光周波数コムによる光フェーズドアレイの開発

加藤 峰士[1,2)]

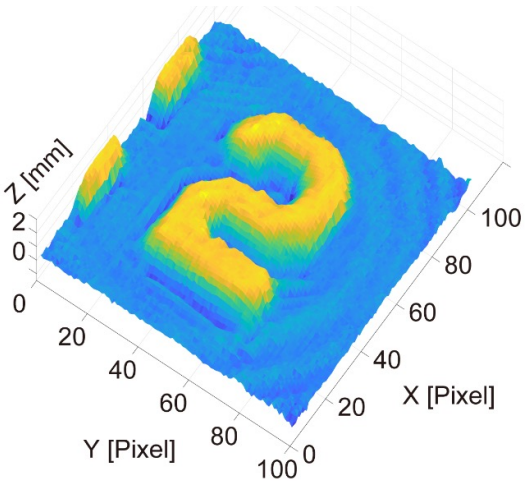
1) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻 特任助教

2) JST, さきがけ「革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出」専任研究者

2022年5月10日

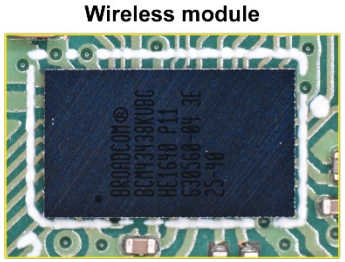
本研究を発案するきっかけ

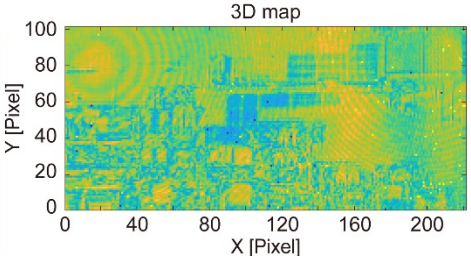
- これまで光周波数コム(光コム)による瞬時3次元計測手法を開発
  - **T. Kato**, et. al, *Optics Express*, **29**(26), 43778-43792, (2021)
  - **T. Kato**, et. al, *arXiv:2006.07801* (2020)
  - **T. Kato**, et. al, *OSA Continuum*, **3**(1), 20 (2020)
  - **T. Kato**, et. al, *Sci. Rep.*, **7**(1), 3670 (2017)
  - ➢ 光コムの制御性を活用した光演算手法を初めて考案
  - ➢ 時間・空間的に広いダイナミックレンジ



光周波数コムを光演算と形状計測へ初めて応用

- 断層像や遠方の物体なども撮影
  - **T. Kato**, et. al, *CLEO2019*, SM2H.4. (2019)
  - **T. Kato**, et. al, *CLEO2018*, STh3L.6. (2018)
  - **T. Kato**, et. al, *CLEO2017*, SF2C.5. (2017)

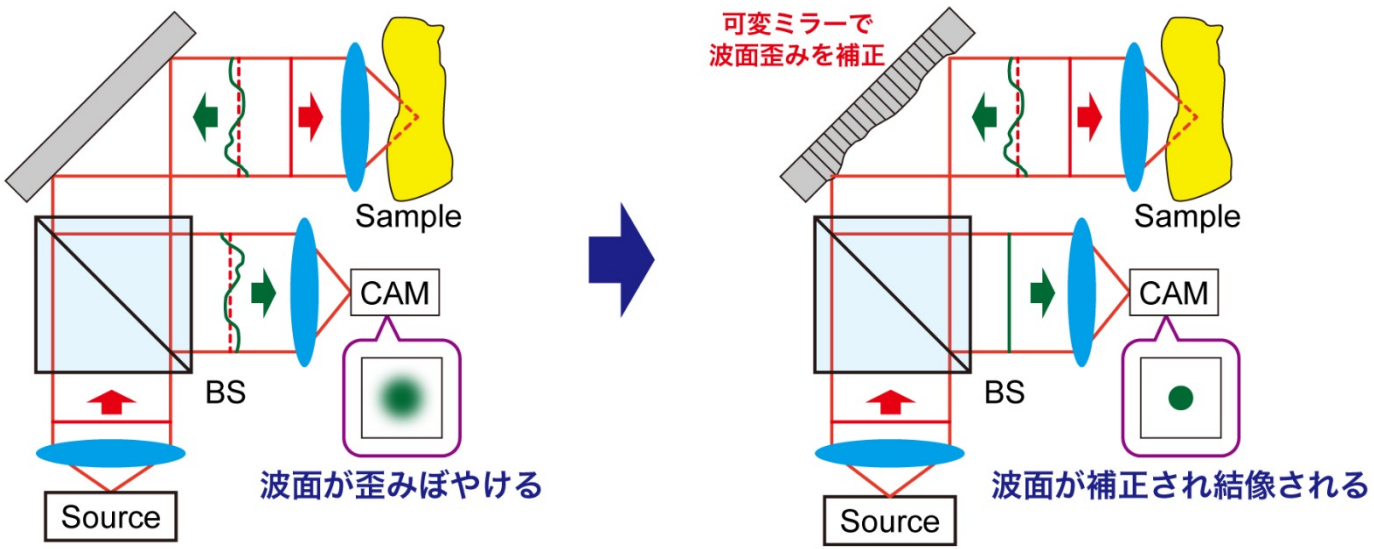




生体組織や空気揺らぎの中の物体は解像度の低下が問題となる

補償光学による像の回復

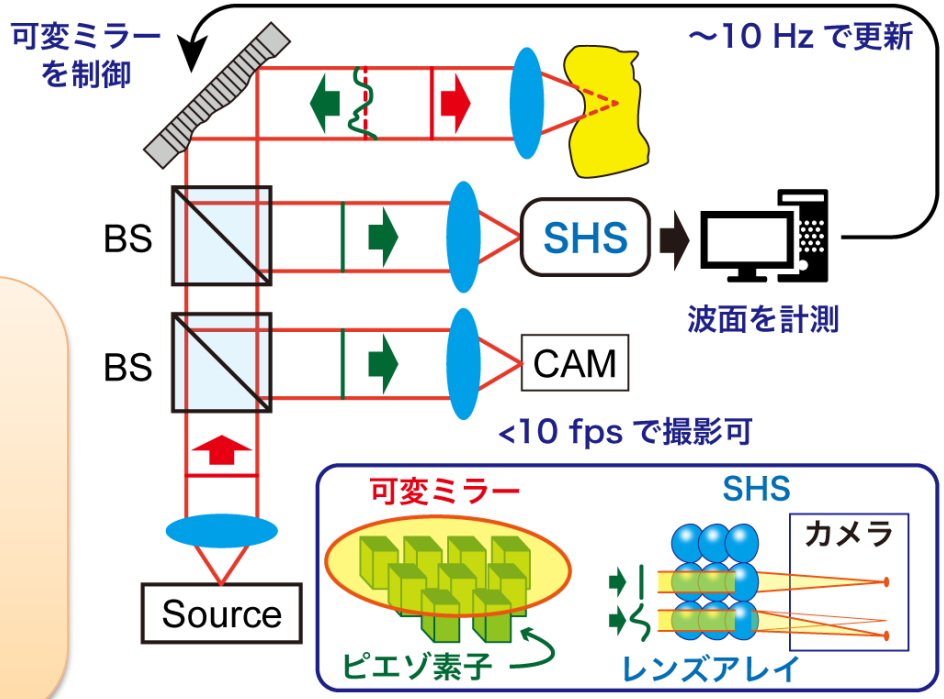
- 歪んだ像を波面制御で補正すればキレイな像に
- 生体組織の顕微観察などでは広帯域光での制御が必要



補償光学　＝　波面計測　＋　波面制御

既存の補償光学の限界

- 波面計測
  - シャックハルトマンセンサ(SHS)
- 波面制御
  - 可変ミラー
  - 空間位相変調器(SLM)

