

半導体レーザとその応用

大阪大学工学部 北 島 巖, 山中千代衛*

まえがき

固体レーザ, ガスレーザについて, 1962年秋にカリウム砒素 p-n 接合への電流注入によって発振した半導体レーザ¹⁾は, その後結晶作成, ダイオード作成の技術向上とあいまって, その発光効率が格段に上昇し発光強度も増大した。

さらに1964年には電子ビームによる半導体結晶の直接励起²⁾, 1965年には光励起³⁾の成功があり, p-n 接合を形成できない物質にでもポンピングが可能となって発光波長領域が格段に広がった。

表1. は現在までに成功している半導体レーザとその励起方法の一覧である。短波長側レーザは電子ビーム励起によってのみ実現されていることに注目したい。将来さらに多くの物質で励起が成功するものと思われる。

一方応用面よりみると, ダイオードレーザに関しては小型軽便であり効率が高く動作が容易なこと, 励起状態の寿命が短かく又連続動作が可能なこと等の利点から, ロケット搭載装置や光スイッチング素子などとして用いられ, 今後オプトエレクトロニクスの分野でますます重要になるものと思われる。

1. 半導体レーザの発光機構

半導体結晶の電子エネルギー構造は, 一般に Ge, Si 型と GaAs 型に分けられる。前者は図1aでみるように伝導帯の底部が, 充満帯の頂部と一致しないX点及びL点に存在する場合であり, 光学遷移には運動量保存のため音響量子の関与が必要である。これは2次過程であるので遷移確率は非常に小さい。後者は図1bでみるように伝導帯の底部と充満帯の頂部が一致している場合であり, P点に近いところで電子, 正孔の再結合の直接遷移が行われる。発光現象を伴うのはこの直接遷移の場合である。

勿論この場合でもドナー (donor) 及びアクセプター (accepter) としての不純物準位が発光の機構に関与し, band gap のエネルギーに影響して発光波長を変化させ

る。電子と正孔の effective mass が大きく違いかつ伝導帯の複雑さと充満帯の単純さの故に帯内における1個の電子と正孔の働きは大きく異なるのである。図2で示

表1 半導体レーザとその励起方法⁴⁾

材 料	波長 (温度)	励 起 法
ZnS	3245 Å (4.2°K) 3300 Å (77°K)	E. B (電子ビーム) "
ZnO	3757 Å (77°K)	"
CdS	4950 Å (77°K) 5280 Å (327°K)	" , 光 "
ZnTe	5280 Å (12°K) 5330 Å (110°K)	" "
CdS _x Se _{1-x}	5000 Å (4.2°K) ~6900 Å (77°K)	" , 光
GaSe	6160 Å	E. B
CdSe	6917 Å (77°K)	"
CdTe	7840 Å (15°K)	"
Ga _{1-x} Al _x As	6400 Å ~8400 Å (77°K)	p-n "
GaAs _{1-x} P _x	6380 Å (77°K) ~9000 Å (300°K)	p-n E.B (7020 Å)
GaAs	8300 Å (77°K) ~8950 Å (300°K)	(p-n, E.B, Avalanche, 光)
InP	9070 Å (77°K)	p-n
InP _x As _{1-x}	1.6 μ (77°K)	"
In _x Ga _{1-x} As	1.77 μ (1.9°K) 2.07 μ	" "
GaSb	~1.6 μ (20°K)	p-n, E.B. 光
InAs	3.15 μ (77°K) 3.0 μ (10°K)	p-n, E.B 光 (GaAs)
Te	3.8 μ (77°K)	E. B
Hg _x Cd _{1-x} Te	3.76 μ ~4.14 μ	光
PbS	4.5 μ (10°K)	p-n E.B (4.2°K)
InSb	5.2 μ (10°K)	p-n E.B, 光 (GaAs)
PbTe	6.5 μ (12°K)	p-n E.B 光
PbSe	8.5 μ (12°K)	" " "
Pb _x Sn _{1-x} Se	10.2 μ (77°K)	p-n
Pb _x Sn _{1-x} Te	11~16 μ (12°K)	p-n, 光

* 大阪大学工学部電気科教授

は正孔の effective mass が大きいことから Fermi 単位
の下降度は小さくむしろ伝導帯へ励起した電子と充満帯
中の正孔とが exciton 効果に似た働きを示し band shrinkage
を行うので、この場合はアクセプタ濃度が多くな
れば電子正孔の再結合発光に対しては見かけ上 band
eap が小さくなっているように振舞い、発光エネルギー
は小さくなり波長は長波長側へ移動する。この効果は光
励起、電子ビーム励起の際に顕著に現われる。

ところで以上は半導体結晶の発光の一般的記述である。
図4に示すようにこの再結合発光において電子と正孔の
平均エネルギー (quasi-Fermi準位) F_n と F_p との差が
放出光子のエネルギー $h\nu$ より大きいとき、即ち $(F_n - F_p) > h\nu$ のときには誘導放出による再結合が自然放出

