

## 波長変換デバイス

物質・材料研究機構 栗村 直

## 1. はじめに：量子相互作用に向けた非線形光学効果

非線形光学を用いた波長変換デバイスは、光と光の相互作用を可能にし、量子情報を引き継ぐことができる。透明材料における非線形光学効果を用いる波長変換デバイスは、実励起を伴わず仮想励起により非線形性が発生するため、その応答は高速性を持つ。これは励起準位の寿命が極めて短いことに相当し、入射した光子の位相情報が失われず出射光子に受け継がれる。

レーザー材料など実励起を伴う材料との比較においてその特徴はより明らかになる。通常固体レーザー材料や半導体レーザー材料では、励起状態の上順位寿命がナノ秒より長いのに対し、上記仮想励起による非線形光学材料では、応答時間はピコ秒よりも短い。レーザー材料では、上順位寿命が長いことは大きなパルスエネルギーを蓄積できる利点とみられる一方、量子光学応用を念頭におく非線形光学材料では位相情報が失われる欠点とみなされる。他方、上記非線形光学効果は、位相情報を保存できるがエネルギーの蓄積には適していないとされる。

世界初のレーザー発振が報告されたのは1960年である。その翌年の1961年、P. A. Frankenらによって非線形光学効果が初めて報告された<sup>1)</sup>。光波混合<sup>2)</sup>という概念によって光波間の相互作用が可能になる、光で光を制御する時代の幕開けであった。同年にすでにパラメトリック過程におけるノイズと揺らぎの理論解析がW. H. Louisell, A. Yarivらによって報告されている。パラメトリック過程は、ゼロ点振動によるノイズから解放される優れた増幅器であり、位相官能増幅器 (Phase-Sensitive Amplifier; PSA) であると指摘されている<sup>3)</sup>。これに続いてパラメトリック過程では複数の異なる光子が完全に同時刻に、相関を持って発生することが実験的に示された<sup>4)</sup>。相関光子対は量子情報における基本的な構成要素であり、この同時刻性は、量子通信、量子中継、量子テレポーテーション、光量子計算、など数々の応用で重要である。

これらに共通するのは、基本的な光源・増幅器としての非線形光学デバイスである。このデバイスは分極反転技術が登場<sup>5)</sup>してからめざましい発展をみせており、少ない光子数での動作が要求される用途においても優れた特性が報告されている。すなわち入射光子の量子状態を保存しながら出射光子に移行させることができ、光通信における量子中継などへの利用が提案されている。またパラメトリック相互作用を用いて、光子を多光子に分割することができるため、光子間相互の量子相関状態を実現することができる。

## 2. 代表的非線形光学効果

代表的な非線形光学効果としては、第二高調波発生 (Second Harmonic Generation; SHG) に代表さ

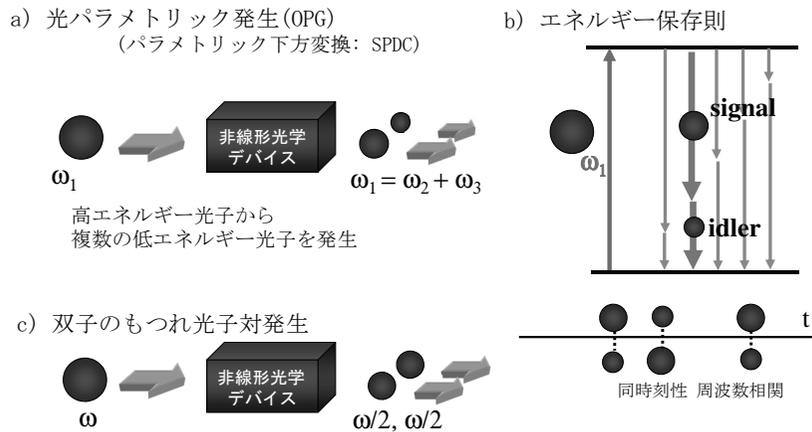


図 1 光パラメトリック過程によるもつれ光子対発生

れる高調波発生や、複数の入力光の和周波数 / 差周波数の光を発生させる和周波発生 (Sum Frequency Generation; SFG)、差周波発生 (Difference Frequency Generation; DFG) がある。また入力したレーザー光から複数の光子を発生させる光パラメトリック発生 (Optical Parametric Generation; OPG) も知られている。

パラメトリック過程は、レーザーの発明直後から、理想的な量子光発生、量子光処理の手法として、注目されてきた。1970年代には、すでに理想的な量子光源 / 増幅器として、理論的 / 実験的検討が進められている。光パラメトリック発生は、高エネルギーの光子から複数の低エネルギー光子を発生する非線形光学過程である (図 1(a))。1970年代から出射光子の特性として、①同時刻性、共存性、②量子状態の相関性などが言及されており、理想的な量子光源として提案されている。発生光子のエネルギーが等しい場合には、双子の光子対と呼ばれることもある。

エネルギー保存則を考える場合に、高いエネルギーの光子から低いエネルギーの光子を取り出す組合せは、無数にある (図 1(b))。これらの組合せの中から、運動量保存則を満たした組合せが選ばれる。すなわち、運動量保存側は (媒質の屈折率を含んだ) 波数ベクトルで決まるため、位相整合に対応する。結果として、エネルギー保存則と位相整合を満たした組合せが選ばれる。

非線形光学で OPG と呼ばれる現象は、量子光学の世界では自発パラメトリック下方変換 (Spontaneous Parametric Down Conversion; SPDC) と呼ばれる。発生する光子のエネルギーが等しい場合には、縮退 SPDC と呼ばれ、後述するような区別のつかない双子の光子対が得られる (図 1(c))。

