

物理システム工学科 3年次「物性工学概論」第8回、2006.6.6 配付資料

佐藤勝昭教官 (副学長) 専門分野: 固体物理学

ホームページ: <http://www.tuat.ac.jp/~katsuaki/> E-mail: satokats@cc.tuat.ac.jp

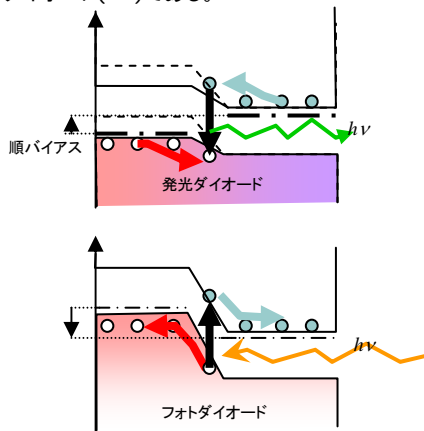
第7回の復習

光電変換: 光を電気に変える

- 光伝導(photoconductivity)
- 光電子放出(photoelectron emission)
- 光起電力効果(photovoltaic effect)
 - フォトダイオード、フォトトランジスタ
 - 太陽電池
- 実際の応用について学んだ
 - 街灯自動点滅器、太陽光発電、CCDカメラ

前回の問題と回答

1. 夜になると街灯が自動的に点灯する仕組みを説明せよ。
 - 光を受けて抵抗が低くなるCdS光伝導センサーと固体リレーが接続されており、明るいときにはランプの回路が開くようにしておく。暗くなるとリレーの電流がoffになり、接点が閉じてランプが点灯する。
2. 太陽電池に使うシリコンはLSIに使うシリコンより純度が低くてよい訳は？
 - LSIではキャリア(電子やホール)を高速で輸送しなければならないので、高い移動度が必要である。このために不純物散乱の少ない高純度のシリコンが必要である。
 - 太陽電池では、高速動作を必要としないので、不純物散乱があっても問題にならない。
3. pn接合が発光ダイオード(光源)にもフォトダイオード(光センサー)にもなる理由
 - 順方向バイアスにより、電子とホールを接合領域に注入できるので、そこで再結合して発光するのが発光ダイオード(LED)である。
 - 光照射によって接合領域に生成された電子とホールを、逆バイアスによる強い電界で分離して電圧として取り出すのがフォトダイオード(PD)である。



第8回に学ぶこと

- ・レーザーの原理
- ・レーザー光の特徴
- ・身の回りのレーザー
- ・レーザーの原理
- ・さまざまなレーザー
- ・半導体レーザー
 - 半導体レーザーの構造
 - 半導体レーザーの閾値
 - DFBレーザー
 - 量子井戸レーザー

1. レーザーの歴史

- ・レーザー発明のきっかけはタウンズ、ショーローによるメーザーの発明であった。
- ・最初のレーザーの実験はメイマンによりルビーで成功した。
- ・レーザーの最初の応用はゴールドマン医師による眼科治療であった。

もともとなったメーザーの発明

1954年、ベル研のC.タウンズとA.ショーローは、アンモニアガスをういて誘導放出によるマイクロ波の増幅器を開発し、これをメーザーと呼んだ。

レーザーの理論的予言

1958年、C.タウンズとA.ショーローは赤外または可視のスペクトルのレーザーが可能であることを理論的に予測した。

最初のレーザーはルビーレーザー

1960年、ヒューズ・エアクラフトのTHメイマンは、合成ルビー・ロッドを用いてコヒーレントな694nm(赤)のミリ秒光パルスを発生することに成功した。当時は光メーザーと呼ばれた。

ルビー(Al₂O₃:Cr)においてレーザー発振が可能であるという物理的根拠は、日本における辻川、田辺・菅野の研究成果がもたれている。

最初のレーザー利用は眼科

1960年代、レオン・ゴールドマン医師は、ルビーレーザーを用いてレーザー光の生体への作用を系統的に研究し、網膜剥離の手術にレーザーを用いる道を開拓した。ゴールドマンはレーザー医療の父と呼ばれている。

2. レーザー光の特徴

光波の発振器または増幅器

位相がそろっている

- 可干涉(coherent): 異なる2つの光源から出た光が干渉可能
- 指向性(directionality): 広がらずにまっすぐ進む
- 単色性(monochromatic): 狭いスペクトル幅
- 高エネルギー密度(high density): 集光すると加熱できる
- 超短光パルス(ultra short pulse): フェムト秒まで短く
- フォトンボース凝縮状態: 巨視的に現れた量子状態

3. 身の回りのレーザー

光ファイバー通信(詳細は第9回で)

