

# 固体 EIT 技術 — 未来デバイスの動作原理

Electromagnetically Induced Transparency in Solids—Principle of Operation for Devices of Tomorrow

市村 厚一

■ ICHIMURA Kouichi

EIT (Electromagnetically Induced Transparency : 電磁波誘起透明化) は、物質に 2 波長の光を照射して量子力学的な重ね合せの状態を生成し、吸収や発光などの光学的性質の劇的変化を誘起する物理現象である。

東芝は、従来気体でしか観測されなかった EIT を、希土類イオン分散結晶 ( $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ) で実現した。また、その結晶が固体としては特異的に長く重ね合せの状態を保ち、光でその状態を制御できる点に着目して、量子コンピュータへの応用を提案し、実現に向け研究を進めている。独自に始めた固体 EIT 研究とその量子情報処理への応用であるが、現在ではほかのいくつかの研究機関でも研究され、新技術分野としての発展が予想される。

Electromagnetically induced transparency (EIT) is a phenomenon in which the optical properties of a material, such as absorption and emission, are dramatically modified as a result of the generation of the superposition states of the material when irradiated by two lights.

Toshiba has realized EIT, which had formerly been observed only in gases, in a solid medium by using rare-earth ions in a crystal ( $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ). We have also proposed the application of EIT in solids to quantum computers, because the lifetime of the superposition states in the crystal is extremely long and the superposition states can be controlled by lights. EIT in solids has recently begun to be studied by other research institutes, and is growing as a novel technology.

## 1 まえがき

EIT (Electromagnetically Induced Transparency : 電磁波誘起透明化) という当時耳慣れなかった新現象の研究企画を始めた 1994 年ごろ、この現象に関する論文はまだ少なく理論が主で、実験の論文は気体を対象としたものがごく少数存在するだけであった。このほとんど手付かずの新現象を、更に固体という未踏の領域で展開し、新しい研究領域、応用分野を開拓しようと、固体での EIT 実現を最初の目標に定めて、東芝での研究が始まった。

EIT では、物質の三つのエネルギー状態に二つの光が作用することで、物質に量子力学的な重ね合せの状態という特別な状態が生成し、重ね合せの状態に基づく量子干渉で特異な光学的性質が現れる。二つのエネルギー状態と一つの光の相互作用に基礎を置く、従来の光学過程には見られない常識を超えた性質が現れるため、それらを従来の性能限界を超えた光素子の動作原理として活用できる。

ところで、この 10 年ほどの間に、量子光学と量子エレクトロニクスの進歩により、物質の量子状態を直接制御して、量子力学の本質にかかわる特徴的性質を積極的に利用しようとする試みが盛んになってきた。重ね合せの状態や絡み合った状態 (複数の粒子や物理量に関する、それぞれを独立に扱うことのできない重ね合せの状態)、量子干渉などの利用である。直感や常識と相いれない特異な性質は、従来

不可能と考えられてきた機能を可能にし、限界と信じられている性能の壁を打ち破る力を持っているのである。

特に、重ね合せの状態に情報 (量子情報) を担わせて、通信や情報処理を行う量子情報処理の研究が、急速な盛り上がりを見せている。アイデアや理論的研究が先行していた分野だが、最近では、理論と併せて実験的研究が盛んに進められている。

これらの量子状態制御を利用した実用的な素子を考えた場合、扱いが楽で、小型化や集積化に有利な固体での素子化が望まれる。またメモリのように、気体と異なり固体中で空間的、エネルギー的に変動しない原子やイオンならではの応用もある。しかし、量子状態を自由に制御でき、かつ望みの量子状態が壊れずに長時間保てるよい固体材料は見つかっていなかった。

そのような状況のなか、当社は固体での EIT 発現に成功した<sup>(1),(2)</sup>。EIT を実現した希土類イオン分散結晶  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  は、酸化物結晶 ( $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ) 中に希土類イオン ( $\text{Pr}^{3+}$ ) を分散させたもので、固体としては特異的に長く重ね合せの状態を保持できることが確認された。また、その重ね合せの状態は光で自由に制御できる。固体の量子状態制御の光素子あるいは量子情報処理素子への応用という新しいニーズにちょうど合致して、固体での EIT 実現というシーズが生まれたといえる。

