



# 世界初、通信波長の光に共鳴する電子と ギガヘルツ超音波のハイブリッド状態を実現

～超音波を用いた省エネ量子光メモリ素子への応用に期待～

NTT物性科学基礎研究所  
日本大学工学部・生産工学部

## 概要

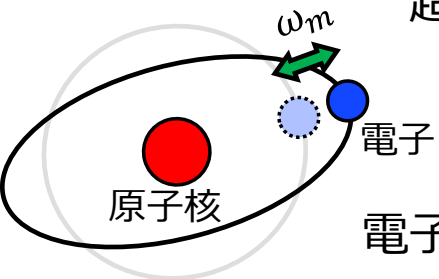
日本電信電話株式会社と学校法人日本大学は、通信波長の光に共鳴する希土類元素を添加した超音波素子を作製することにより、数ミリ秒の長い寿命を持つ光励起電子とギガヘルツ超音波のハイブリッド状態を生成することに成功しました。本成果により、低電圧な超音波励起を用いたコヒーレンスの高い希土類電子の制御が可能となるため、将来的な省エネ量子光メモリ素子への応用が期待されます。

\* 本研究はJSPS科研費のサポートを受けています。

# 概要：電子と超音波のハイブリッド状態



超音波を用いて電子を高速変調



電子と超音波が混ざった状態が生成  
(=ハイブリッド状態)

ハイブリッド状態を実現すれば超音波を用いて電子をコヒーレント操作\*することができる！

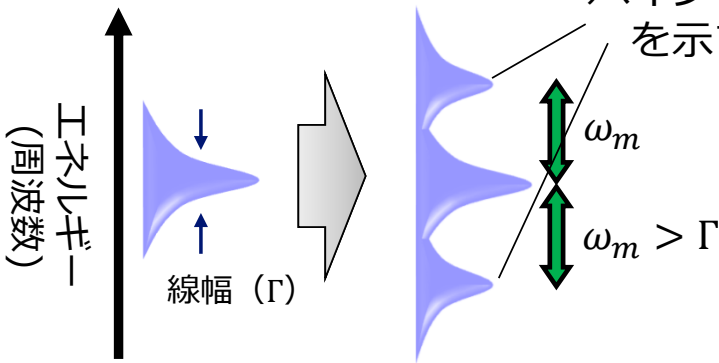
\* 電子の数や位相などの状態操作



量子光メモリ(光量子中継)としての応用に期待

実験的には…

## 電子準位のスペクトル

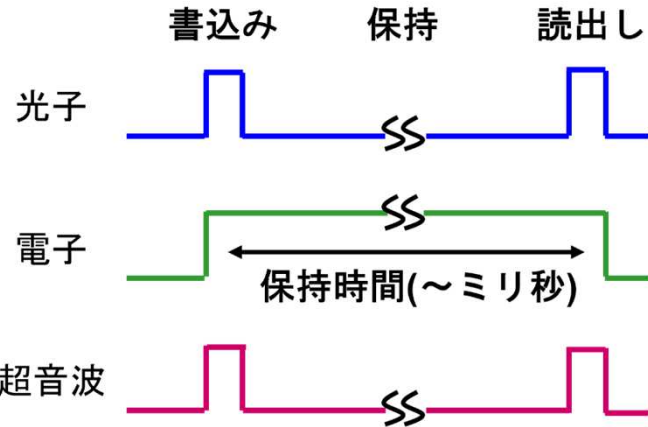
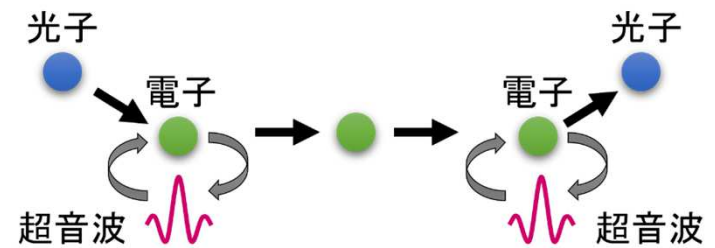


