

静電場を用いたアトムチップによる原子操作

電気通信大学大学院 電気通信学研究科 量子・物質工学専攻
中川研究室 0533008 江村 真史

1 研究背景と目的

アトムチップ (atom-chip) とは、原子を操作、捕獲するようなポテンシャルを生成するためのワイヤ等を固体基板上に集積配置したものである。今後、冷却原子が量子情報処理デバイスや超高感度センサの用途として応用されていく際には、アトムチップの利用が有力な選択肢である。

本研究の目的はアトムチップを利用した精密かつ微細な原子操作である。最終的な目標はアトムチップで作成したポテンシャル内に冷却された原子を捕獲し、さらに輸送や空間分割型原子干渉計、周期ポテンシャルといった原子に対するオペレーションを行う事である。

これらの実現のためには現在アトムチップで起きている金属表面の影響やフラグメンテーションといったいくつかの問題点の解決が必要である。したがって、まずはどのようにして問題を解決するか、そもそもなぜこのような問題が起こっているかを考え、理論的な問題解決のもとに新しいアトムチップをデザインする必要がある。本研究では従来のアトムチップでの問題点解決のための提案と、この考えを使ったアトムチップの設計、及び実験での検証を試みた。

また、もう一つの目的として小型装置でのボース凝縮体の実験がある。これは、一般的な実験室とは異なるさまざまな条件での物理量測定を行うためには可搬型の装置が望ましいためである。このためには、チップ上に原子操作のためのポテンシャル生成源を集積させることで磁気光学トラップや磁気トラップに必要最小限な外部部品のみで実験が行えるようにするほか、コイル配置等の細かい部分も考慮して実験装置全体の小型化を目指す。

2 これまでに現れているアトムチップの問題点

問題点の一つは金属表面の影響によってトラップされている原子に影響が出るという事である。アトムチップは極低温原子を扱うポテンシャルを原子の近傍で生成しているが、アトムチップ自身は常温である。常温の金属中では電子が常に自由に動いており、その運動によって微弱ではあるが常に交流電流が流れていると考えられる。このような金属中に原子のスピン状態の写像が写りこむと、金属内の電子の運動による磁場が原子に影響を及ぼしてしまう。この結果チップ表面近くにいる原子がトラップ周波数に近い周波数の磁場を受けてしまった場合のトラップロスや原子の加熱、デコヒーレンスなどが発生する。こ

の現象は金属表面に非常に接近させた場合に起こり、実際の値の目安として式1の δ で表される表皮深さ (skin depth) が考えられている。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} \quad (1)$$

ここで ω は交流電流の角周波数、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ は透磁率、 σ は金属の導電率であり今回のチップで使用した金の場合は 4.1×10^7 [S/m]である。

もう一つはフラグメンテーションと言われる問題点で、ポテンシャルに意図しない乱れが出来てしまい精密な原子操作を不可能にするものである。ワイヤ上に流れる電流の作る磁場ポテンシャルの場合について説明すると、金属中に流れる電流はワイヤを一様に流れているのではなく、実際は金属に不純物があったり微細な空洞がある場合そのようなところを避けて電流は流れる。さらに、ワイヤ表面の凹凸も考えるとワイヤに流れる電流は決して一様とは言いがたい。このような微細な電流密度の差も原子をトラップしていき極低温にまで冷却する場合は大きな影響が出てきてしまう。

3 本研究で製作したアトムチップ

本研究では以上のような問題を回避するための新しいアトムチップを作成した。

金属表面の影響に対しては原子を操作するためのワイヤを薄くし、原子を近づけても金属内のノイズの影響を受けないようにすることで問題を回避する。ワイヤを薄くすると電流が流せなくなるので、ここでは電場の作るポテンシャルを利用することにした。また、電流を流さない電極でも金属表面や、パターン端の部分に大きな凹凸が合ってはフラグメンテーションが出てきてしまうと考えられるので、電極の製法はクリーンな金属表面が得られる手法とする。

電場によるポテンシャルを利用する場合は引力ポテンシャルとなるので、原子のトラップには磁場によるワイヤトラップを使用する。この場合、金属に流れる電流によるフラグメンテーションについても考慮しなければならない。フラグメンテーションに対するアプローチとしては、原子をワイヤから離してトラップすることによってフラグメンテーションで生じる磁場の乱れの周期を大きくするとう方針である。フラグメンテーションによるポテンシャルはワイヤから遠い場合は空間的に細かい凹凸はキャンセルされて見えなくなる。したがってワイヤの遠方で原子をトラップした場合、フラグメンテーションは発生するものの、細かいポテンシャルの凹凸はなく大きな周期でのポテンシャルの乱れしか現れない。原子を微細な領域で操作する場合は、原子の存在する部分のポテンシャルだけを電場によりフラットにしてやればフラグメンテーションの問題は回避できると考える。

以上を踏まえてアトムチップの構造を考えるを図1のような2層構造を持つものが合理的である。まず、原子をトラップするための磁場を発生する層が原子から比較的是なれた

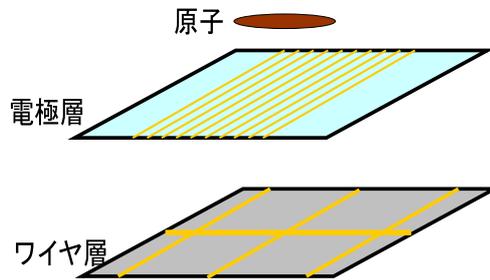


図 1: アトムチップの構造の略図

所に存在する。この層は従来どおりのメッキを積み上げる手法で作成された電流を流すための厚いワイヤがある。その上に、原子を操作するための電極がある層が乗る。

電流による磁場ポテンシャルを作るためのワイヤパターンを表したのが図 2 左の図である。H 型ワイヤトラップとクロスワイヤトラップを組み合わせたもので、チップへの原子のローディング時の効率と蒸発冷却時に必要な高いトラップ周波数、さらに蒸発冷却した原子を加熱や口がを少ないままチップ上で操作することを意図したものである。実際のチップによる原子の捕獲、圧縮、蒸発冷却時の磁場の計算結果は図 2 の (a)(b)(c) である。

