



超高速光通信デバイスの技術動向

Evolution of Devices for Ultra-high Speed Optical Transmission Systems

(株)富士通研究所基盤技術研究所 所長代理

今井 元 Hajime Imai

はじめに

光通信システムは、大容量・長距離伝送を特長として進展してきた。大容量化では、変調速度の高速化が主体で、最近では10 Gbpsの信号を取り扱えるようになっている。また、長距離化では、光ファイバの低損失化や光ファイバ増幅器の出現で無中継距離が100 kmを超えるようになっていく。

しかし、マルチメディア時代の開幕とともにその通信需要は高まり、一つの光ファイバに一つの波長を通した方式では効率が悪いと思われるようになり、たくさんの波長を1本の光ファイバに通した波長多重(WDM)方式が実用化されるようになった。⁽¹⁾この段階で新しいデバイスの開発が求められた。最近のインターネットの急激な普及に伴う通信需要の高まりはこうした動きを加速するだけでなく、新しい通信方式の開発を促進するものであり、デバイスにも質的な変化が不可欠なものとなる。

デバイスの今後を考えていく上でポイントになる点を挙げると以下のとおりである。

- (1) 低コスト(価格)・量産可能
- (2) 単機能からマルチ機能
- (3) 高信頼性
- (4) コンシューマ品としてイメージ

これらのことは以前からも個々には言われていることである。とくに、光ファイバが家庭に入ると、コンシューマ部品として扱われる

ことが今後の通信デバイスとして質的な変化を迫られることになると思われる。一方、システムとしても、これまでのPoint-to-point通信からネットワーク化するために、デバイスにも新しい機能が必要となってくるものと思われる。

以下の章で、光デバイス、電子デバイス開発の歴史をレビューしながら、今後の開発動向を述べる。

光デバイス

通信用光デバイスにはレーザダイオード(LD)とフォトダイオード(PD)があるが、ここではLDを中心に述べる。これまでのLD開発技術の流れを図-1に示す。LDは室温連続発振したのが1970年で、GaAs基板上にキャリアの閉込めを効率的に行うためにダブルヘテロ構造を採用したものであ

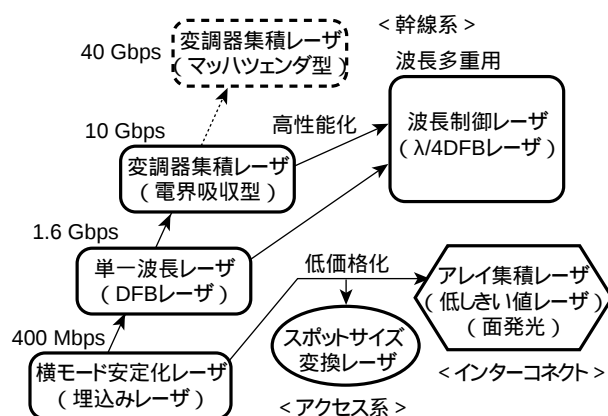


図-1 光通信用レーザの技術の流れ

Fig.1-Technology developments of laser diodes for optical transmission systems.

る。発振波長は $0.8\mu\text{m}$ 帯であり、当時の光ファイバの低損失領域を考えると適切な波長帯であった。その後、光ファイバの低損失領域が $1\mu\text{m}$ 帯（理論予測と合致）へシフトすると、LDもInP基板を用いたものへ移行した。

InP系材料を使うとGaAs系材料と異なり、LDの信頼度が飛躍的に改善され、それまで難しいとされた埋込み構造LDが容易に実現できた。このことは、LDのしきい値低減、横モード安定化、長寿命化などで利点があり、光通信の適用範囲を更に広げることができた。図-1はこの後の技術の流れを示している。高性能化では、縦方向へ進み、単一波長発振が可能な分布帰還型（DFB）レーザ開発、電界吸収型変調器集積（MI）DFBレーザ開発へと進展した。これらは、光ファイバの波長分散（波長ごとに群速度が異なること）による伝送距離制限を回避するためのものであった。しかし、DFBレーザを直接電流駆動して変調する方式では、発振開始時に緩和振動に伴うキャリア変動が生じ、屈折率変化がおき、発振波長がずれる（波長チャープング）ため、外部変調器の採用と

