

周波数空間を利用した固体素子量子コンピュータ

Frequency-Domain Quantum Computer with Solid-State Structures

市村 厚一

ICHIMURA Kouichi

重ね合せの状態や量子干渉など、量子力学の基本的・特徴的な性質をその動作原理として活用する量子コンピュータは、従来技術の延長では実行不可能な計算を可能にする、まったく新しい計算機として期待されている。しかし、その具体的な実現方法はまだ模索段階である。当社では、情報の単位である量子ビットを周波数空間で番地付けし、共通の光共振器への共鳴で量子ビット間の情報伝達をする、新方式の量子コンピュータを提案した。この方式では、量子ビットの空間的位置が基本的に問題にならない。したがって、既に当社で重ね合せの状態生成に成功している結晶中のイオンのような、空間的に無秩序な物理系をそのまま量子計算に利用できる。

Quantum computers promise to exceed the computational efficiency of classical computers by using fundamental and characteristic properties of quantum mechanics, such as superposition states and quantum interference. However, real physical systems necessary for practical implementation of quantum computers are still being sought.

Toshiba has proposed a quantum computer where quantum bits (qubits) are defined in the frequency domain and interaction between qubits is mediated by a common cavity mode. In this quantum computer, qubits can be individually addressed regardless of their positions. Therefore, randomly distributed systems in space such as ions in crystals, with which Toshiba has already succeeded in the formation of superposition states, can be directly employed as qubits.

1 まえがき

量子コンピュータは、従来“0”か“1”のどちらかの状態をとる“ビット”で表現されていた情報を、“0と1の重ね合せの状態”をとる“量子ビット”で表現し、量子力学的な過程で処理する、まったく新しい概念の計算機である。

重ね合せの状態、量子干渉などの量子力学に特徴的かつ基本的な性質を積極的に利用することで、今までできなかった計算が可能になる。特にデータサイズを増やすと必要な計算量が急激に増大し、従来原理に基づく計算機の性能向上では事実上計算不可能な問題が、計算できるようになると考えられている。

このような計算量的に従来型計算機では解けない問題は、案外たくさんある。大きな数の因数分解のような“単純”な問題もその一例である。インターネットでの認証などに利用されている公開鍵暗号の原理は、大きな数の因数分解が事実上不可能であることに立脚している。この因数分解が、量子コンピュータでは超高速で解けてしまうことが理論的に示されている。

理論的にはその性能が保証されている量子コンピュータであるが、実際にどのような物理的実体で量子ビットを作製するかは大問題である。当社では、EIT (Electromagnetically

Induced Transparency : 電磁波誘起透明化) という現象を利用し、固体素子で重ね合せの状態を生成することに成功した⁽¹⁾。この固体EITを利用できる新しい量子計算の方法を提案し、またその実現可能性を検討したので、それらについて述べる。

2 量子コンピュータ実現への課題

量子コンピュータを実用的な装置として実現するためには、次のような克服しなければならない課題がある。

第一の課題は、重ね合せの状態が、制御不能な外界からの相互作用によって壊れてしまうデコヒーレンスと呼ばれる現象の克服である。

第二の課題は、よく制御された形での量子ビット間相互作用の導入である。量子コンピュータの動作には、量子ビット間に相互作用を導入してお互いに情報のやり取りをできるようにする必要がある。これをデコヒーレンスの原因にならないようにうまく導入しなければならない。

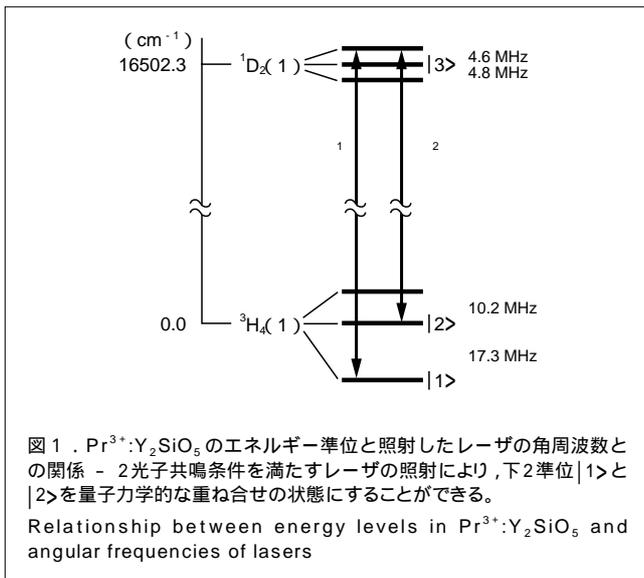
第三の課題は、実用的な計算のための量子ビット数の拡張性である。実用となる計算には、1,000個程度の量子ビットが必要と考えられている。更に可能であれば、小型化や素子の取扱いの面で有利な固体材料での実現が望まれる。

