

## 審査の結果の要旨

氏名 多喜川 良

半導体デバイスは、微細化の極限の追究により(More Moore)、高速化、省電力化、低コスト化を同時に進めることができ、コンピュータをはじめさまざまな分野の発展に寄与してきた。一方、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)トランジスタ動作原理の微細化限界が近づき、高集積化・微細化だけではなく、多様なデバイス機能の実現が求められ(More than Moore)、それらを実現するための集積技術開発の重要性が増している。本論文は、「金マイクロバンプを用いた低温接合による光素子のハイブリッド集積に関する研究」と題し、シリコン(Si)プラットフォーム上に、機能(発光や変調など)ごとに優れた異種材料光素子を低温ハイブリッド集積する技術について論じており、全6章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的と論文の構成が述べられている。Siプラットフォーム上に異種機能を集積化するために、低温接合技術の重要性を論じている。本論文では、金(Au)マイクロバンプ(直径: 5  $\mu\text{m}$ 、高さ: 2  $\mu\text{m}$ )を用いた表面活性化低温接合技術を開発し、これによりヒ化ガリウム(GaAs)およびリン化インジウム(InP)系半導体レーザ、ニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>)光変調器のハイブリッド集積化を実証することを目的とした。

第2章は、「半導体レーザダイオードチップの大気中常温接合」と題し、Auマイクロバンプを利用したGaAsおよびInP系半導体レーザチップのSi基板上への大気中常温接合技術に関し論じている。Au薄膜どうしの接合と比較を行い、種々の接合条件下で接合された界面の機械的強度の比較検討がなされ、Auマイクロバンプを用いた提案手法が有効であることを示している。接合前後のレーザダイオードチップの光出力-電流-電圧特性から、接合によるチップの劣化についても検討を行い、ダメージを与えない接合条件を実験的に導出している。

第3章は、「ニオブ酸リチウム-シリコンハイブリッド構造の実現」と題し、Siと熱膨張係数が約一桁異なるLiNbO<sub>3</sub>の大気中低温接合について論じている。接合後のマイクロバンプの塑性変形の観察や引張試験後の破断面の観察から、Auマイクロバンプを適用することにより、Au薄膜どうしの接合と比べて、接

合強度が大幅に改善することが示されている。さらに、強い光閉じ込め効果および導波路への電界集中効果が期待できる  $\text{LiNbO}_3$  薄膜構造 (厚さ:  $5 \mu\text{m}$ ) を  $\text{Si}$  基板上に常温でフリップチップ転写することにも成功している。 $\text{LiNbO}_3$  薄膜構造は、低膨張材料基板と接合することにより、温度変化による伸縮の抑制が期待できることが有限要素法解析から示されている。

第 4 章は、「ニオブ酸リチウム光導波路チップのパッシブアライメント実装」と題し、 $\text{LiNbO}_3$  光導波路チップの  $\text{Si}$  基板上での高精度実装法について論じている。アライメントマークを用いたビジュアルインデックスアライメント法と  $\text{Au}$  マイクロバンプを用いた大気中低温接合技術により、 $\text{LiNbO}_3$  光導波路チップを  $\text{Si}$  基板上に、水平方向および垂直方向それぞれ  $\pm 1 \mu\text{m}$ 、 $\pm 0.2 \mu\text{m}$  程度で高精度実装可能であることが示されている。光ファイバ固定用 V 溝付き  $\text{Si}$  基板上に  $\text{LiNbO}_3$  光導波路チップをハイブリッド集積し、シングルモード光ファイバとのパッシブアライメントを行った結果、アクティブアライメントと比較して過剰損失約  $0.5 \text{ dB}$  と低接続損失を実証している。

第 5 章は、「ニオブ酸リチウム高速光変調器のハイブリッド集積化」と題し、 $\text{LiNbO}_3$  光変調器を  $\text{Si}$  基板上にハイブリッド集積した際の変調特性について論じている。 $\text{LiNbO}_3$  光変調器が  $\text{Si}$  基板に近接した場合の変調特性に与える影響を有限要素法による電磁界解析を行って調べることにより、 $10 \text{ GHz}$  共振型  $\text{LiNbO}_3$  光変調器の共振周波数が低周波数側にシフトしてしまうことを導出し、これを解決するためにエアギャップを集積した構造を提案、実験によりその有用性を実証している。

第 6 章は、総括であり、各章の主要な成果をまとめ、本論文の結論および将来展望について述べている。

以上、本論文は、低温・高精度・大気中などの接合技術に対する要求を満足する、 $\text{Au}$  マイクロバンプを用いた表面活性化接合技術 ( $\sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) を提案・実証し、実際に  $\text{GaAs}$  および  $\text{InP}$  系半導体レーザ、 $\text{LiNbO}_3$  チップおよび  $\text{LiNbO}_3$  薄膜を  $\text{Si}$  基板上へ低温集積可能であることを検証するとともに、 $\text{LiNbO}_3$  光導波路チップのパッシブアライメントおよびエアギャップ構造  $\text{LiNbO}_3$  高速光変調器を実現し、シングルモード光ファイバとの低接続損失、高速変調 ( $10 \text{ GHz}$ ) を  $\text{Si}$  プラットフォーム上で実証している。このように将来の異種機能集積デバイス創成に役立つ成果が得られており、光エレクトロニクス分野および実装分野を含む精密工学の学術分野に大きく貢献している。

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。