



短パルス光を用いた単一光子状態における ヤングの干渉実験

高橋 宏典・青島紳一郎・浦上 恒幸・竹森 民樹
平野 伊助・土屋 裕

浜松ホトニクス(株)中央研究所 〒434 浜北市平口 5000

(1990年10月30日受付, 1990年11月26日受理)

Young's Interference Experiment in the Single-Photon Region Using Short Optical Pulses

Hironori TAKAHASHI, Shinichiro AOSHIMA, Tsuneyuki URAKAMI,
Tamiki TAKEMORI, Isuke HIRANO and Yutaka TSUCHIYA

Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K. K.,
5000, Hirakuchi, Hamakita 434

(Received October 30, 1990; Accepted November 26, 1990)

Young's interference experiment in the single-photon region using short optical pulses is reported. Picosecond optical pulses at the wavelength of 410 nm, which are second harmonics of pulses generated from a gain switched diode laser, have been used as a light source. The pulse duration and the repetition rate were less than 40 ps and 10 MHz, respectively. Under the single-photon region, where the incoming rate of photon in front of the double slits is 1.12×10^5 photons/s, i. e. a single photon exists in every 90 pulses, the interference pattern has been observed by means of a photon-counting image acquisition system.

1. はじめに

光は波と粒子という二つの性質を、同時にもつことが知られている。古くから、干渉は光の波としての性質を示し、光電効果は粒子としての性質を示すといわれてきた。また、光子の二重性を示す実験として、微弱光領域におけるヤングの干渉実験がよく引用される^{1,2)}。

量子力学によれば、光子の振舞いは確率振幅を用いて表現される。すなわち、上記実験において、ダブルスリットを通過する光子は波として扱われ、二つの経路の確率振幅の和として記述される。そして、検出されるときに初めて光子は粒子として扱われ、その存在確率は確率振幅の絶対値の2乗で与えられる。このとき、入射光が単一光子状態であっても、通常の光量であっても、その量子力学的な扱いはまったく同じであるから、同様の干渉縞が観測されることは容易に理解される。しかし、

ここで単一光子状態における光子が、ダブルスリットをどのように通過するかを実験的に確かめることは重要なことである。

1981年、筆者らの一人である土屋らは、単一光子状態にある極微弱光でヤングの干渉実験を行い、光子計数型画像計測装置^{3,4)}(浜松ホトニクス, PIAS)を用いて、2次元面に到達する光子を一つ一つ検出して画像化し、その積算結果として干渉縞が観測されることを確認した⁵⁾。この実験では、光源に低圧水銀ランプを用いて、検出器で検出される光電子数が100個/sになるまで減光しても、干渉縞が観察され、片方のスリットを閉じると光子数が半分になり干渉縞もなくなることが示された。

実験に用いられた光量では、光子の平均の時間間隔が光源のコヒーレンス長(可干渉距離)より十分長く、連続して入射する光子と光子が干渉する確率はきわめて小

さい。また、実験系の中に1個以上の光子が存在するとき、その光子数が2個以上である確率はきわめて小さく、1%以下になる。

他方、光源を短パルス光源にした場合、光子の存在は光パルスの中に限定されるので、パルス間隔を十分長くして、パルス光に含まれる光子数が最大でも1個となるように減光すれば、連続して入射する光子が同時にダブルスリットの近傍に存在することはなく、光子間の相互作用を無視することができる。われわれは、はじめて、このような単一光子状態でヤングの干渉実験を行い、1個の輝点として検出される一つ一つの光子が確かに自身と干渉していることを確認したので報告する。

2. 実 験

実験系の構成を Fig. 1 に示す。ヤングの干渉計および光検出器は暗室の中に置かれた暗箱の中に入れて実験した。シングルスリットのスリット幅は $100\ \mu\text{m}$ 、ダブルスリットのスリット幅と間隔は、それぞれ、 $75\ \mu\text{m}$ と $250\ \mu\text{m}$ である。また、二つのスリットの間の距離は $24.5\ \text{cm}$ である。

2次元の光検出装置は、PIAS を用いた。この装置の動作の概要を Fig. 2 に示す。光電面に入射する光は光電面で電子に変換される。光電変換された電子はマイクロチャンネルプレート (MCP) で約 10^7 倍に増倍され、この出力電子が半導体位置検出装置 (PSD) でさら

に約 10^2 倍に増倍される。PSD の出力信号は位置演算装置に入力され、個々の光子の光電面上の入射位置が計算されて、フレームメモリに輝点画像として記録される。一つの光子は一つの輝点に対応するので、これを積算することによって画像を得ることができる。このような PIAS では、光子が1個1個の粒子として検出されるような極微弱光域でのイメージングができる。

