

## 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の実現に期待～

日本電信電話株式会社(本社:東京都千代田区、代表取締役社長:島田 明、以下「NTT」と)と学校法人日本大学(本部:東京都千代田区、理事長:林 真理子、以下「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。

本研究成果は、米国東部時間 2024 年 1 月 18 日、米国科学誌 *Physical Review Letters* にオンラインで掲載されました。

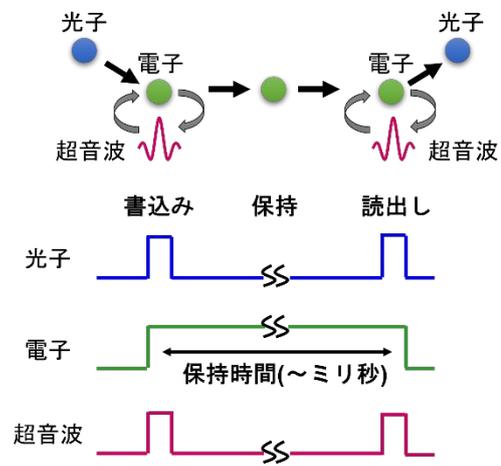
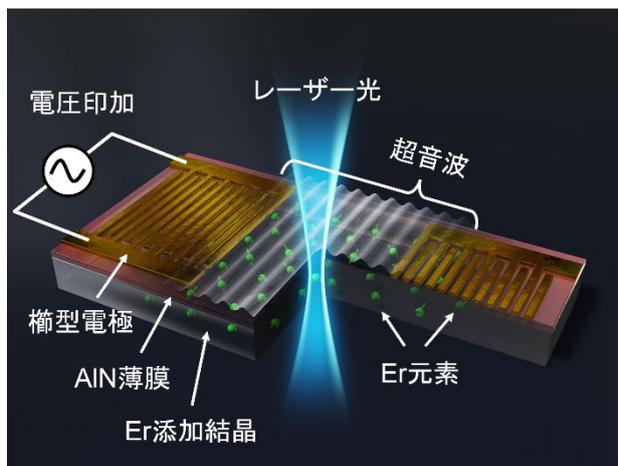


図1: 作製した超音波素子の概略図(左)と将来的な量子光メモリ素子としての利用イメージ(右)

### 1. 背景

希土類元素の一つであるエルビウム(Er)は、通信波長の光に共鳴する内殻電子(※1)を有します。外殻電子によって遮蔽された内殻電子は外界の影響を受けにくいいため、Erは高い量子コヒーレンスが得られる元素として量子光メモリに利用されています。しかしながら、外殻電子の遮蔽効果は内殻電子の外部制御を難しくするという負の側面も与えます。実際に、電場を用いて結晶中Erの光共鳴周波数を1GHz変調する為には100V以上の高電圧が必要であり、制御性の低さが課題となっていました。これに対してNTTは、低電圧で大きな変調が得られる機械振動子を用いた省エネ量子光メモリ素子の実現へ向けた研究を進めています。これを実現するためには、電子の光応答を

機械振動で制御する必要がありますが、それを可能とするための電子と振動のハイブリッド状態(※2)を如何にして創出するかがこれまでの課題でした。

## 2. 本研究の成果

今回 NTT と日本大学は、Er を添加した結晶基板上に超音波の一種である表面弾性波(※3)を生成する素子を作製することにより、約2GHzの振動歪を結晶表面に集中させ、Er の光共鳴周波数を高速変調することに成功しました。この変調速度は励起電子の寿命よりも速く、電子が共鳴線幅を上回る周波数で変調されるため、通信波長帯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が生み出されます。この状態を用いることにより、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ができるため、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。

## 3. 実験の概要

実験に用いた超音波素子(図 1)は、Er 添加結晶(※4)の上に圧電薄膜(※5)を成膜し、その上に楯型電極を配置した構成をとります。楯型電極に電圧をかけると電極パターンに合わせて圧電薄膜が変形するため、楯型電極の周期に応じた周波数の超音波(表面弾性波)を生成することができます。これにより結晶表面付近に歪が誘起され、歪を受けたErの共鳴周波数が超音波の周波数で変調されます。その結果、光吸収スペクトルには、本来のErの吸収ピークに加え、等間隔に離れた複数の吸収ピークが現れます(図2)。

