

波長多重光通信用半導体レーザー

山口 昌 幸

インターネットやマルチメディア情報端末が普及する21世紀の情報化社会では、高速画像伝送の需要がますます高まることから、Tb/sクラスの超大容量伝送が必要とされる。波長多重(WDM)光通信はこうした超大容量伝送を可能にする唯一の通信手段である。WDMを使った大容量化の動きは北米を中心にすでに始まっている。ノーマル光ファイバーが敷設された北米などでは、現在の2.5 Gb/sの基幹系のさらなる大容量化を図るために、WDMの導入が不可欠だからである。WDMシステムの最大の技術的課題は、各チャンネルの波長をいかに制御し、管理するかである。その意味で波長を決定する光源の開発動向は今後のWDMの行方を大きく左右する。本稿では今後のWDMの展開の過程を「導入期」、「発展期」、「成熟期」に分けて(図1)、それぞれの局面で必要とされる光源の技術的現状と課題、展望等について述べる。

1. 導 入 期

32~40チャンネルのpoint-to-pointのWDM伝送が実用化される時期である。WDMの実用化は、特に北米などで急がれており、「すぐに使えるデバイス」を使用して現実的なシステムを構築していくことになる。すなわち、光源であれば実績のある単体の分布帰還型半導体レーザー(DFB LD)あるいはDFB LDと変調器を集積化した光源が使われるであろう。この場合、チャンネルの数だけ異なる波長の素子を選別する必要がある。各素子の発振波長は所望の波長の ± 1 nm以内に入ってい

ばよいであろう。なぜなら個々のLDに対して温度調整を行うことで ± 1 nm程度の波長ずれは容易に修正できるからである。単体LDを用いることによる利点がある。それは拡張性である。1チャンネルあたり2.5 Gb/sの伝送が可能な現在、基幹系といえども一気に数十チャンネルの多重化が必要なほどの情報トラフィックの需要はまだない。したがって、需要に応じて、後からチャンネル数を増やしていく方式が現実的である。導入期にはむしろ初期投資を最小限に抑え、かつその後の拡張性が保証された方式がシステムユーザーにとっては都合がよい。

この時期のWDM光源の課題は低価格化である。DFB LDの発振波長は素子内部に形成されている回折格子の周期で決定される。従来DFB LDの回折格子はレーザー光を利用した2光束干渉露光法により形成されていた。この方法ではウェハー面内に同一周期の回折格子が形成されるため、1枚のウェハーからほぼ同じ波長のDFB LDが得られる。したがって、WDM用に波長の異なる光源を用意する場合、基本的にはチャンネル数に等しい数のウェハーが必要になる。たとえある波長のLDが1個必要な場合でも、その波長に対応するウェハー1枚が必要になってしまう。1ウェハーから何百というLDチップが得られることを考えるときわめて非経済的であり、これでは単体のWDM光源は従来LDに比べて必ずコスト高になってしまう。そこで低コスト化を図るために、必要なすべての波長のLDを1ウェハー上に一括して作製する技術が開発された。

1.1 異波長LDの一括作製技術

図2に任意かつ異なる波長のLDをウェハー上に一括作製する技術を紹介する^{1,2)}。干渉露光法に代わる回折格子の形成方法に電子ビーム(EB)露光による直接描

NEC光エレクトロニクス研究所(〒305 つくば市御幸が丘34)