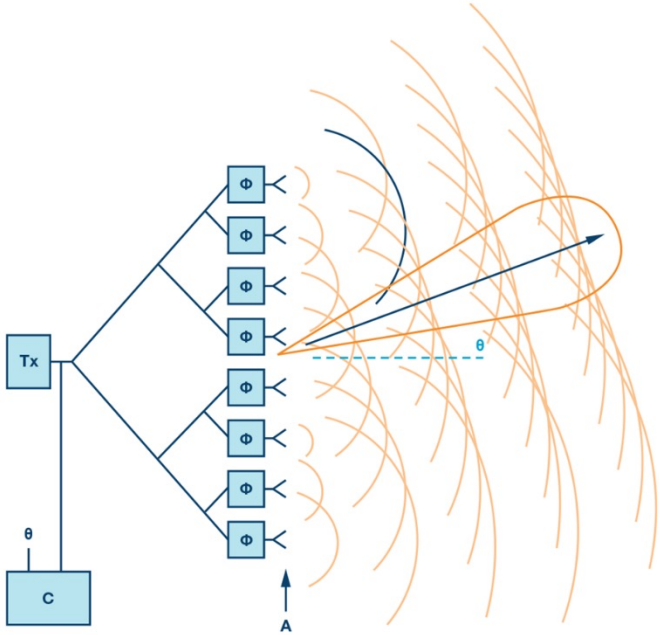


波面計測の応答：~10 Hz
波面制御の応答：~10 kHz

広帯域光で速く応答する技術は？

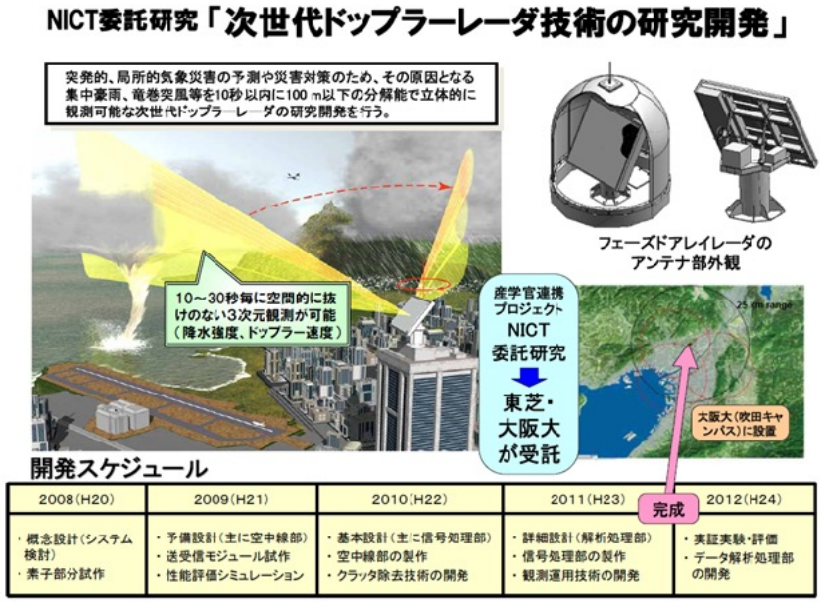
フェーズドアレイ

- アレイ状に配置したアンテナから位相制御した波を出射し、その位相パターンで波の伝搬方向を制御できる技術



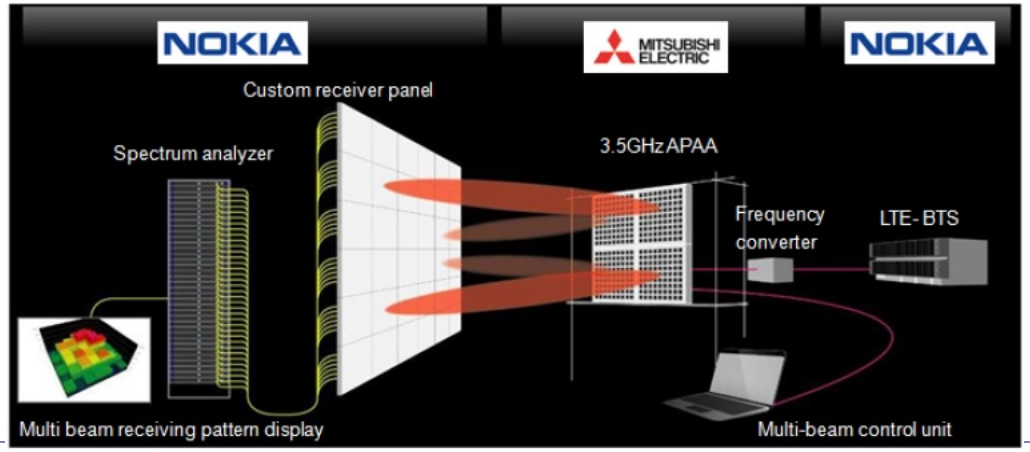
https://www.analog.com/jp/analog-dialogue/articles/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.html

気象観測での応用



https://www.nict.go.jp/press/2012/08/31-1.html

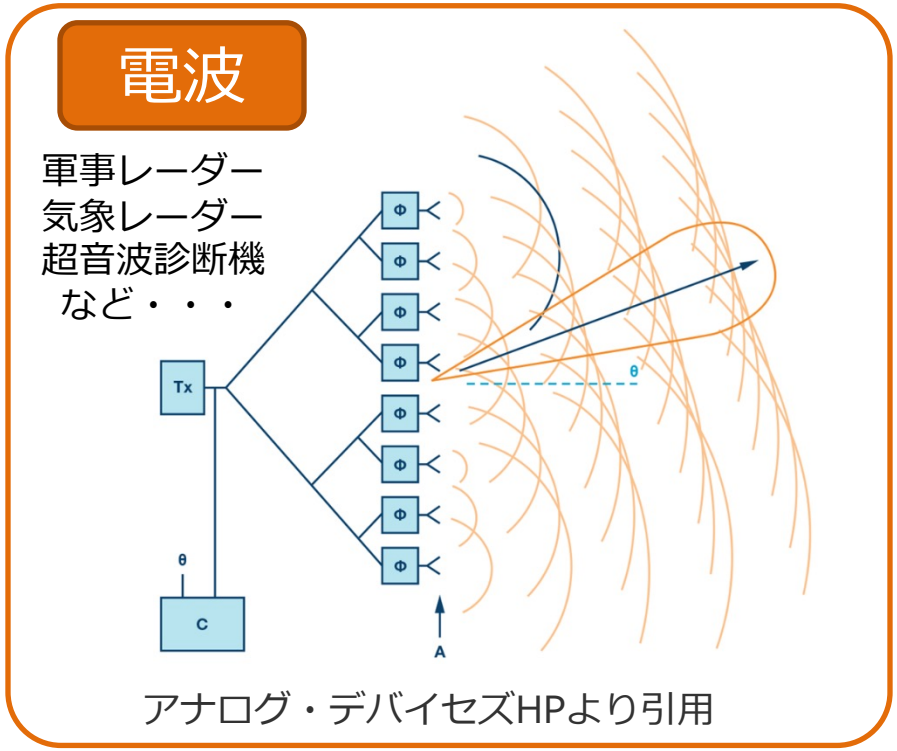
5G通信での応用も進んでいる



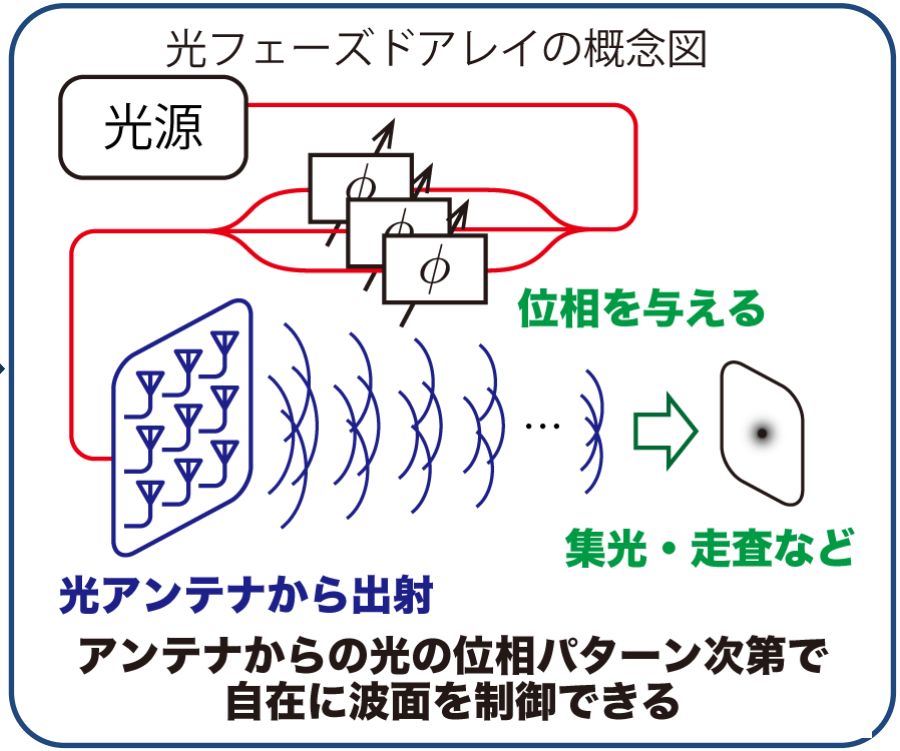
https://www.mitsubishielectric.com/news/2015/0408.html

