

光音響法に基づいた CaF_2 レンズ透過率計測における内部残留応力の影響とそれによる極紫外光の吸収モデル

石崎 勝己^{*1}・石丸伊知郎^{*1,*6}・大平 文和^{*1}・石井 知彦^{*2}・筒井 宏光^{*3}・白井 文夫^{*4}・平田 健二^{*5}

^{*1} 香川大学工学部知能機械システム工学科 〒761-0396 高松市林町新町 2217-20

^{*2} 香川大学工学部材料創造工学科 〒761-0396 高松市林町新町 2217-20

^{*3} 三菱化学産資(株) 〒762-8510 坂出市番の洲町 1

^{*4} 四国計測工業(株) 〒761-0396 高松市林町新町 2217-7

^{*5} 現所属：四国電力(株) 〒762-0007 坂出市室町 2 丁目 4-15

Optical Absorption Model of Extreme Ultraviolet Rays by Effect of Internal Residual Stress for Transmittance Measurement of CaF_2 Lens Based on Photoacoustic Effect

Katsumi ISHIZAKI^{*1}, Ichirou ISHIMARU^{*1,*6}, Fumikazu OOHIRA^{*1}, Tomohiko ISHII^{*2}, Hiromitsu TSUTSUI^{*3}, Fumio SHIRAI^{*4} and Kenji HIRATA^{*5}

^{*1} Intelligent Mechanical System Engineering, Faculty of Engineering, Kagawa University, 2217-20 Hayashi-cho, Takamatsu 761-0396

^{*2} Advanced Material Science, Faculty of Engineering, Kagawa University, 2217-20 Hayashi-cho, Takamatsu 761-0396

^{*3} Mitsubishi Chemical Functional Products, Inc., Bannosu-cho, Sakaide 762-8510

^{*4} Shikoku Instrumentation Co., 2217-7 Hayashi-cho, Takamatsu 761-0396

^{*5} Present address: Shikoku Electric Power Co., Muromachi-cho, Sakaide 762-0007

This paper describes a new model of optical absorption at extreme ultraviolet rays (wavelength: 193 nm) having high photon energies by internal residual stress for transmittance measurement of CaF_2 lens based on photoacoustic effect. We propose an optical absorption model that produces free electrons by residual compression stress. In this model, the generational direction of the free electrons is the same as the direction of the stress. And, the light absorbed by the free electrons is determined by the Drude model. The photon energy of the excimer laser radiation is greater than the energy at the plasma boundary. Thus, dichroism is generated based on the propagation direction of the free electrons. We then verified the validity of the model by controlling the polarization of the illuminating light.

Key words: calcium fluoride, photoacoustic spectrometry, transmittance, ultraviolet rays, optical absorption, residual stress, Drude model

1. 緒 言

近年、極紫外域のレーザーを光源に用いた最新鋭逐次露光装置に必須である大口径投影レンズ(材質： CaF_2 、直径：200 mm、厚さ：50 mm)の面内透過率分布を高い精度で計測する技術の確立が望まれている。従来の CaF_2 透過率計測手法としては、光カロリメトリー法¹⁻⁶⁾が知られている。しかし、光カロリメトリー法はレーザーをレンズに長時間連続照射し、吸収された光エネルギーを温度変化

量として測定する手法であるため、熱容量の小さな小口径レンズ(例えば直径：25 mm、厚さ：10 mm程度)にしか適応できない。

そこで筆者らは、レンズに対してレーザーを ϕ 数 mm 程度の局所領域でパルス照射し、局所的な光熱変換効果^{7,8)}により生じる弾性波強度を、きわめて高い感度を有する弾性波検出器である AE (acoustic emission) センサーで計測する光音響透過率計測原理を提案してきた^{9,10)}。本手法

^{*6} E-mail: ishmaru@eng.kagawa-u.ac.jp

は、レーザー照射領域で生じる局所的な光熱変換現象に基づいていることから、レンズの外形寸法に依存しない計測手法であり、大口径レンズへの適用が可能となる。また、1点あたりの計測時間が1秒程度と短時間であるため、大口径レンズの透過率面内分布の計測が容易である。

