

半導体光デバイス

1. まえがき

光は生命体にとって不可欠であり、ほとんどの生物が光に何らかの反応を示し、また、光を使っている。人間にとって光は通常可視光を指すが、光は電磁波の一種であり、携帯電話に使われている電波と本質的な違いはない。半導体電子デバイスは、電子の流れを制御することで様々な機能を実現しているが、同時に電磁波を発生している。この電磁波を積極的に応用して、通信やテレビ放送が可能になっている。半導体デバイスから発生される電磁波の周波数が高くなると、光の領域に達する。

本資料では、半導体素子の発光と受光の原理、発光ダイオードや半導体レーザ、フォトダイオードの基本構造や特性を理解する。

2. 半導体における発光と受光の原理

物体の光反応には、主に3つの過程がある。図1は、物体中の電子と光子の相互作用を模式的に示している。(a)は吸収過程であり、電子が光子を吸収することでエネルギー準位の高い状態に遷移する。このとき、最初のエネルギー準位を E_1 、励起されたエネルギー準位を E_2 とすれば、

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

という関係が成り立つ。ここで、 h はプランク定数、 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ [J s]、 ν は光子の周波数である。光子の波長は、

$$\lambda = hc / (E_2 - E_1) = 1.24 / ((E_2 - E_1) [\text{eV}]) \quad [\mu\text{m}]$$

で与えられる。

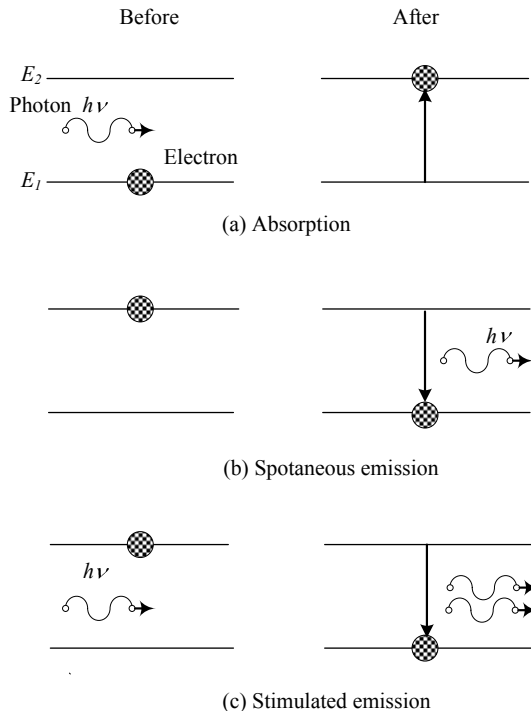


図1. 基本的な3つの光過程.

(b)は自然放出過程であり、高い準位にある電子が光子を放出して低い準位に遷移する。(c)は誘導放出過程であり、外部から光子が入射するとそれがトリガとなって光子の放出が起きる現象である。自然放出と異なり、放出される光子の周波数は入射した光子と同じであり、入射した光子数に比例して光子が放出されるので光増幅の作用がある。

半導体では、エネルギー準位の低い状態が価電子帯、高い状態が伝導帯である。p型の半導体とn型の半導体からなるpn接合によりダイオードを形成する。このようなダイオードにより、光素子可以实现できる。ダイオードに電流注入することで、発光することが知られている。ただし、IV族のSiやGeは発光しないが、III-V族のGaAsやInP、およびその混晶半導体は発光し、LED (Light-Emitting Diode)として広く使われている。半導体の諸特性については固体物理の勉強に譲るが、発光する半導体は直接遷移するということが基本である。これに対し、IV族のSiやGeでは間接遷移でありほとんど発光しない。

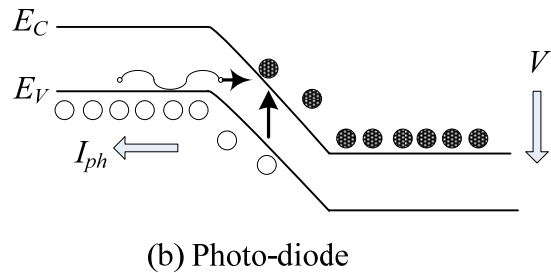
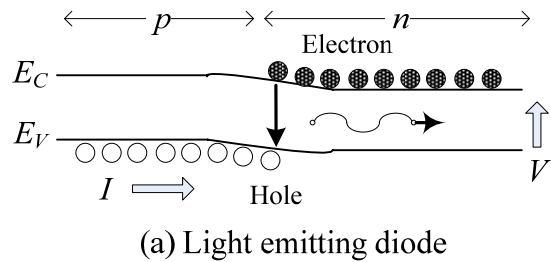


図2. LEDとPDにおけるキャリアと電流.

