

## 電子線励起レーザー

難 波 進  
川 辺 光 央

大阪大学基礎工学部教授

## 1. はじめに

1954年アンモニアによるレーザーが開発されてから間もなく、物理学者は固体からの光学レーザー、すなわちレーザーについて検討を開始した。半導体は可視および赤外の領域で発光するため、これについての可能性も考えられた。アメリカの Lincoln 研究所と、ソ連の Lebedev 物理研究所 (Lebedev Institute) において各々独立して半導体におけるレーザー動作の研究が始められた。最初に半導体から誘導放出を観測したのは Keyes と Quist で、彼らは  $77^{\circ}$  において GaAs ダイオードから、誘導放出に特有のスペクトル線巾の狭化を伴った強い発光を観測した。p-n 接合型の半導体レーザーが最初に報告されたのは1962年 General Electric の研究グループからであった。この成功より前にソ連の Basov によって、電子線励起の方法によって半導体からレーザー発振の得られる可能性のあることが報告されており<sup>1)</sup> Lebedev 研究所ではこの方法による研究が進められていた。この方法は試料を研磨あるいは劈開などの方法により、試料の壁面を使って光学共振器を形成する。この点は接合型レーザーと同じであるが、接合型レーザーでは p-n 接合に順方向に電流を流すことにより、少数担体を注入し、活性領域に電子正孔対を作るのに比し、電子線励起の方法では、試料表面に、数 10 keV ないし 2~300 keV の高速電子線を照射して、電子-正孔対を作る。この様に励起方法が全く異っているため、それに伴う長所・短所がいくつか考えられる。それらを接合型レーザーと比較して列記すると次のようになる。

1) 電子線で直接結晶を励起するため、p-n

接合が作れない半導体 (ほとんどの II-VI 化合物) においても有効である。この方法によって、CdS, ZnS, ZnO 等、多くの II-VI 化合物において、レーザー発振が得られている。

2) 高密度の励起が出来るため、必ずしも、不純物濃度の高い試料を用いなくともよい。たとえば約  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  の担体濃度の GaAs においても発振が観測されている<sup>2)</sup>。

3) 接合部でなく bulk を直接励起するため、発振の機構を調べるのに適している。すなわち接合型では、発振の条件が接合の profile (接合形成の時の温度、不純物密度などによって決まる) に左右される。従って電子線励起の方法は接合型の場合より、解析が容易である。

4) 電子線は掃引が容易であるから、レーザーを使った display としての応用が考えられる<sup>3)</sup>。

5) 電子線による、電子-正孔対の creation energy は band 巾の約 3 倍のエネルギーが必要である。従って効率は、接合型にくらべて、低く約 30% が理論的限度である<sup>4)</sup>。この他、試料に当たった電子がはね返され、その時、持ち去るエネルギーや radiation damage<sup>5)</sup> なども効率を低下させる要因となる。

6) 電子線を得るために、高圧電源と真空系が必要で、装置が大がかりになる。

7) 電子線のエネルギーが数 10 keV から 100 keV まで使えるので、光励起のように、物質のバンド巾による制限はなく、適当な試料があれば真空紫外にまでも、短波長側にレーザー光の波長範囲を広げることが出来る<sup>6)</sup>。以上の特徴を利用して、電子線励起によるレーザーは、接合型レーザーと並行して研究さ

れたが、最初に成功したのは、1963年、Basov らで、CdS の発光スペクトルの線巾の狭化の観測であった<sup>7)</sup>。レーザー発振は1964年、フランスの Benoit a la Guillaume らによって InSb および InAs において得られている<sup>8)</sup>。つづいて Hurwitz らによって GaAs においてもレーザー発振が観測され<sup>9)</sup>、その後レーザーを得るために必要な励起の閾値と不純物濃度の関係など、実験および理論面からより詳細な研究へと進んできた<sup>10,11)</sup>。これらのうちでも特に GaAs および CdS について多くの研究がなされ、発振機

構の研究、発振の閾値を下げる努力<sup>12)</sup>、高出力を得る研究などがすすめられてきた<sup>13,14)</sup>。これと同時に、多数の化合物半導体において、広範囲の波長にわたりレーザー発振を得る努力がなされた。現在では、電子線励起の方法によって、誘導放出まで含めると液体 Xe の 1760 Å から PbSe の 8.5 μm までの広範囲におよんでレーザーが得られている。第一表に、現在まで観測されている電子線励起レーザーをまとめて示す。表に示すように半導体以外の物質からもレーザーが得られており、また *p-n* 接合の作れ

第1表 電子線励起レーザー

物質	発振波長 (Å or μ)	温度	効率, 出力	電子線密度, 加速電圧	文献	関連文献
liq. Xe	1760	liq. N <sub>2</sub>		30 A/cm <sup>2</sup> , 700 keV	6	16, 17
ZnS	3291	4.2° K	6.5%, 1.7W	120 mA/cm <sup>2</sup> , 40 keV	54	
ZnO	3757	liq. N <sub>2</sub>	0.1%, 0.4W	24 keV	50	40, 43
ZnSe					36	
CdS	4891	liq. He		200 keV	45	(7, 12, 35, 36, 43, 46, 47, 48, 52, 53, 57, 59, 62, 63, 64, 65, 70, 74, 79, 84, 90)
	4900	110° K	26.5%, 350W	22 mA/cm <sup>2</sup> , 60 keV	13	
	5280	R. T.	0.5%	4 A/cm <sup>2</sup> , 22 keV	58	
		R. T.	200 kW	1400 A/cm <sup>2</sup> , 260 keV	14	
CdS <sub>0.8</sub> Se <sub>0.2</sub>	4900 6900	77° K	11%, 20W at <i>x</i> =0.39	30 mA/cm <sup>2</sup> , 50 keV	55	56
ZnTe	5330	110° K		4 A/cm <sup>2</sup> , 60-80 keV	61	
	5280	liq. He	8%, 90W		60	
Zn <sub>0.8</sub> Cd <sub>0.2</sub> Te	5270 ~7900	80° K	5% <i>x</i> =0.05	5 A/cm <sup>2</sup> , 60-80 keV	78	
GaSe	5925	liq. N <sub>2</sub>		200 keV	20	
CdSe	6800	liq. He	8%, 16W	1.5 A/cm <sup>2</sup> , 50 keV	48	35, 47, 62, 71
	6900	liq. N <sub>2</sub>	5%, 10W			
◦ GaP <sub>0.8</sub> As <sub>0.2</sub>	7040	liq. N <sub>2</sub>		2.3 A/cm <sup>2</sup> , 50 keV	76	19, 42
CdTe	7850	10° K ~15° K 80° K	10% 30%	1.1 A/cm <sup>2</sup> 2 A/cm <sup>2</sup> <i>I<sub>th</sub></i>	49	51, 73, 84
◦ GaAs	8400				9	{2, 10, 15, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 34, 42, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89}
CdSnP <sub>2</sub>	1.014	80° K		0.2 A/cm <sup>2</sup> <i>I<sub>th</sub></i>	69	
◦ GaSb	1.55	80° K		20 keV	21	77
◦ InAs	3.1	20° K		20 keV	8	
Te	3.7	liq. He		50 mA/cm <sup>2</sup> , 15 keV	18	
PbS <sub>1-x</sub> Se <sub>x</sub>	3.9 ~6.6	90° K	<i>x</i> =0-1		68	
◦ InSb	4.85 ~5.34	4.2° K			18	
◦ PbS	4.27	liq. He			44	75
◦ PbTe	6.4				44	72
◦ PbSe	8.5			7.1 mA/cm <sup>2</sup> , 50 keV	44	

