

小林功郎 「長波長帯光ファイバ通信用単一横・縦モード半導体注入レーザ」

KOBAYASHI Kohroh "Single Transverse and Longitudinal Mode Semiconductor Injection Lasers for Long Wavelength Optical Fiber Communications"

1. 略歴

1944-10 誕生, 1968-03 東京工業大学学士課程卒業, 1970-03 同修士課程修了, 1977-06 同工学博士, 1970-04 NEC 入社, 研究開発グループで光通信用半導体レーザの研究開発に従事, 1991-07 NEC 光エレクトロニクス研究所長, 1999-04 NEC 研究担当支配人, 2002-04 東京工業大学精密工学研究所教授, 2008-04 同研究所長, 2010-03 東京工業大学名誉教授.



(小林 功郎)

1987-03 大河内記念技術賞(共同), 1989-05 電子情報通信学会業績賞(共同), 2009-05 同功績賞. 1996-01IEEE Fellow, 2006-09 電子情報通信学会フェロー, 2007-08 応用物理学会フェロー. 2010-05 電子情報通信学会名誉員.

2. 要約

小林功郎は, 光ファイバ通信用の半導体レーザの研究開発で, 重要な業績を上げた. 1970 年代には, NEC の研究所で半導体レーザの基礎研究に従事した. 主要な研究トピックスとしては, 光注入同期による緩和振動抑制, 電流・光出力 (I-L) 特性の多重階段状変動などの外部光帰還励起の異常現象, I-L 特性の強い飽和や出力光分布の歪をもたらす, 水平横モード不安定現象などである. 1980 年代になると研究課題は, 長距離広帯域光ファイバ通信用の半導体レーザの研究開発・実用化に展開した. 研究チームのメンバーと共に, InGaAsP/InP 材料系による, 高性能, 基本横モードおよび単一縦モード (単一周波数) 半導体レーザを開発し, 実用化した. 2002 年に東京工業大学に移籍後, 全光信号処理やモード同期面発光レーザなど, 先端的な研究課題に挑戦した.

3. 研究概要

3.1 1970 年代の半導体レーザの研究成果:

小林功郎は, 1970 年に東京工業大学修士課程電子工学専攻を修了, 日本電気(株)に就職. 研究所で光通信用半導体レーザの研究開発に従事. 加入後すぐに, AlGaAs/GaAs 半導体レーザの日本初室温連続発振達成の機会に恵まれた[1].

(a) 緩和振動抑制：

半導体レーザの光出力に現れる激しい緩和振動は、高速の光ファイバ通信に応用するとき、深刻な問題になるものと考えられた。半導体レーザ応用研究グループの長であった、内田禎二博士は、この緩和振動を消すことを研究課題に取り上げた。ロイラング博士は、理論解析に基づいて、外部光注入法を提案した。小林功郎は、この方法を実証しようと努力し、2つの AlGaAs/GaAs 半導体レーザを組み合わせた実験により、Fig. 1 に示すように、ほぼ完全な緩和振動抑制に成功した[2]。Fig. 1 で上が外部光注入あり、下が外部光注入無しの時の波形を示す。後に、この実験は、モード同期の最も先進的な実験と認められ、半導体レーザの変調帯域拡大に用いられた。

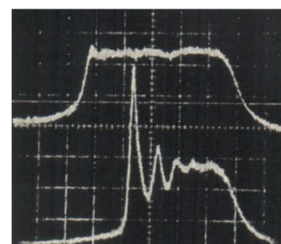


Fig.1 光注入同期による
緩和振動抑制[2].
1ns/div.

(b) 光帰還誘起不安定性：

光帰還、すなわち半導体レーザ光出力の一部が外部の反射鏡によって反射され元の半導体レーザに戻される時、電流-光出力 (I-L) 特性に階段状の多数の安定状態、あるいは周期的な変動が現れることを実験的に見出した[3]。このような静的な動作特性に加えて、半導体レーザの動的特性も光帰還によって大きく影響されることを実験で示した。帰還された光と半導体レーザ内部の光の間のコヒーレント干渉条件によって、安定で穏やかな直接変調周波数特性と、不安定な自励振動や激しい共振状現象が、半導体レーザへの印加電流変化などにより、周期的に繰り返し発生することを示した。これらの現象の理論解析は、ロイラング氏によって行われ、基本となる式は、“Lang-Kobayashi’s Equation”[3]として、反射光／注入光のあるレーザ共振器の解析に、広く用いられている。これらの干渉現象は非常に少ない量の光帰還によって引き起こされるので、半導体レーザの十分に安定な動作を実現するためには、レーザと外部光回路の間に、光アイソレータなどの光非相反デバイスを挿入すべきことが提案された。