光フェーズドアレイ（OPA: Optical phased array）

- フェーズドアレイアンテナ
  → アレイ状に配置したアンテナ ＋ 位相制御された電磁波



光版

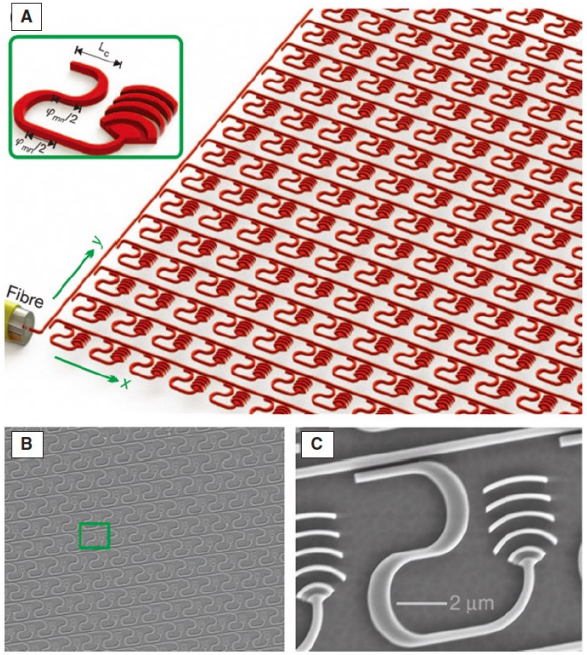


波面計測と波面制御を高速に実現

光フェーズドアレイの現状

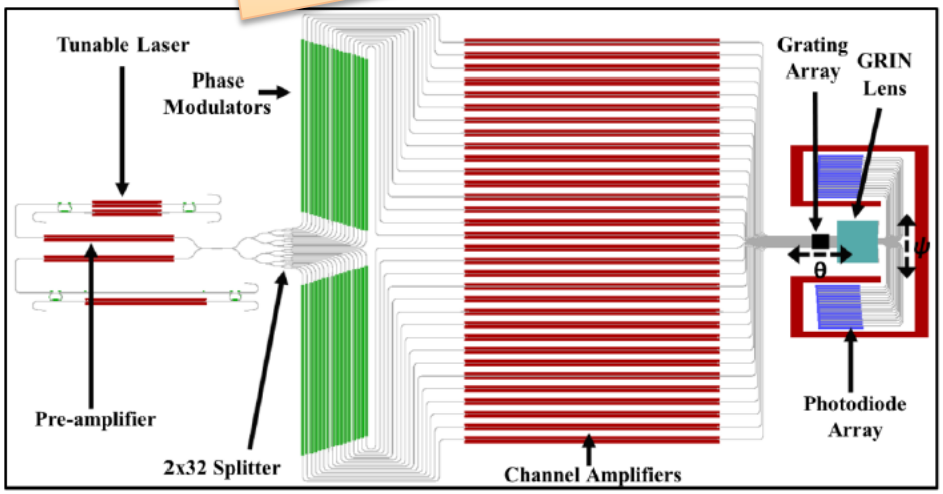
光源～アンテナまでone-chip

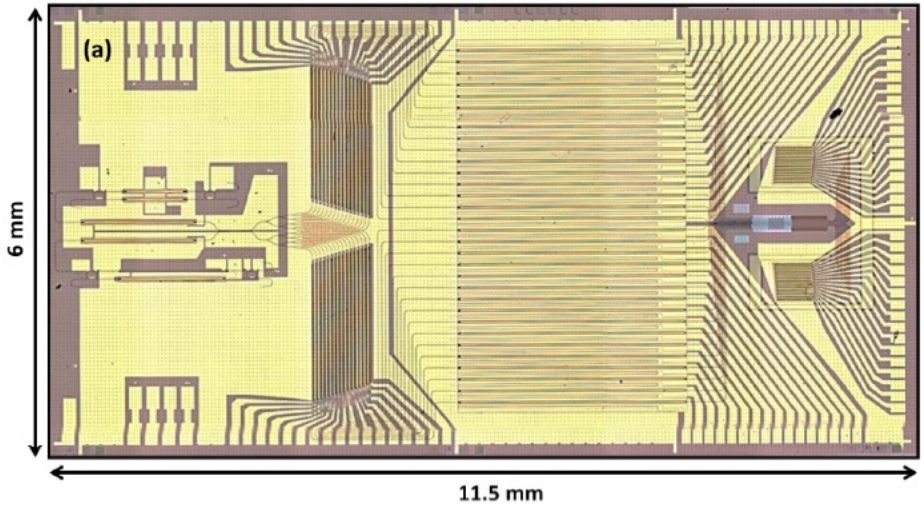
- 光集積回路技術の進歩で高密度な光アンテナが作成可能に



近赤外
1550 nm

J. Sun, E. Timurdogan, A. Yaacobi, E. S. Hosseini, and M. R. Watts, Nature **493**, 195-199 (2013).



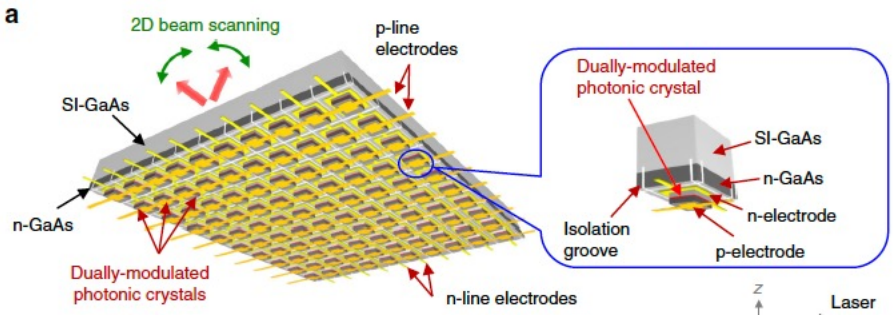


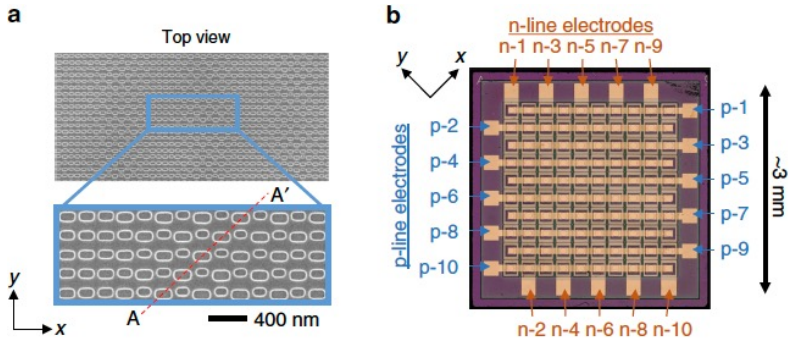
J. C. Hulme, J. K. Doylend, M. J. Heck, J. D. Peters, M. L. Davenport, J. T. Bovington, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, Opt Express **23**, 5861-5874 (2015).

光フェーズドアレイの現状

R. Sakata, K. Ishizaki, M. De Zoysa, S. Fukuhara, T. Inoue, Y. Tanaka, K. Iwata, R. Hatsuda, M. Yoshida, J. Gelleta, and S. Noda, Nat Commun **11**, 3487 (2020).

- フォトニック結晶を制御するタイプ

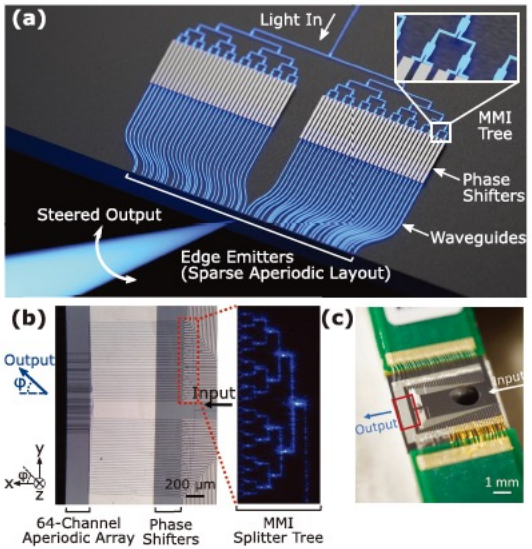




↑　近赤外：970 nm

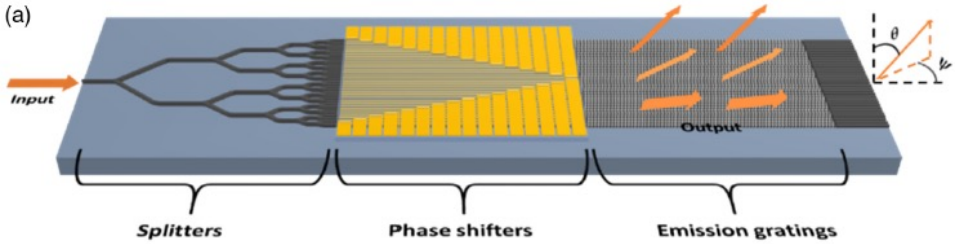
- 帯域も色々と広げている

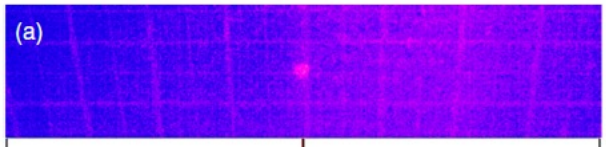
J. Midkiff, K. M. Yoo, J. D. Shin, H. Dalir, M. Teimourpour, and R. T. Chen, Optica **7**, 1544-1547 (2020).



