

令和元年6月19日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05993

研究課題名(和文) ミュラー行列測定による巨大光誘起変形材料の光学特性評価とその応用

研究課題名(英文) Optical characterization of giant photo-induced deformation materials by Mueller matrix measurement and its application

研究代表者

沈用球 (Shim, Yong-Gu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20336803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光照射により巨大な形状変化を示す3元タリウム化合物を研究対象とし、光照射による光学定数(屈折率、誘電率)の変化およびその空間分布を調べた。その結果、実用化されている従来の電気エネルギーで制御する光弾性素子と比較して、光エネルギーでも同程度の屈折率変化が誘起可能であることを明らかにした。また、光照射による複屈折の主軸方向の制御も可能であることを示した。さらに、屈折率の変化は光照射スポット付近で局所的に生じており、スポット光形状や位置により、屈折率を変える領域の制御が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で明らかにした、光照射による屈折率とその分布変化特性に関する知見は、光で位置や焦点を制御可能な機能性レンズ、光で光の進行方向、偏光状態などを制御可能な機能性光学素子など、光照射により電気配線が不要で遠隔で制御可能な、新たな光学素子開発への道を切り拓くものである。また、光で変形する材料に着目した本研究は、光弾性エネルギー変換材料のための新たな研究分野を構築し、光エネルギー利用の新たな一面を開拓するという点で、社会的意義を有している。

研究成果の概要(英文)：In this work, we have investigated the effect of photo-induced-deformation on optical properties of ternary thallium compounds. The 2D images of the change of optical constants with light irradiation were characterized by imaging Mueller matrix ellipsometry. We revealed that the irradiated laser causes the changes of birefringence and the direction of the fast axis in (001) plane. Based on our simulation analysis, it was found that the origin of these phenomena was share stress in the plane generated by the thermal expansion via photothermal conversion. The change of the optical constants by the photo-induced-deformation showed enough large value applying to photo-controlled optical devices.

研究分野：半導体光物性

キーワード：光誘起変形 屈折率 光学素子 ミュラー行列

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光はそのエネルギー、時間、空間の制御が容易なことから、現在の科学における大きな研究分野を形成している。その中でも、光エネルギーの他エネルギー形態への変換は、光を有効利用する上で重要な研究分野であり、既存の光エネルギー変換技術以外の新たな技術、材料の開拓は、人類の将来の生存基盤を確保する上で重要な課題である。我々が発見した3元タリウム化合物における「局所的巨大光誘起変形現象」は、光照射により、光学顕微鏡で観測可能なほど巨大で、しかも極めて局所的な変形が光スポット位置に出現することから、光駆動アクチュエーターなどへの応用が期待され、その研究が進められていた。そのうえで、光照射による変形は物性の変化をもたらすことが予想され、特に、光弾性効果による屈折率変化は、本材料を用いた新しい光制御の光学素子開発への展開が期待できることから、本研究計画を立案し研究に取り組んだ。

2. 研究の目的

(1) 3元タリウム化合物における「局所的巨大光誘起変形現象」について、光照射により生じる光学定数(屈折率, 誘電率)の変化を明らかにし、光で制御可能な新奇光学素子としての可能性を探る。

(2) 光照射による物性変化特性から、本現象の要因を解明するとともに、光エネルギーの新しい利用法を提案し、光駆動機構や光エネルギー変換材料分野に新しい研究領域を拓く。

3. 研究の方法

(1) 本研究課題では、光誘起により特異な変形を示す3元タリウム化合物(主に $TlInS_2$) のバルク単結晶を試料として用いた。測定面は(001)面(xy面)とした。

(2) 光照射時の光学特性変化の評価を行った。その手法としては、イメージングミュラー行列エリプソメーター(IMME)測定系を構築し、光照射による形状変化(弾性応力)に伴う屈折率、複屈折、円複屈折、旋光性の変化の空間分布を明らかにした。

(3) 有限要素法によるシミュレーション計算を行い、実験結果と比較することで、光弾性効果を経た弾性応力・歪量の空間分布に関する情報を取得し、本現象の起源について考察を行った。

(4) 基礎物性評価として、分光エリプソメトリによる試料の光学定数(誘電率スペクトル)計測を行った。

4. 研究成果

(1) 本研究の主となる測定系である、IMMEを構築した(図1)。2つの補償子(Compensator)を回転させることで、ミュラー行列のすべての成分を測定可能にし、ディテクターにCMOSセンサーを用いることでイメージング計測を可能にした。また、試料表面へのポンプ光照射可能な光学系を導入し、光照射時と非照射時の光学定数変化を測定可能にした。

