



令和元年6月17日

電気通信大学

Tel : 042-443-5019 (広報係)

マルチ光コムのコヒーレント制御性を活用した新しい光制御技術を開発 ～高機能光源、分光計測、材料開発などへの適用に向けて～

ポイント

- 複数の光コム有位相差を精密に制御して重ね合わせるにより、光コムパルスの間隔波形を、偏光状態まで含めて任意かつ高速に変調する技術を開発した。
- 自在なコヒーレント制御が可能な高機能光源や、高感度・高精度・多彩な対象の分光計測、材料開発などへの応用が期待される。

JST戦略的創造研究推進事業において、電気通信大学の美濃島 薫 教授、浅原 彰文 助教らは、光周波数コム（光コム）の非常に高い位相制御性（コヒーレント制御性^{注1)}）を積極的に利用することで、複数の光コム（マルチ光コム）を用いた新しい光の操作・制御技術を開発しました。

光コムは、パルス光の繰り返し周波数^{注2)}と位相が極めて精密に制御された超短パルス^{注3)}レーザーで、周波数標準、距離測定、分光計測、イメージング、センシングなどの様々な分野において応用が広がっています。光コムは非常に高いコヒーレント制御性を本質的に有していますが、この性質はこれまで十分に利用されていませんでした。この性質を活用できれば、光コム自体の自在なコントロールや光波制御、新しい計測技術の開発などが可能になると考えられます。

そこで、コヒーレント制御性に焦点を当て、従来の適用範囲を大きく超える新たな制御技術の研究に取り組みました。光コム有位相制御の原理実証として、偏光^{注4)}制御に着目し、マルチ光コムを用いて任意の偏光状態を高速・高精度に生成して、その状態を検出する実験を行いました。複数の光コムを空間的・時間的に重ね合わせると、その位相差に応じて、合成波パルスの偏光状態は、直線偏光、楕円偏光、円偏光などのさまざまな状態になります。実験の結果、マルチ光コム各パラメータを適切に設定することにより、超短パルス列の任意の偏光状態を任意の周期で変えられる「偏光変調コム」を生成することに成功しました。具体的には、4ミリ秒の周期で4種類の偏光状態を繰り返す光コムや、18ナノ秒の周期で2種類の偏光状態が超高速スイッチングする光コムなどを生成し、測定評価を行いました。

コヒーレント制御性の活用は、偏光変調だけにとどまらず、さらに広い範囲への展開が可能であり、自在な制御が可能な高機能コヒーレント光源や、高感度・高精度・多彩な対象の分光計測、材料開発などへの応用が期待されます。

本研究成果は、2019年6月13日に応用物理学会の電子ジャーナル「Applied Physics Express」で公開されました。

本成果は、以下の事業・研究プロジェクトによって得られました。

JST戦略的創造研究推進事業 総括実施型研究（ERATO）

研究プロジェクト：「美濃島 知的光シンセサイザプロジェクト」

（グラント番号：JPMJER1304）

研究総括：美濃島 薫（電気通信大学 情報理工学研究科 教授）

研究期間：2013年10月～2020年3月

本プロジェクトは、光波の時間、空間、周波数、位相、強度、横モード、偏光などあらゆるパラメータを自在に操作でき、様々な応用に使えるところまで進化した知的光源を開発し、その未踏な応用分野を開拓することを目標としています。

<研究の背景と経緯>

光周波数コム（光コム）は、時間領域で見ると、一定の時間間隔で繰り返し発せられる超短パルス列であり、周波数領域で見ると、その光の周波数ごとの強度分布（スペクトル）は櫛（Comb：コム）のように多数の鋭い櫛歯から構成されています（図1）。光コムは、超精密、高分解能、広ダイナミックレンジ^{注5)}、超高速などの特長があり、周波数標準、距離測定、分光計測、イメージング、センシングなどの様々な分野において応用が広がっています。

光コムは、非常に高い位相制御性（コヒーレント制御性）を有している光源ですが、上記の応用と比較すると、これまでこの制御性は十分に活用されていませんでした。本研究では、この高いコヒーレント制御性に焦点を当て、従来の適用範囲を大きく越えて積極的に活用することで、光コムの新たな応用可能性を提示することに取り組みました。