3 固体中のイオンによる重ね合わせの状態実現

もっとも重要な量子ビットの保持,すなわち長いデコヒーレンス時間に関しては,外界との相互作用が少ない核スピンの有利であることが知られている。当社ではEITを利用し,酸化珪酸(Y_2SiO_5)中に分散させた希土類イオン(Pr^{3+})において,その核スピンの二つの量子状態による重ね合わせの状態を実現した。その重ね合わせの状態は,常圧の液体ヘリウムで到達可能な温度4 Kで,数十 μs という固体としてはたいへん長い時間保てることわかった。

EITは三つのエネルギー準位に二つの光を作用させることで誘起される現象である。作用させる光の片方,あるいは両方に対しともと不透明であるはずの物質が,透明になってしまう。その際,三つのエネルギー準位のうち二つが,量子力学的な重ね合わせの状態になっているのである。

Y_2SiO_5 に分散させた Pr^{3+} のエネルギー準位と,照射する二つの光の角周波数 ω_1, ω_2 との関係を図1に示す。図には,EITにかかわる下準位 $^3H_4(1)$ の超微細構造(核スピンの状態によるエネルギー準位)と,上準位 $^1D_2(1)$ の超微細構造が示されている。

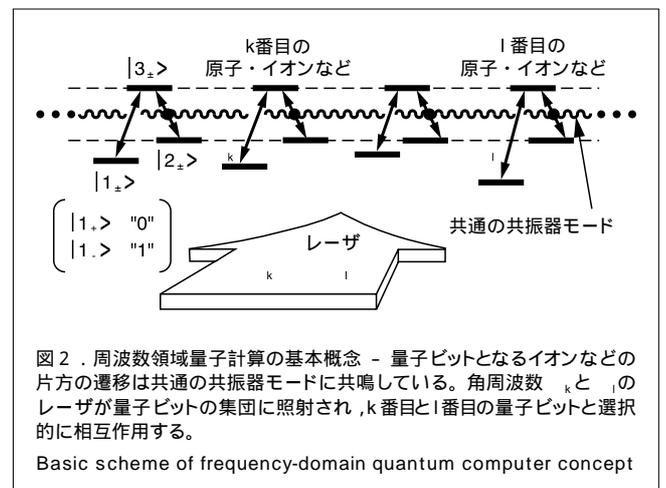


Pr^{3+} イオンと2光子共鳴条件($\omega_1 - \omega_2 =$ 下2準位のエネルギー差)を満たす ω_1, ω_2 の光照射で,図中 $|1\rangle, |2\rangle$ と表されている下2準位が重ね合わせの状態 $\frac{1}{\sqrt{2}}(\frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|2\rangle)$ になる。ここで, ω_1, ω_2 は,それぞれ角周波数 ω_1 と ω_2 の光がイオンと相互作用する強さを表すラビ角周波数と呼ばれる量である。例えばこの準位 $|1\rangle$ を“0”,準位 $|2\rangle$ を“1”とすれば,“0”と“1”の重ね合わせの状態である量子ビットが得られる。またその重ね合わせの度合い(ω_1, ω_2)は,光の強度で制御できる。

4 周波数領域量子コンピュータ

固体EIT材料で量子計算ができないかと考え提案したが,量子ビットを周波数領域で区別し,量子ビット間の相互作用を共通の共振器モードへの共鳴を利用して導入する,周波数領域量子コンピュータである⁽²⁾。

その基本概念を図2に示す。この新方式の量子計算では,量子ビットはそれぞれその空間的な位置とは関係なく定義され,番地付けされ,また,お互いの間の相互作用も,相互の位置に強く依存することがない。したがって,結晶中のイオンのような,空間的に無秩序に散らばった物理系でも,デコヒーレンスにさえ強ければ,そのまま量子ビットとして利用できる可能性がある。