### 3. 分極反転による擬似位相整合 (QPM)

位相整合に関しては、近年主流となっている擬似位相整合 (Quasi Phase Matching : 図 2<sup>6)7)</sup> という手法が高い効率を与えるため、量子光学応用で多く用いられている。その作製技術は分極反転デバイスというコンセプトのもとに多くの研究者の手で進歩を遂げてきた<sup>8)</sup>。材料の極性を反転する電界印加分極反転技術は、1992年に<sup>9)10)</sup>日本から登場している。分極反転デバイスは波長変換の擬似位相整合や光変調の擬似速度整合を包含する概念であるが、電氣的極性を反転させることで出射波の位相を制御することが基本となっており、効率の飛躍的向上や出射光波面の設計・制御が実現されている。特筆すべき性質として、高効率、高速、高設計性がある。この節では分極反転デバイスの中の波長変換デバイスに焦点をあてる。

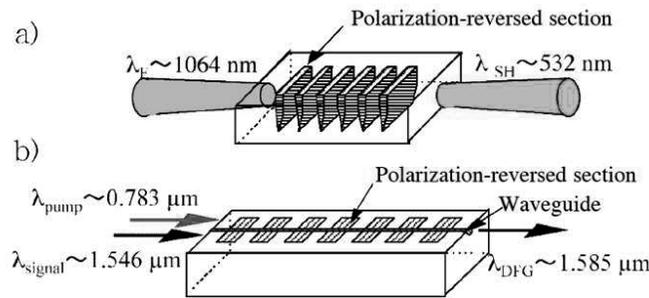


図2 分極反転による擬位相整合波長変換デバイス

a) バルク型 b) 導波路型

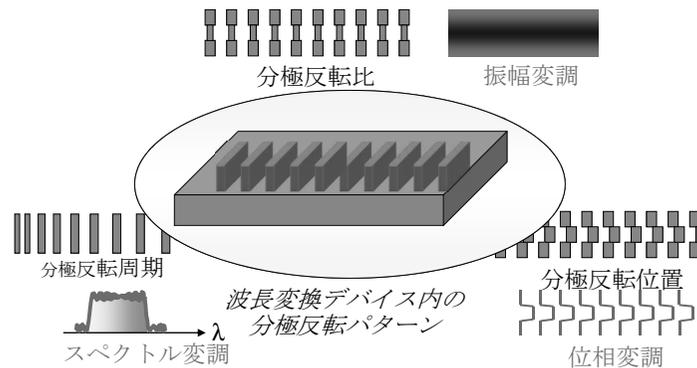


図3 分極反転パターンの変調による機能設計例

レーザー光の波長変換デバイスは、使用するレーザーや目的とする出射波長に合わせて設計できる柔軟なQPMが登場し、近年大きく応用範囲を拡げつつある。特性指数も向上し連続発振レーザーを用いても高い効率が得られるようになった。入射光と出射光の屈折率分散を補償するために周期的な非線形光学定数の反転構造を導入するQPM(図2)では、結晶の透過領域内で位相整合点を自由に設定できるため、高非線形性、高熱伝導性、高耐損傷性、低分散性など要求される特性に適した材料を選択可能である。また結晶内の一部を局所的に位相整合させることができるため導波路などの光回路技術とも親和性が高い(図2(b))。

量子光学では入射光強度が低いために、効率を確保することが困難である。出射光強度(光子数)は、入射光強度に非線形に比例するため、単一光子や微弱光での動作において、効率を確保することが難しくなる<sup>11)</sup>。このために、量子光学用非線形デバイスでは、後述するようなさまざまな工夫が用いられる。

最近ではその特性に対する理解も進み、分極反転パターンを設計することで、出射光の位相やスペクトラムの加工も提案されるようになってきている(図3)。反転周期にチャープをかけて発生するスペクトルを拡大する、分極反転位置をシフトさせて位相を変調する<sup>12)</sup>、などさまざまなデバイスが試みられている。

## 4. 主な波長変換材料

非線形光学定数、電気光学定数の大きな実用材料としてLiNbO<sub>3</sub>(LN)、LiTaO<sub>3</sub>(LT)、KTiOPO<sub>4</sub>

(KTP) など強誘電体を用いたデバイスの報告が多くなされている\*1。微細加工に耐えうる強度を持つ材料や高出力に耐えうる高熱伝導材料が、分極反転のおかげで非線形デバイスとして利用できるようになった。位相整合の義務を分極反転に預けてしまうことで、目的に適した材料の選択が可能になっている。複屈折が小さく従来の複屈折整合では十分波長分散を補償できなかったLTは好例であり、高い非線形光学定数が利用できるようになっただけでなく、高い熱伝導率を生かして高出力波長変換が行われている。

分極反転非線形光学デバイスではパターンニングで位相整合波長を設定できるため、空間を選んで波長変換特性を持たせることが可能である。Mg:CLNはリソグラフィなど洗浄を含むプロセスに対して安定で、導波路の集積基板として適している。ドライエッチングなどの加工性もよくチャンネル導波路で伝搬損失を0.2～0.4 dB/cmまで低下できる。Mg:CLNは非線形光学定数が無機材料で最大であり、プロセス耐性を有していることから、導波路との組合せで究極の高効率デバイスが実現できる。導波路化することでバルクデバイスに対して数百倍効率が向上し数百%/Wの規格化変換効率が容易に得られる。量子光学の領域では低出力レーザーが用いられることが多く、大きな非線形性を持つ材料に導波路構造をとることが理想的といわれる。

分極反転波長変換材料の研究方向としては90年代から低抗電界（分極反転に必要とされる電界が低い）材料の探索がなされてきた。1995年にはMg:CLN（4.5 kV/mm）がCLN（21 kV/mm）に比べ5倍程度抗電界が低いことがわかり<sup>13)</sup>、これを契機としてSLTで1.7 kV/mmが報告された<sup>14)</sup>。KTPは1994年に低抗電界2 kV/mmが報告されている<sup>15)</sup>。この過程で欠陥密度の低いSLTの熱伝導率が高いことが判明し、近年の高出力第二高調波発生（SHG）にはMg添加SLT（Mg:SLT）が用いられるようになった。Mg:CLNで到達できなかったCW19 W出力がシングルパスで得られており、熱特性のよい材料を利用することが重要であると認識されている。ここでは新たな排熱モジュールとの組合せで飽和傾向をみせない入出力特性が得られ、さらなる高出力が期待されている<sup>16)</sup>。この排熱モジュールは、短波長励起の場合のもつれ光子発生の安定性向上にも寄与している。