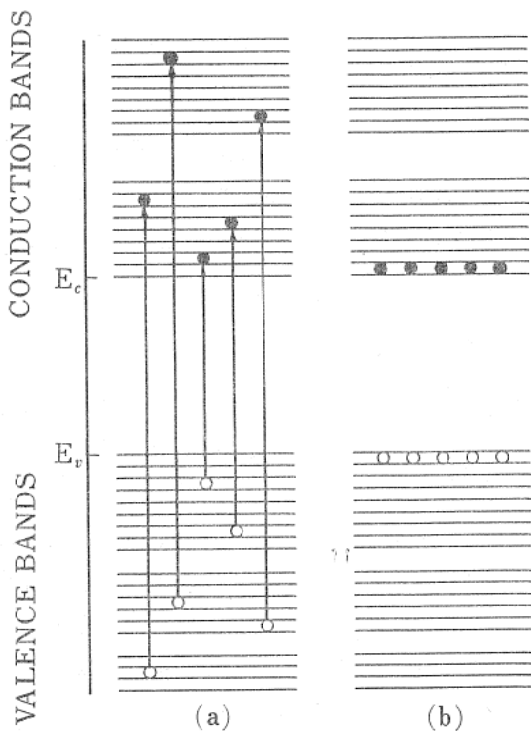
◦ : diode でも発振が観測されているもの。 *I<sub>th</sub>* は閾値を示す。

ない II-VI 化合物により可視から紫外域におよぶ短波長のレーザー光が得られている。

$p-n$  接合型レーザーでは、昨年、Bell 電話研究所の Hayashi らが、GaAs-Ga<sub>0.45</sub>Al<sub>0.55</sub>As の Double hetero 構造をもったダイオードを使って室温連続発振に成功し、半導体レーザーの応用を大巾に前進させるいとぐちを作った。一方電子線励起レーザーの応用面での研究はさほど活発には行なわれていない。効率の点では後述する様に、本質的に  $p-n$  接合型に劣るため、応用面で電子線励起レーザーに期待出来ることは、紫外、あるいは真空紫外といったより短波長のレーザーの開発であろうと思われる。

## 2. 励起の機構およびレーザー発振の閾値

高速に加速された電子は、結晶に入射し、原子核、核の周囲の電子、価電子、および伝導電子などと衝突して散乱される。入射電子のエネルギーは、個々の電子を高い励起状態に上げ、 $\sim 10^{-15}$  sec で準安定な状態になる (第一図)。この準安定な状態 (電子は伝導帯の底、正孔は価電子帯の頂上) から、バンド巾に相当する光



第1図 電子-正孔対の生成

- a) 高速粒子による励起
- b) 準安定状態

を放出するか、あるいは無輻射の過程で再結合する。一個の電子-正孔対を作るに必要なエネルギー  $\epsilon$  は励起される物質に固有なものであって、入射電子のエネルギーには無関係であることがわかっている。 $\epsilon$  の大きさは次の様に考えられる。先ず電子-正孔対を伝導帯と価電子帯に分離するために最低バンド巾のエネルギー  $E_G$  が必要である。大きな運動エネルギーをもった電子、正孔はさらに別の電子-正孔対を作るが、運動エネルギー  $E_k$  が  $E_k < E_G$  となると、 $E_k$  は熱として失われる。放物線状のバンドを仮定すると、この熱として失われる運動のエネルギーの平均値は、 $0.6 E_G$  となる。従って電子と正孔を合わせると、 $1.2 E_G$  のエネルギーが熱として失われる。その他、 $E_G$  にほとんど依存しないエネルギー損失  $1.2 eV$  が実験的に得られており、これは高速粒子が固体と相互作用して生じたプラズモンによる損失と考えられている。従って  $\epsilon$  として次式が得られる。

