

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 蜂須英和

電子や光子に比べ自由度の豊富な原子の状態を高度に制御する技術は、その並進運動や内部状態の情報をを用いた高度な量子情報処理を可能にするものである。原子をマイクロチップ上で制御するアトムチップのアイデアは、情報の担体としての原子の制御性と拡張性の観点から量子情報処理の有望なプラットフォームとして期待され、近年活発に研究が進められている。

この 20 年間で急速に進展したレーザー冷却技術により、運動エネルギーの小さい原子を用意することが可能になり、室温状態では実現できなかった高度な原子制御が行えるようになった。1995 年のアルカリ原子のボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) 実現によって、マイクロケルビン以下の温度領域での操作技術の開拓が進み、自由空間中での原子制御技術は成熟期を迎えたとも言える。この発展を踏まえ、磁場トラップを基本制御法としたアトムチップのアイデアが発表され、後に世界の有力研究グループがこの実現を果たした。このアトムチップは進歩著しいマイクロエレクトロニクス技術との融合を図ることで、原子制御回路の基盤として大きな期待が寄せられている。

現在、量子情報処理実現を1つの目的としてこのマイクロチップでの原子制御の研究が進められているが、その2つの手法、先ほどの「中性原子の磁場トラップ」と伝統的な「イオントラップ」とを基本制御法にしたものが並行して研究されている。これらの制御法において問題になっているのが、チップ表面の電磁場の揺らぎ(ジョンソンノイズなどに起因する)やパッチポテンシャルの揺らぎ(電極表面に付着したトラップされなかった原子などに起因する)とトラップ原子との相互作用によって生じる加熱である。これは量子情報処理で重要な量子状態のコヒーレンスの保持に影響する。本研究では、これらの両手法と比較して、より外乱を受けにくいマイクロチップによる中性原子の電場制御「シュタルク・アトムチップ」について、理論的な検討を加えた。この一方で、ストロンチウム原子にこの手法を適用することで、この新しい原子トラップの原理を実験的に実現し、そのトラップメカニズムを詳細に調べている。

本論文は以下の 9 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、研究の背景として、原子制御の現状および現在行われているマイクロチップ上での原子制御(アトムチップ)の研究、さらに本論文の研究課題であるシュタルク・アトムチップの特徴について言及している。

第 2 章では、シュタルク・アトムチップのトラップ手法について述べている。静電場中では、原理的に電場トラップのポテンシャル極小点がないので、原子を 3 次元電場トラップするためには動的安定化が必要であることを示し、実現可能な電極モデルを使って、シュタルク・アトムチップのトラップ手法について記述している。そして、このトラップが微小振動と実効ポテンシャル中での永年運動との線形結合であると仮定し、中性原子の電場トラップを実

現する上で必要となる印加電圧の駆動周波数条件と実効的なトラップ周波数を解析的に導いている。

第3章では、シュタルク・アトムチップの設計について述べている。実際の電極構造に対して有限要素法による電場解析と原子トラップの安定条件を数値解析により求め、実際のポテンシャルに含まれる非調和成分の影響を評価した上で、トラップの安定条件を拡張したアトムチップの設計を行っている。

第4章では、シュタルク・アトムチップサンプルの作製について述べている。前章の設計に基づき、FIB(Focused Ion Beam)を用いたサンプルの加工について記述している。

第5章では、本実験に必要な実験装置と光源の開発について述べている。シュタルクトラップ実験で必要な冷却原子の作成と移動光格子への原子ローディングの実験系について、その各装置について詳述している。

第6章では、ストロンチウム原子の冷却・トラップ実験について述べている。前章で述べられた装置と光源を用い、シュタルク・アトムチップへ原子をロードするために必要となる冷却原子作成と光格子による原子トラップについて記述されている。

第7章では、シュタルク・アトムチップによる中性原子の電場トラップ実験について述べている。光格子にロードした冷却原子を移動光格子の手法によってシュタルク・アトムチップへ輸送し、中性原子の電場トラップを実証している。さらに、このトラップの安定条件について実験と数値解析の結果の比較検討をしている。

第8章では、シュタルク・アトムチップ中の原子観測実験について述べている。このアトムチップにトラップした原子に観測用レンズをできる限り近付けることで原子からの信号光量を上げ、プローブ光による電極からの散乱ノイズを抑えることでS/N比を向上させた観測手法により、トラップ原子の時間分解計測を実現し、トラップダイナミクスを調べている。

第9章では、まとめと本系における今後の展望について述べている。本研究によって実現されたアトムチップは、量子情報実現において必要とされる量子ビットの拡張性に優れた手法であることを指摘している。この実現に向けた今後の課題として、単一原子量子ビットの実証、原子導波路の実現、そして原子間の量子相関形成手法について言及している。

以上のように、本研究ではマイクロチップ上に作製した電極に交替電圧を印加することで動的安定化による電場トラップの手法をストロンチウム原子に適用し、アトムチップの新手法を提案・実現した。また、実験と数値解析との比較により、シュタルクトラップのメカニズムを詳細に調べている。この原子トラップ手法は構造の微細化に伴い、低電圧でのトラップ駆動が可能になる特徴を持つ。さらに、この系では原子とチップ表面との相互作用を最小限にすることが可能になるため、原子制御回路の小型化、集積化の実現などの応用面における展望が開けている。本研究は、原子系での量子情報処理実現を可能にする有望な手法を提案・実現し、新たな原子デバイスの基礎を築き上げた点に意義があり、物理工学発展への波及効果は大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。