

露光用6kHzArF エキシマレーザの開発

学位論文内容の要旨

半導体は3年で集積度が4倍になるムーアの法則に従って微細化が進み、その露光用光源は微細なデザインルールを実現するために短波長化が進み、高圧水銀ランプのg線、i線の時代を経てエキシマレーザの時代になった。2004年から、本格的にArFエキシマレーザ($\lambda=193\text{nm}$)が露光用光源として使われており、近年では、レンズとウェーハ間に純水などの屈折率の大きな液体を満たす液浸技術を適用し、2010年まで使われようとしている。本論文では、これらの技術に対処可能な露光用光源6kHzArFエキシマレーザの開発を目的に、特に、高繰り返し化技術、パルスストレッチ技術、音響波によるレーザ光への影響の低減技術について、その必要性と技術的課題を明らかにし、研究開発した成果をまとめたものである。

第1章は序論であり、ArFエキシマレーザ露光装置が要求する光源特性について述べている。高解像度を実現させるためには、積算露光量の安定性と密接な関係にあるレーザ出力エネルギーばらつき、中心波長の振動や熱による変動の低減が要求される。高い開口数の実現には、スペクトル線幅の狭帯域化や中心波長変動の低減を実現し色収差を低減しなければならない。生産性向上に向けては、高出力化が要求される。また、装置のオペレーションコストを下げるためにはレーザ装置の交換用部品の長寿命化や、信頼性の向上なども要求される。これらの要求を満たすArFエキシマレーザを実現するためには、高繰り返し動作を可能にし安定した狭帯域化スペクトルを得ること、パルス幅が長くピーク値が低いことが必要になる。そのためにはレーザ励起放電の高度制御が必要となる。

第2章では、まず、繰り返し周波数5kHz以上、平均出力パワー500Wを目標にして、放電部のガス流速120m/s以上でガス循環可能な装置を試作し、レーザガス混合条件の検討を行い、Heバッファガスの使用、低Xe濃度化、低HCl濃度化により放電の安定性を高め、5kHz高繰り返し動作を実現した成果をまとめた。ここでは、サイラトロンパルス電源を用いて繰り返し周波数5kHzにおいて510Wが得られた。次に、高繰り返し動作において重要な予備電離について、スパーク予備電離方式、X線予備電離方式、コロナ予備電離方式の三方式の高繰り返し動作への適応性を実験的に検討した。その結果、コロナ予備電離方式は、予備電離強度の均一性が高く、投入電力が小さく、且つ放電生成物の発生も少ないことが明らかとなった。そこで本研究ではラダー型の外電極を用いた高繰り返し動作の改良型コロナ予備電離方式を開発し、これは紫外線の利用効率が高く、高繰り返し動作においても発光強度が低下せず、高速ガス流中でも安定に動作することを明らかにした。

第3章では、エキシマレーザを高出力化に関連して、光学系への損傷を減らす方法のひとつとして、励起放電時間を延長して、レーザパルスの発振時間幅を伸長させるパルスストレッチ技術を開発したことについてまとめた。また、パルス幅が長くなると、スペクトルの狭帯域化においても有

利になることを示した。本技術は、電極間へパルス電圧を印加、振動する放電電流を発生させ、初めの一周期とそれに続く半周期においてもレーザ発振させるように励起回路を構成して、高繰り返し ArF エキシマレーザにおけるパルスストレッチを実現した。その結果、長パルス幅 50ns が得られ、このとき、スペクトルは半値全幅で 0.32pm の狭線幅が得られることを明らかにした。

第 4 章では、まず、露光装置の生産性を向上させる方法として、光学素子への損傷を抑えながら高出力化するためには、繰り返し周波数を増加させる高繰り返し化が要求されることについてまとめた。次に、露光用プロトタイプ 4kHzArF エキシマレーザをベースとして、高繰り返し動作に適する改良を実施した結果、スペクトル半値全幅が 0.40pm 以下で、レーザ平均出力パワー 42W、パルスごとのエネルギー安定性 3.5

第 5 章では、まず、高繰り返し動作における重要な技術課題に音響波によるレーザ光への影響があり、これは励起放電によって発生した音響波がチャンバー内を伝播し、これが次の放電点弧時に放電空間にガス密度揺らぎを形成し、レーザ光路における屈折率の不均一分布を引き起こし、レーザ光特性を劣化させることについてまとめた。次に、音響波シミュレーションコードを開発し、音響波の伝播状態を調べ、チャンバーの内部構造の改善を図る手法をとった結果、音響波のスペクトル線幅への影響は非常に低下し、高分解能の狭帯域化モジュールを使うことで、6kHz 動作において半値全幅で 0.15pm 以下、スペクトル線幅 E95 で 0.30pm 以下の狭帯域化スペクトルが実現できることを明らかにした。

第 6 章では、まず、露光用 6kHz 高繰り返し ArF エキシマレーザは、狭帯域化と高出力化の両方の要求に応えるため、MOPO(注入同期)方式を採用しており、主な性能仕様は、平均出力パワーが 60W、スペクトル線幅 E95 で 0.5pm 以下であることについてまとめた。