ハイブリッド時のみ光と電子が相互作用



光から電子への情報書き込み操作が可能！

超音波は低電圧で生成できる！ → 省エネ

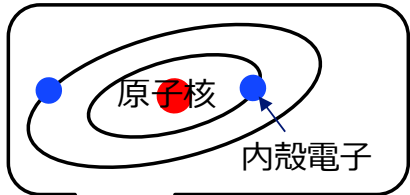


希土類電子は長寿命！

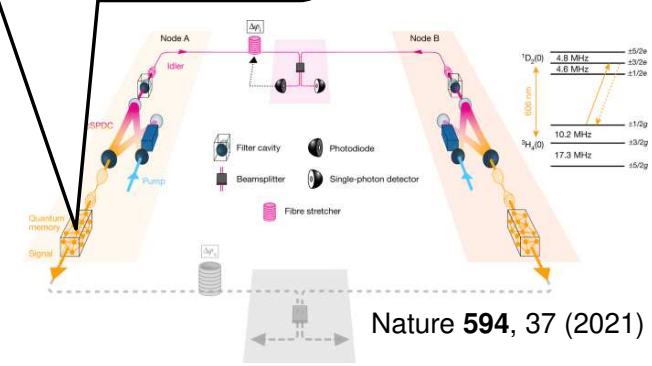
通信波長の光でアクセス可能！

\* 電子の共鳴線幅よりも大きな(高い)周波数で変調する必要有り

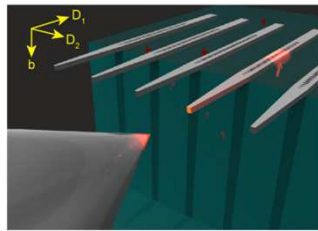
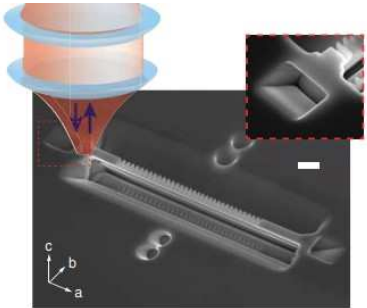
# 背景①：希土類元素を用いた研究例



希土類添加バルク結晶を用いた量子光メモリ



希土類元素を用いた量子光素子のオンチップ化が進められている



Copyright 2024 NTT CORPORATION

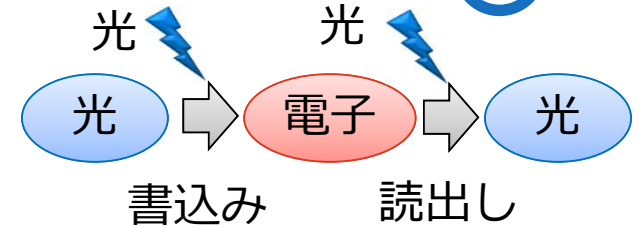
## 希土類元素の応用

- 量子光メモリ

## 希土類元素の特徴

- 内殻電子（遮蔽効果により外界の影響を受けにくい）  
利点：長い寿命、電子の高い量子コヒーレンス  
欠点：低パワーでの外部制御が困難

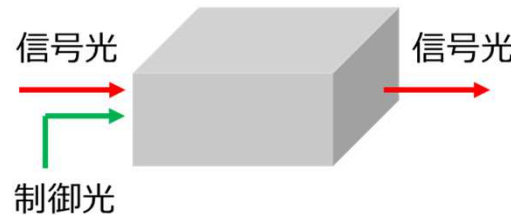
\*エルビウム(Er)の電子は通信波長帯の光に共鳴  
→ 光ネットワークとの適合性