## 5. 主な波長変換方式

波長変換では、高い変換効率と高い安定性の両立をめざして、さまざまな方式が試みられている。ここでは代表的な3例について取り上げて解説したい（図4）。

### 5.1 シングルパス波長変換

レンズで励起光を波長変換デバイス内に集光する、最もシンプルでかつ安定性の高い波長変換方式である。アラインメントが容易でロバストな光学系が構築できる。他方、相互作用長が短いため高い効率を得るための工夫が要求される。高い非線形光学定数を利用すること、長尺デバイスを用いること、ピークパワーの高いパルスレーザーを用いることが、高い効率を得るための鍵である。高い非線形光学定数を利用できるQPMの世代になって広く用いられるようになり、アラインメントの許容度拡大による光源の安定性向上にも寄与している（図4(a)）。

波長変換デバイス自体に高い効率を求めめるため、長尺で均一性の高いデバイスが望ましい。図5はMg:SLNに長さ70 mmにわたる分極反転構造を施したものであり、分極反転比において高い均一性が

\*1 ただしここでは、LN/LT系材料を一致溶融組成LN/LT（CLN/CLT; congruent LN/LT）および定比組成LN/LT（SLN/SLT; stoichiometric LN/LT）として区別する（通常市販されている結晶はほとんどがCLN/CLTである）。なお周期分極反転した（Periodically Poled）LNはPPLN（ピービーエルエヌまたはビブリン）と呼ばれる場合がある。

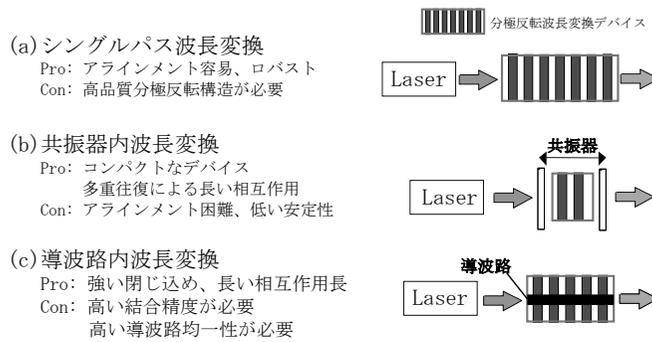


図 4 典型的なパラメトリック波長変換方式

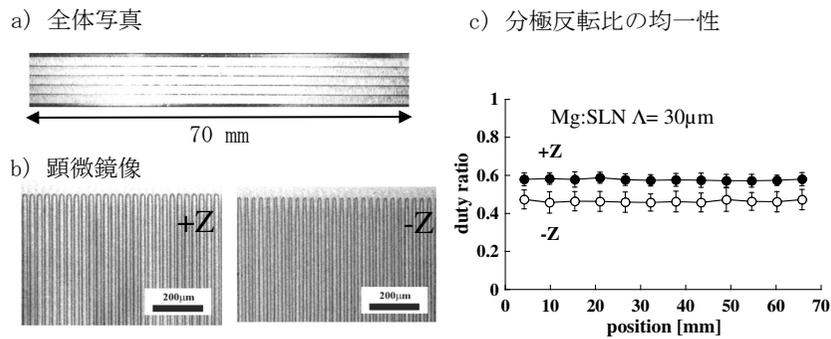


図 5 超長尺高効率波長変換デバイスの例

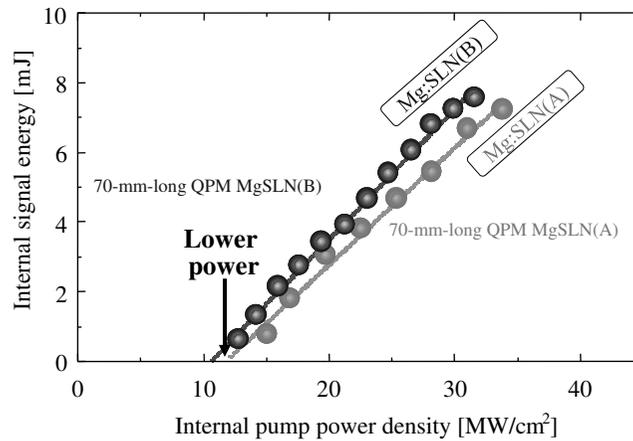


図 6 超長尺デバイスでのシングルパス波長変換特性

達成されていることがわかる<sup>17)</sup>。このデバイスではマイクロチップパルス Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーを励起光として、シングルパスの光パラメトリック発生 (OPG) が可能になり、高い効率で波長変換が実現されている (図 6)。

## 5.2 共振器内波長変換

波長変換デバイスを共振器内に挿入して、変換光を複数回往復させることで相互作用長を拡大する波長変換法である<sup>18)</sup>。直線共振器 (図 4(b)) やリング共振器などの形態がある。入力鏡は入力光に対し

表 1 波長変換デバイスの導波路作製法

導波路作製法	材料	規格化効率* (%/Wcm <sup>2</sup> )	光損傷	屈折率成分	屈折率変化 $\Delta n$	伝搬損失 (dB/cm)@1.5 $\mu\text{m}$
Ti 拡散	LN,Mg:SLN	~ 20	有	ne no	~ 0.001	<0.2
Zn 拡散	LN	~ 60	—	ne no	~ 0.005	<0.5
プロトン交換	LN,Mg:LN,LT	~ 150	有	ne	~ 0.1	<0.2
接着+ドライエッチング	Mg:LN,Zn:LN	~ 450	無	ne no	~ 0.6	<0.4
Rb 交換	KTP	—	有	ne no	~ 0.02	<0.4