筆者らはこれまでに、小口径サンプルを用いた従来の光カロリメトリー法との比較実験により、誤差範囲0.0054%で計測が行えることを確認し、再現性も確保している。また、大口径サンプルの透過率面内分布計測が行えることも実証している¹⁰⁾。しかしながら、本手法によって計測した大口径サンプルと、それを切断した小口径サンプルとの同一点の計測結果を比較すると、大口径サンプルの透過率のほうが最大で3%程度低くなることを確認した。これは、本手法が局所的な光熱変換現象に基づいていることから、形状や寸法の違いによるものではないことは明らかである。そこで、この差異が、製造工程で内部に残留した応力がサンプルを切断した際に開放されたことに起因するのではないかと考えた。元来、応力による光吸収は、フォトンエネルギーが低い長波長光の場合、格子振動（フォノン）が励起されることに伴う光吸収の波長が応力により変化する現象を示しており、すでに体系化されている^{11,12)}。しかし、短波長光である極紫外域では、フォトンエネルギーがきわめて高いことから、フォノンの励起に加えて電子構造に影響を及ぼすと考えられる。

そこで、本論文では、新たに考案した高フォトンエネルギー光が内部残留応力により電子構造の状態が変化することに起因して吸収されるモデルについて述べる。本モデルでは、残留応力を有するCaF₂単結晶において一般的に存在しえないと考えられてきた自由電子が、圧縮応力によって原子間距離が狭められることに起因して、圧縮方向のみに生成される。この応力方向のみに発生した自由電子が、ドルーデモデルに基づき高フォトンエネルギー光によって共振させられることで、吸収を生じることとなる。本吸収は、複屈折と相関関係のある応力に依存するため、二色性である。したがって、CaF₂の結晶においては、不純物や格子欠陥等による光吸収ばかりでなく、残留圧縮応力の方角に応じた吸収が生じることとなる。この考案モデルに基づく二色性を確認するために行った、照射光の偏光制御実験の結果についても報告する。

2. 光音響法透過率計測手法^{9,10)}

光音響透過率計測手法は、サンプルに吸収された光エネルギーにより励起された分子の無放射遷移による熱膨張（熱エネルギー）をサンプル内の弾性波に変換して音波と

して検出し、この弾性波の振幅強度から吸収率を算出することで、透過率計測を行う手法である。

具体的には、レンズにレーザーを ϕ 数mmの領域で照射する。すると、吸収された光エネルギーは光熱変換効果により熱膨張を生じる。この局所的な熱膨張により生じた径方向への力は、単結晶がほぼ一様な吸収係数分布を有することから、厚み方向に一様な分布荷重を、径方向へ付加したと考えることができる。つまり、ある縦弾性係数を有する部材に一様な分布荷重の応力を加えた場合と同様であり、これにより生じた歪みが径方向への縦波として伝搬する。このとき、レーザーを10 nsの短い間隔でパルス照射することで、1パルスでの熱エネルギーを次のパルスの熱エネルギーが到達する前にレンズ全体に拡散させることができる。そのため、レーザーを照射した局所領域に熱エネルギーが滞留しないことから、各パルスのエネルギーに対して一定量の熱膨張を生じる弾性波を励起することとなる。つまり、照射領域が10 ns程度の間隔で伸縮をするため、これにより生じた弾性波がレンズ全体に伝搬する。本手法では、高感度弾性波計測器として非破壊検査や機械の駆動状況のモニタリング等によく用いられるAEセンサーによりこの弾性波を検出することで、吸収率を算出し、透過率を計測する。

本手法は、レーザーを照射している局所的な領域の熱膨張にのみ依存した現象を用いるために、計測対象の外形寸法に依存しない。また、ノイズ成分を除去し計測データの計測精度および安定性を高めるために加算平均処理しても数秒で計測を終えることができ、レンズの透過率面内分布計測にも適している。したがって、従来技術では計測が困難な大口径レンズへの適用が可能となる。

3. 残留応力物質の透過率計測

3.1 大口径サンプル透過率計測実験

提案手法により、大口径サンプル（直径：200 mm、厚さ：50 mm）の透過率面内分布の計測を行った。Fig. 1左に、大口径サンプルの透過率計測結果を示す。中心部の透過率が高く、端に行くにつれて透過率が低い計測結果となっている。このとき、透過率の最大計測差は、波長193 nmに関して中心部の最も透過率の高い部分の測定値が91.50%であり、外周部の最も透過率の低い部分の値が88.10%であったことから、3.40%であった。

計測した透過率を評価するため、基準となる従来手法の光カロリメトリー法で計測を行った。まず、大口径サンプルを光カロリメトリー法で計測可能な大きさ（口径：24×24 mm、厚さ：10 mm）に切断し、先ほどと同一の点を

計測した。また、光音響法でも同様の点で計測を行った。小口径サンプルの光カロリメトリー法による計測結果を Fig. 1 右上に、また光音響法による結果を Fig. 1 右下に示す。小口径サンプルを用いた従来手法との比較実験では、誤差 0.0054% と 0.1% 以下で透過率の計測が行えている。しかしながら、同一点であるにもかかわらず、大口径サンプルと小口径サンプルの計測透過率はほぼすべての点において大口径サンプルのほうが低い結果となっており、その最大計測差は 3.31% であった。

