

パラメトリック蛍光励起用 100 mW 光源の作製

発表者：1513044 落合 洋介 指導教員：宮本 洋子

1 はじめに

本研究は、軌道角運動量もつれ合い状態光子対であるパラメトリック蛍光発生のための励起用 100 mW 光源の作製を目的とする。軌道角運動量もつれ合い状態は、近年、量子通信や量子コンピュータなどの量子情報分野においても注目されているが、その生成や検出、操作などが応用のための課題として挙げられる。パラメトリック蛍光は非線形結晶を用いたパラメトリック下方変換によって発生する。本研究ではパラメトリック下方変換の励起光として、約 100 mW のパワーと円形のビーム断面を持つレーザー光源を作製する。

2 軌道角運動量もつれ合い状態

2 光子のもつれ合い状態とは、光子対の状態がそれぞれの光子の状態の直積で表せない状態のことをいう。2 つの光子 I、S(それぞれアイドラ光とシグナル光) を考える。光子 I(S) の水平方向及び鉛直方向の直線偏光状態をそれぞれ $|H\rangle_{I(S)}$ 、 $|V\rangle_{I(S)}$ とすると、次の式で表されたもつれ合い状態を考えることが出来る。

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|H\rangle_I|H\rangle_S + \frac{1}{\sqrt{2}}|V\rangle_I|V\rangle_S \quad (1)$$

本研究では軌道角運動量もつれ合い状態を取り扱うため、LG ビームのモード指数 m, p に対応した状態 $|m, p\rangle$ を考える。ガウスビームを励起光として非線形結晶からシグナル光とアイドラ光を発生させる。この 2 つの光は軌道角運動量に相関があり、 $|0, p\rangle_S |0, p'\rangle_I, |1, p\rangle_S |1, p'\rangle_I, \dots, |m, p\rangle_S |m, p'\rangle_I$ のコヒーレントな重ね合わせとなる。ここで、 $|m, p\rangle_S |m, p'\rangle_I$ の確率振幅を $C_{p, p'}^m$ とすることで、軌道角運動量もつれ合い状態 $|\Psi\rangle$ は、

$$|\Psi\rangle = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{p, p'=0}^{\infty} C_{p, p'}^m |m, p\rangle_S |m, p'\rangle_I \quad (2)$$

となる。

3 パラメトリック蛍光

パラメトリック蛍光の発生過程であるパラメトリック下方変換について述べる。線形近似では電気分極は入力電場 E に比例するとして、電気感受率 χ を用いて、

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (3)$$

と表される。しかし、強い電場が物質に入射することにより入射電場に比例しない非線形な分極が起きることがある。これを非線形光学効果と呼び、その分極と電場の関係は、

$$P = P^L + P^{NL} \quad (4)$$

$$P^L = \epsilon_0 \chi^{(1)} E \quad (5)$$

$$P^{NL} = \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \dots \quad (6)$$

のようになる。 P^L 、 P^{NL} はそれぞれ線形分極、非線形分極であり、 $\chi^{(1)}$ は線形分極、 $\chi^{(2)}$ 、 $\chi^{(3)}$ はそれぞれ 2 次、3 次の非線形感受率である。大きな非線形感受率をもつを持つ結晶を非線形結晶と呼ぶ。

ここで、入射光と異なる周波数が発生する例を挙げる。入射光を

$$E(r, t) = E \exp\{-i(\omega t - kr)\} + c.c. \quad (7)$$

とすると、非線形分極 P^{NL} は、

$$P^{NL} = \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 \exp\{-i(2\omega t - 2kr)\} + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + c.c. \quad (8)$$

となり、この分極に 2ω と 0 の周波数成分が生じる。分極によって入射光の周波数の 2 倍の周波数の光が発生することを第 2 次高調波発生 (second-harmonic generation, SHG)、 0 の周波数を持った電場の発生を光整流という。パラメトリック下方変換とはこの SHG の逆過程のことであり、一般に周波数 2ω の入射光光子から周波数 ω の 2 つの蛍光光子が発生する。

入射電場を式 (7) と仮定した場合、第 2 次高調波の強度は

$$|E|^2 \propto \frac{\mu_0}{\epsilon} (2\omega)^2 \{E^{(\omega)}\}^4 l^2 \text{sinc}^2 \left(\frac{\Delta k l}{2} \right) \quad (9)$$

で表される。ここで l は非線形結晶の厚さ、 $\Delta k = k_{\text{out}} - 2k_{\text{in}}$ である。 k_{in} は入射光の波数、 k_{out} は出射光の波数である。なお、光の進行方向は入射光と出射光で一致していると仮定した。 $\Delta k = 0$ に近づくにつれ、第 2 次高調波の強度が大きくなる。この条件を位相整合条件という。逆過程であるパラメトリック下方変換についても位相整合条件 $2k_{\text{out}} = k_{\text{in}}$ を満たすときに強い強度で発生する。

