

エラストマー光学系デザインのための物理的光学機能の自己形成に関する研究

中窪, 奎喬

<https://hdl.handle.net/2324/4784645>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 中窪 奎喬

論 文 名 : エラストマー光学系デザインのための物理的光学機能の自己形成に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

光学的計測は科学技術の根幹を成す重要な測定技術であるが、これに用いられる光学系の構築手法は光学精度レベルに研磨・切削された光学機能素子を同様の精度で配置するため、高硬度・高剛性が理想とされ、さらに低雑音のための外部光除去・内部迷光の抑制が重要となる。近年、マイクロ光生化学チップやオールファイバー型光学系の様に高硬度・高剛性を是としない光学系も盛んに研究されているがいわゆるバルク型光学系は、従来からの手法が依然として唯一無二となっている。一方、近年着目されているデジタルファブリケーションでは 3D プリンターを代表とするいわゆる Additive Manufacturing(AM)のような手法がとられており、その分解能は年々上がってきているが、それでもバルク型光学系を構成するためには十分とはいえない状況にとどまっている。

本研究で申請者は、エラストマー光学系というバルク型かつモノリシックな新規光学設計スキームを研究するにあたり AM に着目し、その光学精度を向上させるためには特に有機材料の液相・固相の物理界面を生かした自己形成型の手法が有効であるという着想を得たとしており、AM の特性を生かしつつ同時に高い光学精度でのデザインを実現するために、表面張力や液相・固相界面利用プロセス、固体中乾式分散のような様々な自発的な現象を利用した光学機能形成に関する研究を行っている。本論文前半では、柔軟性と光透過性を両立し化学的に安定なポリジメチルシロキサン(PDMS)の光学系デザインのために、低融点金属ガリウムおよびガリウム合金による光学界面の自己形成を論じ、後半では新規エラストマー材料である super-PDMS について、PDMS が有しない溶液分散性と熱可塑性に着目しつつ、これを光学素子として自発的に形成するための様々な知見を明らかにしている。以上の成果は次のとおりである。

第 1 に、自発的球面形成に関する成果である。

液状の金属ガリウムの表面張力およびその表面の酸化状態が PDMS 表面と接触しているときに起こる特徴的な接触角履歴性(前進接触角 150 度と後退接触角 30 度)を見だし、これを利用してガリウム表面のメニスカス形状が曲率範囲内(約 $-0.36\sim 0.38\text{ mm}^{-1}$)で制御できる非研磨光学凹/凸面として利用できること、これを凸面 PDMS の液体モールドとして利用できることを初めて報告している。低融点金属の中では最大である 710 mN/m のガリウム表面張力により、凸面レンズの最大有効径が 6.9 mm まで可能であること、光学面の二乗平均粗さは 5.9 nm と十分な滑らかさを持つことも実験的に確認しており、PDMS 平凸レンズ(焦点距離: 6.6 mm , 開口部: 5 mm , 中央部の厚さ: 3 mm , F 値: 2.1 , NA: 0.5)を実際に転写作製し評価している。

第 2 に、光学散乱面の自発形成とその機序に関する成果である。

電気化学による酸化還元反応を利用し、ガリウム合金表面の酸化膜の形成と除去を電圧制御することでモールドの光学面を反射面と散乱面の間で可逆的に切り替えることを初めて見いだした。 0.5

mM の硫酸ナトリウム水溶液の電解液中でガリウム合金光学表面に電圧を印加することで、 -1.1 V で反射面に、 $+0.2\text{ V}$ で散乱面が変わることを見出している。またサイクリックボルタンメトリーに類する計測を適用することで、 -0.8 V では光学的な散乱損失が生じない 1 nm 未満の薄い酸化膜が表面に形成されていることも示唆している。

第 3 に、新規エラストマー材料による導波路描画断面の自己形成に関する成果である。

熱可塑性と溶媒分散性を持つ super-PDMS (FK-001(屈折率 1.47)、FK-002(屈折率 1.49)、FK-003(屈折率 1.50))に着目し、これまでの PDMS 等シロキサンエラストマーでは困難とされた液相描画法による導波路作製を初めて成功させ、報告している。描画に伴う気泡や結晶化の問題を解決する分散溶媒として 1,2 ジクロロエタンを見だし、吐出圧力 20 kPa 、描画速度 50 mm/s で PDMS 基板上に $100\text{ }\mu\text{m}$ の線描が可能であった。幅 $200\text{ }\mu\text{m}$ ×膜厚 $3\text{ }\mu\text{m}$ とアスペクト比が低い導波路でも、曲がり半径 2.5 mm でも光伝搬が確認できた。

第 4 に、新規エラストマー材料による熱可塑性と乾式分散性による光学機能性分子の自発的分散機構に関する成果である。

従来の PDMS が持つ特徴的な特性として、固体でありながら液体のように低分子を内部で拡散する「乾式分散」が報告されている。申請者は前述 FK-001 および FK-002 も構造的に「乾式分散」が期待できるとし、FK-001、FK-002 の 25°C での Sudan-I の「乾式分散」を初めて計測して明らかにしている。これらの拡散係数は PDMS の拡散係数のそれぞれ $1/42$ 、 $1/72$ と小さいが、同時に PDMS では見られなかった拡散係数のアレニウス則に沿わない増加が 40°C 以上で見られることも初めて明らかにしており、これが FK-001 および FK-002 の熱可塑性に関連する可能性を示唆している。以上示すように、本論文は、新しいバルク型モノリシック光学系のデザインとして提案されているエラストマー光学系の実現に向けて、低融点金属や新規シロキサン系エラストマーを活用することで、Additive Manufacturing に自己形成による光学機構を組み込むための多方面からの知見を明らかにしており、医学や化学、生化学を始めとした各分野での光センシングの発展に大いに寄与することが期待されるもので、電気電子工学上価値ある業績である。