

最近の技術から

半導体レーザーの高速変調

伊賀 健一・小山二三夫

東京工業大学精密工学研究所 〒227 横浜市緑区長津田 4259

1. ま え が き

近年、超高速光ファイバ伝送や光搬送によるマイクロ波伝送の実現を目的として、半導体レーザーの超高速変調の研究が盛んになってきた。すなわち、20 GHz を越える超高速直接変調、高速変調時にも安定な単一モードで動作する動的単一モード (DSM) レーザー、さらに直接変調に起因する波長チャージングを抑制するための高速外部変調方式、コヒーレント光通信用波数変調など、新たな技術として進展を見せはじめている。

実用上の高速変調技術については文献 1) に紹介されているので、ここでは、研究段階にあるこれら超高速変調技術について紹介する。

2. 超高速直接変調

半導体レーザーの直接変調帯域の上限はいわゆる共振状周波数 f_r で与えられるとされ²⁾、通常の動作条件では、 f_r は数 GHz である。光子寿命の短縮、微分利得の増大、高出力動作等により、その値は増大させることが原理的には可能である³⁾。一方、半導体レーザーの変調は、注入電流を変調する直接変調の他にも、利得や共振器の Q を変調するパラメータ変調によっても行なうことができる。こういった新しいパラメータ変調では、図 1 のように f_r の 1, 2 桁高周波まで変調が可能であることがわかってきた⁴⁾。

現実的には、半導体レーザーのもつ接合容量 C と直列抵抗 R_s の電気的特性により変調帯域が制限される。すなわち、その遮断周波数は

$$f = 1/(2\pi CR_s) \quad (1)$$

で表わされる。通常の埋込みレーザーでは、 $R_s = 5 \Omega$, $C = 10 \sim 40 \text{ pF}$ 程度であり、遮断周波数は数 GHz となり、変調帯域が電気的特性により制約される。これを改善するために、埋込み層の面積を低減し、その容量を 1 pF 以下まで低減した図 2 のようなメサ構造の高速半導体レーザーが製作され、室温で 26 GHz (-3 dB 帯域幅) の

変調が達成されている⁵⁾。

3. 動的単一モード半導体レーザー

通常の劈開面を反射鏡として用いるファブリペロ共振器型の半導体レーザーでは、高速直接変調をすると多モード発振し、発振スペクトルが著しく広がる。このスペクトル広がり、単一モードファイバの有限の波長分散のある $1.55 \mu\text{m}$ を中心とする最低損失波長帯での長距離伝送を行なう場合、分散の影響で著しい帯域制限をもたらす。この問題を解決するため、末松ならびに著者らは 1980 年頃より、高速変調時にも単一モード動作を維持する動的単一モード (DSM) レーザーの必要性を訴え、デバイスの実現を試みた^{6,7)}。その形式には、分布反射形 (DBR) レーザー、分布帰還形 (DFB) レーザー、極短共振器レーザーなどがある。ここ数年において、世界的にも一般的な名称となりつつある DSM レーザーの発展には目覚ましいものがあり、とくに波長 $1.3 \mu\text{m}$ や $1.5 \mu\text{m}$ の GaInAsP 系において、しきい値電流や効率の面では通常のレーザーと遜色のないものが得られるようになり、100 mW 以上の高出力動作も達成されている⁸⁾。この DSM レーザーを用いて 4 Gb/s, 103 km の無中継伝送実験も報告されている⁹⁾。現在では、実用化に向けて信頼性等について研究が進められている。

DSM レーザーを用いても、高速直接変調に伴い活性層内のキャリア密度の変動に起因した波長チャージングが生じる。このような光パルス内の波長シフトは伝送帯域を制限する要因となる。この量 $\Delta\omega$ は、線幅増大係数 α と変調波形 S を用いて次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\Delta\omega = (\alpha/2)(1/S)(dS/dt) \quad (2)$$

これからわかるように、材料定数と波形により決まり、複合共振器等で打ち消す試みもあるが、まだ実用的でない。そこで、次に述べるような外部変調による高速光変調の研究も行なわれ始めた。

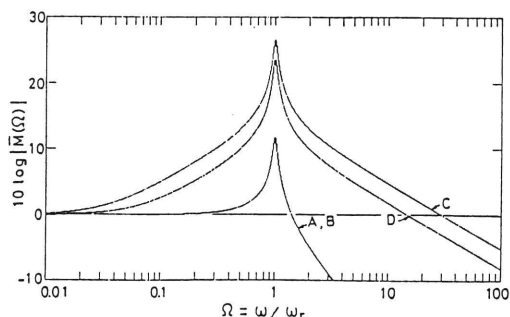


図1 半導体レーザーのパラメータ変調における変調感度の周波数特性⁴⁾
 A: 通常の直接変調, B: キャリア寿命変調, C: 利得変調, D: 損失変調.