← 青色：488 nm

中赤外：4.6 μm →





M. Chul Shin, A. Mohanty, K. Watson, G. R. Bhatt, C. T. Phare, S. A. Miller, M. Zadka, B. S. Lee, X. Ji, I. Datta, and M. Lipson, Optics Letters **45** (2020).

原理はシンプルなので後は製造出来るかどうか

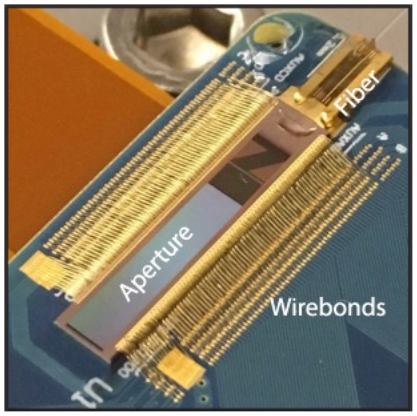
光フェーズドアレイの現状

- LIDARやプロジェクターへの応用に向けて盛んに研究

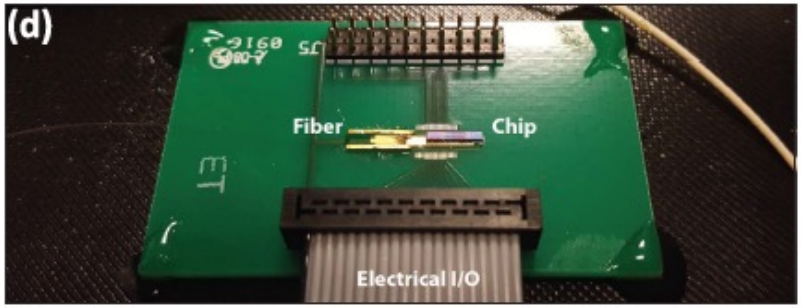
✓ 結合効率が悪いため、**外からの光の波面計測は出来ていない**
  - ➢ LIDARは干渉と信号処理で低パワーでも計測可
  - ➢ Chip上のPDには<-100 dBm ~ 0.1 pWぐらいしか入っていないとか

✓ アンテナ数の２倍程度のパラメータを**独立に校正・制御する**

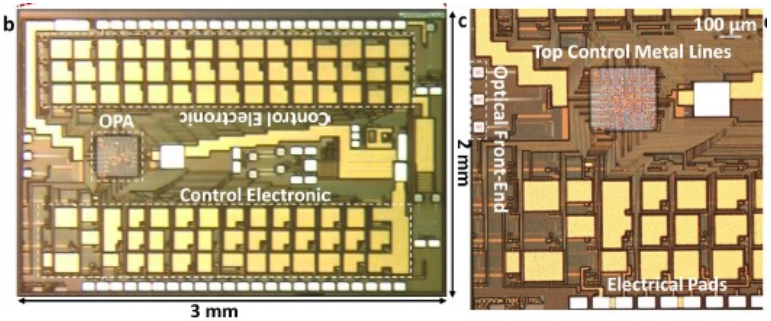
✓ **単色光**のみ。広帯域化するには**回路規模と制御数の増大が不可避**



C. V. Poulton, A. Yaacobi, D. B. Cole, M. J. Byrd, M. Raval, D. Vermeulen, and M. R. Watts, Optics Letters **42**, 4091-4091 (2017).



H. Abediasl, and H. Hashemi, Opt Express **23**, 6509-6519 (2015).



C. V. Poulton, M. J. Byrd, P. Russo, E. Timurdogan, M. Khandaker, D. Vermeulen, and M. R. Watts, Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **25**, 1-8 (2019).

