

高精度プレス成形による赤外線複合レンズの製作

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○石出 響 ◎閻 紀旺

要旨

シリコンウエハと赤外線透過樹脂である高密度ポリエチレンを用いた高精度プレス成形による超薄型赤外線複合レンズの製作技術を提案している。人体からの熱放射が強い波長 $10\ \mu\text{m}$ 付近での透過率が低いという問題を解決するために、接着促進剤を含有しない新たなポリエチレン系樹脂を用いてプレス成形実験を試みた。その結果、赤外線透過率が向上する成形条件を特定し、波長 $10\ \mu\text{m}$ 付近での赤外線透過率を約 21% 向上させることに成功した。

1. 緒論

現在、赤外線カメラは社会において様々な分野に応用されており、その応用例として夜間の監視、自動車の夜間運転補助や人体の温度検知などが挙げられる。一般的に使用される赤外線波長域はおおよそ $7\sim 14\ \mu\text{m}$ であり、レンズ基板には単結晶 Si (シリコン)、Ge (ゲルマニウム) や ZnSe (セレン化亜鉛) などの硬脆材料が使用されている。これらの赤外線レンズは主に研削・研磨加工や超精密旋盤を用いた切削加工によって製造されるが、その製造過程には長い加工時間がかかることや工具の激しい摩耗が生じるという問題がある。それにより生産コストが高くなり、大量生産には不向きであることが知られている。

そこで本研究グループでは、単結晶 Si ウエハと赤外線透過樹脂である高密度ポリエチレン (HDPE) を結合させた複合レンズのプレス成形を提案している⁽¹⁾。すなわち、図 1(a) のようにプレス成形によって単結晶 Si ウエハを HDPE で包み、図 1(b) のように 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。単結晶 Si ウエハは HDPE を補強する役割を持っているが、ウエハ表面に形状加工を行う必要はない。また、レンズはプレス成形により短時間で製造できるため大量生産に適している。本技術の実用化により、赤外線レンズの製造コストを大幅に下げることができると考えられる。

しかし、これまでに製作した赤外線複合レンズは波長 $10\ \mu\text{m}$ 付近において赤外線透過率が低いという問題があった。波長 $9\sim 10\ \mu\text{m}$ 付近は、人体の熱放射による赤外線のピーク波長であり、この波長の赤外線透過率が低いとセンサで検知される赤外線の量が少なくなり、人体を検知しにくくなる。波長 $10\ \mu\text{m}$ 付近の透過率が低い原因の一つとしては、単結晶 Si ウエハとの接着向上のための接着促進剤 (シランカップリング剤) を混合した HDPE を使用したためであると考えられる。HDPE 全体に接着促進剤を混合させることで成形時には単結晶 Si ウエハと HDPE の接着性が向上するが、シランカップリング剤により波長 $10\ \mu\text{m}$ 付近の波長域の赤外線吸収しやすくなり、透過性が低下する⁽²⁾。

そこで本研究では、波長 $10\ \mu\text{m}$ 付近の透過率改善を目的として、同波長域で高い透過率を持ち、かつ接着促進剤を含まない新たなポリエチレン系樹脂を使用して成形実験を試みた。この材料を用いた場合の複合レンズの成形特性や赤外線透過率を調査し、加熱温度とプレス圧力などの適正化を行った。また、接着促進剤を単結晶 Si ウエハと樹脂の界面のみに導入することで接着促進剤の量を大幅に減らし、赤外線透過率の向上を目指す。

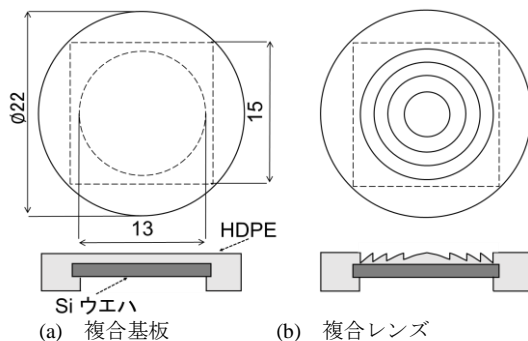


図 1 Si-HDPE 複合基板と複合レンズ

2. 使用材料および実験方法

2.1 使用材料

表 1 に従来の HDPE (樹脂 A) と本研究で使用する新たな樹脂 (樹脂 B) の両者の材料特性を示す。図 2 は樹脂 A と樹脂 B の赤外線透過率の比較をしたものである。樹脂 B は接着促進剤を含有していないため樹脂 A に比べて波長 $9\sim 10\ \mu\text{m}$ 付近の透過率が高いことがわかる。

