

# 半導体レーザーの直接変調技術の開発

Development of Direct Driving Technology for Laser Diodes

澤住 庸生\*  
Sawazumi, Tsuneo

木村 祐介\*\*  
Kimura, Yusuke

大石 篤\*  
Ohishi, Atsushi

High speed and high accuracy direct driving technology for laser diodes is developed. We have achieved both fast settling time of 70nsec or higher and light power stability of 0.5% p-p, at most power range including under threshold. This performance is completed on two type of light monitoring, front-light sampling and rear light monitoring by built-in photo diode. This technology is useful especially for high resolution image printing which requires wide dynamic range up to 10 bits and high speed modulation.

## 1 はじめに

半導体レーザーは、プリンター・光記録・光通信など民生用・産業用を問わず、さまざまな応用分野のキーパーツとして伸長している。また、半導体レーザーを安定かつ高速に制御・駆動する技術も併せて重要技術となっている。高品位のプリンターにおいては、装置のダウンサイジング・スループットの向上・ローコスト化・長寿命化の要求に伴い、光源に半導体レーザーを用い、直接変調するシステムが主流になっている。特に、銀塩感材に代表される記録媒体が濃度階調を直接表現するプリンターシステムの場合、光源用半導体レーザーには、

- ・ 閾値以下の光量から定格光量に至る広いダイナミックレンジでの光量安定化制御
- ・ 高速書込みに対応できる高速変調制御

が必要となる。

一方で半導体レーザーは、その駆動電流と発光光量の特性が、閾値をはさんで急峻かつ非線形に変化するため、広いダイナミックレンジで高速・安定制御することが非常に困難である。今回我々は、このような特性を持つ半導体レーザーを、広いダイナミックレンジで変調でき、高い光量安定性と高速応答性を両立させる技術を開発したので、その内容を報告する。

## 2 半導体レーザーの特性と制御上の課題

### 2.1 半導体レーザーの I-P 特性

横軸に半導体レーザーの順電流 (I)、縦軸に発光量 (P) をプロットした一般的な半導体レーザーの I-P 特性を Fig.1 に示す。図示の  $I_{th}$  で示した閾値電流付近を境に、LED 発光領域 (自然発光領域) と LD 発光領域 (誘導放出発光領域) で光出力特性が極端に変わる。

Fig.2 では、順電流に対する光出力の変化率、すなわち半導体レーザーの微分量子効率 (順電流 - 光出力変換効

率) を示したグラフで、半導体レーザー自体のゲイン特性を著している。LD 領域では、ほぼ一定のゲインが得られるが、LED 発光領域では、非線形にゲインが低下し、LD 発光領域に比べその差は 50dB 程度もしくはそれ以上に達する。さらに、この I-P 特性は、温度係数を持ち一般的には温度により順電流が指数関数的に上昇する。すなわち、I-P 特性の閾値電流  $I_{th}$  が温度上昇に伴い、高い方向にシフトする。

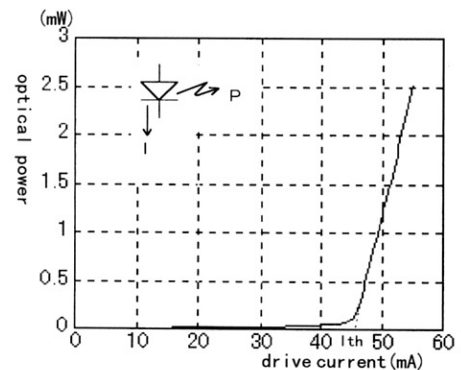


Fig.1 Laser diode I-P curve.