そこで、大口径サンプル製造工程の際に残留してしまう応力に着目し、この残留応力によって新たな吸収現象が生じたのではないかと考えた。残留応力に起因する吸収であるとすると、サンプルを切断することで応力が開放されるため、大口径時より小口径時のほうが高い透過率を示した先ほどの実験結果の説明がつく。また、応力分布が存在しない小口径サンプルであったため、基準となる従来手法との比較実験の結果がほぼ一致していたことも理解できる。元来、応力による光吸収は、光子エネルギーが低い長波長光の場合、格子振動（フォノン）が励起されることに起因する現象を示しており、すでに体系化されている^{12,13)}。しかし、短波長光である極紫外域では、光子エネルギーがきわめて高いことから、フォノンの励起に加えて電子構造に影響を及ぼすと考えられる。

3.2 残留応力開放と透過率分布

前節の実験結果が、残留応力に起因する吸収によるものであることを確認するため、サンプル切断による応力の変遷を歪み検査装置（直交鋭敏色法）で撮影した。本撮影の結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 左の写真は、大口径サンプル（直径：200 mm，厚さ：50 mm）の応力分布撮影写真である。色の違いが応力分布に相当し、水色が圧縮応力，黄色が引張応力が残留していることを示している。赤紫色で示した部分は無応力部である。大口径サンプルでは全体的に色むらが確認できることから、応力分布を有していることがわかる。しかし、大口径サンプルを厚み方向以外に切断した Fig. 2 真中に示すサンプル（口径：24×24 mm，厚さ：50 mm）では、切断によって残留していた応力が開放され、先ほどの大口径サンプル時より応力分布が少なくなっている。またさらに、このサンプルを厚さ方向に切断した Fig. 2 右に示す小口径サンプル（口径：24×24 mm，厚さ：10 mm）においては、全く色むらがなく完全に残留応力が開放されていることが明らかである。この小口径サンプルの大きさは、前節で光カロリメトリー法によって計測を行ったサンプルよりも大きい。また、すべての小口径サンプルにおいて、完全に残留応力が開放されてい

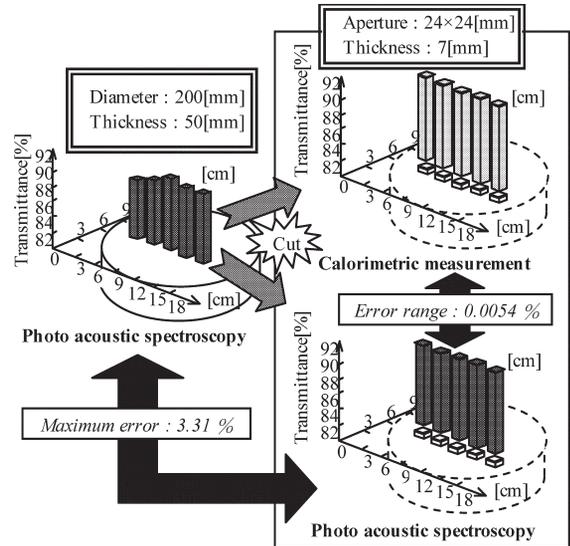


Fig. 1 Difference of measurement transmittance by sample size.

ることが確認できた。したがって、前節の実験条件では、小口径サンプル時には無応力状態の透過率を、また大口径サンプル時には応力を有する状態の透過率を計測していることとなる。この結果より、応力と透過率の間には何らかの因果関係があると考えられる。

そこで、さらに詳細な応力と透過率の関係を明らかにするため、切断後の透過率面内分布が小さかった小口径サンプル、つまり残留応力のみで起因して計測透過率が低下したと考えられるサンプルの計測結果について検討を行った。Fig. 3 は、このサンプルの切断前の光音響透過率計測値と、同じく切断前に歪み検査装置によって計測した応力分布との関係を示したグラフである。本グラフは、横軸に応力を、縦軸に透過率を表している。透過率と応力の相関関係を示している本グラフにおいて、応力値が大きくなるにつれて透過率が減少していることが確認できる。したがって、応力量に応じた吸収現象が生じていると考えられる。つまり、このグラフの関係に基づき補正を掛けることで、大口径サンプルにおいても光カロリメトリー法と同様の計測結果が得られるはずである。そこで、本章 1 節で計測した大口径サンプルの透過率に補正を掛け、従来手法による計測結果との比較を試みた。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 下の棒グラフが光音響法で計測した透過率であり、Fig. 4 上に示した棒グラフが新たに算出した内部残留応力に起因する吸収率である。Fig. 1 右上の光カロリメトリー法による計測結果から、内部残留応力に起因する吸収率を差し引いたものが光音響法による計測結果とほぼ一致することが確認できた。したがって、大口径時と小口径時