光コムの基本的な制御パラメータとしては、繰り返し周波数 f_{rep} とキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} の2つがあります（図1）。 f_{ceo} と隣り合うパルス間のキャリアエンベロープ位相差 ϕ_{CEP} が下式のような関係であることは、光コムの基本特性としてよく知られています。従って、 f_{ceo} を制御すれば、パルス列の ϕ_{CEP} が制御できます。

$$\phi_{\text{CEP}} = 2\pi f_{\text{ceo}} / f_{\text{rep}}$$

さらに、複数の光コム（マルチ光コム）を位相同期して、ひとつのシンセサイザ光源システムとして扱うことによって、より多彩な応用に適用することができます。マルチ光コムでは制御できる周波数パラメータが増加し、オフセット周波数や繰り返し周波数のそれぞれの差に相当する Δf_{ceo} や Δf_{rep} を適切に設定することが重要になります。特に Δf_{ceo} は、2つの光コムにおけるパルスペア間の位相差（相対CEP）制御に関係しており、例えば両者の f_{rep} が同じ場合、相対CEP（ $\Delta\phi_{\text{CEP}}$ ）は下式のように表わせます。

$$\Delta\phi_{\text{CEP}}(t) = 2\pi \Delta f_{\text{ceo}} t$$

この式は、2つの光コムの相対CEPが Δf_{ceo} 制御を介して、高速に精密かつ任意に変調できることを示しています。

<研究の内容>

本研究では、上記のような光コムのコヒーレント制御性の有用性を実証するため、マルチ光コム周波数パラメータを制御することによって、任意の偏光変調が可能な光コムの生成および検出実験を行いました。

図 2 に、実験の概要を示します。図 2 (a)のように、 f_{rep} が同じで偏光の直交した 2 つの光コムを重ね合わせると、合成波の偏光はそれらの相対 CEP ($\Delta\phi_{\text{CEP}}$) に対応して直線偏光や楕円偏光などさまざまな状態になります。この偏光状態は、2 つの光コムの位相差 Δf_{ceo} を制御することによって、任意に制御できます。図 2 (b)は、偏光を変調した光コムを生成するための実験システムです。1 台の光コム (中心波長は約 1560 nm、 f_{rep} は約 56.5 MHz) の出力は、音響光学変調器 (AOM) を通すことにより、 f_{ceo} が Δf_{ceo} だけ異なる 2 つの光 (0 次光と 1 次回折光) に分かれます。これらは、 f_{rep} が同じで、可変な Δf_{ceo} を持つ 2 つの光コム (光コム 1 と光コム 2) とみなせます。ここで、 $\Delta f_{\text{ceo}} = f_{\text{AOM}} - n \cdot f_{\text{rep}}$ で、 f_{AOM} は AOM に印加される周波数、 n は整数です。2 つの光コムの強度が同じになるように調整し、偏光を直交させた状態で空間的・時間的に重ね合わせることによって、偏光が Δf_{ceo} に従って任意に変調された「偏光変調コム」を生成しました。次に、図 2 (c)の実験システムを用いて、偏光変調コムのコヒーレント検出実験を行いました。 f_{rep} が 1002 Hz だけ異なるもう 1 台の光コムをローカルコムとして使用し、いわゆるデュアルコム分光^{注 6)} 測定を適用しました。表 1 に、3 つの光コム周波数パラメータを示します。ローカルコムの偏光を 45° 傾けた直線偏光にした状態で、ビームスプリッタ (BS) で偏光変調コムと空間的に重ね合わせ、垂直および水平方向のインターフェログラム^{注 7)} を検出することで、合成波の偏光情報を取得しました。実際に Δf_{ceo} を変えて測定した結果を、図 3 および図 4 に示します。

図 3 は、 $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}} / 4$ ($= 250$ Hz) という条件に設定した時の結果で、図 3 (a)に示すように、インターフェログラムの検出周期 ($= 1/\Delta f_{\text{rep}}$) ごとに、偏光変調コムを構成する 2 つの光コムの位相差 $\Delta\phi_{\text{CEP}}$ が $\pi/2$ ずつシフトし、合成波の偏光が変化しています。その結果、図 3 (b)のように、特徴的な強度変調がかかった 4 回周期 (4 ms 周期) のインターフェログラムが観測されました。それらを拡大し、周期的に変化する 3 次元インターフェログラムとして再構成した波形が、図 3 (c)です。横偏光、左回り円偏光、縦偏光、右回り円偏光という順序で、偏光変調されていることが分かります。これにより、 Δf_{ceo} を制御することで、偏光変調コムが生成されることを実証しました。

