

非等方性フォトニックバンドギャップ構造中の 3 準位原子を用いた量子機能デバイスに関する研究

学位論文内容の要旨

計算機の高速化と大容量化を目的として機能デバイスが量子サイズにまで縮小化されつつあるが、これに伴い、量子効果を積極的に利用する量子機能デバイスの研究が急速に発展し始めている。特に、集積化の利点を持つ個体の量子機能デバイスは大きな注目を集めているが、更に、クロストークの問題を解決する観点からデバイス間の情報通信やデバイス中での情報処理を光で行うことができる光固体デバイスの開発が強く望まれている。このためには、光の量子コヒーレンスを維持する技術を確認することが必要不可欠となる。光の量子コヒーレンスを維持することは非常に困難であるが、微細加工技術の発展により製造することが可能となったフォトニックバンドギャップ(PBG)構造がこの問題を解決するものとして期待を集めている。今までも、PBG 構造中に埋め込まれた単一の 3 準位原子が光メモリとして機能することが報告されており、ここでは、コヒーレンスが維持されたまま原子からの自然放射が抑制されることが示されている。特に最近では、レーザを用いた自然放射のコヒーレント制御に関する研究が行われるまでに至っている。しかしながら、メモリ以外の機能を持つデバイスの提案はまだ少なく、また、メモリ効果を強めるために自然放射をより強く抑制することも重要な検討課題として残されている。

本研究では、非等方性の PBG 構造中に埋め込まれた 3 準位原子を用いた量子機能デバイスに関する理論的検討を行うが、ここでは、光メモリに加えて光スイッチや光クロック素子としても原子が機能することを明らかにする。更に、等方性モデルに相当するほどの強いメモリ効果が非等方性モデルにおいても形成されることを示す。原子をデバイスとして用いたときの機能とメモリ効果の強さは、ともに、原子からの自然放射を計算することで明らかにされるが、ここでは、レーザのラビ周波数と原子の遷移周波数とに対してより広い領域を扱えるように従来の計算方法を拡張する。また、自然放射の計算は段階的に行い、まずは、原子の最上位にある励起準位からの自然放射を計算する。次に、2つの励起準位からの自然放射を計算し、最後に、自然放射が抑制される強さを計算する。

まず、ラビ周波数と遷移周波数との広い領域に対して最上位にある励起準位からの自然放射を計算するが、最初は長時間極限について検討する。この結果、従来検討されていた領域の外へラビ周波数と遷移周波数とを変化させることで、抑制されていた自然放射を増大させる、もしくは、長時間振動するようにできることを明らかにする。ラビ周波数や遷移周波数は、各々、原子に照射するレーザ強度や直流電界強度により制御できることから、自然放射の抑制と増大とを切り替えることで原子を光スイッチとして利用できることが導

かれる。また、自然放射が長時間振動するときには原子から連続的に光パルスが放射されることとなり、これらの光パルスをクロック信号として用いることにより、原子を光クロック素子としても活用できることを示す。

次に、長時間極限についての計算方法を過渡的な時間変化も検討できるように拡張して、最上位にある励起準位からの自然放射を計算する。自然放射は長時間極限に至る前には過渡的な振動を示すが、遷移周波数を PBG の外部へ移動させるか、もしくは、ラビ周波数を大きくすることで過渡的振動の持続時間を短くできることを明らかにする。これにより原子の量子状態をより高速に安定させることができるようになるが、例えば、ラビ周波数をテラヘルツオーダにまで大きくすることでピコ秒オーダの超高速な時間内で量子状態を安定させることができる。このように量子状態を高速に安定させることで、原子を光メモリとして用いたときのスイッチング時間が改善されることとなる。

更に、最上位の励起準位に加えてもう 1 つの励起準位からの自然放射も計算することで、励起準位の両者に対して、抑制されていた自然放射を同時に増大させることができることを明らかにする。また、放射モードの周波数を計算することで各々の励起準位が 2 つの準位に分裂することも示すが、自然放射を抑制、もしくは、増大させるためには、最上位にある励起準位から分裂した準位のうちの片方を PBG の外部に位置させなければならないことを明らかにする。この場合、もう片方の分裂準位の位置を PBG の内部から外部へ移動させることにより 2 つの励起準位からの自然放射の抑制を増大へと切り替えることができる。したがって、光メモリとして原子を用いる場合にこの結果を利用することで、2 つの励起準位に保持されている量子情報を光メモリから放出される自然放射として光子検出器により検出できることとなる。

最後に、自然放射が抑制される強さについて検討するが、ここでは、励起準位にトラップされる原子分布の比率を計算することで抑制の強さを評価する。この結果、遷移周波数と PBG とのずれをテラヘルツオーダにまで広げることで、80% 以上の原子分布を 2 つの励起準位にトラップできることを明らかにする。これは理想的な等方性 PBG 構造におけるトラッピングの比率に相当し、自然放射が強く抑制されることを表す。したがって、遷移周波数と PBG とのずれを広げることで、実現性の高い非等方性モデルにおいても等方性 PBG に相当するほどの強いメモリ効果を実現できることが導かれる。

