

長波長帯分布帰還型半導体レーザーの研究概要

1. 長波長帯分布帰還型半導体レーザーの研究

従来、光通信光源として、多モード発振するファブリ・ペロ型半導体レーザーが用いられていた。光パルス中に波長の異なる光が含まれていると、ファイバには伝搬速度に波長分散があるため、光パルスの伝搬中にパルス幅が広がってしまう。そのため、パルス間隔を狭めたり、長距離伝送を行うと、伝搬中に前後のパルスが重なってしまう。このため、大容量・長中継間隔伝送には限界があった。

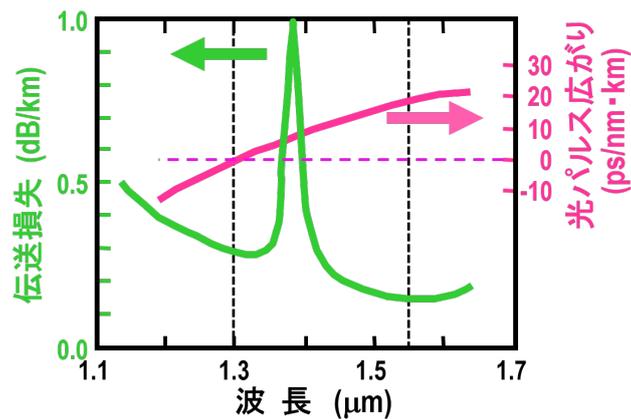


図1 光ファイバの伝送損失と光パルス広がり の波長分散特性

これに代わる光源として、単一縦モードで発振する半導体レーザーとして、発光層下に光学的フィルタとしての周期200~240nmの回折格子を有するInGaAsP/InPダブルヘテロ構造からなる分布帰還型(DFB)レーザーの研究を行った。

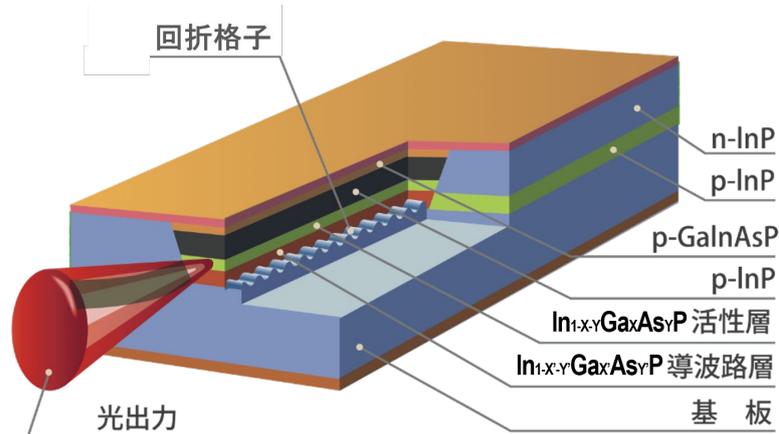


図2 DFBレーザーの構造

DFBレーザーは、GaAs系材料で1970年代に研究されていた。しかし、素子寿命が短く、実用になっていなかった。また、デバイス特性も十分に解析されていなかった。そこで、結晶成長技術とプロセス技術の確立、デバイス特性の解析、単一縦モード発振しやすい構造の提案を行い、1981年に世界で初めて室温連続発振に成功した。

T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Itaya, Y. Noguchi, Y. Suzuki and T. Ikegami, *Electron. Lett.*,18, .27 (1982).

松岡以前の研究

- 1971 DBRレーザの原理検証 Kogelnik等 (AT&T BELL)
- 1972 DFBレーザの理論 Kogelnik等 (AT&T BELL)
- 1973 結合波理論 Yariv (CALTECH)
- 1974 端面回折格子位相効果の理論検討 Streifer (XEROX)
- 1975 GaAs/GaAlAs DFB レーザ室温連続発振 中村等 (日立・CALTEC)