\* 規格化変換効率は通信波長帯の SHG デバイス

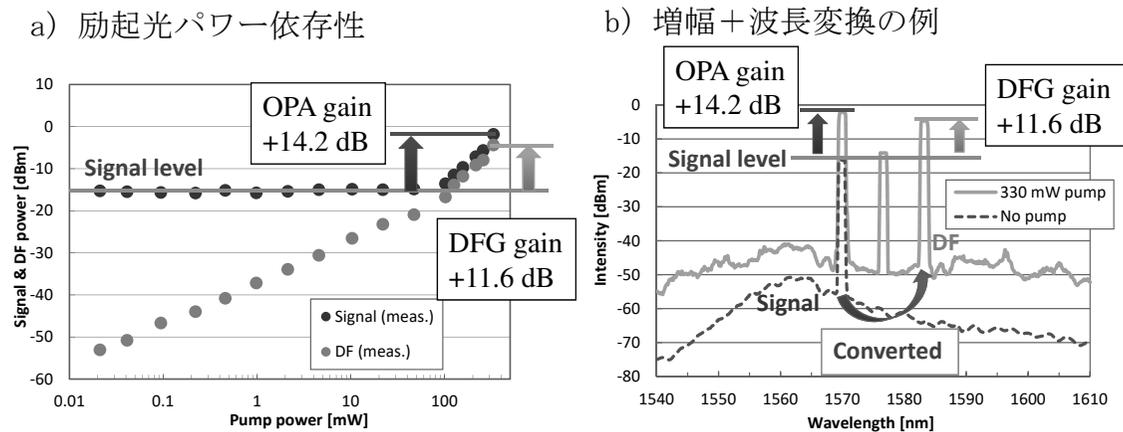


図 7 Mg:CLN ARW 導波路の DFG 波長変換特性

て AR コーティング、出力となるシグナル、アイドラに対しては HR コーティングを施す。また出力鏡は入力光に対して HR コーティング、出射光に対して 60 ~ 95% 程度の反射率でコーティングを施す。振動や温度変化による共振器の変化に敏感で、アラインメントの困難さと不安定さがつきまとう。研究用理化学光源では多く用いられているが、除震を必要とするため社会実装される例は少ない。

### 5.3 導波路内波長変換

導波路内に強く光を閉じ込めて、回折の影響をなくして相互作用長を拡大する方式である (図 4(c))。接着技術とドライエッチング技術を組み合わせた接着リッジ導波路 (Adhered Ridge Waveguide; ARW)<sup>19)</sup> がめざましい進化を遂げている。Mg:CLN をコアに用いたデバイスは、効率が高いだけでなく、イオン拡散 / 交換導波路と異なり長期安定性にも優れている (表 1)。デバイスの SHG 効率として 10 mW 入力換算で 46%、規格化変換効率で 4600%/W の記録が得られている<sup>20)</sup>。長さ 30 mm の長尺デバイスにおいても、単位長さの規格化変換効率で 4500%/Wcm<sup>2</sup> に達している。このデバイスにポンプ光を混合して差周波発生 (DFG) を行くと、波長変換とともに出力は 10 倍以上 (+11.6 dB) に増幅される (図 7)<sup>21)</sup>。同時に信号光のアンプとしても 20 倍以上の高いゲイン (+14.2 dB) が得られる。Mg:CLN ARW デバイスは、大容量光ファイバ伝送において 640 GHz データ通信でも動作することが証明されており、ここでも実励起を伴わない波長変換デバイスの超高速応答が生かされている<sup>22)</sup>。

最近では、薄膜 LN (Thin Film LN; TFLN) と呼ばれる極めて薄い膜厚 0.3  $\mu\text{m}$  程度の LN 膜を用いて、リッジ導波路が報告されている。LN 薄膜単体ではモード伝搬しないためクラッドの SiO<sub>2</sub> などで電界分布を調整してモード導波を可能にしている。単位長さ当たりの規格化変換効率では 4600%/

Wcm<sup>2</sup> が得られているが、長さ方向の均一性を確保することが難しく、デバイスとしての規格化変換効率は 16%/W にとどまっている（素子長 0.6 mm）<sup>23)</sup>。今後の作製プロセス改善が待たれる。

J. Lu らは導波路を分極反転構造を持つリング共振器と結合させることで、極めて高い効率を得たと報告している。精力的な試みといえるが、結合損失の評価や他の共振効果との切り分けは難しい。デバイスとしての評価は歴史の判断に委ね、ここでは参考文献を挙げるにとどめる<sup>24)</sup>。

## 6. 量子光学への応用

### 6.1 量子もつれ光発生

量子もつれ光発生<sup>25)</sup>は量子情報分野の主要な要素技術であり、安定した発生法を確立することが分野の発展に必須である。また発生する光子対のスペクトルやパルス幅、位相などの設計・制御ができれば、量子もつれ光を用いたさまざまな応用が可能になる。量子もつれ光の発生法には、二次非線形光学効果による SPDC<sup>26)-28)</sup>、三次非線形光学効果によるパラメトリック光混合<sup>29)</sup>、原子からのカスケード放出<sup>30)31)</sup>、などがあるが、ここでは効率が高く最も広く用いられている SPDC を中心に話を進める。

SPDC では、高エネルギーの励起光から低エネルギーのもつれ光子を複数発生させる。2 光子を発生させる場合を図 8 に示してあり、位相整合のタイプによって出射光の偏光の組合せを選ぶデザインが可能である。ここでも偏光の組合せをデザインできる分極反転デバイスの設計自由度が示されている。Mg:LN の場合を取り上げると、タイプ 0 は非線形光学定数  $d_{33}$  を用いるため、結晶の Z 軸に平行な偏光を持つ光子対が発生する。タイプ I は  $d_{32}$  を用いるため、結晶の Z 軸に垂直な偏光を持つ光子対が発生する。タイプ II は  $d_{24}$  を用いるため、お互いの光子が直交偏光を持つ光子対が発生する。ただし、図の Mg:LN の例では、位相整合毎に用いる非線形光学定数が異なるため、効率が変わることに注意する必要がある。

我々は Mg:SLT の優れた特性を生かして、波長 532 nm 励起用のもつれ光子対発生モジュールを報告している。S. Harris のシングルサイクル相関光子対<sup>32)</sup>の理論提案を受けて、チャープ構造による広帯域もつれ光子対発生が行われている。ここでは 10% のチャープを持つ周期構造をデザインし帯域の拡大をはかっている。またデバイスに四面排熱モジュール技術を導入して、発生スペクトルの熱的安定性を実現している。A. Tanaka らは、可視 532 nm 光 2 W 励起で非縮退量子もつれ光発生を行い、極めて帯域の広い相関光子対発生が実現している。波長 790 nm から 1610 nm と 1 オクターブを超える帯域 (820 nm) が得られており<sup>33)</sup>従来記録 (710 nm)<sup>34)</sup>を凌駕する。チャープ周期を持つデバイスではスペクトル輝度が低下するため高密度励起が望まれるが、排熱モジュールにより高密度励起でも安定した光子対発生が可能になっている。この光子対源は量子光コヒーレンストモグラフィ (QOCT) への

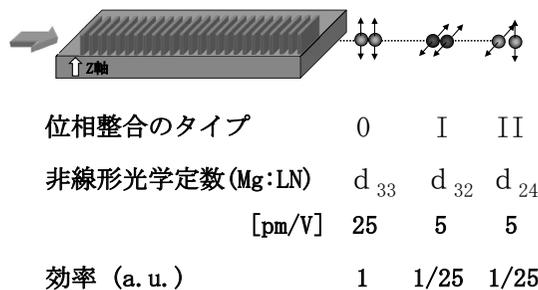


図 8 位相整合のタイプともつれ光子の偏光組合せ

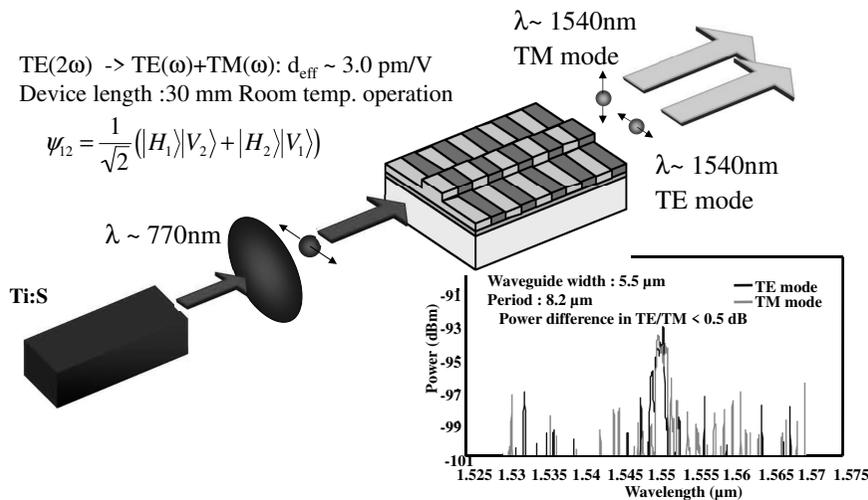


図9 Mg:CLN ARW 導波路によるタイプII偏光もつれ光子対発生

適用を念頭においており、量子光かつ広帯域であることから古典光 OCT の限界を超える高い分解能が可能になる<sup>35)</sup>。また量子光を OCT に用いることで被検体の屈折率分散を補償できる特長も有している。これらチャープ周期を有する広帯域デバイスは、導波路と組み合わせることで高効率と広帯域を両立できる<sup>36)</sup>。

またマサチューセッツ工科大学 F. Wong らとは、KTP を用いたタイプ II 波長変換デバイスで偏光もつれ光子対を発生させている。ここでは位相整合と群速度整合を同時に満たして通信波長帯で帯域拡大を行い、超短パルスとの和周波発生で量子相関時間の測定に成功している<sup>37)38)</sup>。Hong Ou Mandel ディップの観測を行うことで量子相関時間 180 fs と測定されている。なお短パルス的高速測定には後述する光サンプリングが用いられており、測定系にも分極反転波長変換デバイスが利用されている。

同様に、日本大学井上らとの共同研究においては、特殊な設計を行いタイプ II 光子対発生導波路デバイスを実現している<sup>39)</sup>。TE/TM 両モードにおいて高い閉じ込めを得るため、Mg:CLN を用いた ARW デバイスが作製されている。タイプ II で用いた非線形光学定数  $d_{24}$  は通常の  $d_{33}$  と比較すると効率が 1/25 に低下するが、ARW を採用することで 90%/W の高い規格化変換効率が達成されている。直交偏光光子対を通信波長帯で発生させ、タイプ 0 と比較して極めて狭帯域の光源が実現できることを示した。量子通信の波長多重化に有望な技術といえる。またこのデバイスを用いて光ファイバーでの量子鍵配布に成功している<sup>40)</sup>。

相関する光子対の数を拡張することで、従来の量子限界を打破することができる。分極反転 KTP と分極反転 LN を用いて波長 405 nm 励起で 3 光子の相関を実現した例があり<sup>41)</sup>、さらに 4 光子の干渉では 2 光子干渉に比べて位相測定精度を  $\sqrt{2}$  倍に改善できる<sup>42)</sup>。今後、励起光を短波長化することで通信波長帯の 8 光子干渉を実現できる可能性があり、QPM 水晶デバイスの 8 倍波発生デバイス<sup>43)</sup>も含めたシステムが魅力的とされる。