以上に検討した PBG 構造中に埋め込まれた 3 準位原子を用いた機能デバイスは集積化の利点を持つ。このことから PBG 構造を持つ基板に原子を集積することで光集積回路を製造できるであろうことが従来から報告されているが、原子が光スイッチや光クロック素子としても機能することが明らかになったことで、複雑な情報処理を行う光集積回路を構成する機能デバイスとしても原子を利用できることが導かれる。また、機能デバイスのスイッチング時間の改善方法を集積回路の高速動作へ応用することも可能であり、更に、量子情報の検出方法を応用することで集積回路において処理された情報を検出することも可能となる。以上のデバイスの機能に関する検討に加えて、PBG 構造を非等方性モデルと仮定した場合であっても、強いメモリ効果を実現できることが明らかになったことから、実現性の観点からも今回検討した量子機能デバイスの有用性が示されたこととなる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	三島瑛人
副査	教授	小柴正則
副査	教授	山本眞史
副査	助教授	岡本 淳

学位論文題名

非等方性フォトニックバンドギャップ構造中の 3準位原子を用いた量子機能デバイスに関する研究

計算機の高速度と大容量化を目的として機能デバイスが量子サイズにまで縮小化されつつあることに伴い、量子機能デバイスの研究が近年急速に発展している。特に、集積化の利点を持つ固体の量子機能デバイスは大きな注目を集めているが、更に、クロストークの問題を解決する観点からデバイス間の情報通信を光で行うことができる量子機能デバイスの開発が強く望まれている。その有望な候補の1つがフォトニックバンドギャップ(PBG)構造を用いた光デバイスであり、今までにも、PBG構造中に埋め込まれた単一の3準位原子が光メモリとして機能することが報告されている。これまでに、原子からの自然放射が抑制されることで情報が原子の中に保持されることが示され、最近では、レーザを用いた自然放射のコヒーレント制御に関する研究も行われている。しかしながら、メモリ以外の機能を持つデバイスの提案はまだ少なく、また、PBG構造の理想的なモデルである等方性PBG構造と比較して実現性の高い非等方性モデルではメモリ効果が低減することから、非等方性モデルに対してメモリ効果を強める手法も重要な検討課題として残されている。

本論文では、レーザのラビ周波数と原子の遷移周波数とに対してより広い領域を扱えるように従来の計算方法を拡張することで、PBG構造中に埋め込まれた3準位原子が光スイッチや光クロック素子としても機能することを明らかにし、更に、強いメモリ効果が非等方性モデルにおいても形成されることを示している。

まず、長時間極限における最上位にある励起準位からの自然放射について検討する。この結果、従来検討されていた領域の外へラビ周波数と遷移周波数とを変化させることで、抑制されていた自然放射を増大させる、もしくは、長時間振動するようにできることを示す。ラビ周波数や遷移周波数は、各々、原子に照射するレーザ強度や直流電界強度により制御できることから、自然放射の抑制と増大とを切り替えることで原子を光スイッチとして利用できることを導く。また、自然放射が長時間振動するときには原子から連続的に光パルスが放射されることとなり、この光パルスをクロック信号として用いることにより、原子を光クロック素子としても活用できることを明らかにする。

次に、長時間極限における計算手法を過渡的な時間変化も検討できるように拡張し、最上位にある励起準位からの自然放射を計算する。自然放射は長時間極限に至る前には過渡的な振動を示すが、遷移周波数を PBG の外部へ移動させるか、もしくは、ラビ周波数を大きくすることで振動の持続時間を短くできることを明らかにする。これにより原子の量子状態をより高速に安定させることができるようになり、この結果、原子を光メモリとして用いたときのスイッチング時間が改善されることとなる。

更に、最上位の励起準位に加えてもう 1 つの励起準位からの自然放射も計算することで、2 つの励起準位の両者に対して、抑制されていた自然放射を同時に増大させることができることを明らかにする。ここでは、自然放射を抑制、もしくは、増大させるためには、最上位にある励起準位から分裂した準位のうちの片方を PBG の外部に位置させなければならないことを示す。この場合、もう片方の分裂準位の位置を PBG の内部から外部へ移動させることにより 2 つの励起準位からの自然放射の抑制を増大へと切り替えることができる。したがって、光メモリとして原子を用いる場合にこの結果を利用することで、2 つの励起準位に保持されている量子情報を光メモリから放出される自然放射として光子検出器により検出できることとなる。

最後に、自然放射が抑制される強さについて検討するが、ここでは、励起準位にトラップされる原子分布の比率を計算することで抑制の強さを評価する。この結果、遷移周波数と PBG とのずれをテラヘルツオーダーにまで広げることで、80%以上の原子分布を 2 つの励起準位にトラップできることを明らかにする。これは理想的な等方性 PBG 構造におけるトラッピングの比率に相当し、自然放射が強く抑制されることを表す。この結果から、遷移周波数と PBG とのずれを広げることで、実現性の高い非等方性モデルにおいても強いメモリ効果を形成できることを明らかにする。

これを要するに、著者は PBG 構造中の原子を光スイッチや光クロック素子として機能させる方法を新たに提案し、量子機能デバイスの高性能化や、量子情報の検出に関する新知見を得たものであり、光量子エレクトロニクス分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。