松岡の研究

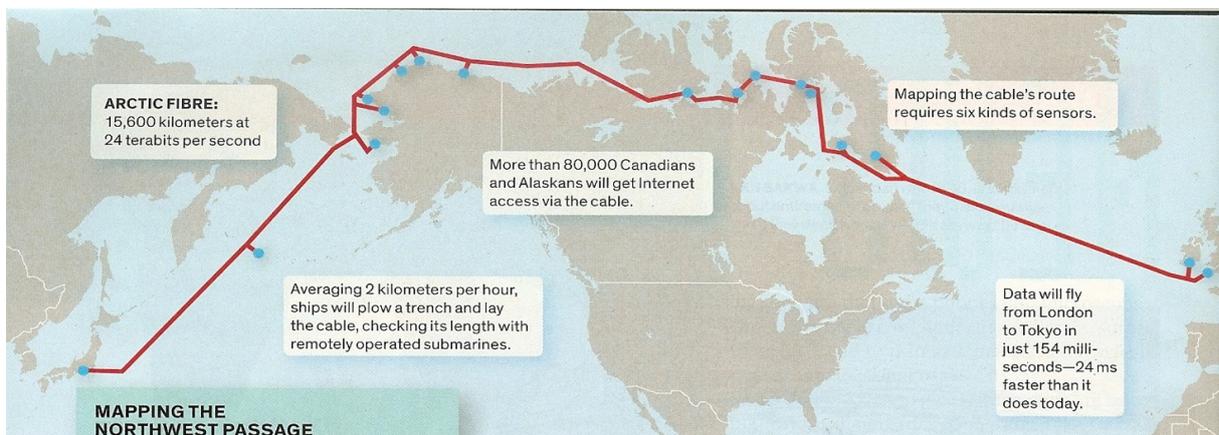
- 1981 世界初のInGaAsP/InP 1.5 μ m帯レーザ室温連続発振
- 1983 InP系結晶の微細加工用エッチング液開発
結晶成長中での回折格子の熱変形防止
- 1984 端面の回折格子位相効果の実験的確認および単一モード化の提案
- 1985 単一縦モード発振温度範囲の予測
高効率・低閾値・高歩留まり素子の設計
- 1986 レーザ光出力 45 mW

図3 DFBレーザの研究開発の歴史

その後、動作特性を解析し、最適設計を行い、実用化した。実用化に際しては、1982年のシステム研究開始時から素子を提供し、1983年から1985年にはレーザ作製技術をメーカーに指導した。

本レーザは、現在、大容量・長中継間隔光通信用光源として、日本をはじめ、ヨーロッパ、アメリカで広く用いられている。日本では、本レーザを光源として1万数千kmに渡る光通信システムが構築されており、伝送容量10Gbit/s（電話156000回線相当）の通信方式が実用に供せられている。最近では、CATVなどにも多く用いられている。

DFBレーザの実現により、光通信用部品から通信方式に関する世界三大国際会議の一つである欧州光通信会議において最優秀論文賞を1984年に受賞。



距離 : 15,600 km 伝送容量 : 24Tb/s 敷設速度 : 2km/h 敷設費 : \$850M (1060 億円)
東京-ロンドン間の伝達時間 : 154ms

図4 北極光ファイバ海底ケーブル

IEEE Spectrum, Jan. 15, pp. 11-13 (2015)

表 1 に示す要素技術毎に具体的研究内容をご紹介します。

表 1 DFB レーザ作製に必要な要素技術

技術	項目	当時の技術
回折格子作製	二光束干渉露光装置の設計・製作 線幅:0.12 μ m	最小線幅:2 μ m
	フォトリソグラフィ	最小レジスト膜厚:0.5 μ m
	結晶のエッチング液	電子ビーム露光装置:開発中
結晶成長	結晶表面クリーニング	エピタキシャル成長:液相成長
	回折格子形状保存	
設計	回折格子形状の設計	結合モード理論
	単一縦モード発振確率	議論なし

