

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03159

研究課題名（和文）単結晶Siと赤外線透過ポリマの界面架橋結合による高機能フレネルレンズの超精密成形

研究課題名（英文）Ultraprecision forming of hybrid Fresnel lenses using infrared-transparent polymer and single-crystal silicon

研究代表者

閻 紀旺（YAN, JIWANG）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：40323042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：車載ナイトビジョン装置や夜間防犯カメラ、温度センサー、サーモグラフィなどの赤外線光学デバイスの開発において高精度の薄型フレネルレンズが求められている。本研究では、精密プレス成形によって高密度ポリエチレン（HDPE）薄肉層と単結晶Siウエハの界面に強固な架橋結合を形成させると同時に、HDPE表面に微細フレネル形状を転写させ、厚さ<1mmの薄型複合レンズの安価な製造プロセスの開発を行った。実際に光学設計、金型製作およびプレス成形実験を行い、目標としたレンズ成形を実現できた。また、Si/HDPE界面結合の制御因子の特定やSi/HDPEレンズ成形メカニズムの解明および成形条件の最適化などを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案したHDPE薄肉層による単結晶Siウエハの内包多層構造を用いた厚さ1mm未満の超薄型フレネルレンズの製作は前例のない試みである。特に数十ミクロンスケールの微細形状転写とSi/HDPEの界面接合を一括して実現できた点は大きな成果であると言える。また、単結晶SiとHDPEとの架橋結合における界面現象の解明は加工学へ重要な知見を与えたものであると考えられる。さらに、本研究成果は暗視カメラ、車載ナイトビジョン装置、夜間防犯カメラ、温度センサー、セキュリティ・体温検査、火災検知など幅広い製品への応用が可能であり、ものづくり産業への波及効果も大きい。

研究成果の概要（英文）：A hybrid structure of single-crystal silicon (Si) and high-density polyethylene (HDPE) was developed for infrared lenses by using precision press molding. A thin HDPE film was used to laminate a silicon wafer and their interface was directly bonded by the silane cross-link. The HDPE film was hot-embossed to form three-dimensional surface microstructures and the silicon wafer provides a high stiffness for the hybrid substrate. The infrared (IR) optical properties of the hybrid substrate were examined and the imaging test result shows that the hybrid substrate was capable to produce practical image quality. These results strongly demonstrate that the developed Si-HDPE hybrid substrate is a promising alternative substrate material for IR lenses. The interface phenomenon between Si and HDPE was investigated and the lens forming mechanisms were analyzed, as well as the optimal forming conditions were explored.

研究分野：超精密加工

キーワード：プレス成形 フレネルレンズ 赤外線素子 光学部品 複合レンズ 超精密切削 マイクロ加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