2.2 プレス成形実験

単結晶 Si ウエハと樹脂 B を結合させた複合基板を成形する。プレス成形過程を図 3 に示す。高精度プレス成形装置 ((株) 東芝機械製 GMP-211 型) を使用し、加熱温度の異なる成形条件とプレス圧力が異なる成形条件に分けて実験を行った。表 2, 3 に実験条件を示す。また、単結晶 Si ウエハと樹脂の界面に接着促進剤を使用する場合としない場合の接着状況をそれぞれ確認した。

表 1 樹脂 A と樹脂 B の材料特性

	樹脂 A	樹脂 B
融点 [$^{\circ}\text{C}$]	129.5	132.5
形状	粒	シート
サイズ [mm]	$\varnothing 3 \times 3.5$	15×15
接着促進剤	内部混合	含有しない

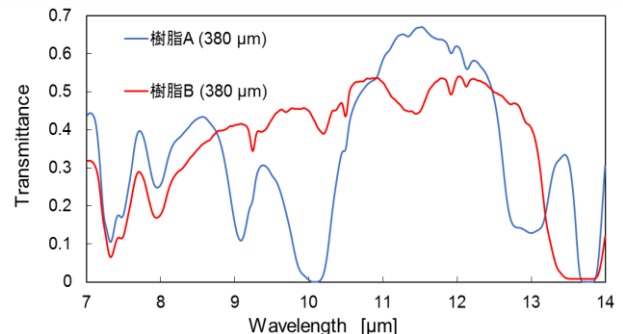


図 2 樹脂 A と樹脂 B の赤外線透過率比較

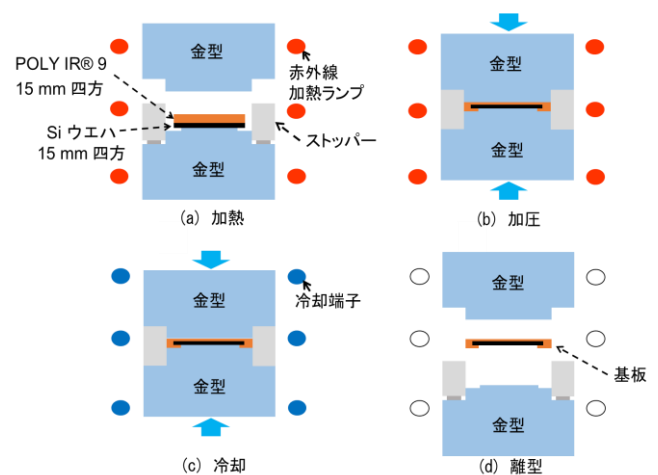


図 3 プレス成形過程

表2 加熱温度を変化させる実験条件

加熱温度 [°C]	160, 180, 200, 220, 240
プレス圧力 [kN]	0.3
冷却温度 [°C]	90
プレス時間 [分]	5

表3 プレス圧力を変化させる実験条件

加熱温度 [°C]	180
プレス圧力 [kN]	0.5, 1.0, 1.5
冷却温度 [°C]	90
プレス時間 [分]	5

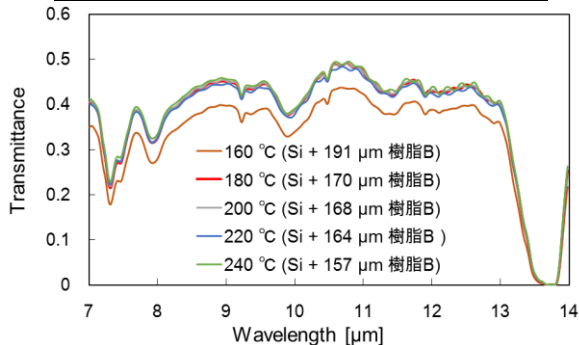


図4 赤外線透過率への加熱温度の影響

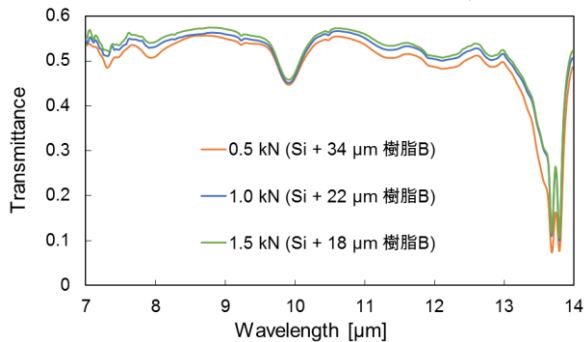


図5 赤外線透過率へのプレス圧力の影響

2.3 赤外線透過率の測定

それぞれの実験条件により成形した基板の赤外線透過率をフーリエ変換赤外線分光装置 (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR) により測定し、透過率の違いを比較する。透過率 T は透過光強度 I_0 と光源強度 I を用いて次式で算出される。

$$T = I_0 / I \quad (1)$$

3. 結果および考察

3.1 加熱温度とプレス圧力による赤外線透過率の変化

樹脂と Si の界面に接着促進剤を使用しない複合基板の赤外線透過率への加熱温度の影響を図4に、プレス圧力の影響を図5に示す。グラフの縦軸は透過率、横軸は波長を表している。波長の測定範囲は赤外線カメラに一般的に用いられる7~14 μmとした。