当社では、固体 EIT 材料の持つ上記の顕著な特長をもっとも有効に活用する応用として、希土類イオン分散結晶の

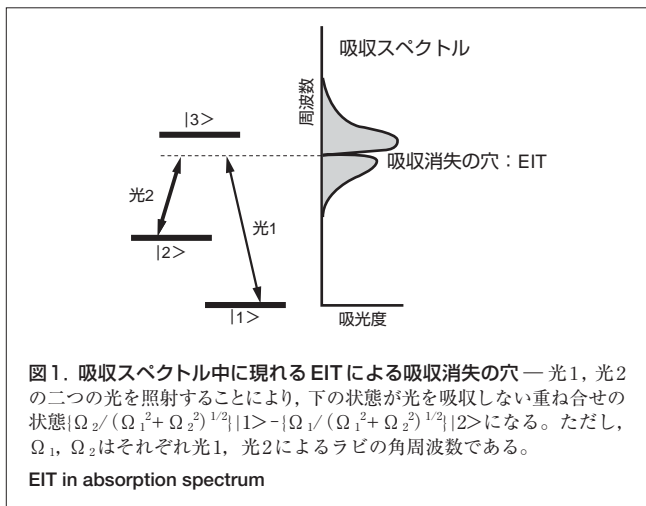
量子コンピュータへの適用を提案した<sup>(3),(4)</sup>。その際、結晶中の希土類イオンをそのまま量子情報を表す量子ビットとして利用できる、周波数領域量子計算という新手法を案出した。現在、その基本動作実証に向け研究開発を進めている。

ここではまず、EITの特徴と固体での実現について解説する。次いで、当社で進めている量子コンピュータへの応用研究を中心に量子情報処理への適用を説明し、この固体の量子状態を光で制御する新技術を紹介する。

## 2 EITの機構と固体での実現

EITはその名のとおりに、物質の光許容遷移に共鳴し、原子や分子などの吸収を担う物理系に通常なら吸収されるはずの光が、もう一つの異なる波長の光の作用で、物理系の上の状態への変化が抑制され、吸収されなくなる現象である。

物理系の遷移エネルギーのばらつき(不均一幅)が無視できる場合に吸収スペクトルに現れるEITを、模式的に図1に示す。物質の下の状態 $|1\rangle$ 及び $|2\rangle$ と上状態 $|3\rangle$ との間の許容遷移に共鳴する二つの光の作用で、状態 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ が状態 $|3\rangle$ から切り離された重ね合せの状態になる。その結果、通常なら光を吸収する下の状態に物理系があるにもかかわらず、光と物質との相互作用がなくなり吸収が消失する。これがEITである。



EITにより吸収スペクトルに生じる吸収消失の穴は、照射した二つの光の周波数差(光子エネルギー差)が $|1\rangle - |2\rangle$ 間遷移の周波数に共鳴すると生じる。また、この透明領域の幅は、照射光と物理系の相互作用の大きさを表すラビ周波数程度である。ラビ周波数は照射光強度の平方根(光の電場の強さ)に比例する。

EITによる透明領域の幅が狭い場合、屈折率が光の周波数に対して急激に変化するため、媒質中を伝播(でんぱ)す

る光の群速度が遅くなる。この群速度は、照射光強度制御による屈折率の周波数依存の調節で、自由に制御できる。

以上のように、EITは次に挙げる顕著な特徴を持っている。

- (1) 物理系は下の二つの状態の重ね合せの状態にあり、吸収は完全に消失し、上状態への変化は起こらない。
- (2) 透明領域の幅を、原子の許容遷移が持つ幅(均一幅: 図1では、山形のスペクトルの幅が均一幅に相当)に制限されることなく狭く設定できる。
- (3) 透明領域を伝播する光パルスの群速度を、もう一つの光の強度調整で自由に制御できる。

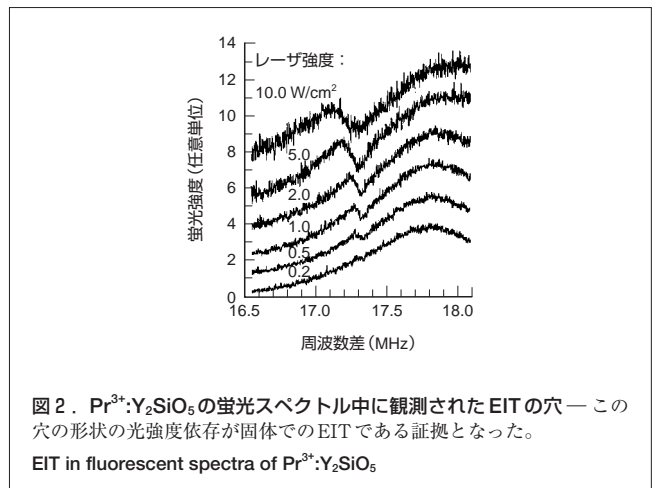
一般に固体では、早い緩和が下の二つの状態の重ね合せを壊してしまう。また、個々の原子やイオンなどが置かれている局所場の違いで、物理系ごとに遷移エネルギーがばらついている。この不均一幅で、たとえ下の二つの準位の緩和が十分遅くても、遷移エネルギーがEITの条件を満たし透明化するのには、吸収に寄与していた物理系のほんの一部にすぎない。その結果、観測にかかる吸収変化は起こらない。これらの要因のため、固体でのEITの誘起とその観測は極めて困難と考えられていた。