固体EIT媒質中で量子ビットとして利用する個々のイオンの3準位は,それぞれ実は同じエネルギーを持つ二つの準位で構成されている。図2では,その二つを+と-の添え字で区別している。量子ビット情報は通常は図中 $|1_+\rangle$ と表された準位に蓄えられている。2量子ビット間の条件付ゲート動作などの場合には, $|1_+\rangle$ と $|2_+\rangle$ に移してから操作される。操作したい量子ビット以外の量子ビットを,共通の共振器モードと共鳴する準位から避難させておき,余計な相互作用が働くのを防ぐためである。

この方法を,EITにより固体での重ね合わせの状態実現に成功した物質に適用することで,前記の三つの課題を克服できる可能性がある。課題克服の方法としては,超微細加工により量子ビットを作製し,更に微細な制御電極を作り込む方法が,量子ドットや固体中のイオンを対象に提案されよく知られているが,この方法はそれらとは異なるアプローチ,あるいは相補的な解決法である。実際にデコヒーレンスに強い重ね合わせの状態が確認済みの固体材料が適用できる点,既存の量子光学の技術が利用でき困難な微細加工を基本的に必要としない点で有利である。

この周波数領域量子計算には、ほかにも以下の特長がある。

- (1) 一つの量子ビットの状態を変化させる、1量子ビットゲートにおいて、上準位を介した2光子過程を利用するため、量子ビットとして禁制遷移で結ばれた下2準位を利用することができる。このような準位の選択は、自然放出による量子ビットの崩壊の心配がなく、デコヒーレンス時間の長い量子ビット実現に有利である。
- (2) EIT状態を利用するため、量子ビット駆動用の光で上準位へ励起されることがなく、上準位からの自然放出によるデコヒーレンスの心配がない。
- (3) 二つの量子ビット間での条件付ゲート動作である2量子ビットゲートが、空間的に離れた任意の2量子ビット間で直接実行できる。
- (4) 量子ゲートを、制御性がよくデコヒーレンスの原因となるノイズの少ないレーザ光で実行できる。
- (5) 光通信との整合性が良い。
- (6) 光の波長以下のスケールに量子ビットを集積できる。

5 固体EIT材料の適用可能性

5.1 結晶中のPr³⁺を用いた量子計算

固体でのEITが実際に観測されている、Y₂SiO₅中に分散させたPr³⁺の、周波数領域量子計算への適用について考える。この固体材料では、基底状態³H₄(1)の二つの超微細構造準位³H₄(1)|±5/2>, ³H₄(1)|±3/2>と励起状態¹D₂(1)の超微細構造準位のうちの二つ(以降、簡単に¹D₂(1)と表現)が、図2における|1_±>, |2_±>, |3_±>にそれぞれ相当する。

結晶中のイオンの遷移角周波数は、個々のイオン周辺の局所場が異なるために不均一幅と呼ばれる分布を持つ。³H₄(1)|±3/2> - ¹D₂(1)遷移と³H₄(1)|±5/2> - ¹D₂(1)遷移の周波数を2軸とした平面を用いて、図3にその遷移角周波数の分布を模式的に表した。イオンの分布を表すだ円のそれぞれの座標軸に沿った広がり、その座標軸で表された二つの遷移の不均一幅になる。また、分布を表すだ円の短軸方向幅の2^{1/2}倍が下2準位間の遷移(³H₄(1)|±3/2> - ³H₄(1)|±5/2>間遷移)の不均一幅(12, inhom)を表す。

この結晶を共鳴角周波数 ω_{cav} の光共振器の中に入れた場合、³H₄(1)|±3/2> - ¹D₂(1)遷移周波数が ω_{cav} と共鳴するイオンが量子ビットの候補となる。ゲート動作は、³H₄(1)|±5/2> - ¹D₂(1)遷移や ω_{cav} に共鳴するレーザ、あるいは磁場を印加し、エネルギー準位を操作しやすいように適当にシフトさせた場合は、そのシフトに合わせた周波数のレーザを用いて行う。