(c) 横モード不安定性：

AlGaAs/GaAs 利得導波半導体レーザの製造技術の進展につれて、電流-光出力 (I-L) 特性におけるキック (強い飽和) や、光出力緩和振動の急激なダンピングなどの異常な振舞いが再現性良く発生するようになった。これらの異常現象は、不安定な水平横モード導波に起因することが実験的および理論的に明らかにした[4]。理論はロイラング氏による。この現象は、励起を上げるに伴い、水平方向の不均一な誘導放出に伴う不均一なキャリア消費により、光導波の力が弱められることにより生じる。そのような異常現象を除去する重要なポイントは、レーザ構造中に、しっかりした固定の横モード導波機構を導入することにある。深

い亜鉛拡散型と名付けられた新しいストライプ構造が、米津宏雄氏により発明され、実証された。この成果の結論は、安定で高性能の半導体レーザを実現するには、確実な固定の光導波構造が不可欠である、というものである。それは、本文の 3.2 に述べられている、単一モード光ファイバ通信用の高性能長波長帯半導体レーザの研究開発につながっている。

3.2 単一モード光ファイバ通信用高性能半導体レーザの研究開発：

光ファイバ通信の研究開発は、1970 年代の多モード光ファイバ短波長($0.8\ \mu\text{m}$)システムから、1980 年代の単一モード光ファイバ長波長($1.2\text{--}1.6\ \mu\text{m}$)システムへ展開された。筆者の所属していた、NEC の光デバイス研究グループに対して、社内システムグループから、最初は長波長帯単一横モード半導体レーザ、次いで同波長帯単一縦モード（単一周波数）半導体レーザ開発の強い要請が寄せられた。3.1(c)で述べた AlGaAs/GaAs 短波長半導体レーザの研究開発で得られた知識を基に、優れた特性を持つ半導体レーザが実現され、初期の光ファイバ伝送装置に搭載され、光通信の発展に貢献した。

(a) InGaAsP 二重チャンネルプレーナ埋め込み

ヘテロ構造半導体レーザ(DC-PBH LDs)

しっかりした固定の光導波機構として、InGaAsP 活性領域ストライプを InP クラッド中に埋め込む埋め込みヘテロ構造を採用した。一組のチャンネル（二重チャンネル）により形成された活性領域メサ構造の両側に、p-n-p-n 電流阻止構造が液相結晶成長法で作られた。この DC-PBHLD は、水戸郁夫氏により発明され、結晶成長された[5]。断面構造を Fig. 2 に示す。強い光子とキャリアの閉じ込めにより、DC-PBHLD は、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯室温動作の特性として、微分量子効率 78%，電気-光変換効率 43%，単一基本モード光出力 50mW など、優れた特性を発揮した。また、 130°C まで連続動作が可能であった。後にほぼ同様な特性が $1.5\ \mu\text{m}$ 帯でも得られた。このデバイスは、長距離・広帯域光ファイバ通信の発展に大いに寄与した。

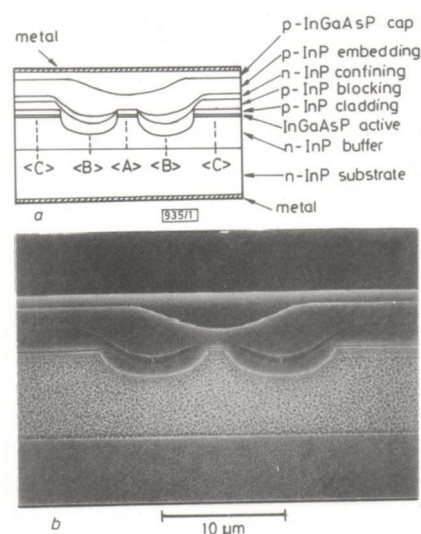


Fig. 2 InGaAsP 基本横モード
半導体レーザ[5]

(b) 単一縦モード分布帰還型半導体レーザ

(DFB-DC-PBH LDs)

$1.55\ \mu\text{m}$ 帯の長距離-広帯域光ファイバ通信用の光源には、高速変調時に単一周波数が要求された。この条件は石英系単一モードファイバの波長分散の影響を避けて最低損失波長域を活用するうえで不可欠なものであった。分布帰還 (DFB) 用の周期構造を、安定な単一

横モード (DC-PBH) 半導体レーザに埋め込んだ。その結果, Fig.3 に示すように, 高性能の, $1.5\mu\text{m}$ 帯 DFB-DC-PBHLD が実現された[6]。単一周波数条件下で, 20mW 光出力や, 75°C 動作などの特性が得られた。

3.3 東京工業大学移籍後の先端技術への取り組み

2002 年に東京工業大学精密工学研究所に教授として移籍後は, 全光信号処理や面発光レーザのモード同期などを含み, 先端技術へ取り組んだ。

(a)全光ラベル認識：

全光信号処理技術は, 従来の電気信号処理に比べて, 速度や消費電力の点で有利になると期待されている。これまでに, SOA-MZI (Semiconductor Optical Amplifier-Mach-Zehnder Interferometer)全光スイッチや波長変換器を用いて数ビットの全光先頭ビット抽出や, 全光ラベル認識等を行った。ループバック方法を導入し, 全光スイッチの数を減らすことを試みた[7]。基本機能の実証はできたが, ラベルビット数の拡大や消費電力の低減は今後の課題である。

