

## 直接ボンディングによる3次元光配線

上 條 健・和 田 浩・佐々木浩紀

マイクロプロセッサの高性能化，並列化が進むにつれて，チップ内・間，ボード内・間などの階層における“光配線技術”が注目されている<sup>1)</sup>。本稿においては，Si-LSIのチップ間光配線をめざした集積化光配線に関する研究について，筆者らの最近の結果を中心に報告する。

現状の電気配線機能はSi-LSIに内蔵されている送受回路により達成されており，Si-LSIチップへの光配線機能集積化が重要な研究課題となる。Si-LSIはSi単一材料上に形成した類希な集積デバイスである。しかし，光配線機能集積化は，Si-LSIのSi単一材料集積デバイスとしての枠組みが崩れてしまうという技術的転換を引き起こす。それは，光配線のための化合物半導体光デバイスの集積が要請されるためであり，異種の半導体材料で構成される集積回路技術という新たな技術領域が出現するからである。筆者らは，最近，“multi-material optoelectronic integrated circuit (MMOEIC)”という概念を提唱し，光配線への応用を試みている。

### 1. MMOEICと3次元光配線

MMOEICのイメージを図1に示す。この場合，Si-LSIチップの一部に光配線のための光源とフォトダイオードを集積している。また，図2に，平板光学系を用いたチップ間光配線のイメージを示す。このようなMMOEICの実装形態を考えると，平面であるSi-LSIの裏面を光学的結合に用いることが得策となる。これを実現するためには，Si基板を透過する波長の面型光源が必要となる。そこで，光源としては，波長が $>1\mu\text{m}$ であるInGaAsP系の面発光レーザーが有力な光源となる。そこで，InP系光デバイスをSi基板上に集積化するためのプロセス技術開発が必要となる。その詳細は，次節で述べる。一方，実装基板は，computer generated hologram (CGH)に代表される平板光学素子で構

成されている。マルチチップを光配線する光学系としては，マクロ光学系，ハイブリッド光学系，マイクロ光学系があるが，将来のマルチチップモジュール(MCM)のアーキテクチャーにおける自由度を考えると，マイクロ光学系に対応できる光学系の設計が必要になると考えられる。最近，佐々木ら<sup>2)</sup>はこのような自由空間光配線において，等倍マイクロガウス光束光学系より集束マイクロガウス光束光学系の方がトランスをより広くとれることを示した。位置合せ精度が， $5\mu\text{m}$ 程度緩和されるので現状のフリップチップボンディング精度の範囲内で配置される。今後は，平板光学基板の作成技術の研究が重要になるが，配線アーキテクチャーと配線ノイズ，デバイス配置精度を考慮した研究が望まれる。

### 2. 直接ボンディングプロセスによるマルチ材料デバイス集積技術

MMOEIC形成には，Si基板上への化合物半導体デバイスの集積技術の確立が必要である。従来，Si基板上への化合物半導体デバイス形成には，エピタキシャル成長によるアプローチが広く研究されてきた。しかし，高温プロセスであることによるSi-化合物半導体間の熱膨張差と格子不整合に起因した転位の発生やSi-LSIの劣化や複数の材料を集積しようとするときの選択成長の煩雑さなどの問題がある。これらの問題を解決し，複数の異種材料デバイスを自由に集積する技術として，直接ボンディングプロセス技術の研究が注目されている。

最近，筆者らのグループは，atomic rearrangementを利用した直接ボンディングプロセスの開発を行い，GaAs基板上，Si基板上にInGaAs/InPレーザーダイオードを直接接合することに成功した<sup>3,4)</sup>。これらの作製プロセスは，InGaAsP/InPレーザーダイオードのDH構造をInP基板上に格子整合条件で有機金属気相成長(MOVPE成長)したのち，表面化学処理をした上で室温で貼り合わせ，熱処理を行い接合しており，デバイス構造化は接合後に行っている。このプロセスは，材料接合はハイブリッド的なプロセスであり，デバイス化の後にモノリシック集積が完成するので，材料系の空間配置の自由度が高い。同時に，デバイス配置は，フォト

Direct wafer bonding technology and 3-dimensional free-space chip-to-chip optoelectronic interconnection (1995年11月10日受理)

Takeshi KAMIJOH, Hiroshi WADA, Hironori SASAKI 沖電気工業(株)研究開発本部半導体技術研究所(〒193 八王子市東浅川町 550-5)