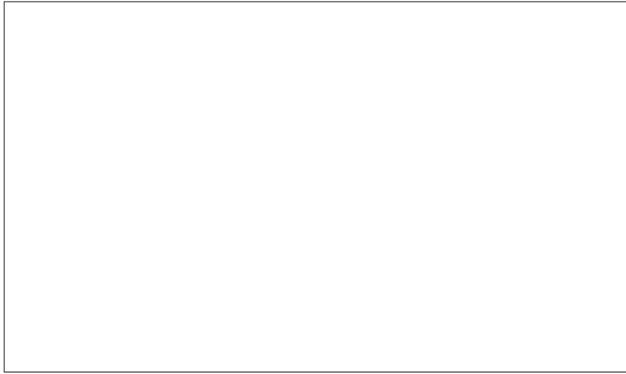


Fig. 2 Release of residual stress distribution by cutting.

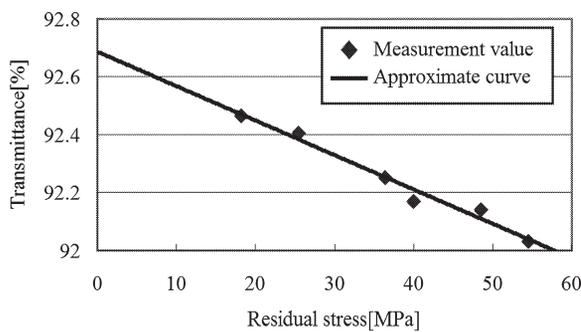


Fig. 3 Relationship between residual stress and transmittance.

の計測結果の差異が、残留応力に起因する吸収によるものであることが実験的に明確となった。

4. 応力に起因する二色性の算出

CaF₂の単結晶に高光子エネルギー光を照射した際には、残留応力に応じた新たな吸収現象が生じることが実験によって明確となった。本章では、この吸収量を算出するためのモデルと、その算出方法について述べる。

一般的に、CaF₂が応力を有している場合には、その応力量に比例した量の複屈折が生じていることが知られている。したがって、CaF₂の残留応力に起因する吸収は、二色性であると考えられる。そこで、偏光子による透過率算出式¹³⁾をもとに、複屈折量から直線偏光に対する吸収量を求める式を導出することとした。

Fig. 5は、本算出式を得るためのモデルである。複屈折性 n を有する物体に対して、偏光軸が x 軸方向の光を垂直照射した場合を示している。この複屈折性 n は、結晶の y 方向の屈折率 n_y 、 x 方向の屈折率 n_x 、物体の偏光角度 θ 、波長 λ 、および結晶の厚さ d によって次式 (1) で求めることができる。

$$n = n_y - n_x = \theta \cdot (\lambda/4) / \{ (\pi/4) \cdot d \} \quad (1)$$

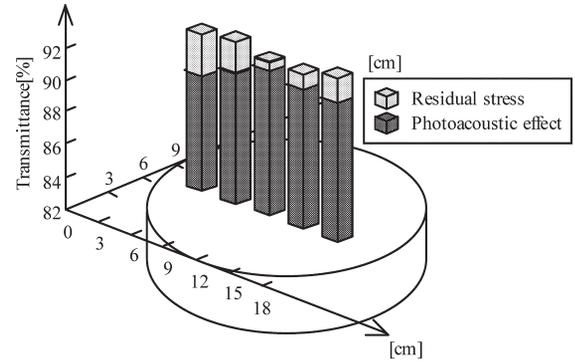


Fig. 4 Correction results by optical absorption based on residual stress.

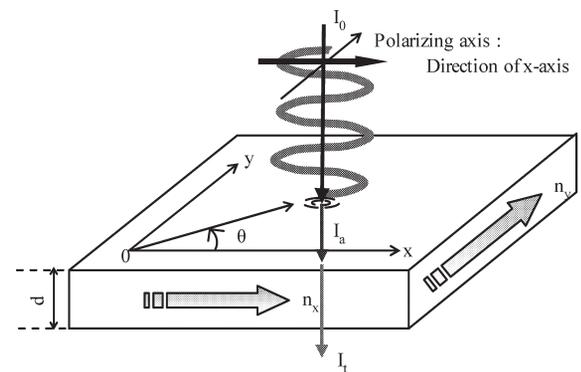


Fig. 5 Calculating model of absorption amount by double refraction.

