

令和 4 年 10 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14144

研究課題名（和文）標準量子限界に迫るシングルショット時間分解分光測定

研究課題名（英文）Single shot time resolved spectroscopy oriented to standard quantum limit

研究代表者

平 敬（Hira, Takashi）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任研究員

研究者番号：60802163

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：万能量子計算実用化のために必要なデコヒーレンス問題へのアプローチとして、標準量子限界に近い領域で適用可能なシングルショット時間分解分光測定手法を提案した。その手法の実験装置を構築し、測定データに基づいて最適化計算を行うソフトウェアを開発した。最適化計算に伴う問題点を洗い出し、その解決方法を提示した。問題点の解決により新たな測定手法のパラダイムにつながることを指摘した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

万能量子計算の実現に必要なデコヒーレンス問題の回避のためにはエラー訂正理論があるが、既存の理論では極めて高い量子忠実度が要求され、工学的要件が多大なものとなる。工学的要件の緩和のためには新たな量子測定・制御技術が必要であり、その一つとして標準量子限界に迫るシングルショット時間分解分光が考えられる。この技術の発展により万能量子計算を実現するための工学的要件が緩和され実用化へ近づくことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：I proposed the single-shot time-resolved spectroscopy which can be adapted to the realm nearly close to standard quantum limit as an approach to the decoherence problem which are needed to put universal quantum computing into practical. I made the experimental apparatus and developed the optimization software which calculates from the measured image. I figure out the problem with the optimization and supposed the solution of the problem. I pointed out the solution leads new paradigm of metrology.

研究分野：時間分解分光

キーワード：時間分解分光 標準量子限界 シングルショット 量子計算 量子情報 デコヒーレンス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1)量子系の制御技術の発展につれ、いわゆる万量子計算の研究が活発になっているが、理論面の発展と現存する実験技術の間には大きなギャップがあった。そのうち最もよく知られている問題としてはデコヒーレンスが挙げられる。デコヒーレンス問題を解決するために現在までに採られているアプローチとしては量子エラー訂正があるが、現在考えられているエラー訂正理論が有効に機能するためには量子系の忠実度が極めて高い必要があり、超伝導量子ビットを用いても数十量子ビット程度のシステムを実現するにとどまっている。

このようなシステムは NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer)と呼ばれ活用法が現在もなお模索されているが、万量子計算が持ちうる能力とは大きく異なる研究段階のものである。

(2)NISQ を超える量子計算系を開発するためにはハードウェアの量子的忠実度そのものを飛躍的に上げなければならず、量子系の極めて微弱な変化を極めて高速に測定・制御する必要があることが予想される。量子系を光と電子の相互作用に限って考えた場合、そのような測定技術は時間分解分光と等価なものとなる。現在までに開発されている時間分解分光は多数回の測定を必要とし、かつ光子数が極めて多い場合に適用可能なものがほとんどであり、数十光子数程度の信号強度でも使用可能で 1 回の測定でも意味のある測定が可能な測定技術は存在していない。

2. 研究の目的

(1)本研究の目的は前項のように微弱光にも適用可能で 1 回の測定(シングルショット)で単発の量子現象を捉えられるような新技术を、既存の技術の中の最も有望なものに着目してその問題点を解決することにより高性能化を図ることによって実現するものである。

(2)既存の技術のうち最も有望なものは SEA-TADPOLE と呼ばれる測定系であるが、未だに標準量子限界が問題となるような信号強度・時間幅の領域でのシングルショット測定に用いられるようにはなっていない。本研究ではその問題点を分析し、改善することにより標準量子限界の領域でもシングルショット測定が可能になると思われる新手法を提案し、実装することが目的である。

3. 研究の方法

(1)SEA-TADPOLE の持つ問題点を分析し、その解決方法を採用した実験装置を構築する。その実験装置の物理モデルに対し、測定結果と最もよく一致するような最適化計算を行うことにより、電子との相互作用を経た光波形を逆推定する。

SEA-TADPOLE の持つ問題点として考えられるものは、光子の損失・情報の損失である。量子効率が高くて高い二次元ディテクタを用いたとすると、その損失があり得るのはディテクタの持つダイナミックレンジを活かしきっていないという点に絞られる。具体的にはパルス光のピーク部分と裾野部分を同等の精度で捉えることが出来ないという問題を持っている。

そこでディテクタへ光を照射する前にデジタルミラーデバイス等の可変マスクを配置し、微弱光を捉えられる露光条件でいながらパルス光のピーク部分も意味のある情報として飽和せずにとらえられるようにする。その可変マスクのパラメータを含めた物理モデルに対して最適化計算を施すことにより、電子と相互作用を経た光波形を求める。

そのような最適化計算を行うには、近年発達してきた GPU や機械学習ライブラリなどの持つ演算能力を流用することがコスト・開発速度の面で有利である。ただしこの計算自体は機械学習やディープラーニングとは異なる操作である。

