

1. はじめに

我々の研究室では、準安定状態ネオン原子を用いて原子線ホログラフィーの実験を行ってきた。その手法は、レーザー冷却法と磁気光学トラップとを用いて、de Broglie 波長の長い原子波を生成し、それを窒化シリコン薄膜に微小な方形の穴を開けて作られたホログラムに照射して、任意の原子パターンを形成するというものである。

この描画パターンを、さらに実時間で変化させるためには、既に確立された原子線ホログラフィーによる原子操作を、実時間で原子波の位相に変調が加えられるような他の原子操作法と組み合わせることが考えられる。我々は、2次の Stark ポテンシャルによる原子波の位相シフトを利用することを考え、そのためにホログラムの表面に電極を形成した。原子波が透過する開口は、その電極と電極の間に加工された。従って、電極間の電位差を任意に変化させることによって、原子波の受ける位相シフトの大きさが変化し、それが再生パターンへと反映されることとなる。

本実験は、このような静電場による位相シフトを用いて実時間で再生パターンが変化するような原子線ホログラフィーを、初めて実現することを目的として行われた。

2. 静電場による原子波の位相シフト

中性原子は、永久双極子モーメントを持たないため、電場で原子に力を与えるには2次以上の摂動が必要とされる。2次の Stark 効果を用いる場合、ポテンシャルの形状は、 $U = -\mathbf{a} |E|^2 / 2$ という式で表される。 E は電場の大きさ、 \mathbf{a} は原子の分極率である(本実験で用いた、 ^{20}Ne 原子の $1s_3$ 準安定状態の分極率は、約 $2.8 \times 10^{-39} \text{ F m}^2$ であることが分かっている)。

本実験では、磁気光学トラップから解放された極低温の原子は、重力による 28.5 cm の自由落下を経て、約 2.4 m/s にまで加速されてホログラムに到達する。原子波は、ホログラムに開けられた微小な開口を通過する際、その経路上の電場の存在により位相状態を変化させるため、これをホログラフィーの像再生に利用する。位相シフトの大きさは、原子の通過速度 v を一定と見なすならば、その波数ベクトルの経路積分値で表される。

$$\Delta f = \int k_{pot} dz - \int k_0 dz \quad (1)$$

$$k_{pot} = \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} = \frac{\sqrt{2m(\hbar^2 k_0^2 / 2m + U)}}{\hbar} = \sqrt{k_0^2 + \frac{2m}{\hbar^2} U} \quad (2)$$

$$\cong k_0 + \frac{m}{\hbar^2 k_0} U = k_0 + \frac{1}{\hbar v} U$$

は全エネルギーであり、式中の近似は、ポテンシャルエネルギーに比べて原子の運動エネルギーが十分に大きいことによる（アイコンナル近似）。これより、

$$\Delta f = \frac{1}{\hbar v} \int U_{Stark} dz = -\frac{\mathbf{a}}{2\hbar v} \int E(z)^2 dz \quad (3)$$

を得る。本実験における諸条件のもとでは、ホログラム上の隣り合う電極間に 1 V 程度の電位差を与えることで、原子波の位相を 2π 変化させることができる。

3. 電極付きホログラムの構造

我々は、原子線ホログラフィー用のホログラムとして、純バイナリホログラム（pure binary hologram：PBH）を採用している。これは、計算機ホログラフィー（computer generated holography：CGH）の一種であり、再生に用いる原子波の波面と、再生パターンの両方が知られていることにより、その中間にあるホログラム上の透過関数を計算によって求める。また、透過率が 0 から 1 の間の実数値をとるホログラムは、振幅透過型ホログラムと呼ばれる。原子波の場合は、物質中をコヒーレントに透過できないために、従来の原子線用のホログラムは、透過率が穴を開ける場合の“1”と、開けない場合の“0”に 2 値化された、振幅透過型ホログラムである。

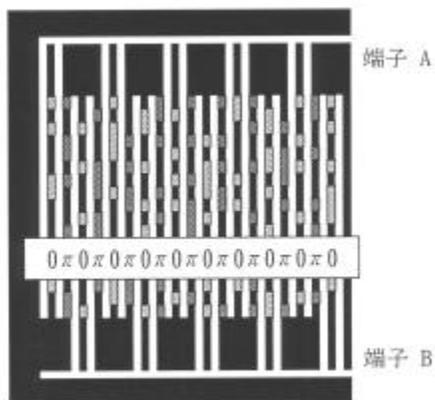
Fraunhofer 回折近似が成り立つ場合、ホログラム上の透過関数は、再生像の逆フーリエ変換によって得られる。このとき、純バイナリホログラムを採用すれば、計算機による高速フーリエ変換（fast Fourier transform：FFT）アルゴリズムが利用でき、さらにホログラムに穴を開ける加工も容易となる。純バイナリホログラムでは、透過率の 2 値化に加え、ホログラムと再生面が縦横に $2^N \times 2^N$ 個の正方形のセルに分割され、セル単位でホログラムの穴の開閉や再生像の強度分布が取り扱われる。尚、計算機ホログラフィーでは、原子線の重力による加速や、ホログラムを Fresnel 型にするためのレンズ効果をも、全て計算の中に入れてしまうことができる。

