

物理システム工学科3年次

物性工学概論

第火曜1限L0031教室

第8回 光エレクトロニクスと材料[1] レーザー

佐藤勝昭

副学長(兼務)工学教育部

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

第7回の問題(1)

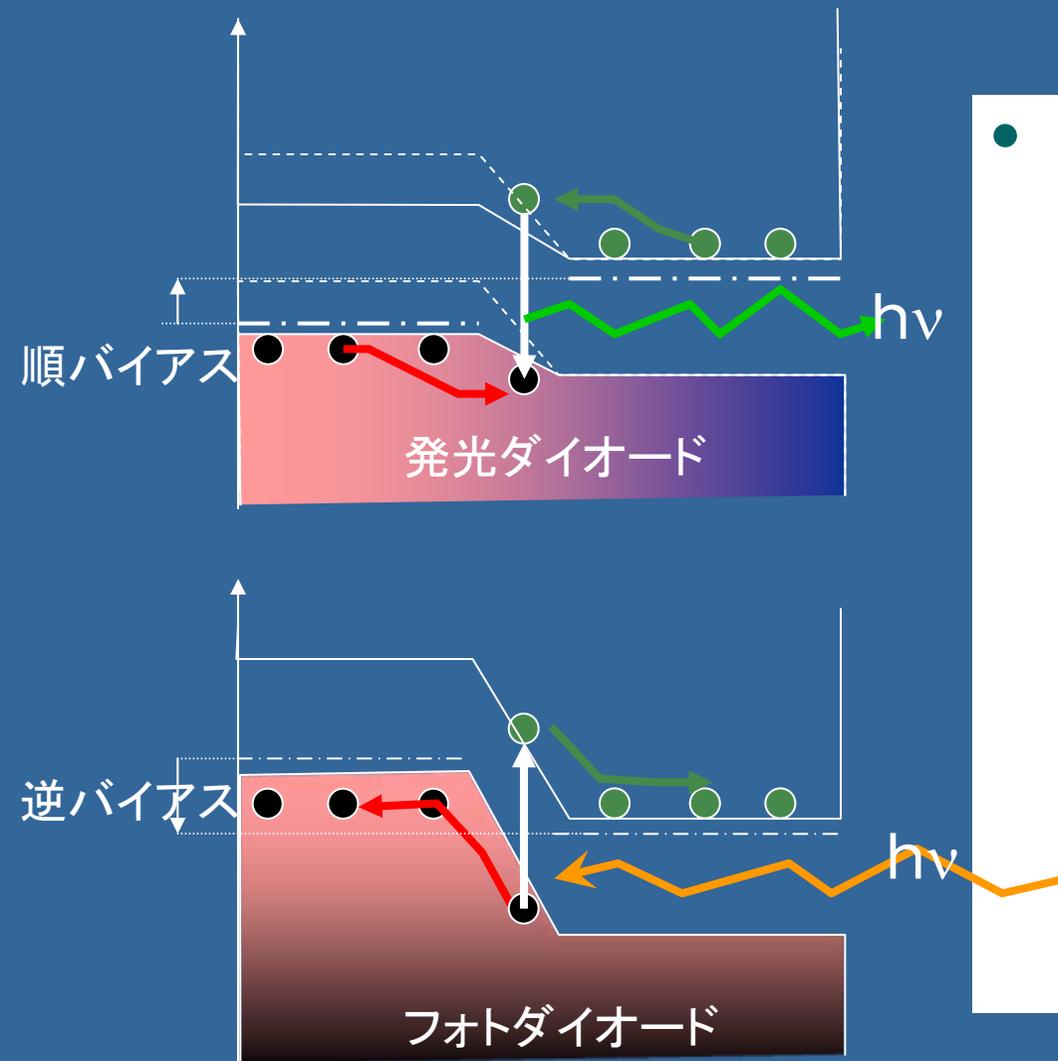


- 夜になると街灯が自動的に点灯する仕組みを説明せよ。
 - 光を受けて抵抗が低くなるCdS光伝導センサーと固体リレーが接続されており、明るいときにはランプの回路が開くようにしておく。暗くなるとリレーの電流がoffになり、接点が閉じてランプが点灯する。

第7回の問題(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。

第7回の問題(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

1. レーザーの歴史
2. レーザ光の特徴
3. 身の回りのレーザー
4. 自然放出と誘導放出
5. さまざまなレーザー
6. 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
 - LDの製造工程



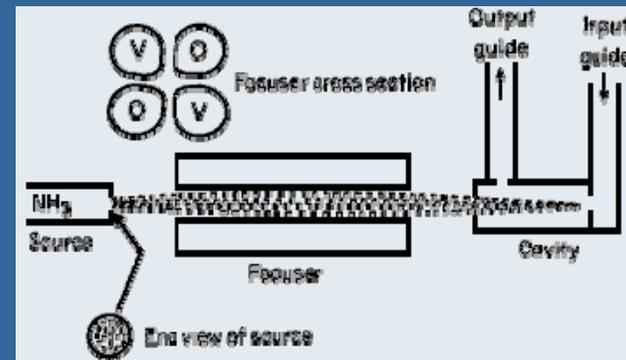
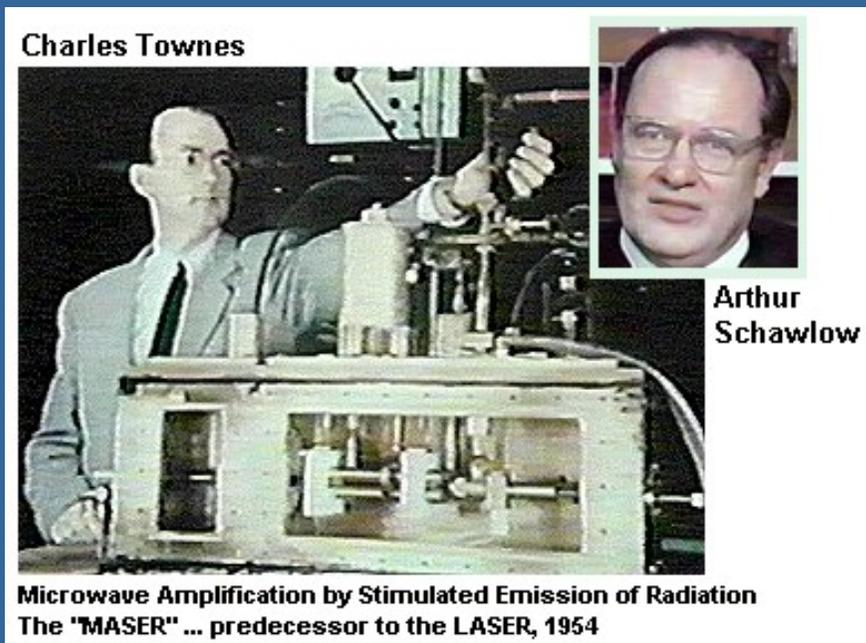
1.レーザーの歴史

- 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だった。
- 彼らは、レーザーの理論的裏付けも与えた。
- 最初のレーザーの実験はメイマンによりルビーロッドを用いて成功した。
- 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。

レーザーの歴史

もともに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、アンモニアガスを用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。



MASER (Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation)

http://www.laserservicealliance.com/laser_history.htm

レーザーの歴史

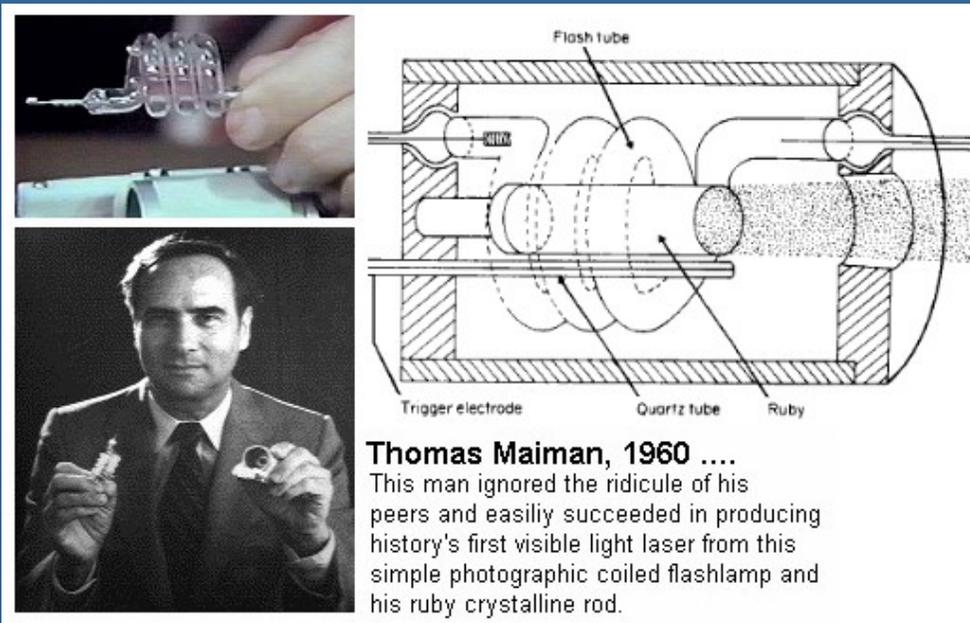
レーザーの理論的予言

- 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。

レーザーの歴史

最初のレーザーはルビー・レーザだった。

- 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($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$)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とになっている。



レーザーという用語はメーザーの発明者Cタウンズの研究室の学生ゴードン・グールドによるもので、特許紛争の後、彼が公式のレーザー発明者ということになっている。

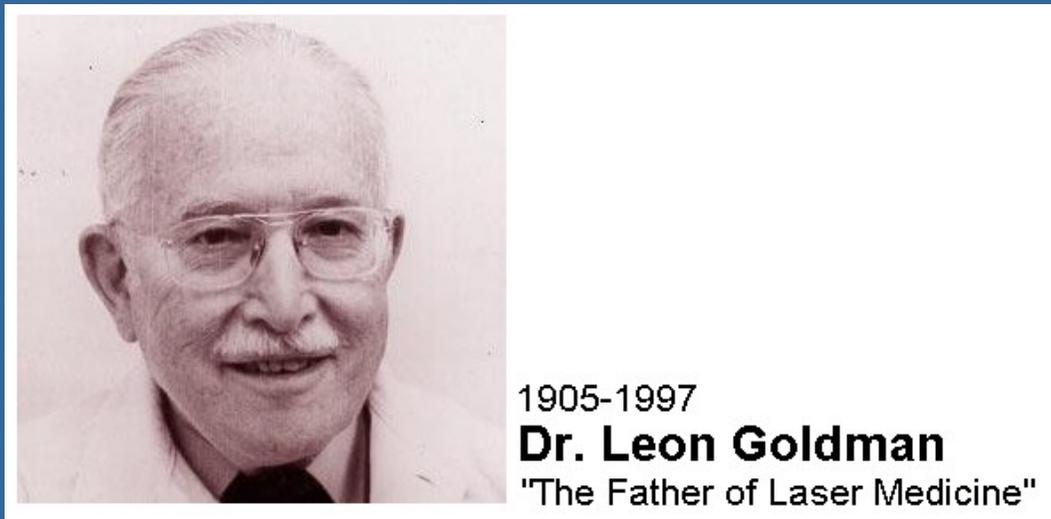
LASER (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation)

http://www.laserservicealliance.com/laser_history.htm

レーザーの歴史

最初のレーザー利用は眼科だった。

- 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拓いた。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
 - 可干渉(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
- **フォトンのボース凝縮状態**: 巨視的に現れた量子状態