アンテナ数だけ電気回路が増える

少ない制御で双方向動作する広帯域光フェーズドアレイは出来るか？

本研究が目指す大目標

光周波数コムによる
広帯域光フェーズドアレイの実現

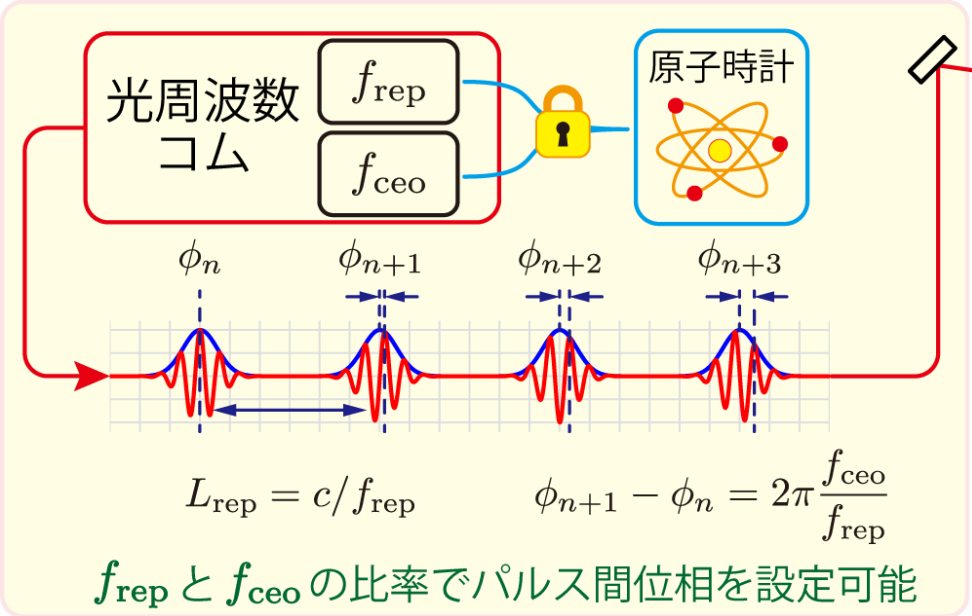
周波数（縦モード）で空間（横モード）を
制御する光技術の確立

光周波数コムを用いた光フェーズドアレイ

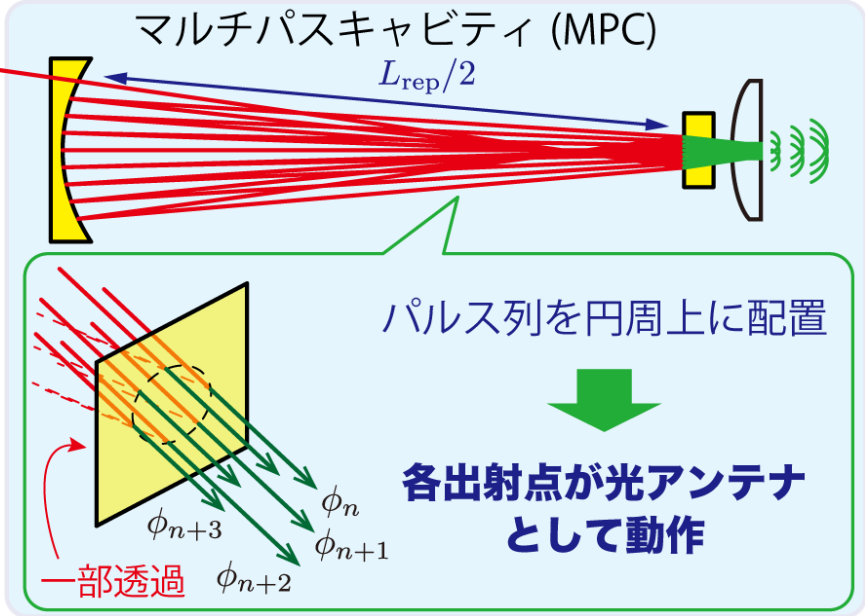
特願2021-137394

➢ 光を直接制御することで、広帯域波面制御を実現

1. 光周波数コムの**２つの周波数制御で位相制御**を実現
2. パッシブな共振器で**光アンテナアレイ**を構築



（光周波数コムによる位相制御）



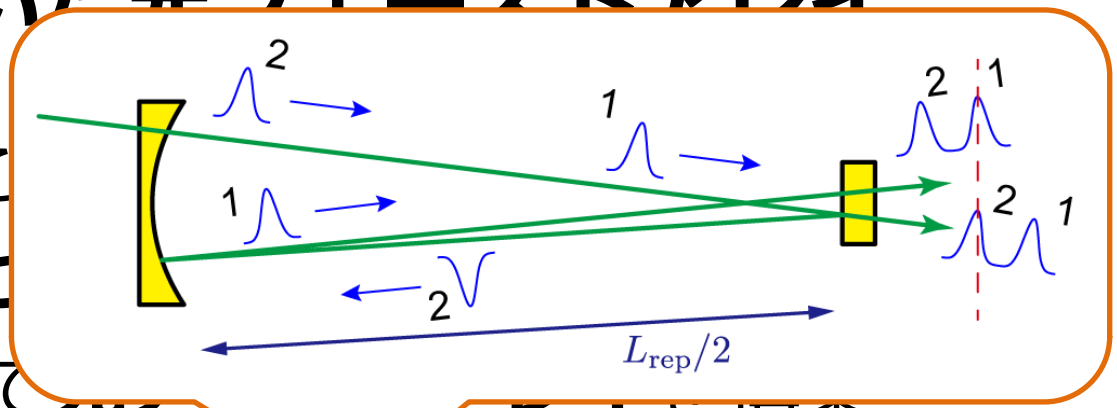
（光アンテナアレイ）

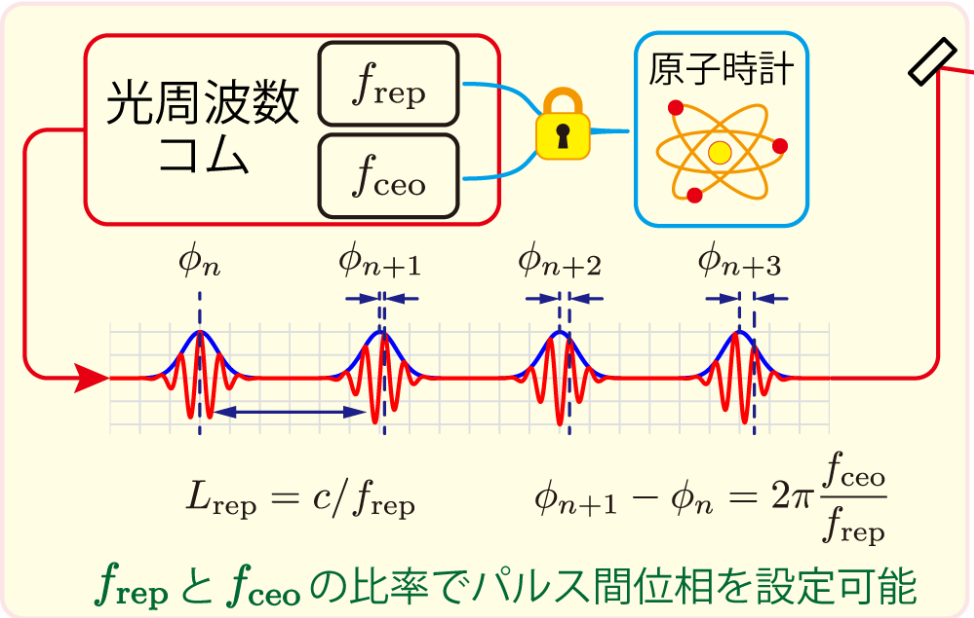
光周波数コムを用いた光フェーズドアレイ

➢ 光を直接制御するこ

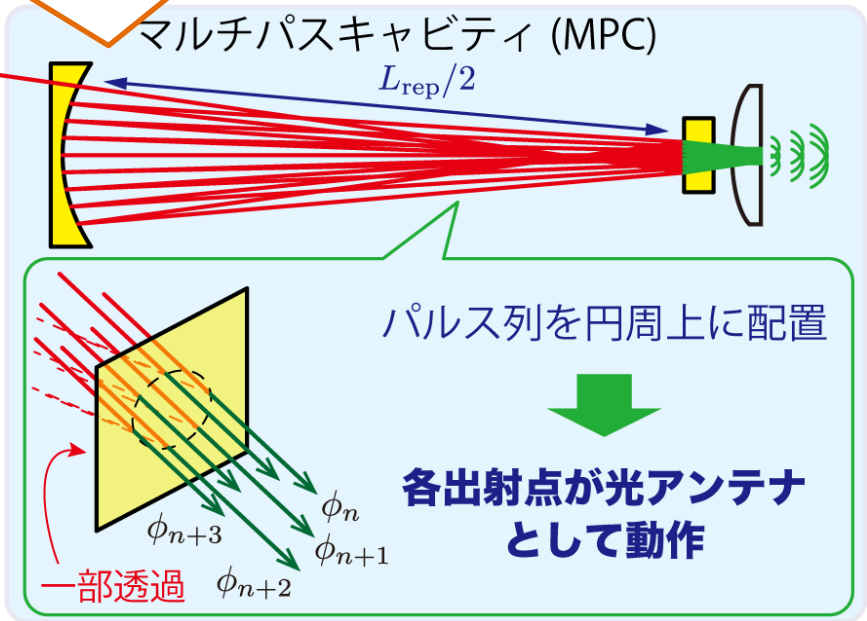
1. 光周波数コムの2

2. パッシブな共振器で





（光周波数コムによる位相制御）

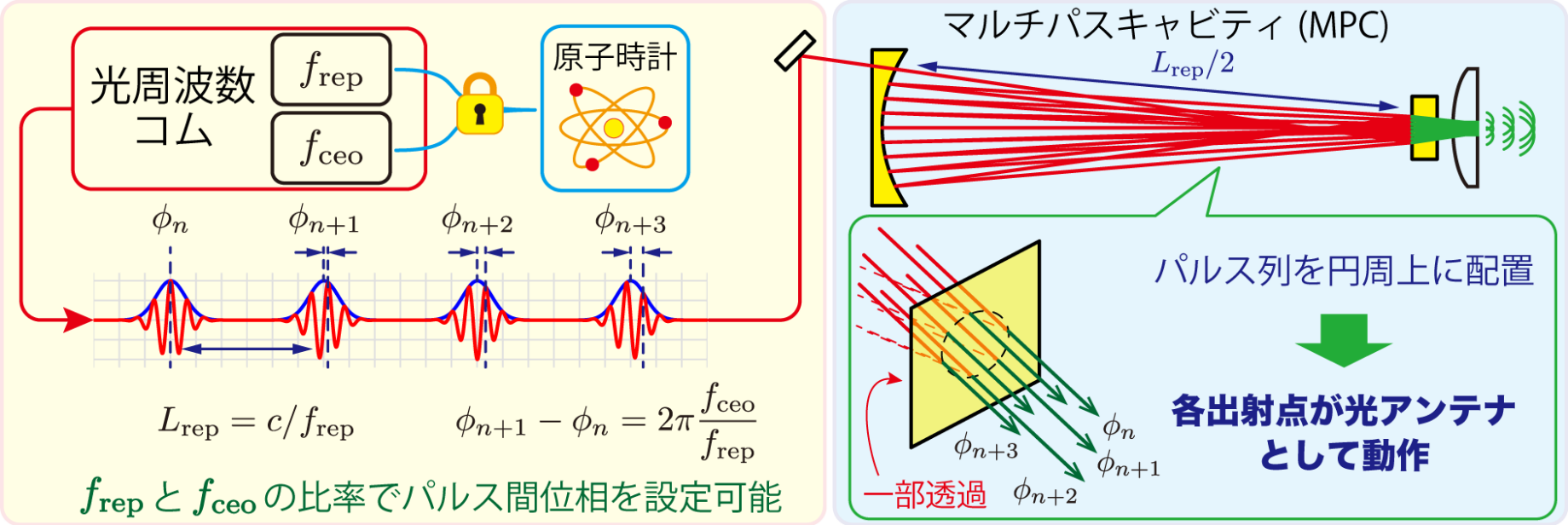


（光アンテナアレイ）

光周波数コムを用いた光フェーズドアレイ

特願2021-137394

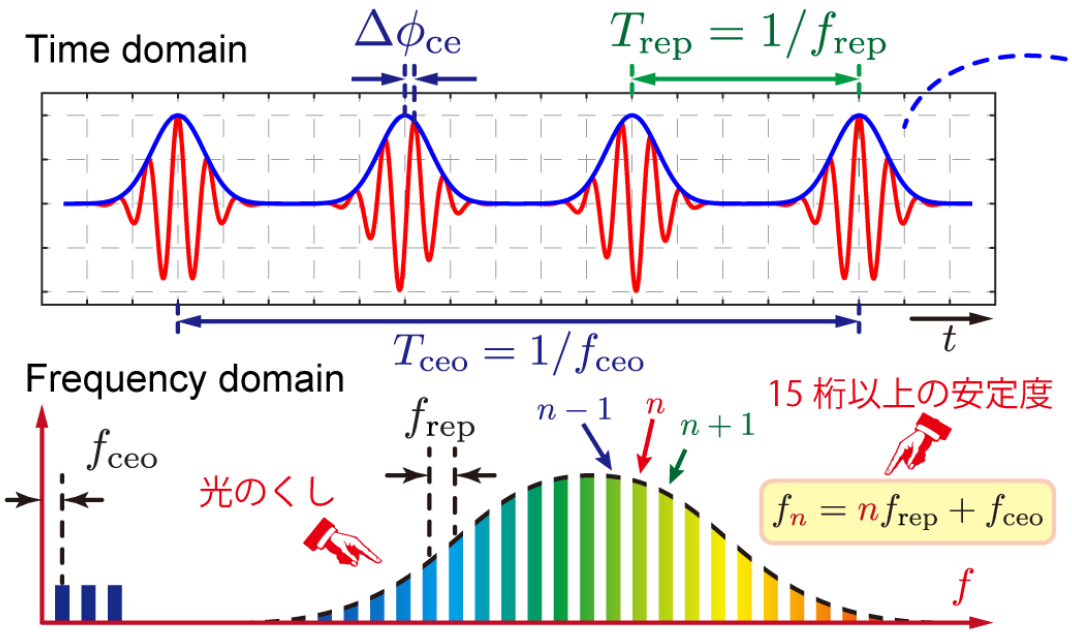
1. 光周波数コムの**２つの周波数制御で位相制御**を実現
2. パッシブな共振器で**光アンテナアレイ**を構築