本実験で使用したホログラムは、NEC 基礎研究所の藤田淳一博士によって製作されたものであり、100 nm 厚の窒化シリコン薄膜に穴の加工が施されている。設計においてホログラムと再生面は、それぞれ 1024×1024 の正方形セルに分割され、ホログラム上の 1 セルの大きさは $0.5 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ とされた。

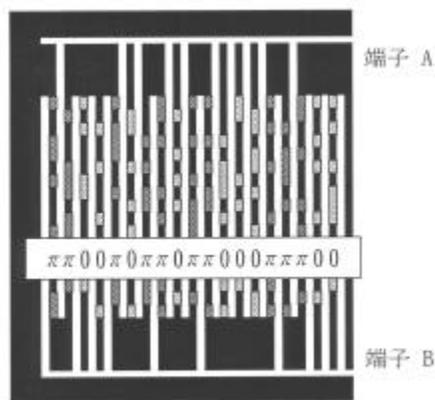
一方、ホログラム上には、各開口の近くに電場を生じさせるための電極として、プラチナの膜が 30 ナノメートル厚で蒸着された。その際、隣接する個々の開口に電極を取り付け、個別に配線を施すことは困難であるため、直線状の電極を等間隔に平行に並べて、

楕形の電極構造をとることにした。実際には、先に分割されたホログラム上のセルのうち、奇数番目の列には開口のパターンが形成され、残った偶数番目の列が電極部分に割り当てられた。従って、幅が $0.5 \mu\text{m}$ 、ピッチが $1.0 \mu\text{m}$ 、全部で 513 本の電極が作られた。

図 1 は、電極の配線の仕方と、原子波が受ける位相変化の関係を、模式的に表した図である。配線は、直線状電極の一方の端を延長して、ホログラムの両側に設けられた引き通し線の、いずれか一方と結線するという方法で、容易におこなえる。2本の引き通し線の端は端子になっており、導線によって真空槽の外にある定電圧電源と結ばれ、任意の電位差が与えられるようになっている。いま、電極間を通過する原子が、 π の位相シフトを受けるような電位差 V が、2端子間に掛けられている場合を想定する。このとき、隣り合う電極が同じ引き通し線とつながっていて等電位である場合には、その電極間を通過する原子波の位相シフトはゼロである。もし異なる引き通し線とつながっていれば、原子波は π の位相シフトを受ける。本実験では、位相変化の “0” と “ π ” が交互に、従って電極の端は 2本ずつ交互に周期的に配線されるパターンと（図 1 (a)）、ランダムな配線パターン（図 1 (b)）の 2通りの配線方法が用いられた。



(a) 周期的な電極パターン



(b) ランダムな電極パターン

図 1

4. 実験方法

実験装置は大きく分けると、高密度な磁気光学トラップ(MOT)を生成する部分と、そのMOT中の原子を用いて、原子線ホログラフィーの再生像の観測を行う部分から構成される。前者のMOT生成には、その前にネオン原子の準安定状態への励起や、レーザー冷却の過程が必要となる。また、ホログラフィーの実験では、外場の影響を受けにくいことと、原子の到着を2次元的に高効率で検出できることが、重要となる。

図 2 は、実験装置の構成図である。真空槽は 4つの領域に分けられていて、各領域の間は $20 \sim 40 \text{mm}^2$ 程度の大きさの穴で仕切られており、合計 5 台のターボ分子ポンプによる差動排気で、 10^{-7}Torr 以下の超高真空状態が保たれている。また、図 3 はネオン原子のエネルギー準位図である。原子をレーザー冷却するには、数万回のフォトンの吸収、