3.身の回りのレーザー

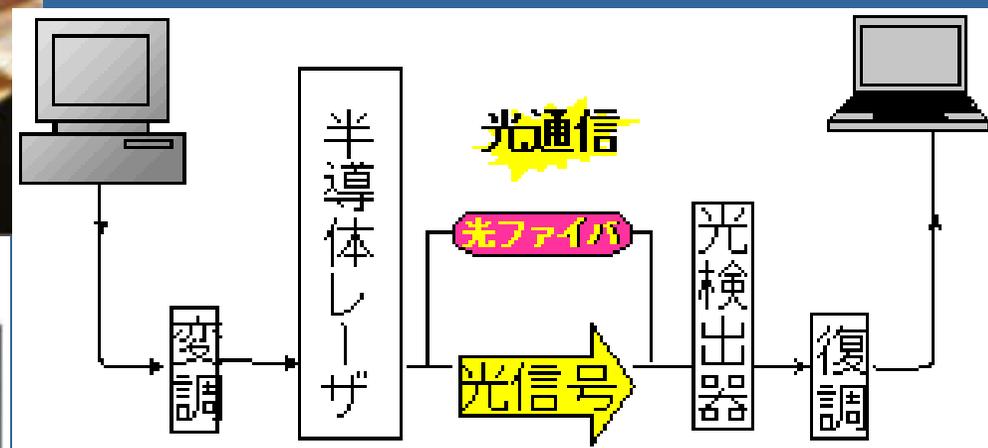
- 光ストレージ(光ディスク)
- 光ファイバー通信
- レジのバーコードリーダー
- レーザープリンター
- レーザー治療
- レーザー加工
- レーザー計測
- レーザポインター



身の回りのレーザー

光ファイバー通信 (詳細は第9回で)

- 光ファイバー通信はどのように行われているか調べてみよう。



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。

身の回りのレーザー

光ストレージ (詳しくは、第10回講義で)

- CD、DVD、BD
- MD、MO

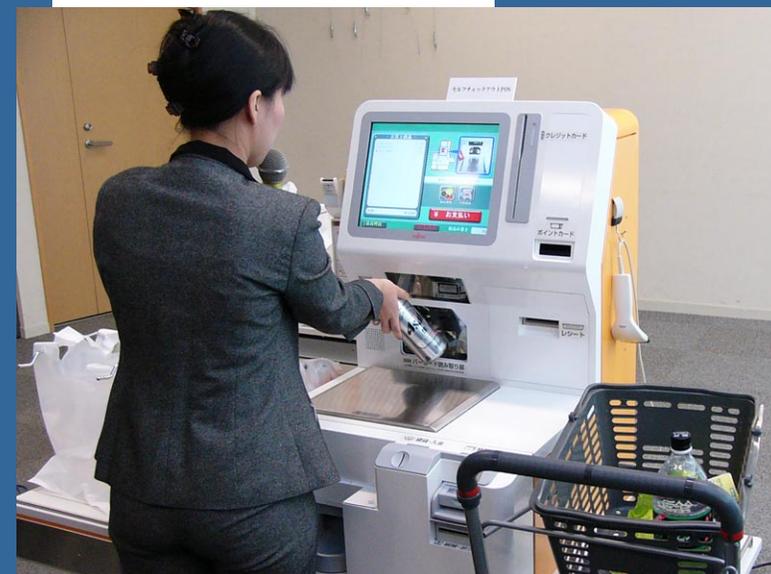
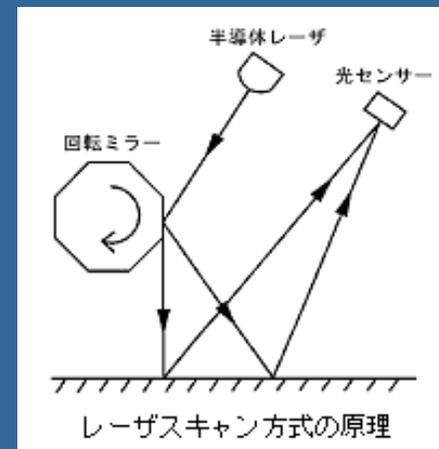


レーザー光の単色性と細いビーム→微小スポット
高いエネルギー密度→温度上昇による相変化等
が利用されている。次世代のホログラフィックメモリー
では可干渉性が利用される。

身の回りのレーザー POSレジとバーコードリーダー



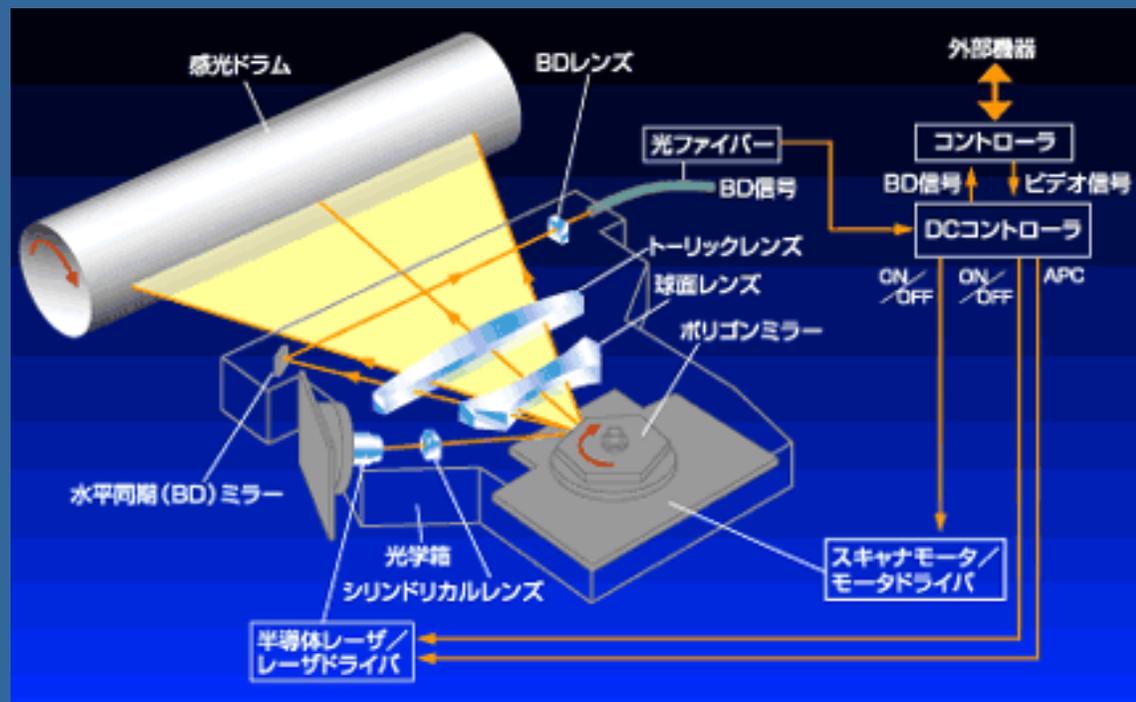
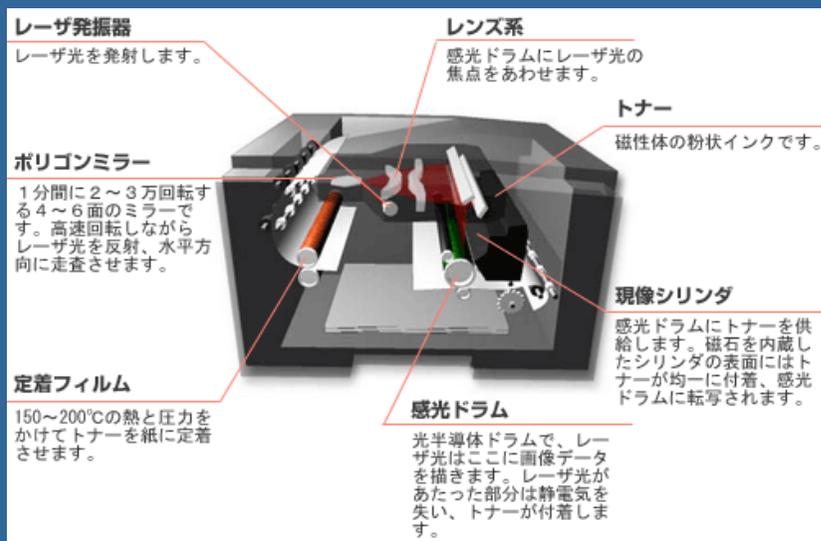
- バーコードは、縦縞のストライプ形状を持つラベルで、縦縞の太さの違いと数によってデータ化されていて、これを光学的に読みとる。
- レーザ光は、多面体ミラーの回転によってラベル上にラインとして照射される。
- ラベルに当たって反射された光をライン状の受光部で受ける。反射された光の強弱を光センサーで読みとって製品を識別する。
- この装置によって、お店のレジでは店員が商品をレーザー光にかざすだけで自動的に商品を識別し料金をはじき出すことができる。



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。

身の回りのレーザー 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。



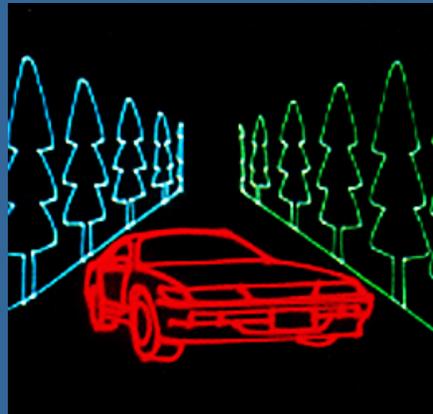
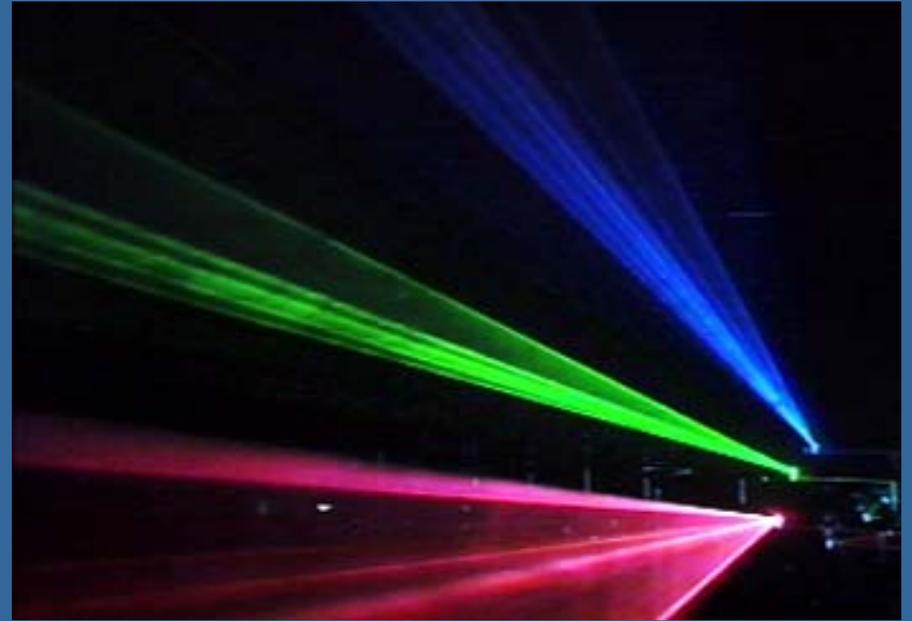
レーザー光の直線性、細いビーム、単色性の特徴が活かされている。