また、上式を変形して、物体の偏光角度 θ は以下のように示し直すことができる。

$$\theta = \pi \cdot d (n_y - n_x) / \lambda \quad (2)$$

ここで、この偏光角度は、偏光軸が x 軸方向の光を、偏光軸に対してある角度 θ をもつ偏光子に垂直入射したときの、偏光子の角度 θ と同様と考えられることに着目する。この偏光子を用いた場合の透過光強度 I_t は、照射光強度 I_0 を用いて次式で表すことができる。

$$I_t = I_0 \sin 2\theta \quad (3)$$

また、上式より、偏光子によって遮断された光強度、つまり吸収光強度は次式 (4) で求めることができる。

$$I_a = I_0 (1 - \sin 2\theta) = I_0 \cos 2\theta \quad (4)$$

したがって、式 (2) を式 (4) に代入することにより、複屈折物体に対しての吸収光強度 I_a は、比例定数 k を用いて次式 (5) で表すことができる。

$$I_a = k \cdot \cos 2 \{ \pi \cdot d (n_y - n_x) / \lambda \} \quad (5)$$

ここで、 k は入射光の光量も含めた比例定数である。複屈折による二色性は、偏光子の場合とは異なり、100% 吸収することはないので、このような比例定数が必要となる。

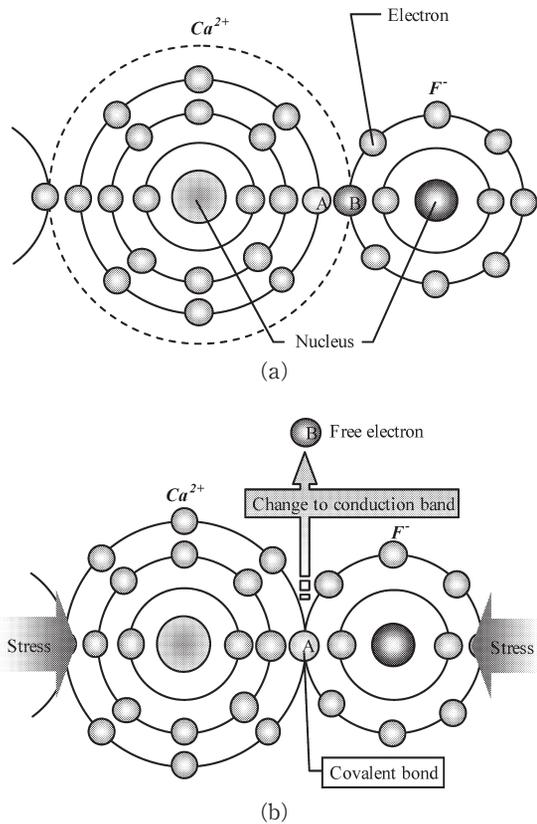


Fig. 6 Generative model of free electron in CaF₂ by stress. (a) General stable state based on ion binding, (b) generation of free electron by compressional stress.

本式 (5) は、複屈折を有した CaF₂ に対して垂直にある偏向をもった高光子エネルギー光を照射した場合、複屈折量に応じて吸収量が増大する、二色性が生じることを示すものである。つまり、切断することにより残留応力が開放され複屈折を有さない小口径サンプルでは応力による吸収を生じないが、複屈折を有している大口径サンプルでは複屈折量に伴った吸収を生じることとなる。しかしながら、前述したように、応力により光吸収を生じることはないと考えられている。そこで、残留応力を有する CaF₂ に高光子エネルギー光を照射した際に二色性を生じるメカニズムについて、次章で示す新たな吸光原理モデルを考案した。

5. 残留圧縮応力による光吸収のモデル化

5.1 圧縮応力による自由電子発生モデル

光の吸収、特に近赤外から可視域を含む紫外域までの吸光は、物質中の電子が光エネルギーによって励起され、エネルギー準位の高い状態に遷移することに起因して起こる。この遷移に必要なエネルギー量は物体の結合状態に依存し、イオン結合である CaF₂ の高純度結晶内で生じさせ

るためには、非常に高い光子エネルギーが必要となる。これが、高光子エネルギーを有する極紫外域のレーザーを用いても CaF₂ の吸収率が低い要因である。しかしながら、3章での実験で、内部残留応力に起因する新たな吸収現象を確認した。そこで、残留応力、特に原子間間隔が狭くなる圧縮応力によって CaF₂ の結合状態が変化することで電子が励起しやすい状態となり、自由電子として振舞うのではないかと考えた。