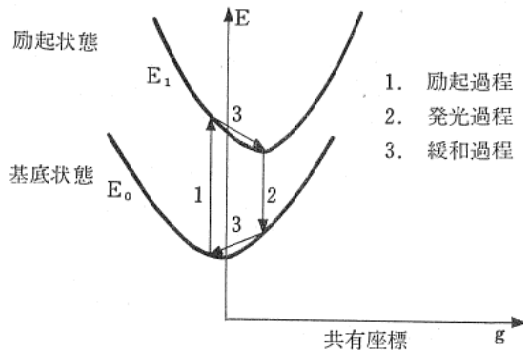
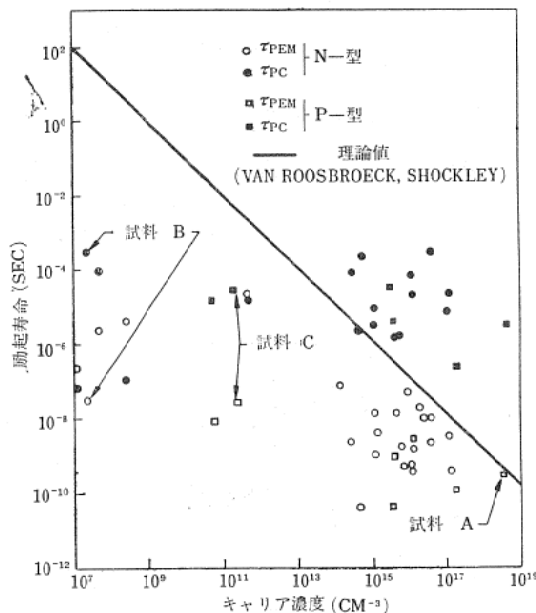


図5 発光の遷移過程



試料A Mn doped
試料B Te "
試料C Zn "

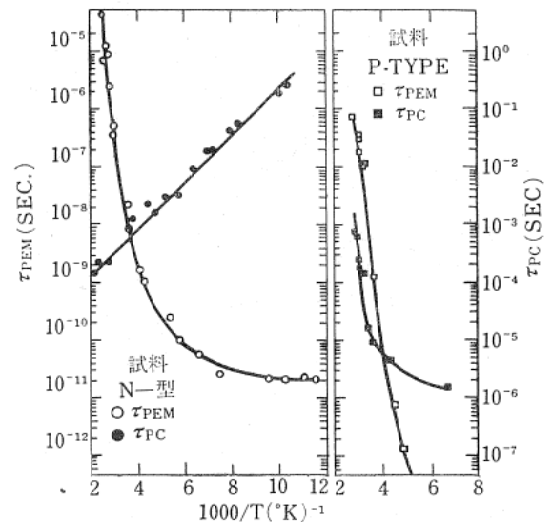
τ_{PEM} photoelectromagnetic 効果の励起寿命
 τ_{PC} photoconductivity の励起寿命

図6 GaAs のキャリア濃度による励起寿命⁶⁾

によるそれに打ちかつようになることができる。これが
population inversion によるレーザ発振の条件である。

この条件は半導体結晶の場合には電流注入によって直接
に伝導帯へ多量の電子を詰め込むことができるので容易
に実現される。

図5は励起と発光の過程を示す。励起状態における緩
和時間がレーザのパルス応答性を示すことになる。一般
に半導体結晶では励起状態にある電子の寿命は短かく、
図6に示す如くキャリア濃度が多く不純物単位と伝導帯
の底が重なっているときは $10^{-8} \sim 10^{-10}$ sec の速応答性をも
っている。これは他の固体レーザ、ガスレーザ、液体
レーザでは得られない利点であろう。図7は温度によ
って、励起寿命が変化する様子を示したものである。光電
効果 (PC) による値と Photo Electro Magnetic 効果
(PEM) による値が異なっているのは注目すべきこと
である。



τ_{PEM} photoelectromagnetic 効果の励起寿命
 τ_{PC} photoconductivity の励起寿命

図7 温度による励起寿命の変化⁶⁾

2. 半導体レーザの励起方法

1. 電流注入励起

図8のようなダイオード構造の結晶に電極をつけ、順
方向に電流を注入すると接合面にて電子正孔の再結合が
起り光が放射される。この接合面で生じた光は接合部の
屈折率が n 側及び p 側の屈折率と違うことから、接合面
自身が light path となり光は共振器を構成している端
面間を往復する。誘導放出による発光利得が結晶内での
吸収その他による損失に十分打ち勝つようになればレー
ザ作用を起す⁷⁾。

ダイオードのエネルギー帯構造を図9に示す。外部電界

がかかっていないときはn側とp側の Fermi 準位 F が一致して平衡を保っているが、図9bに示すように順方向に電圧 V をかけると barrier が縮少しn側の伝導帯上に励起されていた電子はp側の伝導帯上へ侵入してp側の正孔と再結合し発光する。図10に示すように順方向電圧をかけると同時に多量の電子をn側に注入してやればp側に近い接合部において population inversion の条件が満され誘導放出によるレーザ作用が生じる。レーザ発振に必要な最小電流を threshold current といって J_{th}