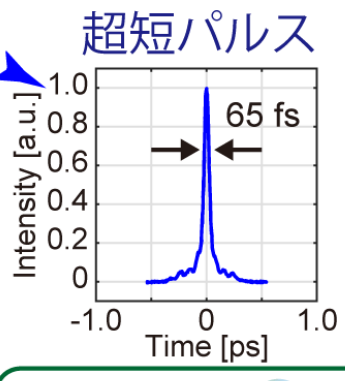


- **高速・高精度・広帯域位相制御 + 自由な高開口度アンテナ配置**
- **光周波数コムの２つの周波数パラメータのみで広帯域に波面制御**

光周波数コム（光コム）

- 高い制御性と高コヒーレント性を持つ超短パルス列





光コムの f_{rep} と f_{ceo} (～MHz) で、光 (PHz) を自在に操れる

光コムを制御するパラメータ

1. f_{rep} ~ T_{rep}
繰り返し周波数

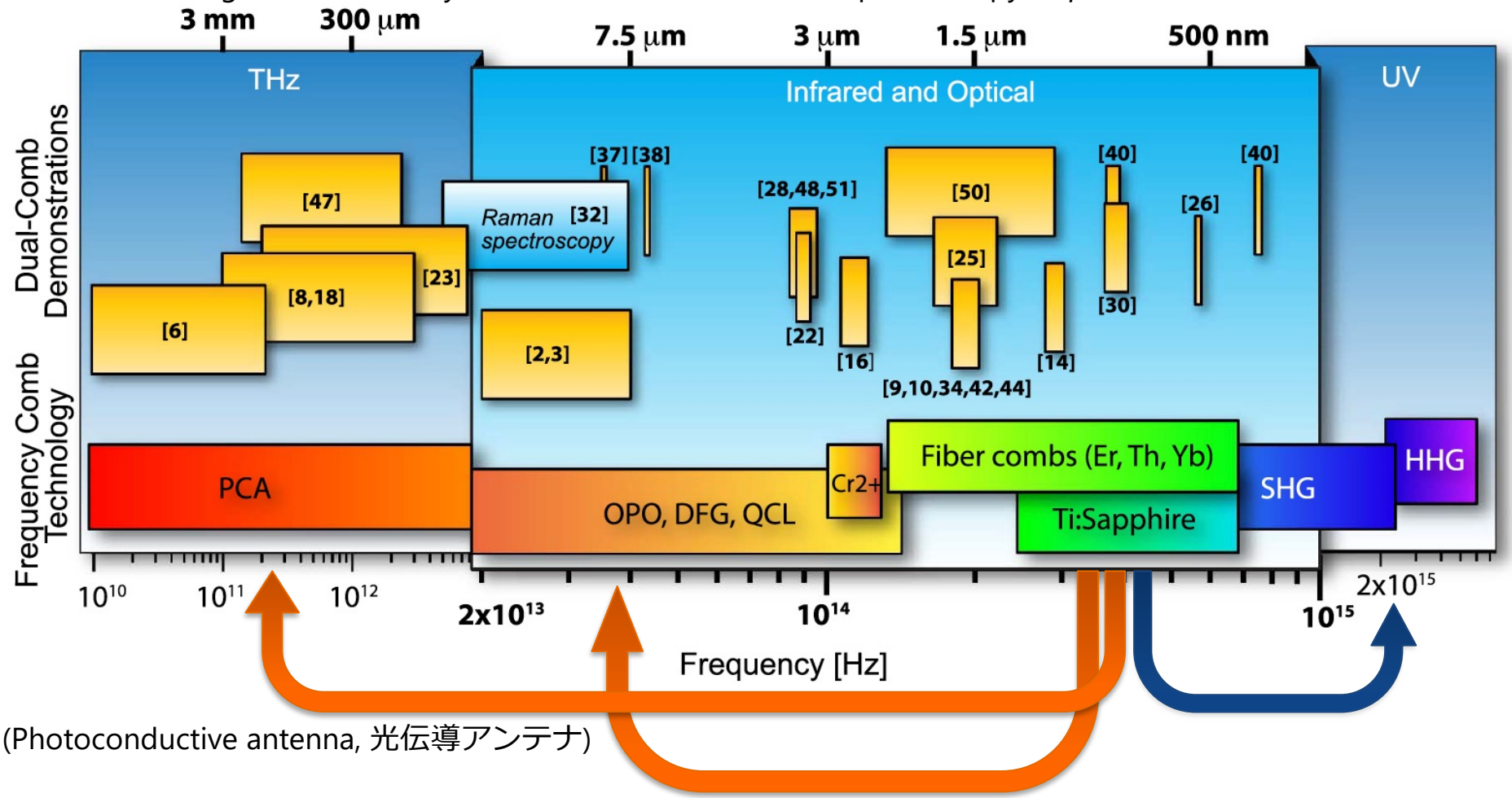
2. f_{ceo} ~ $\Delta\varphi_{ce}$
オフセット周波数

2つの周波数だけで位相制御

光の周波数とキャリア位相を電子工学で自在に操作

光周波数コムがカバーする帯域

I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, "Dual-comb spectroscopy," *Optica*, **3**(4), 414-414 (2016).

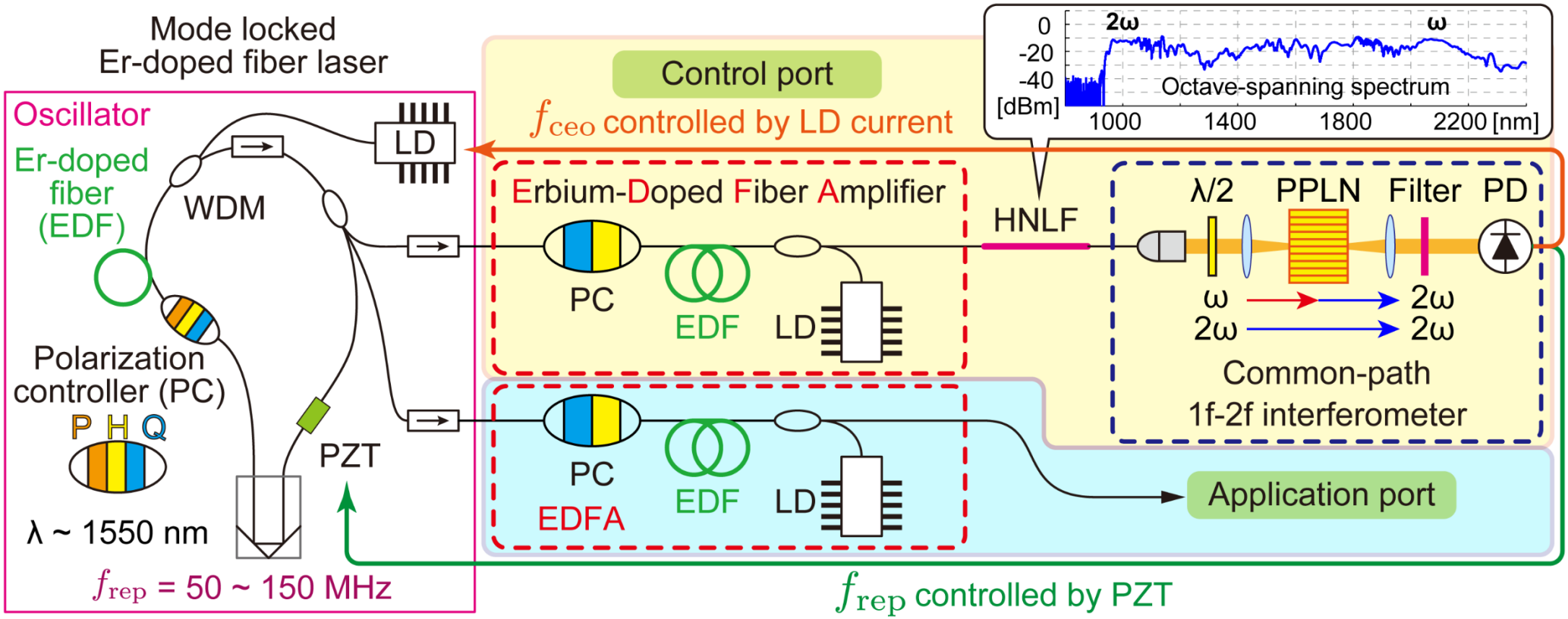


PCA (Photoconductive antenna, 光伝導アンテナ)