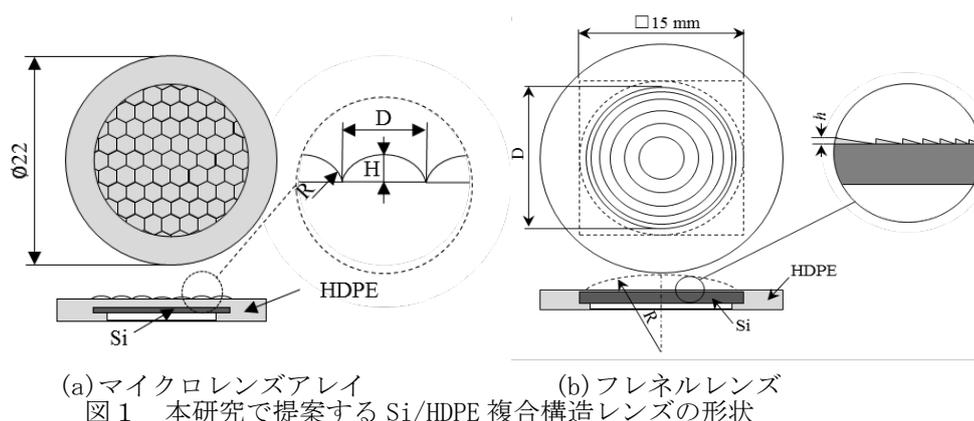
赤外線光学分野において、単結晶シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) を基板としたレンズが多く使用されてきた。これらの材料は赤外線領域で屈折率が高く、屈折率の波長分散が少ないためレンズ材料として好適であるが、フレネルレンズやマイクロレンズアレイなどの薄型かつ複雑な形状を有する光学素子への加工は困難である。超精密切削によるレンズ加工では、非常に長い加工時間を要するだけでなく、工具摩耗も激しいため、生産コストの増加に繋がる。特にフレネルレンズのような回折形状の切削加工では、刃物角の極めて小さい特殊なダイヤモンド工具を使用するため、工具刃先のマイクロチップングが問題となる。近年、より切削加工しやすい赤外線透過材料として ZnSe や ZnS なども使用されているが、有害物質に該当するため、レンズ加工においては防護措置が必要不可欠であり、安全性の問題が残されている。一方、モールドプレス成形が可能なカルコゲナイドガラスが開発され、Si などをレンズ基材としてその表面に回折面や非球面を形成したカルコゲナイドガラスを薄肉レンズ層として一体化させた赤外線複合レンズも提案されている¹⁻³⁾。しかし、カルコゲナイドガラスをプレス成形するには 400℃ 以上の高温が必要なため超硬合金製の金型が必要になり、金型の加工コストが高いのみならず、離型膜の劣化なども問題として指摘されている。

2. 研究の目的

上記課題を解決するために、本研究では、半導体基板として使用されている単結晶 Si ウエハの片面あるいは両面に赤外線透過樹脂 (高密度ポリエチレン, HDPE) からなる薄肉レンズ層をプレス成形によって結合させた超薄型 (厚さ < 1mm) 赤外線複合レンズを提案する。単結晶 Si ウエハと HDPE はいずれも比較的安価に入手できる素材であり、量産の低コスト化が可能である。また、HDPE を用いたフレネルレンズ、マイクロレンズアレイなどの薄肉レンズ層は 200℃ 以下の低温でも容易に成形することができるため、銅やアルミなどの金型が使用可能になり、金型の加工コストは大幅に削減できる。さらに、薄肉の HDPE 層が単結晶 Si 基板を内包するレンズ設計によってレンズ全体の結合強度が向上し、外部からの衝撃を緩和できるメリットもある。また、単結晶 Si 基板の高剛性により、HDPE 単体のレンズに比べてレンズ変形が生じにくく、精度の保証が容易になる。

3. 研究の方法

本研究では、図 1 に示すような Si/HDPE 複合構造のマイクロレンズアレイおよびフレネルレンズを成形する。まず超精密切削によりアルミニウム表面にフレネルレンズ形状を加工し、成形用金型とする。そしてプレス成形により単結晶 Si ウエハを HDPE で包み、HDPE の表面にレンズ形状を転写することで赤外線複合レンズを成形する。成形実験は、高精度プレス成形装置を使用し、加熱温度とプレス圧力を変化させて行った。また、HDPE の種類について赤外線透過率や接着促進成分の有無など材料特性の異なるものを選定し、成形特性や成形後のレンズの光学特性などの比較を行った。



4. 研究成果

(1) マイクロレンズアレイの成形

Si と HDPE の複合構造成形において、成形温度と圧力を適切に設定することが重要である。本研究では、基礎実験を重ねることによって強固な界面架橋結合を得るための成形条件を明らかにした。それを応用してマイクロレンズアレイを HDPE への転写成形を試みた。その結果、界面剥離や空気溜まりのない複合レンズを得ることができた。図 2(a) に複合マイクロレンズアレイ形状の三次元測定結果と使用した金型の写真を示す。HDPE の冷却収縮を考慮して金型形状補正を行った結果、目標値と同等のレンズ高さを得ることができた。