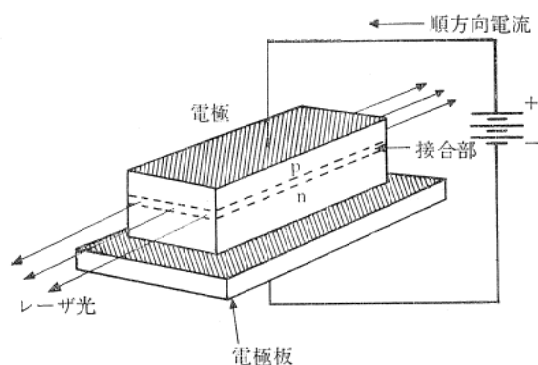


図8 p-n 接合レーザの構造

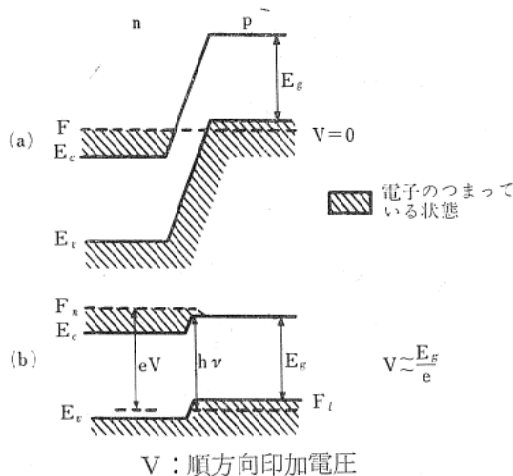
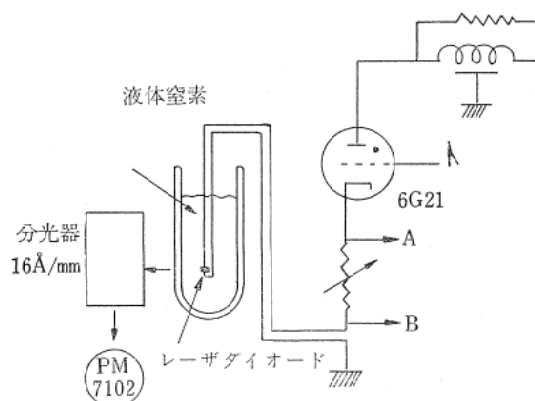


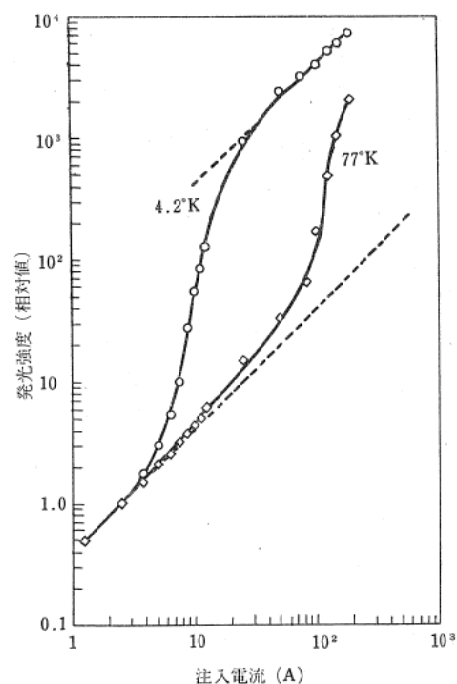
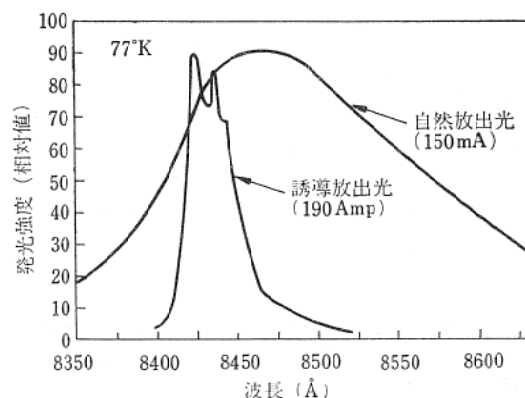
図9 p-n 接合のエネルギーダイアグラム

図10 電流注入型レーザの実験図⁸⁾

で表わす。GaAs p-n 接合レーザにおける電流注入量と発光強度の変化を図11に示す。電流値が J_{th} に達するまでは発光強度も比例して増大するが、 J_{th} を越えると発光強度は急に大きくなり、又図12でみるように、スペクトル巾も急減してレーザ発振であることを表わしている。

図13は注入電流量によって発光強度が変化していることを示していると共に、スペクトルピークが高エネルギー側へ移動していることを示している。これは先に述べた band filling 効果^{10,11)}のためであり、伝導帯の底がだんだん詰ってきて、quasi Fermi 準位が上昇したためと考えられよう。図14には同じく電流注入量による発光エネルギーの変化を示したのであるが不純物の種類によって伝導帯の底に重なっている不純物準位の広がりの違いが現われていて興味深い。

図15は発光温度と発光エネルギーの関係を示したもの

図11 注入電流量による発光強度の変化⁹⁾図12 発光スペクトルの変化77°K⁹⁾

である。電流注入による温度上昇を考慮して計算した値が破線で示されている。温度が上れば結晶の格子間隔の拡大による結合エネルギーの減少から帯間エネルギーの減少はこうにして示される。又温度が上昇すると発光効率は低下し threshold が上がる¹³⁾。