なった。

すでにリチウムナイオベート（LN）デバイスによりマッハツェンダ（MZ）干渉型変調器も実用化されており、原理的にはこの方が波長チャープングは生じない。MI-DFBレーザの場合には、電界変化に伴う屈折率変化が生じて波長がずれるために、長距離伝送ではLN変調器と棲み分けられた。今後、40 Gbpsまで変調速度が上がってくると、小型化が重要なポイントとなるために、変調器集積レーザとしては、MZを半導体で形成して集積化することが不可欠となる。このことは、半導体導波路技術の開発が必要となり、また逆に、半導体導波路技術は、光デバイスへの大きな変革に役立つものとなる。

こうした高性能化には、もう一つ波長多重（WDM）システムへの適用から新開発が生まれる。それは、波長可変レーザのような発振波長を自由に設定できるものである。⁽²⁾ 波長可変レーザの必要な理由は、システムで多くの波長を扱うようになる、レーザの品揃えや故障したときのリペアでメリットがあること、また、波長ルーティン

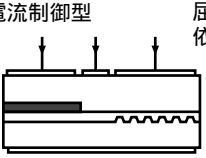
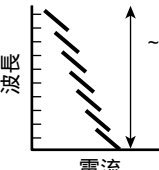
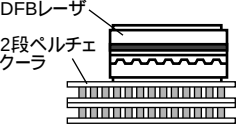
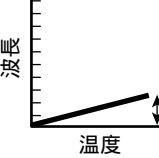
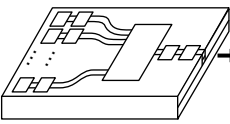
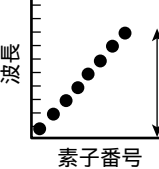
レーザ構造/波長可変機構	特 徴
電流制御型 屈折率のキャリア密度依存性  NEL Altium GEC-Marconi 富士通	 ～32 nm(～40チャンネル相当) 波長可変幅は大きい が波長ジャンプ有り。
温度制御型 屈折率の温度依存性  DFBレーザ 2段ベルチェ クレーラ Nortel 富士通	 連続的に波長可変。 波長可変幅が小さい。 5 ～ 7 nm(7チャンネル相当)
アレイ集積型 素子切り換え  NEC Lucent Bellcore 富士通	 波長可変幅は大きい が素子数が多い。 6 ～ 32 nm(8 ～ 40チャンネル相当)

図-2 波長可変レーザの構造と特徴

Fig.2-Structures of wavelength tunable lasers and comments.

グやノードで任意波長の挿抜に便利が良いことである。波長可変機構の開発は過去に盛んに行われており、図-2に示すように大別される。

波長可変は屈折率を変えることで行うが、その方法として、温度を変える方法、キャリアを注入して変える方法がある。後者では、DFBレーザの電極を分割して注入電流分布を変えるものと、DBRレーザの分布反射器の電流を変えるものがある。これらの方法には一長一短があり、決定打がないのが現状である。すなわち図-2に示したように、温度を変化させるものは、波長の連続可変が可能であるが可変範囲が狭いこと、電流を変えるものでは、波長可変範囲は大きいが連続可変でなく、波長ジャンプ位置が制御できないことである。これらの欠点を補う方法として提案されているのが、レーザアレイを用いるものである。

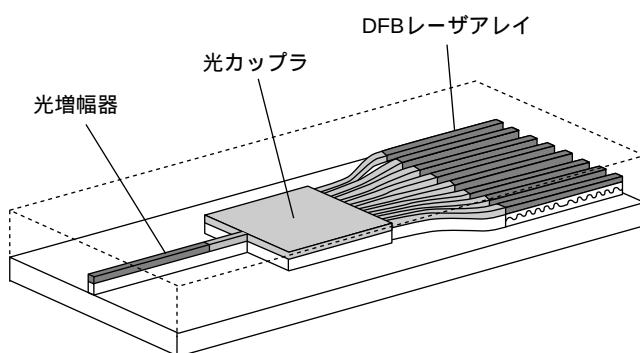
図-3は、八つのDFBレーザアレイからなり、それらの出力光を光導波路を用いて一つにまとめ、光増幅器を通して光出力を調整するものの例である。この方法により、32 nmの可変波長範囲を実現でき、アレイを切り換えることで波長域が設定できるようになる。しかし、アレイ間の波長設定技術が重要になる。回折格子のピッチ、活性層を含む各成長層の膜厚、ストライプ幅などを精密制御する必要がある。具体的にどの程度の制御が必

