

単一光子条件外での非線形干渉量子イメージングの理論解析及び LA-STAMP を 用いた中赤外域単一ショット超高速イメージングの提案

Theoretical analysis of quantum imaging based on induced coherence with induced emission and a proposal of a new mid-infrared single-shot ultrafast imaging scheme with LA-STAMP

高橋 和輝 (M1), 渡瀬 陸(M2), 保坂 有杜(助教)

Kazuki Takahashi, Riku Watase, Aruto Hosaka

Abstract

We theoretically show that a quantum imaging scheme proposed by Lemos is realizable regardless of the existence of induced coherence in optical parametric conversion. We propose a new mid-infrared sub-picosecond single-shot ultrafast imaging scheme by combining the quantum imaging and LA-STAMP.

1. はじめに

2014年 Lemos 等は、2つの非線形結晶を同一光で励起することによって生じた2つのシグナル光が干渉を示すことを利用した量子イメージング手法を実証した[1]. 干渉を利用しているため、対象物質の透過率をイメージングする通常の強度イメージングに加え撮影対象の屈折率変化に起因する位相変化量をイメージングする位相イメージングも可能とする。また撮影対象へ照射された光を直接検出するのではなく非線形波長変換後の光を検出しているため、一般的に検出器効率が低い中赤外光を用いたイメージングへの応用が可能であり、化学センシングへの応用が期待できる。しかしこの手法は単一光子性が満たされるように、非線形結晶での非線形利得を十分低くする必要があった。

一方、2つの非線形結晶における非線形利得の比率がある条件を満たし、2つのシグナル光の強度が釣り合えば、単一光子性を満たさない高利得領域で非線形結晶を励起した場合においてもシグナル光

間の干渉が見られることがその後示されている[2]. また高利得領域では低利得領域の場合と比較して干渉のSN比も向上するという利点を持つことが分かっている。今回我々は、非線形ゲイン比率がその条件を満たした場合に、低利得・高利得に関わらず任意の非線形ゲイン領域において実際に強度・位相イメージングが可能であることを示す。その際に非常に便利な解析手法として、ビームスプリッタによる干渉や2次の非線形効果などをそれぞれに固有なシンプレクティック行列として表すシンプレクティック解析を利用する[3]. 入力状態の共分散行列にシンプレクティック行列を乗算するだけで出力状態の共分散行列を取得し、平均強度等を知ることができる。量子状態における解析と古典状態における解析は別物として扱われることが多いが、シンプレクティック解析を利用することによって古典と量子をシームレスに捉えることができるという利点を持ち、低利得、高利得と分けることなく統一して解析を行うことができる。

さらに、Lemos等の量子イメージング手法が高利得領域で実現することを利用して、サブピコ秒レベルの超高速イメージングを可能としている LA-STAMP[4]と融合することにより、分子の振動モードに起因した光誘起吸収変化特性といった中赤外域での超高速現象の単一ショットによるイメージングを高検出効率で実現できると考え、提案する。

2. 量子イメージングの理論解析

シンプレクティック解析を利用して、オブジェクトの透過率・屈折率による強度・位相変化が検出光子数にどう影響を与え、そしてイメージングが可能であるのかを解析する。

今回はレモス氏らの実験と同様、図1のような実験セットアップを想定する。

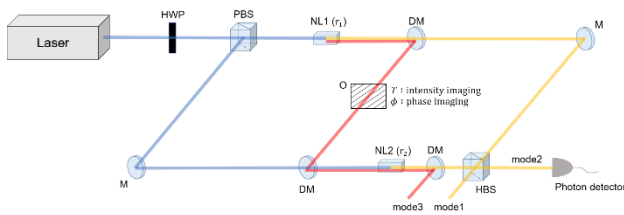


Fig. 1. Quantum imaging using nonlinear interferometry based on induced coherence with and without induced emission: HWP: half wave plate, PBS: polarizing beam splitter, NL: nonlinear crystal (with nonlinear gains $\cosh r_1$ and $\cosh r_2$), DM: dichroic mirror M: mirror, O: object, and HBS: half beam splitter

まずレーザーは1つ目の非線形結晶 (NL1)を励起しシグナルーアイトラ光を生成する。アイトラ光はオブジェクト (O)へと照射された後2つ目の非線形結晶 (NL2)に入射し新しくシグナル光を生成する。この時点でオブジェクトの情報はシグナルへと転写されている。最後に2つのシグナル光をHBSにて干渉させ、出力の一方を光子検出器によって検出する。オブジェクトの情報が転写されているシグナル光と転写されていないシグナル光を干渉させることによって、オブジェクト情報がイメージングされる。