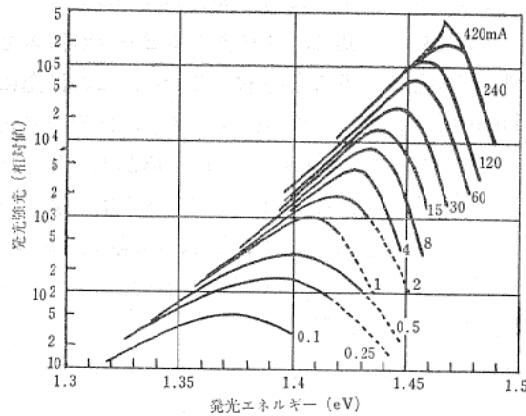


図13 注入電流量の発光スペクトルの変化¹⁰⁾

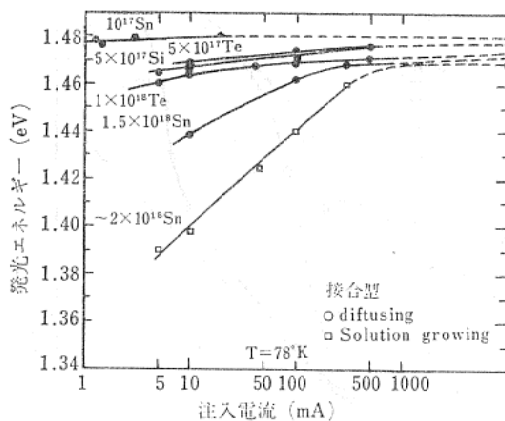
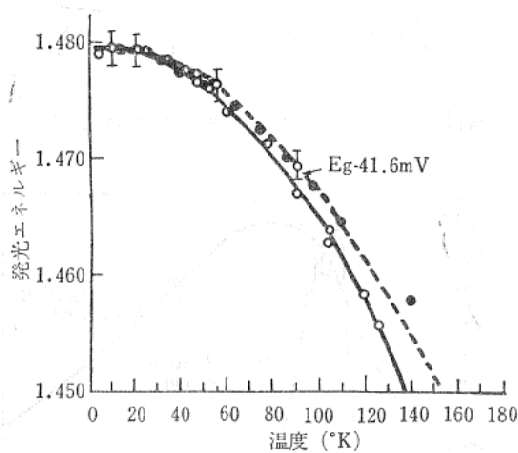


図14 注入電流量による発光エネルギーの変化¹²⁾



- threshold current 上のレーザ発光のエネルギー
- 電流パルスによる温度上昇を補正した値

図15 温度による発光エネルギーの変化¹³⁾

さて元に戻って考えてみるに電流を結晶に注入し発光を観測するのに、以上のようなダイオード構造でなければならないということはない。かなり以前より半導体結晶に針を立てて電流を注入すれば針の先端付近の結晶表面より発光が観測されることが報告されている¹⁴⁾。昔に習うと言おうか最近では、大出力レーザ開発の1つの工夫として、共振器端面をもつ半導体母結晶に単に電極をつけ、大電流を注入して結晶全体が発光する現象 (superradiance)¹⁵⁾を観測している。ダイオード構造ではどうしても active region が狭く発光の部分集中とそれによる熱的な端面破壊があり、発光出力の限界がさけられないので、結晶全体を発光させる工夫がなされているわけである。

2. 電子ビーム励起

1964年 Basov ら²⁾によって最初に成功をおさめたこ

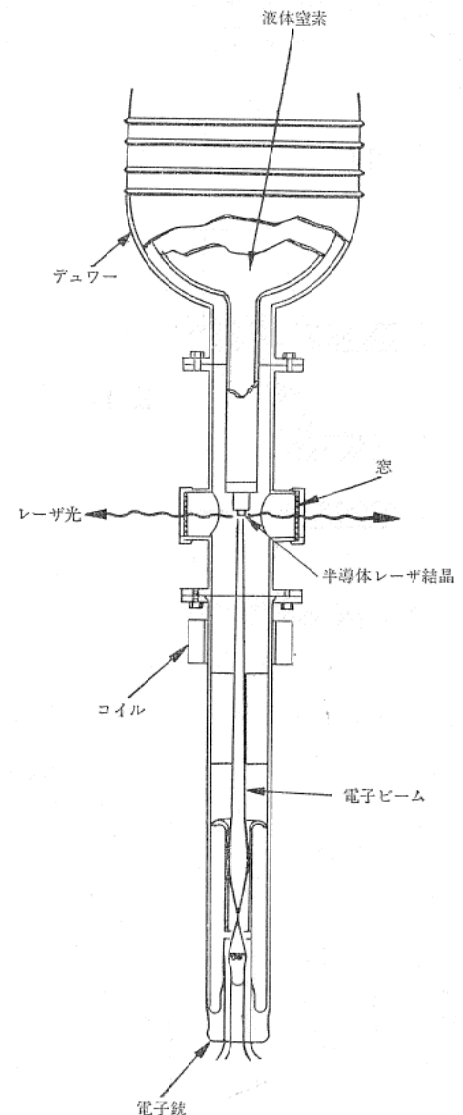


図16 電子ビーム励起による半導体レーザ装置

の励起方法は主に2つの利点がある。まずダイオードを形成できなくて電流注入型励起の不可能な物質に対しても、ポンピングが可能になったこと、もう一つは電子ビームの入射エネルギーが大きいので、エネルギーギャップの大きな物質にでも直接励起が可能であるということ。即ち半導体レーザとして紫外領域のレーザ光が獲得できるということである。

