

## パラメトリック蛍光対の空間伝播と量子干渉

－回折限界を破る干渉縞の実現－

### 学位論文内容の要旨

近年の高度情報社会の進展に伴い、コンピューターなどに用いる半導体素子の高集積化が求められている。このような半導体素子の製造には光リソグラフィーと呼ばれる手法が広く用いられている。半導体素子の高集積化には、より線幅の細かな回路パターンを基板に書き込むことが必要となるが、光の性質である「レイリーの回折限界」によってその線幅は制限されてしまう。このため、光源の半波長以下の線幅を持つ回路パターンの書き込みは困難であった。したがって、これまでの半導体素子の高集積化はリソグラフィー光源の短波長化によって達成されてきた。

現在、主流である光リソグラフィーの光源は波長 193nm の ArF レーザーである。また、極紫外線リソグラフィー (EUVL) は次世代の光リソグラフィーの最有力候補で光源波長は 13.5nm である。この EUVL は ArF を用いたリソグラフィーと比較して光源の波長が大幅に短波長化されるため数分の 1 の加工分解能を有するとされる。しかしながら、この方式にはいくつか問題がある。極紫外線は物質に対する透過率が低く、従来のリソグラフィー装置に用いられるレンズなどの光学部品は使用できない。また、光源が短波長化するにつれて装置の位置決め精度に対する要求が厳しくなる。このため、例えば EUVL が実現しても光源の短波長化による高集積化は限界を迎えるとされている。ゆえに「回折限界」という制約を無視できるような加工方式の実現が望まれている。

これまで、このような加工方式の実用化を目指して多重露光法や近接場リソグラフィーなどの研究が進められている。多重露光法は複数回の露光によって回折限界を破る線幅を持つ回路パターンの書き込みを可能とする。しかしながら、複数回の露光によって回路パターンのコントラストが低下してしまう。また、各々の露光で装置の精密な位置決めが必要になる。一方、近接場リソグラフィーではエバネッセント光を用いて可視光でも極紫外線と変わらない解像線幅を達成できるが、加工の際にマスクと基板の接触が必要となるために基板に傷が付く可能性がある。

こうした中、2000 年に Boto らによって光の量子的性質を利用する「量子リソグラフィー」が提案された。この技術はリソグラフィーの光源として「光子数もつれ合い状態」と呼ばれる状態を用いる。彼らの理論によると  $N$  個の光子がもつれ合った状態にある場合、レーザー光と比較して  $1/N$  倍細かな線幅を持つ回路の加工が可能となる。例えば光子数 10 のもつれ合い状態が光源のときには、可視光で数十 nm の線幅を持つ回路の作成が可能となる。このような特性を持つ量子リソグラフィーの実現にはまず空間中に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の観測による理論検証が必要となる。しかしながら、このような研究の報告はない。

これまで、Edamatsu らは、光子数 2 のもつれ合い状態と経路干渉計を用いて、レーザー光を用

いた場合の  $1/2$  の周期を持つ干渉パターンを得た。また、Nagata らは、光子数 4 のもつれ合い状態と経路干渉計を用いてレーザー光の場合の  $1/4$  の周期を持つ干渉パターンを得た。一方、Angelo らはもつれ合い状態の回折によって形成された回折パターンの周期がレーザー光を用いた場合の  $1/2$  になることを実証した。しかしながら、いずれの研究でも空間上に形成された回折限界を破る干渉縞を観測していない。それゆえ、本研究では量子リソグラフィの理論を実証するために、空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の観測を目指した。

空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の実現には、もつれ合い状態を発生させるための光源、回折限界を破る周期を持つ干渉縞を空間上に形成する能力を持つ干渉計、さらに、干渉縞の検出部が必要となる。

本研究では最初に光子数 2 のもつれ合い状態を得ることを試みた。この状態を得るにはパラメトリック下方変換によって同時発生するパラメトリック蛍光対を用いるのが一般的である。実際に蛍光対を透過率 50% の無偏光ビームスプリッターで干渉させることでこの状態が得られる。このとき、効率のよいもつれ合い状態の発生にはビームスプリッター上で同時発生した光子をうまく重ね合わせることが重要となる。そのためには、パラメトリック蛍光対の空間中の伝播を知る必要がある。

これまで、パラメトリック蛍光対の空間伝播に関する研究はあるが、同時発生した光子の空間伝播を定量的に、かつ簡単に評価するための方法がなかった。そこで本研究ではこのようなことを可能とする方法を提案し、同時発生した光子の空間伝播を評価した。

パラメトリック蛍光対の発生方法には Type-I、Type-II と呼ばれる 2 種類の発生方法が存在するが、各々のタイプで同時発生する蛍光対を測定するための光学系が異なる。それゆえ、これらのタイプで独立に空間伝播を調べた。この結果と安定性など干渉光学系に求められる性能も含めた検討によって、空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の光源にはビーム状に発生する Type-I パラメトリック蛍光対から得られるもつれ合い状態が適しているという結論に至った。

次に、ビーム状蛍光対から得たもつれ合い状態を干渉させるための光学系を構築した。このとき、光学系のミスアライメントが干渉縞の明瞭度、及び周期に与える影響を考慮するため、光源の品質から干渉パターンを見積もる方法を提案した。そして、この方法を用いて回折限界を破る周期を持つ干渉縞を得るために必要となる光源品質を明らかにした。さらに、レーザー光を用いて提案した干渉計の安定性、実効透過率を評価した。最後に、これらの結果をふまえて効率よく干渉縞の観測を行うために光学系を改良した。