http://web.canon.jp/technology/detail/lbp/laserbeam_system/

身の回りのレーザー

レーザーディスプレイ

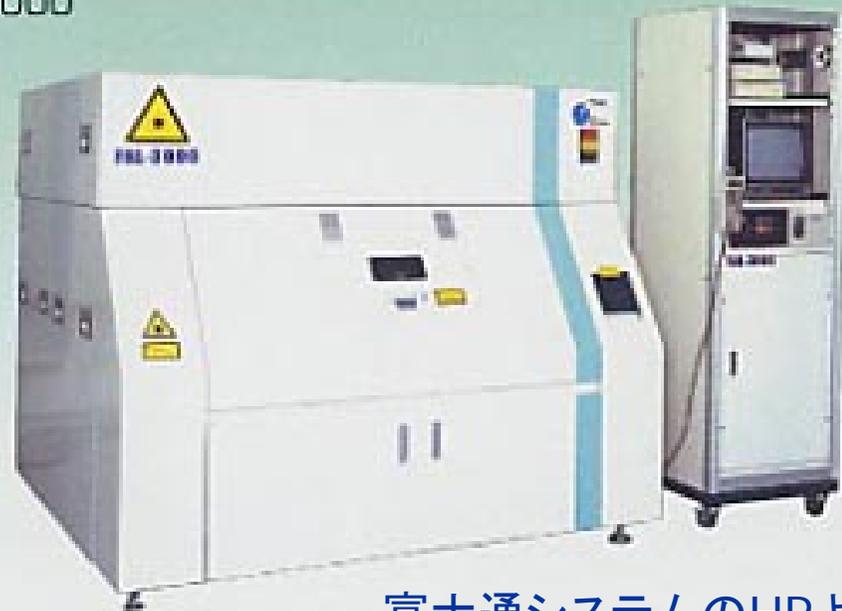
- ポリゴン(多面体)ミラーでレーザービームを上下左右に偏向する。



レーザーの高い直線性、単色性、
高いエネルギー密度が利用されている

身の回りのレーザー レーザー加工

FAL3000

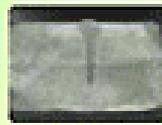


富士通システムのHPより

◆金属加工



軟鋼切断(28t) ステンレス切断(12t) アルミ切断(6t)



ステンレス溶接

CO2

レーザーの高い直線性、
高いエネルギー密度が利用されている

身の回りのレーザー レーザー治療

- 主としてCO₂レーザーであるがルビーレーザー、YAGレーザー、半導体レーザーも用いられる
- 美容形成、眼科、歯科、外科など多方面で使われている。



身の回りのレーザー

レーザー治療（美容形成）

- | | |
|----------------------------|--|
| CO ₂ （炭酸ガス）レーザー | 用途：レーザーメス、ホクロやイボなどを取る、しわ取り
10.6μmという赤外なので大部分は組織中の水分に吸収され、熱エネルギーに変換される。 |
| ルビーレーザー | 用途：シミ、あざ
694nmという波長を有しており、メラニン色素に良く吸収され、血管や組織にはあまり吸収されない。
Q-スイッチ ルビーレーザーは、レーザー照射時間を短くして、他の正常細胞への影響を最小化する。 |
| アレキサンドライトレーザー | 用途：シミ、あざ、脱毛
755nmという波長を有します。メラニン色素に反応する性質がある。 |
| Nd-YAGレーザー | 用途：シミ、ソバカス、赤あざ
YAGにネオジウムを混ぜたものを用いて、1064nmという波長を有す。波長を半分に変換できるKTP結晶を組み込んで、532nmの波長を出す。532nmの波長は、メラニン色素に反応するとともに、ヘモグロビンの赤い色素にも反応する。 |
| Er-YAGレーザー | 用途：ニキビ跡の凹凸や顔面のしわ取り
YAGにエルビウムを混ぜたもので、2936nmという波長を有しており、水分に反応する。 |
| 色素レーザー | 用途：赤あざ、血管性疾患
アルコールに色素を溶かしこんだものを発振体としており、585nm付近の波長を有しヘモグロビンに反応する。 |
| 半導体レーザー | 用途：脱毛、毛細血管拡張症など
半導体の性質を変えることにより様々な波長のレーザー光を作り出すことが可能。 |

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

レーザーの原理

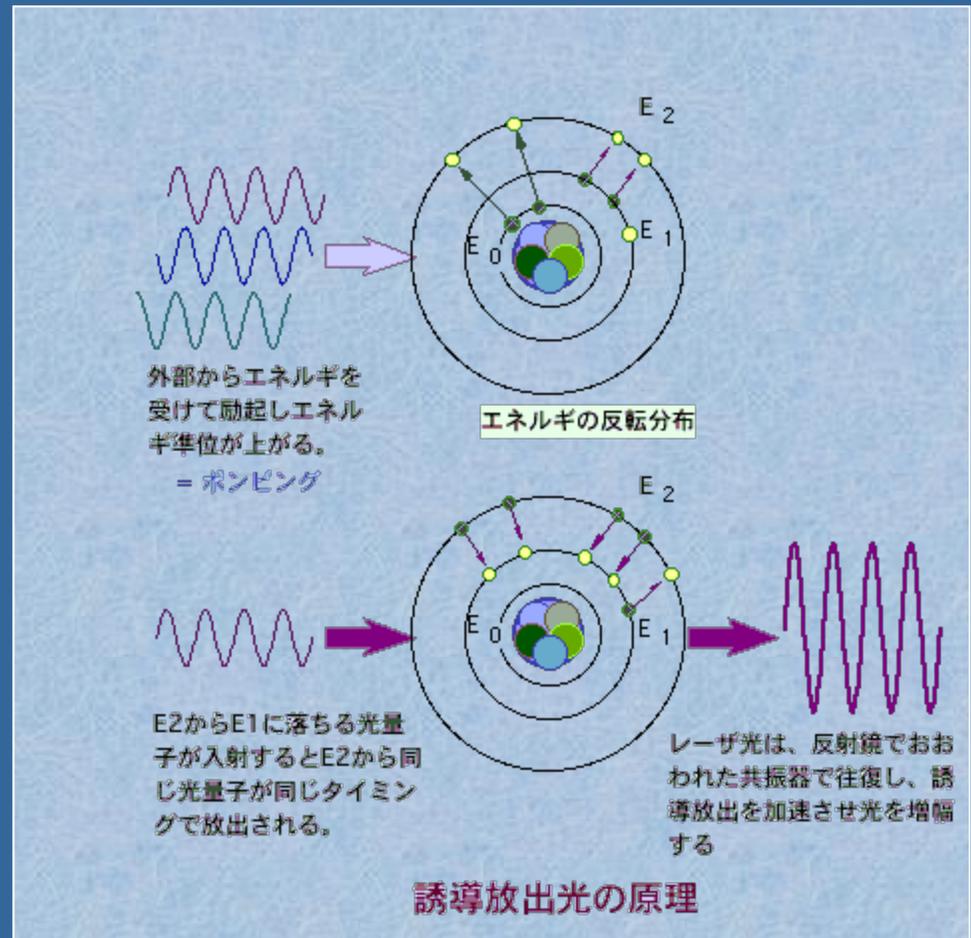
自然放出と誘導放出

- 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。
- この現象を
laser=light amplification by stimulated emission of radiation (誘導放出による光増幅)とよぶ

レーザーの原理

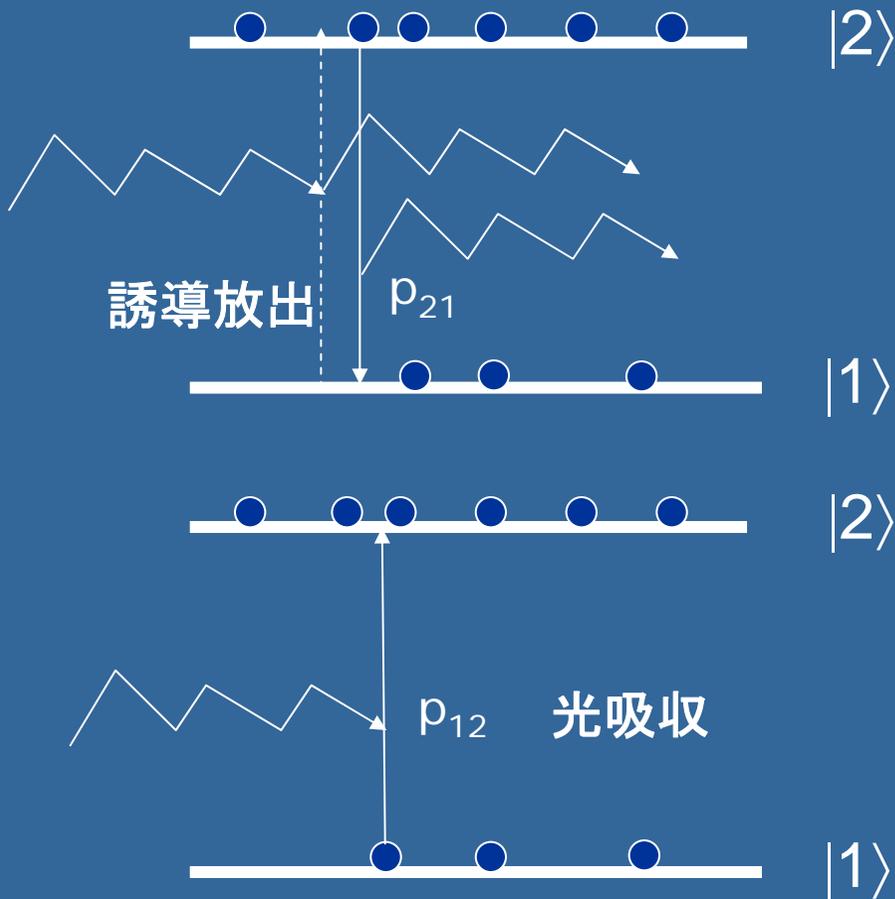
誘導放出の原理

- 光の吸収により励起状態に反転分布状態を作る(ポンピング)
- 光の刺激により励起状態から基底状態へ遷移が起きる



レーザーの原理

レーザーと反転分布

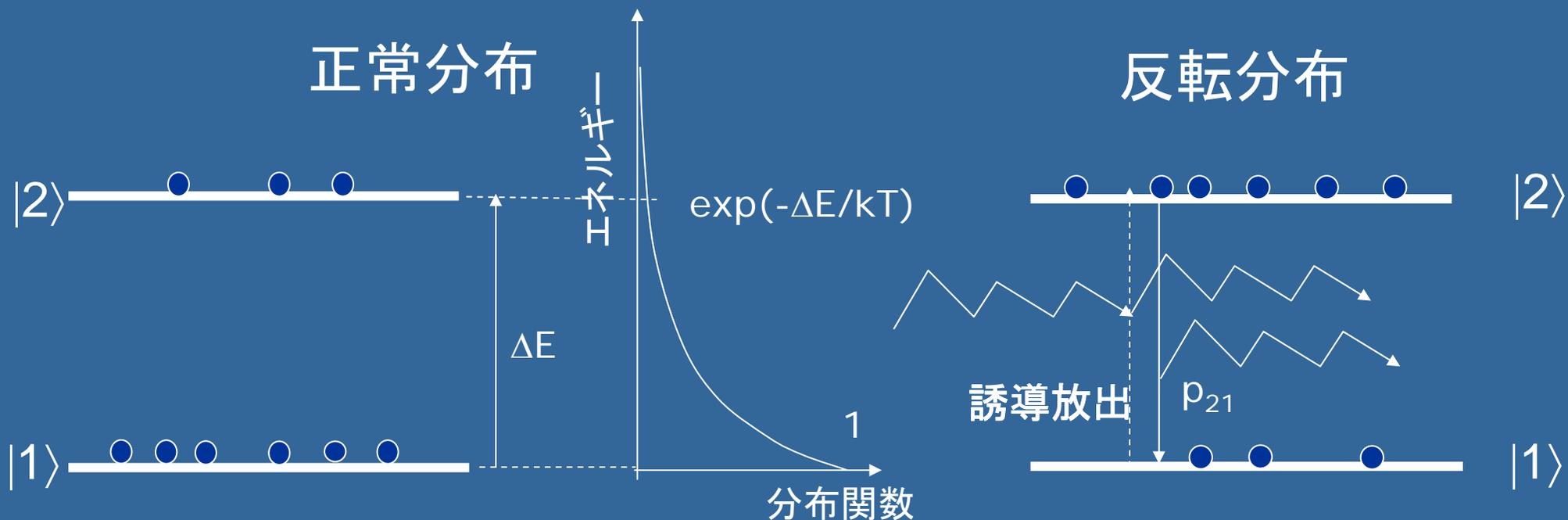


- 電界を受けて状態 $|1\rangle$ から $|2\rangle$ に遷移
- 同じ確率で状態 $|2\rangle$ から $|1\rangle$ に遷移
- $|2\rangle$ のポピュレーションが $|1\rangle$ のそれより大きいと正味の誘導放出が起きる。

