

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	III-V/Si大規模集積光回路に向けたChip-on-wafer異種材料接合技術に関する研究
Title(English)	Study of chip-on-wafer heterogeneous bonding technology toward III-V/Si large scale photonic integration circuits
著者(和文)	菊地健彦
Author(English)	Takehiko Kikuchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第269号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:植之原 裕行,西山 伸彦,中川 茂,宮本 智之,庄司 雄哉
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第269号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	菊地 健彦	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	植之原裕行	教授	庄司 雄哉	准教授
	審査員	西山 伸彦	教授		
		中川 茂	教授		
宮本 智之		准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「III-V/Si 大規模集積光回路に向けた Chip-on-wafer 異種材料接合技術に関する研究」と題し、和文 6 章から構成されている。

第 1 章「序論」では、本論文の背景と研究目的を示している。最初に昨今の通信トラフィック増大に起因した光トランシーバへの要求について述べ、InP 系モノリシック集積やシリコンフォトニクスといった従来の単一材料技術を用いた光デバイスの課題があることを指摘している。また、この課題に対する有効な解決策として III-V 族化合物半導体とシリコンフォトニクスのハイブリッド集積技術であると述べ、特に Chip-on-wafer 接合(小片接合)による III-V/Si 大規模集積光回路が有効であると指摘している。そのため、本論文ではその作製技術の確立を目的として提示している。

第 2 章「III-V/Si 光トランシーバ回路の構成検討/各所の光増幅器設計」では、まず 10 Tbps 級伝送に向けた光トランシーバ回路の構成を提案している。これを検証するため、回路内各所の光強度ダイアグラムを作成し、各半導体光増幅器(SOA)に要求される利得と光出力を見積るとともに、光増幅特性の数値計算結果から、各 SOA に適した構造を検討している。その結果、増幅効率と利得飽和の抑制はトレードオフの関係にあることを指摘した上で、トランシーバ構成においては、レーザ後、変調器後、受信器前の 3 か所に SOA を分散配置し、それぞれで最適な増幅、利得飽和特性を選択することで効率的な光増幅を行うべきであると述べている。また、そのような最適設計した SOA の分散配置によって、全体として 3 割程度低消費電力化されることを計算から明らかにしている。

第 3 章「ウェハ接合技術を用いたリッジ型ハイブリッドレーザの作製」では、Wafer-to-wafer の接合を用いたデバイス作製を行い、リッジ型ハイブリッドレーザの基礎検証を行っている。最初に、InP 系利得領域の両端に、二段テーパー導波路構造を介してシングルモード Si 導波路領域が接続されたファブリペロー (Fabry-Perot: FP) レーザを作製し、そのしきい値電流から InP 系利得領域と Si 導波路領域間の光結合効率が 80% 以上得られていることを確認したと述べている。次に、共振器を構成するルーブリミラーや波長チューニング用のダブルリングフィルタが形成された Si 光回路上に、レーザおよび SOA 用の 2 つの利得領域が集積された SOA 集積波長可変レーザを作製し、波長可変動作と SOA による光増幅動作を確認している。

第 4 章「InP/Si 直接小片接合技術の検討」では、UV オゾン処理を用いた親水化接合を主たる接手法として選択し、これを Pick-and-place と組み合わせることで、Silicon-on-insulator (SOI) ウェハ上への高歩留まりの InP 小片接合を実現したと述べている。また、接合後の InP 基板除去に関して、ウェットエッチング時の接合界面への薬液浸入を抑制するため、保護膜による接合界面の被覆と、化学機械研磨による InP 基板厚低減を組み合わせたプロセスを提案している。これらの手法により、Si 導波路上へ種々のエピタキシャル層設計を有する InP 小片(0.5 mm×1.8 mm)を高密度に接合し、基板除去後の PL (Photoluminescence) 評価において小片全体を有効領域とした均一な発光強度を得たと述べている。

第 5 章「小片接合技術を用いたデバイス作製/大規模集積化に向けた基礎検討」では、小片接合プロセスを用いた光デバイス作製実証を行っている。最初に FP レーザを作製し、20-85°C の温度域における連続発振と、従来の GaInAsP/InP 系レーザと同等の特性温度を確認したと述べている。また、これらの FP レーザの信頼性検証として高温通電試験を行い、注入電流密度 9.1 kA/cm² の条件において合計 3,000 時間経過後の発振特性に重大な劣化が無いことを確認したと述べている。次に、リング共振器装荷型の波長可変レーザを作製し、55 nm の広い可変波長範囲(副モード抑圧比 50 dB 以上)と、その全域において 70 kHz 以下のスペクトル線幅を達成したと述べている。また、SOA の増幅特性を評価した結果、第 2 章の計算で示された傾向と一致したと述べている。以上の結果から、エピタキシャル層構造が異なる InP 小片を同一の SOI ウェハ上に接合し、デバイス用途に応じて利得特性が異なる SOA を作製可能であることを実証したと述べている。

第 6 章「結論」では、上記の議論を総括している。

以上を要するに本論文は、異種材料集積技術の確立とともに、それを利用した大規模光集積回路実現に向けた指針を明確にしたものであり、学術上、工業上貢献するところが大きい。よって、博士(工学)の学位を与えるに十分資すると認められる。