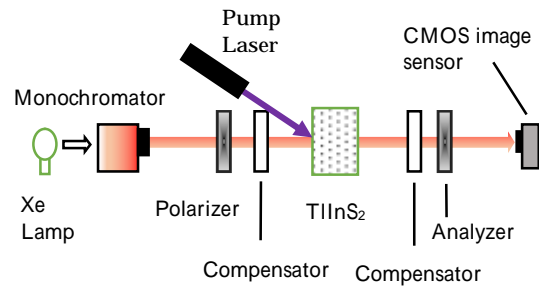


図1 IMME測定系

(2) 光照射時の複屈折率変化($\Delta n'$)の面内分布を図2に示す。ポンプ光照射付近を中心として、局所的に円形状の複屈折率変化が生じる領域が観測された。この変化量はポンプ光中心付近では光強度の増大に伴い増大し、30 mWの光照射で、 3.3×10^{-4} に達していた。これは、光変調素子として用いられている電気光学結晶 $LiNbO_3$ と同程度の変化量(100 V/cmの電場に対し 10^{-5} 程度)であり、光による局所的な光学定数変化領域の制御が可能なることから、本物質は光制御の新奇光学素子として応用が期待できることがわかった。

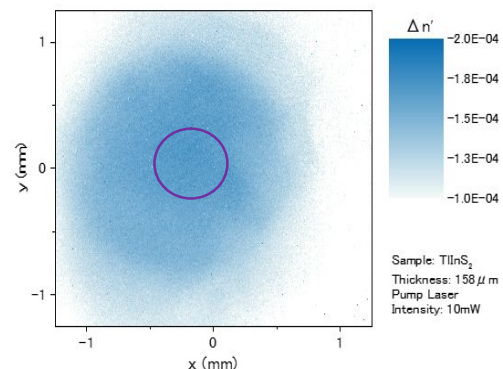


図2 ポンプ光照射に伴う複屈折率変化分布

(3) 図3には光照射時の主軸方向変化($\Delta\theta$)の面内分布を示す。複屈折とは異なり、ポンプ光中心に対して等方的ではなく方向により正負の異なる領域が出現することがわかった。この結果は、光照射により複屈折主軸方向を変化させることができ、なおかつ、その方向が正負に

分かれた領域を発生させることができることを明らかにした。この起源を明らかにするため、シミュレーション計算結果との比較を行った。

(4) 本現象に対して、光照射の光熱変換に伴う温度上昇と熱伝導および熱膨張現象を考慮したシミュレーション計算を行った。図4にxyせん断歪量のシミュレーション結果を示す。これは、図3の主軸方向変化($\Delta\theta$)の実験結果と類似した分布であることがわかる。主軸方位の回転は、光弾性係数との関係により、せん断歪の影響が強いことから、図3の結果は、光照射により生じるxyせん断歪の分布に起因していることがわかった。またポンプ光照射付近でゼロにならないのは、ポンプ光形状と結晶軸方向との関係で説明できることが分かった。一方、図2の複屈折率変化($\Delta n'$)は、光照射による垂直歪の影響が強く、こちらもシミュレーション結果と実験結果は定性的に良い一致を示した。これらの定性的な一致は、図2,3で示した光誘起変形による光学定数変化は、光熱変換に伴う熱膨張現象による試料内の弾性歪を介した光弾性効果が主たる要因であることがわかった

(5) 光学定数の変化量の絶対値に関しては、複屈折率変化および主軸方向変化共に、実験とシミュレーション結果で大きな乖離が見られた。これは、光照射による試料表面膨張量が実験とシミュレーション結果で1桁程度の差が生じていたためである。この原因として、実験において、表面温度に関しては実験値とシミュレーション値は良い一致を示していたことから、熱膨張係数値が文献値と異なる状態になったためと推測される。現時点では、この原因は明らかではないが、構造相転移の影響も可能性として考えられ、今後より詳細な研究が必要である。

(6) 本研究に関連するその他の成果としては、光誘起変形現象における過渡応答特性を調べ、ミリ秒単位での制御が可能であることを明らかにした。また、3元タリウム化合物の結晶異方性や光学異方性と光誘起変形形状や変形量の異方性との関係を明らかにした。さらには、基礎物性定数である誘電率スペクトルと電子準位構造との関係を調べ、その温度特性から、相転移が電子準位構造に与える影響について明らかにした。これらの結果は、光誘起変形現象の原因解明のための重要な基礎情報となる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6件)

北野稜汰, 沈用球, 脇田和樹, Nazim Mamedov, 3元タリウム化合物における光誘起変形のミリ秒過渡応答特性評価, 平成30年度 応用物理学学会 多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会論文集, 査読無, 2019, 69-72.

板倉涼介, 沈用球, 脇田和樹, Nazim Mamedov, 層状3元タリウム化合物における光誘起変形の異方性, 平成30年度 応用物理学学会 多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会論文集, 査読無, 2019, 73-76.

