

京都大学	博士（工学）	氏名	北村 優太
論文題目	フッ化物単結晶の光学特性に及ぼす応力の影響		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、半導体フォトリソグラフィ用高性能光学素子として使用されるフッ化カルシウム単結晶（CaF_2単結晶）、フッ化マグネシウム単結晶（MgF_2単結晶）のアニール工程および光学素子使用条件下で発生する応力を有限要素法により解析し、応力状態から複屈折を求める手法を示し、かつ、その有用性を示したものであり、6章から構成されている。</p> <p>第1章は緒論であり、本研究実施の背景となった半導体フォトリソグラフィ分野の現状について述べ、フッ化物単結晶の応力制御や光学特性に関する研究状況について概説するとともに問題点を指摘し、本研究の位置付けと目的を示している。</p> <p>第2章では、応力複屈折の原因となる光弾性効果および逆誘電率から得られる屈折率楕円体を用いて光路差および方位角を算出する理論について述べている。その後、光の波面法線方向に向かって連続的に応力が変化する場合の複屈折計算手法として、厳密な手法であるジョーンズ行列法と近似的な手法である平均応力法を紹介している。さらに、異方性媒体における両手法の等価性について検討している。また、高性能光学素子としてフッ化物単結晶を使用する場合には応力低減が重要であり、そのような使用条件では、上述の両手法の等価性を保証するための応力条件は満たされていることを述べている。</p> <p>第3章では、立方晶系に属する CaF_2 単結晶のアニール工程終了後の応力および複屈折を評価する手法を開発し、その妥当性について検証している。まず、CaF_2 単結晶のアニールは 1000°C 以上の高温で行われ、この領域では単結晶は強いクリープ挙動を示すが、既存の研究では十分なデータがないため、高温領域での同単結晶圧縮試験を実施し、クリープ構成式を作成している。次に、このクリープ構成式を有限要素解析に組み込み、$\langle 001 \rangle$ 方向育成と $\langle 111 \rangle$ 方向育成の CaF_2 単結晶のアニール工程における非線形熱応力解析を行い、応力および応力複屈折を算出している。その後、解析結果と実験結果を比較し、いずれの結晶方位においても、両者が定性的にも定量的にも良好に一致していることを確認している。また、結晶育成方向の違いにより生じる複屈折状態の大きな差異について検討を行っている。さらに、異なる結晶寸法、アニール条件での解析を行い、これも実験結果が一致することを述べ、任意の条件における開発手法の妥当性を示している。</p> <p>第4章では、正方晶系に属する MgF_2 単結晶のアニール工程終了後の応力および複屈折を、真性複屈折を考慮して評価する手法を開発している。MgF_2 単結晶においても 1000°C 以上の高温下で単結晶をクリープさせるため、応力フリー温度の概念を解析に導入して、クリープによる応力緩和を線形挙動によって近似的に再現することを行っ</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	北村 優太
<p>ている。〈001〉方向育成と〈100〉方向育成の MgF_2 単結晶に対して、複数の応力フリー温度を設定して有限要素解析を行い、どの応力フリー温度を使用した場合においても、複屈折解析結果は結晶対称性と整合性が取れており、定性的に評価できていることを検証している。そして、適切な応力フリー温度を設定することで、実験結果と良好に一致する複屈折解析結果を得ることを示している。また、結晶方位による複屈折状態の違いは、応力複屈折よりも真性複屈折によることを示している。</p> <p>第 5 章では、先端半導体フォトリソグラフィに用いられる ArF エキシマレーザー光源のチャンバウインドウとして使用される CaF_2 単結晶に対して、その使用環境下で発生する応力を算出し、レーザーが入射した際の複屈折状態を求める手法の構築を行っている。この際、CaF_2 単結晶は ArF エキシマレーザーのような真空紫外光に対しては真性複屈折現象を示すため、これを解析に組み込むための定式化を実施している。また、単結晶がレーザー光を吸収することによる発熱を考慮するため、温度測定試験を再現するような吸収物性を逆解析的に求めている。そして、〈111〉方向育成、〈110〉方向育成、〈100〉方向育成の CaF_2 単結晶チャンバウインドウに対して、複屈折測定器の波長である 633nm と、ArF エキシマレーザーの波長である 193nm の 2 種類の波長を用いた場合の複屈折状態を求めている。波長 633nm 光に対する複屈折解析結果は、実験結果と良く一致し、解析の妥当性が示されている。また、波長 193nm での解析結果から、P-偏光度を用いて光学性能の評価を行っている。これにより、従来用いられてきた〈111〉方向育成単結晶よりも〈100〉方向育成単結晶の方が、ArF エキシマレーザー光源のチャンバウインドウとして使用するのに適していることを示している。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、有限要素法を用いて、半導体フォトリソグラフィにおいて光学素子として使用されるフッ化物単結晶のインゴットアニール工程、および光学素子使用環境下での応力状態、複屈折状態を求める手法の開発を行い、その成果をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 応力のオーダーが 10^9Pa 以下の場合には、厳密な複屈折計算法であるジョーンズ行列法と、近似的な計算法である平均応力法は等価であることを示している。
2. 高温環境で CaF_2 単結晶の圧縮試験を行い、クリープ構成式を作成している。そして、このクリープ構成式を用いて有限要素法による非線形熱応力解析を行い、 $\langle 001 \rangle$ 方向育成と $\langle 111 \rangle$ 方向育成の CaF_2 単結晶のアニール工程終了後の応力と複屈折を算出している。これにより求めた解析結果は実験結果と良好に一致している。また、 $\langle 111 \rangle$ 方向育成単結晶の光路差の大きさは $\langle 001 \rangle$ 方向育成単結晶の値と比較して非常に小さいが、この違いは単結晶の機械的な異方性よりも光学的な異方性に大きく起因していることを明らかにしている。
3. 応力フリー温度の概念を導入して、 $\langle 001 \rangle$ 方向育成、 $\langle 100 \rangle$ 方向育成の MgF_2 単結晶のアニール終了後の応力および複屈折を算出する手法を開発している。得られた結果より、結晶方位に依存する複屈折状態の違いは、応力複屈折よりも真性複屈折によることを示している。そして、複数の応力フリー温度を設定し、いずれも定性的に複屈折現象を再現できることを検証している。また、適切な応力フリー温度を設定することで、実験結果と一致する解析結果が得られることを確認している。
4. 真空紫外領域の光に対する CaF_2 単結晶の真性複屈折の定式化を行うことで、ArF エキシマレーザー光源の CaF_2 単結晶チャンバウインドウの使用環境における応力と複屈折を求めるシステムを構築している。そして、複屈折測定器で用いられる波長 633nm 光に対する複屈折解析を実施し、実験結果との比較を行い、その応力と応力複屈折の解析結果の妥当性を確認している。また、ArF エキシマレーザーの波長である 193nm 光に対する複屈折解析結果から、従来用いられてきた $\langle 111 \rangle$ 方向育成単結晶よりも $\langle 100 \rangle$ 方向育成単結晶の方が、ArF エキシマレーザー光源のチャンバウインドウとして使用するのに適しているという知見を得ている。

以上、本論文は、 CaF_2 単結晶と MgF_2 単結晶の結晶内応力を有限要素法による熱応力解析によって算出し、その結果から複屈折を求める手法を示している。さらに、いくつかの重要な評価結果および知見を提示し、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 10 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 2013 年 11 月 26 日以降