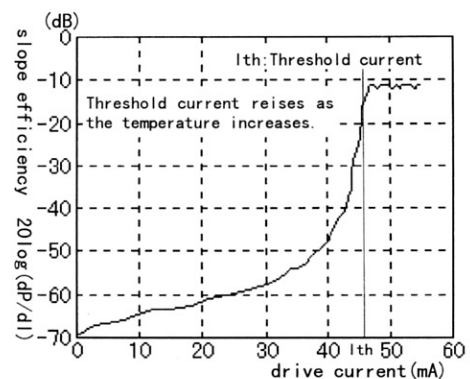


Fig.2 Laser diode slope efficiency (dp/di) curve

\* 感材技術センター  
\*\* 画像システム機器事業部 GI 機器開発グループ

## 2.2 半導体レーザーの制御回路の構成

一般的に半導体レーザーの発光量を安定化させるために用いられる制御方法としては、発光量を負帰還し、光量指令信号との差を比較して制御するフィードバック制御系が良く知られている。Fig.3に光量フィードバック系の制御ブロックを図に示す。フィードバック系に単純なPID補償を組み込んだ光量安定化回路においては、半導体レーザーをDC点灯させる上では、優れた光量安定性を得ることができる。

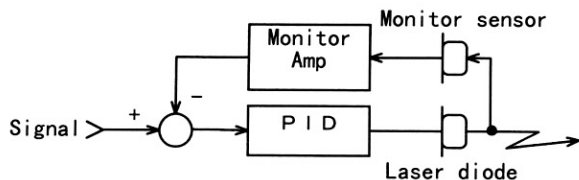


Fig.3 Block diagram of light output feed back control

また、回路に高速な電気部品を使用し、回路定数を適当に調整することにより、LD発光領域に限定して使用すれば、高速光変調も実現できる。このように構成した制御回路により、半導体レーザーをLD発光領域でパルス変調した時の応答波形をFig.4に示す。ところが、この回路を用いて、閾値をわずかに下回るLED発光領域では、極端に応答性が低下してしまう。(Fig.5)

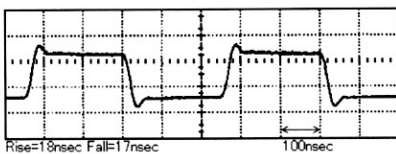


Fig.4 Pulse response at LD region

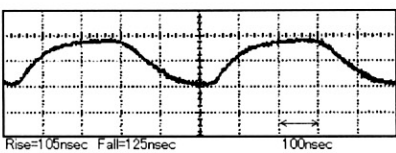


Fig.5 Pulse response at LED region

この応答劣化の原因は、フィードバックループ内に、制御要素として含まれる半導体レーザー自体のゲインが、前節2.1に示すように、LED発光領域で極端に低下してしまい、制御系の開ループゲインもこれに伴い低下するためである。LD発光領域のみを使用するアプリケーションでは、比較的容易に光量安定性と高速応答が実現できるが、これでは、光出力のダイナミックレンジとして、たかだか2桁程度しか得ることができない。

そこで従来、半導体レーザーの応答性を向上させる方法として、以下の例に代表される試みが実施されている。

### (1) サンプリングAPC方式<sup>1)</sup>

例えば本方式を、レーザープリンターに利用する場合、

画像書き込みをしていない区間で半導体レーザーをダミー発光させ、所望の光量を発生する駆動電流のデータにホールドする。画像書き込み中は、ホールドしたデータを基に、オープンループで電流駆動を行うため高速変調が可能となる。しかし、オープンループ駆動の期間は、半導体レーザーの発熱による光出力の減少、いわゆるドループ特性などの影響を直接受け、高い光量設定精度の要求されるアプリケーションには適さない。

### (2) オープンループLED領域特性補償方式

光量フィードバック制御系の光量安定化回路において、LED発光領域に相当する入力信号に対して、応答性を補償した信号を作成し、オープンループで加える方式である。この方式も、オープンループでの補償のため、半導体レーザーのI-P特性の温度係数の影響などを受ける。通常は、半導体レーザーの恒温化制御と組み合わせて使用される。

## 2.3 半導体レーザーの制御上の課題

半導体レーザーをLD発光領域のみに限定して使用すれば、その光量安定性・応答性共に、高いパフォーマンスを得ることが可能である。しかしながら、閾値以下のLED発光領域の発光量も利用し、広い光量ダイナミックレンジで使用するアプリケーションでは、その制御が格段に困難になる。すなわち、広い光量ダイナミックレンジでリアルタイムに光量を安定化させる制御と応答性を確保する制御を両立することが、半導体レーザーの直接変調技術の上で大きな課題の1つとなる。