図 4 は、 $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}} / 2$ ($= 501$ Hz) という条件に設定した時の結果です。図 4 (a)は、水平と垂直の直線偏光状態のスイッチングを、また図 4 (b)は、右回りと左回りの円偏光状態のスイッチングを示しています。さらに、 Δf_{ceo} の条件を変えると多彩な偏光の変調やスイッチングが可能であることを実験で確認しました。例えば、 $\Delta f_{\text{ceo}} = f_{\text{rep}} / 2$ ($= 28.3$ MHz) とすると、パルス列の繰り返し周期 f_{rep} での偏光変調、すなわち 28.3 MHz (35.3 ns 周期) で水平と垂直の直線偏光を完全にスイッチするような超高速偏光変調が確認できました。

＜今後の展開＞

本研究では、光コムに非常に高いコヒーレント制御性を積極的に活用することにより、マルチ光コムに新しい光波制御・操作技術を開発しました。複数の光コムに周波数パラメータである f_{rep} 、 f_{ceo} 、 Δf_{rep} 、 Δf_{ceo} を適切に設定することで、相対 CEP を含む任意のパルス列制御を実現しました。この有用性を実証するために、独自の実験システムを用いて偏光変調コムに生成と検出に成功しました。

今回は偏光変調に着目して実験を行いましたが、コヒーレント制御の適用範囲は非常に広く、さまざまな応用が期待されます。今後の展開としては、自在な制御が可能な高機能コヒーレント光源や、高感度・高精度・多彩な対象の分光計測、材料開発などへの適用に向けて、実用化を見据えた研究開発を推進する予定です。

<参考図>

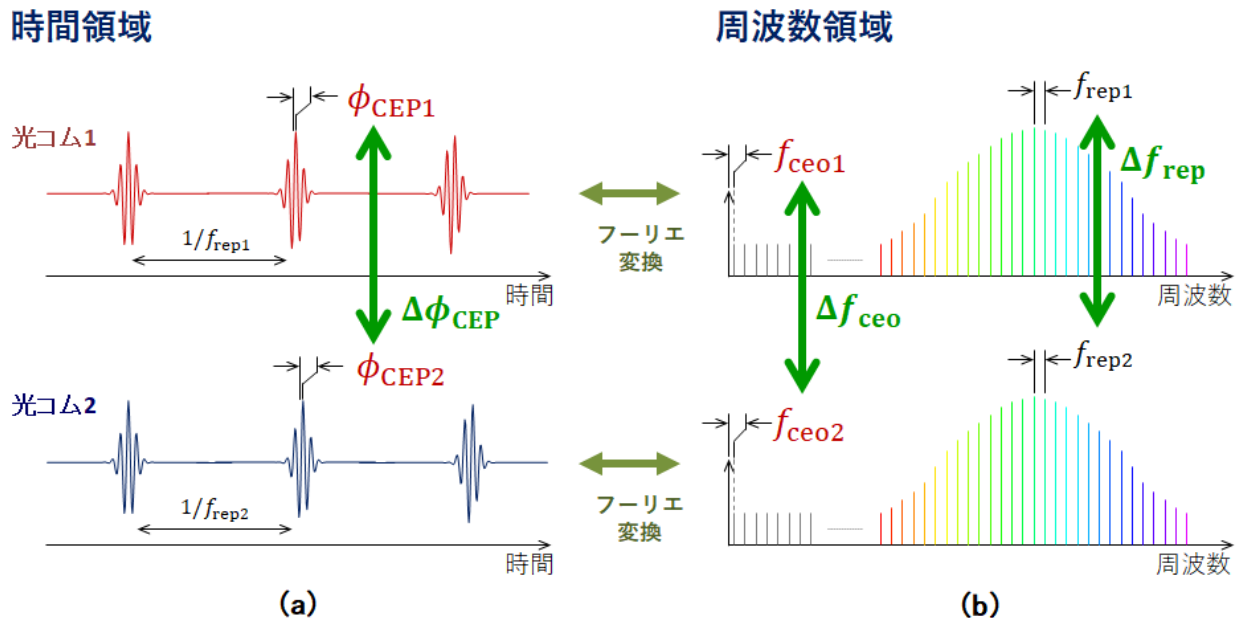


図1 時間領域と周波数領域における光コムの概念図

(a) 時間領域での光コム波形で、一定の時間間隔で繰り返し発せられる超短パルス列である。パルスの時間間隔は、パルスの繰り返し周波数 f_{rep} の逆数である。パルスの電場ピークと包絡線ピークとの位相差を、キャリアエンベロープ位相 ϕ_{CEP} という。