E-mail: yamaguch@optd.cl.nec.co.jp

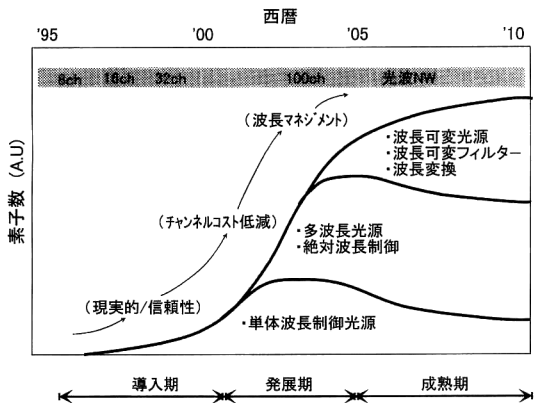


図1 WDM 光通信システムの展開と必要とされる半導体光デバイス。

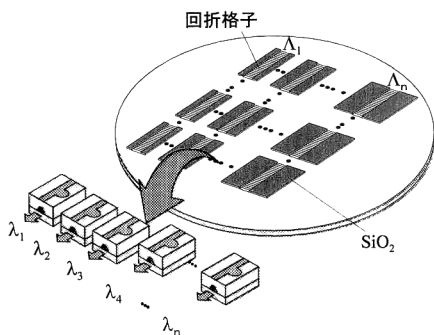


図2 異波長 DFB LD のウェハー面内一括作製技術。

画がある。EB 露光技術を用いれば回折格子の周期をウェハー面内で変えることが可能である。しかし、従来の EB 露光装置では解決できない問題があった。一般に EB 露光装置では電子ビームの位置制御は最小単位 2.5 nm の精度で行われるため、回折格子の周期は 2.5 nm の整数倍に限定されてしまう (例えば周期 200 nm の次は 202.5 nm, 205 nm というように)。DFB LD の発振波長 (λ) と回折格子周期 (Λ) との間には $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ (n_{eff} は等価屈折率で約 3.2) の関係があることから、従来の EB 露光では発振波長を約 15 nm の間隔で離散的にしか制御できなかった。この問題を解決したのが、電子ビームの描画フィールドサイズを変調する新しい技術である。図3にフィールドサイズ変調法の原理を示す。新しい EB 露光技術では、ウェハー面内で固定されている描画フィールドサイズを所望の回折格子周期に応じて変える方法である。EB 装置の偏向板に加える電圧をコンピューター制御で調整することで、フィールドサ

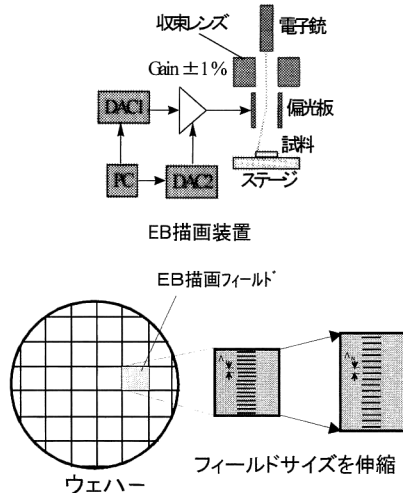


図3 フィールドサイズ変調 EB 露光による回折格子周期の任意制御技術。

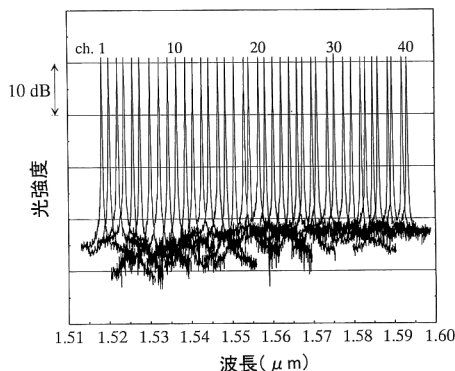


図4 一括作製された 40 チャンネル、異波長 DFB LD の発振スペクトル。

イズを 0.05% の単位で伸縮させる。このとき、回折格子のパターンも同じ比率で伸縮するため、その周期は 0.0012 nm の精度で制御できる。これにより、ほぼ任意周期の回折格子が形成可能となった。図4はフィールドサイズ変調 EB 露光法により作製した回折格子を用いて、約 2 nm 間隔に並ぶ 40 チャンネルの異波長 DFB LD を同一ウェハー上に一括作製したときの発振スペクトルである。現状のエルビウム・ドープ光ファイバー増幅器 (EDFA) の利得帯域よりも十分に広い 1519~1594 nm の波長範囲を 1 ウェハーでカバーできた。選択 MOVPE (有機金属気相成長) 技術を用いて、ウェハー面内で各チャンネルの活性層の利得波長をそれぞれの発振波長にチューニングする技術を併用したため、発振閾電