固体の不均一幅の問題に関して、当社では、光と作用する許容遷移、すなわち通常光学的に観測される遷移の不均一幅は、実は広くてもよいことに気がついた。狭くなくてはならないのは、通常は光禁制で観測にはかからない、残り一つの遷移の不均一幅なのである。この幅さえラビ周波数より小さければ、吸収に寄与するすべての原子が同時に重ね合せの状態になる。

つまり固体でEITを誘起し観測するための条件は、次の二つである。

- (1) 1光子で結ばない遷移(図1の $|1\rangle - |2\rangle$ 間の遷移)の不均一幅がラビ周波数より小さい。
- (2) 1光子で結ばない状態の緩和が遅い。

上記2条件を満たす物質を探した結果、 $\text{Pr}^{3+}$ を含む



Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>を見いだした。この物質の光学特性を担うPr<sup>3+</sup>のエネルギー状態の中から、<sup>3</sup>H<sub>1</sub>状態が超微細構造で分裂した二つの状態(図1の|1>, |2>に相当)と<sup>1</sup>D<sub>2</sub>状態(|3>に相当)を選択して、固体でのEIT発現に成功した。

二つの光の周波数差を掃引しながら上の状態<sup>1</sup>D<sub>2</sub>からの発光強度を測定した結果を図2に示す。下の二つの状態のエネルギー差に相当する17.3 MHzに穴が生じている。これは、この光子エネルギー差(周波数差, 波長差)の2波長光照射により、吸収に寄与していたPr<sup>3+</sup>が重ね合せの状態になり、<sup>1</sup>D<sub>2</sub>への励起が抑制されて生じたものである。

### 3 固体の重ね合せ状態生成技術としてのEIT

固体でEITが実現したということは、固体で重ね合せの状態を生成したことを意味する。その重ね合せの状態の持続時間(デコヒーレンス時間)が、数十μs以上と、固体としてはたいへん長いことがわかった。更に、後述する当社の量子コンピュータ応用の提案が元となり、磁場印加でPr<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>のデコヒーレンス時間を延ばす研究がオーストラリア国立大学で行われ、数十~数百msまで延びることが実験的に確認された。また、ラジオ波パルス列の印加で更に延長できることも示されている<sup>(5), (6)</sup>。

固体でのEITを実現した希土類イオン分散結晶は、固体で非常に長時間重ね合せの状態を保持でき、更にその重ね合せの状態を、制御性のよい光で操作できる点で、希有の固体材料である。EITと希土類イオン分散結晶の組合せにより、従来困難だった固体での重ね合せの状態の生成と制御が可能になる。

### 4 固体EITの量子情報処理への適用

EITは、物質の量子状態を光で制御する手段といえるが、逆に、EITが誘起された物質で光の量子状態を制御することもわかってきた。物質や光の量子力学的性質を巧みに通信や情報処理に応用した量子情報処理の実現にとって、物質と光双方の量子状態制御に有効なEITは、たいへん有用である。更に素子化を考えると、固体でのEITは、量子情報処理実現にもっとも適した材料系の一つである。

#### 4.1 固体EITを利用した量子コンピュータ

実用的な量子コンピュータ実現の様々な試みに対する共通かつ最大の課題はデコヒーレンスの克服である。第2の課題は、個々の量子ビットの制御と量子ビット間相互作用をデコヒーレンスの原因とならない、よく制御された形で導入することである。第3に量子ビット数の拡張性である。また、これらの固体での実現が望まれている。

固体EIT材料の利用で、最大の課題であるデコヒーレンス

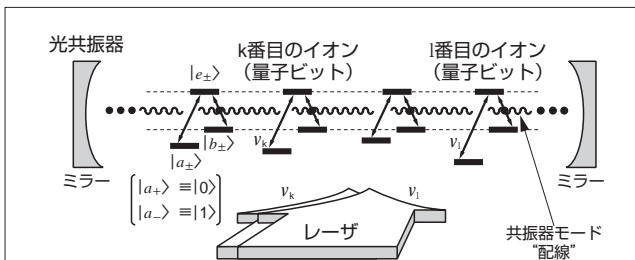


図3. 周波数領域量子計算の基本概念 — 各イオン(量子ビット)の|b±>-|e±>間遷移が共通の共振器モードと共鳴していることで、各量子ビット間が結ばれる。量子ビットの個別操作は、各量子ビットの|a±>-|e±>間遷移の共鳴周波数の違いを利用して行う。例えば、周波数νkのレーザーによりk番目の、νlのレーザーによりl番目の量子ビットがそれぞれ操作される。