レーザーの単色性、高いエネルギー密度、高い指向性が利用されている。

光ストレージ(光ディスク)(詳細は第10回で)

レーザー光の単色性と細いビーム→微小スポット高いエネルギー密度→温度上昇による相変化等が利用されている。次世代のホログラフィックメモリーでは可干渉性が利用される。

レジのバーコードリーダ

レーザー光は、多面体ミラーの回転によってラベル上にラインとして照射される。ラベルに当たって反射された光をライン状の受光部で受ける。反射された光の強弱を光センサーで読みとって製品を識別する。レーザー光の直線性、細いビーム、単色性の特徴が活かされている。

レーザープリンター

電気信号で強度が変調されたレーザー光は、多面体ミラーの回転によって感光ドラム上に掃引して照射される。感光ドラム上に形成された電荷にトナーを付着して印字する。

レーザーディスプレイ

ポリゴン(多面体)ミラーでレーザービームを上下左右に偏向して図形や文字を表示する。

レーザー治療

レーザー加工

レーザー計測

レーザーポインター

4. レーザーの原理

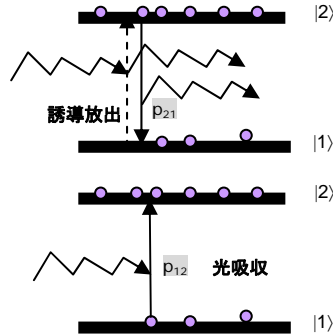
- 自然放出と誘導放出
- 誘導放出の原理
- レーザーと反転分布
- 正常な分布と反転分布
- 反転分布をどう実現するか

自然放出と誘導放出

- 自然放出 (spontaneous emission): 励起状態から基底状態への緩和によって発光
- 誘導放出 (stimulated emission): 光の電界を受けて励起状態から基底状態へ遷移、この逆過程は光吸収。前者が後者より強ければ、正味の誘導放出が起きる。
- この現象が laser = light amplification by stimulated emission of radiation である

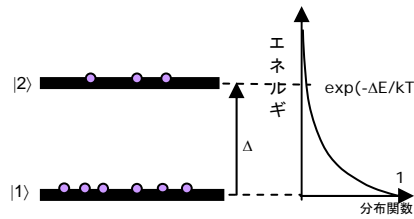
レーザーと反転分布

- 電界を受けて状態|1> から|2> に遷移
- 同じ確率で状態|2> から|1> に遷移
- |2> のポピュレーションが|1> のそれより大きいと正味の誘導放出が起きる。



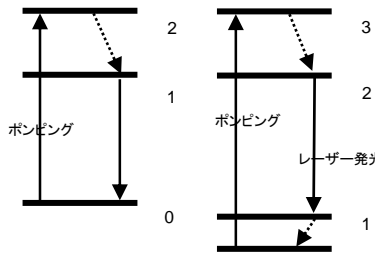
正常な分布

- (Maxwell-Boltzman)
- ΔE だけ上にある準位の分布は $\exp(-\Delta E/kT)$



反転分布の実現

- 通常レーザーは3準位系と4準位系が使われる。
- 3準位レーザーの場合は熱平衡状態では原子は基底状態に多く存在するため、反転分布が作りにくい。という欠点がある。反転分布をつくるためには、強い励起を用いて、基底状態の原子の半分以上を上準位に移行させる必要がある。
- 4準位レーザーは励起すると、準位3に原子がポンピングされ、すぐに準位3に落ちてくる。また、発振後準位1に落ちてくるが、その後準位0に戻っていく。つまり、準位1と準位2の間では、簡単に反転分布を作りやすいという特徴がある。



5. さまざまなレーザー

気体レーザー: 例) He-Ne, He-Cd, Ar⁺, CO₂, Excimer:

気体の励起状態に反転分布を作る

固体レーザー:

例) YAG: Nd(ヤグ), Al₂O₃: Ti(チタンサファイア), Al₂O₃: Cr(ルビー):

固体中の局在中心を光学的に励起、反転分布を作る

液体レーザー

色素レーザー

半導体レーザー

GaAlAs, InGaN: 電子とホール
の高密度注入により反転分布

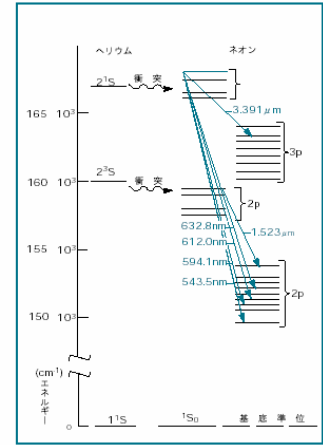
HeNeレーザーの原理

ヘリウムガスを励起し、ネオンガスを衝突励起

ネオン原子の準位間遷移で、レーザー光

いろんな波長のHeNeレーザー

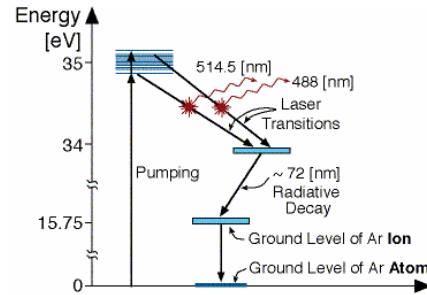
- 1.523μm 赤外
- 632.8nm 赤
- 612nm オレンジ色
- 594nm 黄色
- 543.5nm グリーン