干渉縞の検出部では近接場光学顕微鏡に用いる波長以下の開口サイズを持つプローブと光子計数装置からなる波長以下の高い解像力を有する光子検出技術を確立した。さらに、このプローブへの光子の結合の高効率化を図った。これらの干渉計の構築、評価、改良によって、波長 702nm の光源を用いて、回折限界を破る 328nm の周期を持つ干渉縞の観測に成功した。

以上を要するに、本研究では、量子リソグラフィの実現への最初のステップとして、空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の実現を目指した。まず、パラメトリック蛍光対の空間伝播を調べるための新規の方法を提案し、蛍光対の空間伝播を決める要因を明らかにした。さらに、空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の観測のための干渉計の構築、評価、改良を行った。そして、これらの結果をもとに、世界で初めて空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の観測に成功した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笹 木 敬 司  
副 査 教 授 末 宗 幾 夫  
副 査 教 授 三 澤 弘 明  
副 査 教 授 竹 内 繁 樹

## 学 位 論 文 題 名

### パラメトリック蛍光対の空間伝播と量子干渉

#### － 回折限界を破る干渉縞の実現 －

近年の高度情報社会の進展に伴い、コンピューターなどに用いる半導体素子の高集積化が求められている。このような半導体素子の製造には光リソグラフィーと呼ばれる手法が広く用いられている。半導体素子の高集積化には、より線幅の細かな回路パターンを基板に書き込むことが必要となるが、光の性質である「レイリーの回折限界」によってその線幅は制限されてしまう。このため、光源の半波長以下の線幅を持つ回路パターンの書き込みは困難であった。

2000 年に Boto らによって光の量子的性質を利用する「量子リソグラフィー」が提案された。この技術はリソグラフィーの光源として「光子数もつれ合い状態」と呼ばれる状態を用いる。彼らの理論によると  $N$  個の光子がもつれ合った状態にある場合、レーザー光と比較して  $1/N$  倍細かな線幅を持つ回路の加工が可能となる。例えば光子数 10 のもつれ合い状態が光源のときには、可視光で数十 nm の線幅を持つ回路の作成が可能となる。このような特性を持つ量子リソグラフィーの実現にはまず空間中に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の観測による理論検証が必要となる。しかしながら、このような研究の報告はない。

これまで、Edamatsu らは、光子数 2 のもつれ合い状態と経路干渉計を用いて、レーザー光を用いた場合の  $1/2$  の周期を持つ干渉パターンを得た。また、Nagata らは、光子数 4 のもつれ合い状態と経路干渉計を用いてレーザー光の場合の  $1/4$  の周期を持つ干渉パターンを得た。一方、Angelo らはもつれ合い状態の回折によって形成された回折パターンの周期がレーザー光を用いた場合の  $1/2$  になることを実証した。しかしながら、いずれの研究でも空間上に形成された回折限界を破る干渉縞を観測していない。それゆえ、本研究では量子リソグラフィーの理論を実証するために、空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の観測を目指した。

空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の実現には、もつれ合い状態を発生させるための光源、回折限界を破る周期を持つ干渉縞を空間上に形成する能力を持つ干渉計、さらに、干渉縞の検出部が必要となる。

本研究では最初に光子数 2 のもつれ合い状態を得ることを試みた。この状態を得るにはパラメト

リック下方変換によって同時発生するパラメトリック蛍光対を用いるのが一般的である。実際に蛍光対を透過率 50% の無偏光ビームスプリッタで干渉させることでこの状態が得られる。このとき、効率のよいもつれ合い状態の発生にはビームスプリッタ上で同時発生した光子をうまく重ね合わせることが重要となる。そのためには、パラメトリック蛍光対の空間中の伝播を知る必要がある。

これまで、パラメトリック蛍光対の空間伝播に関する研究はあるが、同時発生した光子の空間伝播を定量的に、かつ簡単に評価するための方法がなかった。そこで本研究ではこのようなことを可能とする方法を提案し、同時発生した光子の空間伝播を評価した。

パラメトリック蛍光対の発生方法には Type-I、Type-II と呼ばれる 2 種類の発生方法が存在するが、各々のタイプで同時発生する蛍光対を測定するための光学系が異なる。それゆえ、これらのタイプで独立に空間伝播を調べた。この結果と安定性など干渉光学系に求められる性能も含めた検討によって、空間上に形成された回折限界を破る周期を持つ干渉縞の光源にはビーム状に発生する Type-I パラメトリック蛍光対から得られるもつれ合い状態が適しているという結論に至った。

次に、ビーム状蛍光対から得たもつれ合い状態を干渉させるための光学系を構築した。このとき、光学系のミスアライメントが干渉縞の明瞭度、及び周期に与える影響を考慮するため、光源の品質から干渉パターンを見積もる方法を提案した。そして、この方法を用いて回折限界を破る周期を持つ干渉縞を得るために必要となる光源品質を明らかにした。さらに、レーザー光を用いて提案した干渉計の安定性、実効透過率を評価した。最後に、これらの結果をふまえて効率よく干渉縞の観測を行うために光学系を改良した。

干渉縞の検出部では近接場光学顕微鏡に用いる波長以下の開口サイズを持つプローブと光子計数装置からなる波長以下の高い解像力を有する光子検出技術を確立した。さらに、このプローブへの光子の結合の高効率化を図った。これらの干渉計の構築、評価、改良によって、波長 702nm の光源を用いて、回折限界を破る 328nm の周期を持つ干渉縞の観測に成功した。

これを要するに、著者は、量子リソグラフィの実現に向けて、パラメトリック蛍光対の空間伝搬特性を解析するとともに、空間上に形成された回折限界を破る周期の干渉縞の観測実験を行って有益な知見を示し、量子光加工の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があるものと認める。