(b) 周波数領域での光コムのスペクトルで、その形状は櫛のような形をしている。周波数領域における櫛1本1本の間隔が繰り返し周波数 f_{rep} であり、この櫛を左端(0 Hz)まで並べた時の余りがキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} である。キャリア波形が1周して元に戻る周期が f_{ceo} で決まる。

(a)と(b)は、フーリエ変換^{注8)}の関係にある。光コムの任意の櫛歯(モード) f_n は、ある整数 n と f_{rep} と f_{ceo} を用いて、 $f_n = f_{\text{ceo}} + n \cdot f_{\text{rep}}$ と表わすことができるため、この2つのパラメータ f_{rep} と f_{ceo} を電氣的に精密制御することにより光コムを自在に制御することができる。また、隣り合うパルス間のキャリアエンベロープ位相差は $\phi_{\text{CEP}} = 2\pi f_{\text{ceo}} / f_{\text{rep}}$ と表わされるため、 f_{rep} と f_{ceo} を制御することにより、パルス波形の位相を自在に制御し操作することができる。

2つの光コムを同期して利用する場合には、制御できるパラメータが増えて、光コム1の f_{rep1} と f_{ceo1} (または光コム2の f_{rep2} と f_{ceo2})、それぞれの差 $\Delta f_{\text{ceo}} = f_{\text{ceo1}} - f_{\text{ceo2}}$ と $\Delta f_{\text{rep}} = f_{\text{rep1}} - f_{\text{rep2}}$ の4つになる。