## 3 半導体レーザーのフルレンジ直接変調技術の開発

### 3.1 考案した技術の基本構成<sup>2)</sup>

前章に述べたように、半導体レーザーの光量安定性と応答性を両立させる制御方法は、いくつかの試みがなされている。しかしながら、我々は下記の要件を併せてクリアすることを条件に、基本構成を模索してみた。

\*ノイズ耐性の高いこと。

制御回路内外から発生・混入するノイズに対して抑制できること。例えば、半導体レーザーのモードホッピングにより生じる光量変動ノイズも抑制可能にする。

\*半導体レーザーの温度特性の影響を受けないこと。

環境温度変化のような長時間の温度特性ドリフトの影響と共に、ドループ特性のような短時間の温度特性に対する性能変動も抑制する。さらに、恒温化制御のような、特殊な機能を付加することなく実現する。

そこで、リアルタイムフィードバックを基本構成とし、フルレンジでのパルス応答特性を確保するために、LED発光領域での半導体レーザーのゲイン変動を補償する制御要素を、フィードバックループ内に設ける方式を考案した。開発した制御回路のブロック図をFig.6に示す。

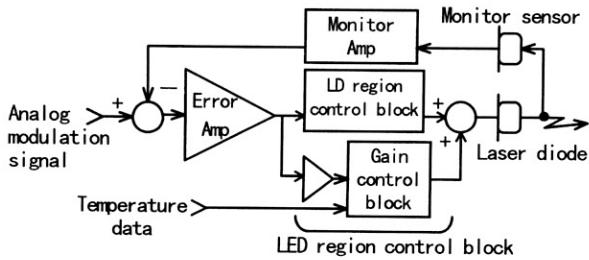


Fig.6 Laser diodes control block diagram of our method

図示のLD系制御部は、通常のPIDの補償要素で構成し、半導体レーザのLD発光領域での応答性能が、適正になるような開ループゲイン（一定ゲイン）に調整してある。

一方、図示のLED系制御部は、半導体レーザがLED発光領域で、それ自体のゲインが低下してしまう分を充足する増巾部と、増巾部から出力される信号レベルに従いゲインを減少させるゲインコントロール部（一種の電子アッテネーター）で構成している。ゲインコントロール部は、半導体レーザの非線形なゲイン変化に合致するように構成している。

Fig.7を用いて本構成の動作を説明する。2章で述べたように、半導体レーザのゲイン特性は、図示の非線形なカーブを描く。LED系制御部は、その増巾部で、LED発光領域で不足するゲインを充足する増巾度を与える。そして、半導体レーザは、発光量に応じて、それ自体のゲインは非線形に増加するが、ゲインコントロール部で制御系のゲインを減衰させ、LD発光領域では、略0にする。このように、制御系ゲイン（LD系・LED系制御部を合わせたゲイン特性）を、半導体レーザのゲイン特性の逆特性に合致させることにより、半導体レーザを含めた制御系全体のループゲインを、全光量域でフラットにできる。制御系全体のループゲインが、全光量域でフラットになるため、閾値以下の動作でも、高い応答性が確保できる。半導体レーザの非線形なゲインカーブに、いかに制御回路の特性を合わせるかがポイントとなるが、今回、ダイオード・トランジスタの非線形領域を組み合わせて構成することにより、実現することができた。

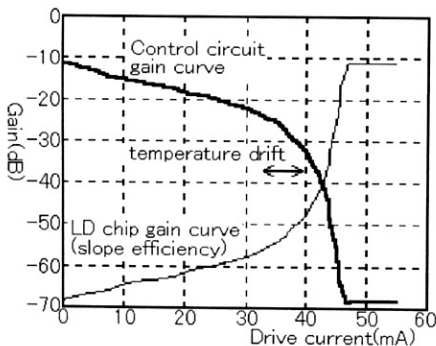


Fig.7 Gain curve of LD chip and control circuit

さらに、半導体レーザの温度係数によるゲインカーブのドリフトに対しては、温度を測定し、ゲインコントロール部の特性をリアルタイムに平行移動する補償を付加することにより解決することができた。