ダイオードに光を照射するとバンドギャップと等しいかそれ以上のエネルギーを持つ光子は吸収される。光子のエネルギーによりキャリア（電子とホール）が励起され、ダイオードに電流が発生する。これが、フォトダイオード (PD: Photo-diode) の原理である。PDは光の吸収過程の応用であり、IV族を含めほとんどの半導体で実現できる。また、近年、普及が進んでいる太陽電池もPDと基本構造は同じである。図2に示すように、LEDではダイオードに順方向の電圧 V をかけ電流 I を流して発光させる。PDでは逆方向電圧を印加して、電流を取り出す。この電流を光電流 (I_{ph} , Photo-current) と呼ぶ。LEDに対してPDでは電流の向きが逆になることに注意する。

LED や後述するレーザダイオードでは、注入された電流（電子）が光子に変換される割合を表す発光効率が問題となる。図2に示すような単純なpn接合では、キャリアが拡散し、発光せず再結合を起こす現象が起こりうる。この発光効率を飛躍的に改善させたのが、図3に示すダブルヘテロ構造(DH: Double Hetero-structure)である。中央の発光する層(活性層)をよりバンドギャップの大きな層(クラッド層)で挟んだ構造となっている。このようなサンドイッチ構造により、キャリアが活性層に閉じ込められて、発光効率が高められる。また、バンドギャップの小さな活性層では屈折率が大きくなり光が閉じ込められるので誘導放出がより強くなるという効果がある。半導体レーザのほとんどがDH構造を採用している。

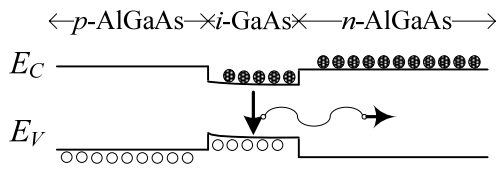


図3. ダブルヘテロ構造 p-i-n 接合.

3. 半導体レーザの原理

レーザは誘導放出による光増幅機能を応用している。電子回路では増幅器と正帰還回路で発振器を構成することができるが、光においては増幅機能と光帰還を組み合わせて発振させる。光帰還は、光増幅機能を持つ媒体を共振器構造にして両端面にミラーを配置することで実現される。このような構造をファブリペロ(Fabry-Perot)共振器という。他に、リング型の共振器も可能である。

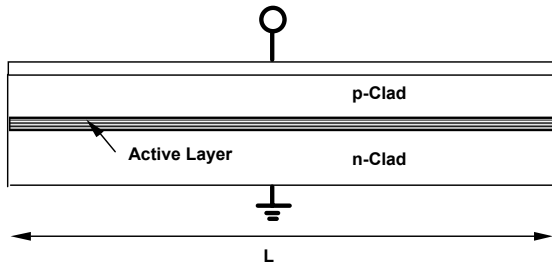


図4. 半導体レーザの断面層構造.

図4に示すように、半導体レーザでは、細長い導波路を組成のことなる半導体を用いて形成し共振器としている。共振器長は300 μm程度である。ここで、活性層が導波路のコアとなり、その上下の層がクラッドとなる。活性層のバンドギャップをクラッドのそれより小さくすることで、活性層のみが発光する。また、活性層の屈折率が大きくなることから光閉じ込め効果があり、光導波路を形成している。活性層は通常、幅が1 μm、層厚が0.1 μm程度である。このように微細な構造をもたせるのは、波長程度の大きさにすることで、光の横モードを単一モードとするためである。半導体結晶をある結晶面にそってへき開すると原子レベルで整った平面となりミラーとして機能させることができる。このようにして作製したレーザを、ファブリペロレーザ (FP-LD: Fabry-Perot Laser Diode) という。レー