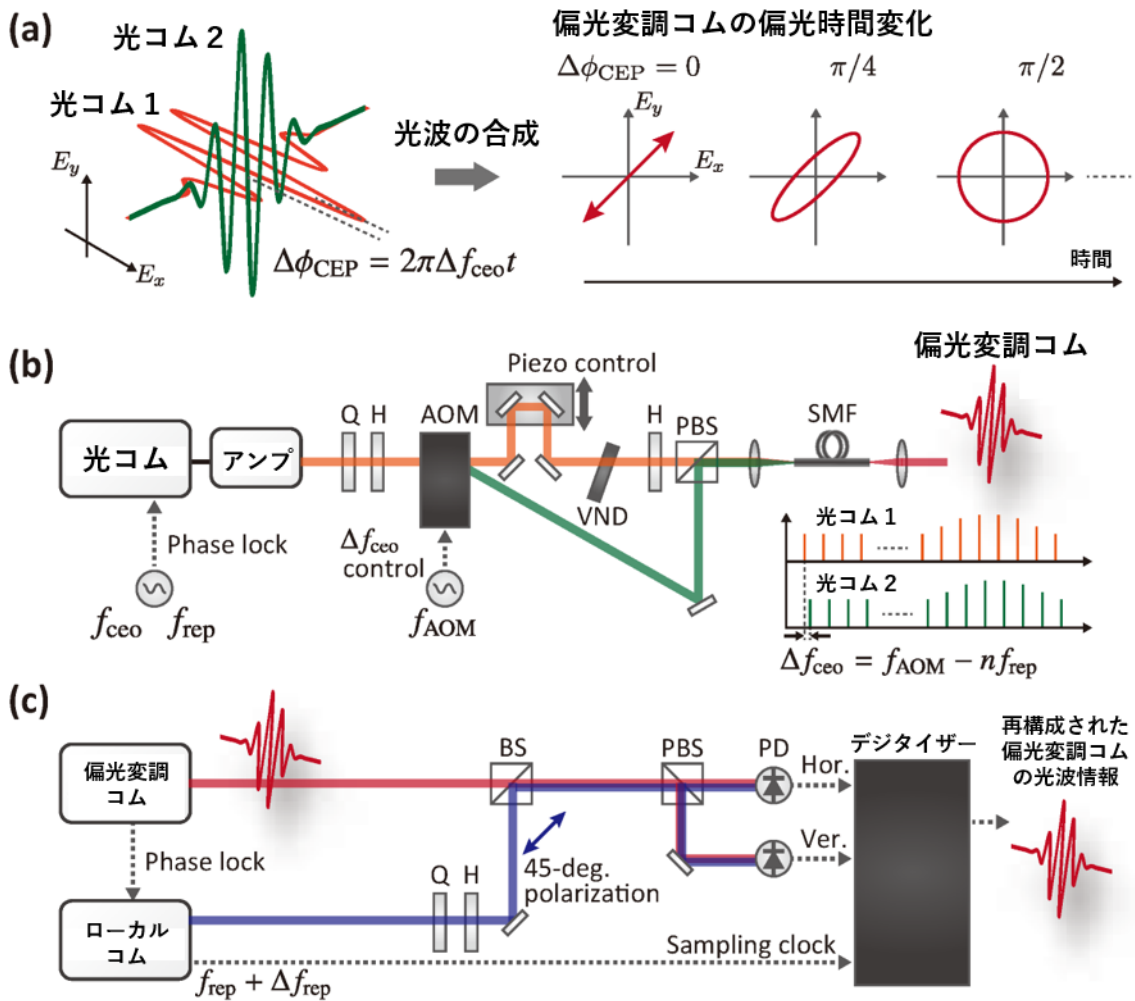


図 2 偏光変調コムの生成・検出実験

(a) 偏光変調コムの概念図

(b) 偏光変調コム生成用の実験システム

(c) 偏光変調コムのコヒーレント検出のための実験システム

AOM : 音響光学変調器、SMF : シングルモードファイバ、PBS : 偏光ビームスプリッタ、BS : ビームスプリッタ、Q : 1/4波長板、H : 1/2波長板、VND : 可変減光フィルタ、PD : フォトダイオード

表 1 実験に使用した 3 つの光コム周波数パラメータ

| | 繰り返し周波数 | オフセット周波数 |
|--------|--|--|
| 光コム 1 | f_{rep} | f_{ceo} |
| 光コム 2 | f_{rep} | $f_{\text{ceo}} + \Delta f_{\text{ceo}}$ |
| ローカルコム | $f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}$ | f_{ceo} |

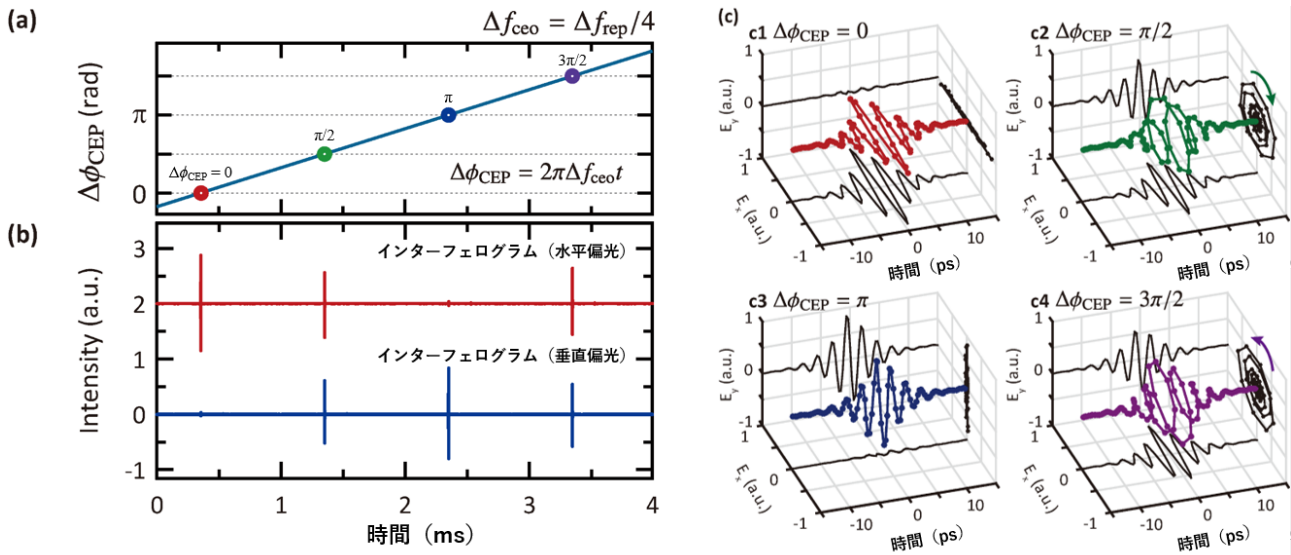


図 3 $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}}/4$ ($= 250 \text{ Hz}$) の時の偏光変調コムのコヒーレント検出結果