## 6.2 スクイーミング

スクイード光の定式化<sup>44)</sup>が進められて、実験的な発展がめざましい。通信路容量の増大や干渉計測の精度向上にスクイーミングは有効な手段である。系全体の損失低減に向けて、最近では光通信波長帯での実験が多くみられる。量子通信では用いられる光強度が比較的低いため低励起強度での動作が望ま

れ、極めて高い規格化変換効率が要求される。このため非線形光学定数の大きい分極反転デバイスの登場する場面が多くみられる。

ファイバーレーザーを用いた Mg:CLN 分極反転デバイスによる通信波長帯真空スクイズドパルス光源が実現されている<sup>45)</sup>。同研究は真空スクイズド状態の非ガウス操作の実現に発展している<sup>46)</sup>。高効率 Mg:CLN ARW によりナノ秒パルス光でのスクイーミングも着実に進展がみられている<sup>47)</sup>。重力波検出への適用を目的にスクイーミングレベルの改善が進められており、やはり分極反転波長変換デバイスが貢献している<sup>48)</sup>。また最近では、ファイバー結合した LN 導波路波長変換モジュールを用いたスクイーミングも報告されている<sup>49)</sup>。

### 6.3 量子通信・量子中継

古典光を用いる高速光通信でも、すでに非線形光学デバイスの優れた位相特性が知られ、PSA の利用が検討されている。光通信では、90 年代後半に強度変調—直接検波に波長多重技術を持ち込んで大容量化がはかられた。2005 年以降はコヒーレント通信が再び脚光を浴びており、情報伝送に位相情報が利用できる環境にある。コヒーレント通信においてもシャノン限界を打ち破るべく、PSA の利用がはかられている。パラメトリック過程は仮想励起状態を介して極めて高速な応答を実現するため、半導体増幅器や希土類添加ファイバのようなキャリアの実励起を伴う増幅・変換過程と比べて、光子の位相情報を保持できることが現在では広く知れ渡っており、これを利用しやすい環境にある。

60 年代にはすでに通信理論においてもノイズの量子論的取扱いからスクイーミングが議論されている<sup>50)</sup>。パラメトリック過程による波長変換では零点振動から解放されて不確定性原理の範囲内で光子数を圧縮することが可能であり、ノイズを抑圧したスクイズド状態が実現できる。ここでは光子数と位相を同時に決定でき、これを制約するのは不確定性原理だけであるとされた。

光通信の将来を見据えるとコヒーレント光通信から量子情報通信へ移行することで、金融や国防で要求される究極の安全性が実現できる<sup>51)</sup>。量子通信に向けた量子状態を壊さない中継技術の構築に、非線形光学デバイスがやはり一役買っている<sup>52)53)</sup>。

### 6.4 量子演算

周波数空間でマルチチャネルの Freq-bin 量子ビットを形成して、量子演算に用いる方法が提案されている。各周波数チャネルに持たせた量子情報を、広帯域和周波発生デバイスで 1 つの周波数チャネルに集約してモード混合させる<sup>54)</sup>。ここでは通信波長帯マルチチャネルの入射光に対して波長変換の帯域拡大をはかるため、タイプ II デバイスを設計して群速度整合と擬位相整合を同時に満たしている。

### 6.5 光サンプリング

位相情報を持つ信号光の高速サンプリングに、分極反転非線形光学デバイスが用いられている。和周波発生 (SFG) によるサンプリング (図 10) は、以下のような優れた特徴を有している。

- 波長変換後にフィルタリングを行うことで低ノイズ計測が可能
- ポンプ光の強度を変えることで検出器としての利得が可変
- 超高速応答のために検出系の不感時間が短い

SFG 高速サンプリングの例を著者らの実験例から紹介する (表 2)。光ファイバ伝送において、伝送されてくる高速信号のクロック周波数を抽出することは切替や検出のタイミングを決める上で重要である。波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯のデータレート 640 GHz の光信号から、SFG サンプリングによりクロック周波数の抽出が行われている<sup>22)</sup>。1565 nm 信号光と 1559 nm 局発光から和周波 781 nm を発生させて和周波光

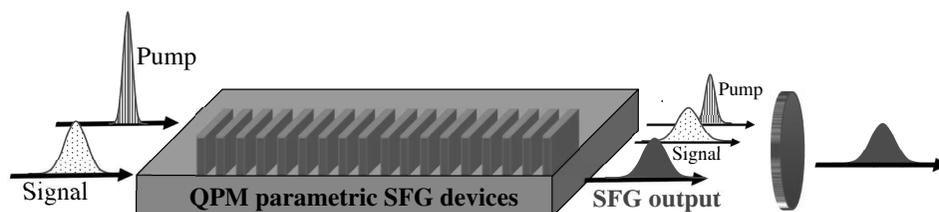


図 10 和周波発生 (SFG) による高速サンプリング

表 2 SFG 高速光サンプリングの例

Signal (nm)	Pump (nm)	SFG output (nm)	Time scale (ps)	Material/Device	Ref.
1565	1559	781	1.6	LN/waveguide	22)
1578	790	527	0.18	SLT/bulk	37)
1520	820	533	0.22	SLT/bulk	38)

の強度信号からクロック周波数を決めている。やはり実励起を伴わない $\chi^{(2)}$ デバイスの超高速応答が生かされている。

高速サンプリングは、量子干渉性の計測に用いられて、量子もつれ光の評価にも展開されている。

マサチューセッツ工科大学 F.Wong らは、KTP を用いた分極反転非線形光学デバイスで、通信波長帯で量子もつれ光子対を発生させてその特性評価に光サンプリングを用いている。もつれ光子の発生には擬位相整合と群速度整合を同時に満たす設計<sup>55)-57)</sup>を行い、発生する光子の帯域拡大を行って短パルスの波長領域をカバーしている ( $d_{24}$  を用いる設計のため効率は犠牲になっている)。このもつれ光子それぞれをさらに分極反転 SLT (1 mm 長) で SFG 光サンプリング行って短波長へ変換し量子相関時間の測定に成功している<sup>37)38)</sup>。ここでは Hong Ou Mandel ディップの観測が行われてもつれ光子の相関時間は 180 fs と測定されている。