1980年10月研究開始

(a) 必要なサブミクロン周期の回折格子を、大面積半導体結晶上に作製できる二光束干渉露光装置の開発

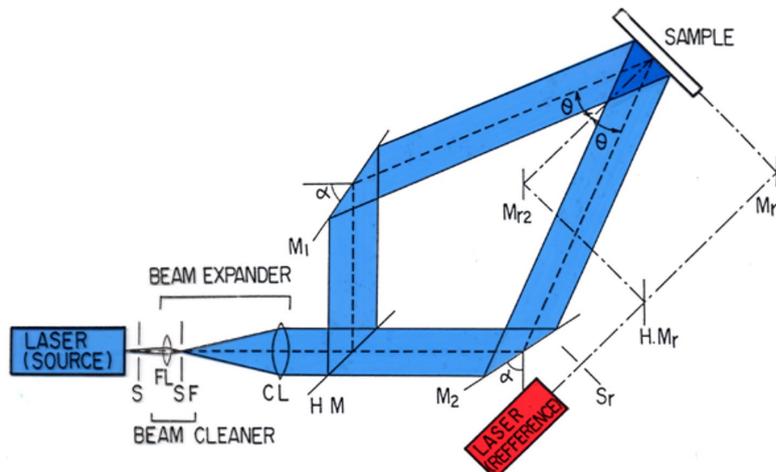


図 5 二光束干渉露光装置の原理図



図 6 外販した装置

(b) InP 結晶の加工用に制御性および再現性の高いエッチング液開発

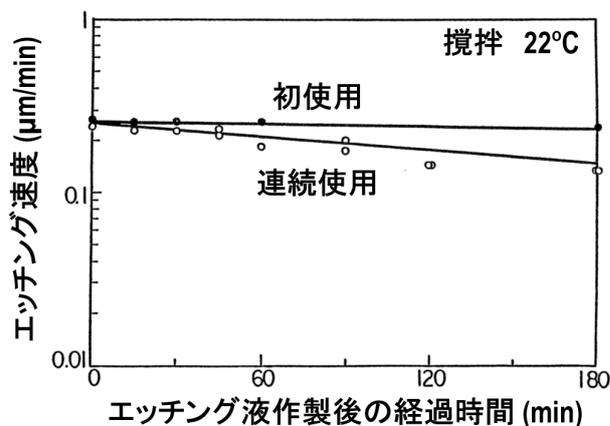
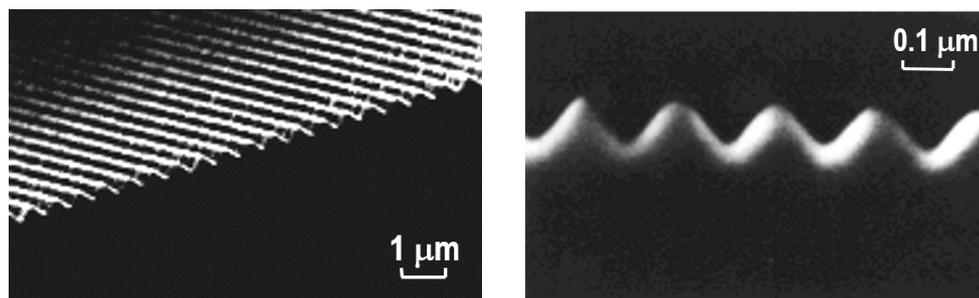


図7 (001)面 InP 基板用に開発したエッチング液
SBW* : 10HBr : 40H₂O のエッチング安定性
* 飽和臭素水

T. Matsuoka and H. Nagai, *J. Electrochem. Soc.* **133**, 2485 (1986).



(a) 鳥観図 (b) 断面

図8 (001)面 InP 基板に形成した周期 197nm の回折格子の走査型電子顕微鏡写真

(c) 回折格子の上にデバイス構造を結晶成長するとき、成長炉中で熱により回折格子が変形する。この現象を熱力学的に解析し、成長雰囲気中にリンの圧力を添加して、熱変形を防止する技術を開発。