- (a) 相対 CEP の時間変化
- (b) 水平方向と垂直方向の同時取得インターフェログラム
- (c) インターフェログラムから再構築した 3 次元波形

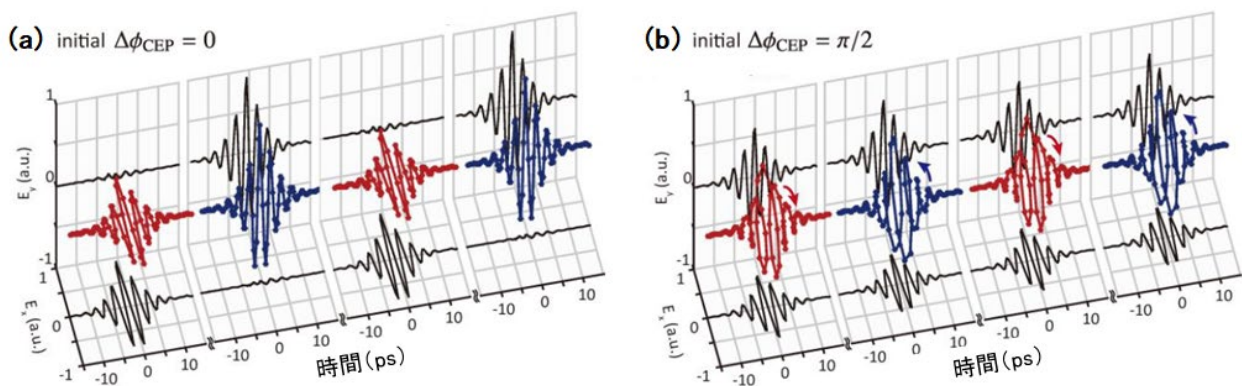


図 4 $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}}/2$ ($= 501 \text{ Hz}$) の時の偏光変調コムの偏光スイッチング

- (a) 水平と垂直の直線偏光状態のスイッチング
- (b) 左回りと右回りの円偏光状態のスイッチング

<用語解説>

注 1) 光コムのコヒーレント制御性

光コム光波の位相を自在に制御できる性質。

注 2) 繰り返し周波数

1 秒間あたりのパルス生成回数。

注 3) 超短パルス

非常に短いパルスで、特に数ピコ秒以下のパルスのこと。

注 4) 偏光

電界または磁界が特定の方向でのみ振動する光。

注 5) ダイナミックレンジ

識別または再現することが可能な信号特性の最大値と最小値の比。範囲と分解能の比。

注 6) デュアルコム分光

繰り返し周波数がわずかに異なる 2 台の光コムを用いて行うフーリエ分光。フーリエ分光とは、2 光束干渉計を用いて得られた光の干渉信号をフーリエ変換して分光分析すること。

注 7) インターフェログラム

干渉測定において、測定光を 2 つの光路に分け、一方の光路長を時間的に変化させて再び結合させると、干渉光の強度は時間の関数の波形になる。この波形をインターフェログラムという。

注 8) フーリエ変換

ある関数を別の周期関数に分解して表わす時に使う手法で、ここでは時間領域のデータを周波数領域のデータに変換するのに利用される。

<論文タイトル>

” Coherent multi-comb pulse control demonstrated in polarization-modulated dual-comb spectroscopy technique”

(偏光変調デュアルコム分光技術で実証されたコヒーレントマルチ光コムパルス制御)

doi:10.7567/1882-0786/ab2991

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

美濃島 薫 (ミノシマ カオル)

電気通信大学 大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻 教授

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1

Tel : 042-443-5758

E-mail : minolab-webmaster-ml@uec.ac.jp

<広報に関すること>

電気通信大学 総務企画課広報・基金・卒業生室広報係

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp