

アトムチップの開発とその評価

量子物質工学科(0013070) 中川研究室 中川悠輔

< 背景・目的 >

現在世界では、原子干渉計や量子情報処理デバイスへの応用を目指した研究がさかに行われている。ワイヤーに電流を流し、作られる磁場ポテンシャルを用いて原子波導波路を作り、そこに中性原子をトラップさせてボーズ凝縮体 (BEC) を生成する。コヒーレントな状態を保ちつつ、その原子波を操作することでこのような応用を目指すわけである。

我々は、その微細なワイヤーパターンを一つの基板上にまとめた原子回路 (AtomChip)を開発し、パターンに沿って原子を任意にかつ容易にガイドすることを目標にしている。

< 原理 >

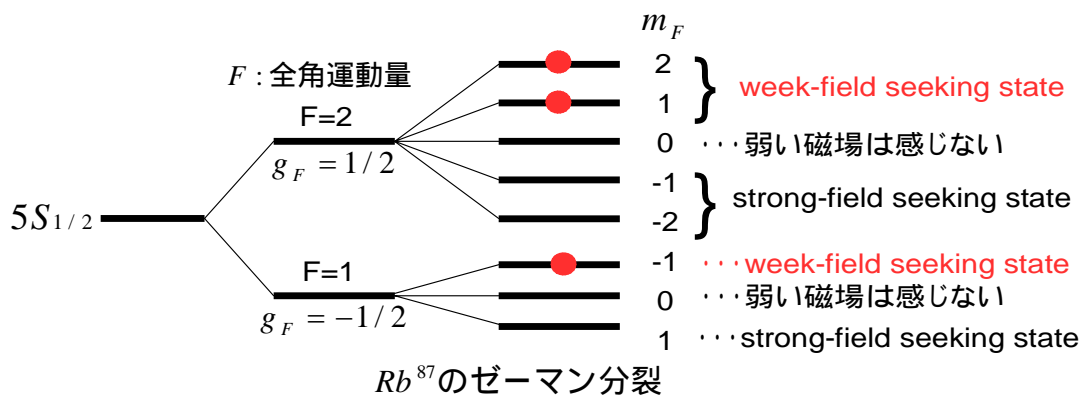
・原子と磁場の相互作用

磁気双極子モーメントをもつ原子と磁場との相互作用で生じるポテンシャルは次式で与えられる。

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = g_F \mu_B m_F |B|$$

(g_F : g 因子、 μ_B : ボー磁子、 m_F : 磁気副準位)

ここで、 g_F と m_F がともに正または負のとき、原子は下図のようにゼーマン分裂により、磁場の小さい場所のほうがエネルギー的に安定になる。すなわち、磁場の極小点がポテンシャルの極小点となるので、3次元的な磁場の極小点を作れば原子はそこにトラップされることになる。



使用する原子は Rb^{87} の $5S_{1/2} : |F=2, m_F=2\rangle$ の状態を想定しているため、トラップには3次元的な磁場の極小部を作れば原子がトラップされることになる。

・原子波導波路の作り方

直線ワイヤーに電流を流すと、右ねじの向きに磁場ができる。それに、バイアス磁場を図のようにワイヤーと垂直な向きにかけると、磁場同士が打ち消しあって、ワイヤーの上方に磁場の極小点ができる。そこに原子がトラップされて原子波導波路となるわけである。



図1.原子波導波路の原理

<磁場計算プログラミング>

下図はアトムチップ（右）とそれが作る磁場（左上）および磁場の極小付近での等磁場面の断面（トラップ原子ではないが、おおまかなトラップの様子は推測できる）を計算した結果である。チップ図の黄色部がワイヤーである。この磁場計算は MATLAB によってプログラミングしたもので、任意のワイヤーパターンの作る磁場を計算できるようにした。左上図は右図のようにバイアス磁場を加えつつ Z 型ワイヤーに電流を流したときに生じる磁場であり、3次元的な磁場極小部が作られることがわかる。