流がすべてのチャンネルで 10 mA と均一なレーザー発振特性を実現した²⁾。この技術は、将来 EDFA の利得帯域が長波長側に拡大し^{3,4)}、100 nm またはそれ以上の広帯域な WDM システムが現実になった場合においても、1 ウェハですべてのチャンネルの光源を賄うことができる有望な技術である。

1.2 波長の信頼性

WDM システムの光源には長期にわたって安定な発振波長が保証されることが重要である。DFB LD の波長の信頼性をこれまでに行った関連試験の結果から大まかに予測してみる。図 5 は、以前コヒーレント通信用に開発した DFB LD に対して強制加速劣化試験を行ったときの、駆動電流の増加率に対する発振波長の変化量をプロットした図である⁵⁾。発振波長は定電流駆動の条件下では劣化の大小に関係なく、測定誤差範囲内で変化はない。一方、定光出力駆動の場合は、駆動電流の増加率に比例して波長は変化した。その変化量は素子の熱抵抗と駆動電流の増加量から見積もられる素子の温度上昇による波長変化量の予測値とほぼ一致する。すなわち、DFB LD の発振波長の経時変化は、駆動電流が増加したことによる温度上昇が主要因であることが判明した。さて、発振波長変化の主要因が判明したことにより DFB LD の発振波長の信頼性を予測することが可能になる。WDM システムではチャンネル間隔の 1/10 以下の波長設定精度が要求される。したがってチャンネル間隔 100 GHz (0.8 nm) の高密度 WDM システムでは、光源の波長変化の許容範囲は ± 10 GHz 以下となる。これを許容される駆動電流の増加量に焼き直すと 8 mA となる (通常の DFB LD の熱抵抗値: $70^{\circ}\text{C}/\text{W}$ と発振波長の温度係数: $0.1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ を仮定)。8 mA という駆動電流の許容増加量は小さな値だが、決して悲観的な値ではない。WDM 用の光源は波長安定化を図るために、室温

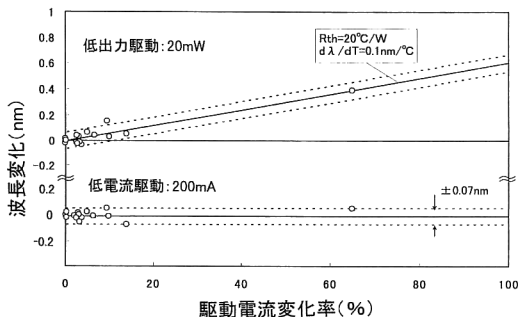


図 5 DFB LD の発振波長変化の駆動電流増加率依存性 (定出力動作/定電流動作の比較)。

付近で温度を固定して使う。この場合 DFB LD の動作電流 (光出力 5 mW のとき) はせいぜい 40 mA 程度である。これに対して約 20% の動作電流の増加が許されるわけである。この動作条件であれば DFB LD の寿命は 10 万時間を超える。つまり、10 万時間以上にわたって波長変化量が ± 10 GHz 以下の安定動作が可能と予測される。

2. 発 展 期

導入期の WDM では、多チャンネルの WDM 信号が 1 本のファイバーを共有することで、チャンネルの数によるスケールメリットを狙ったものである。したがって、光源のコストは従来の LD 並の値を維持すればよかった。発展期になると、伝送コストのいっそうの低減を図るために、伝送装置の 1 チャンネル当たりのコストを低減することが重要となる。そのため 1 チップで多波長の光を同時に発振できる光源や、波長の温度依存性が小さくそのため波長のモニター機能や制御回路を必要としない光源の開発が望まれる。

2.1 多波長光源

多波長光源の最も簡単な構成は、異なる波長の LD を 1 チップ上に配列したアレイ化光源である。アレイ化光源では単体 LD の場合とは異なり、温度調整で各 LD の波長を独立に制御することは不可能である。そのため、各 LD が等間隔の波長で発振することが大切である。図 6 は波長間隔が 0.2 nm となるように設計された 8 チャンネルの DFB LD アレイの波長分布の報告例である⁶⁾。DFB LD の発振波長は回折格子の周期のほかに、端面位相や活性層断面形状等の影響を受けるために、アレイ化光源の波長は必ずしも線形に並ばない。それでも結晶成長技術の進展等によりウェハ一面内の均一性が向上したため、波長間隔の分布を WDM の波長グリッド間隔の 10% (10 GHz または 0.08 nm) 以下に抑制することがある程度可能になってきた。アレイ化光源は単体の光

