レーザーノート 1

長パルス電子ビーム制御型レーザーの設計

波々伯部圭佑^{*}・中尾定彦^{*}・藤沢 彰^{*}

(1978年 6 月 2 日 受理)

Basic Design of Long Pulsed E-beam Controlled Laser

Keisuke HOHKABE^{*}, Sadahiko NAKAO^{*} and Akira FUJISAWA^{*}

(Received June 2, 1978)

1. まえがき

今日、レーザー装置には極めて多くの種類があり、それぞれ特徴を有している。このうち、電子ビーム源を用いる電子ビーム制御型炭酸ガスレーザーは高出力レーザーという点で注目されているレーザーの1つであり、我国でも防衛庁、大阪大学において、大がかりなレーザー装置を用いて研究が進められている。また、電子ビーム制御型レーザーの応用例としては、同方式のレーザーによる加工機が米国AVCO社において製品化されている。

防衛庁においては、電気エネルギーを入力としてレーザー出力を得る電気励起レーザーの研究を行っており、¹⁾ 高出力化の基本的特性に関するデータを得ることを目的として、熱陰極電子ビーム源を用いたレーザー装置を試作した。“放電”によってレーザー媒質に電気エネルギーを供給する電気励起レーザーは、レーザー発生のために、均一かつ安定な放電を達成する必要がある。レーザー発生に適した均一かつ安定な放電を実現するには、レーザー媒質中に1対の電極を置き、所要の高電圧を印加するだけでは十分でなく、連続放電、パルス放電の違い、レーザー媒質の状態などに応じて、放電方式、電極の構造などについて種々の工夫が必要である。そ

の1つとして、電子ビーム制御型レーザーに見られる電子ビーム源を用いる方式があり、これは種々の放電条件に対して所望の放電を形成するのに適し、規模の大きいレーザー装置にも有用である。

このような点から、当研究所においては、電気励起レーザーの研究のために試作したレーザー装置は、実験装置であることを考慮して、広い動作範囲を可能にする電子ビーム制御型レーザーとした。また、この実験装置に要求される性能として、放電パルス幅を従来の同種のレーザーに比べて長く、放電パルス幅の可変範囲を広くとることを計画したため、電子ビーム源としては、熱陰極を有する電子銃を選定した。

一般に熱陰極電子銃は上述のような長パルス動作に適しており、短パルスで高密度の電子ビーム電流を要求されるレーザー装置には冷陰極が適している。また、電子銃の取扱いの点から見ると、熱陰極の場合は冷陰極に比べて電子銃内を高真空まで排気する必要があり、機械的強度においても、冷陰極の方がすぐれている。その他、電子ビーム源の陰極としてプラズマソースがあり、比較的広いパルス幅範囲にわたってかなり大きい電流密度が得られる。

ここでは、熱陰極電子銃を用いたレーザー装置の設計と試作した装置の2、3の特性につい

^{*} 防衛庁第1研究所 (〒153 東京都目黒区中目黒2-2-1)

^{*} 1st Research Center, Japan Defence Agency (Nakameguro 2-2-1, Meguro-ku, Tokyo, 153)

て紹介する。

2. 電子ビーム源のレーザー装置への応用

電子ビーム源を電子ビーム制御型レーザー装置へ応用する場合、考慮すべき点はレーザー装置としてどのような性能を期待するかである。特に、放電パルス幅や放電電流の大きさに応じて最も適した電子ビーム源を選ぶ必要がある。前述したように、電子ビーム源の電子発生の源である陰極には冷陰極、熱陰極及びプラズマカソードがあり、これらの陰極によって得られる電流密度と動作パルス幅との関係をFig. 1⁽²⁾に示す。

Fig. 1 Approximate limits of existing guns.