HeNeレーザーの遷移におけるヘリウム原子とネオン原子の主なエネルギー準位。

Arイオンレーザー

- 青458nm
- 青488nm
- 青緑514nm

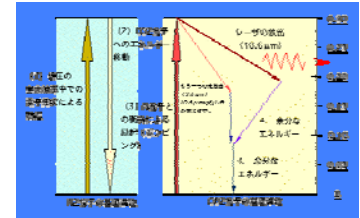


Arイオンレーザーの用途

- レーザーショー
- など照明用
- PL励起光源

CO₂レーザー

- 10.6μm
- 用途
- 金属加工
- レーザー治療
- 空気汚染計測



YAGレーザー、YVO₄レーザー

- YAG: Nd
- 1.06μm
- 微細加工
- SHG用光源

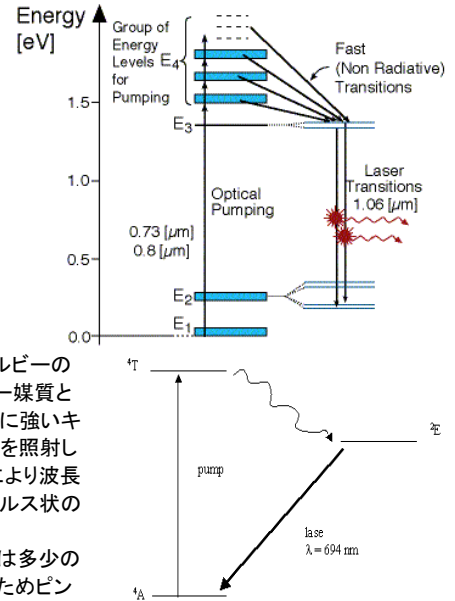
チタンサファイアレーザー

- Al₂O₃: Ti³⁺
- (波長可変)

ルビーレーザー

- Al₂O₃: Cr³⁺
- 固体レーザー

- 一種で、人造ルビーの単結晶をレーザー媒質とするもので、これに強いキセノンランプの光を照射して励起することにより波長694.3nmのパルス状の光が得られる。
- ルビーの単結晶は多少の不均一性があるためピンホールを入れて発振位置を調整する。また不規則な何本もの発振線があるためエタロン板を入れる。これによりコヒーレンス長は数mになる。



液体レーザー
色素レーザー

- 色素レーザーは長さ1cmの石英ガラスの管に例えばローダミン6Gのような有機色素溶液を満たしたものである。
- この色素セルは、部分反射鏡と回折格子からなるキャビティ中に置かれる。波長を変えるために回折格子をキャビティ内に入れる。
- ポンプ光は色素セルに集光され、色素を励起してレーザー動作を誘導する。色素レーザーに使う色素溶液の濃度は、 10^{-2} から 10^{-4} モルの間である。
- 色素レーザーは波長範囲 360~950 nmにおいて3nsのパルス光を出力する。
- ピークパワーは使う色素によるが10~20 kWの程度である。CW色素レーザーの線幅は 20~40 GHzである。

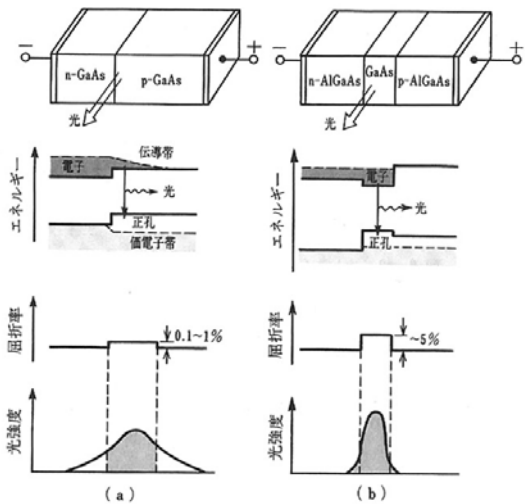
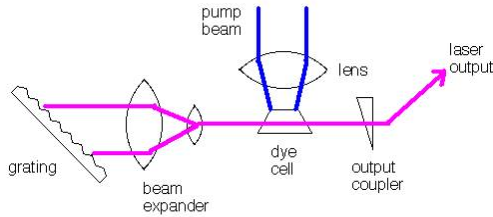
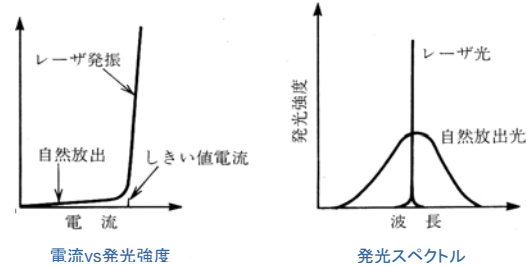
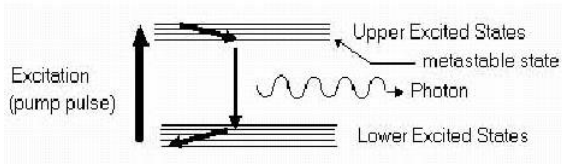