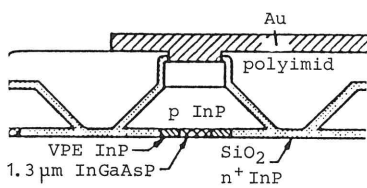


図2 高速メサ型 GaInAsP/InP レーザー⁵⁾

4. 外部変調技術

外部変調器としては、LiNbO₃等の電気光学結晶を用いたものと、半導体の電界光吸収効果を用いたもの等がある。LiNbO₃の変調器によって、パルス幅 43 ps の変調が報告されており¹¹⁾、最近、8 Gb/s, 68.3 km の直接検波による光ファイバ伝送実験も行なわれている¹²⁾。また、図3に示すような半導体の多重量子井戸 (MQW) 構造における電界光吸収効果を用いた高速の光変調器が提案され、半導体レーザーとモノリシックに集積できる可能性をもった外部変調器として期待されており、実際に、パルス幅 100 ps の変調が確認されている¹³⁾。ところが、このような外部変調においても、変調器内の屈折率変動に起因する位相変調によって、スペクトル広がり起きる可能性があり、それが直接変調と同様に(2)式で記述できることが、著者らによって指摘された¹⁴⁾。今後、超高速化、あるいは半導体レーザーとのモノリシック集積化とともに、スペクトル広がりについての検討が必要であろう。

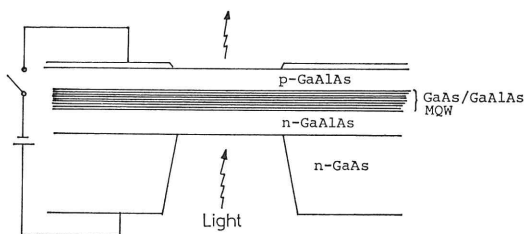


図3 MQW 構造電界吸収効果を用いた変調器¹³⁾

5. あとがき

光ファイバの伝送帯域は約 70 Gb/s・km^{1/2} (波長 1.55 μm) であり、これを有効に生かすための光変調の超高速化は今後とも進められよう。高速化のためのデバイス構造の最適設計を行なうとともに、外部変調方式の導入、新しい超格子構造やパラメータ変調などにより、10 GHz を越え、100 GHz に及ぶような超高速変調が期待される。

文 献

- 1) 茂木直人: 光学, **15** (1986) 143.
- 2) 池上徹彦, 末松安晴: 電子通信学会論文誌, **51-B** (1968) 57.
- 3) K. Y. Lau and A. Yariv: IEEE J. Quantum Electron., **QE-21** (1985) 121.
- 4) K. Iga: IECCE of Japan, E 68 (1985) p. 417.
- 5) J. E. Bowers, B. R. Hemenway, T. J. Bridges and E. G. Burkhardt: OFC'86, WBB2 (1986).
- 6) K. Iga and Y. Suematsu: European Conference on Integrated Optics (1981) p. 70.
- 7) Y. Suematsu, S. Arai and K. Kishino: IEEE J. Lightwave Technol., **LT-1** (1983) 161.
- 8) M. Kitamura, M. Yamaguchi, S. Murata, I. Mito and K. Kobayashi: ECOC'85 (1985) p. 21.
- 9) A. H. Gnauck, B. L. Kasper, R. A. Linke, R. W. Dawson, T. L. Koch, T. L. Bridges, E. G. Burkhardt, R. T. Yen, D. P. Wilt, J. C. Campbell, K. C. Nelson and L. G. Cohen: OFC'85, Postdeadline paper (1985).
- 10) 小山二三夫, 末松安晴: 電子通信学会光量エレ研, OQE 84-71 (1984).
- 11) M. Izutsu and T. Sueta: IEEE J. Quantum Electron., **QE-19** (1983) 668.
- 12) A. H. Gnauck, S. K. Korotky, B. L. Kasper, J. C. Campbell, J. R. Talman, J. J. Veselka and A. R. McCormick: OFC'86, Postdeadline paper, PD9 (1986).
- 13) T. H. Wood: Electron. Lett., **21** (1985) 693.
- 14) F. Koyama and K. Iga: Electron. Lett., **21** (1985) 1065.

(1986年4月1日受理)