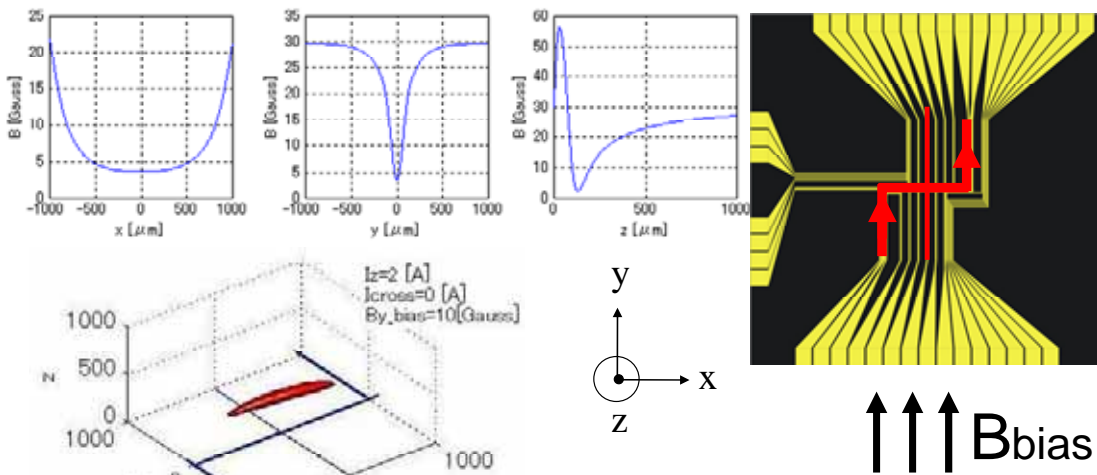
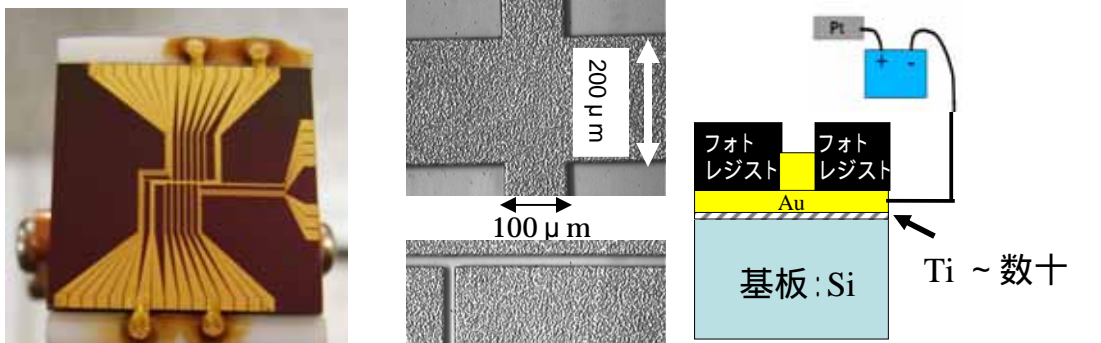


図2.アトムチップ(右)
理想的なワイヤーでの磁場計算結果(左上)
磁場極小付近での断面図(左下)

たくさんワイヤーはあるが、今回使用するのは赤で示した Z 型と真ん中のクロスワイヤーの 2 本だけである。なぜなら、その 2 本だけで BEC 生成が可能だからである。他のワイヤーはトラップ原子の圧縮および移送用に設計されたもので今後の実験で使用する予定である。

<作成したアトムチップ>

図3は実際作成したアトムチップ(左)とその拡大図(真ん中)である。チップの基板は(黒い部分)Si、ワイヤー(黄色い部分)はAuで作成し、ワイヤーは金メッキによって高さ20 μm まで成長させた。(右)ここで基板とワイヤーの間にTiを挟むのは、両者がくっつきやすくするため、Ti部分を流れる電流が作る磁場は無視できると考えている。チップと、電源につなぐ太いワイヤー(Copper-beryllium)とは直径25 μm の金ワイヤーを30回ボンディングしてあり、12A以上流すとボンディング部のワイヤーが切れた。しかし、チップに流す電流は最大3A程度なのでボンディングおよびチップのワイヤーの耐久性は問題無いことがわかった。専用銅マウントに取り付けられたチップは真空チャンバーに入れて、現在ベーキング中である。



チップは2cm×2cm

図3 .
アトムチップの写真(左)
十字部とZ型の角の拡大図
(真ん中)
金メッキ図(右)

<磁場生成用電流源の開発>

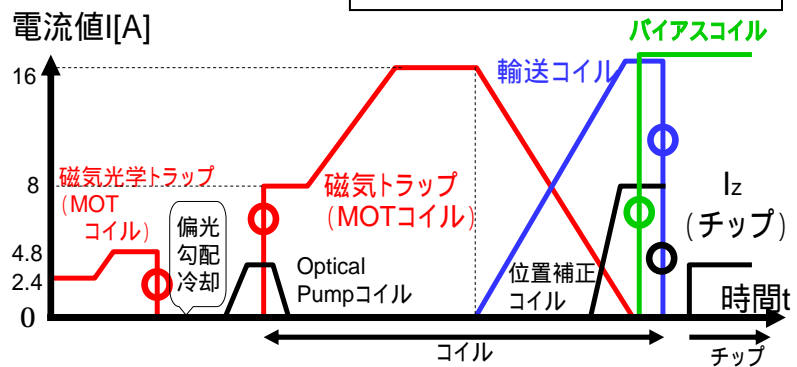
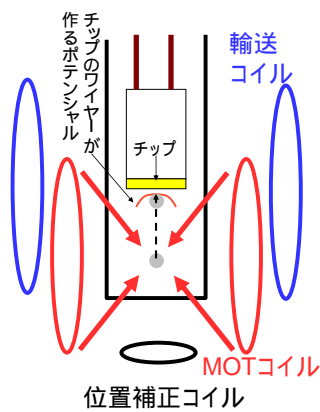


図4.トラップからチップにロードするまで(左)
各コイルとチップに流す電流のタイミングチャート(右)