今回は図1におけるmode1からmode3までの3つのモードについて、出力を解析する。シンプレクティック解析において、図1におけるNL1、Oの透過率と位相変化、NL2、HBSはそれぞれ固有の行列 N_1 、 O_T 、 O_ϕ 、 N_2 、 B として表され、入力・出力状

態は正準位置、正準運動量表記における共分散行列 σ_{in} 、 σ_{out} と表される[3]。ここで入力状態は3つのモードについて真空であり、 σ_{in} は単位行列となる。各素子の行列を作用する順番に積算したシンプレクティック行列

$$S = BN_2O_\phi O_T N_1$$

を用いて、出力状態の共分散行列は

$$\sigma_{out} = S_{total}\sigma_{in}S_{total}^T = S_{total}S_{total}^T$$

と計算できる。共分散行列の定義により、ここから各モードにおける部分行列を取り出し、出力光子数を計算することが出来る。[5]

今回は2つの結晶において完全に同一の非線形効果が起こっているため、結晶の非線形ゲイン r_1 、 r_2 はレーザーからのパワーに比例する値 p とそのPBSによるパワー分岐比 k によって次のように表すことが出来る。結果においてはこの2パラメータによる特性を見る。

$$r_1 = pk$$

$$r_2 = p(1-k)$$

イメージング性能を評価するにあたって、検出光子数のオブジェクト特性変化 (T と ϕ)に対する単調性とビジビリティで評価した。ここでビジビリティは下式で表され、イメージのコントラスト比を表している。

$$V = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max} + n_{min}}$$

ただし、 n_{max} は最大検出光子数、 n_{min} は最小検出光子数である。

まず単調性の解析結果を図2(強度イメージング)と図3(位相イメージング)に示す。

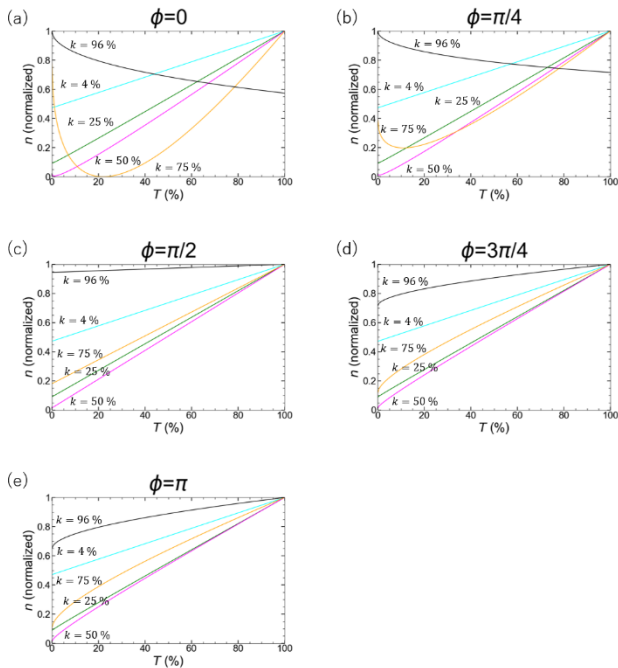


Fig. 2. Detected photons as a function of object's transmittance in intensity imaging. Power split ratio k is set to 4 %, 25 %, 50 %, 75 %, and 96 %, and phase shift ϕ is set to (a)0, (b) $\pi/4$, (c) $\pi/2$, (d) $3\pi/4$, and (e) π with $p = 6$.

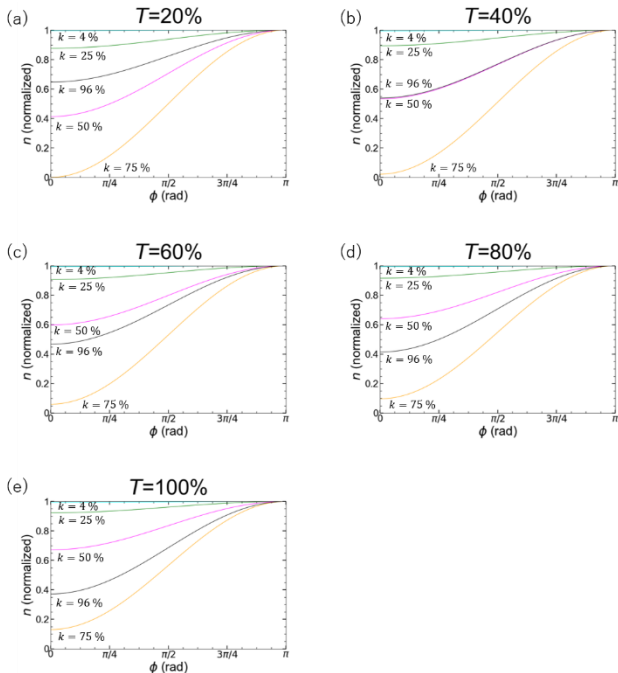


Fig. 3. Detected photons as a function of object's phase

shift in phase imaging: Power split ratio k is set to 4 %, 25 %, 50 %, 75 %, and 96 %, and transmittance T is set to (a)20 %, (b)40 %, (c)60 %, (d)80 %, and (e)100 % with $p = 6$.