Y. Shim, T. Asahi, K. Wakita, N. T. Mamedov, E. N. Alieva, N. A. Abdullaev, Photoinduced Reversible Local Deformation of the Surface Relief in Bulk Single Crystals of TlInSe₂, TlGaTe₂, and TlSe, Technical Physics Letters, 査読有, Vol. 44, 2018, pp. 643-645.
DOI: 10.1134/S1063785018070295

M. Ishikawa, T. Nakayama, K. Wakita, Y. G. Shim, N. Mamedov, First-principles study of giant thermoelectric power in incommensurate TlInSe₂, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 123, 2018, 161575-1-5
DOI: 10.1063/1.5011337

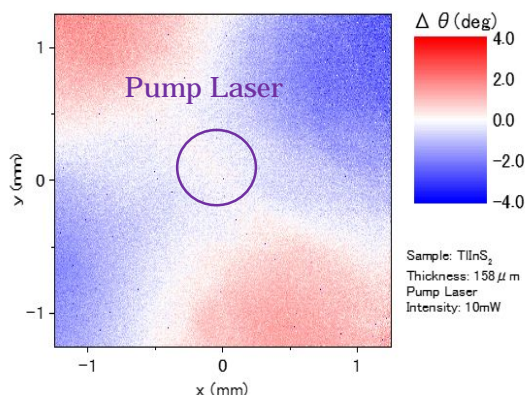


図3 ポンプ光照射に伴う屈折率主軸方向変化分布

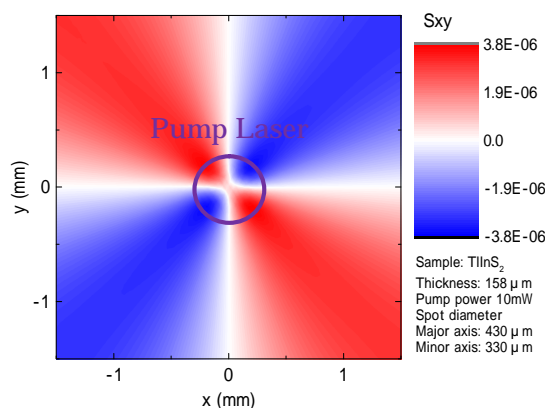


図4 光照射によるxyせん断歪のシミュレーション計算結果

酒井 誠司, 沈 用球, 脇田 和樹, Nazim Mamedov, 光誘起変形に伴う TlInS₂ の光学特性への影響, Proceedings of the 28th Symposium of Association for Condensed Matter Photophysics, 査読無, 2017, 191-194

Y. Shim, Y. Itoh, K. Wakita, N. Mamedov, 75. Anisotropic optical constants and inter-band optical transitions in layered semiconductor TlGaSe₂, Applied Surface Science, 査読有, Vol.421, 2017, 788-793
DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.11.005

〔学会発表〕(計 19 件)

北野稜汰, 沈 用球, 脇田和樹, Nazim Mamedov, 層状 TlGaSe₂ における光誘起変形のミリ秒過渡応答特性評価, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019

板倉涼介, 沈 用球, 脇田和樹, Mamedov Nazim, 層状 3 元タリウム化合物における光誘起変形の異方性, 平成 30 年度 多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会, 2018

板倉涼介, 沈 用球, 脇田和樹, Mamedov Nazim, 層状 3 元タリウム化合物における光誘起変形現象の偏光依存性, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 2018

Y. G. Shim, Photo-induced localized-deformation in ternary thallium compounds, Academician G. B. Abdullayev Centenary International Conference and School, Modern Trends in Condensed Matter Physics (MTCMP-2018), 2018 (Invited)

Kitano Ryota, YongGu Shim, Kazuki Wakita and Nazim Mamedov, Transient response of photo-induced deformation in layered TlGaSe₂, The 7th Hsinchu Summer Course & Workshop, 2018

酒井 誠司, 沈 用球, 脇田 和樹, Nazim Mamedov, 光照射による 3 元タリウム化合物の光学定数変化, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018

酒井 誠司, 沈 用球, 脇田 和樹, Nazim Mamedov, 光誘起変形に伴う TlInS₂ の光学特性への影響, 第 28 回光物性研究会, 2017

酒井 誠司, 沈 用球, 脇田 和樹, Nazim Mamedov, 3 元タリウム化合物における光誘起光学定数変化のイメージング測定, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017

酒井 誠司, 沈 用球, 脇田 和樹, Nazim Mamedov, 3 元タリウム化合物の光誘起変形による光学特性変化, 第 1 回フォトニクス研究会, 2016

YongGu Shim, Yoshiaki Itoh, Kazuki Wakita, Nazim Mamedov, Anisotropic optical constants and inter-band optical transitions in layered semiconductor TlGaSe₂, 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE-8), 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.opt.pe.osakafu-u.ac.jp/ishilab-top/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：マメドフ ナジム
ローマ字氏名：Mamedov Nazim

研究協力者氏名：脇田 和樹
ローマ字氏名：Wakita Kazuki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。