自然放出と誘導放出

正常な分布と反転分布

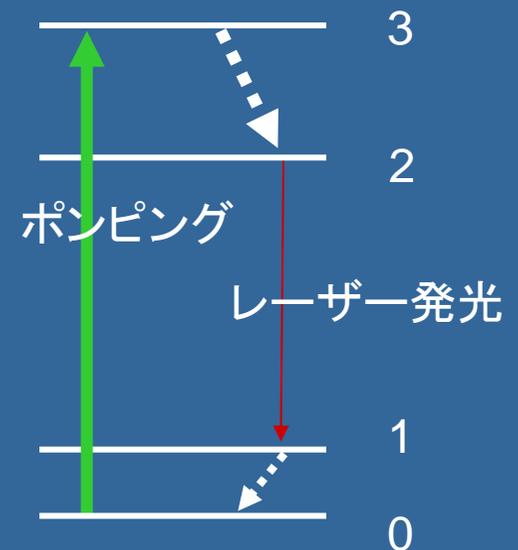
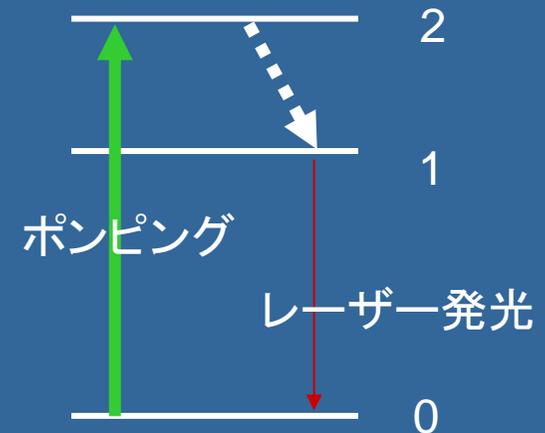
- ΔE だけ上にある準位の分布は $\exp(-\Delta E/kT)$



自然放出と誘導放出

反転分布をどう実現するか

- 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、その直後準位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
例) 色素レーザ
- 半導体レーザー:
例) GaAlAs, InGaN: 電子とホールの高密度注入により反転分布を作る。

気体レーザー HeNeレーザー



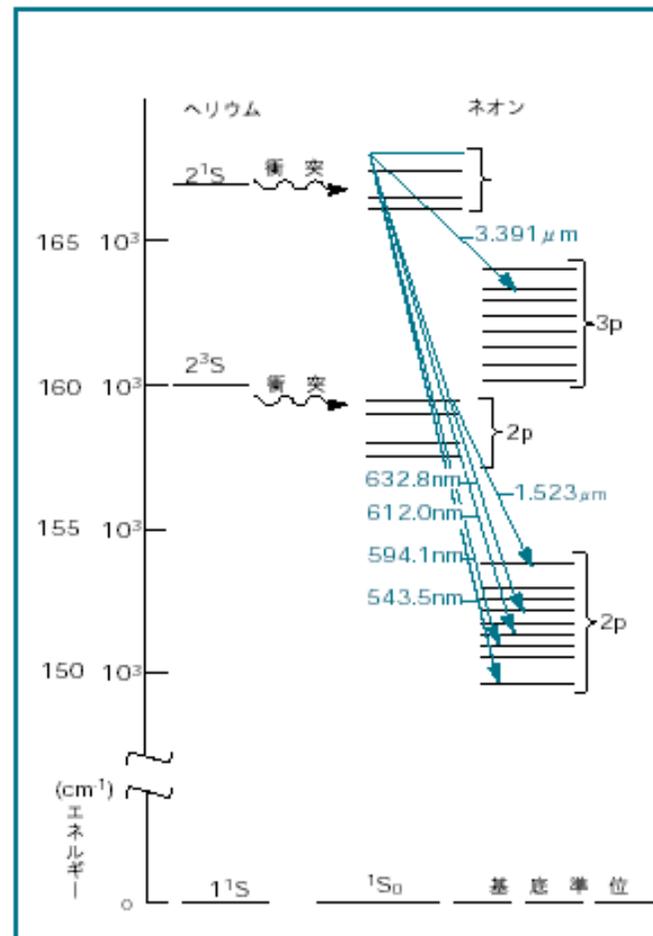
昭和オプトロニクス

<http://www.soc-ltd.co.jp/index.html>

気体レーザー

HeNeレーザーの原理

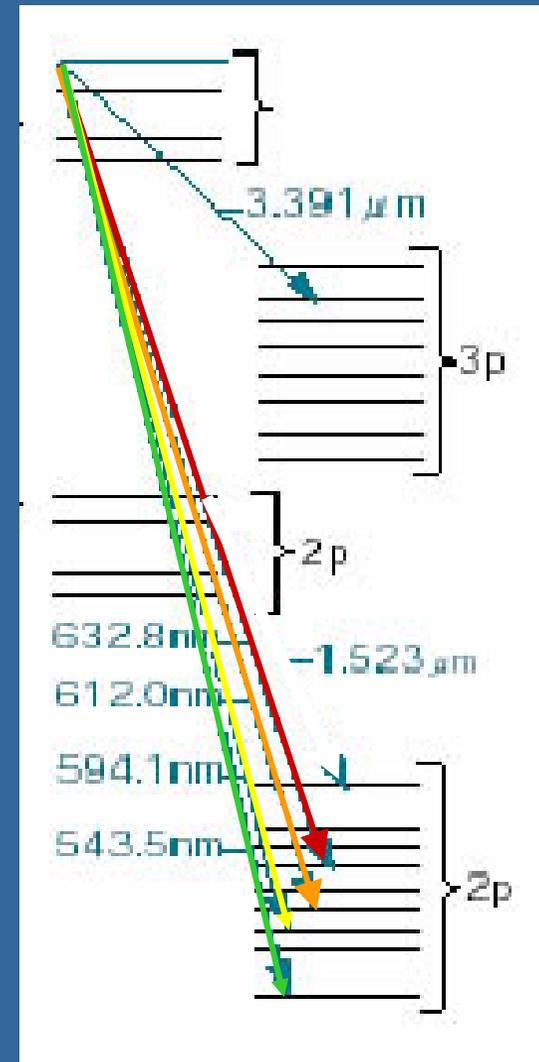
プラズマ内での自由電子との衝突による励起は、最もエネルギー準位の低い準安定状態に多数のヘリウム原子を取り込む原因となる。ヘリウムの励起状態には、ヘリウムの2つの電子の一方が最も低エネルギーの原子軌道1S から2S 原子軌道に励起される 2^1S と 2^3S の2つの励起状態がある。このため、この状態を電子励起状態と呼んでいます。これに対して、ネオンは、 $1S_0$ 基底準位に $1s^2 2s^2 2p^4$ の状態で配列されている10個の電子を有し、より大きく、より複雑な原子です。ネオン原子は多くの励起状態を持ち、その内のレーザー作用に関係する励起状態が右図にエネルギー準位のダイアグラムとして示されています。電子的に励起された状態のネオンガスの多様な性質は、互いに他の電子を整列させることができる励起された電子の運動による幾つもの異なった手段からもたらされます。



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。

いろいろな波長のHeNeレーザー

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



気体レーザー Arイオンレーザー

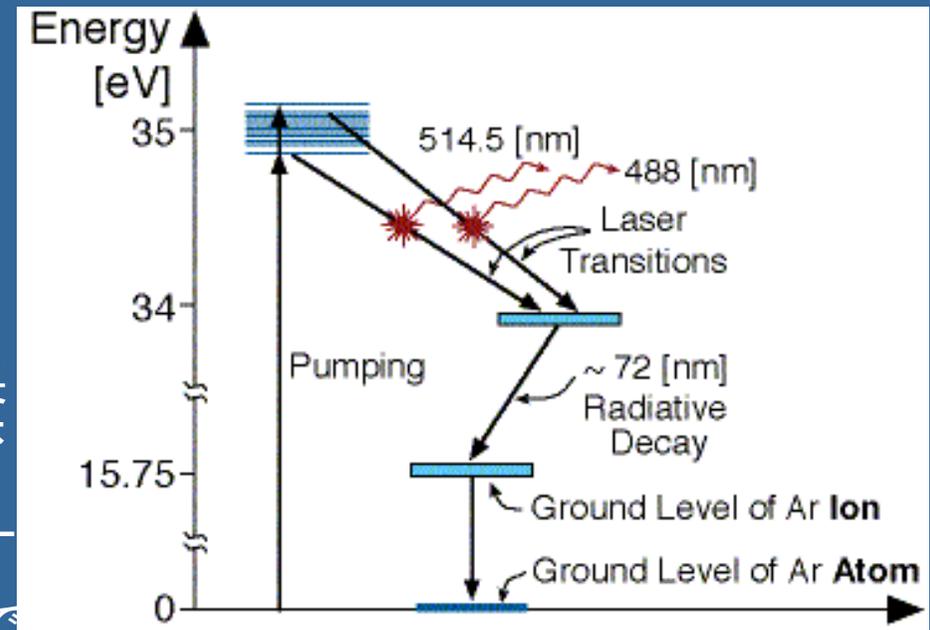
- 青458nm
- 青488nm
- 青緑514nm



気体レーザー

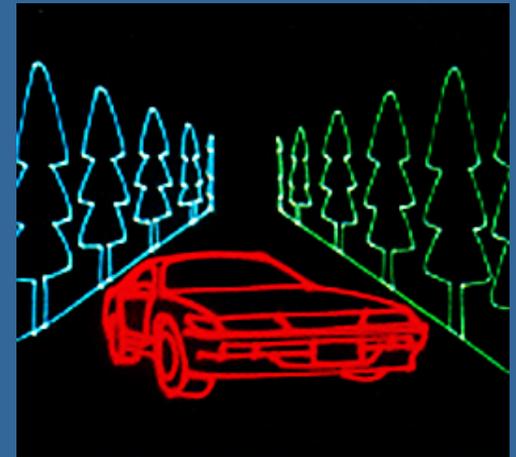
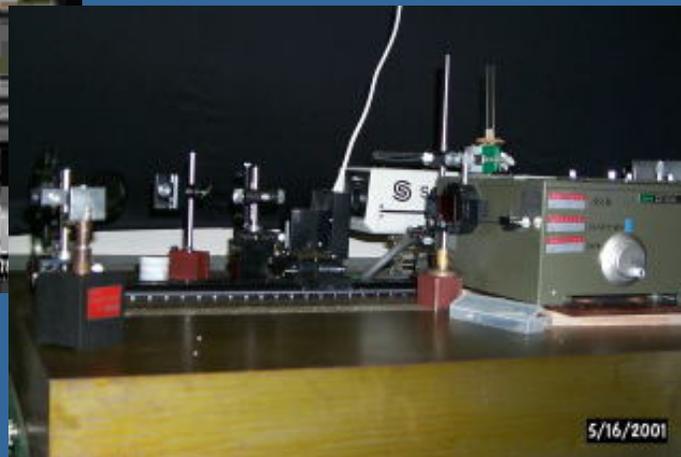
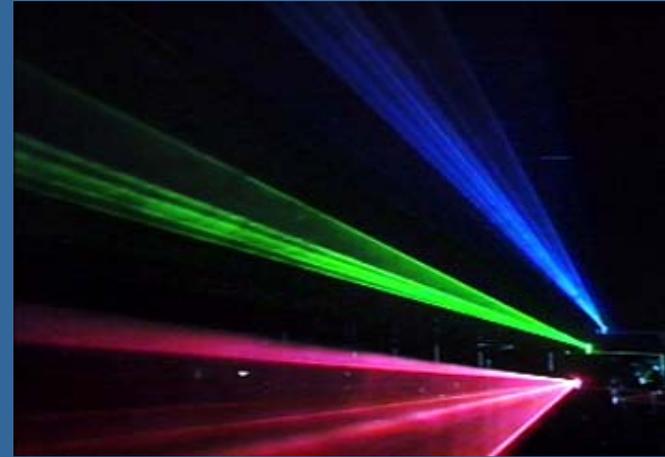
Arイオンレーザーの原理