$$\epsilon = 2.2 E_G + 1.2 \quad (1)$$

内部量子効率を 1 とし、入射電子の表面反射による損失も考えないとすると、電子線励起による発光効率の最大値  $\eta_m$  は

$$\eta_m = \frac{E_G}{(2.2 E_G + 1.2)} \quad (2)$$

となる。この値は半導体においては 30%~40% となるが、実験的には、たとえば CdTe においては 30% と理論値に近い高効率を得られている。

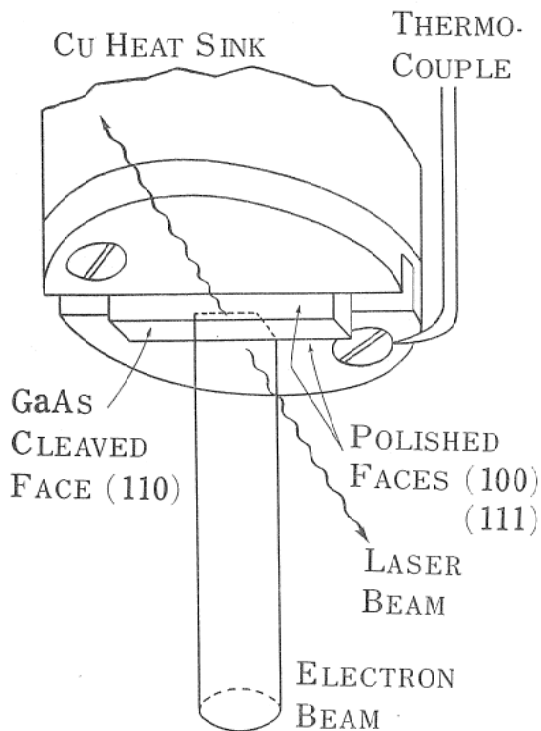
第二図に、電子線励起レーザーの略図を示す。光は Fabry-Perot Cavity の反射面間を往復する。 $\alpha$  を媒質中の光の損失、 $g$  を電子-正孔対の反転分布による光の利得とすると、レーザー発振の条件は

$$R \exp[(g - \alpha)L] \geq 1 \quad (3)$$

となる。ここで  $R$  は cavity 面での反射率、 $L$  は cavity 面間距離である。従って閾値  $g_{th}$  は

$$g_{th} = \alpha + \frac{\ln(1/R)}{L} \quad (4)$$

となる。 $g$  は自然放出光、すなわち電子線励起



第2図 電子線励起によりGaAsからレーザーを得る方法

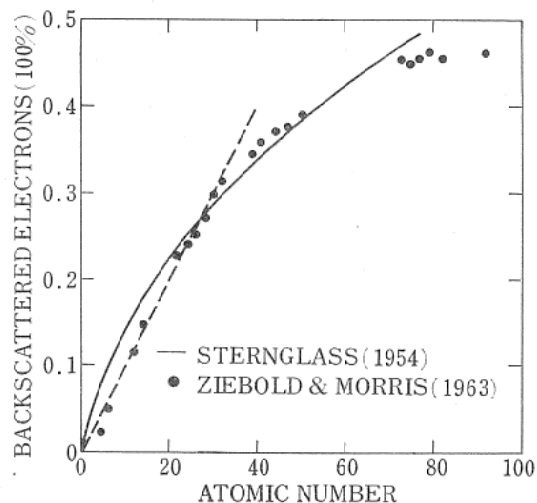
により生じる電子-正孔対の生成割合により決まる。

低温におけるレーザー発振の閾値  $Z_{th}$  (電子-正孔対の生成割合) は Klein により次式で示されている<sup>23)</sup>。

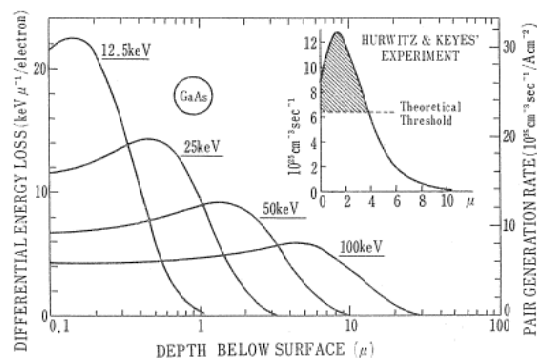
$$Z_{th} = 3.94 \times 10^{23} \left[ \frac{(\eta^2 E^2 \Delta E)}{\eta} \right] \left[ \alpha + \frac{\ln(1/R)}{L} \right] \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1} \quad (5)$$

ここで  $\eta$  は屈折率,  $E$  は自然放出光のエネルギー,  $\Delta E$  はその半値巾,  $\eta$  は内部量子効率である。単位はエネルギーは eV, 損失は  $\text{cm}^{-1}$  である。

実際の閾値を求めるにはこの他, 入射電子が結晶表面で反射される割合および結晶中に入射した電子の深さに対する励起の割合を知らねばならない。前者については, 理論的, 実験的に詳細に研究されており, 後方に散乱される割合は構成物質の平均の原子量に依存する。第三図にこの関係を示す。電子の侵入深度はレーザーの活性領域を決定する。これに関しては Spencer の詳細な研究があるが, Ehrenberg と King によって実験的にも求められている。これは試料に細い電子線を照射して, 蛍光の顕微鏡写真



第3図 原子番号に対する電子の後方散乱の割合  
実線は計算値, 点線は実測値



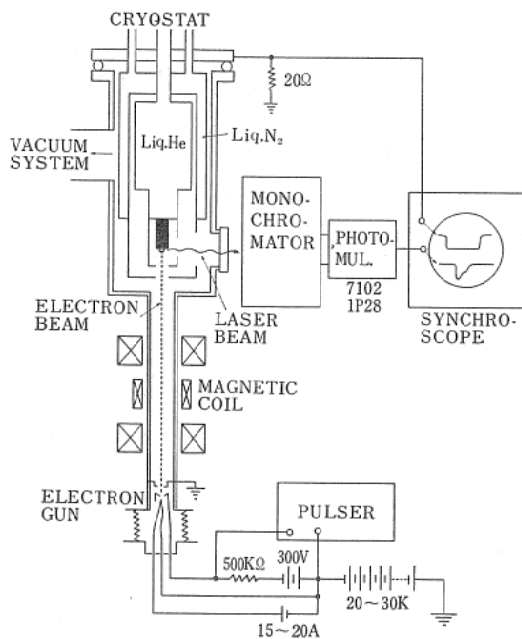
第4図 GaAs 中の電子線による励起の分布状態 (Klein による<sup>23)</sup>)