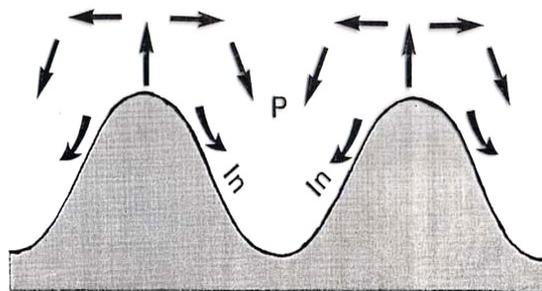


図9 物質移動の原理

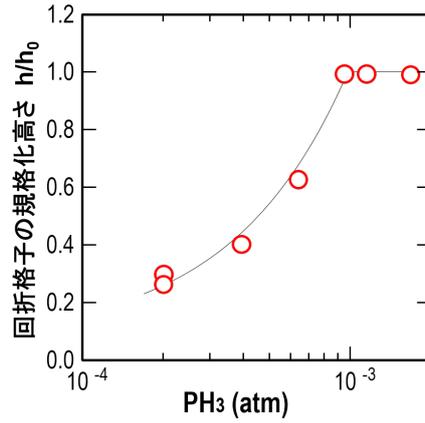


図10 液相成長炉にフォスフィン PH₃ 導入の効果

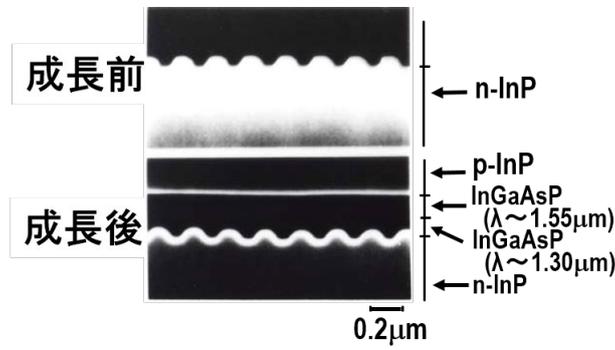


図11 回折格子上に成長した DFB レーザ構造の断面写真

H. Nagai, Y. Noguchi, and T. Matsuoka, *J. Crystal Growth* **71**, 225 (1985).

(d) 共振器端面での回折格子の位相効果

共振器端面を直接エッチングして、端面での回折格子位相を変化させて特性測定を行い、縦モードの単一性が、端面での回折格子の位相に依存して変化することを指摘。

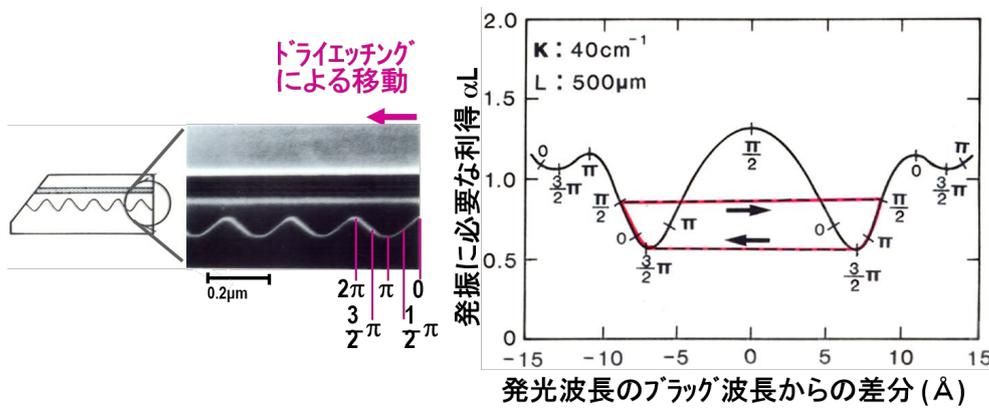


図12 共振器端面での回折格子の位相効果

T. Matsuoka, H. Nagai, and Y. Yoshikuni, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21**, 1880 (1985).

(e)素子設計

共振器端面での回折格子位相効果を考慮して結合波理論を用いて解析し、高歩留まりで作製可能であり、高出力が得られ、かつ、安定動作する構造を提案。

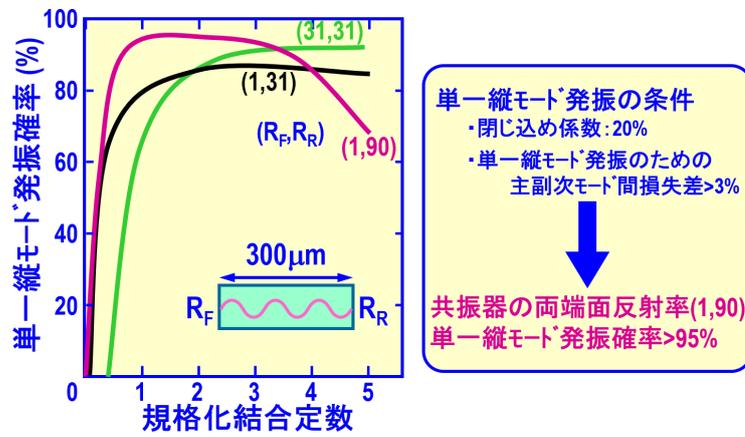


図13 DFBレーザの構造と単一縦モード発振確率