

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 石井 雄三

本論文は、光インタコネクション技術の展開において、鍵となる光実装技術の経済化を目指したものである。光バンプ実装の実現の鍵は、実装性に優れたマイクロレンズアレイの作製技術にある。従来のマイクロレンズ作製技術の多くは、フォトリソグラフィ技術を用いており、作製工程と実装工程の両方において、アライメントが必要であった。そこで、両工程を同時に行うことができる作製法として、微小量の液滴を吐出する技術であるインクジェット技術に着目した。

平坦面に吐出された液滴が作り出す球面形状が、レンズとして利用できるのは明らかであるが、そのレンズの基本光学特性(焦点距離や NA など)を定量的に制御する術はこれまで報告されていない。また、インクジェット法によるレンズ作製技術には、特有の大きな問題点が二つある。一つは、レンズ表面の凹凸の存在であり、レンズ材料の硬化収縮が大きいことに起因している。インクジェット法は、吐出液の粘度に対して厳しい制約を与えるため、この問題の解決は困難とされていた。二つ目の課題は、レンズアレイの均一性である。レンズを一つずつ繰返し吐出して作製するため、フォトリソグラフィ技術では問題とならなかったレンズアレイの均一性が強く懸念される。

これらの課題を解決するために、本研究では以下に述べる種々の提案と検討を行った。

- 1) レンズ特性の制御技術: レンズを形成する基板の表面自由エネルギーを調節して、液滴の接触角を制御することを試みた。平坦基板表面にフッ素化処理を行い、表面のフッ素原子含有量を 10~30% の範囲で制御することで、レンズ NA を 0.25~0.40 の範囲で制御できることを実験的に示した。また、表面自由エネルギー論 ( $\gamma$  論) に基づいた理論考察を行い、フッ素化エポキシ樹脂接着系における界面自由エネルギーが、同一の補正係数をもつ Good-Girifalco 式で記述できることを明らかにし、接触角制御によるレンズ NA 制御を可能にした。
- 2) インクジェットレンズの高性能化: 従来のインクジェットレンズにおいて見られた表面凹凸の問題を解決するために、100%硬化成分からなる低粘度なレンズ用樹脂材料を開発した。透明性と耐熱性に優れた基本エポキシ樹脂を主成分として、反応性希釈剤の混合によって、65℃で 15 mPa·s の低粘度化を実現した。本樹脂で作製したマイクロレンズの形状精度は、ガラスモールドレンズと同等の 0.23  $\mu\text{m}$  を示し、硬化レンズ表面の凹凸の問題を解決することができた。
- 3) レンズアレイの高均一化・稠密化: インクジェットにより作製したレンズアレイの均一性は、10×10 アレイ(N=100)の実験から、直径均一性が±1%、焦点距離均一性が±3%であることが明らかになり、フォトリソグラフィ技術に匹敵する高い均一性が得られることを実証した。これにより、インクジェット吐出量の高均一性と、接触角の高安定性が示された。また、それぞれのマイクロレンズの形成(着弾)位置精度は、±3  $\mu\text{m}$  を得、さらに、フォトリソグラフィ技術を併用することで、マイクロレンズアレイを稠密に配列させることが可能になり、96%のフィルファクタを実現した。

以上のマイクロレンズ技術を用いて、光バンプ実装の基本要素である BGA 形光パッケージを開発し

た。光源には、今後の普及が確実視されている面発光レーザー(VCSEL)を用い、従来の樹脂パッケージと同様に製造でき、リフローによるボード実装も可能であることを実証した。パッケージ製造精度とボード実装精度を明らかにするとともに、それを許容できる太径の光ビームパターンが適切なアレイピッチで得られていることを確認した。

本審査会では、以上の内容の詳細が、論文提出者により適切な発表資料を用いて、制限時間内に明確に行われた。予備審査の際に指摘されたいくつかの問題点、すなわち、接合面のバブル発生のメカニズムとその抑制方法、実装プロセスの詳細等について、新たな考察がされており、本論文および発表がその結果を踏まえて適切に修正されていることを確認した。

論文提出者の発表に対する質疑応答では、主に、レンズ特性の制御技術の統合設計に関する議論が行われた。この過程で、本研究の成果は、インクジェットによるマイクロレンズ作製法の従来の問題点を解決し、作製と実装を同時に行うことができる、経済的なマイクロレンズ実装技術の創出に貢献したことが明らかとなった。さらに、光バンプ実装の広トランス特性を実証することによって、光実装特有の課題である光軸アライメント問題を解決し、電気実装と同等の経済化を期待できる、光インタコネクション技術の展開に貢献するなど産業界への波及効果も大きいことから、本研究で得られた工学的知見は極めて大きく、また、工学の発展に寄与するところは多大である。

よって本論文は、博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。