- 誘導放出は Ar^+ イオンおよび Ar^{2+} イオンのいずれにおいても起きるが、通常は Ar^+ イオンが関与する。 Ar^+ イオンの場合、レーザー発振は 488.0 nm と 514.5 nm の可視域で起きる。
- 誘導放出は Ar^+ 励起状態の $3s^23p^44p^1$ から $3s^23p^44s^1$ に落ちるときに置き、これは、さらに 74 nm の紫外線自然放出によって $3s^23p^5$ 状態に緩和する。
- この状態が電子を1つ捕捉してアルゴン原子の基底状態 $3s^23p^6$ に戻る。
- Ar^{2+} イオンも同様の過程を経て、紫外線域の波長 334.0, 351.1, and 363.8 nm のレーザー発振を示す。
- レーザー出力は連続である。可視域の出力パワーは (Ar^+ の場合) 30 W にも達することができる。紫外域 (Ar^{2+} の場合) では最大 10 W に達することができる。



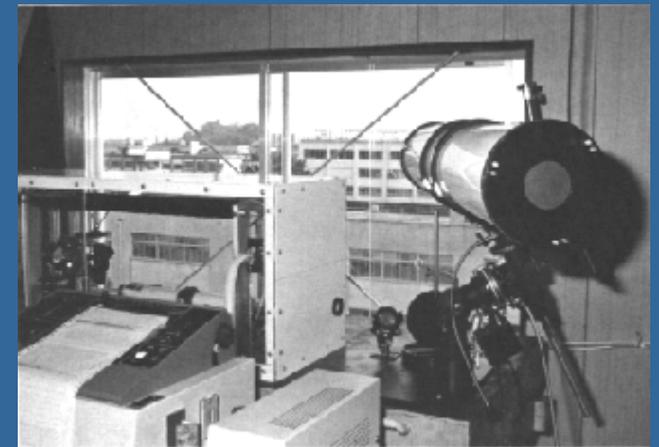
気体レーザー Arレーザーの用途

- レーザーショーなど照明用
- PL励起光源



気体レーザー CO₂レーザー

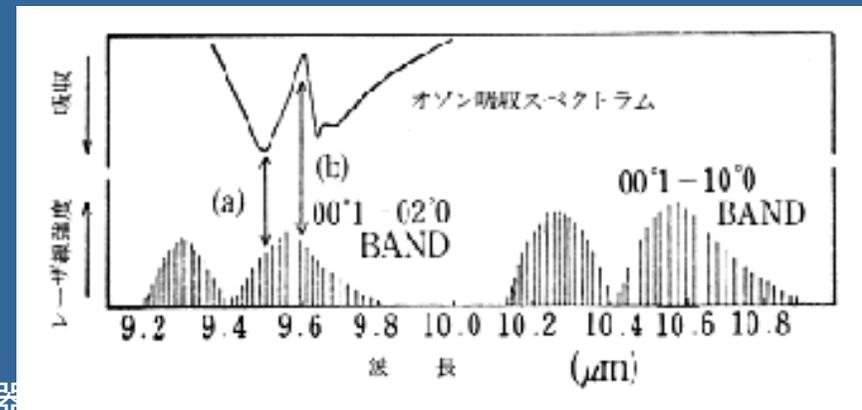
- 10.6 μ m
- 用途
 - 金属加工
 - レーザー治療
 - 空気汚染計測



金属加工機

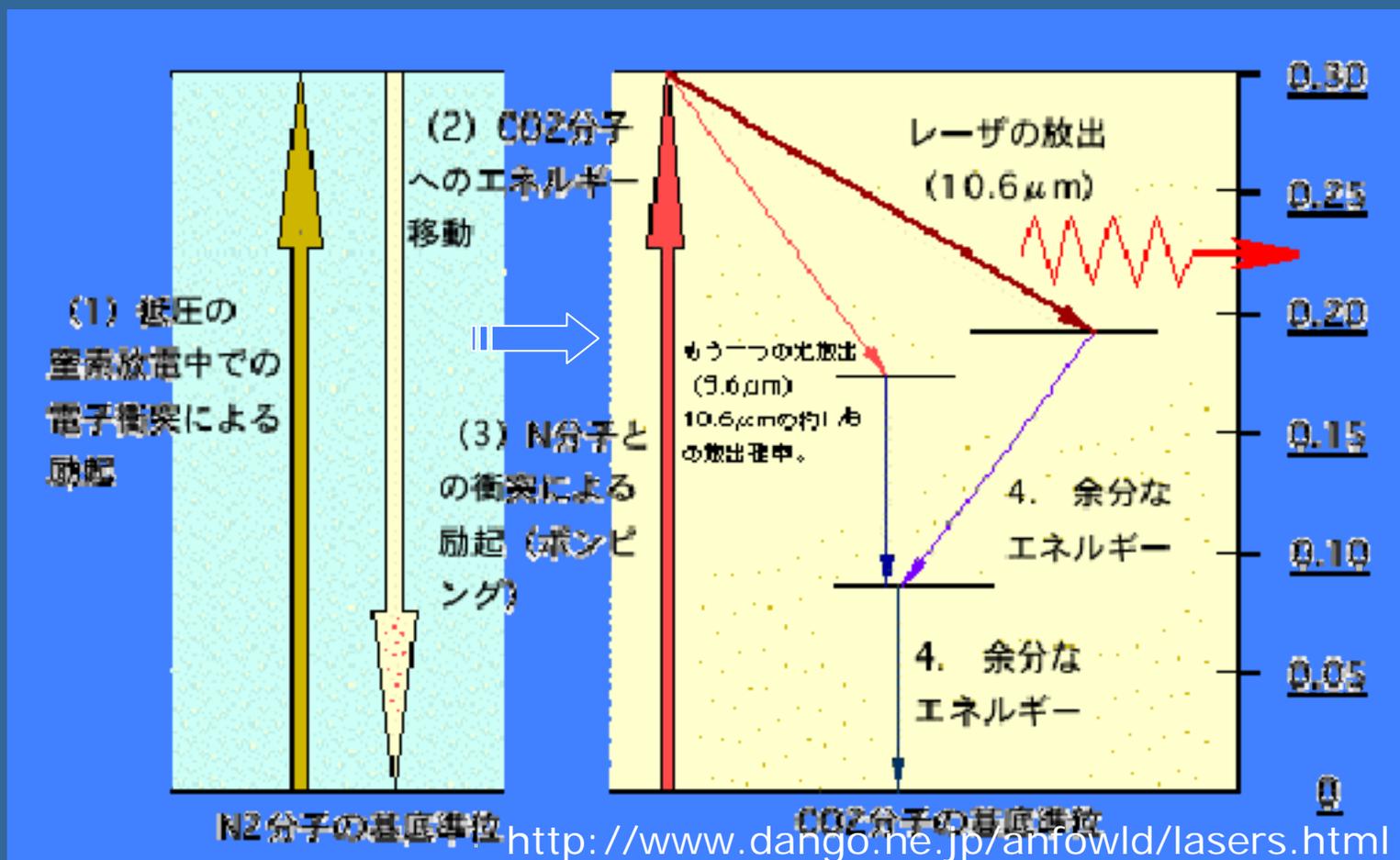


レーザー治療器



気体レーザー CO₂レーザーの原理

- 炭酸ガスレーザーの発振原理。10.6 μm を放出するのにN₂分子の力を借りている。



固体レーザー ルビーレーザー

- $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$
- 固体レーザーの一種で、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て波長を選ぶことによりコヒーレンス長は数mになる。

ルビーレーザー

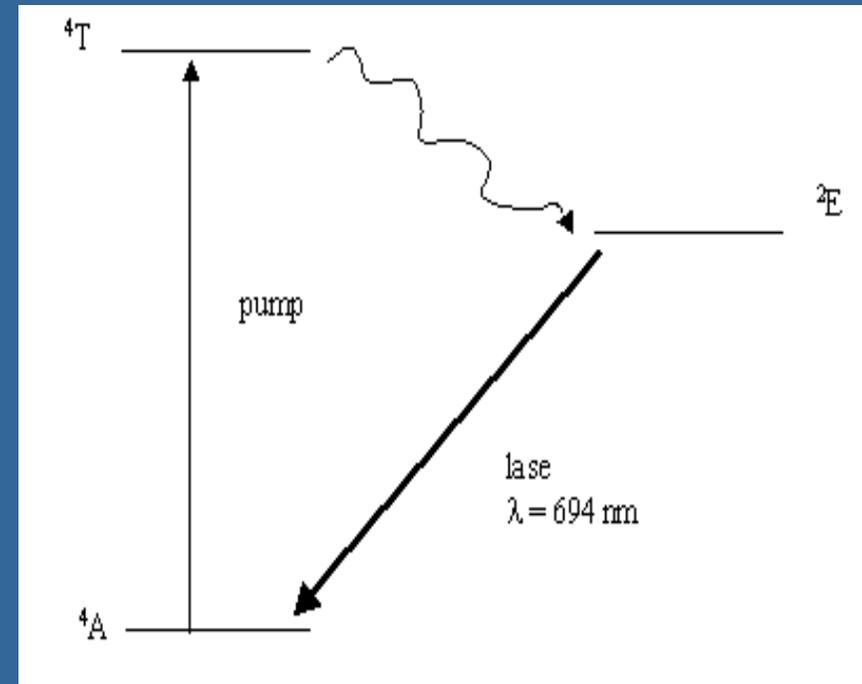


ルビーロッド



固体レーザー ルビーレーザーの原理

- フラッシュランプによって Cr^{3+} イオンの $^4\text{A}_2$ 基底状態から $^4\text{T}_2$ 励起状態へ励起することによりポンピングする。
- $^4\text{T}_2$ 準位・ ^2E 準位間の速い準位間交差によって、 ^2E 励起状態からから $^4\text{A}_2$ 基底状態への誘導放出が起きる。
- レーザー動作の終状態が基底状態であるため、反転分布の維持が難しく、ルビーレーザーの効率は低い。