図16は電子ビーム励起の装置図¹⁶⁾である。結晶の大きさを 1 mm^3 として数 10 keV で数 mA のビームが必要である。ただし、半導体のエネルギーや結晶表面の状態によりかなり threshold の値は違ってくるものと思われる。図17は Cusano ら¹⁷⁾による 77°K のGaAsの励起の実験結果である。多重モード発振の様子と不純物濃度によるスペクトルの変化が示されている。

図18は発光機構のところで述べた不純物濃度と発光エネルギーの関係を示したものである。濃度が高くなるとBurstein shift 及び band shrinkage の効果が大きく現われてくるのがみられる。

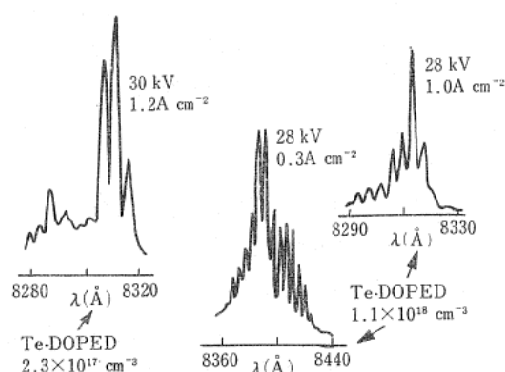


図17 電子ビーム励起によるレーザ発振モードスペクトル¹⁷⁾

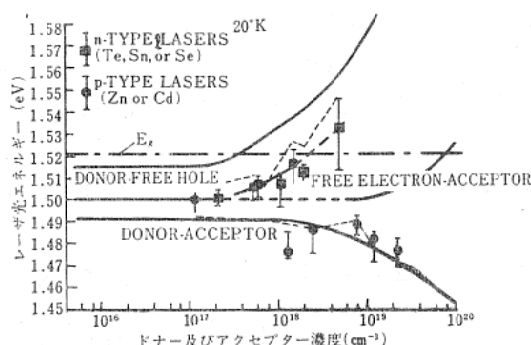


図18 ドナー及びアクセプター濃度によるレーザ発光エネルギーの変化¹⁸⁾

3. 光励起

電子ビーム励起の成功に刺激されて、レーザ光を用いた半導体結晶のポンピングが1965年に成功した³⁾。この

方法は当初半導体結晶の光学吸収が大きいことから active region の形成が疑問視されていたものであるが、電子ビーム励起の場合と同様にレーザ光の照射面として側開面を用い、結晶表面に近いところに active region を形成することに成功している。さらに励起光の波長を band edge に近いものをえらんで吸収係数を小さくし active region を大きくすることも可能になっている。

1965年 Phelan ら¹⁹⁾は図19に示すように、GaAs ダイオードレーザを励起光源として用いて InSb 結晶のポンピングに成功した。GaAs からの波長 0.84μ の光を電流を増すことによって増大させると、図20にみるように InSb からの 5.3μ の発光が急に強く立上ってくるのが観測された。これを分光してみると確かにスペクトル巾が狭くなっており、レーザ光であることが明らかになった。その後このような手法で GaAs ダイオードレーザ