から求めたものである。第四図は GaAs 中の励起の分布状態を示す。励起された担体の分布は, 担体の拡散, 寿命, 等を考慮して計算される。

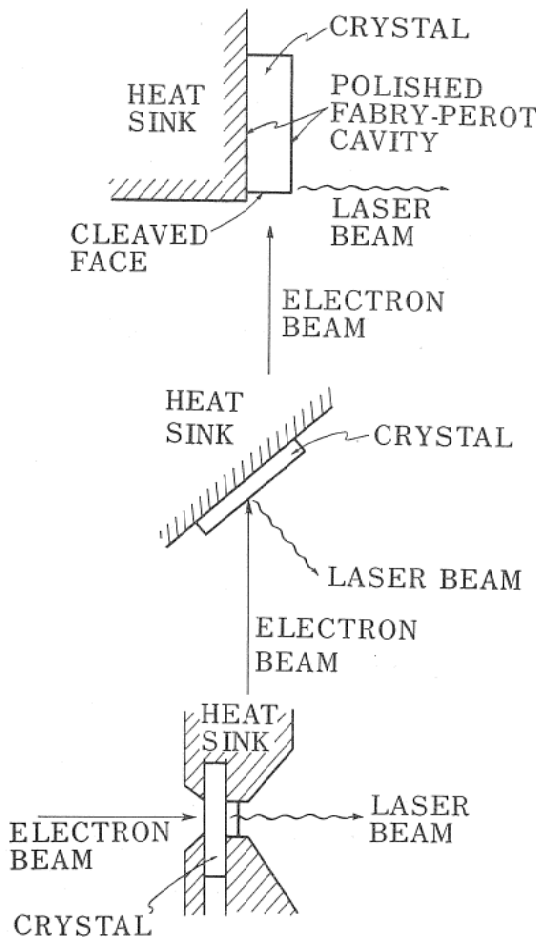
### 3. 実験方法

第五図に装置の概略を示す。加速電圧はさまざまだが, 半導体の場合, 約 300 keV 以上になると欠陥の影響が大きいので<sup>14)</sup>, これ以下の電圧で加速する。レーザーの共振器は, 試料の端面を利用して構成する。試料の端面を平行研磨するか, 劈開によって作り Al などを蒸着して反射率を上げることもある。第六図は電子線の方向とレーザー光の方向を示したものである。よく行われるのは(a)の方法であるが, この場合は電子線の侵入深さが数  $\mu\text{m}$  (加速電圧数 10 keV) であるため, 電子線のあたる面と,

cavity 面が正しく直角になっていないと発振は起らない。(b)の方法は自由担体による、光の吸収を少なくすることが出来、また発光面積を大



第5図 電子線励起レーザー装置の概略



第6図 励起と光の取り出し方

きく出来る<sup>24)</sup>。(a)では活性領域の深さが浅いため、端面で光の回折が起り、指向性が悪くなる。しかし(b)の方法では指向性の良いレーザー光が得られる。(c)の方法の例としては、CdS による低閾値のレーザーがある。これは、電子線照射面に Al を蒸着し、Al 膜を透過した電子線が CdS を励起する<sup>12)</sup>。そのとき電子線によって Al 蒸着膜に小さな泡が生じ、これが conforcal な cavity を形成することになる。これによって閾値が下り、77°K では 5 keV で発振が得られている。この方法によれば、ブラウン管の蛍光面に CdS を取りつけて、管の表面からレーザー光を得ることが出来る。

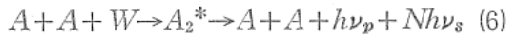
#### 4. 各種の電子線励起レーザー

##### 4.1 紫外線レーザー

電子線レーザーの最大の特徴は、励起エネルギーが高いため、あらゆる物質を励起出来ることにある。従ってこのレーザーで最も期待される場所は、現在得られているレーザー光の波長範囲を真空紫外、あるいはそれ以上に短くすることである。

ルビーレーザーが成功した時点から、短波長レーザーの実現に関して、いくつか理論が現れたが、1970年までは、Nd レーザーの第五高調波から得られた 2120Å が最も短波長のレーザーであった。短波長のレーザー発振を直接得ようとする場合、問題点は、高エネルギー準位への励起法である。ガスの超短時間放電、レーザーによるガスの放電などが考えられるが効率の点で問題がある (H<sub>2</sub> ガス放電で約 1,600Å のレーザーが得られている)<sup>92)</sup>。この点電子線励起の方法が最も適している。凝縮体を電子線で励起し、その第一励起状態からの発光を利用すると半導体の場合と同様に、励起エネルギーが効率よく (<30%) 利用出来る<sup>16)</sup>。実験は Basov らによって、先ず固体状態の貴ガスについて行なわれた<sup>17)</sup>。この場合は半導体と異なり exciton state が発光の過程に重要な働きをしていることが知られている。高速電子の衝突によって、原子のイオン化および free exciton state への励起が起り、つづいて localized exciton state への緩和 ( $\tau \approx 10^{-12}$  sec). localized exciton の発

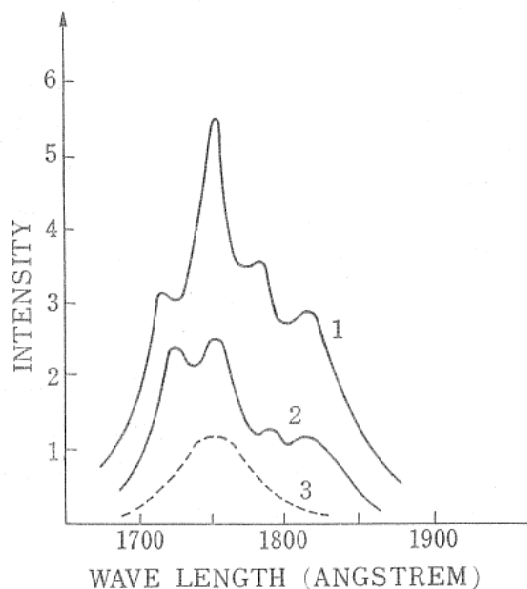
光を伴った消滅 ( $\tau \approx 10^{-9}$  sec) の過程を経て基底状態にもどる。localized exciton としては次式に示すように 2 原子対になった励起状態が考えられる。いわゆる excimer の状態を経た、励起→発光の過程である。