Fig. 6 (a) に、筆者らが現在提案している CaF₂ の単結晶の分子モデルを示す。2個の電子が不足している Ca²⁺ と、1個の電子が多い F⁻ とのイオン結合で常に安定状態を保っている。このように、一般的に CaF₂ の単結晶は自由電子をもたないとされてきた。しかしながら、圧縮応力が加わっている CaF₂ に対しては、その安定状態が崩れると考えた。Fig. 6 (b) に、考案した圧縮応力によって CaF₂ の結合状態が変化するモデルを示す。本モデルは、内部応力による圧縮力が加わると原子間距離が狭まり、図中で示す A の電子1個を Ca²⁺ と F⁻ が共有することで、CaF₂ が部分的に共有結合的な結合を発生すると考えられる。これに伴い、余分となった B の電子が高光子エネルギーによって伝導帯へ遷移され、これが自由電子となる可能性も考えられる。なお、本モデルは電気伝導度の異方性、化学結合や格子定数の測定などは行っていないことから、現時点で考えられるモデルである。

5.2 自由電子と光吸収

本節では、生成された自由電子によって生じる吸光の原理について述べる。

自由電子による吸光は、自由電子が豊富に存在する金属表面に高光子エネルギー光を照射したときの反射モデルであるドルーデモデル¹⁴⁾ により説明することができる。Fig. 7 にドルーデモデルを示す。本グラフは、横軸に光の波長に反比例する光子エネルギーを、縦軸に金属表面における反射率を示している。グラフより、光子エネルギーの小さな可視光領域では、自由電子が多数存在しても反射率がほぼ 100% であることがわかる。しかしながら、波長が短くなり周波数が高くなると自由電子が共振を起こすことで、極端に反射率が小さくなる。したがって、このプラズマエッジとよばれる現象が起こる波長より短い波長域では、被照射物体内部に光が侵入するため光吸収が生じる。そこで、同様の現象が、応力を有する CaF₂ に高光子エネルギー光を照射した場合にも生じているのではないかと考えた。一般にプラズマエッジは、紫外域である 200~300 nm (光子エネルギーとしては 3.9~5.9 eV) の波長範囲で確認される。今回、用いた ArF エキシ

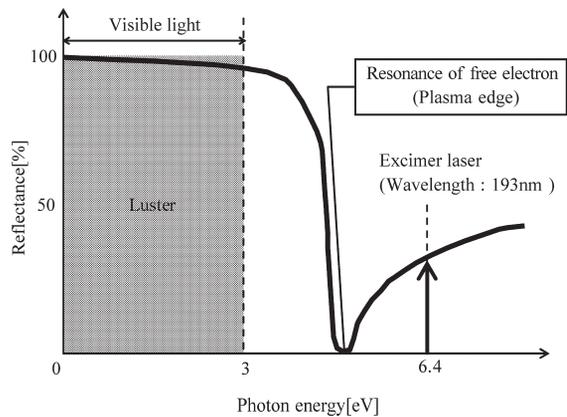


Fig. 7 Optical absorption based on Drude model by generated free electron.

レーザーの波長は 193 nm であり、通常のプラズマエッジのエネルギーよりも高い 6.4 eV の光子エネルギーを有している。したがって、自由電子が存在すれば、可視光のように 100% 反射することなく、吸光を伴う。これが、残留応力を有する CaF₂ に高光子エネルギー光を照射した場合に過剰な吸収を生じる要因であると考えられる。

6. 応力方向による二色性

6.1 自由電子移動方向と二色性

前章では、圧縮応力によって CaF₂ 結晶内で自由電子が発生し、光吸収が生じる新たな原理モデルについて述べた。しかしながら、4 章で述べた二色性から、応力方向に応じた自由電子発生方向があり、またその発生方向に基づいた吸収現象が生じているのではないかと考えられる。そこで、さらに詳細な CaF₂ の結合状態について考察を行い、新たなモデルを構築することとした。

Fig. 8 は、CaF₂ の電子軌道を量子力学的に図示したものである。量子力学では、Fig. 8 中に示すように、電子を雲のように広がりをもったものであるとする、電子雲として捉える。カルシウム原子 Ca は、原子核を中心に円軌道を描く電子軌道である 4s 軌道の電子雲を有している。一方、フッ素原子 F は、原子核を中心に 8 の字を描く電子軌道である 2p 軌道の電子雲を有する。Fig. 8 (a) に示す応力の加わっていない状態では、電子軌道は安定しており、どの方向に対しても自由電子が存在しない状態である。しかし、圧縮応力が加わった場合、Fig. 8 (b) に示すように圧縮方向に対して Ca 原子と F 原子の距離が近づくため、電子軌道のバランスが崩れる。これによって、実線で示した図中 *x* 方向、つまり応力と同方向の電子が過剰となり、その方向にのみ自由電子として振る舞うと考えら