他方 SFG 光サンプリングでは、各パルス間の群速度不整合が時間分解能を劣化させる。この点では短尺デバイスが望ましいが、短尺デバイスでは変換効率が低下するため、時間分解能と効率の間にトレードオフがある。慶応大学の早瀬らは上記トレードオフを考慮して最適デバイス長 (2 mm 長) を見だし高い分解能を実現している<sup>58)</sup>。またこの SFG 光サンプリングを Time-bin 量子ビットのデコーディングに用いてその特性評価を報告している<sup>59)</sup>。

## 7. まとめ

量子相互作用に広く用いられている擬位相整合波長変換デバイスの基本的な特性を紹介し、材料・デバイス選択のガイドラインおよび用途を概観した。効率の高さ、設計自由度の高さ、応答の速さから量子光学のキーコンポーネントになりつつある。今後特性改善に加えて、新規な応用分野の開拓も期待される。

本章の内容は以下の方々の御協力をいただいております：

早稲田大学 中島啓幾教授、大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所 Hwan Hong Lim 博士、国立研究開発法人理化学研究所 丸山真幸博士、国立研究開発法人産業技術総合研究所 高 磊博士、日本大学 井上修一郎教授、行方直人准教授、住友大阪セメント株式会社 市川潤一郎博士、マサチューセッツ工科大学の F. Wong 博士、京都大学 竹内繁樹教授、岡本 亮准教授、慶応大学 神成文彦教授、保坂有杜助教、早瀬潤子教授、河内優太君に深く感謝いたします。