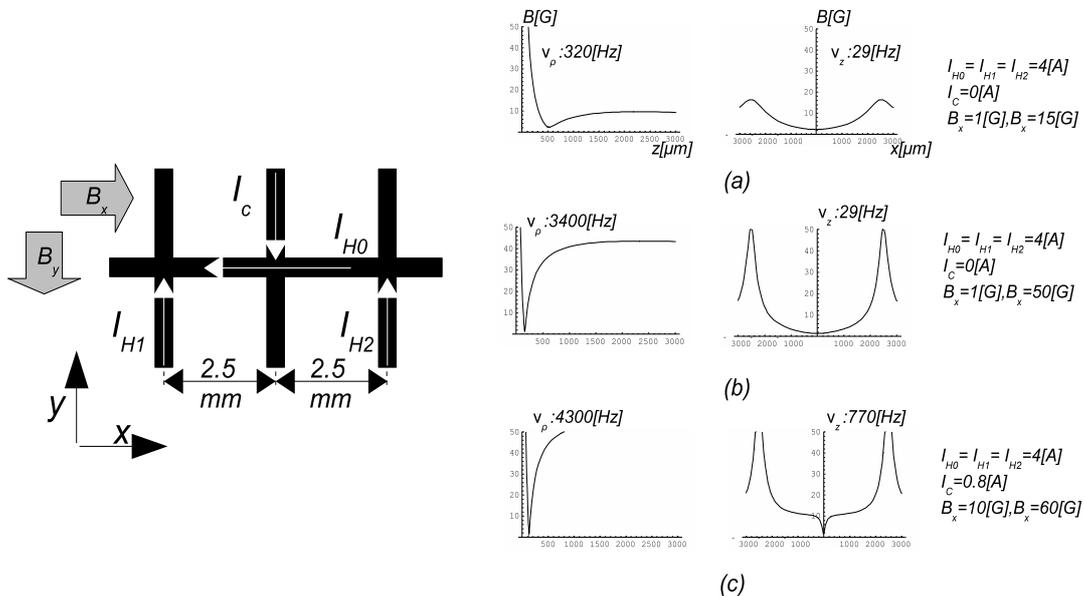


図 2: 電流による磁場の作るポテンシャル

電場ポテンシャルのための電極の設計の際には、複雑な電極に電圧を加えた場合に生じる電場を定量的に求めたいので、数値解析を行う必要がある。今回はアトムチップの電極部分の設計を有限差分法を利用して電極のパターンと電圧、さらに電流部分のパターンと電流値を様々に変えながら原子をトラップしながら原子操作のために適切な深さのポテンシャルを得られる条件を探していった。ここで、実際に原子が感じるポテンシャルである電場と磁場が足しあわされたエネルギーは、式 2 のようになる。

$$U_{mag+elec} = g_F \mu_B m_F |B| - \frac{\alpha}{2} E^2 \quad (2)$$

図3は実際のチップで使用した条件で求めた原子の感じるポテンシャルである。条件は、原子をトラップするための電流が流れている上に電極があるという条件で、電流が流れるワイヤと電極は $55\mu\text{m}$ 離れていて、さらにその上のワイヤより $60\mu\text{m}$ の位置に磁場のミニマムが出来るように電流と磁場を設定している。電極は太さ $2\mu\text{m}$ で $5\mu\text{m}$ 間隔で並んでいて、GNDと正電圧がかかっている電極が交互にある。ワイヤに流す電流値は 2A でバイアス磁場は $B_x=1\text{G}$ 、 $B_y=40\text{G}$ 、電極は 3V と GND が交互に並んでいる。

図3(a)はワイヤ直上のポテンシャルで、このポテンシャルについて z 方向の極小点について x 軸方向で見たものが図3(b)である。 $1.4\mu\text{K}$ の深さで、 $10\mu\text{m}$ の周期ポテンシャルが生成されているのが分かる。

図3(c)は $x=0$ での z 軸方向のポテンシャルで、赤い線は電場と磁場によって作られるポテンシャルで、青い線は磁場のみの場合である。磁場だけでは約 $60\mu\text{m}$ の位置にポテンシャルが最小の地点が出来ているが、電場を加えることにより電極に近い z が小さくなる方向へ向かってポテンシャルが落ち込んでいる。しかし、極小点は磁場だけのときと近い位置にあり、約 $5\mu\text{K}$ の高さのポテンシャルの山があるため、この極小点にトラップされた原子は電極方向へは落ち込まない。