光源は、半導体レーザを用いた短パルス光源 (浜松ホトニクス, PLP-01) を用いた。これは、ゲインスイッチング法で近赤外線レーザダイオード (LD) から短パルス光を発生させ、チェレンコフ放射型の第2高調波発生 (SHG) 素子によって、 $410\ \text{nm}$ のパルス光を得るものである^{6,7)}。この波長における PIAS の光電面の量子効率率は 15% と高く、効率良く光子を検出することができる。PLP-01 では、最大繰返し周波数 $10\ \text{MHz}$ 、パルス幅 $40\ \text{ps}$ 以下、ピーク出力 $0.5\ \text{mW}$ 以上の短パルス光が得られる。

光源からのパルス光はニュートラルデンシティフィルターで減光した。シングルスリットの後の光量を測定するため、光路切換え用のミラーを設けて、入射光を光電子増倍管 (PMT) で検出し、光電子数を計測した。この場合、光子数の算出には PMT の光電面の量子効率 16% を考慮した。

3. 実 験 条 件

光源のパルス光の繰返し周期 $100\ \text{ns}$ とパルス幅 $40\ \text{ps}$ を距離に換算すると、それぞれ $30\ \text{m}$ と $12\ \text{mm}$ になる。したがって、この光源からは $12\ \text{mm}$ の長さの光パルスが $30\ \text{m}$ の間隔で出力されていることになる。今回の実験系では、光源から検出器までの距離は $167\ \text{cm}$ であるので、実験系には最大でも1個の光パルスしか存在していない。

シングルスリットを通過した直後の光量は光子数に換算して 1.12×10^5 個/s とした。これは、パルスの繰返し周期 $100\ \text{ns}$ を考慮すると、約 90 パルスに1個の光子が存在するような光量であり、後述するように、パルスの中に光子が存在する場合には、99% 以上の確率で1個の光子が含まれるという単一光子状態になっている。このとき、ダブルスリットを通過し、PIAS の光電面で光電変換されて、最終的に検出される光電子数は、約 350 個/s であった。

4. 実 験 結 果

上記の実験条件で1時間積算したときの画像を Fig.

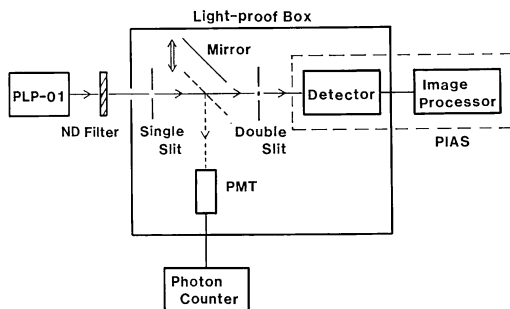


Fig. 1 Experimental setup for measuring the interference pattern in the single photon region.

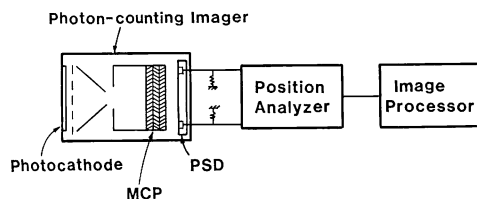


Fig. 2 Schematic diagram of PIAS.

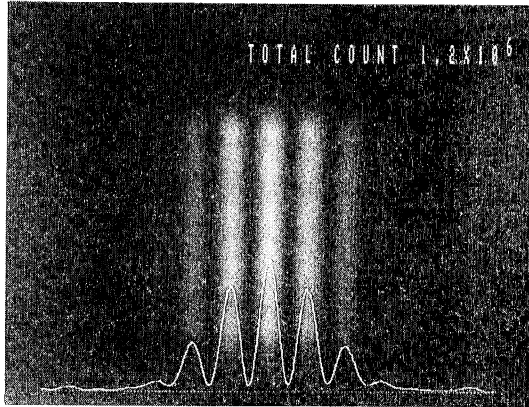


Fig. 3 Young's interference pattern and its intensity profile in the single photon region. Each incident photon generates a bright spot. The observed intensity profile shows the accumulation of bright spots.

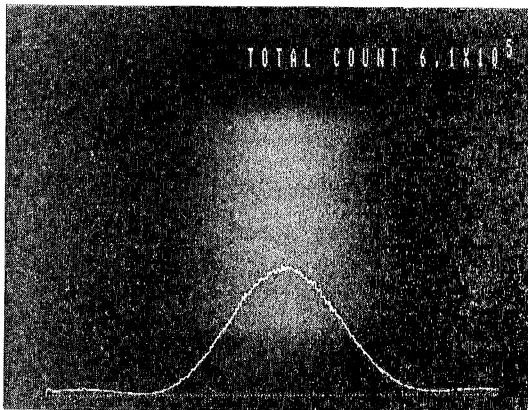


Fig. 4 Intensity distribution observed when one of the double slits is closed. No interference pattern appears.