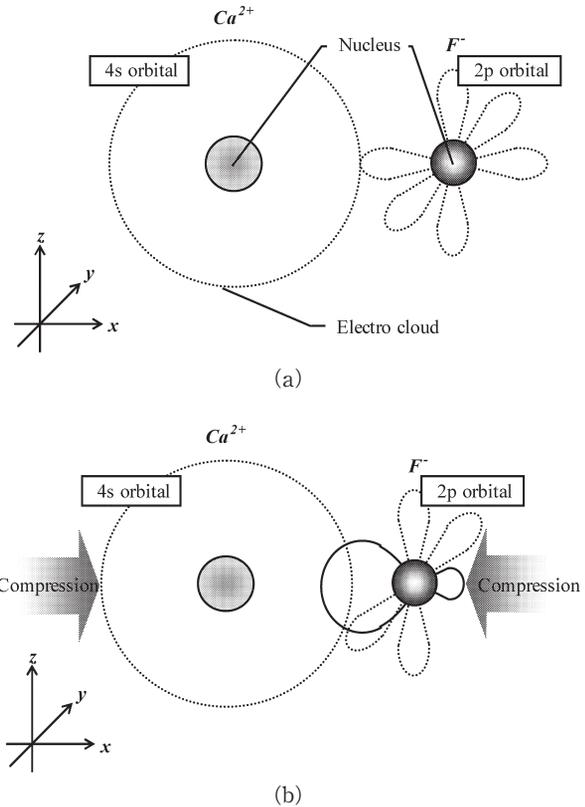


Fig. 8 Generative direction model of free electron by compressional stress. (a) General electron orbital, (b) moving direction character of free electron by compressional stress.

れる。

さらに、このモデルに基づき、偏光特性を伴う吸収現象を図示したものが Fig. 9 である。本図では、圧縮を生じている方向と同様の方向にのみ電子が移動する。そのため、ランダム偏光の光を照射すると、偏光板のように電子が自由に動くことが可能な方向の光は遮断され、また電子の動きと垂直な方向の光は透過するという挙動を示すと考えられる。つまり、応力により結晶内部に自由電子が発生し、それが偏光板と同様に光の一部に影響を与えることにより、光吸収を生じる。この際、応力量により発生する自由電子量は増減するため、応力量に相関のある吸収量として検出される。また、自由電子が移動可能な方向は圧縮方向に依存しているため、二色性であると考えられる。

6.2 応力方向による二色性確認実験

前節のモデルに基づく吸収では、圧縮応力の方向と同じ方向の直線偏光の光を照射すると吸収率が極大になり、またその直線偏光の偏光角を $\pi/2$ ずらして照射した際に吸収率が極小値をとるはずである。そこで、考案モデルの妥当性を確認するため、励起光の偏光を変化させ実験を行った。

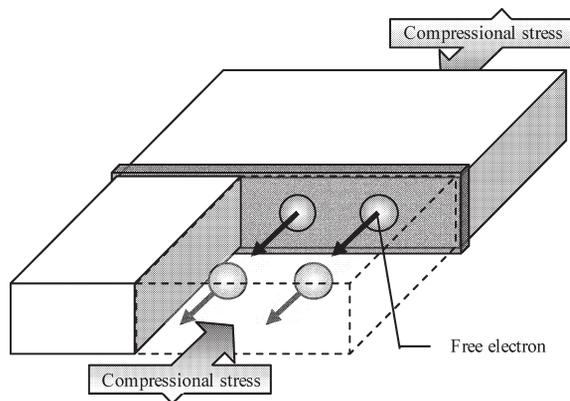


Fig. 9 Dichroism by determined moving direction of free electron.

本実験では、大口径サンプルの残留応力を有している部分に対して、偏光制御が可能なローションプリズムを介して励起光を照射することで、直線偏光に対する光音響吸収率の変化を計測する。この際、照射光の偏光角を、Fig. 10中に示す x 軸方向を 0 度とし、10 度刻みで 180 度まで回転させた。

Fig. 10 下のグラフに本実験の結果を示す。照射光の偏光方向が 0 度、または 180 度のときに光音響法による吸収率が最大となっており、また、偏光角度が 90 度の際に吸収率が最小となっていることが明らかである。この吸光量の変化は、式 (5) により算出した応力によって生じた複屈折に起因する吸収量の変化とほぼ一致する。つまり、残留応力、特に圧縮応力を有する CaF_2 では、無応力の結晶では存在しない自由電子が応力と同方向に発生し、その自由電子によって二色性が生じていることを示している。したがって、考案モデルの妥当性を確認することができたと考えられる。

7. 結 言

本稿では、提案してきた CaF_2 の光音響透過率計測手法において、元来確認されていなかった高光子エネルギー光が、結晶内の残留応力によって電子構造の変化を引き起こすことに起因して吸収される現象を確認し、この吸光現象の発生原理モデルを考案した。