要かという、波長0.1 nmの制御にはストライプ幅・活性層厚のナノメータ制御が必要となる。

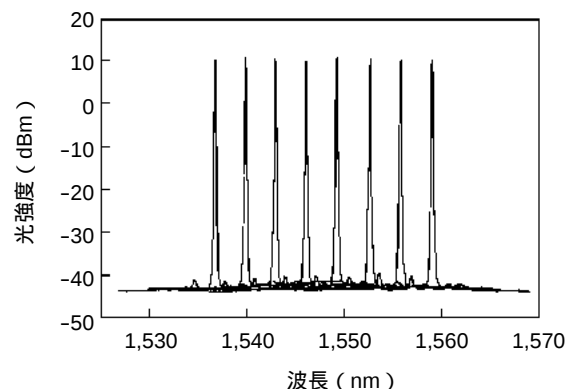
つぎに必要なものは、集積化技術と量子ドットなどの量子効果技術である。また、成長技術の進展に伴う新しい材料技術もある。図-3は小規模集積を示したものであるが、ここにもあるように、集積を実現するにはまず導波路技術が必要になる。半導体モノリシック技術は、将来の電子デバイス・ICとの集積を考えると相当難しいが、ハイブリッド集積を考えると実現性が高くなる。この場合、光デバイスはある程度小規模集積し、例えばガラス導波路上にハイブリッド集積することになる。光をLSIのように自由に扱えるようにすることが大切で、CADの充実が必要となる。量子効果を利用したものでは、量子井戸はすでに実用化されている。今後、上述した量子ドットなどを利用できるか否かが決め手になる。新材料技術は格子整合との戦いであるが、薄膜成長技術の向上で範囲が広がってきているので、これまでのデバイスの限界を突破することが期待される。

電子デバイス

これまでの電子デバイスは、より高速化をねらったテクノロジー開発が中心である。そのために、ゲート長を短くしたFET、HEMT⁽³⁾の開発、



(a) 8チャンネル波長選択レーザ



(b) 8チャンネル波長選択レーザの発振スペクトル特性

図-3 波長選択レーザ

Fig.3-Array laser diodes for wavelength selection.

ベース層薄膜化と高濃度化したヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)⁽⁴⁾の開発などお互いに競争してきている。これらのテクノロジーの現状を図-4に示す。縦軸はベース・エミッタ間の破壊電圧を示している。FET系ではゲート破壊電圧を示す。高周波化には電圧を上げることが一つの方法であるが、この破壊電圧が壁になっている。また、各デバイスともにそろそろ加工限界となっており、この壁を破るには新しい材料の開発が必要となる。HBTでSiGeをベース領域に採用するののも一つの大きな改善である。

現状では、高速化ではHEMTに歩がありそうである。システムの要求は今や40 Gbps更には80～160 Gbpsと言われている。WDMシステムと超高速システムは競合し共存しないと思われていたが、最近の動向ではWDMシステムでも超高速が進められているので、高速化へのチャレンジは当面続きそうである。

高速システムを考えるときには、信号の増幅・タイミング・整形からなる再生回路の実現が重要となり、こうした回路技術がポイントとなる。例えば40 Gbpsシステムでは、40 Gbpsの主信号を直接処理する方式と一度20 Gbpsに分割してから処理する方式が考えられている。こうするこ

とで信号処理部分のスピードを落とすことができ、その分デバイスへの負担を軽くすることができる。このような方式での長短の議論は別として、回路技術での解決方法が重要になるという一例である。

半導体デバイスから見ると、今後はある回路への適用にどのテクノロジーが最適かを示すことが重要になってくる。こうしたテクノロジー選択シミュレータが実現すると、回路設計がよりたやすくなる。とくに、今後は高速特性だけがデバイスの選択基準になるのではなく、プロセス・集積度・信頼性・完成時期などがこれまで以上に重要な判断基準になってくる。高性能だけがデバイスの選択基準にならない。例えば、図-5にHEMTとSiGe-HBT高周波特性の解析結果に示すように、ゲート長を短くすれば f_T は高くなるが、加工限界がそろそろ見えてきているし、HBTの方もベース濃度にドーピング限界が見えてきている。この計算結果は、高速化にはHEMTが適していることを示している。しかし、FET系の V_{th} ばらつき、低周波雑音の課題があり、高集積設計には工夫が必要になる。HBTでは、高電流動作となるために、信頼度や高集積化の課題があり、高速化に限界が出てくる。この事例からも、テクノロジー選択シミュレー