4 光源の作製

本研究で行ったパラメトリック蛍光励起用光源の作製について述べる。波長 405nm の半導体レーザーを使用した。

4.1 アイソレータの調整

戻り光によるレーザーの損傷、不安定化、干渉によるノイズなどの防止を目的として偏光依存型アイソレータ (THORLABS, IO-5-405-LP) を使用した。アイソレータは、入射側偏光子、マグネット付きファラデー回転子、出射側偏光子から構成される。入射側偏光子は、直線偏光だけをファラデー回転子に透過するフィルタとして機能し、ファラデー回転子によって入射光の偏光面は 45 度回転され、その後、出射側偏光子から出射される。ここで入射光に対して出射光は 45 度回転していることになる。一方、逆方向では、ファラデー回転子は順方向時と同じ方向に光の偏光面を回転させ続けるので、光の偏光面は入射光に対して 90 度回転していることになる。よって、光の偏光面は入射側偏光子の透過軸に対して垂直となり、偏光子によって遮断される。

順方向でより高いパワーを持って光が通過し、逆方向で光が遮断されるようにアイソレータを調整した。その後アイソレータ通過によるパワーのロスと戻り光の透過率について測定を行った。

表 1: レーザー光のパワーとアイソレータ通過後のパワー

レーザー光のパワー	アイソレータ通過後のパワー	逆方向に光を通したときの通過パワー
$124 \pm 2 \text{ mW}$	$108 \pm 2 \text{ mW}$	$17.5 \pm 0.2 \text{ } \mu\text{W}$

以上より、アイソレータ通過によるパワーのロスは $9.8\% \sim 16\%$ となった。また、戻り光の透過率は約 0.02% 未満であった。

4.2 半導体レーザーの特性測定

本研究に使用する半導体レーザーの電流-パワー特性を測定した。測定結果を図 1 に示す。

電流-パワー特性

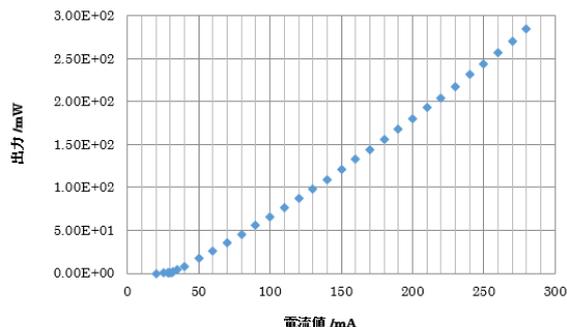


図 1: 半導体レーザーの電流-パワー特性

以降の実験で使用する電流値 280 mA でのパワーは $301 \pm 2 \text{ mW}$ であった。また、この半導体レーザーの閾値電流は 30.5 mA であることが分かった。

4.3 ビームの成形

光源を伝搬方向に垂直な断面内の光強度分布が特徴的なガウス関数をとるガウスビームとするために、空間フィルタを用いてビームの成形を行った。対物レンズによってビームを集光し、空間フィルタに通したのち、平凸レンズを用いてコリメートした。対物レンズと空間フィルタの距離を変え、空間フィルタ通過後のビームのパワーと縦横比の関係を調べることで、円形ビームとなる時の条件を決定した。

実験系を以下に示す。

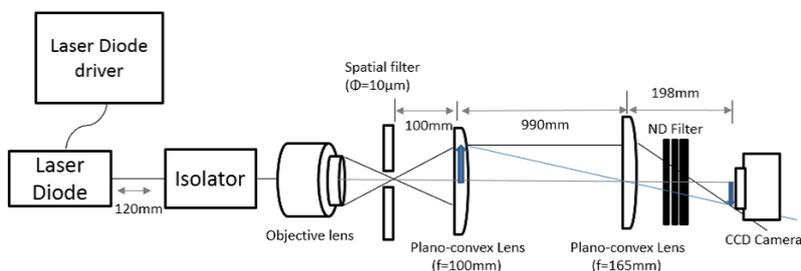


図 2: ビーム成形実験の系

撮影した強度分布を二次元ガウス関数

$$I(x, y) = z_0 + A \exp\left[\frac{-1}{2(1 - c^2)} \left\{ \left(\frac{x - x_0}{w_x}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{w_y}\right)^2 - \frac{2c(x - x_0)(y - y_0)}{w_x \cdot w_y} \right\}\right] \quad (10)$$

にてフィッティングし、ビームの縦横比を求めることで、ビームが円形となる時の条件を決定する。ここで、 z_0 、 A はそれぞれ強度分布の背景強度と最大強度、 w_x 、 w_y はそれぞれ x 、 y 方向のガウス関数の幅、 x_0 、 y_0 はビームの中心座標、 c は x 方向と y 方向の分布の相関を表す。各パワーごとの w_x と w_y の比を求めて、ビームが円形となる時のパワーとその時の対物レンズと空間フィルタの距離を決定する。

