパルス間の強度干渉も興味ある問題である. 干渉計配置の実験では, 検討すべき課題は2つある. 1つめは, 異なるパルス間でも2次の干渉による強度変調は生じるのか, という問題であり, 干渉計の一方の経路に T_0 の遅延を入れた実験に対応する (図4a.). 2つめは, ビームスプリッターで重ね合わせるのはあくまで同一パルスであるとして, それによって生じる強度変調には隣接パルス間で相関があるのか, という問題である. 実験的には, 干渉計の出力の一方が光検出器で電気信号に変換されて積の演算回路に入るまでの間のどこかに, T_0 の遅延を挿入するケースに対応する (図4b.).

モード同期レーザーのパルスの場合, どちらの課題についても答えは完全にイエスである. モード同期レーザーでは, 等間隔の縦モードが互いに同期して発振している. 時刻ゼロでは, 各モードの位相がほぼそろい, 大きな振幅が得られるが, 時間がたつと周波数差によって位相はばらばらになる. そして, モード間隔の逆数の時間がたてば, 再び位相がそろって次のパルスが得られるのである. この間, それぞれのモードの位相の連続性は維持されているから, 2つめのパルスは位相のゆらぎも含めて1つめのパルスの複製となる. したがって, どちらの位置に遅延を挿入しても, 同一パルス内と同様の強度干渉が観測されるので

ある。このことは、パルスの複製の質が劣化しない範囲（各モードの線幅の逆数程度の時間）で T_R を T_0 の2倍、3倍、…と長くしていくことによって、短時間で同じ測定が行えることを意味している¹⁸⁾。

蛍光の場合は、異なるパルスの間にはモード同期レーザーのパルスのような位相の相関はない。干渉計の一方の経路に遅延を入れた場合には、独立な2つのパルスが重ね合わせられることになるから、強度変調は $\tau_1 = \tau_c$ の1成分のみとなり、したがって同時計数率のへこみも幅 τ_p の浅い成分のみとなる。干渉計の出力の方に遅延を入れた場合はどうなるだろうか。 $\delta\tau < \tau_c$ の領域の強度変調は、 $\delta\tau$ の値と位相変調器の位相 ϕ により決定されるから、隣接する2パルスに対してほぼ同一の変調になる。一方、 $\tau_c < \delta\tau < \tau_p$ の領域の強度変調は、各パルスの位相ゆらぎに依存したもので、パルスごとに独立の変調となる。したがって、同時計数率測定を行うと、前者の変調に対応する幅 τ_c のへこみだけが現れる。このように、蛍光を用いた実験では、遅延を入れる位置を変えることによって、同時計数率の2成分のへこみのいずれか一方を選択的に測ることが可能である¹⁹⁻²¹⁾。

強度干渉実験は、2つの異なる位置もしくは時刻における光強度の積を測定することによって、単独の強度測定では得ることのできない、さまざまな情報を浮かび上がらせる。近年は特に、量子力学的な相関を扱った実験が注目されがちであるが、古典的な波動光学で説明可能なタイプの実験にも、多様な可能性が残されており、干渉計配置による超短パルス測定もそのひとつである。

本テーマに関して共同研究者となり、また議論に参加していただいた、東京大学物性研究所旧松岡研究室のメンバーに感謝いたします。

文 献

- 1) R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss: "Correlation between photons in two coherent beams of light," *Nature*, **177** (1956) 27-29.
- 2) 松岡正浩: "二光子相関における量子的干渉と古典的干渉", *光学*, **20** (1991) 2-7.
- 3) 北野正雄: "光子対と量子相関", *光学*, **28** (1999) 486-490.
- 4) L. Mandel: "Quantum effects in one-photon and two-photon interference," *Rev. Mod. Phys.*, **71** (1999) S274-S282.
- 5) G. Magyar and L. Mandel: "Interference fringes produced by superposition of two independent maser light beams," *Nature*, **198** (1963) 255-256.

- 6) L. Mandel and E. Wolf: "Coherence properties of optical fields," *Rev. Mod. Phys.*, **37** (1965) 231-287.
- 7) E. M. Purcell: "The question of correlation between photons in coherent light rays," *Nature*, **178** (1956) 1449-1450.
- 8) 宮本洋子, 松岡正浩: "不完全モード同期パルスの二光子相関", *レーザー研究*, **23** (1995) 1002-1007.
- 9) H. Paul: "Interference between independent photons," *Rev. Mod. Phys.*, **58** (1986) 209-231.
- 10) R. L. Pfleegor and L. Mandel: "Interference of independent photon beams," *Phys. Rev.*, **159** (1967) 1084-1088.
- 11) R. L. Pfleegor and L. Mandel: "Further experiments on interference of independent photon beams at low light levels," *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968) 946-950.
- 12) W. Radloff: "Zur Interferenz unabhängiger Lichtstrahlen geringer Intensität," *Ann. Phys. (Leipzig)*, **26** (1971) 178-189.
- 13) Z. Y. Ou, E. C. Gage, B. E. Magill and L. Mandel: "Fourth-order interference technique for determining the coherence time of a light beam," *J. Opt. Soc. Am. B*, **6** (1989) 100-103.
- 14) Z. Y. Ou, E. C. Gage, B. E. Magill and L. Mandel: "Observation of beating between blue and green light," *Opt. Commun.*, **69** (1988) 1-5.
- 15) C. K. Hong, Z. Y. Ou and L. Mandel: "Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference," *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987) 2044-2046.
- 16) Z. Y. Ou and L. Mandel: "Observation of spatial quantum beating with separated photodetectors," *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 54-57.
- 17) Y. Miyamoto, T. Kuga, M. Baba and M. Matsuoka: "Measurement of ultrafast optical pulses with two-photon interference," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 900-902.
- 18) Y. Miyamoto: "Measurement of laser pulse by intensity interference," *Doctoral thesis, Univ. Tokyo* (1994).
- 19) M. Baba, Y. Li, Y. Miyamoto and M. Matsuoka: "Autocorrelation measurement of ultrashort incoherent light pulses by intensity interference," *Prog. Cryst. Growth Charact.*, **33** (1996) 343-346.
- 20) M. Baba, Y. Li and M. Matsuoka: "Intensity interference of ultrashort pulsed fluorescence," *Phys. Rev. Lett.*, **76** (1996) 4697-4700.
- 21) Y. Li, M. Baba and M. Matsuoka: "Femtosecond measurement of fluorescence by two-photon interference," *Phys. Rev. A*, **55** (1997) 3177-3183.
- 22) Y. Li, M. Baba, Y. Miyamoto and M. Matsuoka: "Measurement of scattered light pulse by two photon interference," *Prog. Cryst. Growth Charact.*, **33** (1996) 347-350.
- 23) *Ultrashort Light Pulses*, 2nd ed., ed. S. L. Shapiro (Springer-Verlag, Berlin, 1984).
- 24) Y. Miyamoto, Y. Li, M. Baba and M. Matsuoka: "Two-photon interference of imperfectly mode-locked pulses," *Prog. Cryst. Growth Charact.*, **33** (1996) 379-382.
- 25) 山本 俊: "チタンサファイアレーザーによる強度干渉とパラメトリック変換の実験", 熊本大学修士論文 (1999).

(2000年7月29日受理)