

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	薄膜分布反射型レーザの低消費電力動作構造および作製プロセスに関する研究
Title(English)	Study of Low-Power Consumption Structure and Fabrication Process of Membrane Distributed Reflector Lasers
著者(和文)	高橋 直樹
Author(English)	Naoki Takahashi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12699号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:西山 伸彦,中川 茂,宮本 智之,庄司 雄哉,雨宮 智宏,松尾 慎治
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12699号, Conferred date:2024/3/26, 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)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	高橋 直樹		審査員主査： Chief Examiner	西山伸彦 教授	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「Study of Low-Power Consumption Structure and Fabrication Process of Membrane Distributed Reflector Lasers (薄膜分布反射型レーザの低消費電力動作構造および作製プロセスに関する研究)」と題し、英文 6 章から構成されている。

第 1 章「Introduction(序論)」では、光通信の歴史を紐解くとともに、低消費電力レーザに関して概説した。その中で、半導体薄膜レーザについて、その低消費電力レーザとしての優位性を述べた。そして、どれを選択し、どのように設計するかは、アプリケーションに依存することを指摘し、またその際のレーザ設計にはトレードオフが多く存在することを示した。特に、データ伝送用のレーザを考えた場合、前述したトレードオフを含む設計論が十分でないことを指摘し、それを確立し実証することを本論文の目的として掲げた。

第 2 章「Theoretical analysis of membrane laser for low-power consumption operation (低消費電力動作のための半導体薄膜レーザの理論的解析)」では、半導体薄膜レーザの低消費電力に向けた設計について議論した。まず、半導体レーザの特性が光閉じ込めに大きく影響を受けていることを示し、横方向の閉じ込めを強化する方法として、埋め込みリッジ導波路を提案した。埋め込みリッジ導波路は、光閉じ込め係数を増加することができるため、電極をより活性層に近づけることができ、内部損失を増加させず電気抵抗を下げることで適切な設計が存在することを指摘した。次に、共振軸方向の閉じ込めとして、従来利用されている $\lambda/4$ シフト構造では、半導体薄膜レーザへ適用すると、閉じ込めが強すぎるため空間ホールバーニングが発生することを指摘、これを緩和するために ACPM(Asymmetric corrugation-pitch-modulation) 回折格子の導入を提案し、軸方向に対するキャリア密度の不均一性が解消されることを示した。以上の理論計算を利用して、データ伝送を想定した場合の、要求光出力および伝送速度から最適なレーザ構造を導くことに成功した。

第 3 章「Fabrication technologies for membrane photonic devices (半導体薄膜光デバイスのための作製技術)」では、Si 基板上に第 2 章で設計した化合物半導体薄膜構造を形成するための作製技術について述べた。特に有機金属気相成長法による選択再成長を利用した横クラッド層膜厚制御について、成長過程を明確にし、成長時間と膜厚の関係を導き出した。また、回折格子の波長設計と実際の特性の関係を明確にするとともに、再現性を向上するための新たなプロセスシーケンスを確立した。

第 4 章「Characteristics of membrane distributed-reflector lasers (半導体薄膜分布反射型レーザの特性)」では、実際に半導体薄膜レーザを作製し、その特性を明らかにした。まず、半導体レーザの根幹となる初期基板に対し、量子井戸層厚やドーピングプロファイルを調整することによって、温度特性の改善および電気抵抗の低減を実現した。その上で、第 2 章で提案した埋め込みリッジ構造や ACPM 回折格子を実際に導入し、従来の研究に比べしきい値電流や微分抵抗の大幅な低減を達成した。また、20Gbps でのアイダイアグラムを確認し、提案構造がデータ伝送エネルギーコストを低減できることを示した。

第 5 章「Future prospects: extension of applications of membrane lasers (将来展望：半導体薄膜レーザのアプリケーション拡大)」では、複数のアプリケーションへの適応例を示している。オンチップ光インターコネクションでは、2 章での検討に加え、データ伝送エネルギーコストの観点から、さらなる新構造導入について議論している。また、光インターコネクションを見据えた集積についても議論し、曲げ導波路を作製可能で低損失で伝搬できる InP 導波路とレーザを集積する手法について議論した。光ニューラルネットワークへの応用としては、半導体薄膜レーザが、光 ReLU 関数として利用できることを指摘し、その動作実証を行った。Radio-over-fiber への応用では、光子-光子共鳴構造を新たに導入することで、変調帯域を拡大し、30GHz 帯で 64QAM の無線信号を 3GPP 規格値内の EVM(Error Vector Magnitude)で信号伝送に成功した。

第 6 章「Conclusion(総括)」では、これまでの議論を総括した。

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、東工大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 Tokyo Tech 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： 高橋 直樹
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： 西山伸彦 教授
Chief Examiner

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This thesis, entitled "Study of Low-Power Consumption Structure and Fabrication Process of Membrane Distributed Reflector Lasers," consists of six chapters in English.

In Chapter 1, the history of optical communications is reviewed, and low-power lasers are discussed. In the chapter, the advantages of semiconductor membrane lasers as low-power lasers are described. It was shown that laser design is dependent on the application and that many tradeoffs exist. The objective of this thesis is to establish and demonstrate a design theory that includes tradeoffs for lasers for data transmission.

In Chapter 2, the design of semiconductor membrane lasers for low power consumption was discussed. The characteristics of semiconductor lasers are greatly affected by optical confinement, and a buried ridge waveguide was proposed as a method to enhance lateral confinement. The buried ridge waveguide can increase the optical confinement factor, allowing the electrode to be closer to the active layer, and an appropriate design exists that can lower the electrical resistance without increasing the internal loss. Next, for the resonance axis direction, an introduction of ACPM (Asymmetric corrugation-pitch-modulation) grating was proposed. It is shown that the $\lambda/4$ shift structure causes spatial hole-burning due to too strong confinement, while the ACPM grating suppresses the non-uniformity of carrier density with respect to the axial direction. Using these theoretical calculations, the optimal laser structure was successfully derived from the required optical output power and transmission rate, assuming data transmission.

Chapter 3 describes fabrication techniques for the compound semiconductor membrane structures designed in Chapter 2 on Si substrates. In particular, the thickness control of the side cladding layer using selective regrowth by metal-organic vapor-phase epitaxy was discussed, the growth process was clarified, and the relationship between the growth time and the film thickness was derived. Also, the relationship between the wavelength design and the actual characteristics of the gratings was clarified, and a new process sequence was established to improve the reproducibility.

In Chapter 4, the semiconductor membrane lasers were fabricated and their characteristics were clarified. The buried ridge structure and ACPM grating proposed in Chapter 2 were actually introduced and achieved significant reductions in threshold current and differential resistance compared to previous studies. In addition, eye diagrams at 20 Gbps were confirmed, showing that the proposed structure can reduce the data transmission energy cost.

Chapter 5 discusses various applications of membrane lasers, including on-chip optical interconnection, optical neural networks, and radio-over-fiber, with experimental results.

Chapter 6 summarized results of this thesis.

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、東工大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 Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).