強度イメージングにおいては、 $\phi = \pi/2$ から $\phi = \pi$ の範囲にあるという条件において、全ての T で単調性が保たれる。この位相条件は遅延操作や位相シフタなどにより容易に実現される。一方位相イメージングにおいては T による単調性への影響はないが、 $\phi = 0$ から $\phi = \pi$ の範囲に制限される。これ以上の位相差を明確に特定することはできない。

続いて、図2と図3にある結果から最大・最小検出光子数を取得し、ビジビリティを計算した。その結果を図4に示す。

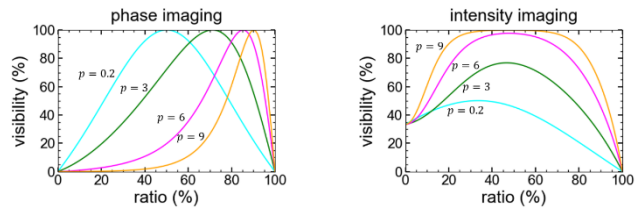


Fig. 4. Visibility change in function of power split ratio : with $p = 0.2$ (low-gain regime) and $p = 3, 6, \text{ and } 9$ (high-gain regime): (a)phase imaging and (b) intensity imaging.

ここで $p = 0.5$ とは、分岐比 $k = 0.5$ に設定した場合モード1における平均光子数が0.01となり、単一光子による干渉を想定する上で十分低い値となる。また、 $p = 3, 6, 9$ とは、分岐比 $k = 0.5$ に設定した場合結晶における非線形ゲインがそれぞれ7.4 dB、20 dB、33 dBとなるような値であり、単一光子条件外である。強度・位相イメージング双方において、単一光子性の有無によらず、パワー分岐比 k を適切に設定すれば高いビジビリティを持ってイメージングが実現できることが分かった。

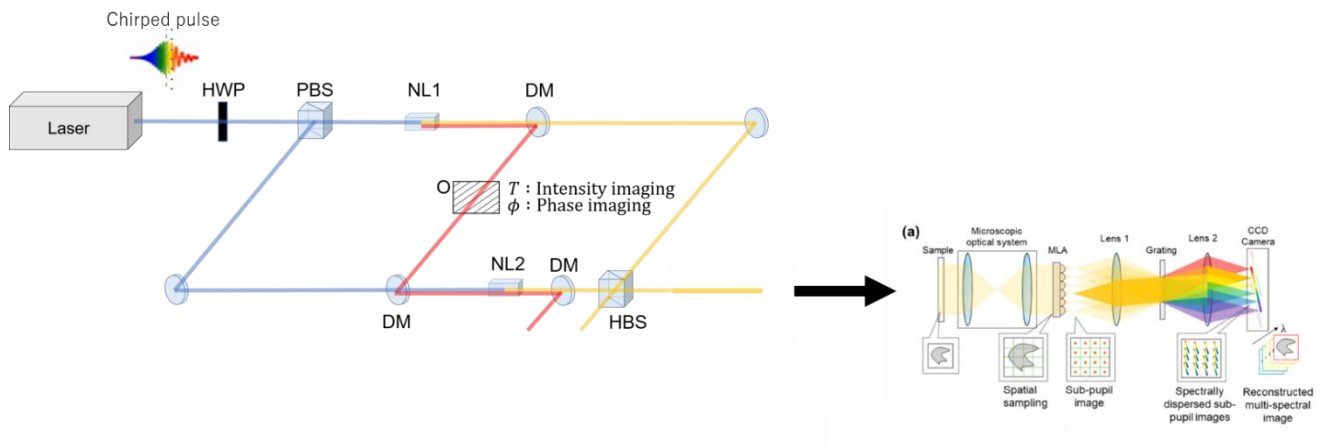


Fig. 5. the combination of quantum imaging and LA-STAMP.[4]

特に位相イメージングにおいては解析により

$$\cosh^2 p(1-k) - \frac{2 \cosh^2 pk - 1}{\cosh^2 pk} = 0$$

を満たすときに必ずビジビリティが1になることが分かった。これは、最後にHBSで干渉させる2つのシグナル光のパワーが一致する条件に相当する。

3. 中赤外域超高速イメージングの提案

前章において、Lemos 等による量子イメージングが高利得領域においても実現できることを示した。そこで今回我々は、既にサブピコ秒レベルでの撮影を可能としている LA-STAMP とこの量子イメージング法を融合することによって、分子の振動モードに起因した光誘起吸収変化特性といった中赤外域での超高速現象の単一ショットによるイメージングを高検出効率で実現できると考え、提案する。