次に、これまでに開発した高繰り返し化技術、音響波影響の低減技術を発振段レーザチャンバーに適応した結果、繰り返し周波数 2kHz から 6kHz の間で、E95 は 0.30pm から 0.34pm の間に収まることを製品レベルで明らかにした。また、高繰り返し化技術、および音響波影響の低減技術を増幅段レーザチャンバーに適応した結果、音響波の影響によるエネルギー安定性の変動が非常に小さくなることを製品レベルで明らかにした。一方、パルスストレッチ技術を用いることによって、発振段レーザにおいてはスペクトルの狭帯域化、および増幅段レーザチャンバーにおいてはパルス幅仕様の達成が可能になることを製品レベルで明らかにした。

第 7 章は結論であり、本研究開発で得られた成果に関して述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 酒 井 洋 輔

副 査 教 授 雨 宮 好 仁

副 査 教 授 福 井 孝 志

学 位 論 文 題 名

露光用6kHzArF エキシマレーザの開発

半導体の集積密度は、これまで 18~24 ヶ月で倍増するというムーアの法則に従って微細化が進み、このデザインルールを実現するために露光用光源は短波長化が進み、高圧水銀ランプの g 線、i 線の時代を経て現在エキシマレーザの時代になった。2004 年から ArF エキシマレーザ (波長 = 193nm) が本格的に露光用光源として使われ始め、現在では、レンズとウェーハ間に純水などの屈折率の大きな液体を満たす液浸技術を適用し、2010 年に向けたロードマップ (加工幅 45nm) までは本光源が使われようとしている。

本論文は、これらの技術に対応可能な露光用光源 6kHzArF エキシマレーザの開発を目的に、特に、高繰り返し化技術、パルスストレッチ技術、音響波によるレーザ光への影響の低減技術について、その必要性と技術的課題を明らかにし、研究開発した成果をまとめたものである。

本論文は 7 つの章からなり、以下のように構成されている。

第 1 章は序論であり、ArF エキシマレーザ露光装置が要求する光源特性について述べている。即ち、高解像度を実現させるためレーザ出力エネルギーのばらつきを低減する (積算露光量の安定化) こと、高い開口数を得るためにはスペクトル線幅の狭帯域化や中心波長の変動を色収差の低減により実現すること、生産性向上には出力を上げること、等の要求を掲げ、本要求を満たすためにレーザ励起放電の高度制御の必要性について述べている。

第 2 章では、繰り返し周波数 5kHz 以上、平均出力パワー 500W を目標にして、放電部のガス流速 120m/s 以上でガス循環可能な装置を試作し、レーザガス混合条件の検討を行い、バッファーガスに He を使用して Xe ガスの低濃度化、HCl 濃度を低下することにより放電の安定性の向上に成功し、5kHz 高繰り返し動作を実現した成果を纏めた。本開発においては、予備電離としてスパーク予備電離、X 線予備電離、コロナ予備電離の三方式検討し、その結果、コロナ予備電離方式は小電力動作が可能で予備電離密度の均一性が高く、且つ放電による副産物の発生も少ないことが明らかになり、本方式を採用したこと示した。

第 3 章では、エキシマレーザの高出力化に関連して、光学系への損傷を減らしスペクトルの狭帯域化を齎す方法として、励起放電時間を延長によるパルスストレッチ技術を開発したことについて纏めている。

第 4 章では、露光装置の生産性を向上させる方法として、光学素子への損傷を抑えながらレーザ光の高出力化には、繰り返し周波数を上げることが要求されるが、プロトタイプ 4kHzArF エキシマレーザをベースに高繰り返し動作に適する改良を加えた結果、スペクトル半値全幅が 0.40pm 以

下でレーザ平均出力パワー 42W、パルス毎のエネルギー安定性 3.5

第 5 章では、放電励起媒体中で発生する音響波によるレーザ光品質への影響について纏めた。本影響を本研究で開発した音響波シミュレーションコードを用いて解析した結果をもとに、レーザ励起キャビティの内部構造を改善した。その結果、スペクトル線幅が改善し、更に高分解能の狭帯域化モジュールを使うことで、6kHz 動作のもと半値全幅が 0.15pm 以下、スペクトル線幅は 0.30pm 以下の狭帯域化スペクトルが得られた。

第 6 章では、露光用 6kHz 高繰り返し ArF エキシマレーザでは、狭帯域化と高出力化の両者の要求に応えるべく注入同期方式を採用したシステムを開発し、その結果平均出力が 60W、スペクトル線幅 0.5pm 以下の実機が製品レベルで実現したことを示した。

以上のように、本論文は露光用 6kHz ArF エキシマレーザの開発において、レーザ光の高繰り返し化、長パルス化、低ピークパワー化、およびスペクトル狭帯域化の実現のためレーザ励起媒質放電に検討・改良を加え、半導体超微細加工産業が要求する高い性能を満足する実用機を開発、その成果を纏めたものであり、放電プラズマ工学・レーザ工学ならびに微細加工技術の進歩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あるものと認める。