ここで  $A$  : 基底状態の原子,  $W$  : 励起エネルギー,  $A_2^*$  : 励起二原子分子 (excimer),  $h\nu_p$  : photon,  $N h\nu_s$  : phonons, である。

一般に excimer の発光のエネルギーは励起エネルギーにくらべて小さいために、再吸収による損失はない。しかし輻射振動子の数が多いこと、発光スペクトルの半値巾が大きいこと ( $Xe$  : 0.3 eV) などの為、発振させるには高密度の励起が必要である。

実験は最初固体  $Xe$  についてなされたが<sup>17)</sup>, 数 100 keV の高エネルギー電子を照射することにより、結晶内に欠陥が生じ、その欠陥を通じて再結合が起るため成功しなかった。液体を用いると、欠陥の蓄積はなく、光学的均一性もすぐれ、発光波長における吸収係数も固体より小さいために損失が少ない。Basov らは液体  $Xe$  を 700 keV, 30 A/cm<sup>2</sup> の電子線で励起することにより始めて 1760 Å の光の誘導放出に成功した<sup>6)</sup>。第七図は励起密度による発光スペク



第7図 液体  $Xe$  の発光スペクトル<sup>6)</sup>  
 1 : 150 A/cm<sup>2</sup>, 2 : 70 A/cm<sup>2</sup>,  
 3 : 弱励起の場合の発光スペクトル

トルの変化 (線巾の狭化) を示す。

この方法を  $Ne$  や  $He$  に応用すると、約 600 Å まで波長範囲を広げることが可能である<sup>6)</sup>。

#### 4.2 III-V 化合物

電子線励起レーザーが最初に成功したのは  $InAs$ <sup>8)</sup> である。その後、III-V 化合物では、 $GaAs$ <sup>9)</sup>,  $InSb$ <sup>18)</sup>,  $Ga(AsP)$ <sup>19)</sup>,  $GaSe$ <sup>20)</sup>,  $GaSb$ <sup>21)</sup> などにおいてレーザーが観測されている。これらの中では  $GaAs$  に関する研究が最も多い。レーザー遷移の機構については、III-V 化合物では一般に、不純物準位とバンド間の遷移であるとされている。特に  $GaAs$  については、Cusano による詳細な研究がある。それによると、レーザー遷移の機構は不純物濃度によって異なり、低濃度から高濃度に移行するに従い、donor-free hole, free electron-acceptor, donor-acceptor とレーザー遷移が変化していく<sup>10,22)</sup>。この他、発振の閾値の不純物濃度依存性、温度依存性などきめ細かい実験がいくつかなされている。たとえば Klein によると<sup>11)</sup>, 不純物濃度が  $n$  型では  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup>,  $p$  型では  $5 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> のとき発振の閾値が最も低く、また  $n$  型より  $p$  型の方が閾値が低い。発振の閾値の温度変化は Bogdankevich らによって研究され<sup>26)</sup>, 中間濃度の場合、温度を上昇すると閾値が下がる現象を見出している。これは温度によって遷移機構が変化するためで、たとえば  $n$  型において、低温では donor state が、高温になると伝導帯の底が遷移の準位になるためと説明されている。

$GaAs$  レーザーの発振波形の励起パルスに対する時間的な振舞については、興味深い現象がいくつか観測されている。たとえば、電子線パルスの開始とレーザー発振の開始の間に時間遅れが存在し、この時間遅れには、約  $10^{-9}$  sec と約  $10^{-7}$  sec の二種類あることがわかっている。この現象は  $p-n$  接合型レーザーにおいても観測されており、短い時間遅れは、結晶中の trap が注入された担体により満たされるまでに要する時間であり<sup>29)</sup>, 長い時間遅れは、発光波長を吸収する様な光学的吸収中心となる trap が存在するためと考えられている<sup>30)</sup>。後者は試料や温度の違いにより、観測されない場合もあり、またこの長い時間遅れを前者のように、単なる

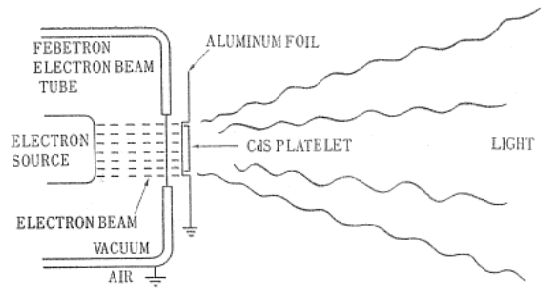
担体の trapping model で説明しようとする<sup>31</sup>と  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の trap が存在せねばならなくなることから光の吸収中心が原因であると考えられている。この時間遅れが大きくなり、励起パルスの終端で発振が始る現象、いわゆる内部Qスイッチ現象も観測されている。接合型レーザーでもこの現象は見られており Ripper らによって double acceptor type trapping model で説明されている<sup>31,32</sup>。これは光学的吸収中心 model の拡張で、担体注入中は光吸収中心として働く trap が存在し、励起が終ると同時に擬 Fermi 準位が変化することによってこの trap が消滅するという仮説的な model である。したがってこの光吸収中心になる trap の物理的な説明はなされていない。また  $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  の single hetero 構造のレーザーでもこの現象は観測され<sup>33</sup>、この場合は、*p*型の活性領域から正孔が *n*型に流出すること、すなわち hole injection と関連づけて説明されている。しかし電子線励起の方法によって、*p*型、*n*型の両者でこの現象が見られることから、この現象は接合構造には直接関係ないと考えられる<sup>34</sup>。この現象を説明出来る物理的 model はまだはっきりしておらず、GaAs レーザーに関して残された重要な問題の一つである。

### 4.3 II-VI化合物

電子線励起の特徴の一つは *p-n* 接合の出来ない II-VI 化合物においてもレーザー発振が得られることである。II-VI 化合物の多くは可視または紫外域に発光スペクトルを持つので可視光レーザーの点からもこの方法は重要である。