冷陰極は電界放出によって電子ビームを得るものであり、動作時の真空度は熱陰極のように高い必要はなく、機械的にも強い構造となり得、電子ビーム源の運転、操作に関してもそれだけ容易になる可能性がある。

一方、熱陰極は加熱されたフィラメントを用いて電子放出を行い、動作時の真空度は高いことが望ましい。このため、運転、操作に十分注意する必要がある。

2.1 電子ビーム源に要求される性能

レーザー装置に用いられる電子ビーム源はレーザー装置としての使用目的に応じてその必要な条件が決まる。レーザー装置が実験研究用である場合、電子ビーム源が具備すべき条件とし

て、次のようなものが挙げられる。

- (1) 電流密度が可変できること
- (2) 電流密度が均一であること
- (3) 電子ビームエネルギーが可変できること
- (4) 単一パルス動作あるいは繰返しパルス動作が可能であり、パルス幅が可変できること
- (5) 電子ビームの立上りが速いこと
- (6) 電子ビーム透過窓の破損、過電力に対する保護機構を有し、高電圧に対する安全性を具備すること
- (7) 陰極及び電子ビーム透過窓の交換が容易であること
- (8) 陰極加熱電力が少ないこと

2.2 熱陰極電子ビーム源の構成

本レーザー装置に使用した電子ビーム源は、上述の各条件を満足するとともに、レーザー装置用としての要求性能に基づき製作された。その基本的構成をFig. 2に示す。同図からわかるように、電子銃は直径0.5 mmのトリウムタングステン線のフィラメント、これを中心として同心円状に配置されたメッシュ状半円筒の第1グリッド

Fig. 2 Schematic representation of E-beam system.

ド、矩形でメッシュ状の第2グリッド、メッシュ状のアノード及び厚さ $25\mu\text{m}$ のチタン薄膜からなる。なお、チタン薄膜は電子が十分に透過できるとともに、電子銃内の高真空を保ち、レーザー媒質の圧力に耐える必要がある。

通常、フィラメント、アノード間には最高200kVが印加されているが、第1グリッドはフィラメントに対して負にバイアスされているため、電子は放射されない。然るに、第1グリッドに正電圧パルスが印加されたとき、各フィラメントから電子が扇形状に放出され、第1グリッドを通り抜けて、同電位の第1、第2グリッド間を飛行し、分布が一様な電子ビームとなって第2グリッドを通過する。

この電子は第2グリッド、アノード間で加速され、アノード及びチタン薄膜を通り抜けてレーザー媒質中に打込まれる。なお、レーザー媒質側には、アノード及びチタン薄膜と同電位のメッシュ状の電極が設けられ、レーザー媒質中の放電に対するカソードとなる。

次に電子ビーム源の排気系についてみる。

Fig. 3 Vacuum system block diagram.

排気系はFig.3に示すように電子銃内を3種類のポンプがそれぞれ独立に排気するような構成であり、各ポンプの排気速度、到達真空度を次に示す。

- (1) 油回転ポンプ $1000\text{l/min} \sim 10^{-2}\text{Torr}$

- (2) ソープションポンプ $10^{-3} \sim 10^{-4}\text{Torr}$

- (3) イオンポンプ $400\text{l/s} \times 3, \sim 10^{-7}\text{Torr}$

熱陰極電子銃は正規の運転状態にするまでにいくつかの準備操作が必要である。これはスタート時点での状態によっても異なる。

一度、運転状態になった場合は、イオンポンプのみにより常に排気を行い、高真空を保つことによって随時正規の運転を行い得る。

準備操作に時間を費やすのは、電子ビームの透過窓であるチタン薄膜の交換、あるいはフィラメントの交換を行った場合である。

交換後、高真空にもっていくまでの手順としては、油回転ポンプ、ソープションポンプ、イオンポンプの順に動作させ、必要に応じて電子銃内壁及び内部の構造物を白熱ランプによってベーキングするなどの操作を行う。