図4の結果より加熱温度が160~180 °Cでは赤外線透過率の向上が見られる。加熱温度が高いほど樹脂の粘性が下がり、樹脂の厚さが薄くなっているためである。しかし、180 °C以上では薄くなっても透過率は向上していない。これは加熱温度が高すぎると樹脂内部の分子鎖が切れてしまい、表面の劣化を起こすためであると考えられる。また、150 °Cまでの場合、離型時に樹脂が単結晶 Si ウエハに張り付かなかった。樹脂は溶けているが流動性が低く、プレスの加圧によって単結晶 Si ウエハを覆うことができなかった。さらに高温にすることで樹脂の流動性が高まり、かつ粘性の低下により樹脂を薄くすることができたため、融点よりも高温での加熱がふさわしいと考えられる。したがって、透過率の向上に最適な加熱温度は180 °Cであると言える。



図6 接着促進剤の使用による接着向上

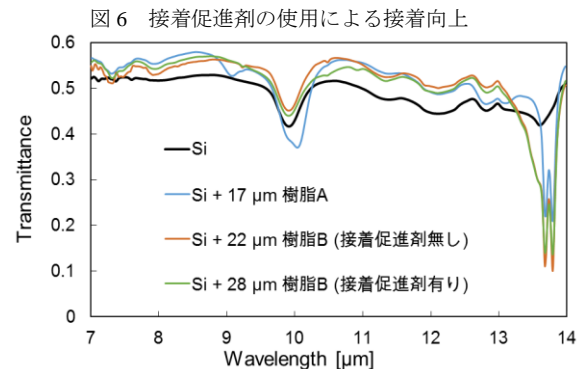


図7 樹脂種類と接着促進剤による透過率の変化

次に、図5の結果より、加熱温度を180 °Cに固定しプレス圧力を変化させる場合、0.5~1.0 kNまでは透過率は上昇しているものの1.0~1.5 kNでは樹脂の厚さはあまり薄くならず、透過率は大きな変化はない。また、1.5 kNで成形した複合基板には亀裂が生じ、圧力が強すぎると判明した。したがって、本研究の条件において、単結晶 Si ウエハと樹脂の結合を確保しつつ赤外線透過率の向上に最適なプレス圧力は、1.0 kNであると言える。

しかし、図6(a)から分かるように、成形された複合基板には、単結晶 Si ウエハと樹脂 B の間に未接着部分がある。これは、有機物である樹脂は有機物同士しか反応せず、無機物である単結晶 Si ウエハとは接着の相性が優れないために生じたものと考えられる。接着改善策として、樹脂と Si の界面に僅かな接着促進剤 (シランカップリング剤) を導入して成形した。成形した複合基板を図6(b)に示す。未接着部の解消に成功し、全面接着の基板が得られた。

3.2 成形条件の適用

3.1において求めた2つの成形条件で、接着促進剤を使用した場合としない場合での樹脂 B を用いた複合基板と、樹脂 A を用いた複合基板でそれぞれの赤外線透過率の比較を図7に示す。接着促進剤を用いた場合でも樹脂 B を用いた複合基板では、樹脂 A を用いた複合基板と比べて波長 10 μm 付近で透過率が向上している。また、波長 13 μm 以上の波長域での透過率が低い、この波長域で放射強度が強く、主に検知されるのは-50 °C 前後の物体であるため、人体検知機能には影響ないと考えられる。

したがって、樹脂 B を用いた複合基板は赤外線複合レンズとして応用されるのに十分な赤外線透過率を持ち、単結晶 Si のみで製造された赤外線レンズと同等な画質を得る可能性があると考えられる。

4. 結論

接着促進剤を含有しない新たな赤外線透過樹脂を用いて複合基板を成形した場合、透過率が向上するような成形条件は加熱温度 180 °C、プレス圧力 1.0 kN である。また、接着促進剤を単結晶 Si ウエハと樹脂の界面のみに用いることで、全体に接着促進剤を含有する樹脂に比べて波長 10 μm 付近の透過率が改善された。

参考文献

- (1) A. R. Abdul Manaf and J. Yan, Press molding of a Si-HDPE hybrid lens substrate and evaluation of its infrared optical properties, *Precision Engineering*, **43** (2016) 429-438.
- (2) 福田知由, 山崎諒太, 青木美波, 藤井秀司, 中村吉伸, 佐々木真利子: シリカ粒子表面上の処理層の構造におよぼすシランカップリング剤の有機官能基とアルコキシ基数の影響, *日本接着学会誌*, **49**, 1 (2013) 4-10.