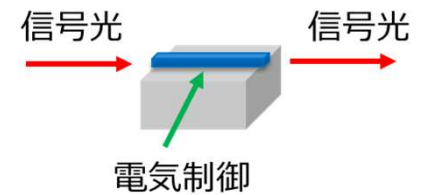
## 集積化に適した制御手法が必要

光制御は集積化に不向き → 電気制御へ

バルク結晶 + 光制御



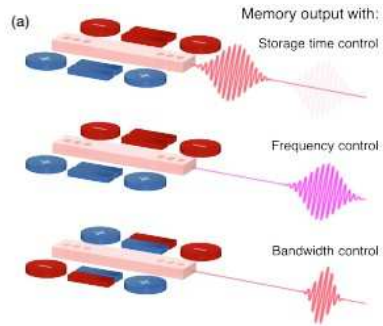
オンチップ素子 + 電気制御



# 背景②：エルビウムの励起電子を電気で制御した例

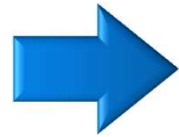


## 電界による制御

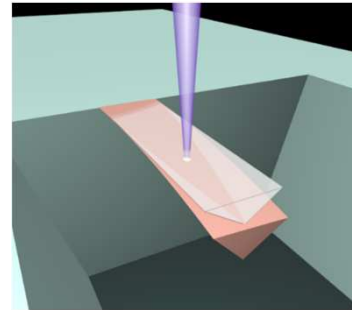


Optica 8, 114 (2021)

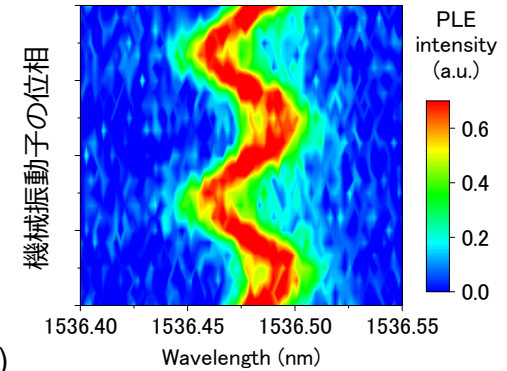
制御性の高い手法へ



## 機械振動を利用した制御



Phys. Rev. Lett. 126, 047404 (2021)



	変調振幅 (制御のしやすさ)	変調周波数 (制御の速度)
電場	8 MHz/V	数 GHz
機械振動	400 MHz/V	数 MHz

機械振動を用いて光から電子への書き込み操作を行うには両者のハイブリッド状態を用いる必要有り！

ハイブリッド状態を生み出すには電子の線幅よりも速いスピードで電子の共鳴周波数を変調する必要有り (> 1GHz)



ギガヘルツ域の振動を誘起できる構造が必要！

# 本研究の成果



## ギガヘルツ超音波を用いたEr励起電子の高速変調による 電子と超音波のハイブリッド状態の実現

<これまで>

機械振動を用いたEr電子の変調速度は1MHz以下



<今回>

超音波を用いることで変調速度を**GHz域まで高速化**

Er励起電子の線幅(500 MHz)よりも速く変調

→ 電子と超音波(フォノン)の**ハイブリッド状態**を実現

**コヒーレンスの高いEr励起電子の光応答を超音波で低電圧制御することに成功！**

結晶表面付近にあるEr電子の共鳴周波数を1GHz変調するのに必要な電圧 = **0.3 V (\*3.3 GHz/V)**

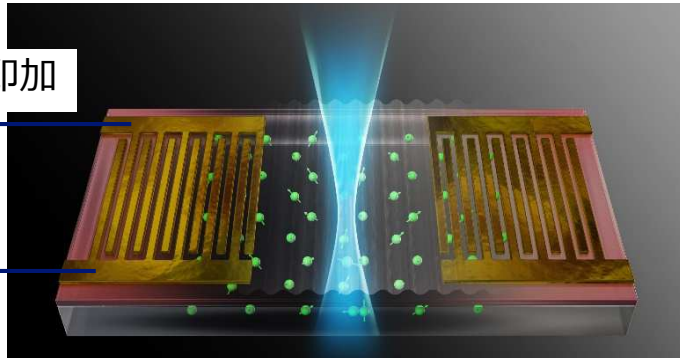
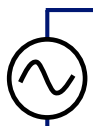
→ **将来的な省エネ量子光メモリ素子の実現に期待**