文献

- 1) P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters and G. Weinreich: *Phys. Rev. Lett.*, **7**, 118 (1961).
- 2) M. Bass, P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters and G. Weinreich: *Phys. Rev. Lett.*, **8**, 18 (1962).
- 3) W. H. Louisell, A. Yariv and A. E. Siegman: *Phys. Rev. Lett.*, **124**, 1646 (1961).
- 4) D. C. Burnham and D. L. Weinberg: *Phys. Rev. Lett.*, **25**, 84 (1970).
- 5) 栗村 直: 固体物理, **29**, 75 (1994).
- 6) J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing and P. S. Pershan: *Phys. Rev.*, **127**, 1918 (1962).
- 7) 宮澤信太郎, 栗村 直 監修: 分極反転デバイスの基礎と応用, p.47, オプトロニクス社, ISBN4-902312-11-5.
- 8) 宮澤信太郎, 栗村 直 監修: 分極反転デバイスの基礎と応用, p.90, オプトロニクス社, ISBN4-902312-11-5.
- 9) 佐脇一平, 三浦道雄, 栗村 直: LiTaO<sub>3</sub> への深い周期的分極反転の作製 (II) —電界印加法—, 第70回応用物理学会秋季学術講演会, 18 a-X-2 (1992).
- 10) M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh and K. Watanabe: *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 435 (1993).
- 11) 栗村 直: 光学, **36**, 232 (2007).
- 12) H. Lim, S. Kurimura and N. Yu: *Opt. Exp.*, **22**, 5209 (2014).
- 13) A. Kuroda, S. Kurimura and Y. Uesu: *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1565 (1996).
- 14) Q. Chen and W. P. Risk: *Electron. Lett.*, **30**, 1516 (1994).
- 15) K. Kitamura, Y. Furukawa, K. Niwa, V. Gopalan and T. E. Mitchell: *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3073 (1998).
- 16) H. H. Lim, T. Katagai, S. Kurimura, K. Noguchi, N. Ohmae, N. Mio and I. Shoji: *Opt. Exp.*, **19**, 22588 (2011).
- 17) M. Maruyama, H. Nakajima, S. Kurimura, N. E. Yu and K. Kitamura: *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 011101 (2006).
- 18) N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, M. Nakamura, K. Kitamura, Y. Takada, J. Sakuma and T. Sumiyoshi: *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5134 (2004).
- 19) S. Kurimura, Y. Kato, M. Maruyama, Y. Usui and H. Nakajima: *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 191123 (2006).
- 20) R. Kou, S. Kurimura, K. Kikuchi, A. Terasaki, H. Nakajima, K. Kondou and J. Ichikawa: *Opt. Exp.*, **19**, 11867 (2011).
- 21) Y. Muranaka, K. Sugiura, S. Kurimura, R. Kou, K. Kikuchi, H. Nakajima and J. Ichikawa: CW-pumped +11.6 dB gain in DFG using an efficient QPM adhered-ridge waveguide, Conference on Lasers and Electro-Optics 2012 OSA Technical Digest (Optica Publishing Group), paper CF3 A.6 (2012).
- 22) L.K. Oxenlowe, F. Gomez, C. Ware, S. Kurimura, H. C. H. Mulvad, M. Galili, H. Nakajima, J. Ichikawa, D. Erasme, A.T. Clausen and P. Jeppesen: *J. Lightwave Technol.*, **27**, 205 (2009).
- 23) A. Rao, K. Abdelsalam, T. Sjaardema, A. Honardoost, G. Camacho-Gonzalez, and S. Fathpour: *Opt. Exp.*, **27**, 25920 (2019).
- 24) J. Lu, J. Surya, X. Liu, A. Bruch, Z. Gong, Y. Xu and H. Tang: *Optica*, **6**, 1455 (2019).
- 25) A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen: *Phys. Rev.*, **47**, 777 (1935).
- 26) P. G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. V. Sergienko and Y. H. Shih: *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 4337 (1995).
- 27) S. Takeuchi: *Opt. Lett.*, **26**, 843 (2001).
- 28) Z. Y. Ou and L. Mandel: *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 50 (1988).
- 29) M. Fiorentino, P. L. Voss, J. E. Sharping and P. Kumar: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14**, 983 (2002).
- 30) A. Aspect, P. Grangier and G. Roger: *Phys. Rev. Lett.*, **47**, 460 (1981).
- 31) A. Aspect, P. Grangier and G. Roger: *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 91 (1982).
- 32) S. E. Harris: *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 063602 (2007).
- 33) A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Subashchandran, M. Okano, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, T. Hirohata, S. Kurimura and S. Takeuchi: *Opt. Exp.*, **20**, 25228 (2012).
- 34) N. Mohan, O. Minaeva, G. N. Goltsman, M. F. Saleh, M. B. Nasr, A. V. Sergienko, B. E. A. Saleh and M. C. Teich: *Appl. Opt.*, **48**, 4009 (2009).
- 35) M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura and S. Takeuchi: *Sci. Rep.*, **5**, 18042 (2016).
- 36) B. Cao, M. Hisamitsu, K. Tokuda, S. Kurimura, R. Okamoto and S. Takeuchi: *Opt. Exp.*, **7**, 21615 (2021).
- 37) O. Kuzucu, F. N. C. Wong, S. Kurimura and S. V. Tovstonog: *Opt. Lett.*, **33**, 2257 (2008).
- 38) O. Kuzucu, F. N. C. Wong, S. Kurimura and S. Tovstonog: *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 153602 (2008).
- 39) G. Fujii, N. Namekata, M. Motoya, S. Kurimura and S. Inoue: *Opt. Exp.*, **15**, 12769 (2007).
- 40) 河野太一, 行方直人, 栗村 直, 井上修一郎: 直交偏光量子もつれ光子対の 10.5 km ファイバー伝送実験, 第70回応用物理学会秋季学術講演会, 11 a-T-7 (2009).
- 41) H. Hubel, D. R. Hamel, A. Fedrizzi, S. Ramelow, K. J. Resch and T. Jennewein: *Nature*, **466**, 601 (2010).
- 42) T. Nagata, R. Okamoto, J. L. O'Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi: *Science*, **316**, 726 (2007).
- 43) S. Kurimura, M. Harada, K. Muramatsu, M. Ueda, M. Adachi, T. Yamada and T. Ueno: *Opt. Mat. Exp.*, **1**, 1367 (2011), (invited).
- 44) H. P. Yuen: *Phys. Rev.*, **A13**, 2226 (1976).
- 45) 行方直人, 小松崎祐樹, 高橋佑太, 栗村 直, 井上修一郎: ファイバーレーザーを用いた通信波長帯真空スクイーズドパルス光源, 第70回応用物理学会秋季学術講演会, 11 a-T-4 (2009).
- 46) N. Namekata, Y. Takahashi, G. Fujii, D. Fukuda, S. Kurimura and S. Inoue: *Nat. Photonics*, **4**, 655 (2010).
- 47) 戸川翔太, 中川大貴, 衛藤雄二郎, 平野琢也, 檀田拓也, 栗村 直, 中島啓機: 高効率周期分極反転光導波路を用いた通信波長帯パルス光のスクイーミング II, 日本物理学会第69回年次大会, 27 pCC-6 (2013).
- 48) T. Eberle, S. Steinlechner, J. Bauchrowitz, V. Händchen, H. Vahlbruch, M. Mehmet, H. Müller-Ebhardt and R. Schnabel: *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 251102 (2010).
- 49) T. Kashiwazaki, T. Yamashima, N. Takanashi, A. Inoue, T. Umeki and A. Furusawa: *Appl. Phys. Lett.*, **119**,

- 251104 (2021).
- 50) H. Takahashi: *Adv. Commun. Sys.*, **1**, 227 (1965).
- 51) 例えば, 佐々木雅英, 松岡正浩 監修: 量子情報通信, 102-132, オプトロニクス社, 東京(2006).
- 52) S. Tanzilli, W. Tittel, M. Halder, O. Alibart, P. Baldi, N. Gisin and H. Zbinden: *Nature*, **437**, 116 (2005).
- 53) R. Ikuta, Y. Kusaka, T. Kitano, H. Kato, T. Yamamoto, M. Koashi and N. Imoto: *Nat. Commun.*, **2**, 537 (2011).
- 54) Y. Yamagishi, A. Hosaka, K. Tanji, S. Kurimura and F. Kannari: Arbitrary Mixing of Frequency-Range Multimode Quantum States Using Nonlinear Waveguide Crystals Based on Dispersion Engineering, OSA Nonlinear Optics Topical Meeting, NM2 B.4 (2021).
- 55) N.E. Yu, J. H. Ro, M. Cha, S. Kurimura and T. Taira: *Opt. Lett.*, **27**, 1046 (2002).
- 56) N.E. Yu, S. Kurimura, K. Kitamura, J. H. Ro, M. Cha, S. Ashihara, T. Shimura, K. Kuroda and T. Taira: *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3388 (2003).
- 57) F. Konig and F.N.C. Wong: *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1644 (2004).
- 58) 松浦 亮, 渡辺真成, 栗村 直, 赤羽浩一, 早瀬潤子: 周波数上方変換による極微弱フェムト秒パルスの高時間分解測定および結晶長依存性, 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 10 p-Z19-11 (2020).
- 59) Y. Kochi, S. Kurimura and J. Ishi-Hayase: Ultrafast Measurement of Femtosecond Time-bin Qubits Using Optimized Up-conversion Single Photon Detector, Conf. on Lasers and Electro Optics- Pacific Rim, CFA7I-02 (2022).

\* \* \*