まず、フィッティングするにあたって各初期値を決定する必要がある。そのため、撮影した各パワーごとの強度分布についてビームの中心における x 軸方向、 y 軸方向のビーム断面図を作製し、そこから手作業によって x 軸方向のビーム幅と y 軸方向のビーム幅 (それぞれ $xwidth$ 、 $ywidth$) のおおよその値を求め、縦横比を計算した。

結果を以下の図 3、4 に示す。

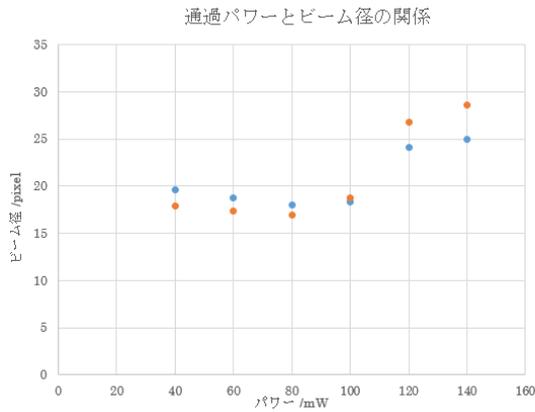


図 3: 通過パワーとビーム径の関係

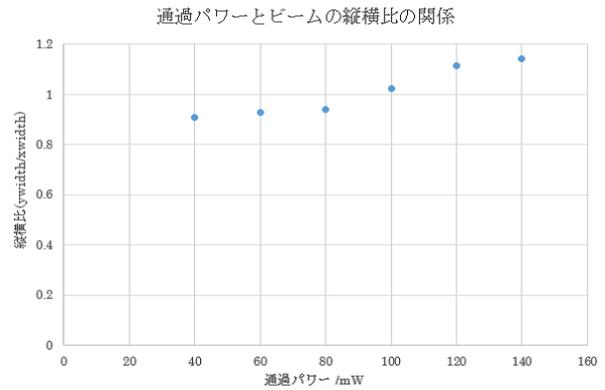


図 4: 通過パワーと縦横比の関係

図 3 より、パワーが下がる (対物レンズと空間フィルタの距離が小さくなる) につれて、100 mW 付近を境にビームの光軸に垂直な断面内での形は y 方向に長い楕円形から x 方向に長い楕円形になっている。図 4 より、100 mW となるときに縦横比がほぼ 1 となり、ビームは円形になるとおおよそ見積もることができた。

5 まとめ

本論文の目的は、パラメトリック蛍光励起光として、約 100 mW のパワーと円形のビーム断面を持つレーザー光源を作製することである。波長 405 nm の半導体レーザーの出力を成形して光源とする。まず、アイソレータの調整を行った。調整後のアイソレータ通過によるパワーのロス率は 9.8%~16% となった。その後、半導体レーザーの電流-パワー特性測定より、この半導体レーザーの閾値電流は 30.5 mA であることが分かった。次に空間フィルタによってビーム断面が円形になるようビームの成形を行った。対物レンズによってビームを集光し、空間フィルタに通したのち、平凸レンズを用いてコリメートした。対物レンズと空間フィルタの距離を変えつつ、空間フィルタ通過後のビームのパワーとコリメートレンズ直後の断面の縦横比の関係を調べることで、円形ビームとなるとき条件を決定する。本研究では、各パワーごとに撮影した強度分布から中心座標位置での x 方向、 y 方向のビーム断面図を作製し、手作業でおおよその縦横比を求めた。その結果、通過パワーが約 100 mW の時ビームの縦横比がほぼ 1 となり、円形となった。

参考文献

- [1] 宮本洋子, 「光渦と角運動量」, 数理科学, **597**, 45-55, (2013)
- [2] 宮本洋子, 「ラゲールガウシアンビームと光の軌道角運動量」, レーザー研究, **32**(4) 232-236, (2004)
- [3] 川瀬大輔, 「光子の軌道角運動量もつれ合いの生成と制御に関する研究」, 北海道大学博士論文, (2009)
- [4] 宍戸宏樹, 「もつれ合い状態光子対発生のための光源作製」, 電気通信大学修士論文, (2017)
- [5] 舘野博直, 「パラメトリック蛍光励起用半導体レーザーの作製及び性能評価」, 電気通信大学修士論文, (2016)
- [6] Y.R.Shen, "The Principles of Nonlinear Optics", Wiley-Interscience Publication, (1991)
- [7] A.Yariv 著, 多田邦夫, 神谷武史 共役 「光エレクトロニクスの基礎」, 丸善株式会社, (1988)
- [8] THORLABS, "可視域フリースペース型アイソレータ、390~700nm アイソレータチュートリアル"
(https://www.thorlabs.co.jp/newgroupage9.cfmobjectgroup_ID=2996), 2019 年 1 月 26 日アクセス
- [9] THORLABS, "IO-5-405-LP Free-Space Isolator User Guide", (2018)
- [10] Joseph W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics" McGraw Hill Book Co Ltd, (2000)
- [11] 吉村武晃, 「光情報工学の基礎」, コロナ社, (2000)