ザダイオードに順方向電流を注入すると、レーザ発振が起きる。レーザ発振は、ミラーでの損失と導波路での損失の和よりも増幅利得が大きくなったときに起きるため、しきい値特性をもつ。また、図5に示すように、共振器内でレーザ光は定在波を形成し、その位相条件を満たす波長でのみ発振が起きる。このとき、発振波長λは

$$m\lambda = 2nL \quad (2)$$

で与えられる。ここで、mはモード次数、Lは共振器長、nは共振器の屈折率である。このため、レーザ光はLED光と全く異なり、位相が揃ったスペクトル純度の高い光となる。これをコヒーレンシが高いという。

しかし、へき開でミラーを形成した半導体レーザでは、多数のモードが存在するため、単一モードの発振は得にくく、図6に示すような多モード発振となる。このときの隣り合うモードの間隔Δλは近似的に

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (2nL) \quad (3)$$

で与えられる。



図5. 共振器内の定在波.

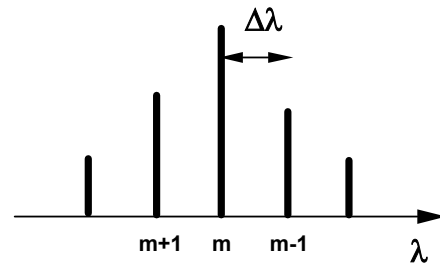


図6. ファブリペロレーザの光スペクトル.

レーザの単一モード発振は、特に、長距離高速光ファイバ通信において重要となり、単一モードレーザが開発されている。単一モード化の基本技術は、図7に示すように、回折格子を共振器構造に組み込み、ブラッグ波長で発振させることにある。このようなレーザを、分布帰還型レーザ (DFB-LD: Distributed Feedback Laser Diode) と呼んでいる。回折格子は、一定の周期Λで活性層近傍に凹凸を形成したものであり、ブラッグ波長λ_Bは、

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (4)$$

で与えられる。回折格子のフィルタ効果により、ブラッグ波長において安定な単一モード発振が可能になる。

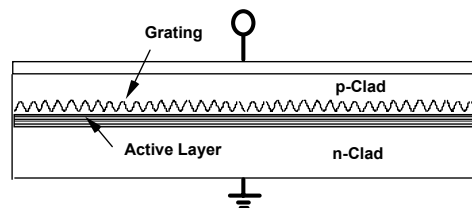


図7. (a) DFB-LDの断面層構造.

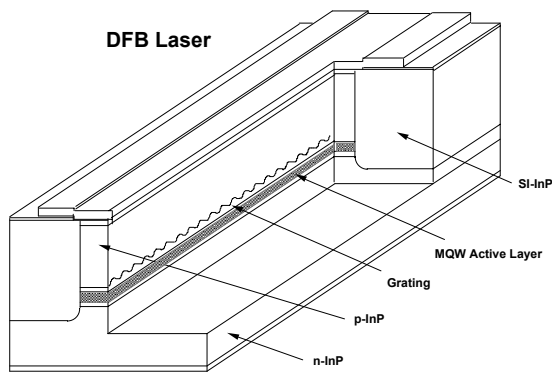


図 7. (b) DFB-LD の断面模式図.

4. 基本的な特性

発光素子の基本的な静特性として、電流-光出力特性と光スペクトルがある。半導体光素子は、電気的にはpn接合であり単純なダイオード特性となる。ただし、微細な構造を持ち静電気に弱いので、注意深い取り扱いが必要である。また、特に5mW以上の可視光レーザーでは、目にレーザー光を照射すると眼底が損傷するので注意が必要である。赤外光レーザーでも50mW以上の高出力レーザーでは同様の注意が必要である。レーザーチップは、0.3 x 0.3 mm角程度の小さな半導体素子であり、光出射面も小さなスポットとなっている。レーザーチップを専用のパッケージにマウントし、光出力を光ファイバと結合して外部に取り出せるようにしたものをピッグテールモジュールと呼んでいる。

LEDとPDを用いて、電流-光出力特性を測定する回路を図8に示す。LEDやレーザーから得られる光パワー P は、

$$P = \eta_D h\nu \frac{I - I_{th}}{e} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 η_D は微分量子効率、 $h\nu$ は光子エネルギー、 I は注入電流、 I_{th} はレーザーのしきい値電流(LEDの場合は0)、 e は電荷素量である。

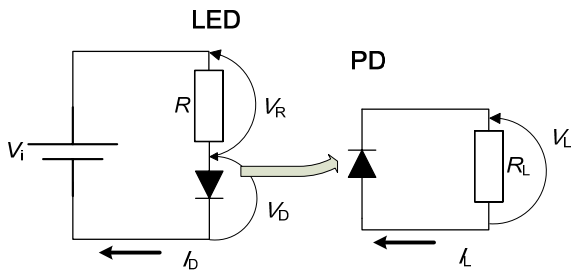


図 8. LED の電流 - 光出力特性の測定系.