放出を繰り返せるような、遷移モーメントの大きな閉じた2準位系が必要となるが、本実験では数十秒の長い寿命を持つ $1s_5$ ($J=2$) 準安定状態と $2p_9$ ($J=3$) の間の遷移が、レーザー冷却及びMOTに利用されている。遷移波長は640nmであり、これには波長可変なCW色素レーザー(DCM色素)を用いている。図2にあるように、ソース部では直流放電によって、準安定状態ネオン原子が生成されており、原子の初速度を抑えるために、この部分は液体窒素により予備冷却されている。次の真空槽に設置された deflector は、レーザー光の放射圧により、原子線をコリメートし、強度を増す働きがある。尚、本実験装置では、空間変化する磁場により、原子の減速によって生じるドップラーシフトを補償する、ゼーマン同調法によるレーザー冷却が行われている。また、MOTは正四面体タイプのものであり、4本のレーザー光は、予め真空槽の外部で分岐され、そのうちの1本はレーザー冷却用のビームを兼ねている。

一方、 $1s_5$ 状態の原子は、 $2p_5$ 状態を介して、約半分の原子を $1s_3$ 準安定状態へとオプティカルポンピングすることが可能であり、ホログラムには、この状態のネオン原子を用いている。 $1s_5$ 状態から $2p_5$ 状態への励起のための、波長598nmの色素レーザーの光(Rhodamine 6G色素)は、真空槽の上部窓より入射されて、MOTの中心で強度の極大点を作るようにフォーカスされる。 $1s_3$ 準安定状態に至った原子は、MOTの力を感じずに、重力による放物運動を開始するので、その経路上にホログラムを設置し、さらに下方で、イオンや電子などの高エネルギー粒子用の2次元検出器である micro-channel plate (MCP) を用いて、原子の作る再生パターンを観測する。実験データの記録は、MCP背面の蛍光板が光る様子を、CCDカメラによって撮影する方法で行っており、映像は家庭用ビデオデッキで録画され、コンピューター上の画像処理ボードを用いて解析される。

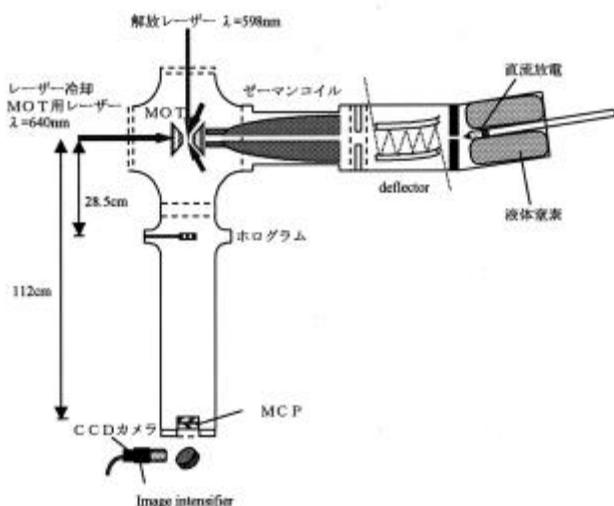


図2 実験装置図

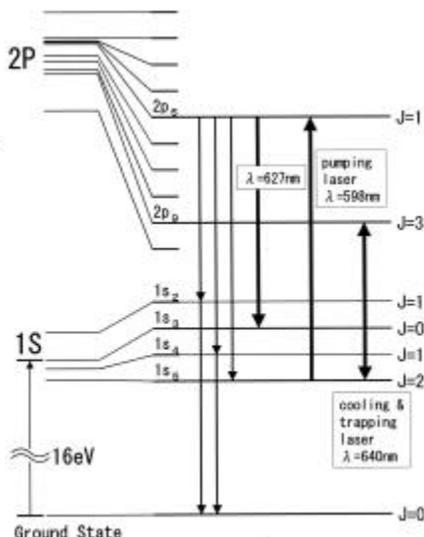


図3 エネルギー準位図

5. 実験結果

実験には、設計方法の異なる3通りのホログラムが使用された。そのうちの2つは、想定された（異なる電位の電極間を通過する原子波が の位相シフトを受けるような）電位差を与えて実験をしたときに、正しい再生像（文字 F J）が得られるものである。両者が異なるのは、各電極に与える電位の配置が周期性を持つか、ランダムであるかという点である。また、3番目のホログラムでは、2種類の再生像（文字 と ）のスイッチングを行うホログラムである。ホログラムを設計するに当たり、ホログラム上の電極間のセルに穴を開けるかどうかの判定（2値化）は、計算により得られた透過関数を基に、表1に従って行われた。

	等電位の電極間のセル	異なる電位の電極間のセル
端子間に位相差 に相当する印加電位を掛けることで像を再生する場合	$h_{binary} = \begin{cases} 1 & \text{if } h_{real} > 0 \\ 0 & \text{if } h_{real} \leq 0 \end{cases}$	$h_{binary} = \begin{cases} 1 & \text{if } h_{real} < 0 \\ 0 & \text{if } h_{real} \geq 0 \end{cases}$
印加電位がゼロのときに像が再生されるようにする場合	$\text{全てのセルに対して } h_{binary} = \begin{cases} 1 & \text{if } h_{real} > 0 \\ 0 & \text{if } h_{real} \leq 0 \end{cases}$	

