

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)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	菊地 健彦		審査員主査： Chief Examiner	植之原 裕行

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

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 (Study of chip-on-wafer heterogeneous bonding technology toward III-V/Si large scale photonic integration circuits)」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た。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高速・大容量伝送化と低消費電力化の両立要求について述べ、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を説明した。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について述べ、Chip-on-wafer 接合(小片接合)による III-V/Si 大規模集積光回路作製技術の確立を本論文の目的として掲げた。

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案を示した。本構成は、レーザ後、変調器後、受信器前の 3 か所に半導体光増幅器(Semiconductor optical amplifier: SOA)を分散配置することで効率的な光増幅を行う。これを検証するため、回路内各所の光強度を試算し、各 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た。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り、活性層光閉じ込め係数 α を下げる程利得は小さくなり、飽和光出力が大きくなることを確認した。また、最適設計した SOA の分散配置によって、レーザおよび SOA の消費電力の合計は、レーザ単体を高出力化した場合や、SOA の数を減らして 1 つ当たりの利得を増やした場合と比較して、3 割程度低消費電力化されることを計算から確認した。これらの結果から、本研究で提案する光回路内構成は、10 Tbps 級伝送を前提とした光トランシーバ回路の実現とその低消費電力化に有望であることを示した。

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た。最初に、InP 系利得領域の両端に、二段テーパ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。次に、共振器を構成するループ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実証した。

第 4 章「InP/Si 直接小片接合技術の検討」では、基板表面粗さへの影響が小さい 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。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た。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が得られた。

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、上記の小片接合プロセスを用いた光デバイス作製実証を行った。最初に FP レーザを作製し、20-85°C の温度域における CW (Continuous-wave)発振と、従来の GaInAsP/InP 系レーザと同等の特性温度(67 K)を確認した。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(温度 85°C/2,000 時間、温度 110°C/1,000 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。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。最後に、ハイブリッド SOA を作製した。増幅特性を評価した結果、 α が小さい構造ほど SOA 利得が減少し、代わりに大きな飽和光出力が得られるという、第 2 章の計算で示された傾向を再現した。また、 α が 2.2%と最も小さい構造を有する SOA においては、最大で 16.1 dBm の大きな飽和光出力が得られた。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。

第 6 章「結論」では、上記の議論を総括した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： 電気電子 系
Department of Graduate major in 電気電子 コース
学生氏名： 菊地 健彦
Student's Name

申請学位(専攻分野)： 博士 (工学)
Academic Degree Requested Doctor of
審査員主査： 植之原 裕行
Chief Examiner

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This thesis, entitled "Study of chip-on-wafer heterogeneous bonding technology toward III-V/Si large scale photonic integration circuits," consists of six chapters in Japanese.

In chapter 1, the background and the objective of this thesis are described. Firstly, requirements of high-speed operation and low-power consumption to optical transceivers due to the recent increase of data traffic are explained, thus problems of single material technologies such as InP-based monolithic integration and silicon (Si) photonics are indicated. Next, the III-V/Si hybrid integration technology is presented as a promising solution to overcome these problems, and the establishment of chip-on-wafer (CoW) heterogeneous bonding technology toward III-V/Si large scale photonic integration circuits is defined as the objective of this thesis.

In chapter 2, a configuration of III-V/Si hybrid optical transceiver circuit towards 10 Tb/s-class transmission is proposed, and the design of semiconductor optical amplifiers (SOAs) for various part in the circuit is investigated. In the proposed configuration, SOAs are distributed in three positions in the circuit, such as after the laser, after the modulator, and before the receiver, for an efficient optical amplification. After that, required characteristics of each SOA is defined from an optical power diagram of the circuit, and appropriate design for each SOA is discussed, using numerical calculations for optical amplification characteristics. Results of the calculation indicate that the wall-plug efficiency and the suppression of gain saturation are in trade-off relation, and higher saturated optical output power can be obtained with smaller optical confinement factor in active layers (ζ). Additionally, it is confirmed that the summation of electrical power consumption for a laser and SOAs in the proposed configuration is approximately 30% lower than that of other configurations, in which the number of SOAs is reduced with increased gain of each SOA or an output power of the laser.

In chapter 3, characteristics of hybrid lasers with InP-based ridge structure is investigated using a wafer-to-wafer bonding process. Firstly, Fabry-Perot (FP) lasers with InP-based gain and Si waveguide regions are fabricated. From the threshold current of the lasers, it is confirmed that high optical coupling efficiency of over 80% is obtained at the interface between InP-based gain and Si waveguide regions, via a two-step taper structure. Moreover, wavelength tunable lasers which are comprised of a Si cavity with a loop mirror and double ring filters and InP-based gain regions with laser and SOA sections are demonstrated, utilizing this hybrid structure.

In chapter 4, high-yield bonding of InP chips on a silicon-on-insulator (SOI) wafer is realized using UV-ozone treatment, which offers enough surface hydrophilization without the increase of surface roughness. Additionally, regarding the InP substrate removal after the bonding, a side-wall covering for InP chips using protection films and a chemical mechanical polishing are combined, to suppress the influence of the lateral etching at the bonding interface. Utilizing these methods, high-density integration of various types of InP-based epitaxial structures (chip size: 0.5 mm \times 1.8 mm) on a Si waveguide circuit is demonstrated, and uniform photoluminescence intensity over the whole region of each chip is confirmed.

In chapter 5, the fabrication of optical devices using the CoW bonding process is demonstrated. Firstly, FP lasers are fabricated, and continuous-wave (CW) operation is achieved at a temperature from 20°C to 85°C. The characteristic temperature of the threshold current is 67 K, which is almost the same as the typical value for GaInAsP/InP-based lasers. To investigate the reliability of these lasers, an aging test with the injection current density of 9.1 kA/cm² for 3,000 hours in total (temperature: 85°C/2,000 hours and 110°C/1,000 hours) is performed, and no significant degradation is observed in lasing characteristics after the test. Next, wavelength tunable lasers with Si double ring filters are fabricated. A wide wavelength tuning range of 55 nm (with sub-mode suppression ratio over 50 dB) is obtained, and a narrow spectral linewidth of less than 70 kHz are realized in the entire wavelength tuning range. Finally, hybrid SOAs are fabricated. Measured optical amplification characteristics indicate that the gain of the SOA decreased with smaller optical confinement factor in active layers (ζ), and higher saturated optical output power is obtained. These results agree with the trend of the theoretical calculation in chapter 2. A high saturated optical output power of 16.1 dBm is obtained for SOA with the smallest ζ of 2.2%.

In chapter 6, all discussions of this thesis are summarized.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).