OPO (Optical parametric oscillator); DFG (Difference frequency generation); QCL (Quantum cascade laser)

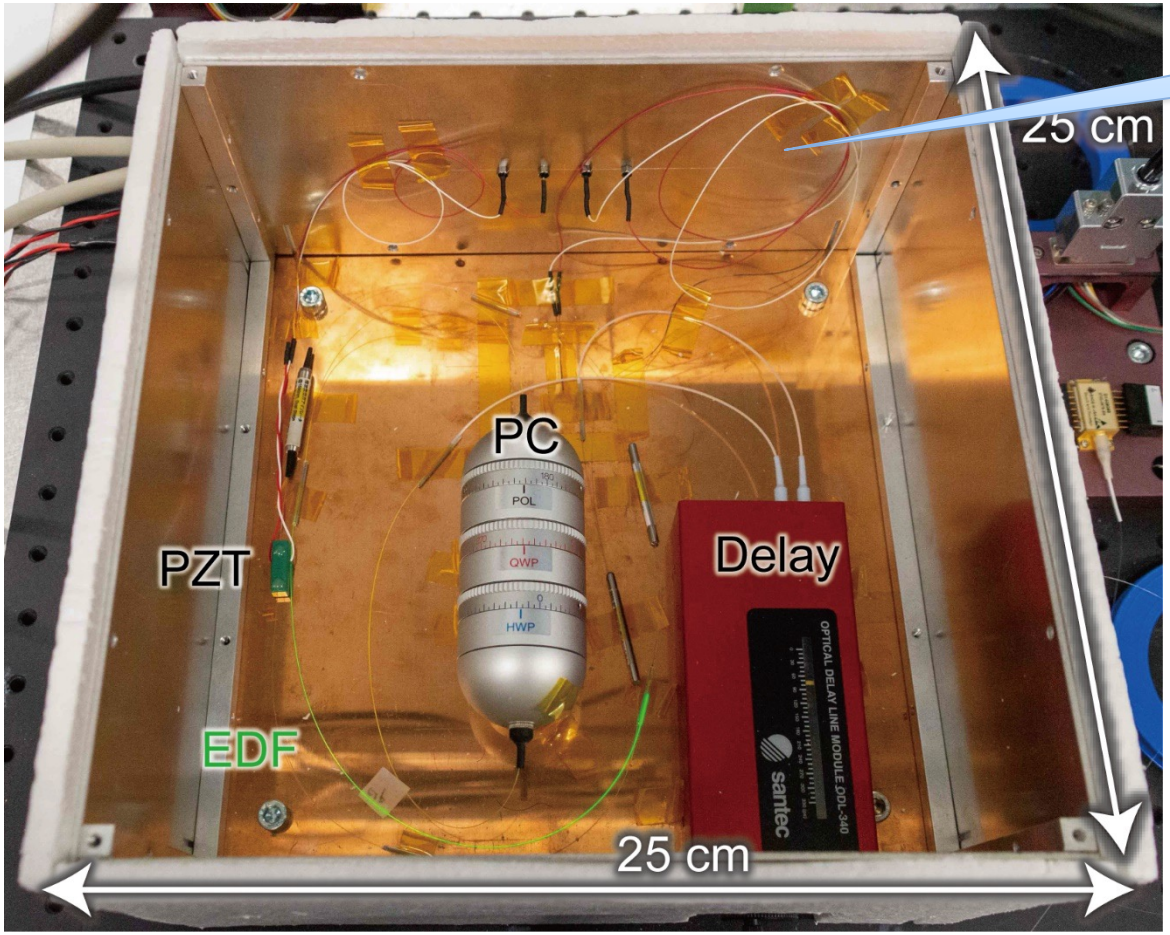
Er:fiber-based frequency comb (standard setup)

マイクロ波基準に位相同期させた光コム



オールファイバ、高い操作性、長期安定なシステム
※近赤外から可視光まで出力できる

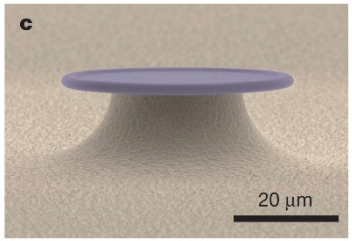
自作 mode-locked Er-doped fiber laser



非線形偏波回転を利用

※Mode-locked fiber laser には様々な方式がある

光コムも色々
- ✓ EOコム
- ✓ Kerrコム etc…



P. Del'Haye, *Nature*, **450**(7173) ,1214 (2007).

Erコムはfrep~50 MHzが標準（長さの国家標準）
200 MHz以上は難しい（Erのゲイン・強度 etc）

光コム光源の多様性が急速に広がっている

光コムによるOPAの特徴

- 光源は広帯域なスペクトルを持つ超短パルスレーザー
  - 従来のCW光ではなく**広帯域**。更にモード同期した光なため **fsパルス**を形成。
  - **非線形現象を直接誘起**でき、多光子励起顕微鏡の光源ともなりうる。
  - 波面の走査速度は繰り返し周波数程度（**MHz ~ GHz**）に到達。

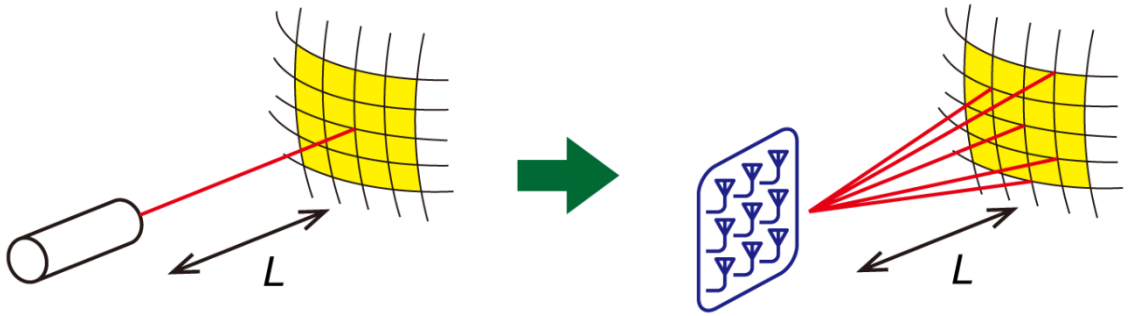
- 光周波数を高安定に制御できる光コムで波面を制御する
  - **原子時計レベルで光周波数を制御**し、その安定度で波面制御可能。→ **高安定(<10^{-11})**
  - 従来の光集積回路方式では原理的に異なる制御手法。→ 従来法では実現不可

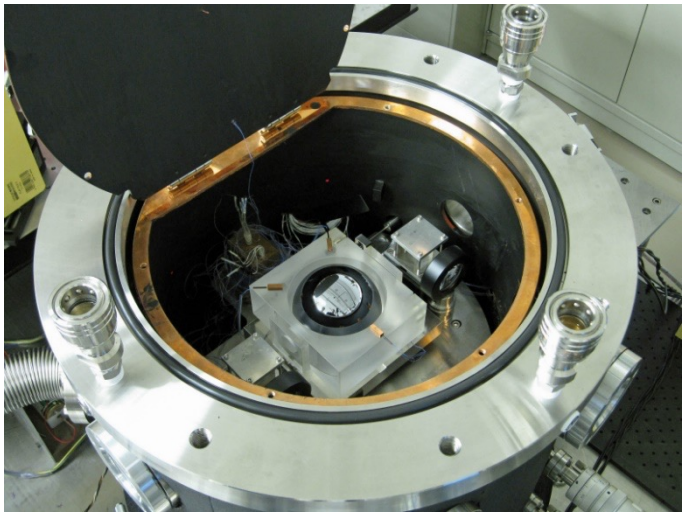
- 光コムを用いた超精密計測手法がそのまま適応可能
  - 光周波数の精密測定でノーベル賞を与えられて以来、**距離・分光分野で幅広く適応**。
  - 距離計測では圧倒的な**ダイナミックレンジを達成（>9桁）** → kmをμmで計測可能。
  - 空気屈折率の補正手法(~10^{-10})も合わせて提案されている → 屋外計測も可能