Basic scheme of frequency-domain quantum computer concept

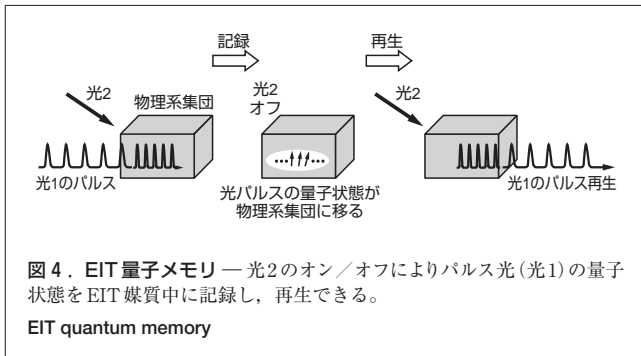
を固体で克服できる。また、第2, 第3の課題も克服するため、周波数領域量子計算の方法を考案した。

図3に、周波数領域量子計算の基本概念を示す。この方法では、光共振器の中に量子ビットとなる三つのエネルギー状態を持つ物理系がある。Pr<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>の場合、結晶中のPr<sup>3+</sup>イオンがこの物理系に相当する。量子ビット間の相互作用は、共通の共振器モードへの共鳴を利用して導入する。個々の量子ビットは、共鳴周波数の違いで区別し、量子ビットの個別操作は、照射する光の周波数を調整して実行する。その結果、量子ビットは空間的位置と無関係に番地付けされ、量子ビット間の相互作用も、実空間での位置にあまり依存しなくなる。つまり、量子ビットがほぼ完全に周波数空間で扱えるようになる。そのため、結晶中の希土類イオンのような、空間的にランダムに散らばった物理系でも量子ビットとして利用できるようになる。

当社では、Pr<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>結晶の表面に誘電体多層膜ミラーを積層して共振器構造を作り込んだ試料を用いて、通常のコンピュータの配線に相当する共振器モードと量子ビットとなるPr<sup>3+</sup>イオンとの結合を確認する実験を行った。その結果、共振器モードとイオンとの結合に起因する現象の観測に成功した。

#### 4.2 量子メモリ, 光量子ゲートへの適用

EITを誘起する二つの光のうち、片方を連続照射の光とし、もう片方をパルス光とすると、EITによって透明になった媒質中をパルス光がゆっくと進む。このパルス光の伝播中に、連続光の照射強度を次第に弱め、ついにはゼロにすることで、パルス光の量子状態(パルス光の量子状態の情報)を媒質の原子やイオンの物理系集団に移すことができる。更に連続光の再照射で、物理系集団から量子情報を受け取ったパルス光を再生することもできる(図4)。このような量子メモリとしての機能が理論的に示されている<sup>(7)</sup>。再生後の物理系集団に情報が残らないこと、光遅延としての利用法もあるこ



とから、量子バッファと呼んだほうがよいかもしれない。

量子メモリ応用でも、原子が運動する気体より原子やイオンなどの位置が動かない固体が望ましい。実際、 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ を用いて、光パルス形状の記録と再生の実験が行われている<sup>(8)</sup>。パルス形状だけでなく、量子状態の記録と再生を行う量子メモリとしての実証は今後の課題である。

量子通信や量子暗号、光を量子ビットとする量子コンピュータでは、光で光の量子状態(位相)を制御する光量子ゲートが有用あるいは必須である。この光量子ゲートは、理想的には単一光子どうしでの動作が望ましく、非常に大きな非線形性が必要である。この大きな非線形性を、EITで実現しようとする試みがある。

EITでは、物理系集団の光許容遷移と共鳴する周波数領域において、吸収に寄与する線形感受率が重ね合せの状態による量子干渉で打ち消し合う一方で、非線形感受率は量子干渉によって強め合う、あるいは共鳴による大きな値を示す。この、非線形過程の効率の利用にたいへん好つごうな性質を利用するのである。更に、EIT媒質中での光の群速度を非常に遅くすることで、外部とEIT媒質との境界で入射パルス光を圧縮し、エネルギー密度を上げられる点も非線形過程に有利である。また、EITにより制御光と被制御光を両方重ねてゆっくりEIT媒質中を伝播させ、大きなエネルギー密度と長い相互作用時間で更に大きな非線形性を引き出すとする提案もある<sup>(9)</sup>。