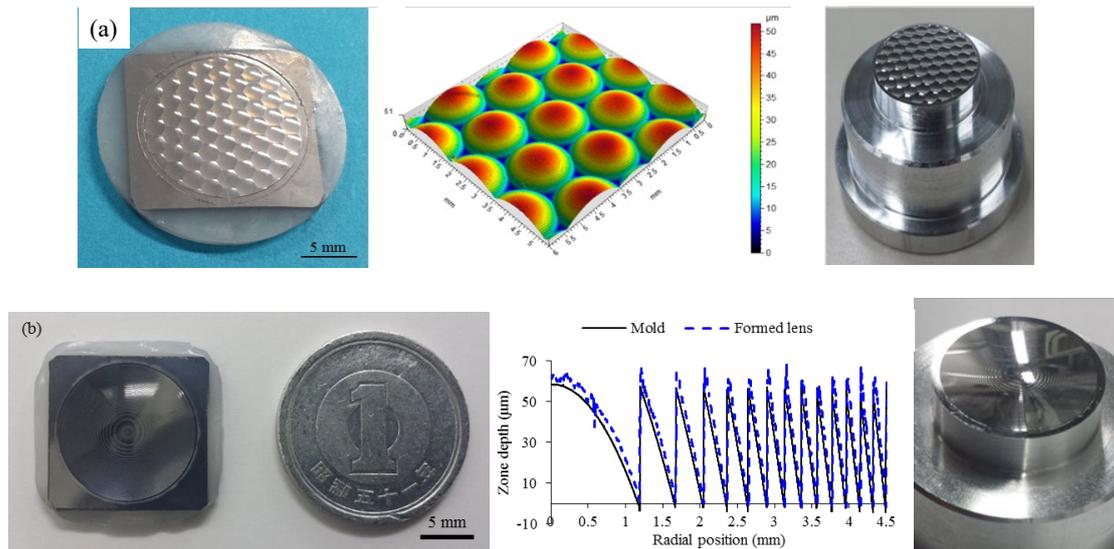


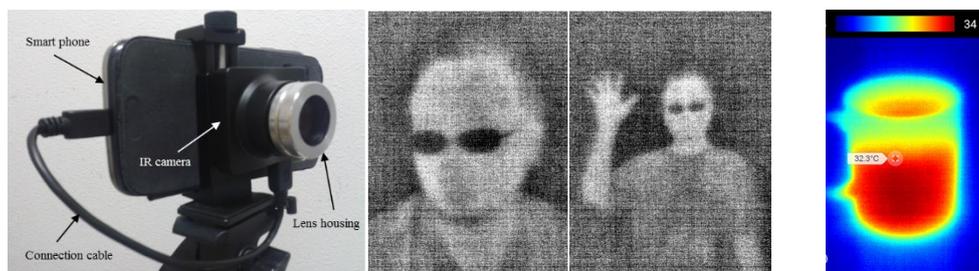
図2 本研究で試作した Si/HDPE 複合レンズ：(a)マイクロレンズアレイ，(b)フレネルレンズ

(2) 複合フレネルレンズの成形

図 2(b)に成形した複合フレネルレンズ，断面形状の測定結果および使用した金型の写真を示す．界面剥離や空気溜まりなどが見られず，ミクロンレベルの微細溝が精密に転写されていることが確認できる．また，金型形状と転写されたレンズ形状の断面プロファイルから，形状誤差は最大で約 $2\mu\text{m}$ であることがわかる．

(3) 樹脂種類の影響

異なる物性を有する樹脂を用いて，複合フレネルレンズ成形実験を行い，得られたレンズの形状精度や光学性能を評価した．その結果，人体検知の波長範囲 $10\mu\text{m}$ 付近で透過率が高い樹脂を用いる場合，成形された複合基板には単結晶 Si ウエハと樹脂の間に未接着部分が確認された．そこで，接着の改善策として，界面に接着促進剤であるシランカップリング剤を僅かに導入して成形を試みた．その結果，未接着部の解消に成功し，全面接着の基板が得られ，単結晶 Si のみで製造された赤外線レンズと同等な透過率を得ることができた．



(a) 評価用光学系 (b) 暗視野画像 (c) サーモグラフィ画像
図3 本研究で試作した Si/HDPE 複合フレネルレンズの評価

(4) 複合レンズの光学性能評価

試作した複合レンズの光学性能を検証するために，図 3 のように実際に赤外線光学系を構築し， $7\sim 14\mu\text{m}$ の波長範囲で透過率や屈折率の評価そして結像画質の測定を行った．その結果，鮮明な暗視野像およびサーモグラフィ画像が得られ，本提案技術の有効性が実証された．