図9に、リモコンなどで使われている赤外LEDの電流-光出力特性と光スペクトルの測定例を示す。図10は、光ファイバ通信で使われるDFB-LEDの電流-光出力特性と光スペクトルの測定例である。LEDとLDでは、光スペクトルが大きく異なる。LEDはブロードなスペクトルであるが、LDでは、線状のスペクトルが得られる。レーザー

光はコヒーレントであるといわれるが、それはスペクトルの線幅が極めて小さいことを意味している。

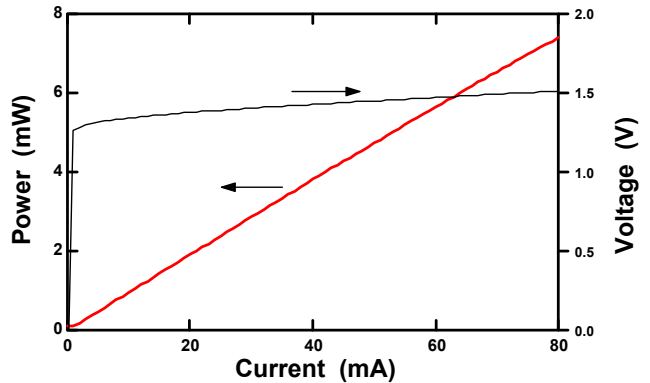


図 9. (a) LED の電流 - 光出力特性.

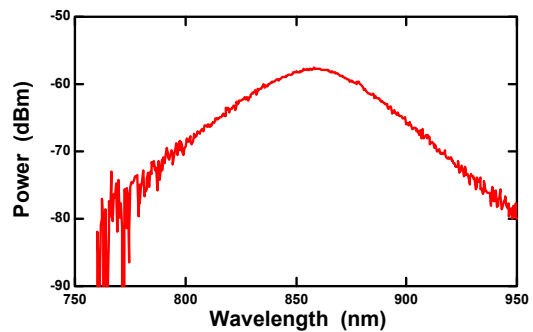


図 9. (b) LED の光スペクトル. 注入電流 90 mA.

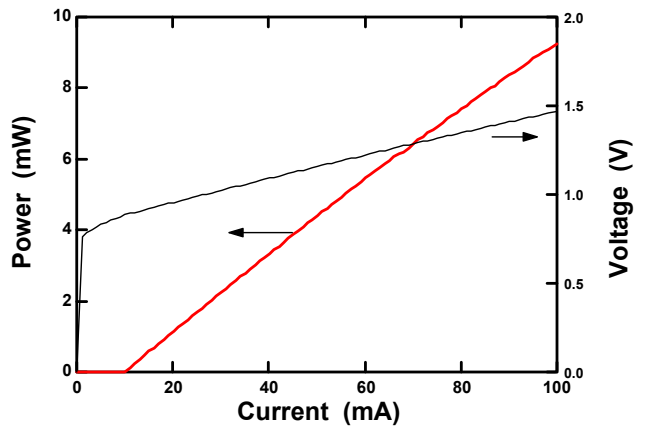


図 10. (a) DFB-LD の電流 - 光出力特性.

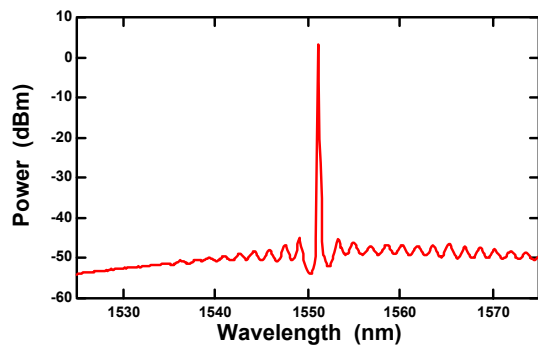


図 10. (b) DFB-LD の光スペクトル. 注入電流 40 mA.