図 5 のように、2 手法を融合することを考える。以下動作原理を説明する。

励起光としてチャープパルスを使用する。また結晶には type – II PPKTP を使用する。チャープ光を結晶へ励起した時の出力を、エネルギー保存条件と位相整合条件に基づき解析すると、図 6 のように Joint Spectral Amplitude (JSA)によってその出力特性を視覚的に表示することができる。

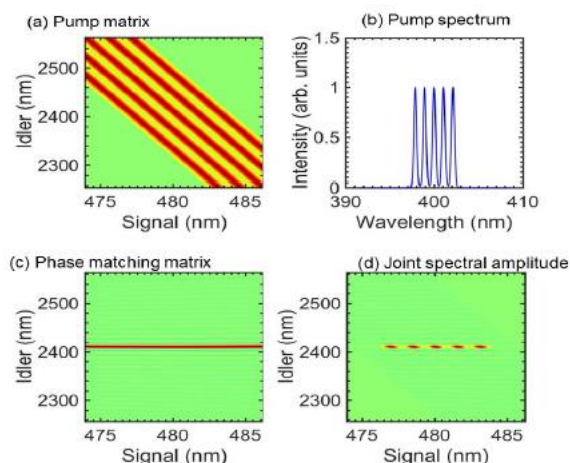


Fig. 6. output mode analysis by Joint Spectral Amplitude. (a)energy conservation (c)phase matching condition (d)integration of (a) and (c).

最終的な JSA は図のように横長であり、チャープパルスの瞬時周波数の通過に応じて選択波長領域が横へずれていく。中赤外域のアイドラに関しては、狭帯域チャープパルスが生成し、可視域のシグナルに関しては広帯域チャープパルスが生成することが分かる。

その後、赤外チャープパルスはオブジェクトを撮影する。その際、オブジェクトの超高速変化はチャープパルスの各時間領域に転写されていく。

2 つ目の結晶でポンプ光と赤外チャープパルスを同時に入射させると、図 6 の JSA に基づき、1 つ

目の結晶から出力されたシグナル光と同一波長の光が誘導される。その際、チャープパルスを用いているため、時間経過に従ってエネルギー保存関係がシフトしていく。よって、最終的に得られる2つのシグナル光は全く同じチャープ特性と波長を持っていることが分かる。ただし、2つ目の結晶から誘導されたシグナル光にはオブジェクトの超高速現象が転写されており、波長と時間変化が1対1に対応している。

これを LA-STAMP に入射すると、各波長が空間的に分割されて離れた状態で一度にカメラ上に投影される。これによって、カメラのシャッター速度を超えて超高速現象を撮影することが可能になる。

現在、400 nmチャープパルス励起による480 nmシグナル、2400 nmアイトラでの撮影に取り組んでいる。現在はチャープパルスを1つ目の非線形結晶へと励起することによる中赤外域チャープパルスの生成に成功しており、 $280\ \mu\text{m} \times 280\ \mu\text{m}$ のオブジェクト撮影を行った場合、1ピクセルあたり100 photons/pulseが計測されている（素子の透過率やカメラの検出効率も考慮されている）。この場合 LA-STAMP 入射前の最大検出光子数が200であるから、4枚程度の撮影(1枚あたり 50photons/pixel)程度であれば現実的である。

4. まとめ

Lemos 等による量子イメージングが単一光子性の有無によらず実現可能であることを示した。また、LA-STAMP と融合することにより、中赤外域における単一ショットでの超高速イメージングを高検出効率で実現することが出来ることを提案した。現状として、 $280\ \mu\text{m} \times 280\ \mu\text{m}$ のオブジェクト撮影を行った場合、素子の透過率やカメラの検出効率も含めて1ピクセルあたり100 photons/pulseが計測されている。今後設計を進め、まずは中赤外光による超高速イメージングを原理実証段階で実証する予

定である。

References

- [1] G. B. Lemos *et al.*, “Quantum imaging with undetected photons,” *Nature* **512**, 409 (2014).
- [2] M. I. Kolobov *et al.*, “Controlling induced coherence for quantum imaging,” *J. Opt.* **19**, 054003 (2017).
- [3] S. L. Braunstein and P. van Loock, “Quantum information with continuous variables,” *Rev. Mod. Phys.* **77**, 513 (2005).
- [4] H. Nemoto *et al.*, “Single-shot ultrafast burst imaging using an integral field spectroscope with a microlens array,” *Opt. Lett.* **45**, 5004 (2020).
- [5] M. S. Kim *et al.*, “Properties of squeezed number states and squeezed thermal states,” *Phys. Rev. A* **40**, 2494 (1989).