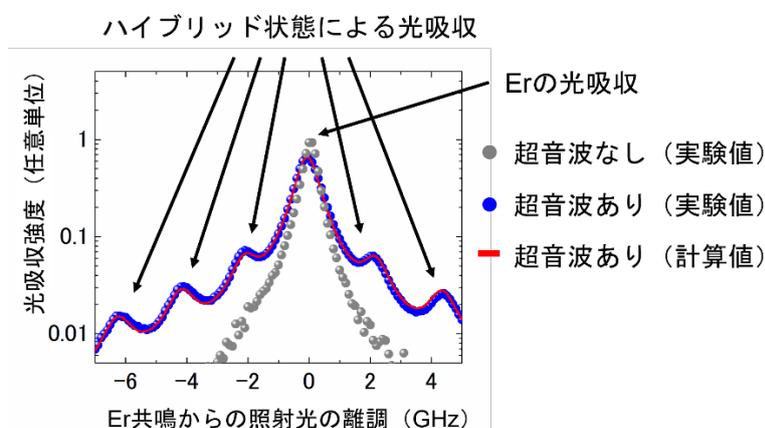


図2: 超音波の印加による光吸収スペクトルの変化

これらの吸収ピークの間隔は超音波の周波数に一致しており、Er の電子状態と超音波が混ざったハイブリッド状態による吸収を示しています。この実験結果と超音波の深さ方向の歪強度分布を取り入れた解析により、結晶の最表面付近ではハイブリッドの程度が十分大きくなり、超音波を用いて励起電子の数や位相を操作できる可能性が示されました(図3)。

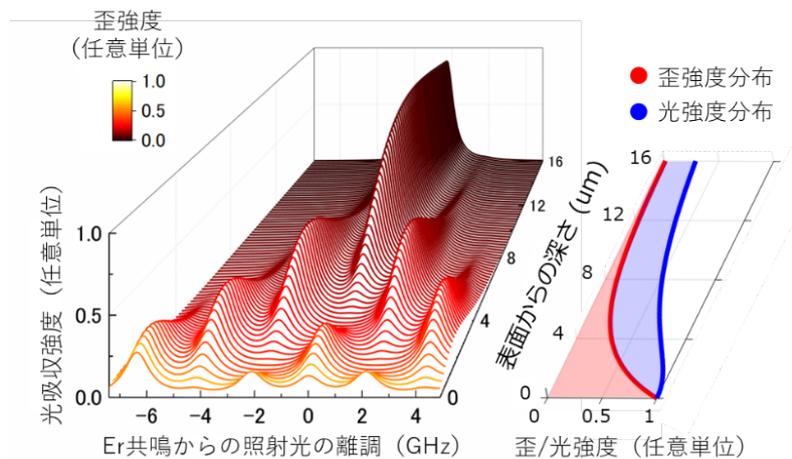


図3: 光吸収スペクトルの深さ依存性と歪・光強度分布

### 3. 技術のポイント

#### (1) 同位体純化された Er を添加した超音波素子の作製

電子と超音波のハイブリッド状態を実現するには、Er を添加した結晶の上に高周波超音波を生成する構造が必要です。本実験で使用する Er 添加結晶は圧電特性を持たないため、超音波を電氣的に生成するための圧電性薄膜を結晶表面に堆積する必要があります。NTT は高い圧電特性と周波数特性を併せ持つ高品質な窒化アルミニウム (AlN) の成膜技術を有しております。この技術を用いて、Er 添加結晶上に AlN 圧電膜を形成した高周波超音波素子の作製に成功しました。この素子で結晶表面付近の Er 光共鳴周波数を 1 GHz 変調する為に必要な電圧は僅か 0.3 V であり、低電圧で大きな変調が得られることが特徴です。