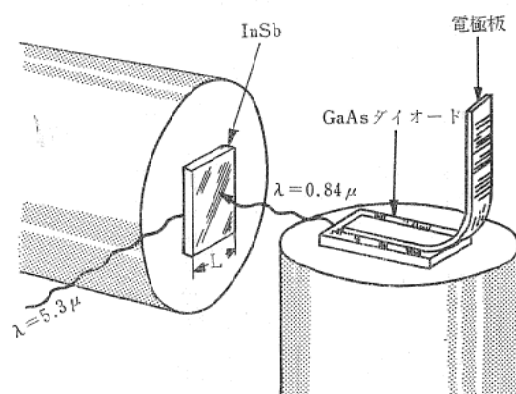


図19 GaAs p-n 接合レーザ光による InSb 結晶のポンピング¹⁹⁾

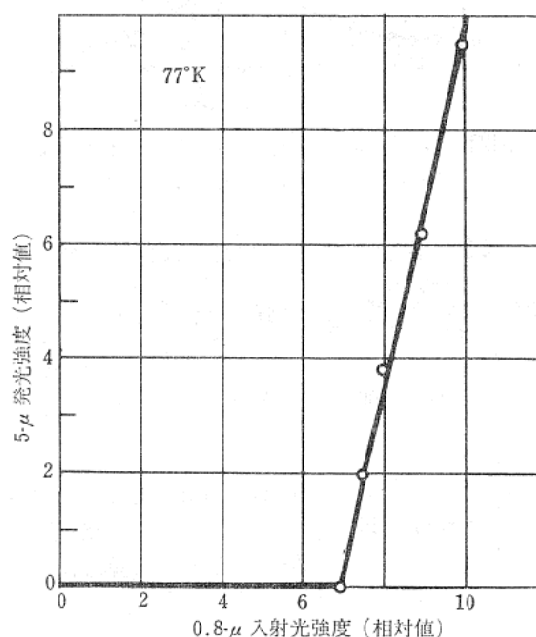


図20 GaAs レーザ光による InSb レーザの発光強度依存性¹⁹⁾

を InAs や PbTe の結晶の光励起の光源として用いてレーザ発振に成功している。

一方ソ連でも Basov らは同じ頃 Qスイッチルビーレーザを用いて 77°K における n 型 GaAs 結晶の光励起に成功したことを報じている²⁰⁾。ルビーレーザ光を 3 MW/cm² にまで強めたとき GaAs からの発光強度が増大しスペクトル巾が 20 Å にまで狭くなった。筆者ら²¹⁾の実験室でもその頃別個に光励起レーザの可能性を予測し P 型 GaAs 結晶を液体窒素に入れて同様に Qスイッチルビーレーザを用いてレーザ作用に成功した。この場合は液体窒素のルビーレーザ光による Raman 散乱光が吸収端近くの励起光源として働いている可能性もある。実験結果を図 21 に示す。発光強度の増大と共にスペクトルピークが長波長側へ移動しているのが観測されている。これは先に述べたように多量の電子正孔が生成され、P 型結晶に顕著に現われる band shrinkage の効果のためであろうと考えられる。

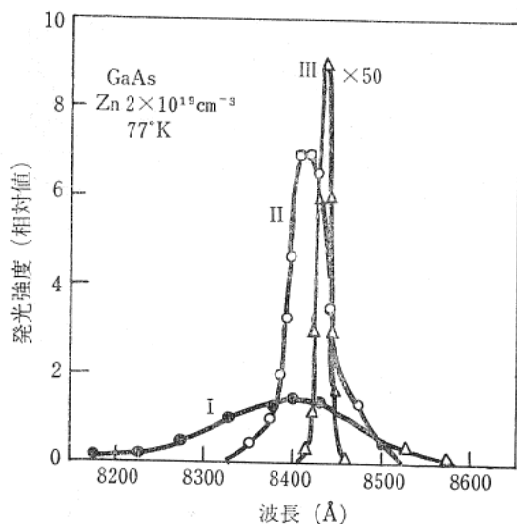


図 21 ルビーレーザ光の励起による p-GaAs の発光スペクトルの変化²¹⁾

表 2 半導体レーザの励起方法とその特徴

励起方法	最大発光出力	最大発光効率	励起物質	特 徴
p-n 接合	50W	80%	Ⅲ-V 化合物	小型軽量 動作簡便 連続発振
電子ビーム	1 KW	35%	Ⅱ-VI 化合物	高電圧装置が必要 真空が必要 連続動作可
			Ⅲ-V 化合物	
光励起	200KW	50%	Ⅱ-VI 化合物	2 光子励起可 レーザ光源が必要 連続動作不可
			Ⅲ-V 化合物	

Basov らは更に Nd ガラスレーザを用いた 2 光子励起によって 5×5×5 mm³ の大きさの GaAs 結晶を励起することに成功し、又ルビーレーザを用いて CdS 結晶の 2 光子励起にも成功したことを報じている。

このような強力なレーザを光源として用いて、半導体結晶に 0.5 mm の厚さの active region を形成できると共に、200 kW に達する発光出力が得られるということは大きな利点である。表 2 に 3 つの励起方法の利害得失をまとめて記載する。

3. 半導体レーザの応用

現在一般に言ってレーザそのものの発振特性や発光機構の研究は一段落つきかけており、これからはそれぞれのレーザの特質を生かした応用研究がなされる段階である。

半導体レーザも励起方法として 3 つの可能性が実現されていていよいよ応用面への期待が大きい。接合レーザに関しては当初よりその小型軽便さや連続的動作の可能性から実用面への開発がまたれているが、指向性がやや劣ること、発光出力が比較的小さいことから足踏み状態であった。しかし最近では計測法の発達と結晶作成の技術改良による大出力レーザの開発などから半導体レーザの実用も今一步の段階になったと考えられる。以下各種励起方法による応用面の可能性と筆者らの計画している応用研究の一部を紹介する。

1. ロケット搭載用大気観測装置

電流注入型接合レーザは小型軽量で操作が簡便なことからいろいろの方面への応用が期待されている。特に宇宙研究方面で有用性が大きいと思われる。筆者ら²²⁾は超高層における大気観測装置に半導体レーザを利用しようと試みているのでその概要を述べる。表 3 に使用した GaAs レーザの特性を示す。

従来は宇宙塵や大気組成の測定は気球やロケットの打ち上げによる直接採集の方法がとられていたが、指向性単色性、出力強度のすぐれたレーザの出現によって散乱光計測によるそれらの測定が始められつつある。すなわ

表 3 GaAs p-n 接合レーザの特性 (77°K)

発 光 波 長	8400 Å
出 力	≈ 5 W
ビーム拡がり	5 ~ 15°
効 率	≈ 30%
応 答 性	10 nsec
温 度 効 果	20 Å/°K
電 流 密 度 (Jth)	1000 A/cm ²

ち、Fioccoらによってルビーレーザー光を地上より射出しその後方散乱から dust の分布を測定する実験が行われたが、半導体レーザーをロケットに搭載し、レーザービームの散乱計測により、より直接的に詳細なデータを得る方がすぐれている。