本モデルは、結晶内に一般的に存在しえないと考えられてきた自由電子が、圧縮応力によって原子間間隔が狭まり、 CaF_2 の結合状態が変化することによって生成されるモデルである。

ドルーデモデルに基づき、エキシマーレーザーのような高光子エネルギーをもった光を照射した際に自由電子が存在すると、吸収現象を伴うことを示した。

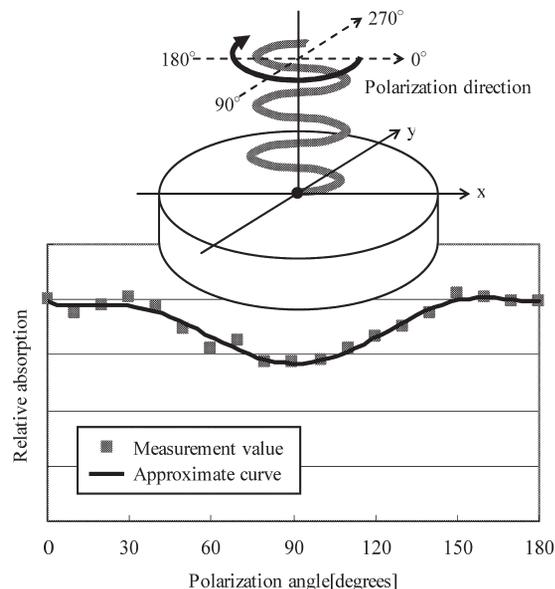


Fig. 10 Relationship between polarization angle and optical absorption.

またさらに、自由電子が圧縮応力と同方向にのみ移動することで二色性を生じるモデルを考案し、ローションプリズムを用いた励起光の偏光制御実験によって、考案モデルの妥当性を確認した。

本研究は、平成 14 年度～平成 15 年度日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）「光音響法による次世代ステッパー用レンズ高精度透過率計測の研究」の助成を受けて行った。ここに謝意を表す。

文 献

- 1) International Standard Organization: *ISO 11551*, 1st ed. (1997).
- 2) E. Eva and K. Mann: "Calorimetric measurement of two-photon absorption and color-center formation in ultraviolet-window materials," *Appl. Phys. A*, **62** (1996) 143-149.
- 3) E. Eva and K. Mann: "Nonlinear absorption phenomena in optical materials for the UV-spectral ranges," *Appl. Surf. Sci.*, **109/110** (1997) 52-57.
- 4) T. Tomaru, T. Uchiyama, D. Tatsumi, S. Miyoki, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Suzuki, A. Yamamoto and T. Shintomi: "Cryogenic measurement of the optical absorption coefficient in sapphire crystals at 1.064 μm for the large-scale cryogenic gravitational wave telescope," *Phys. Lett. A*, **283** (2001) 80-84.
- 5) C. P. Khattak, F. Schmid and M. B. Smith: "Correlation of sapphire quality with uniformity and optical properties," *Proc. SPIE*, **3060** (1997) 21-22.
- 6) K. Mann and E. Eva: "Characterizing the absorption and aging behavior of DUV optical by high-resolution excimer laser calorimetry," *Proc. SPIE*, **3334** (1998) 1055-1061.
- 7) 澤田嗣郎編：光熱変換分光法とその応用（学会出版センター，1997）。
- 8) 澤田嗣郎編：光音響分光法とその応用—PAS（学会出版センター，1982）。

- 9) 筒井宏光, 石丸伊知郎, 大平文和: “光音響法による紫外線透過率計測技術の提案”, *Optics Japan 2002*, 日本光学会年次学術講演会講演予稿集 (2002) pp. 12-13.
- 10) 筒井宏光, 石丸伊知郎, 大平文和, 石井知彦, 奥田貴啓, 石崎勝己, 白井文夫, 平田健二: “光音響法による紫外線用 CaF_2 レンズの透過率計測手法の研究 (第 1 報) —大口径レンズ透過率計測技術—”, 精密工学会誌, **72** (2006) 1264-1269.
- 11) 工藤恵栄: 光物性基礎 (オーム社, 1996).
- 12) W. Hayes, H. F. Macdonald and R. J. Elliott: “Effects of uniaxial stress and electric fields on localized vibrational modes,” *Phys. Rev. Lett.*, **15** (1965) 961-963.
- 13) 石黒浩三: 光学 (裳華房, 1993).
- 14) T. Ishii: “Electronic properties of gold trichloride-graphite intercalation compounds (AuCl_3 -GICs),” *Solid State Commun.*, **84** (1992) 1055-1059.