# 実験の概要①：ハイブリッド状態の観測

GHz域の超音波を生成可能な櫛型電極をEr添加 $Y_2SiO_5$ \*結晶上に導入 \*イットリウムシリケート

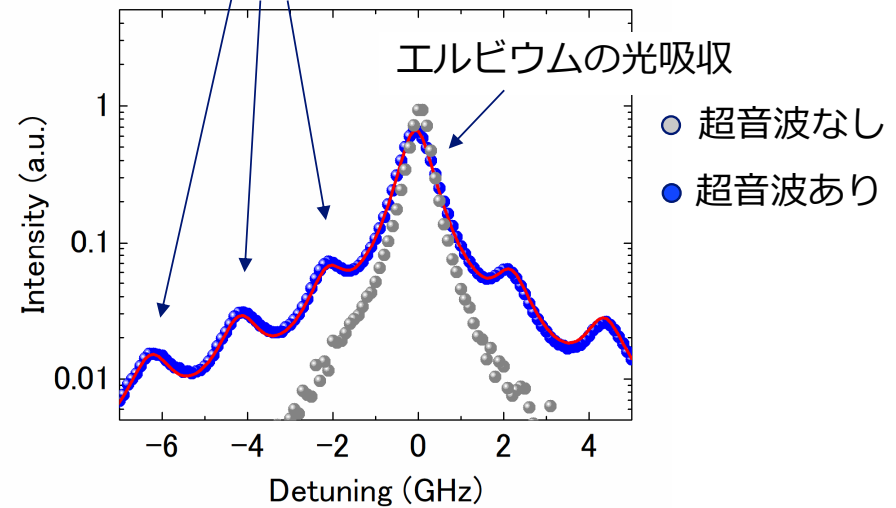
レーザ光（通信波長）を上から照射

超音波を印加



表面弾性波により表面付近に歪が誘起  
→ 電子状態の高速変調

ハイブリッド状態による光吸収（サイドバンド）



光吸収スペクトルに複数のサイドバンドを観測

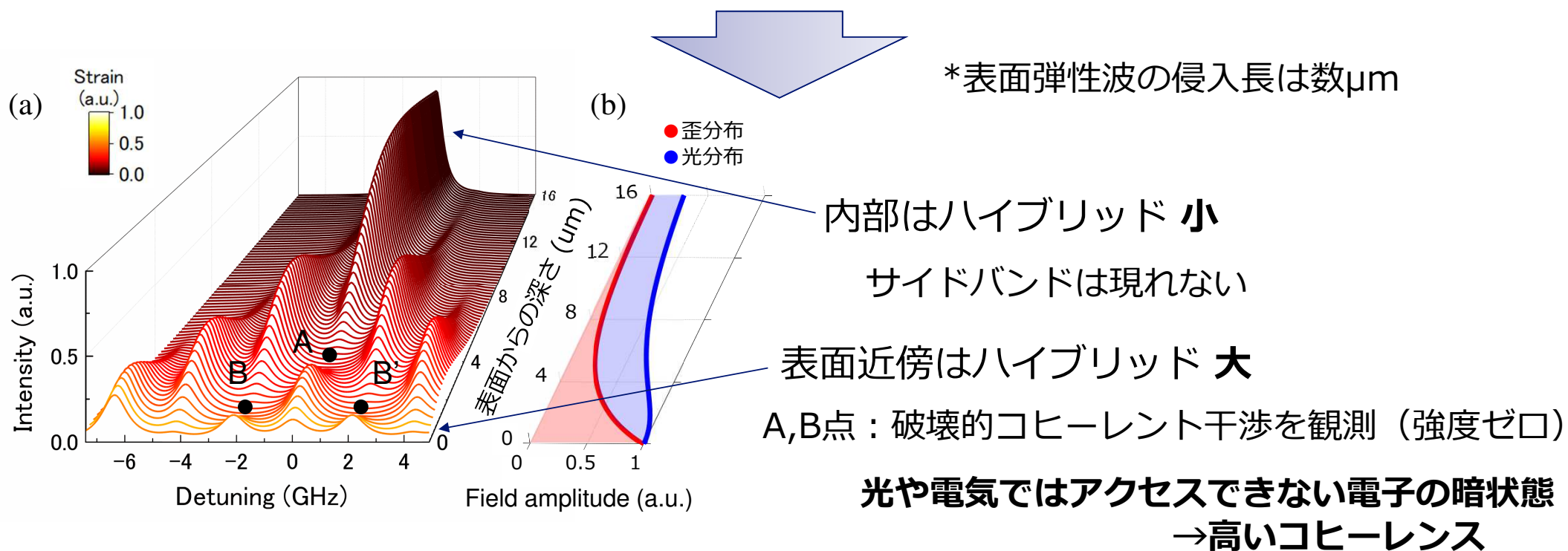
サイドバンド間隔は表面弾性波(超音波)の周波数に合致

**数ミリ秒の長い寿命を持つエルビウム励起電子と  
ギガヘルツ超音波のハイブリッド状態を生成することに成功！**