II-VI 化合物に関しては、主として、発振可能な物質の範囲を広げること、高出力高効率を得ることおよび発振機構の研究に力がそそがれた様である。

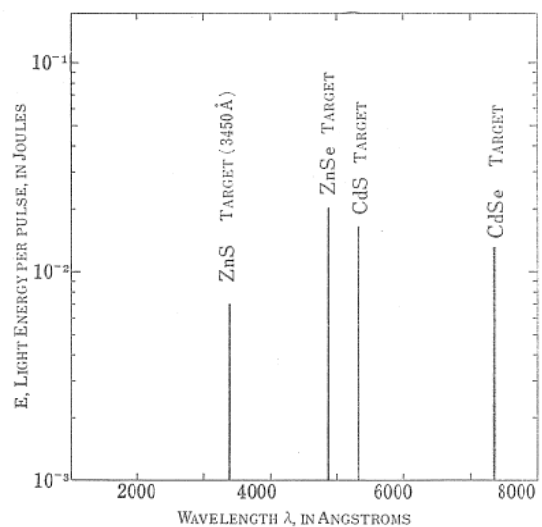
1963年、CdS の発光スペクトルの線巾の狭化が観測されてより、第一表に示すようにほとんどの II-VI 化合物からレーザー発振が得られている。出力、効率については、Hurwitz が1967年 CdS および CdSe について 4.2°K で 300 W, 28%, 350 W, 27% とそれぞれ理論的境界に近い高効率を得ている<sup>35</sup>。いずれも Cd rich 雰囲気気相成長法により作った結晶を使って



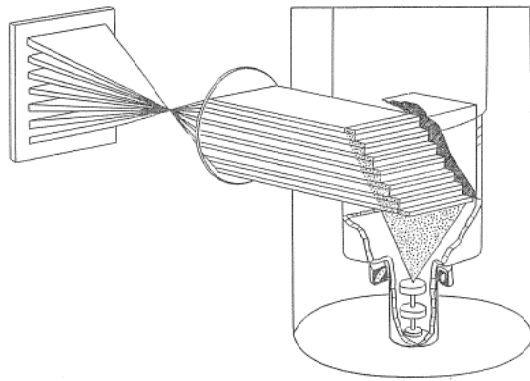
第8図 高出力誘導放出光を得る場合の試料および電子線励起の模式図<sup>36)</sup>

いる。高出力レーザーとしては、パルス動作ではあるが Brewster が CdS より室温で 200 kW<sup>14)</sup>、また誘導放出ではあるが 10 MW の高出力を得ている<sup>36)</sup>。これは高出力の光源を得る目的でなされたもので、第八図に示す様に、一般的な電子線励起レーザー装置と異っている。半導体薄片単結晶を電子線の通過し易い Al 箔に張りつけ、これを電子銃の出力窓にそのまま取りつける。薄片は Fabry-Perot cavity を構成しておらずその為出力光は誘導放出光ではあるが coherent ではなかった。加速電圧の最大値は 380 keV で、これ以上になると Cd イオンの変位による欠陥が観測される。効率は約 1% である。Brewster はこれを光源として、弾丸による破壊の瞬間写真を撮影している。その他 ZnS, ZnSe, CdSe についても高出力の光パルスを得ている。第九図にその波長、出力を示す。

レーザを用いた display への応用の一つとして scanning beam laser が考えられている<sup>3)</sup>。



第9図 波長と出力 (パルス巾 3 nsec)



第10図 Display 用電子線励起レーザー  
scanatron (from Lax<sup>3)</sup>)

第十図に示すように、Fabry-Perot cavity を構成した数 cm の棒状の半導体を電子線で掃引し、これと直角方向に光を取り出すものである。この他前述した、CdS 薄片に Al 蒸着を施し閾値の低いレーザー発振を得た実験結果も display への応用の可能性をもっている。

II-VI 化合物のレーザー遷移は III-V 化合物のように伝導帯あるいは価電子帯に励起された担体が直接再結合するのではなく、exciton 状態を経て、再結合すると考えられている。Packard らは、発振スペクトルから、CdS では、free exciton-LO phonon 線 (free exciton が LO phonon を一個放出して消滅する時の発光スペクトル) が、また、ZnO では、60°K 以下では bound exciton-LO phonon 線、270°K では free exciton-LO phonon 線が発振していることを示した<sup>37)</sup>。Hang は free exciton-LO phonon 線が発振するとして、発振の閾値の温度変化を理論的に計算した<sup>38)</sup>がこれによると 60°K 以上では  $T^3$  に比例して閾値が上昇する、しかし液体窒素以上の温度で CdS<sup>39)</sup>、ZnO<sup>40)</sup> についてなされた実験では、このように大きな温度変化は見られなかった。これは閾値が exciton の消滅過程よりむしろ band edge の吸収係数の温度変化によってきめられているためと考えられている。

## 5. むすび

半導体レーザーの一つとして出発した、電子線励起レーザーも効率装置などの点から、接合型レーザーにくらべて劣るため、今後の半導体

レーザーの主流は、やはり接合型レーザーになるとと思われる。従って、今後電子線励起の方法の半導体レーザーにおける役割は、発振機構の研究等、補助的なものとなろう。しかし、この方法は高エネルギー励起であるため、今後レーザー光が紫外、あるいは X 線への領域に進むとき、大きな役割をはたすものと思われる。