後方散乱によるレーザーレーダ方程式は一般に次式で表わされる。

$$\frac{P_s}{P_o} = \frac{KT^2 N \sigma A}{R^2}$$

ここで P_o , P_s はそれぞれ送信受信パワー、 K は受信係率、 T は大気中の透過率、 A は受信面積、 N は粒子密度、 σ は後方微分散乱断面積、 R は受信系から対象までの距離である。 $K=1$, $T=1$, $A=100\pi\text{cm}^2$, $R=10\text{m}$ とし、 $N\sigma=10^{-12}\text{cm}^{-1}\text{sterad}$ を代入すると $P_s/P_o \sim 10^{-13}$ が得られる。発光出力100W程度の半導体レーザーを用いると、 $R_s \sim 10^{-11}\text{W}$ となり、光電子増倍管の雑音と同程度になるので、光電子計数計測法を用いて十分測定可能である。夜光は狭帯域干渉フィルターを用いて十分除去できる。

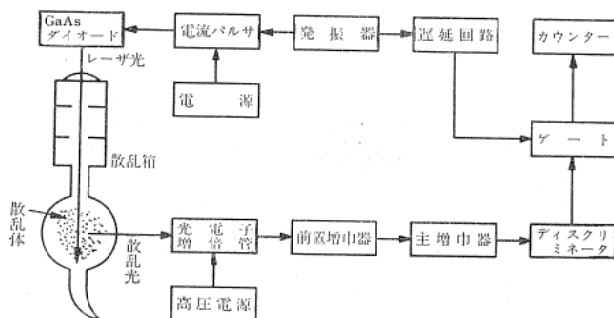


図22 半導体レーザーによる粒子の散乱測定

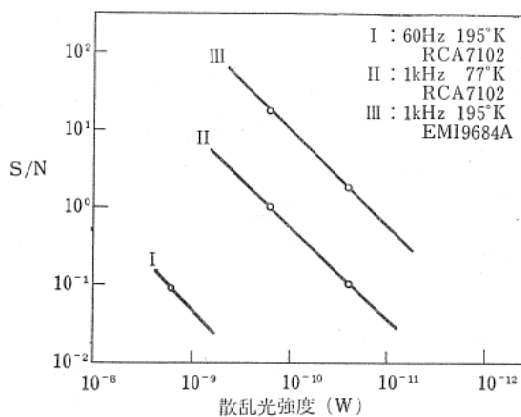


図23 半導体レーザーを用いた光電子計数計測による空気90°散乱光測定結果、レーザー光パルス巾1μsec、レーザーダイオード冷却77°K、発振繰返し数60Hzと1kHz、光電子増倍管冷却温度195°Kと77°K

図22は実験室内における大気の90°光散乱の測定系統図である。気圧と測定条件をかえて観測した結果を図23に示す。又予め粒径の違う粒子を使って、散乱光強度より粒径分布を割出す可能性が確かめられた。

2. Scanatron Laser

電子ビームによる半導体の励起については、電子ビームをブラウン管のようにscanさせ縦横に配列している半導体結晶を順次励起しようとする提案がある。図24はその模式図である。これによると指向性単色性のすぐれた画面伝送ができるであろう。

図25は radiating mirror といわれる電子ビームとレーザー光の変換装置である。

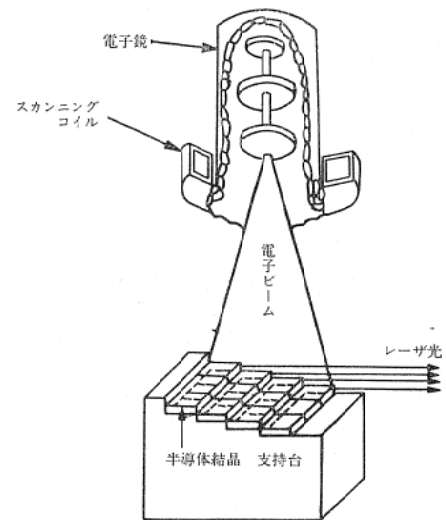


図24 電子ビーム scan による多配列半導体結晶のレーザー発光²³⁾

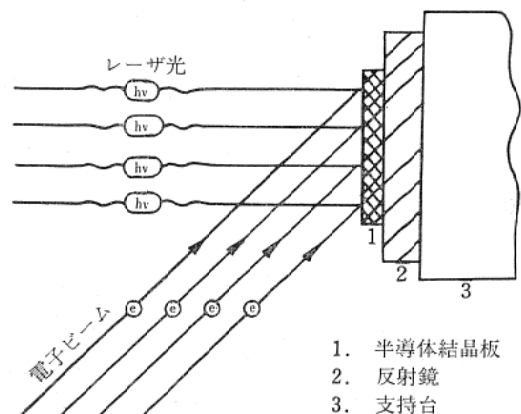
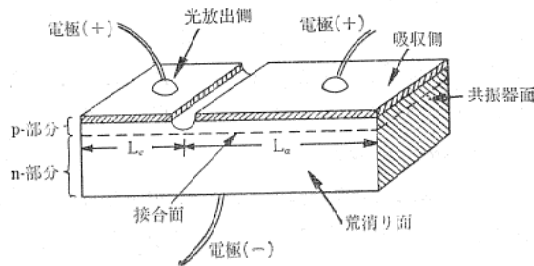
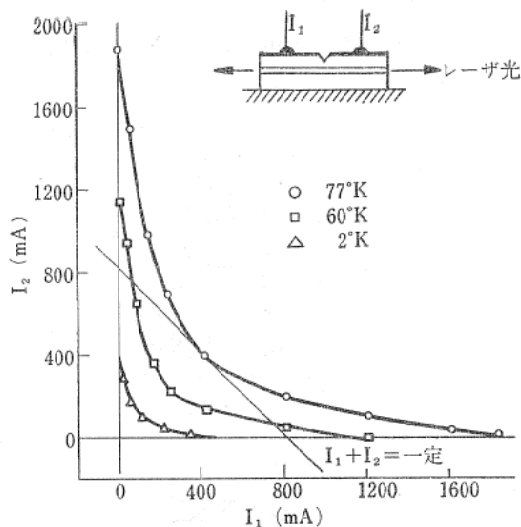