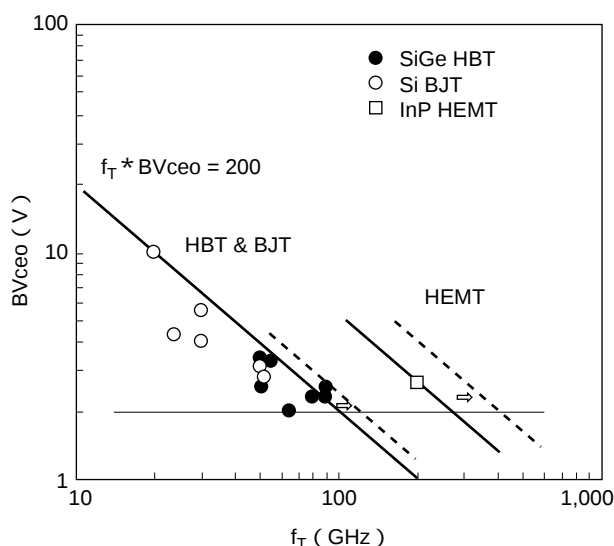


図-4 高速トランジスタの現状

Fig.4-Current characteristics of high frequency transistors.

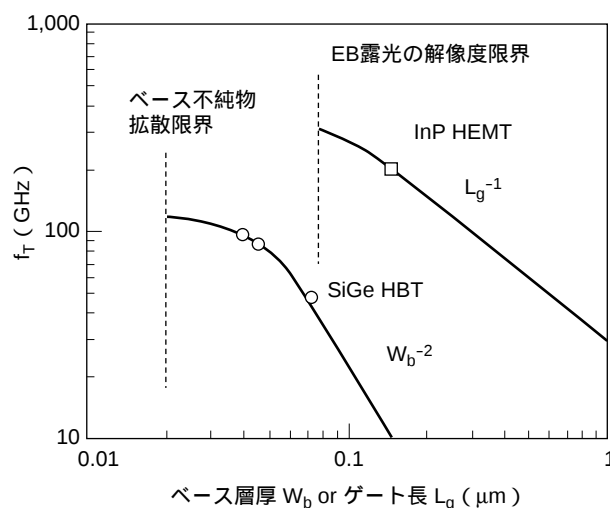


図-5 高速トランジスタの高周波限界

Fig.5-Calculated results for limitation on high frequency operation.

タの実現は重要となろう。

高速化は重要な課題であるが、一方低コスト化も重要になる。この場合、気をつけなければならないのは基板である。最近、GaAs基板は大口径化し、6インチ製造ラインも構築されてきているのに対し、InPは、もろいために大口径化が難しく、現状は3インチである。通信用デバイスも、最初に述べたように、コンシューマデバイスとして位置付けられるようになると、基板の口径が低コスト化の一つの大きな要因となる。GaAs基板上にInP系材料を成長させる技術も開発されているが、現状は今一歩であり、今後の開発動向が注目される。

お わ り に

光通信用デバイスの将来動向ということで述べてきたが、今後は、インターネットを起爆剤とする通信革命が起きそうなことから、それを契機にデバイスも大きな変革を迫られるだろう。

これまで、光デバイスと電子デバイスの集積化

は何回チャレンジしても成功しなかったが、この機を捕らえることがラストチャンスとなる可能性がある。モノリシック集積でなく、ハイブリッド集積を採り入れて、より簡単にたやすく機能を実現することが重要となろう。

デバイス特性のブレークスルーには新材料技術の開発も重要である。有機金属気相成長法の開発は材料技術の発展に今後も大きく寄与してくるものと思われる。

参 考 文 献

- (1) Special Issue on Photonic Networks : *FUJITSU Sci. Tech. J.*, 35, 1, pp.1-138(1999)
- (2) 今井：波長多重システム用をめざした光通信用レーザー．*レーザー研究*, 26, 8, pp.589-592(1998)．
- (3) D. Xu et al. : An 0.03- μm gate-length enhancement-mode InAlAs/InGaAs/InP MODFET's with 300 GHz f_T and 2 S/mm extrinsic transconductance. *IEEE Electron Device Lett.*, 20, pp.206-208(1999)
- (4) G. Freeman et al. : IEDM99, pp.569-572.