図 3-46 (a) ホモ接合と (b) ダブルヘテロ接合レーザーの構造の概念図および注入キャリア、屈折率、光強度の分布 [活性領域内に閉じ込められた光(光強度分布のスクリーンの部分)が誘導放出に寄与する]

色素レーザーの原理

- ポンプ光としてはフラッシュランプか、他のレーザーを用いる。
- 色素は、発光波長より短い波長の光を吸収する。なぜならパイロニック準位のせいで、吸収したエネルギーの一部は熱に変換されるからである。
- 色素に吸収されたエネルギーは反転分布をもたらし、電子を励起状態に運ぶ。
- 励起にひきつづき、振動エネルギーが失われ、励起状態の最も低いパイロニック準位に移る。
- 誘導放出は、基底状態の最も高いパイロニック準位に対して置き、振動緩和によって系の基底状態に戻る。このプロセスが繰り返される。



6. 半導体レーザー(LD (laser diode))

- LED構造において、劈開面を用いたキャビティ構造を用いるとともに、ダブルヘテロ構造により、光とキャリアを活性層に閉じ込め、反転分布を作る。
- DFB構造をとることで特定の波長のみを選択している。

半導体レーザーの材料

- 光通信用: 1.5 μ m: GaInAsSb, InGaAsP
- CD用: 780nm GaAs
- DVD用: 650nm GaAlAs MQW
- 次世代DVD用: 405nm InGaN

ダブルヘテロ構造(DH)レーザー

- 活性層(GaAs)をバンドギャップの広い材料でサンドイッチ
- バンドギャップの小さな半導体をバンドギャップの大きな半導体でサンドイッチ: 高い濃度の電子・ホール活性層に閉じこめ
- 屈折率の高い半導体(バンドギャップ小)を屈折率の低い半導体(バンドギャップ大)でサンドイッチ: 全反射による光の閉じこめ

DFBレーザー

- 1波長の光しかでないレーザー。つまり、通信時に信号の波がずれることがないので、高速・遠距離通信が可能。(通信速度: Gb/s = 1秒間に10億回の光を点滅する。電話を1度に約2万本通話させることができる)

量子井戸レーザー

厚みが1nm程度のGaAsとAlGaAsを交互に積層した人工格子構造のバンド構造は図のようになり、1次元の量子井戸(QW)を形成する。量子井戸内には離散的なエネルギー準位ができる。量子井戸レーザーは、しきい値電流が低く、しきい値電流の温度依存性が小さい、利得スペクトル幅が狭い、レーザーの偏光度が高い、パルス応答性が優れているなどの特徴をもつ。

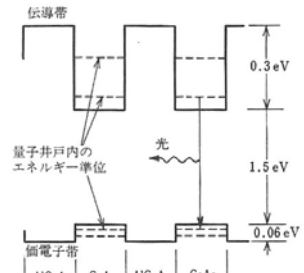
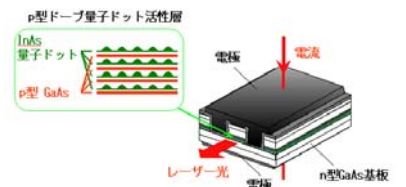


図 3-49 量子井戸構造のエネルギー帯構造 (量子井戸の深さは Al 組成が 0.25 に対するもの)

量子ドットレーザー

量子ドットレーザーでは活性層に、量子ドットが縦横に並んだ量子ドットアレイ (quantum dot array) を用いている。量子ドットでは空間的に同じ場所に電子と正孔が閉じ込められるため、一對の正孔と電子が効率よく再結合を行うことが出来る



問題

Laserは何の頭文字をとったもので意味は何か
Laserのさまざまな応用はレーザーのどのような特徴を利用しているか
Laser動作が起きるためには、どのような条件が必要になるのか。