参考文献

- 1) R. A. Soref, S. J. Emelett and W. R. Buchwald, Silicon waveguided components for the long-wave infrared region, *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, 8, (2006) 840-848.
- 2) T. Grulois, G. Druart, N. Guérineau, A. Crastes, H. Sauer, and P. Chavel, Extra-thin infrared camera for low-cost surveillance applications, *Opt. Letters*, 39, 11, (2014) 3169-3172.
- 3) L. Shen, N. Healy, C. J. Mitchell, J. S. Penades, M. Nedeljkovic, G. Z. Mashanovich, and A. C. Peacock, Mid-infrared all-optical modulation in low-loss germanium-on-silicon waveguides, *Opt. Letters*, 40, 2, (2015) 268-271.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 閻 紀旺	4. 巻 65
2. 論文標題 スローツールサーボを用いた硬脆材料の自由曲面切削	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 機械技術	6. 最初と最後の頁 72-75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mukaida Mao, Yan Jiwang	4. 巻 8
2. 論文標題 Fabrication of Hexagonal Microlens Arrays on Single-Crystal Silicon Using the Tool-Servo Driven Segment Turning Method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 323-323
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi8110323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 石塚 潤, 長澤圭祐, 三神政之, 閻 紀旺	4. 巻 62
2. 論文標題 フッ化物ガラスの超精密切削 - 仕上げ面生成と工具損傷の基礎検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 88-93
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.11420/jsat.62.88	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Ishide, J. Yan	4. 巻 13
2. 論文標題 Study on Infrared Transmittance of Si-Polymer Hybrid Structure Press Molded Using a Coupling Agent	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 817-824
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2019.p0817	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Z. Zhang, J. Yan, T. Kuriyagawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Manufacturing technologies toward extreme precision	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Extreme Manufacturing	6. 最初と最後の頁 22001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab1ff1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Nagayama, J. Yan	4. 巻 14
2. 論文標題 Measurement and compensation of tool contour using white light interferometry for ultraprecision diamond turning of freeform surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 H. Ishide, J. Yan
2. 発表標題 High-precision press molding of hybrid infrared lens substrates by using a new polymer without coupling agent content
3. 学会等名 The 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石出 響, 閻 紀旺
2. 発表標題 高精度プレス成形による赤外線複合レンズの製作
3. 学会等名 精密工学会第25回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒木信乃, 閻 紀旺
2. 発表標題 光学レンズ用PMMAの超精密切削に関する研究
3. 学会等名 精密工学会第25回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiwang Yan
2. 発表標題 Ultraprecision machining for free-form IR optics
3. 学会等名 Workshop on Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms - Imaging and Non-imaging Applications (UPM2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石塚 潤, 長澤圭祐, 三神政之, 閻 紀旺
2. 発表標題 SiO2を含まない光学ガラスの超精密切削加工
3. 学会等名 2017年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Yan
2. 発表標題 Towards low-cost mass production of micro IR optics
3. 学会等名 Workshop on Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms (UPM 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長山晃大, 閻 紀旺
2. 発表標題 白色干渉計を用いたダイヤモンド工具輪郭誤差の計測と補正による 超精密自由曲面切削の実現
3. 学会等名 日本機械学会第 13 回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Yan
2. 発表標題 Ultraprecision machining for micro IR optics
3. 学会等名 The 18th International Manufacturing Conference (IMCC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤祐亮, 閻 紀旺
2. 発表標題 形状誤差予測によるマイクロレンズアレイ加工の高精度化
3. 学会等名 精密工学会第27回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 A. R. Abdul Manaf, J. Yan	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer Nature Singapore Pte Ltd.	5. 総ページ数 950
3. 書名 Micro and Nano Fabrication Technology, Chapter 21: Press Molding of Hybrid Fresnel Lenses for Infrared Applications	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----