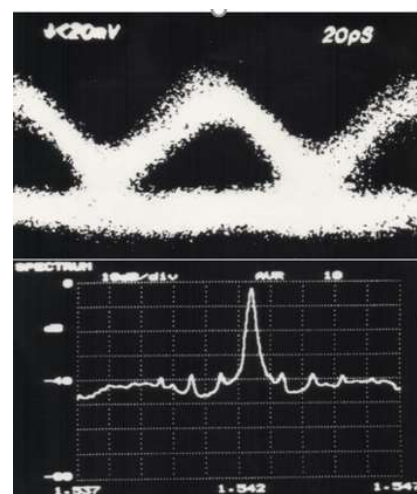


Fig.3 $1.5\mu\text{m}$ 帯 DFB-DC-PBHLD の 10Gb/s の単一周波数動作[6]

(b)外部共振器 VCSEL の分周波 (Sub-Harmonic) モード同期

直接変調帯域よりも高速の光信号生成のために, 面発光レーザ (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) チップとモード同期用の凹面鏡を組み合わせ, 複合共振器を設計・製作した。曲率半径 14.12mm の凹面鏡を用いて, 3.52GHz , 5.28GHz の $1/3$, $1/2$ の分周波電気信号注入による能動モード同期により, 10.56GHz 繰り返しの光信号波形を得た[8]。曲率半径 4.71mm の凹面鏡を用いた別の実験では, $1/2$ 分周波モード同期により 31GHz 繰り返しのモード同期波形を観測した。この実験では, 独自の二重パス共振により, $120\mu\text{m}$ 以上という広い凹面鏡設置余裕を確認した。実用上重要な特性と思われる。

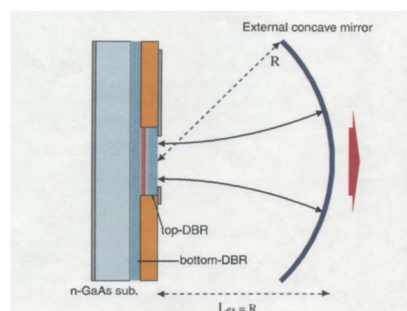


Fig.4 モード同期のための凹面鏡を設置した面発光レーザ (VCSEL) [8]

4. REFERENCES

- [1] I. Sakuma, H. Yonezu, K. Nishida, K. Kobayashi, F. Saito and Y. Nannichi, "Continuous Operation of Junction Lasers at Room Temperature," Japan. J. Appl. Phys., Vol. 10, pp. 282-283, 1971.
- [2] R. Lang and K. Kobayashi, "Suppression of Relaxation Oscillation in the Light Output of Semiconductor Lasers," IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-12, pp. 194-199, Mar. 1976.
- [3] R. Lang and K. Kobayashi, "External Optical Feedback Effects on Semiconductor Injection Laser Properties," J. Quantum Electron., Vol. QE-16, No. 3, pp. 347-355, Mar. 1980.
- [4] K. Kobayashi, R. Lang, H. Yonezu, Y. Matsumoto, T. Shinohara, I. Sakuma, T. Suzuki and I. Hayashi, "Unstable Horizontal Transverse Modes and Their Stabilization with a New Stripe Structure," IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-13, No. 8, pp. 659-661, Aug. 1977.
- [5] I. Mito, M. Kitamura, Ke. Kobayashi, S. Murata, M. Seki, Y. Odagiri, M. Yamaguchi, and Ko. Kobayashi, "InGaAsP Double-Channel-Planar-Buried-Heterostructure Laser Diode (DC-PBH LD) With Effective Current Confinement," J. Lightwave Tech., Vol. LT-1, No. 1, pp. 195-202, Mar. 1983.
- [6] M. Kitamura, M. Yamaguchi, S. Murata, I. Mito and K. Kobayashi, "High-Performance Single-Longitudinal-Mode Operation of InGaAsP/InP DFB-DC-PBH LD's," J. Lightwave Tech., Vol. LT-2, No. 4, pp. 363-369, Aug. 1984.
- [7] J. Kurumida, H. Uenohara and K. Kobayashi, "A New Loopback Method of All-Optical Label Processing for Label Bot Scalability," Photonics Tech. Letts., Vol. 20, No. 9, pp. 745-747, May 2008.
- [8] T. Kato, A. Matsutani, T. Sakaguchi, and K. Kobayashi, "Sub-harmonic mode-locking of VCSEL with a concave external mirror," IEICE Electronics Express, Vol. 5, No. 4, pp.152-156, Feb. 25, 2008.

2021-6-26 小林功郎談