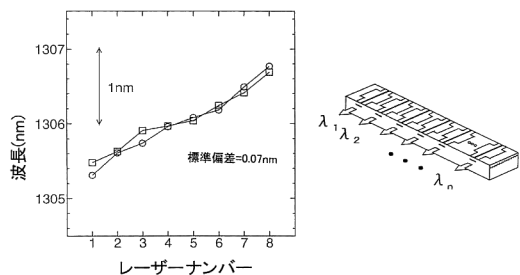


図 6 異波長 DFB LD アレイの発振波長分布⁶⁾。

源に比べ素子の実装コストを大幅に低減できる。反面、すべてのチャンネルが単一スペクトルで発振し、かつ波長間隔が許容範囲内で均等であることなどの条件が付くため、単体 LD に比べ歩留まりは低下する。さらにチップサイズが大きくなることから 1 ウェハからの収率も低くなる。結局は装置化したときに単体 LD を使用した場合より低コストにならなければメリットはない。要はアレイ化光源の歩留まりをどこまで高められるかである。

アレイ化光源の歩留まりを高める工夫として、1つのチャンネルに対して 2つの LD を用意して、どちらか一方の LD に不具合が発生しても他方の LD でカバーできるように、波長に冗長性をもたせたアレイ化光源なども検討されている⁷⁾。

こうしたアレイ化光源の問題点を克服するために、波長が等間隔に並ぶ多波長光源 (図 7) が提案された⁸⁾。モード同期 LD とアレイ導波路格子 (AWG) を組み合わせた構成からなる。モード同期 LD は WDM のチャ

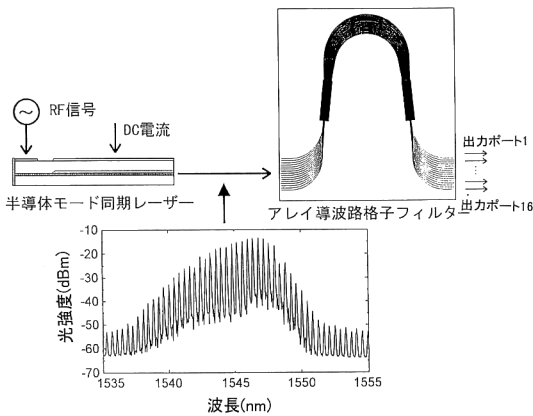


図 7 モード同期 LD とアレイ導波路格子フィルターを組み合わせた波長等間隔光源⁸⁾。

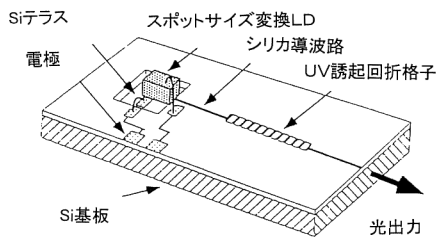


図 8 スポットサイズ変換 LD と回折格子付き石英導波路を組み合わせた波長温度係数の小さな光源⁹⁾。

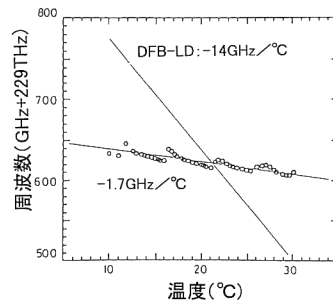
ネル間隔に等しい周波数 (例えば 100 GHz) またはその公約数の周波数で同期発振させる。すると LD の発振スペクトルの縦モードは同期周波数に等しい周波数間隔で並ぶ。それぞれの縦モードを、帯域通過フィルターである AWG により切り出すことにより、波長間隔の等しいコヒーレントな光を得ることができる。この光源はチャンネル間隔周波数をきわめて高い精度で、かつ均等に設定できる。課題は、モード同期 LD の長期安定動作の保証と、各チャンネルから均一な光出力を得ることであろう。