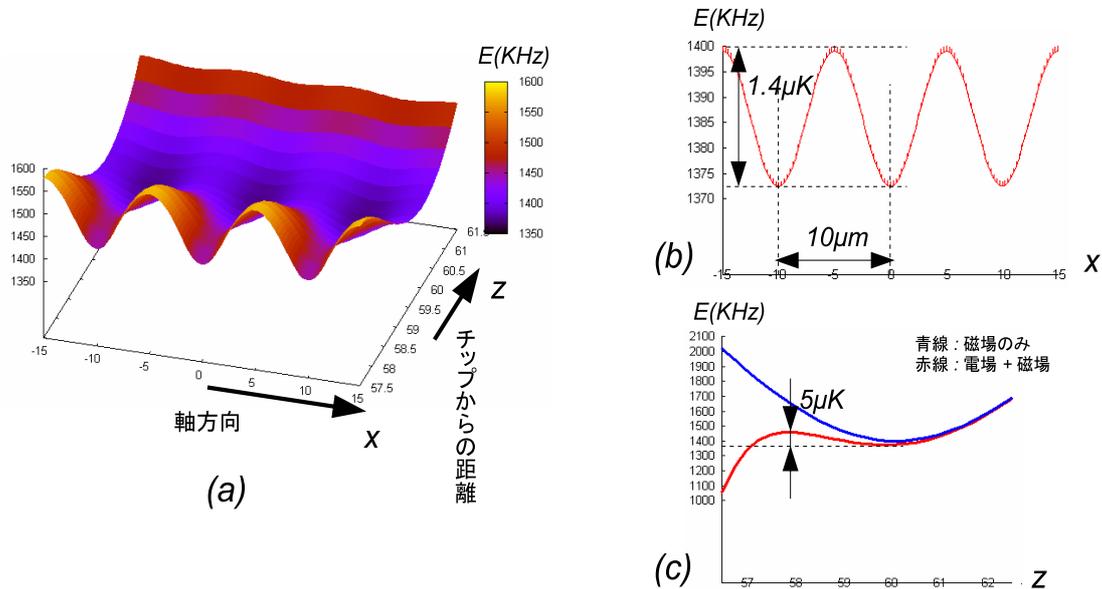


図3: 電場によるポテンシャル

実際に製作したチップ実物の写真が図4であり、(a)が全体図で中央部分の赤く囲んである箇所に電極層のあるガラス基板を接着している。(b)は電極部分の顕微鏡写真で、このなかの赤く囲んだ部分を拡大したものが(c)である。チップ全体のサイズは $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ である。

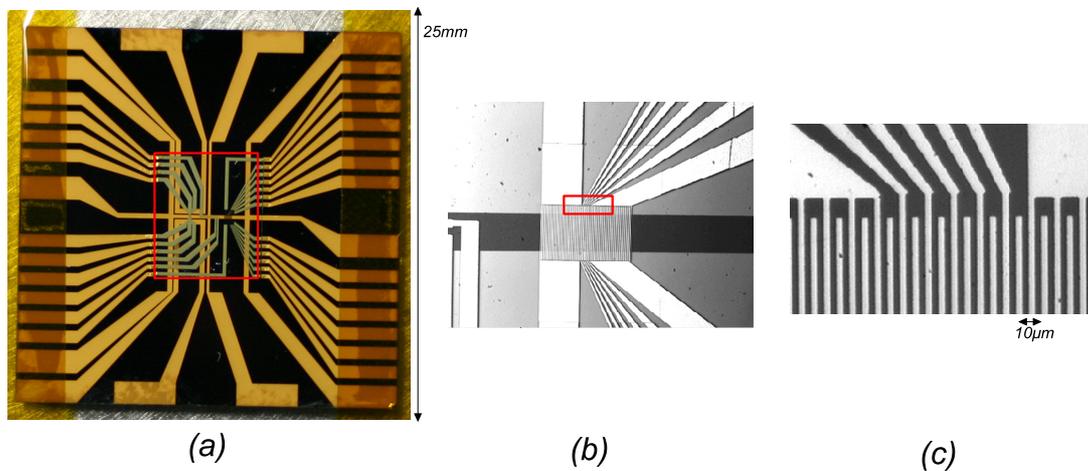


図 4: 作成したアトムチップ

チップの断面図は図 5(a) のようになっており、シリコン基板上に $10\mu\text{m}$ のワイヤがあり、その上に $50\mu\text{m}$ のガラス基板が乗っており、さらにその上に厚み 100nm の電極部や厚み $1\mu\text{m}$ の微小電流を流すパターンが乗っている。電極部分の詳細図は図 5(b) で、 $2\mu\text{m}$ の電極が $5\mu\text{m}$ ごとに並んでいるが個々の電極の電圧を操作できるのは中央の 10 個の電極だけで、他に左右 50 個ずつ交互に電圧を設定できる電極が作られている。