5.2 量子ゲート実行の条件

周波数領域量子計算のゲート実行には以下の三つの本質的条件がある。第一の条件は、動作時間 T とステップ数

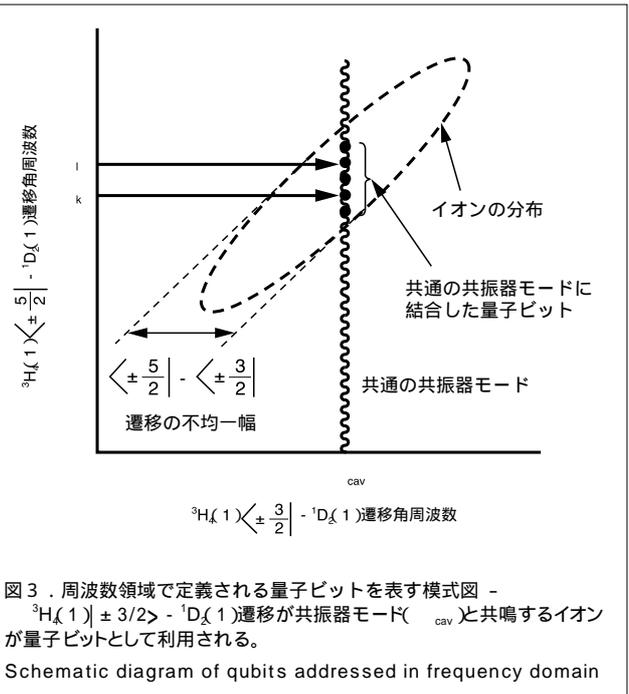


図3. 周波数領域で定義される量子ビットを表す模式図 - ³H₄(1)|±3/2> - ¹D₂(1)遷移が共振器モード(ω_{cav})と共鳴するイオンが量子ビットとして利用される。

Schematic diagram of qubits addressed in frequency domain

N_s , 位相緩和時間 T との関係で、一連のゲート動作は位相緩和時間内で終わらなければならないという条件である。これは $N_s T < T$ と表される。

第二の条件は、1量子ビットの状態を、上準位への励起を起こさずに操作するための条件である。そのためには、動作時間 T と共振器寿命 $1/\gamma$ が、共振器 - 量子ビット間の結合定数 g , レーザとのラビ周波数(レーザ - 量子ビット間結合定数) $Rabi/(2)$ の逆数より長くなければならない。これは、 $1/T < g$, $1/T < Rabi/(2)$ と表される。

第三の条件は、周波数分解能に関するものである。³H₄(1)|±5/2> - ¹D₂(1)遷移周波数の量子ビットごとの相違は、駆動用レーザパルスの周波数幅(不確定性関係で定まるスペクトル幅)及び結合定数(g , $Rabi/2$)より大きくなくてはならない。この条件は、 $1/T < 12, inhom/N$, $g < 12, inhom/(2 N)$, $Rabi < 12, inhom/N$ (N は量子ビット数)と表される。

以上三つの条件は、次のようにまとめられる。

$$\begin{aligned} \frac{N_s}{T} &< \frac{1}{T} < g < \frac{12, inhom}{2 N} \\ \frac{1}{T} &< \frac{Rabi}{2} < \frac{12, inhom}{2 N} \\ k &< \frac{1}{T} \end{aligned} \quad (1)$$

5.3 固体EIT材料Pr³⁺:Y₂SiO₅での実現可能性

EITにより重ね合せの状態ができることが確認された、Pr³⁺:Y₂SiO₅の3準位、³H₄(1)|±5/2>, ³H₄(1)|±3/2>, ¹D₂(1)

で、上記の条件を満たすことができるかを以下で確認する。

この固体材料の周波数領域量子計算にかかわる種々の物性値は、次のようになる。 $T = 70 \mu\text{s}$ (1.4K, Pr^{3+} 濃度 0.02at%で), $T_{12, \text{inhomo}}/(2) = 70 \text{ kHz}$, 遷移双極子モーメント $= 2 \times 10^{-32} \text{ C} \cdot \text{m}$, 光の周波数 $= 4.947 \times 10^{14} \text{ Hz}$. 次に, ゲート動作の諸条件として, 実現の容易な, あるいは実現可能性のある以下の値を想定する。レーザ強度 $= 0.1 \text{ W/cm}^2$, 共振器体積 $= 2 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$, 共振器長 $= 4 \text{ cm}$, フィネス $= 1.9 \times 10^6$.