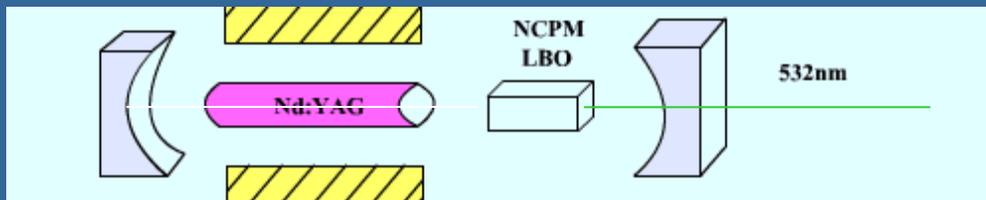
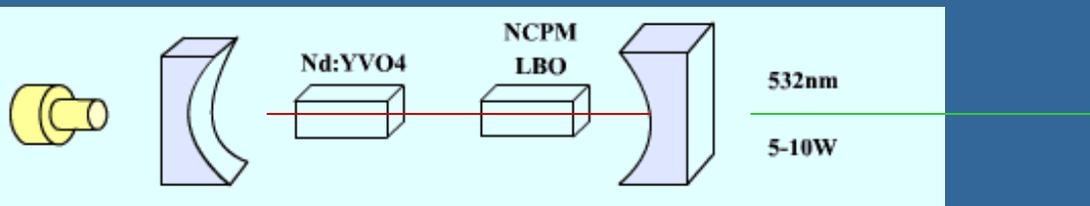
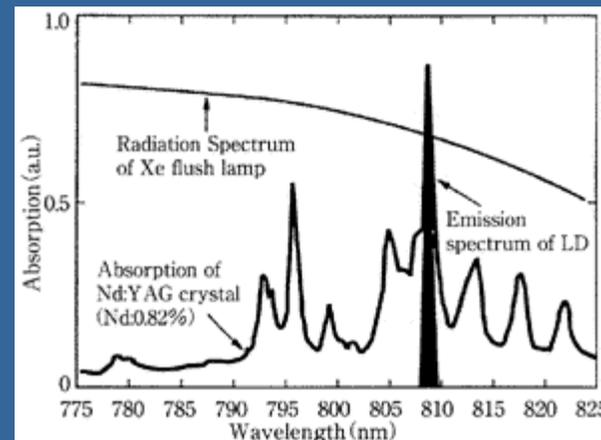


注: $^4\text{A}_2$ 、 $^4\text{T}_2$ などは、固体中の多電子の多重項のスピ多重度と対称性を表す群論の記号です。

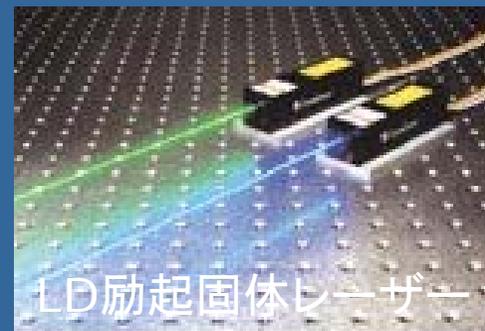
固体レーザー

YAGレーザー、YVO₄レーザー

- YAG:Nd
- 1.06μm
- 微細加工
- SHG用光源
- LD(810nm)
→Nd³⁺を励起
- Nd³⁺
→1064nmのレーザー発振
- 非線形結晶
→SHGにより532nm(緑)



<http://www.fesys.co.jp/sougou/seihin/fa/laser/fal3000.html>

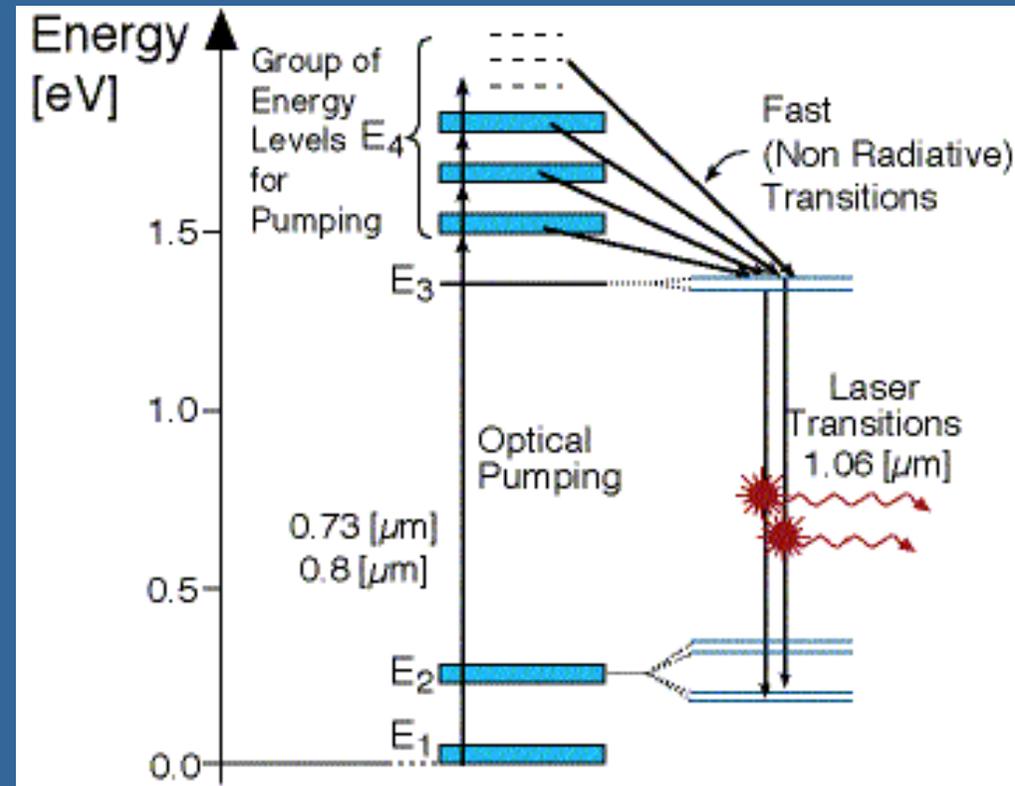


LD励起固体レーザー
フォトテクニカ社

固体レーザー

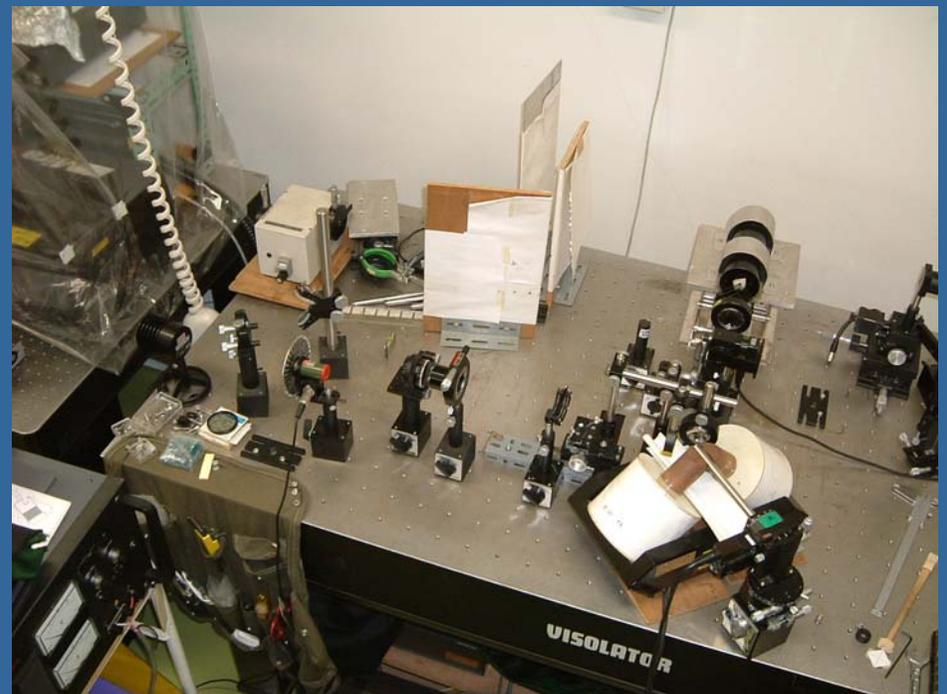
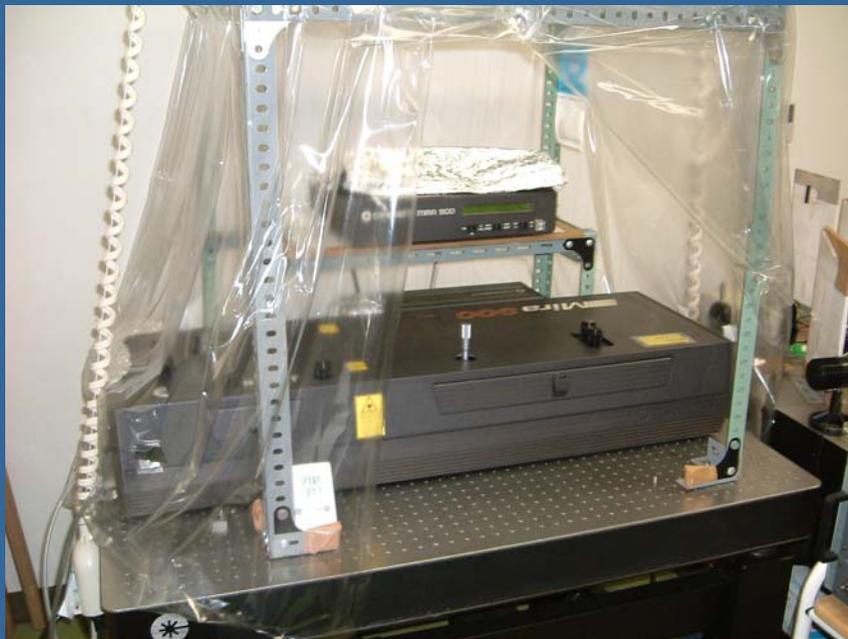
Nd:YAGレーザー

- Nd:YAGレーザーは4準位系である。Nd³⁺イオンの高エネルギー準位は基底状態の原子を、フラッシュランプまたはGaAlAs半導体レーザーによって0.73 μm および0.8 μm の波長でポンピングする。
- これにより反転分布が生じるが、Nd³⁺イオンは上位の状態から下位の状態 $^4F_{3/2}$ へ格子緩和し、レーザー励起準位に分布する。
- この準位からレーザー基底状態 $^4I_{11/2}$ に誘導放出が起きレーザー動作する。発振波長は1.06 μm である。



固体レーザー チタンサファイアレーザー

- $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ (波長可変)