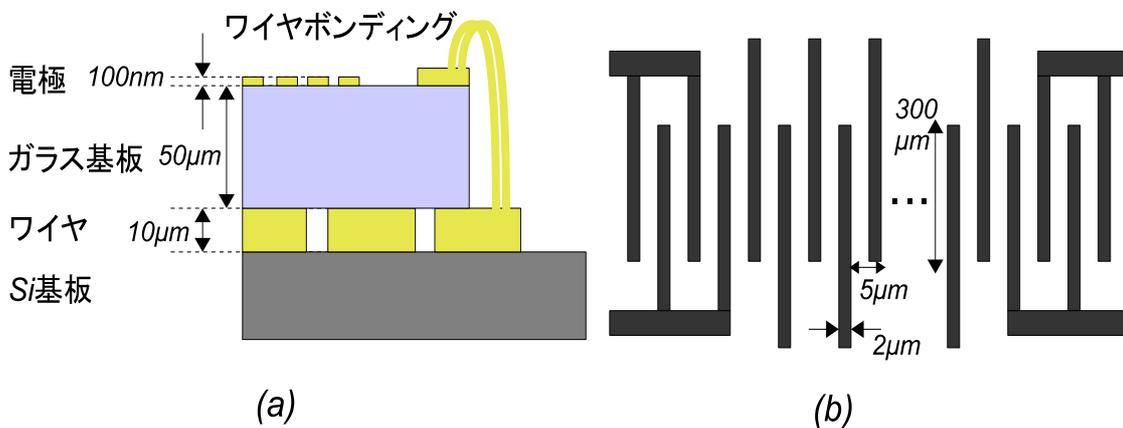


図 5: 実際のアトムチップの構造

4 アトムチップの評価

アトムチップを駆動させるためには冷却原子を用意する必要があるが、本研究で設計したアトムチップで生成されるポテンシャルは $1\mu\text{K}$ 程度となっている。この温度は Rb の

ボース凝縮体への相転移温度程度であり周辺装置としてはBECの生成装置と同様のものが必要となる。

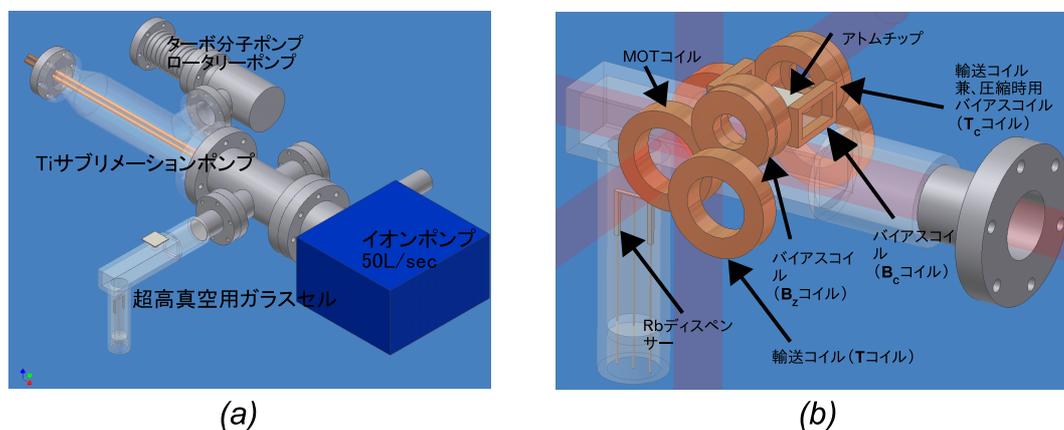


図 6: 実験装置

図 5(a) は本研究のために作成した装置の真空系であり、5(b) はアトムチップ周辺のコイルと冷却光の配置図である。本研究の目的のひとつを装置全体の小型化としているので、主に使用するコイルを小さくする方向で装置を設計・製作した。装置の特徴としては、真空装置の蓋としてアトムチップを使用することで電極の駆動に必要な多量の配線を大気中で結線することと、複数のコイルを使用してMOTの箇所からアトムチップの箇所までの間を角度を付けて原子の輸送を行う点である。

5 まとめと今後の展望

本研究では従来のアトムチップで問題となっていた点を考慮した、チップ上での原子の微細な操作方法を提案した。原子を操作するためのポテンシャルを電場によるポテンシャルとすることで、電極を薄くすることを可能とし金属表面の影響を回避する。電場のみでは原子を捕獲できないため磁場ポテンシャルも利用するが、その際生じるフラグメンテーションについては電流を流すワイヤから遠ざけることで影響を抑える。以上をふまえ、磁場と電場を利用した2層型のアトムチップを設計・製作した。

また、アトムチップを実際に動作させて評価するための装置の製作を行った。現状では必要な真空系、光学系、制御系等が一通り完成し、MOTが作れるようになり、吸収像による原子の観測も行えるようになったところである。

今後の目標としては、第一にアトムチップに原子をロードして今回デザインしたアトムチップが実際に使用可能かを評価することである。その後、電場によるポテンシャルを利用した原子の輸送や、二重量子井戸型ポテンシャルによるジョセフソン接合の実験に発展させていきたい。