

半導体露光用ArFエキシマレーザの高繰り返し化に関する研究

石原, 孝信

<https://doi.org/10.15017/1398401>

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名： 石原 孝信

論文題名： 半導体露光用 ArF エキシマレーザの高繰り返し化に関する研究

区 分： 甲

論 文 内 容 の 要 旨

エキシマレーザは 1966 年に Basov によって提案され、その後、放電励起の希ガス－ハライドエキシマレーザを中心に高出力化、高繰り返し化と長寿命化などの高性能化の研究開発が進められた。エキシマレーザは、近紫外域のいくつかの波長でこれまでになく高出力で高効率な発振が得られるので、研究用途のみならず産業で実用化されている。

市場の大きな産業は、半導体露光装置用の光源である。半導体露光装置は、コンピュータや携帯電話を構成する CPU やメモリといった電子部品に刻まれている、ナノメートル単位の微細な半導体集積回路をつくる装置である。電子部品に刻まれる半導体集積回路は、コンピュータや携帯電話の性能向上のため、年々微細化されてきている。この微細化を支えたのは、微細加工技術の発展で、中でも半導体露光技術の発展の功績は大きい。近紫外域の波長で発振するエキシマレーザは、この微細化のために、半導体露光装置用の光源として採用された。KrF エキシマレーザを用いた半導体露光装置は 1990 年代の後半に、ArF エキシマレーザを用いた半導体露光装置は 2004 年に実用化された。

半導体露光用エキシマレーザへのさまざまな技術的要求の中で、スループット向上のための、繰り返し周波数の向上とレーザ出力の向上は強く要求されている。現在の半導体露光用 ArF エキシマレーザの繰り返し周波数は 6 kHz で、レーザ出力は 60 W である。次世代の半導体露光装置の光源に要求されているレーザ出力は 100 W 以上である。この高出力化は、半導体露光装置やエキシマレーザ自身の光学素子のダメージの点から、繰り返し周波数を上げて実現するのが望ましい。したがって、放電励起 ArF エキシマレーザで 10 kHz 動作を実現することが期待されている。

本研究は、以上を背景として、10 kHz の繰り返し周波数で空間的に均一な放電を形成できる条件と課題を明らかにすることを目的とした。まず、高繰り返し動作の阻害要因であるガス密度くぼみと音響波を高い分解能で計測できる計測システムを構築した。そして、この計測システムを用いて、フッ素を含まないガスの放電で、空間的に均一な放電を形成するために必要な、放電領域に対するガス密度くぼみ領域の空間的位置関係を調べた。つぎに、放電励起 ArF エキシマレーザで、10 kHz の繰り返し周波数で空間的に均一な放電を形成できる条件を確認した。さらに、ガス密度くぼみの影響を、放電開始時の電極間の中心面内の電界強度分布より検討した。

本論文は、これらの研究をまとめたものであり、5章より構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景と意義について述べるとともに、本論文の内容を要約した。

第2章では、エキシマレーザ、半導体露光技術と半導体露光用エキシマレーザの概要を述べた。最後に、本研究の位置づけを示した。

第3章では、エキシマレーザの高繰返し動作の阻害要因であるガス密度くぼみと音響波の計測のために、構築した計測システムについて述べた。ガス密度くぼみの計測は、狭帯域色素レーザを光源としたマッハツェンダー干渉法を用いた。この計測システムにより、放電位置に対するガス密度くぼみの空間的位置関係、および放電領域の電子密度とガス密度くぼみ領域のガス粒子密度変化を高い分解能で計測することができた。この計測システムの時間分解能は500 ps、空間分解能は0.05 mm、電子密度の検出下限は 10^{19} m^{-3} 、そしてガス粒子密度変化の検出下限は 10^{21} m^{-3} である。音響波の計測は、ガス粒子の密度変化を感度よく可視化できるシュリーレン法を用いた。このシステムにより音響波の伝播の様子、およびチャンバ内の構造物で反射して放電領域に戻ってくる音響波を計測することができた。

第4章では、放電励起 ArF エキシマレーザにおいて、10 kHz の繰返し周波数で空間的に均一な放電を形成できる条件と課題について述べた。ガス流速を速くすることなく、高繰返し化を実現するために、フッ素を含まないガスの放電で、空間的に均一な放電を形成するために必要な、放電領域に対するガス密度くぼみ領域の空間的位置関係を、マッハツェンダー干渉法を用いた計測システムで調べた。その結果、電極のギャップ間隔を短くすると、空間的に均一な放電を形成するために必要な、放電領域の中心とガス密度くぼみ領域の中心の最短間隔は狭くなることを確認した。そして、放電励起 ArF エキシマレーザにおいて、電極のギャップ間隔を16 mm から8 mm にすることにより、空間的に均一な放電を形成できる最大繰返し周波数は7 kHz から10 kHz 以上に増加することを明らかにした。このように電極のギャップ間隔を短くして、最大繰返し周波数が増加する要因として、放電幅が狭くなることと、電極間の電界強度分布が電極幅の中心に集中することを示した。電極のギャップ間隔を標準の1/2にして、10 kHz 動作したときのレーザパルス出力エネルギーは、標準の電極ギャップ間隔のときの1/3に低下した。電極のギャップ間隔を短くして高繰返し動作を実現する場合は、レーザパルス出力エネルギーの増大化が重要な課題であることを明らかにした。さらに、ガス密度くぼみの影響を、放電開始時の電極間の中心面内の電界強度分布より検討した。圧力低下の影響と放電生成物等の他要因の影響の2つに分けて見積もった結果、放電生成物等の他の要因の影響は、圧力低下の影響の5倍以上であった。

第5章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の展望について述べた。