リアルタイムフィードバックで制御するため、外乱に対する抑制効果と高い光量安定性を、リアルタイム・フル光量レンジで得られ、しかも高速の応答性についてもフル光量レンジで確保することに成功した。

### 3.2 フロントAPCへの適用結果

本節では、考案した制御回路を半導体レーザのフロント出射光の一部をサンプリング・負帰還し、APC（Auto Power Control）制御した結果について報告する。

構成のブロック図をFig.8に示す。フロント光の一部をサンプリングミラーで分離し、PINフォトダイオードで受光している。サンプリングミラーは、レーザ光の偏光方向と光軸方向に対し、各45度程度ずつ傾けて配置してある。半導体レーザではLED発光領域とLD発光領域で、偏光状態も変化する。サンプリングミラーを傾斜し配置することにより、出射光の偏光に依存することなく、正確な光量のサンプリングを実現している。

また、図示のサーミスターは温度補償用のセンサーとして、半導体レーザの直近に設置してある。

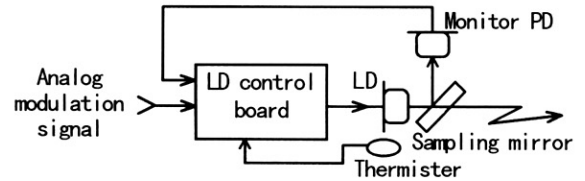


Fig.8 Block diagram of Front APC

本構成で、LD発光領域については、Fig.4同等の応答性能が得られ、LED発光領域でも、良好な応答性能が得られた。約28℃の環境下において、LED発光領域でパルス変調駆動した際の、応答波形をFig.9に示す。

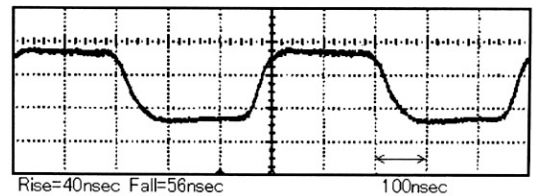


Fig.9 Block diagram of Front APC

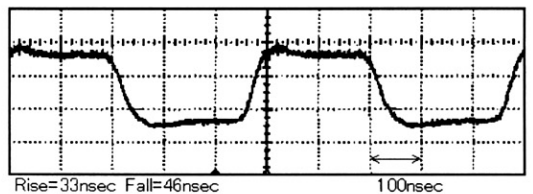


Fig.10 Block diagram of Front APC

また、約 18℃の環境下において、LED 発光領域でパルス変調駆動した際の、応答波形を Fig.10 に示す。温度補償の付加により、半導体レーザの特性が変化しても、良好な応答性を得ることができた。

本構成により連続発光した際の、発光量のドリフト性能の結果を Fig.11 に示す。約 0.5%p-p 程度の高い光量安定性が得られた。

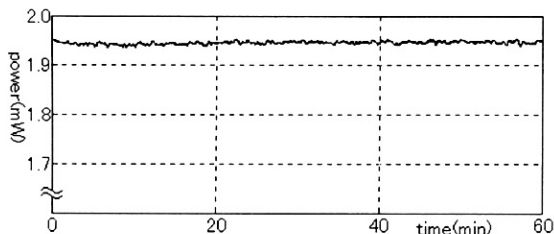


Fig.11 Evaluation result of light power stability

本構成の制御回路は、各種波長の半導体レーザに対する適応性も確認しており、感光材料の露光特性を評価する装置<sup>3)</sup>に適用している。

### 3.3 内蔵フォトダイオードによる APC への適用結果

現在、製品として出荷されている半導体レーザは、レーザチップの後方端面から出射されるレーザ光を受光するモニター用フォトダイオードが内蔵されているものが多く出回っている。内蔵フォトダイオードを利用することにより、フロント APC に比べ、部品点数削減・小型化・調整工数減少などのメリットが得られる。しかしながら、内蔵フォトダイオードを使用する際は、いくつか留意すべき点がある。代表的なポイントを以下に挙げる。