## 実験の概要②：ハイブリッド状態の空間依存性

先の実験結果は歪を受けている部分と受けていない部分の影響全てを含んでいる

→ 表面弾性波の歪分布から各深さにおけるスペクトルを抽出



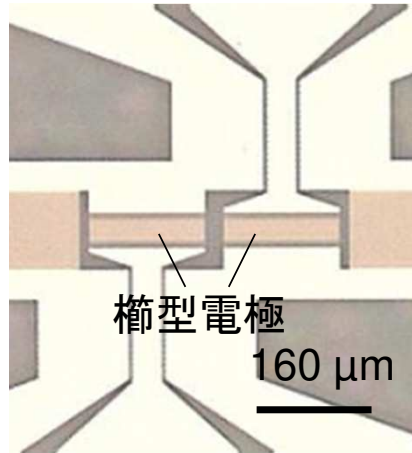
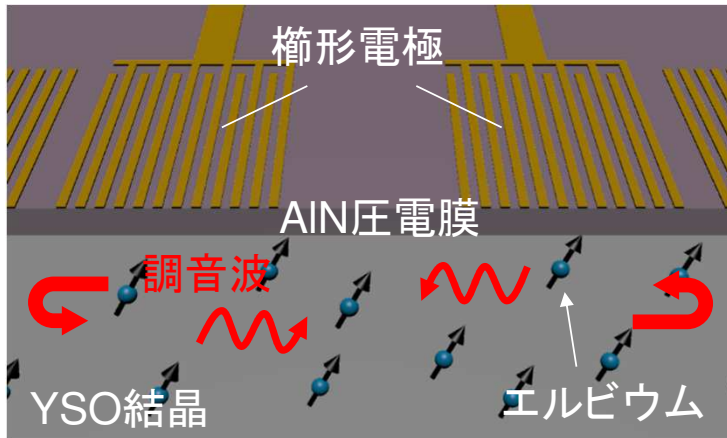
**光を表面に集めることができればハイブリッド状態を最大限に活用できる！**

# 技術のポイント①-1：高周波超音波素子の作製

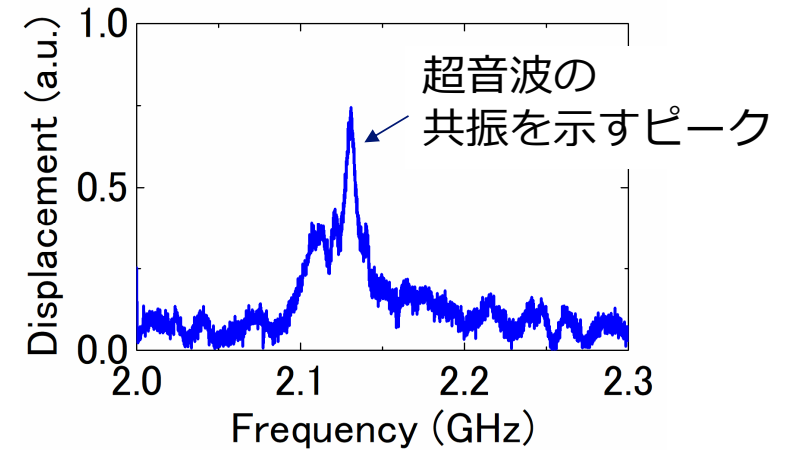
Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>結晶(非圧電性)上に高品質な圧電膜を形成する必要有り