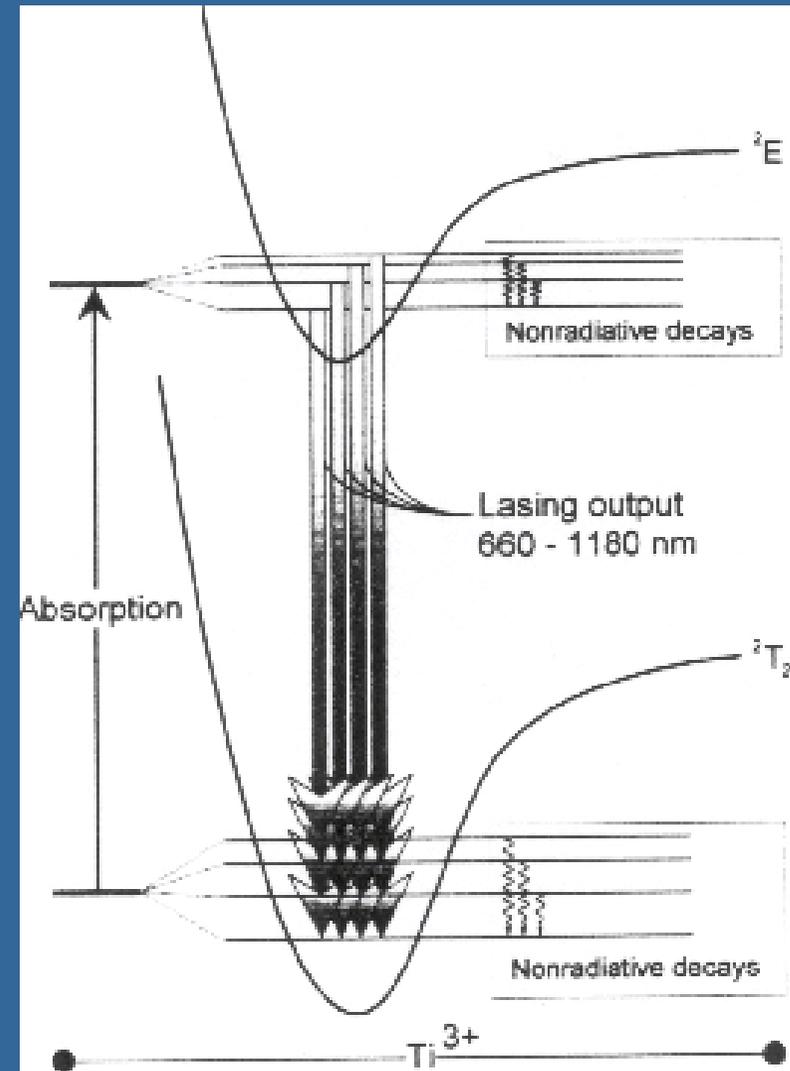


佐藤研のチタンサファイアレーザー

固体レーザー

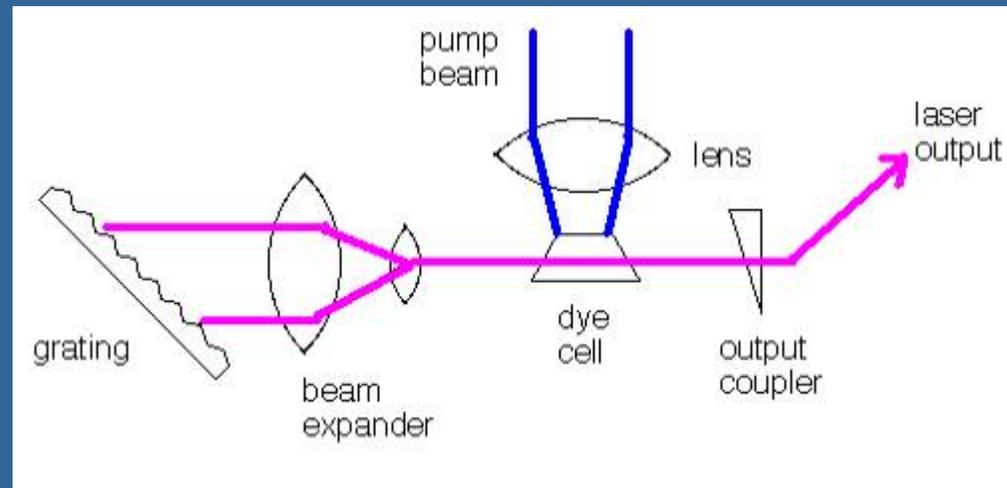
チタンサファイアレーザーの原理

- Ti^{3+} イオンの $3d^1$ エネルギー準位図を示す。
- 図において、 2T_2 準位が基底状態、 2E 準位が励起状態である。
- 非常に接近した多数のバイブロニック準位(フォノンと結合した電子準位)が純粹の電子準位の幅を広げている。
- 電子遷移とバイブロニック遷移の強い混成により、チタンサファイアレーザーはバイブロニックレーザーとも呼ばれている。
- 出力波長は、660から1180 nmにおよんでおり、現存するレーザーのうちで最も広いチューニング範囲をもっている。



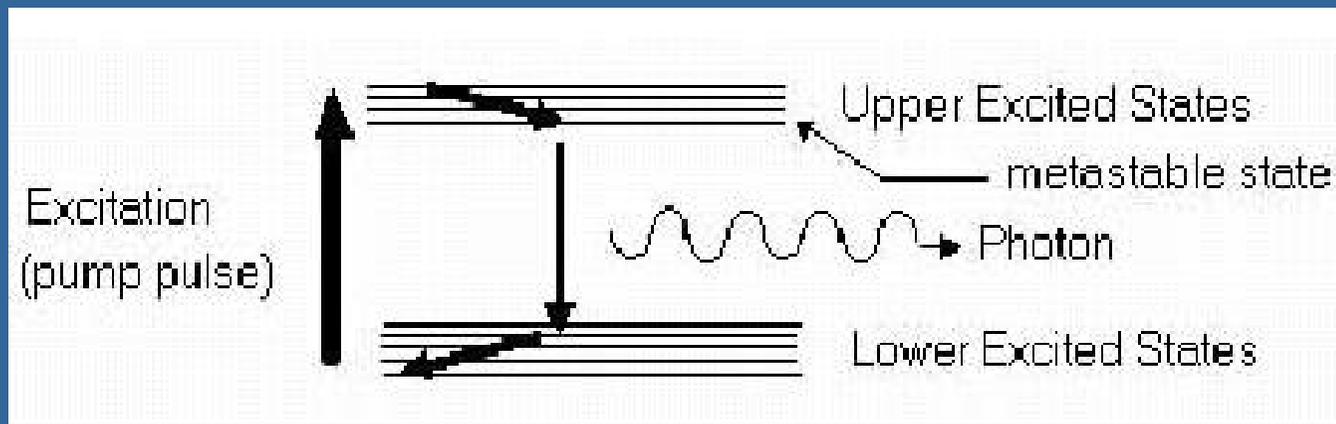
液体レーザー 色素レーザー

- 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。



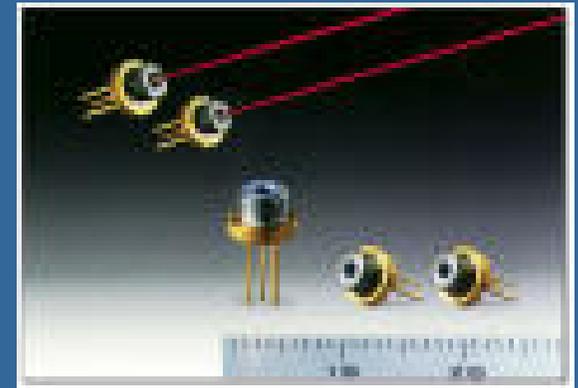
液体レーザー 色素レーザーの原理

- 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。なぜならバイブ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バイブロニック準位に移る。
- 誘導放出は、基底状態の最も高いバイブ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。

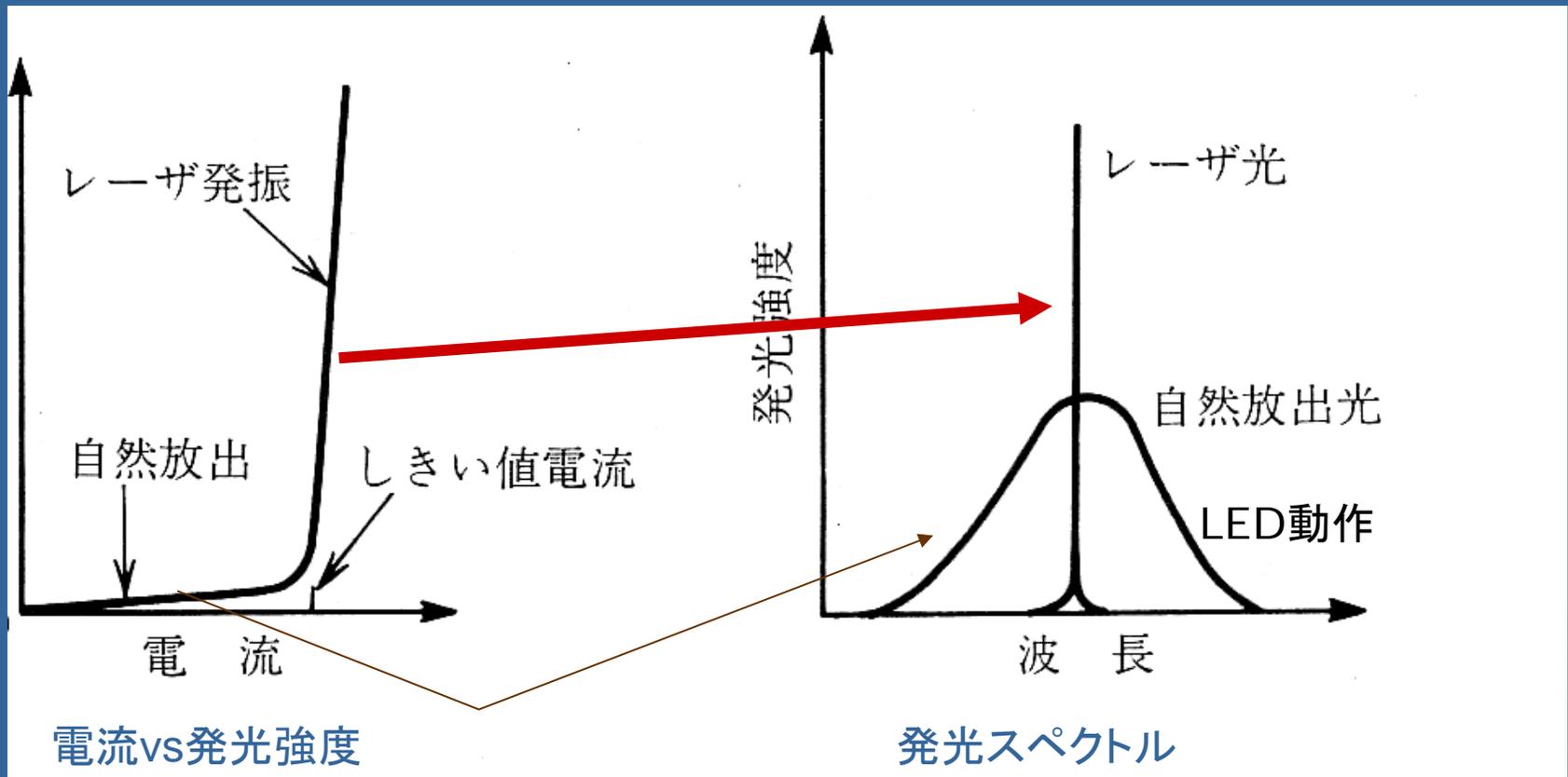


6. 半導体レーザー LD (laser diode)

- 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。



半導体レーザーの動作特性



半導体レーザーの材料

- 光通信帯用: $1.5 \mu\text{m}$; GaInAsSb, InGaAsP
- CD用: 780nm GaAs
- DVD用: 650nm GaAlAs MQW
- 次世代DVD用: 405nm InGaN

バルク基板にMOVPE、MBEなど気相成長によって薄膜をエピタキシャル成長している。

MOVPE: metal-organic vapor phase epitaxy
MBE: molecular beam epitaxy

エピタキシャル成長

- エピタキシャル成長とは、単結晶基板上に結晶方位が揃った単結晶の薄膜を成長させる方法のことである。
- エピタキシで得られる薄膜結晶は、バルクの結晶に比べ結晶性、純度ともに優れており、また極めて薄い結晶膜や複雑な多層の結晶構造を作り出せることから、特に化合物半導体の分野では不可欠な技術となっている。
- 原料物質の形態、成長に利用する原理により、気相エピタキシ、液相エピタキシ、分子線エピタキシなどの手法がある。