3に示す。この図では、輝度分布を示すグラフが正規化して、重畳表示してある。トータルカウント数（全画面に対するカウント数）は約 1.2×10^6 である。このとき、測定系のダークカウント数は 6×10^3 以下であり、十分無視できる。干渉縞の可視度は 0.92 であり、この値は測定系のダークではなく、光源のスペクトル幅、およびダブルスリットの加工精度などで制限されている。観測された干渉縞の間隔は約 1.0 mm であり、これはダブルスリットの間隔およびダブルスリットと PIAS の受光面との距離を用いて計算で求めた値と一致する。

次に、ダブルスリットの片方を閉じて、同様の測定を行った。左のスリットを閉じて右のスリットだけにした場合の結果を **Fig. 4** に示す。逆の場合についても実験

したが、いずれの場合にも干渉縞は見られず、検出された光子数が前述のダブルスリットによる実験のときの値の半分になった。

以上の実験から、一つの光子がダブルスリットの両方を通して、1個の輝点を作り、これが干渉縞を形成するという光子の二重性が示される。

5. 考 察

今回の実験における単一光子条件を評価する。実験条件で示したように、今回の実験では繰返し 10 MHz の光パルスが、ダブルスリットに入射するとき、平均で約 90 パルスに 1 個の光子が存在する。すなわち、一つのパルスに 1 個以上の光子が存在する確率は約 1.1×10^{-2} である。このとき、光パルス中の光子数がポアソン分布に従うものと仮定すると、一つのパルスに 2 個以上の光子が存在する確率は 6.9×10^{-5} である。したがって、今回の実験において、光子が 1 個以上ある確率に対して、光子が 2 個以上ある確率は 0.6% 以下である。

ところで、光子数の計測値がポアソン分布になるのは、光源のコヒーレンス時間が観測時間より十分小さい場合である。今回の実験の場合、観測時間はパルス光のパルス幅 40 ps と考えてよい。また、光源のスペクトル幅 3 nm から求めたコヒーレンス時間は 0.18 ps となる。したがって、これらの値が上記条件を十分満足しているため、ポアソン分布を仮定することは妥当である。

6. ま と め

複数の光子が系の中に同時に存在して互いに影響し合えないように、パルス光を減光して、系の中に同時に存在するパルス数が最大 1 個であり、かつ、一つのパルス当りの最大光子数が 1 個となる単一光子状態を作った。次に、この単一光子状態でヤングの干渉実験を行い、干渉縞を得ることができた。また、シングルスリットにすると干渉縞が得られないこともわかった。この結果、一つ一つの光子がダブルスリットを同時に通過して、自分自身と干渉していることが確かめられた。この実験結果は、冒頭に述べた土屋らの実験結果と相まって、光子自身の干渉性および、光子の二重性をより明確に示すものである。

終りに実験に協力して下さった藤田勝吉、および本研究の機会を与えて下さった取締役中央研究所長・鈴木義二博士、代表取締役社長・晝馬輝夫の諸氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) R.P. Feynman, R.B. Leighton and M.L. Sands: *The Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley, Reading, 1965).
- 2) P.L. Knight and L. Allen: *Concepts of Quantum Optics* (Pergamon Press, Oxford, 1983).
- 3) Y. Tsuchiya, E. Inuzuka, T. Kurono and M. Hosoda: "Photon-counting imaging and its application," *Advances in Electronics and Electron Physics*, Vol. 64 A (Academic Press, London, 1985) pp. 21-31.
- 4) Y. Tsuchiya, E. Inuzuka, T. Kurono and M. Hosoda: "Photon-counting image acquisition system and its applications," *J. Imag. Technol.*, **11** (1985) 215-220.
- 5) 土屋 裕, 犬塚英治, 杉山 優, 黒野剛弘, 堀口千代春: "フォトンカウンティング領域における「ヤングの干渉実験」", *テレビジョン学会誌*, **36** (1982) 1010-1012.
- 6) 谷内哲夫, 山本和久: "半導体レーザーの第二高調波発生", *応用物理*, **56** (1987) 1637-1641.
- 7) J. Ohya, G. Tohmon, K. Yamamoto and T. Taniuchi: "Picosecond blue light pulse generation by frequency doubling of a gain-switched GaAlAs laser diode with saturable absorbers," *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990) 2270-2272.