→ NTTの有する高品質な窒化アルミニウム(AIN)圧電膜の形成技術を利用

素子の概略図及び顕微鏡像



超音波素子の振動スペクトル



**従来の機械振動子(1MHz)よりも3桁周波数の高い2GHzの超音波を利用可能に!**



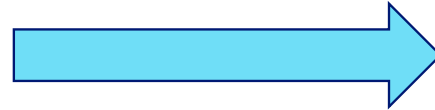
# 技術のポイント①-2 : エルビウム吸収線の狭線化

<一般的なエルビウム>

Er同位体の種類

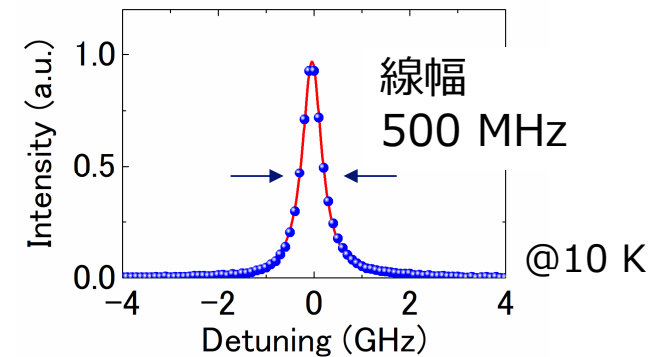
166 (34%)	} 共鳴周波数が 僅かに異なる
167 (23%)	
168 (27%)	
170 (15%)	

170Erのみを添加した  
YSO結晶を利用



<今回用いたエルビウム>

170エルビウムの光吸収スペクトル



複数の同位体が混在  
→ 吸収線幅に広がり (~1 GHz)  
\*超音波の周波数と同程度

同位体純化により吸収線が狭線化

光吸収線幅(0.5GHz) < 音響波周波数(2GHz) : resolved sideband条件を達成

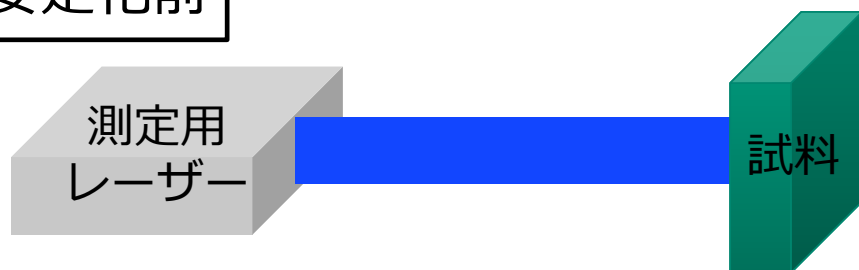


→ 超音波でEr電子準位を高速変調可能

電子と超音波(フォノン)のハイブリッド状態を実現

## 技術のポイント②：レーザー周波数の安定化

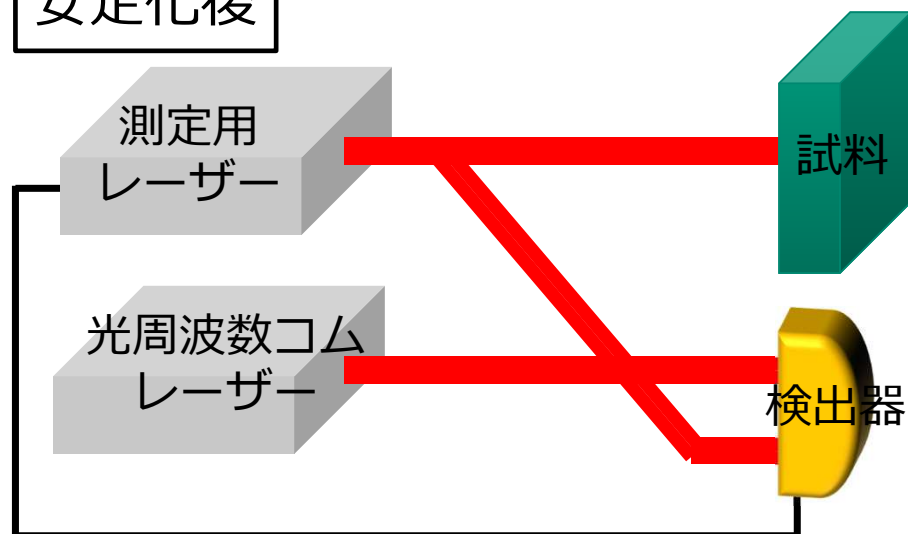
安定化前



室温の変化などによりレーザー周波数は僅かにゆらぐ

エルビウム製の狭い光共鳴を測定するには  
測定用レーザーの周波数を安定させる必要がある

安定化後



フィードバック制御

日本大学との共同研究

周波数精度の非常に高い光周波数コムレーザー  
に測定用レーザーを同期させる



測定用レーザーの周波数ゆらぎを低減  
( $\Delta f$ : 1 kHz  $\rightarrow$  1 Hz)