## 引用文献

- 1) N. G. Basov, O. N. Krokhin and Yu. M. Popov, *Advances in Quantum Electronics II*, International Conf. On Quantum Electronics, J. R. Singer, ed. (Columbia Univ. Press N. Y. 1961) p. 496.
- 2) N. G. Basov, O. V. Bogdankevich and B. M. Lavrishin, *Soviet Physics-Solid State* **8** (1966) 15.
- 3) B. Lax, *Solid State Design* **6** (1965) 19
- 4) N. G. Basov, *Quantum Electronics, Proc. 3rd. Inter. Congress Paris (1964)* Columbia Univ. Press 1769.
- 5) V. S. Vavilov, *Soviet Physics-Uspokhi* **7** (1965) 797.
- 6) N. G. Basov, V. A. Danilychev and Yu. M. Popov, *Oyo Butsuri* **40** (1971) 139.
- 7) B. G. Basov, O. V. Bogdankevich, A. G. Devyatkov, *Soviet Physics-Doklady* **9** (1964) 288.
- 8) C. Benoit á la Guillaume and J. M. Debever, *Solid State Commun.* **2** (1964) 145.
- 9) C. E. Hurwitz and R. J. Keyes, *Appl. Phys. Letters* **5** (1964) 139.
- 10) D. A. Cusano, *Solid State Commun.* **2** (1964) 353.
- 11) C. A. Klein, *Appl. Phys. Letters* **7** (1965) 200.
- 12) F. H. Nicoll, *Appl. Phys. Letters* **16** (1970) 501.
- 13) C. E. Hurwitz, *Appl. Phys. Letters* **9** (1966) 420.
- 14) J. L. Brewster, *Appl. Phys. Letters* **13** (1968) 385.
- 15) N. G. Basov, O. V. Bogdankevich, V. A. Goncharov, B. M. Lavrishin and U. Yu. Sudzilovskii, *Soviet Physics-Doklady* **11** (1966) 522
- 16) A. G. Molchanov, I. A. Poluéktov and Yu. M. Popov, *Soviet Physics-Solid State* **9** (1968) 2655
- 17) N. G. Basov, O. V. Bogdankevich, V. A. Danilychev et. al., *JETP Letters* **7** (1968) 317
- 18) C. Benoit á la Guillaume and J. M. Debever, *Physics of Quantum Electronics*



- Conference Proc. (McGraw Hill 1966) 397
- 19) N. G. Basov, Physics of Quantum Electronics Conference Proceedings (McGraw Hill 1966) 411
  - 20) N. G. Basov, O. V. Bogdankevich, A. N. Pechenov, G. B. Abdulaev, G. A. Akhundov and E. Yu. Salalaev, Soviet Physics-Doklady **10** (1965) 329
  - 21) C. Benoit á la Guillaume and J. M. Debever, C. R. Acad. Sci. (Paris) **259** (1964) 2200
  - 22) D. A. Cusano, Appl. Phys. Letters **7** (1965) 151
  - 23) C. A. Klein, Physics of Quantum Electronics, Conference Proceedings (McGraw Hill 1966) 424
  - 24) L. N. Kurbatov, A. N. Kabanov, V. U. Sigriyanskii, V. E. Mashchenko, N. N. Mochalkin, A. I. Sharin and N. V. Sorokanovitskii, Soviet Physics-Doklady **10** (1966) 1059
  - 25) H. C. Casey, Jr. and R. H. Kaiser, Appl. Phys. Letters **8** (1966) 113
  - 26) O. V. Bogdankevich, N. A. Borisov, I. V. Krukova and B. M. Lavrushin, Phys. Status Solidi **29** (1968) 715
  - 27) C. A. Klein and J. M. Lavine Appl. Phys. Letters **12** (1968) 125
  - 28) S. Iwai and S. Namba, Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Research **62** (1968) 44  
B. K. Garside, J. Shewchun and B. S. Kawasaki, IEEE J. Quant. Electrons. **QE-7** (1971) 88
  - 29) K. Konnerth and C. Lanza, Appl. Phys. Letters **4** (1964) 120
  - 30) G. E. Fenner, Solid-State Electron. **10** (1967) 753
  - 31) J. C. Dymant and J. E. Ripper, IEEE J. Quantum Electrons. **QE-4** (1968) 155
  - 32) J. E. Ripper, IEEE J. Quantum Electrons. **QE-5** (1969) 391
  - 33) E. A. Ulmer, Jr. and I. Hayashi, IEEE J. Quantum Electrons. **QE-6** (1970) 297
  - 34) M. Kawabe, A. Masuyama, K. Aoki, K. Masuda and S. Namba, J. J. Appl. Phys. **9** (1970) 850  
A. Masuyama, M. Kawabe, K. Masuda and S. Namba, Proc. 2nd Conf. Solid State Devices Tokyo (1970) p. 161
  - 35) C. E. Hurwitz, II-VI Semiconducting Compounds Intern. Conf. D. G. Thomds ed. (Benjamin N. Y. 1967) p. 682
  - 36) J. L. Brewster, Record of 10th Symposium of Electron. Ion and Laser Beam Technology (L. Marton ed. San. Francisco Press, 1969) 209
  - 37) J. R. Packard, D. A. Campbell and W. C. Tail, J. Appl. Phys. **38** (1967) 5255
  - 38) H. Haug, J. Appl. Phys. **39** (1968) 4687
  - 39) R. F. Leheny, K. L. Shaklee, E. P. Ippen, R. E. Nahory and J. L. Shay, Appl. Phys. Letters **17** (1970) 494
  - 40) S. Iwai and S. Namba, Appl. Phys. Letters **16** (1970) 354
  - 41) H. Aritome, K. Masuda and S. Namba, J. J. Appl. Phys. **9** (1970) 579  
H. Aritome, K. Masuda and S. Namba, J. Opto Electronics (to be published)
  - 42) O. V. Bogdankevich, V. A. Goncharov, B. M. Lavrushin, V. S. Letokhov and A. F. Suchkov, Soviet Phys.-Semiconductors **1** (1967) 1
  - 43) F. H. Nicoll, Proc. IEEE **55** (1967) 114
  - 44) C. E. Hurwitz, A. R. Calawa and R. H. Rediker, IEEE J. Quantum Electronics **QE-1** (1965) 102
  - 45) N. G. Basov, O. V. Bogdankevich and A. G. Devyatkov, Soviet Physics-JETP **20** (1965) 1067
  - 46) C. Benoit á la Guillaume and J. M. Debever, Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris) **261** (1965) 5428
  - 47) E. L. Nolle, V. S. Vavilov, G. P. Golubev and V. S. Mashtakov, Soviet Physics-Solid State **8** (1966) 236
  - 48) C. E. Hurwitz, Appl. Phys. Letters **8** (1966) 121
  - 49) V. S. Vavilov and E. L. Nolle, Soviet Physics-Doklady **10** (1966) 827
  - 50) F. H. Nicoll, Appl. Phys. Letters **9** (1966) 13
  - 51) V. S. Vavilov and E. L. Nolle, Soviet Physics-Solid State **8** (1966) 421
  - 52) C. Benoit á la Guillaume and J. M. Debever, Phys. Stat. Sol. **17** (1966) 875
  - 53) N. G. Basov, O. V. Bogdankevich and A. G. Devyatkov, Soviet Physics-Solid State **8** (1966) 1221
  - 54) C. E. Hurwitz, Appl. Phys. Letters **9** (1966) 116
  - 55) C. E. Hurwitz, Appl. Phys. Letters **8** (1966) 243
  - 56) W. C. Tait, J. R. Packard, G. H. Dierssen and D. A. Campbell, J. Appl. Phys. **38** (1967) 3035
  - 57) N. F. Malyuk, G. A. Fedows, V. D. Fwsevko I. A. Shakh-Melikova and M. K. Sheinkman, Soviet Physics-Solid State **8** (1967) 2513
  - 58) F. H. Nicoll, Appl. Phys. Letters **10** (1967) 69
  - 59) L. N. Kurbatov, V. E. Mashchenko and N. N. Mochalkin, Optics and Spectrosc. **22** (1967) 232