2.2 絶対波長光源

発振波長に経時変化や温度依存性のない絶対波長光源があれば、波長安定化のための波長モニターやフィードバック回路などの余分な制御系が不要になる。さらに長期的に高い波長の信頼性が確保できる。絶対波長光源に近い光源として、図 8 に示したような光源が報告されている⁹⁾。Si 基板上に作製した石英光導波路とスポットサイズ変換 LD をハイブリッド集積した構成からなる。石英導波路に UV 誘起法により回折格子を形成したことで、集積光源は回折格子のブラッグ波長で単一スペクトルで発振する。石英系導波路の屈折率の温度係数は半導体の約 1/10 と小さいため、発振波長の温度係数は通常の LD が $-14 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ であるのに対し、 $-1.7 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ と小さい。また、回折格子が DFB LD とは異なりパッシブな導波路に形成されているため、発振波長を変動させる要因も少なく、経時的な変化も小さいと予想される。

3. 成熟期

この時期になると point-to-point の伝送はいつその多チャンネル化が進み、伝送容量は Tb/s のオーダーに達する。そうなる光のレイヤーでの高速信号処理を可能にする WDM をベースにした各種のネットワークが実



用化の時期を迎える。光源のキーデバイスは波長可変LDであろう。波長選別が不要な光源として、また光波ネットワークの要素技術である光クロスコネクトや光ADM、光ATMに不可欠な機能デバイスとしてその役割は大きい。波長可変LDはこれまでも研究されてきたが、実用的なものはない。波長可変範囲、波長制御の容易性、軸モードや光出力の安定性などのいずれかに問題のある素子がほとんどであった。真に使える波長可変光源の実現には、新たな発想の導入が必要であろう。最近報告されたマイクロマシンを使った波長可変光源¹⁰⁾などは新しい発想である。波長可変光源の開発はまさにこれからである。

WDMの今後の展開のシナリオを「導入期」、「発展期」、「成熟期」に分け、そのシナリオに沿ってWDM光源の展望について述べてきた。「発展期」までは、光デバイスの具体的な姿と課題をある程度見通すことができるが、「成熟期」の光波ネットワーク用光源に関しては予測が難しい。そうはいっても光波ネットワークを必要とする21世紀は確実に近づいている。光デバイスの実用化までの研究開発期間が平均5年程度であることを考えると、光波ネットワークの時代に備えて、魅力的な光デバイスを実現するための技術的ブレークスルーがここ数年の間に必要である。

文 献

- 1) 山崎裕幸, ほか: “回折格子の精密制御EB描画によるWDM用異波長DFB-LDの一括形成”, '96電子情報通信学会秋期大会 C-313.
- 2) 工藤耕治, ほか: “ウェハ内一括形成されたデチューニング制御広波長域 (>70 nm) 異波長DFB-LD”, '97電子情報通信学会春大会 C-4-64.
- 3) A. Mori, *et al.*: “1.5 μm broadband amplification by tellurite-based EDFAs,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97*, Technical Digest PDI-1.
- 4) Y. Tashiro, *et al.*: “High-power erbium-doped fiber amplifier pumped by wavelength multiplexed semiconductor laser diode unit,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97*, Technical Digest WA5.
- 5) 山口昌幸, ほか: “WDM用波長制御DFB LD”, '97電子情報通信学会春大会 SC-4-1.
- 6) 室谷義治, ほか: “DFBレーザアレイの発振波長精密制御”, '96電子情報通信学会春大会 C-377.
- 7) C. E. Zah, *et al.*: “Wavelength accuracy and output power of multiwavelength DFB laser arrays with integrated star couplers and optical amplifier,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 8 (1996) 864.
- 8) 三条広明, ほか: “半導体モード同期レーザとアレイ導波路格子フィルタを用いた等周波数間隔多波長光源”, '96電子情報通信学会春大会 C-194.
- 9) T. Tanaka, *et al.*: “Integrated external cavity laser composed of spot-size converted LD and UV written grating in silica waveguide,” *Electron. Lett.*, 32 (1996) 1202.
- 10) Y. Uenishi, *et al.*: “Tunable laser diode using a nickel micromachined external mirror,” *Electron. Lett.*, 32 (1996) 1207.

(1997年4月10日受理)