表 1

図4、図5、図6に、各ホログラムによる実験結果を示す。積算時間はそれぞれの再生像によって異なるが、約1.5～6時間であり、画面内の全データ数は約11万～90万個となった。各再生像内には、画面の垂直方向に上から順に、実像、非回折像、虚像が並んでいる。また、画面中央には、MOT中の原子から放出された真空紫外光による、ホログラムの正方形の影が現れている。一方、水平方向には、楕形の電極による周期構造に起因する高次の回折像が出現している。

実験結果において特徴的なこととしては、周期的な電位配置のホログラムで印加電位ゼロの場合（図4（a））では、実像の再生位置が水平方向に2分の1回折距離だけシフトしているのに対して、同条件のランダムな電位配置のホログラムの結果（図5（a））では、像が水平方向に拡散されている点などが挙げられる。また、図6の2種類の再生像のスイッチングを行うホログラムでは、文字 と に対して別々に用意されたホログラムの開口のパターンを重ねて、どちらか一方でも穴を開ける条件が満たされているセルの全てに穴を開けた。

6. まとめ

電場による2次の Stark ポテンシャルによって、ホログラムを透過する原子波に任意の位相変化を与えることに成功し、これを利用して、電極に与える電位を変えることで再生像のパターンを変化させることのできる原子線ホログラフィーを初めて実現した。今後は、さらにこの技術を応用して、より複雑な原子波のコントロールが可能となることが期待される。

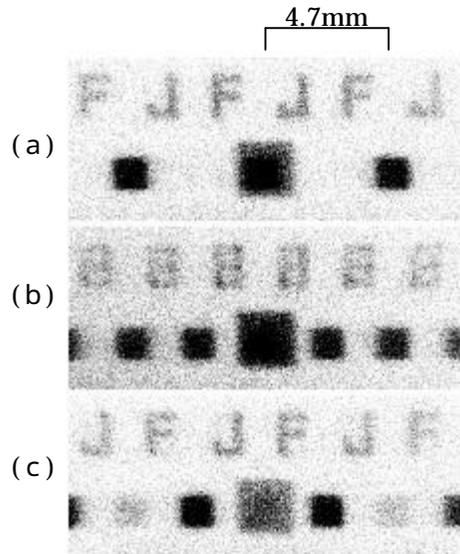


図4 周期的な電位配置を持つホログラム (a) 印加電位 0V
(b) 印加電位 0.53V (= $\pi/2$ シフト) (c) 印加電位 0.75V (= π シフト)

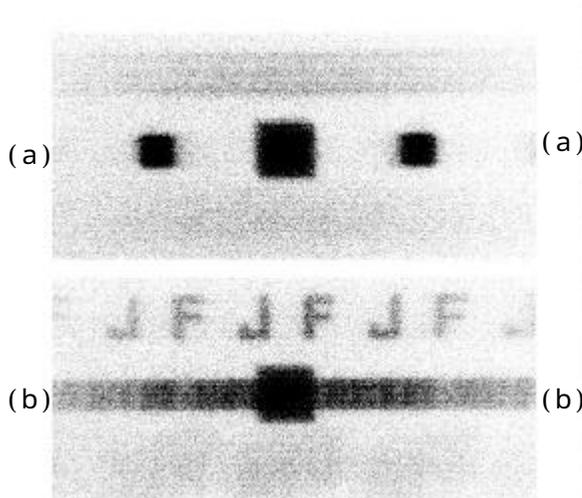


図5 ランダムな電位配置を持つホログラム
(a) 印加電位 0V
(b) 印加電位 0.75V (= π シフト)

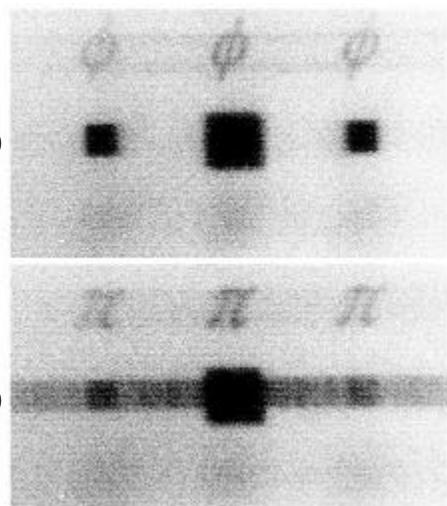


図6 2種類の再生像のスイッチング
(a) 印加電位 0V
(b) 印加電位 0.66V (= π シフト)