- 60) C. E. Hurwitz, IEEE J. Quantum Electrons. **QE-3** (1967) 333
- 61) A. N. Vlasov, G. S. Kozina, and O. B. Fyodorva, Soviet Physics-JETP **25** (1967) 283
- 62) C. E. Hurwitz, II-VI Semiconducting Compounds D. G. Thomas ed. (Benjamin, N. Y. 1967) 682
- 63) C. Bevoit á la Guillaume, J. M. Debever and F. Salvan, II-VI Semiconducting Compounds D. G. Thomas ed. (Benjamin, N. Y. 1967) 669
- 64) O. V. Bogdankevich, A. G. Devyatkov and U. S. Orlov, Soviet Phys-Semiconductors **1** (1967) 534
- 65) F. H. Nicoll, RCA Rev. **29** (1968) 379
- 66) L. B. van Atta G. S. Picus and A. Yariv, Appl. Phys. Letters **12** (1968) 84
- 67) G. P. Golubev, V. A. heleznyakov, S. N. Maksimovs, E. L. Nolle and A. Fazylow, Soviet Physics-Semiconductors **3** (1969) 240
- 68) L. N. Kurbatov, A. D. Britov, I. S. Averyanov, V. E. Naschchevko, N. N. Mochalkin, and A. I. Dirochker, Soviet Physics-Semiconductors **2** (1969) 1008
- 69) F. M. Berkovshii, N. A. Goryunova, V. M. Arlov, S. M. Ryvkin, V. I. Sokolova, E. V. Tsvetkova and G. P. Shpeikov Soviet Physics-Semiconductors **2** (1969) 1027
- 70) J. R. Packard, W. C. Tait and D. A. Campbell, IEEE J. Quant. Electron. **QE-5** (1969) 44
- 71) D. L. Keune, N. Holonyak, Jr., P. D. Dapkus and R. D. Burnham, Appl. Phys. Letters **17** (1970) 42
- 72) L. N. Kurbatov, A. D. Britov and N. N. Mochalkin, Soviet Physics-Semiconductors **4** (1970) 95
- 73) E. L. Nolle, Soviet Physics-Semiconductors **3** (1970) 1301
- 74) M. A. Kaneev, V. E. Mashchevko and O. R. Niyazova Soviet Physics-Semiconductors **3** (1969) 645
- 75) C. Benoit á la Guillaume and J. M. Debever, Proc. Symposium on Radiative Recombination in Semiconductors Dunod Cie, Paris (1964) 255
- 76) N. G. Basov, O. V. Bogdankevich, P. G. Eliseev and B. M. Lavrushin, Soviet Physics-Solid State **8** (1966) 1073
- 77) A. A. Kastalskii, E. S. Filatova and Yu. G. Shrater, Soviet Physics-Semiconductors **3** (1969) 134
- 78) A. N. Vlarov, L. N. Dmitruk, G. S. Kozina and L. N. Kurbatov, Soviet Phys. Semiconductors **3** (1970) 1199
- 79) J. Shewchuv, B. S. Kawasaki and B. K. Garside, IEEE J. Quant. Electron. **EQ-6** (1970) 133
- 80) J. Vine and P. A. Einstein, Proc. I. E. E. **111** (1964) 921
- 81) D. A. Cusano and J. D. Kingsley, Appl. Phys. Letters **6** (1965) 91
- 82) D. F. Kyser and D. B. Wittry, Proc. IEEE **55** (1967) 733
- 83) J. M. Lavine and A. Adams, Jr., IEEE J. Quantum Electron. **QE-4** (1968) 195
- 84) C. A. Klein, IEEE J. Quant. Electronics **QE-4** (1968) 186
- 85) O. V. Bogdankevich N. A. Borisov, I. V. Kryukova, B. M. Lavrurkin Soviet Physics-Semiconductors **2** (1969) 845
- 86) R. Hunsperger, Solid-State Electronics **12** (1969) 215
- 87) O. V. Bogdankevich, V. V. Kalendin and A. N. Mestvirishvili, IEEE J. Quantum Electron. **QE-6** (1970) 389
- 88) L. N. Kurbatov, N. N. Mochalkin, A. D. Britov, Soviet Physics-Semiconductors **4** (1970) 47
- 89) I. V. Akimova L. N. Borovich, O. V. Bogdankevich, A. V. Dudenkova Yu. P. Zokharov. Yu. M. Popov, A. N. Pechenov, and K. P. Fedoseev, Soviet Physics-Semiconductors **4** (1971) 1142
- 90) A. N. Vlasov, L. N. Kurbatov, V. I. Mignunov, I. Yu. Petrova, N. V. Soroko-Novitskii and E. E. Chernova-Stolyarova Soviet Physics-Semiconductors **4** (1971) 1789
- 91) C. Bevoit á la Guillavme and J. M. Debever Solid State Commun. **3** (1965) 19
- 92) R. T. Hodgson, phy, Rev, Letters **25** (1970) 494 R. W. Waynant, J. O. shipman, Jr, R. C. Eltonand A. W. Ali, Appl, Phys, Letters **17** (1970) 383