この光量子ゲートにも、固体EITが利用できる可能性がある。

## 5 あとがき

EITは、光という制御性に優れ素性のよくわかった道具を利用して、物質や光の重ね合せの状態や絡み合った状態、及び量子干渉といった、量子力学に特徴的な性質を人工的に自由に制御するためのもっとも基本的な構成の一つである。

現在、これら量子力学の基本的かつ特徴的な、常識と相入れなかった性質は、アカデミックな研究対象からデバイス原理へとその役割を変えつつある。この流れの中で、実用デバイス化に有利な固体によるEITは、今後ますますその

重要性を増すと考えられる。

この固体EIT研究は、研究を企画、スタートし、固体でのEITを実現するまで、完全に当社のオリジナルな研究だった。そのため見習う先行研究がなく、EIT発現の条件を吟味し、固体でも満たすことのできる条件を突き止め、物質を探し、観測法を工夫してようやく固体でのEITを実現した。また、固体EITの量子コンピュータへの応用を提案した際も、希土類イオン分散結晶を量子コンピュータに適用しようという話はほかには表だっては存在しなかった。

しかし、現在ではEITを利用した様々なデバイス、特に量子情報処理デバイスが提案され、実証実験が行われ、固体を利用した実験も報告されている。また希土類イオン分散結晶を利用した量子コンピュータの研究も、世界のいくつかの研究機関で行われるようになってきた<sup>(5), (10)-(12)</sup>。このように多少なりとも研究人口が増えたことで、固体EIT技術は、今後加速しながら発展するだろう。

当社は、もっともすなおな発展の方向と考えられる量子コンピュータへの応用を実現するため研究を進めていく。それと同時に、まだまだ生まれて間もない技術であり、その応用や使いみちが出そろっているとは思えない固体EIT技術の、新たな応用と使いみちも探索していく。

## 文献

- (1) Ichimura, K., et al. Evidence for electromagnetically induced transparency in a solid medium. *Phys. Rev.* A58, 1998, p.4116 - 4120.
- (2) 市村厚一, ほか. 固体におけるEIT(電磁波誘起透明化). *東芝レビュー*, 54, 5, 1999, p.67 - 71.
- (3) Ichimura, K. A simple frequency-domain quantum computer with ions in a crystal coupled to a cavity mode. *Optics Communications*, 196, 2001, p.119 - 125.
- (4) 市村厚一. 周波数空間を利用した固体素子量子コンピュータ. *東芝レビュー*, 57, 9, 2002, p.38 - 41.
- (5) Fraval, E., et al. Method of Extending Hyperfine Coherence Time in  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ . *Phys. Rev. Lett.* 077601, 2004, p.1 - 4.
- (6) Fraval, E., et al. Dynamic decoherence control of a solid-state nuclear quadrupole qubit. *quant-ph/0412061*, 2004, p.1 - 4. <<http://arxiv.org/list/quant-ph/0412>>, (accessed 2005-05-08).
- (7) Fleischhauer, M.; Lukin, M. D. Quantum memory for photons: Dark-state polaritons. *Phys. Rev.* A65, 022314, 2002, p. 1 - 12.
- (8) Turukhin, A. V., et al. Observation of Ultraslow and Stored Light Pulses in a Solid. *Phys. Rev. Lett.* 88, 023602, 2002, p. 1 - 4.
- (9) Lukin, M. D.; Imamoglu, A. Nonlinear Optics and Quantum Entanglement of Ultraslow Single Photons. *Phys. Rev. Lett.* 84, 2000, p.1419 - 1422.
- (10) Crozatier, V. et al. Laser diode stabilization for coherent driving of rare earth ions. *Optics Communications*, 241, 2004, p.203 - 313.
- (11) Xiao, Y.-F. et al. Realizing quantum controlled phase flip through cavity QED. *Phys. Rev.* A70, 042314, 2004, p.1 - 5.
- (12) Longdell, J. J. et al. Demonstration of Conditional Quantum Phase Shift between Ions in a Solid. *Phys. Rev. Lett.* 93, 130503, 2004, p.1 - 4.



市村 厚一 ICHIMURA Kouichi, D. Sc.

研究開発センター フロンティアリサーチラボラトリー主任研究員, 理博。光を利用した量子情報処理デバイスの研究開発に従事。日本物理学会, 応用物理学会, 日本光学会会員。Frontier Research Lab.