PD では、吸収された光パワーを P として、発生する光電流 I_{ph} は、

$$I_{ph} = \eta \frac{eP}{h\nu} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 η は PD の量子効率である。

PD の電圧 - 電流特性を測定した例を、図 11 に示す。ここで、PD は Si ダイオードであり、光入力がない場合 ($P_{opt} = 0$)、白色 LED 光源による光入力がある場合、入力パワーを 2 倍とした場合について測定している。また、電圧源を用いて電圧を変化させている。逆方向電圧では、光電流がマイナス方向に流れていることがわかる。PD は、ゼロ電圧、あるいは逆方向電圧を印加して使用される。順方向電圧においても光電流が流れる領域がある。この領域では起電力を発生することが可能になり、太陽電池として用いられる。

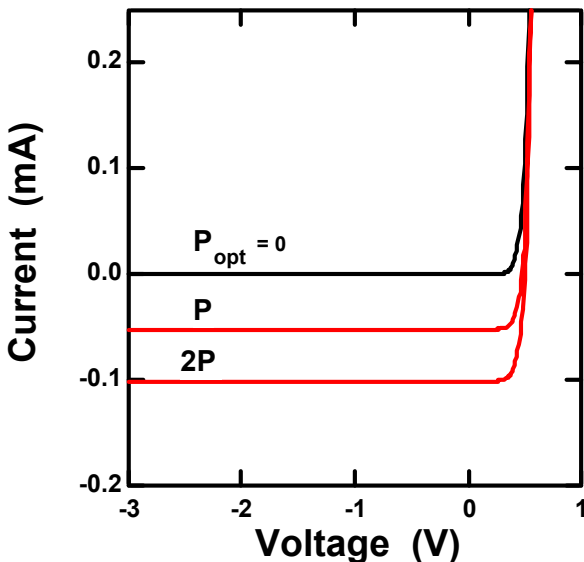


図 11. PD の電圧 - 電流特性.

5. 半導体レーザの応用

半導体レーザに、デジタル信号やアナログ信号など様々な変調信号を加え、変調された光信号を得ることができる。光通信では、光ファイバで光信号を送り、フォトダイオードで光強度を電流に変換して受信しており、強度変調 - 直接検波方式と呼ばれている。光ファイバ通信はデジタル通信であり、2 値の NRZ (Non-Return-to-Zero) 信号が一般的である。半導体レーザの直接変調を用いて、10 ギガビット Ethernet など 10 Gbit/s 高速通信が実用化されている。図 12 に、10 Gbit/s のビットパターンとアイパタンの測定例を示す。

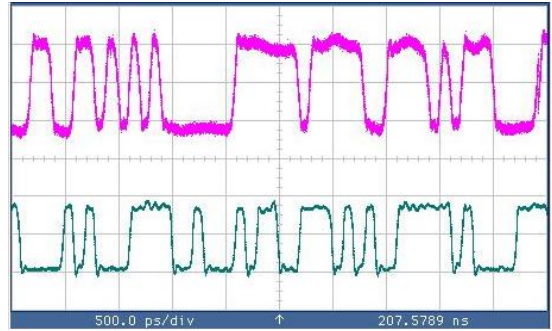


図 12. (a) 10 Gbit/s のビットパターン. 横軸: 500 ps/div. 下は、電気信号であり、上が光信号を PD で受信して観測した信号.

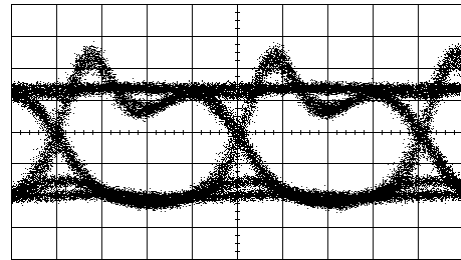


図 12. (b) 10 Gbit/s のアイパターン. 横軸: 25 ps/div

このような高速のデジタル通信の実験には、高速の擬似ランダムパルスパターン発生器が必要となる。

LED は、リモコンなど低速の空間通信に良く使われている。LED は自然放出に基づいており、時間応答が制限され、Gbit/s の高速な信号を発生させることが困難である。

参考文献

- [1] 米津 宏雄, 「光通信素子工学」, 工学図書, 1984.
- [2] S. M. Sze and Kwok K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices," A John Wiley & Sons, 2007.