チップ上での BEC 生成のためには、3つのコイルを使ってトラップしてから、チップへとロードする手法を考えている。(図4)まず、磁気光学トラップをした後に、偏光勾配冷却をし、オプティカルパンプによって原子を $|F=2, m_F=2\rangle$ の

状態にそろえて磁気トラップへ移行する。(図 4)次に MOT コイルを切りつつ、外側の輸送コイルをゆっくり立ち上げることによって合成磁場ができて、磁場の極小部の移動に伴い原子はチップ近傍まで移送される。そこでチップのワイヤーでポテンシャルを作り、うまくキャッチさせる。微妙な位置合わせは位置補正コイルを使用している。

ここで必要になるのが、原子の密度損失を少なくするために、コイルに流す電流のスイッチング時間を 1ms 以下に抑えることである。(図 4 の 印部)また、コイルでのトラップから、チップでのトラップへ移行するときにそれぞれの作る磁場勾配が一致している必要がある。そうしないと、原子数のロスが生じてしまうからである。そのためには、電流値を自由に変えられる電流源が必要であり、その 2 つの条件が満たされる電流源を 5 つのコイル分だけ自作した。また、PC からコントロールでき、PC からのノイズはフォトカプラによる絶縁によって抑えられている。下図がその評価であり、すべての条件を満たした電流制御系の作成に成功した。

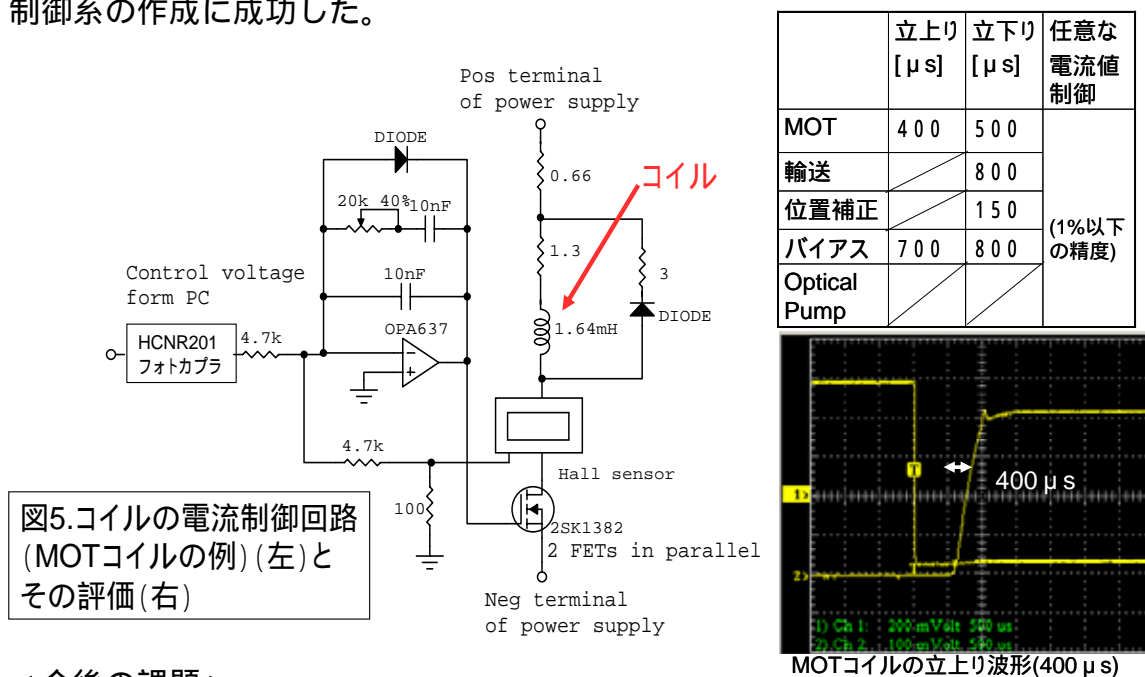
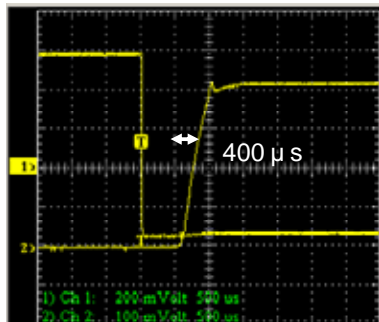


図5.コイルの電流制御回路 (MOTコイルの例) (左)と
その評価(右)



MOTコイルの立上り波形(400 μ s)

< 今後の課題 >

アトムチップや電流制御系は出来上がったので、とにかくチップ上で BEC を作成することが第一の目標である。それができたら、トラップ原子の吸収像を観察することによってワイヤーパターンや表面からの影響を確かめてチップの評価をしたいと思う。また、MATLAB を使用してトラップ原子の波動関数の解析・グラフィック化を試みる。さらに今回作成した磁場計算プログラムに厳密な電流密度 (Z 型ワイヤーの角の部分やクロスワイヤーの十字の部分の電流密度) を利用することにより、磁場ポテンシャルが理想的なワイヤーとどれほど変わるか評価することも必要になってくると考えている。