今回作製した超音波素子には同位体純化された Er が使用されています。電子と超音波のハイブリッド状態を実現するためには、Er の共鳴線幅を上回る周波数で Er 電子準位を高速変調する必要があります。Er には共鳴周波数が僅かに異なる複数の同位体が存在するため、一般的に得られる共鳴線幅は数 GHz 程度の広がりを見せますが、同位体純化した Er の利用により、共鳴線幅は 500 MHz にまで狭線化されます。これに 2 GHz の超音波を作用させることにより、電子と超音波のハイブリッド状態を実現しました。

#### (2) レーザー光の周波数を高精度に安定化

このような狭い共鳴線幅の光吸収を評価するためには、実験に使用するレーザー光の周波数を高精度に安定化する必要があります。NTT と日本大学は、光周波数コム (※6) を利用したレーザー光の周波数安定化機構を共同開発することにより、従来に比べて3桁ほど周波数精度の高い実験を可能としました。

### 4. 今後の展開

今回の実験では振動歪が結晶表面付近に集中する表面弾性波を用いていますが、歪の大きさが表面からの深さ位置に依存するため、ハイブリッドの程度が位置によって異なります。今後、NTT と日本大学は、最表面のみに Er を添加した材料の利用や、最表面の Er だけ選択的に光アクセスできるような構造を導入することにより、ハイブリッド状態の均一性向上に取り組めます。ハイブリッ

ド状態の均一性と制御性を高めることにより、通信波長帯で動作する省エネ量子光メモリ素子の実現と長距離量子通信への応用をめざします。

## 用語解説

### ※1. 内殻電子

原子核の周りの電子は通常原子核に近い内殻軌道から埋まり、光吸収には外殻の電子が寄与します。これに対して、希土類元素では一部外殻軌道から電子が埋まるため、光吸収に寄与する電子は内殻軌道の電子となります。この内殻電子は外殻電子の静電遮蔽効果を受けるため、外場の影響を受けにくく、そのため安定した電子状態となります。

### ※2. ハイブリッド状態

電子の共鳴周波数が電磁場や歪場などの外場によって強く変調されると、外場を纏ったドレスト電子状態と呼ばれるハイブリッド状態が生まれます。このようなハイブリッド状態を利用することにより、超音波を用いた電子の光応答制御が可能となります。ハイブリッド状態を生むためには電子の光共鳴線幅よりも高い変調周波数が必要になります。

### ※3. 表面弾性波

物体の表面付近に集中して伝搬する超音波を表面弾性波と呼びます。表面弾性波素子を用いることで最高で 10 GHz 程度の周波数の振動歪を結晶に与えることができます。

### ※4. Er 添加結晶

Er のコヒーレンス時間は Er を添加する結晶によって大きく異なります。本研究の素子では量子光学の分野で広く用いられているイットリウムシリケート( $Y_2SiO_5$ )を母結晶としています。

### ※5. 圧電薄膜

表面弾性波を電氣的に励振するには電圧を応力や歪へ変換する圧電層が必要になります。 $Y_2SiO_5$  は非圧電材料であるため、高い圧電特性をもつ AlN を  $Y_2SiO_5$  の上に成膜しています。

### ※6. 光周波数コム

周波数上で櫛のように多数の等間隔なピークを持ったレーザー光を光周波数コムと呼びます。ピークの周波数間隔が非常に高い精度で等しいため、周波数の物差しとして様々な機器の周波数安定化に用いられています。 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/07/21/230721a.html>



■本件に関する報道機関からのお問い合わせ先

日本電信電話株式会社

先端技術総合研究所

企画部広報担当

[nttrd-pr@ntt.com](mailto:nttrd-pr@ntt.com)

日本大学工学部

庶務課

菅井 正一

[Ceb.koho@nihon-u.ac.jp](mailto:Ceb.koho@nihon-u.ac.jp)

日本大学生産工学部

庶務課

星野 慶成

[hoshino.keisei@nihon-u.ac.jp](mailto:hoshino.keisei@nihon-u.ac.jp)