図25 radiating mirror²³⁾

3. Composite Laser

p-n 接合レーザー間の光結合特性は、近接した2個のダイオードを同時に発光させて調べられている²⁴⁾。特に直線配列の結合を強めるために図26に示すような結合型レーザーが考えられた。この結合レーザー (Composite Laser)

図26 Composite Laser (結合型レーザー)²⁵⁾図27 結合型レーザーの threshold 電流²⁶⁾

は光の結合性を調べる外に接合レーザーにおける電流注入の一樣性が threshold を下げる働きを調べる上でも重要な意味をもつ、すなわち左右の接合面に一樣な密度で電流が注入されるとき最も threshold current が小さくなり得る。故に p-n 接合レーザーの効率を上げるためには接合面の均一性が重要であることが結論される。この模様を図27に示す。左右の接合面積が等しいときは、各々の電流 I_1 I_2 が等しいとき $I_1 + I_2$ は最小になり $I_1 \neq 0$ $I_2 = 0$ のとき或いは $I_1 = 0$ $I_2 \neq 0$ のときは $I_1 + I_2$ が最大になっているのが理解される。さてこの構造のダイオードにおいて、光放出側の電流 I_1 を 0 とし、吸収側の電流 I_2 を threshold ぎりぎりに抑えておき、そのような状態において発光側の接合に電流 I_1 を極く少量トリガとして加えるならば $I_1 + I_2$ は threshold を越し、ただちに全接合面がレーザー発光を行なうであろう。光放出側接合部に電流トリガを加える代りに、図28に示すようにもう 1 個の接合レーザー光で光放出側接合面を励起しても同じことである。すなわち外部光が電流によって光放出側の接合面の quasi-Fermi 準位を上げてやれば、吸収側の接合部の電流注入による発光が、光放出側接合面の吸収端の短波長側移動から全接合面を透過することが可

能となり端面間往復による誘導放出によりレーザー発振が成立するわけである。図29はこの結合レーザーにおけるトリガ電流とレーザー発光の追従性を示したものである。点線は吸収側接合部に電流が流れていないときの自然発光の立上り時間であり、実線は予め吸収側に threshold ぎりぎりの電流が注入されているとき、発光側にトリガ電流を注入したときのレーザー光の立上り時間である。横軸は I_2/I_1 を目盛っているがトリガ電流が小さい程発光の応答性は良いことが示されている。

それ故この結合レーザーは速応答性のスイッチング素子として用いられることが期待される。又発光側接合部へのトリガ電流により 2 安定動作が可能であろう。

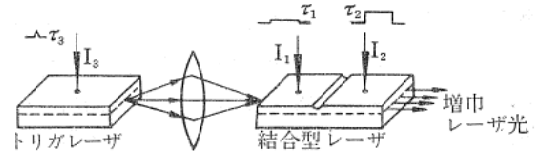
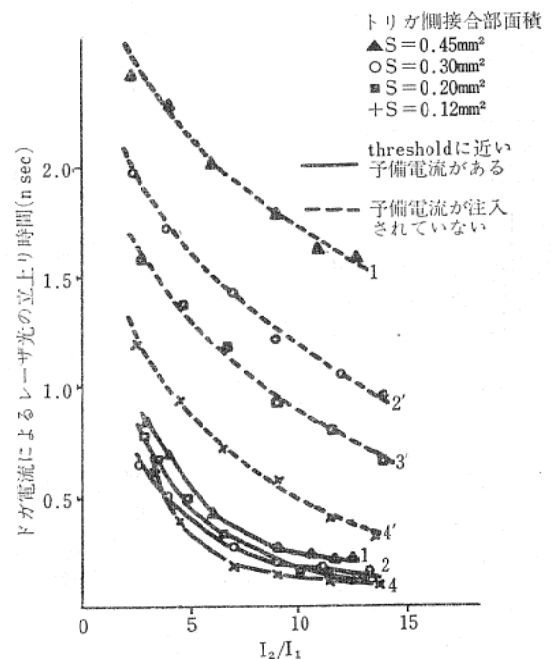


図28 光による結合レーザーの動作

図29 トリガパルスとレーザー発光の時間ずれ²⁷⁾

4. コヒレント・トリガ装置

発光効率が高く且つ動作面で利点の多い p-n 接合レーザーを何とか改良して大出力レーザーを実現したいというのは実用面からみても当然の要望であろう。そこで先ず簡単に考えつくのが多くのダイオードレーザーを同時に発光させることである。ここで時間的厳密さを考慮すれば、図30にみるように、トリガ用レーザー光により多くのレーザーが同時に動作することがレーザーのコヒレント性からみ