これらの値から, 式(1)の条件を検討するために必要なラビ周波数, 共振器 - 量子ビット間結合定数, 共振器寿命が求められ, それぞれ, $R_{\text{Rabi}}/(2) = 30 \text{ kHz}$, $g = 30 \text{ kHz}$, $= 2 \text{ kHz}$ となる。更にステップ数 N_s として最低値1, 動作時間 T として上限値 $70 \mu\text{s}$ を考えると, 量子ビット数 $N \sim 3$ 程度まで式(1)を満たしゲート動作可能となる。

実際の固体材料では, 図3のように量子ビットとなるイオンが等間隔で整然と並んでいるわけではない。また, 量子ビットとして利用しないイオンが, 量子ビット駆動用あるいは読み出し用の光を吸収し, エラーの原因となる可能性もある。それらの問題点に関しては, 量子ビットとして採用したイオンの遷移周波数に対して校正を行う, また余分なイオンは照射光と共鳴しない準位に移すよう前処理する, などの方法で対処できると考えられる。

更にこの材料系でのゲート動作には, 周波数の絶対値を kHz オーダーで制御したレーザ光源と, 単一イオンからの発光を検出する手段, 及び小さな共振器体積(モード体積)で長い光子寿命を持つ光共振器が必要である。それらは現在の量子光学の技術で実現可能である。

5.4 量子ビット数の増大可能性

実際の値を考慮して式(1)の条件(最初の2式)を検討すると, 以下のように, 量子ビット増大にはどうすればよいかが見えてくる。

N_s/T と $T_{12, \text{inhomo}}/(2N)$ が与えられた場合, T, g, R_{Rabi} はレーザのパルス幅や強度, 共振器体積を変えることで, かなりの範囲で条件を満たすことができると考えられる。したがって, 残った関係 $N_s/T < T_{12, \text{inhomo}}/(2N)$ より, $T_{12, \text{inhomo}}/(2)$ は, NN_s すなわち量子ビット数とステップ数を掛けたものの上限值を与える性能指数として利用できることになる。ただし, 式(1)の最後の条件に留意する必要がある。先に検討された $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ の3準位, $^3\text{H}_4(1) | \pm 5/2 \rangle, ^3\text{H}_4(1) | \pm 3/2 \rangle, ^1\text{D}_2(1)$ の場合, $T_{12, \text{inhomo}}/(2) = 5$ となる。

ここで検討された固体材料及び遷移で, NN_s の上限が5と小さいのは, 固体でのEITによる透明化により重ね合せの状態の生成が確認された材料, 遷移だからである。固体EIT発現のためには, $T_{12, \text{inhomo}}/(2)$ が小さいほど有利

であるため, 特に $T_{12, \text{inhomo}}/(2)$ が小さな(70 kHz)準位を選択したのである。

したがって, NN_s の上限を与える $T_{12, \text{inhomo}}/(2)$ 増大のためには, 下2準位として, 超微細構造準位で分裂した2準位以外の準位を選択して, $T_{12, \text{inhomo}}/(2)$ を大きくすることが考えられる。また, 母体材料をガラスに替えることで, $T_{12, \text{inhomo}}/(2)$ を 10^8 倍にもすることができる。更に, 温度を4KからmKの領域へと下げることによって, T を大幅に増大させることも可能と予想される。遷移及び母体材料の選択と位相緩和時間は必ずしも独立と見なせるわけではないので, 単純な見積りはできないが, 上記のような方法で NN_s を大きく増加させることが可能と考えられる。

6 あとがき

量子コンピュータの実現により, 劇的に速くなるのが理論的に予想されている情報処理の一つは, 検索である。現在から将来にわたって加速度的に増加し続けるであろう様々な情報を相手に, スピーディに有用なものを抽出する技術は, 今後ますます重要性を増すに違いない。既存技術の延長では扱いきれなくなるそれらの情報を有効に活用するには, 原理的に新しい量子コンピュータが必要になるだろう。

また, 現在急速に進められているゲノム塩基配列の決定により, 生物の遺伝子情報が非常な勢いで蓄えられつつある。その機能解析はばく大な数の組合せを扱う問題であり, 量子計算がその力を発揮する分野になる可能性がある。更に, 計算量的に従来型計算機では扱えない量子力学的なシミュレーションにも量子コンピュータは有効と考えられている。精度の良い物性計算は, 物質設計の強力な道具になるだろう。

このように量子コンピュータは, 従来技術の壁を破り, 将来の豊かな社会を実現する突破口となる技術と考えられる。

現在はまだ重ね合せの状態を固体素子で生成した段階であり, 今後2量子ビットゲート動作, 量子ビット数増大, アルゴリズム実行と, やるべきことはたくさんあるが, この価値ある技術の早期実現のため研究を進める。

文献

- (1) 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.
- (2) 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.



市村 厚一 ICHIMURA Kouichi, D. Sc.

研究開発センター 新機能材料・デバイス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。Advanced Materials and Devices Lab.