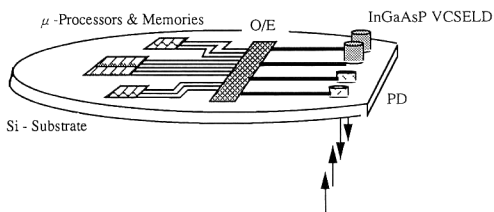


図1 MMOEICの概念図。

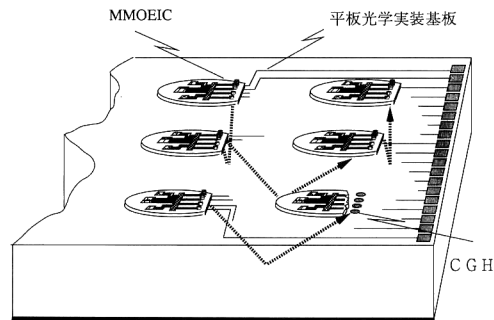


図2 平板光学系による3次元マルチチップ光配線モジュールの概念図。

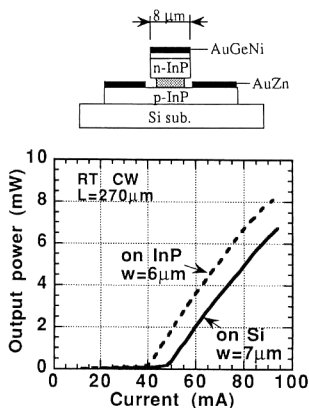


図3 直接ボンディングにより形成したSi基板上InGaAsP半導体レーザーの構造と電流-光出力特性の格子整合InP基板素子との比較。

リソグラフィーの精度で決定できるので、デバイスの空間配置精度も高いという特長が得られる。この点は、直接ボンディングを用いたMMOEICの特長であるといえる。

図3は、Si基板上に接合したInGaAsP/InPレーザー構造と通常のInP基板上の構造を示している。InPとSiの接合は、450°Cで30分間の熱処理により行っている。この接合熱処理温度は、従来の温度より低温化され

たものであり、Si-LSIへの集積化を念頭に置いたプロセスである。つまり、Si-LSIのAl系配線の劣化を防ぐ温度による熱処理温度である450°Cに設定されており、デバイス化プロセスに耐える十分な接合強度を得ることができる。図3中に示したレーザー発振特性の比較において、両者とも同じ値のしきい電流密度を示している。この結果は、直接ボンディングプロセスが、デバイスの劣化を引き起こさずにSi基板上に化合物半導体デバイスを集積化できることを示すものといえる。

このほか、直接ボンディングプロセスは、単体デバイス形成にも有用であることが報告されている。長波長面発光レーザーの多層膜としてAlAs/GaAsミラーをInGaAsP/InP構造に直接ボンディングすることで室温発振に成功し<sup>5)</sup>、また半導体レーザーの低しきい電流化のためのInP-SiO<sub>2</sub>-InP構造電流ブロック層の形成などに用いられている<sup>6)</sup>。

Si-LSIに光配線機能を集積化する試みが研究されている。化合物半導体で構成される光配線デバイスの集積化のために、Si基板上への化合物半導体の直接ボンディングプロセス技術の開発が進んでおり、すでにSi基板上でInGaAsP/InPレーザーの室温連続発振に成功している。今後、異種材料で構成された新しいタイプのOEICである“MMOEIC”の実現が期待される。

## 文 献

- 1) 和田 浩：“光インタコネクション”，応用物理，**16** (1993) 2-9.
- 2) H. Sasaki, K. Shinozaki and T. Kamijoh：“Reduced alignment accuracy requirement for free-space optical interconnection using focused Gaussian beams,” Tech. Dig. CLEO Pacific Rim '95, paper P78 (1995).
- 3) H. Wada, Y. Ogawa and T. Kamijoh：“Electrical characteristics of directly-bonded GaAs and InP,” Appl. Phys. Lett., **62** (1993) 738-740.
- 4) H. Wada and T. Kamijoh：“Room temperature cw operation of 1.3-mm InGaAsP lasers on Si fabricated by low-temperature direct bonding,” Conf. Proc. 7th Int. Conf. InP and Related Materials, paper FB2-7 (1995).
- 5) J. J. Dudley, D. I. Babic, R. Mirin, L. Yang, B. I. Miller, R. J. Ram, T. Reynolds, E. L. Hu and J. E. Bowers：“Low threshold, wafer fused long wavelength vertical cavity lasers,” Appl. Phys. Lett., **64** (1994) 1463-1465.
- 6) H. Wada, Y. Ogawa and T. Kamijoh：“Novel current-blocking structures in semiconductor lasers using directly bonded InP-SiO<sub>2</sub>-InP,” IEEE Photonics Technol. Lett., **6** (1994) 1403-1405.