従来手法とは全く異なる原理で、性能を飛躍的に向上可能。

光フェーズドアレイがもたらす未来

- 超精密３次元測量の実現
  - 光フェーズドアレイで超精密集光点走査（XY軸）
  - 光周波数コムによる絶対距離測定（Z軸）
- 例）シリコン球の形状計測によるアボガドロ定数決定
  - 超精密な３次元スキャンを行えば
    球面までの最短距離を面計測で算出





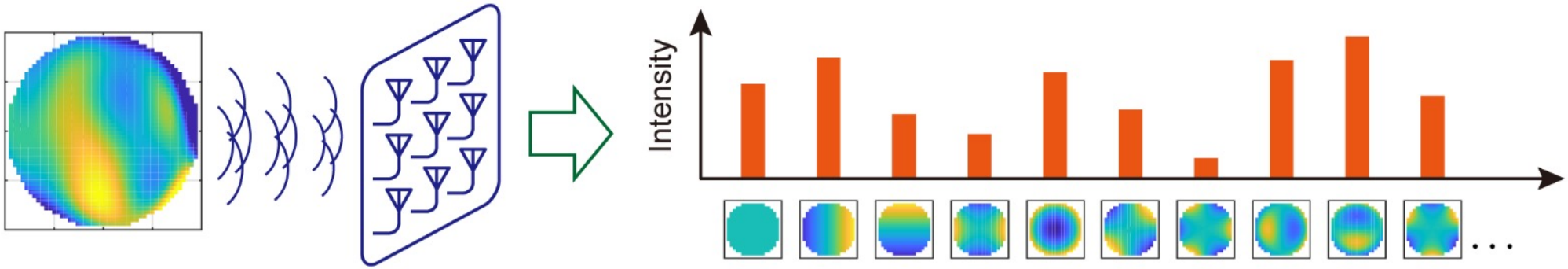
https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/より引用

機械駆動なしの高速・高精度走査は
精密測定に大きく貢献

光フェーズドアレイがもたらす未来

- 補償光学にとどまらない展開が期待

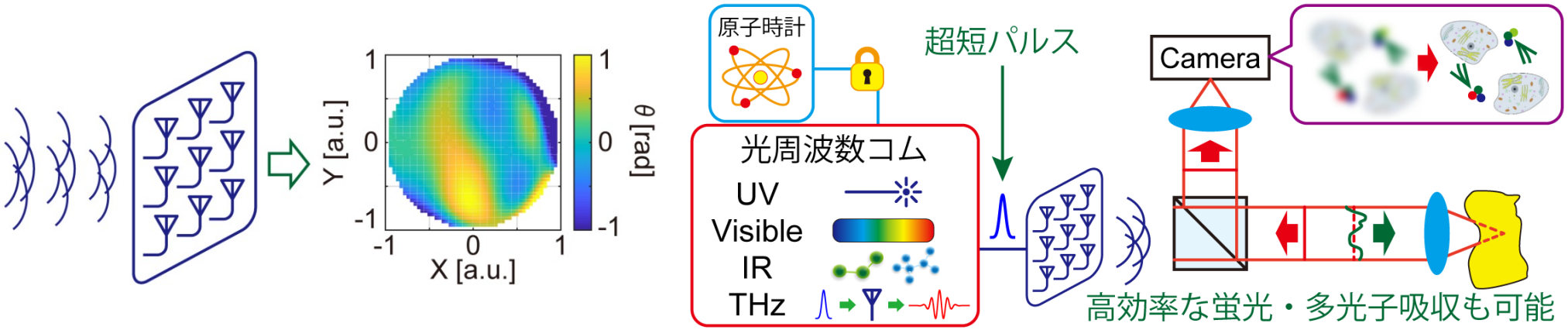
➢ 周波数（縦モード）で空間（横モード）が制御できる
  - 周波数の安定度が空間にも与えられる
  - 極めてきれいな単一横モードが生成可能
  - **横モードの基準**ができる　→　**横モードの分光器**



光通信やデバイス、複雑な光学系等の横モード特性を正確に評価

光フェーズドアレイがもたらす未来

- MHz以上の速度で波面制御が可能
  - 高速任意波面発生器で所望のビームを生成できる
- 幅広い帯域の光周波数コムで動作可能
  - 深紫外～THz領域までの超短パルスで補償光学を実現

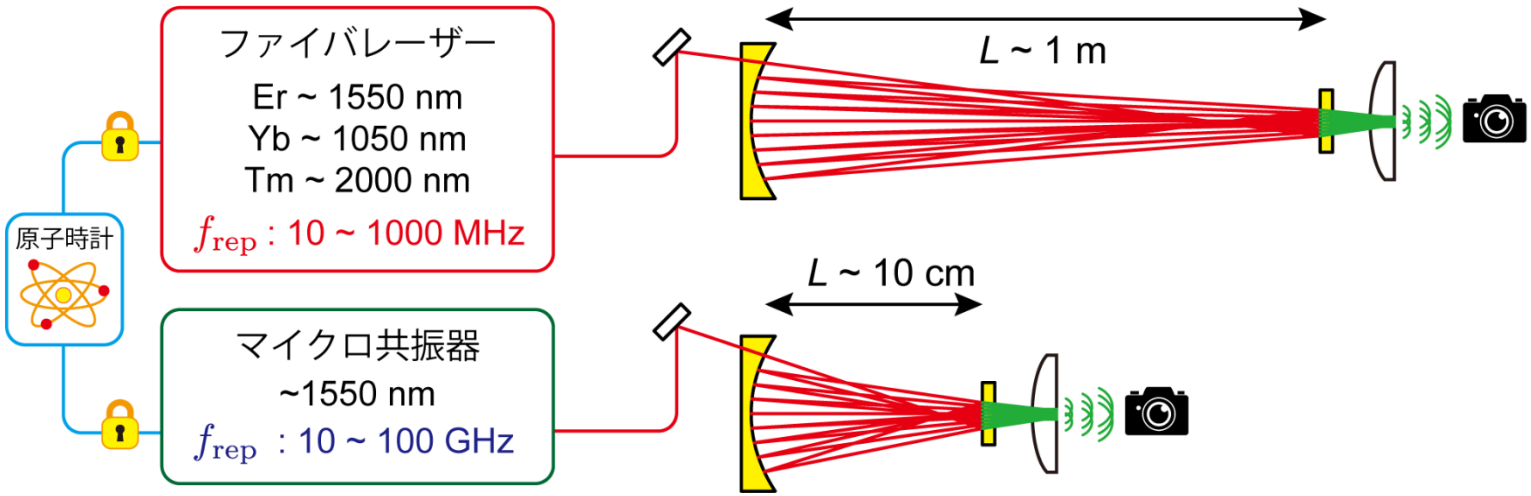


超広帯域・高速補償光学系を実現
⇒生命科学・物質材料分野等に全く新しい知見を与えることが出来る

光アンテナ光学系の最適化と小型化

◆ MPCの間隔は光周波数コムの繰り返し周波数に依存　→　現状では大型

➢ 高繰り返し光周波数コムによって光アンテナ部の小型化が可能



◆ 光アンテナ部からの出射光を干渉させるためのレンズ光学系が複雑

➢ 一体化したモノリシックなマルチレンズアレイで解決可能

高繰り返し光源で、手のひらサイズの光フェーズドアレイも可能

企業への期待

➢ 直近で到達可能な応用用途としては「超高速3D Lidar」が上げられる。

- 現状の3D Lidarはレーザー光をガルバノミラー等で掃引
  - 機械駆動の場合、動作速度は ~kHz 程度。
  - 多数のビームを同時に用いて<Mpoints/s 程度でデータ取得が可能。

✓ 本手法は機械駆動部がなく、超短パルス列によって波面位相を走査

- ◻ 走査速度はMHz~GHzで掃引することになる。

✓ 距離計測は長さの国家標準である「光コム」を使用

- ◻ Lidarの距離分解能より高精度 (~nm)。

- OCTの的な用途
- 蛍光計測用の光源

➢ 実用化のためには…

- **RF制御回路の作り込み** ＆ **最適かつ堅牢な光学系**が必要。
- 使用環境に合わせた作り込みが不可欠（自動車への搭載・生体組織観察）

各要素技術の完成度を高めるため・
応用を見据えた基礎実験のための共同研究

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称　　：波面制御装置及び補償光学装置
- 出願番号　　：特願2021-137394
- 出願人　　：電気通信大学
- 発明者　　：加藤峰士、美濃島薫

お問い合わせ先

国立大学法人電気通信大学
産学官連携センター
産学官連携ワンストップサービス

TEL 042-443-5871
FAX 042-443-5725
E-mail onestop@sangaku.uec.ac.jp