実験の手順を述べる。100 フェムト秒程度のパルス時間幅で中心波長 1030nm 程度のフェムト秒パルスレーザー光源を参照光パルスとし、マルチショット FROG を改良した測定系を用いて高精度な参照光パルス波形を得る。この改良はパルスの裾野部分では長時間の露光を行い、パルスのピーク部分では露光時間を短くすることにより行う。参照光パルスを二つに分割し、片方をエタロンに入射し疑似的な未知パルスを生成する。未知パルスと参照パルスをバイプリズムによって波面を傾けて空間的に干渉させる。これをデジタルミラーデバイスへ入射させて信号強度が強い部分には減衰度の高いマスクをかけ、信号強度の弱い部分ではマスクをかけないようにする。デジタルミラーデバイスからの反射光を量子効率の高い二次元ディテクタに入射させ、干渉縞を得る。参照光波形、デジタルミラーデバイスの変調パターン、二次元ディテクタで検出した干渉縞パターンを含み、未知パルスの波形をパラメータとしたモデルを構築する。実験による測定データを二次元ディテクタで得た画像とし、その画像を最も精度よく再現できるような未知パルス波形を最適化問題として導出する。

(2)100 フェムト秒前後の時間領域、数十光子数程度の信号強度、シングルショット測定、この三条件を同時に満たす実験系を構築するために、フェムト秒ファイバーレーザー光源・高量子効率二次元ディテクタ・デジタルミラーデバイス等を調達した。

フェムト秒ファイバーレーザー光源の構築、二次元ディテクタとデジタルミラーデバイスの動作確認を行った。

これらを統合して機能させるためには最適化計算を行うソフトウェア部分の開発が必要であるので高性能な GPU を調達し、PyTorch ライブラリの持つ確率的勾配降下法の改良版アルゴリズムを採用して物理モデルに対する最適化計算のシミュレーションを行った。

4. 研究成果

開発したシミュレーションの結果を図 1 ~ 3 に示す。SEA-TADPOLE の前提として FROG 測定が高精度に行えていることが必要であるため、図 1 のようなチャープ光パルス波形を想定して理想的な FROG 測定結果を計算したものが図 2 である。図 3 は光パルス波形を知る手段が FROG 測定データ(図 2)しか無いものとし、未知のパルス波形を初期値として可能な限り図 2 に図 3 が近づくように最適化計算を行ったものである。

ここでは確率的勾配降下法の改良版手法として、最もローカルミニマムや鞍点に捕らわれにくい工夫がなされていると考えられる Yogi アルゴリズムを使用した。

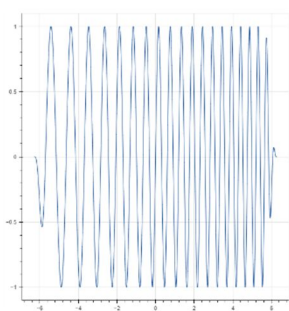


図 1

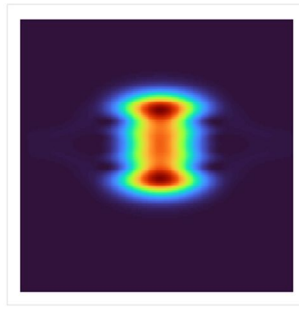


図 1

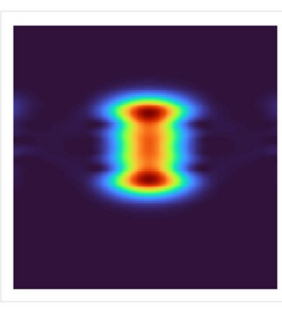


図 3

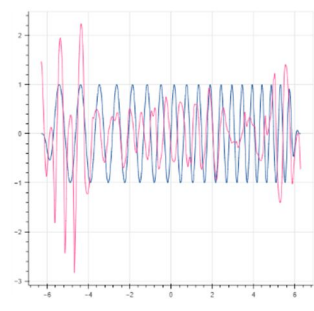


図 4

図 2・図 3 を比較すると、非常によく一致しているように見える。

ところが図 4 に示すように、想定されている理想のチャープパルス波形と、最適化計算により得られた波形を比較しやすく重ねた場合には、周波数などの大まかな傾向は一致しているものの、大きな差異がみられる。ある程度波の形が真の波形に近いところから、位相に関する誤差がまだ大きいものの、パワースペクトル領域で見るとそれほど差が無いように見えるという解釈が図 2 ~ 4 から考えられる。

このことから、現段階の最適化計算には本質的に極めて多数のローカルミニマムが存在し、既存のローカルミニマム回避の工夫では追いつかない構造になっていると考察できる。このような問題が生じる原因として考えられるのは、任意の時刻に任意の電場強度を取りうるような過度に一般的なパラメータを想定して最適化計算を行ったために物理学的にあり得ないようなパラメータ状態も探索空間に含んでしまっている可能性がある。

今後の展望としては物理学的に妥当な状態に限定された電場強度波形のみを表現できるようなパラメータの定義に変更して最適化計算を実行するような改良が考えられる。

展望としては、このような最適化問題をうまく解くことが出来るノウハウを確立することにより、解析的には解けないような新奇な実験系を用いて新しい測定手法を次々に構築していくことが出来るようになることが考えられる。個別の測定系と個別のアルゴリズムではなく、より一般性のある枠組みの下で広範な測定手法を確立できれば新たなパラダイムが生まれることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------