**エルビウム製の光学特性を高精度に測定可能に**

## 希土類電子と超音波のハイブリッド状態を世界で初めて実現

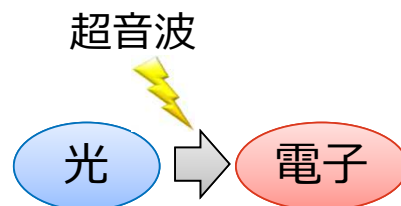
数ミリ秒の長い寿命を持つ励起電子をGHz超音波で制御

- ・ 低パワー
- ・ 局所的
- ・ 高速



集積化量子光メモリの制御手法として期待

超音波を用いた古典領域でのメモリ書き込みの制御に成功



(現在) 光子数は約1億個：古典光領域

光から電子への変換を超音波で制御 (光メモリの書き込み制御に相当)

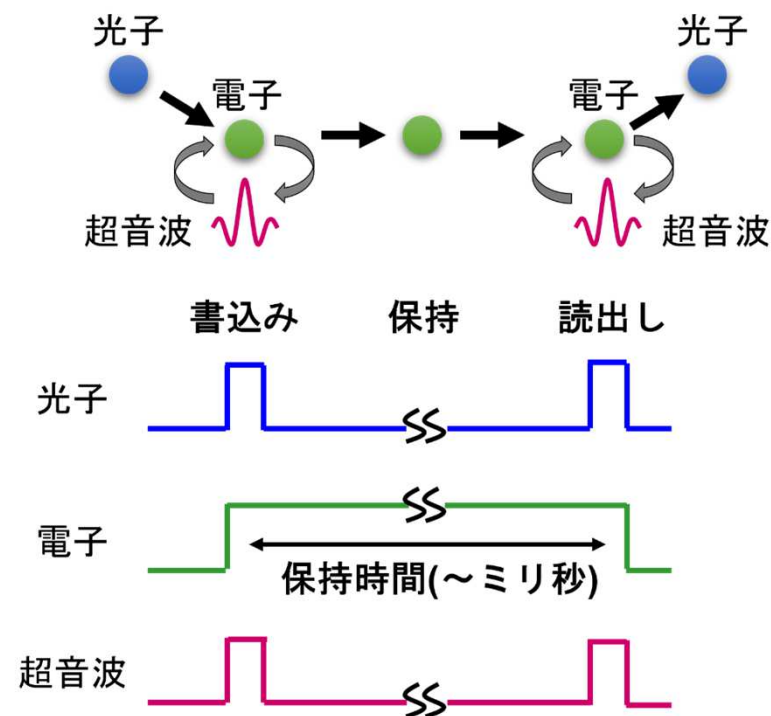
# 今後の展開

- **結晶表面への光アクセス** (1~2年後)  
→ ハイブリッド状態の均一性向上
- **光の読み出し制御** (3~5年後)  
→ 超音波を用いて電子から光への変換を制御
- **量子光源 (単一光子) の利用** (5~7年後)  
→ 量子光源と光子検出器の導入
- **量子メモリ動作の実証** (7~10年後)  
→ 1ミリ秒程度の長い保持時間を達成



省エネオンチップ量子光メモリ素子の実現へ

量子光メモリ動作の概略図



# 外部発表予定



米国科学誌 Physical Review Letters に掲載予定 (2024年1月)

***Observation of acoustically induced dressed states of rare-earth ions***

R. Ohta, G. Lelu, X. Xu, T. Inaba, K. Hitachi, Y. Taniyasu, H. Sanada,  
A. Ishizawa, T. Tawara, K. Oguri, H. Yamaguchi, and H. Okamoto



本件連絡先：NTT物性科学基礎研究所物  
フロンティア機能物性研究部  
ナノメカニクス研究グループ

太田竜一  
岡本創

[ryuichi.ohta@ntt.com](mailto:ryuichi.ohta@ntt.com)

[hajime.okamoto@ntt.com](mailto:hajime.okamoto@ntt.com)