ホモ接合とダブルヘテロ構造

- 活性層(GaAs)をバンドギャップの広い材料でサンドイッチ:ダブルヘテロ(DH)構造

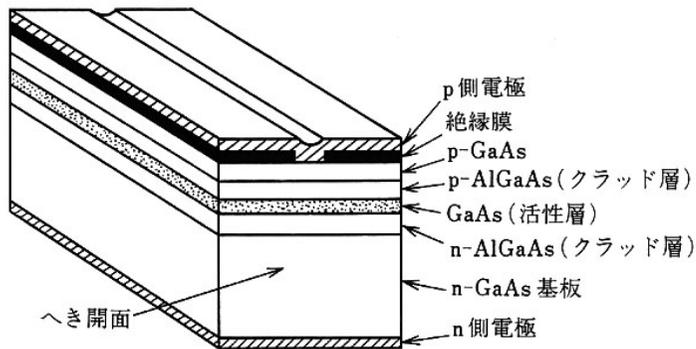
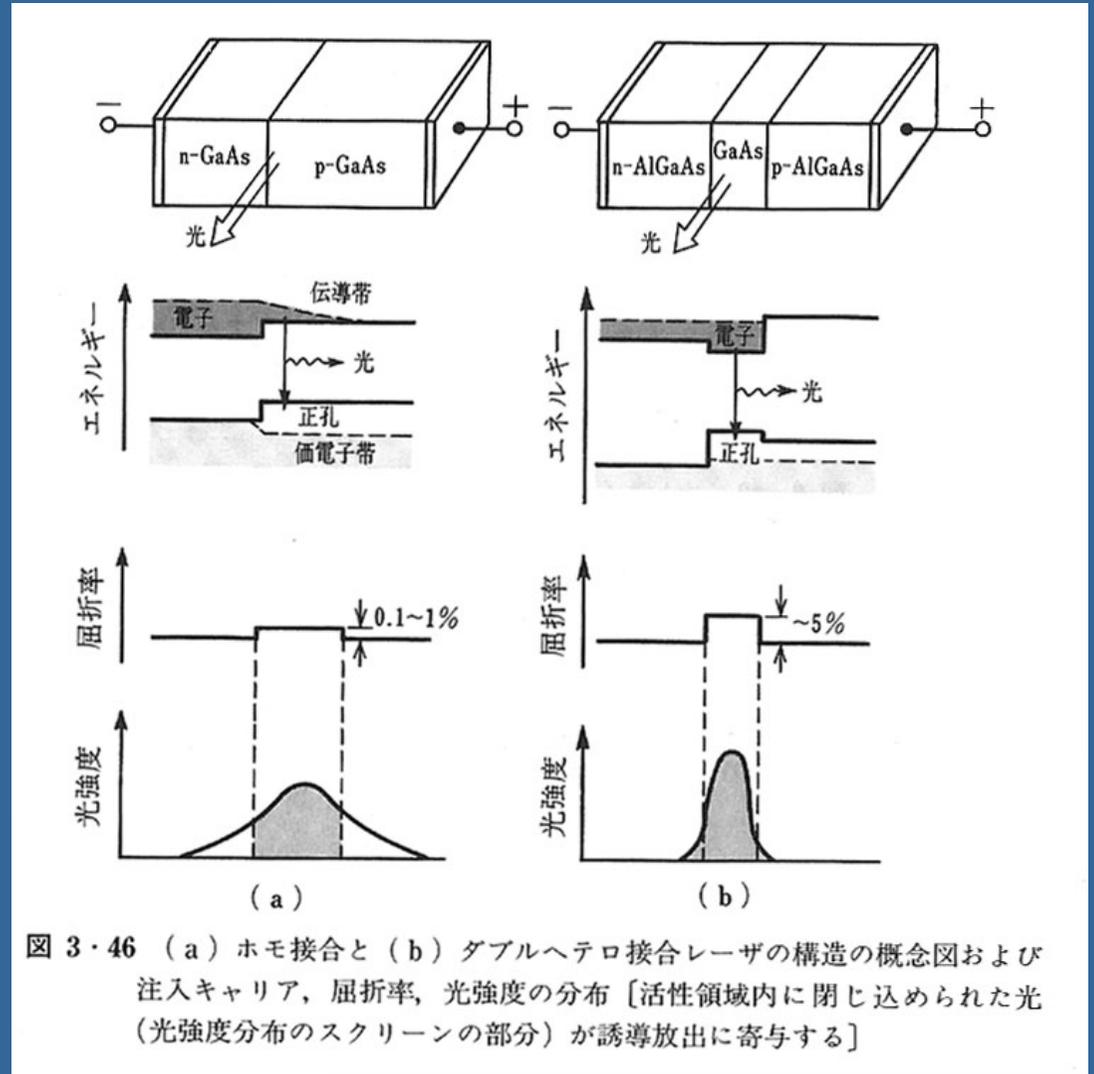


図 3・48 ストライプ形ダブルヘテロ接合レーザー



DHレーザー

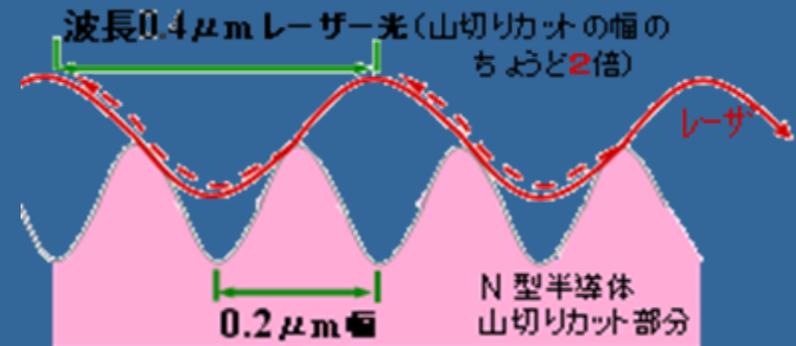
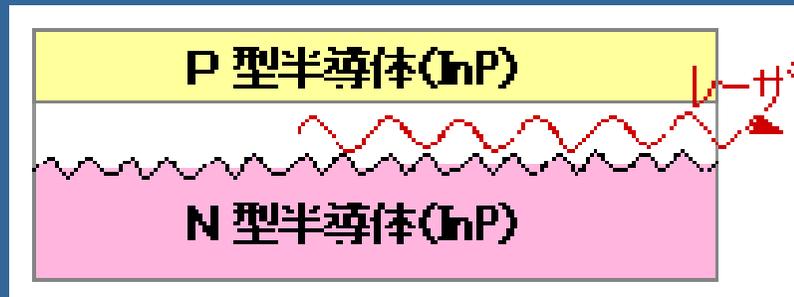
- 光とキャリアの閉じこめ
 - バンドギャップの小さな半導体をバンドギャップの大きな半導体でサンドイッチ: 高い濃度の電子・ホール活性層に閉じこめ
 - 屈折率の高い半導体(バンドギャップ小)を屈折率の低い半導体(バンドギャップ大)でサンドイッチ: 全反射による光の閉じこめ



DHレーザーを発明した
Alferov博士と故林巖雄
博士

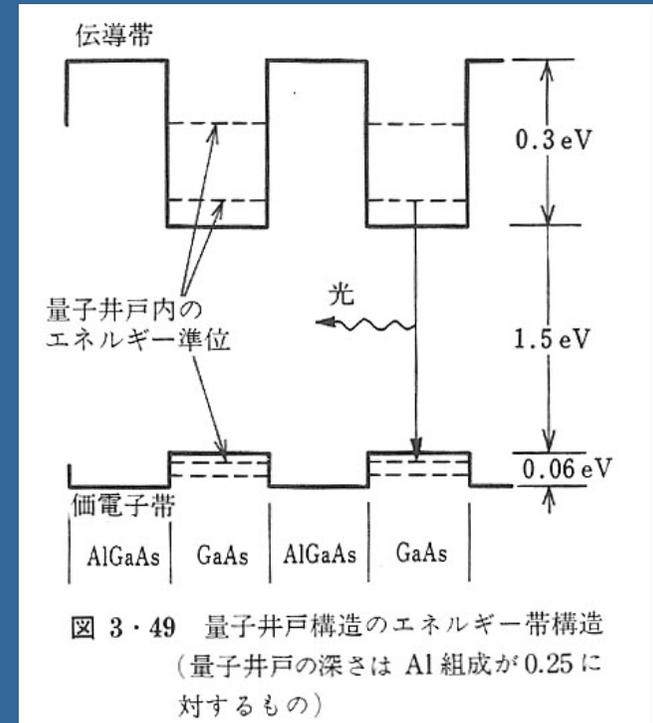
DFBレーザー

- 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ます)



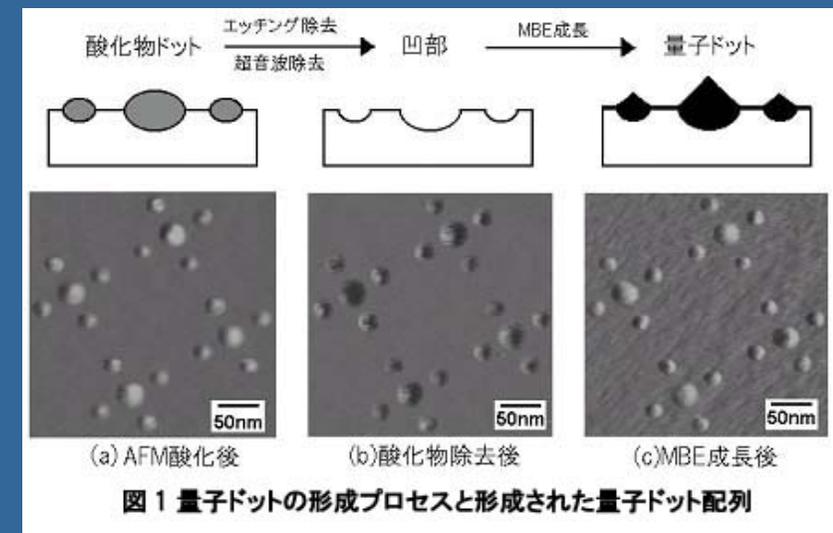
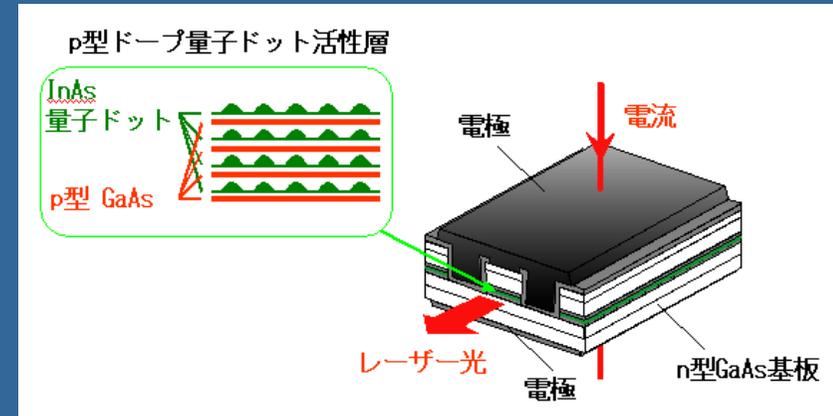
量子井戸レーザー

- 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。



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、一対の正孔と電子が効率よく再結合を行うことができる。
- なお、一対の電子と正孔の再結合では光子が一つしか発生しないため、活性層では量子ドットがたくさん並んだアレイ構造になっている。



実用化されたQDレーザー

- 東京大学と富士通株式会社は、量子ドットを用い、従来の半導体レーザーでは不可能であった、温度による光出力特性の変化を抑制した量子ドットレーザーの開発に成功した。
- 開発した量子ドットレーザーは、温度による光出力の変動が非常に小さく、レーザーの駆動電流を調整することなく、 20°C から 70°C の範囲で、毎秒10ギガビットの高速動作を実現した。

物性工学概論これからの予定 (変更することがあります)

1. 光エレクトロニクスと材料

1. (今回)レーザーの原理と応用
2. (6/20)光通信と材料
3. (6/27)光ディスクと材料
4. (7/04)ディスプレイと有機材料

2. スピンエレクトロニクスと材料

1. (7/11)磁性の基礎
2. (7/18)ハードディスクと光磁気ディスク
3. (7/25)スピンエレクトロニクスデバイス

3. 期末テスト(8/1)

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。