- \* 高速応答タイプのフォトダイオードが内蔵されていること。
- \* 内蔵フォトダイオードから出力される光電流が、比較的大きいこと。
- \* フロント光と内蔵フォトダイオードの出力のリニアリティが良いこと。

以下に適用結果を報告する。Fig.8 の負帰還用のフォトダイオードを、内蔵フォトダイオードに置き換えた構成となる。回路定数を適当に調整して制御を試みた。すると、パルス変調波形の立上りや立下りのエッジ部に、フロント APC では見られない波形歪みが生じた。

解析の結果、内蔵フォトダイオードに寄生する容量成分を通して、半導体レーザの駆動電流が、負帰還ループにノイズとして混入することが原因であることが解った。Fig.12 にパルス変調時の、フロント出射光と内蔵 PD の波形を示す。

市販の半導体レーザは、内蔵フォトダイオードとレーザチップの電極端子の 1 つが共通にされている製品が多い。レーザのアノードとフォトダイオードのカソード端子が共通となっている製品 (Fig.13) を、今回使用した。

フォトダイオードの接合容量や浮遊容量といった成分が、図示の Cs 部に等価的に入るため、半導体レーザの駆動電流 Isw により、Cs を通過する帯域のノイズ電流 In が、光電流 Ipd に重量して負帰還ループに混入する。

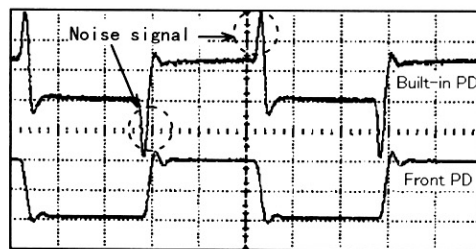


Fig.12 Comparison between Built-in-PD and Front-PD signal at pulse modulation

対策として、演算増巾器を負帰還アンプに使用し、光電流出力に混入したノイズ電流成分をキャンセルする構成を付加した。その概略構成図を Fig.14 に示す。

本構成の追加により、内蔵フォトダイオードでもフロント APC と同等の応答性能を達成できた。

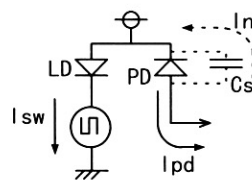


Fig.13 Occurrence of PD current noise

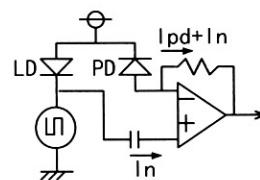


Fig.14 Scheme of PD noise compensation circuit

## 4 むすび

簡易な回路構成でフル光量レンジで高速・高安定な変調が可能で、半導体レーザの直接変調技術を開発した。試作した制御回路を Fig.15 に示す。多階調の画像システムの基本技術として広範に応用していけるものと考えられる。さらに、アクティブ光計測用の光源部への活用など、他の技術分野への展開も可能な技術であると考えられる。

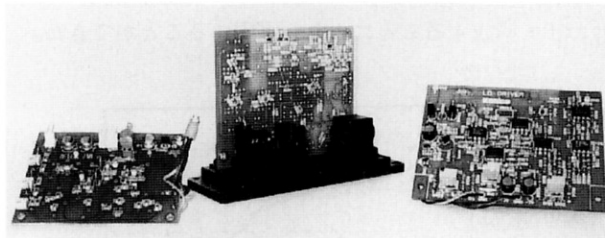


Fig.15 Left : Built-in PD APC board Center : Front APC LD unit Right : Front APC board

### ●参考文献

- 1) 一例として 三菱電機(株)、M66515FP データシート、“三菱半導体 DataBook1997 デジタル ASSP 編”、4-p311(1997)
- 2) 特開平 10-200179
- 3) 大石篤 他、Konica Technical Report、Vol. 10, 9 (1997)