2.3 電子ビーム源の主要諸元

熱陰極電子ビーム源の主要諸元を次に示す。

- (1) タイプ グリッド制御型熱陰極
- (2) 電子ビーム面積 $20\text{cm} \times 250\text{cm}$
- (3) 電子ビーム透過薄膜 チタニウム
厚さ $25\mu\text{m}$
- (4) 加速電圧 $100 \sim 200\text{kV}$ 連続可変
- (5) パルス幅 $0.1 \sim 10\text{ms}$ 連続可変
- (6) パルス繰返し数 1パルス / 2分
- (7) 出力電流密度 $2\text{mA/cm}^2 (0.1\text{ms})$
 $20\mu\text{A/cm}^2 (1\text{ms})$
 $2\mu\text{A/cm}^2 (10\text{ms})$
- (8) 連続動作時間 1時間以上
- (9) フィラメント電源 DC $0 \sim 36\text{V}$
8kW 最大
- (10) 入力 $1\phi\text{AC}200\text{V } 50\text{A}$
 $1\phi\text{AC}100\text{V } 20\text{A}$
 $3\phi\text{AC}200\text{V } 70\text{A}$

その他、操作盤にて行える機能として、次のようなものがある。

- (1) パルス幅、グリッド電圧、加速電圧、フィラメント電圧の設定
- (2) グリッド電圧、加速電圧、フィラメント電圧及び電流の表示

なお、上述の諸元は後述する設計に基づき設定されたものである。

3. レーザ装置としての設計

熱陰極電子ビーム源を用いるレーザ装置の設計において、放電入力から電子ビーム源の諸元が決定され、目標レーザ出力からレーザ共振器の構造、寸法等を設定でき、両者が相まってレーザ装置としての規模が決まる。

レーザ装置としての設計目標は次のとおりである。

- (1) 電気励起レーザの実験装置としての機能を有し、レーザ出力1 kJの規模とする。
- (2) 放電パルス幅は0.1~10ms 可変できること。

3.1 レーザ出力の試算

目標出力よりレーザ装置の規模を設定するにあたっての原理的なモデルと基本式は次のとおりとする。

まず、モデルはFig. 4に示すように、レーザ媒質の有効部分の断面積及び共振器ミラーの断面積 $d_1 \times d_2 \text{ cm}^2$ 、媒質有効長 $\ell \text{ cm}$ とし、電子銃よ

Fig. 4 Schematic representation of E-beam laser.

りレーザ媒質中に打込まれる電子ビーム断面積 $d_2 \times \ell \text{ cm}$ とする。

このモデルを用いて、レーザ出力を算定するための基本式は次のように表わされる。

$$U_L = (s\ell)(\alpha_0 w_0) T_p \left\{ \frac{t}{\ln(1-a)(1-a-t)} - \frac{t}{2\alpha_0 \ell} \right\} \quad (1)$$

ここで、 U_L はレーザ出力エネルギー、 s, ℓ はレーザ媒質の有効断面積と長さ、 α_0, w_0 はレーザ媒質の小信号利得係数と飽和定数、 T_p はレーザ出力のパルス幅、 t は共振器ミラーの透過率、 a は共振器ミラーの損失とする。

なお、(1)式の関係は、レーザ媒質中の1点から出た光が共振器ミラー間を一巡して元の強さにもどると仮定した場合の関係と利得係数の定義式とから求められる。

3.1.1 レーザ媒質の容量 $s\ell$

レーザ媒質の寸法を設定すれば、レーザ装置の規模を設定できる。(1)式からわかるように、 $s\ell$ を大きくするほど、大きい出力が期待できる。報告されている例^[9]からみると、 $50 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$ 以上の出力が得られており、ガス圧力1 atmのレーザ媒質の場合、1 kJを得るには20lのレーザ媒質が必要となる。これに余裕をみて、 $s\ell = 100 \text{ l}$ と設定した。

s については、大きくとるほど光強度の密度を小さくでき、共振器ミラーの耐久性は増すが、製造可能な寸法を考慮して、Fig. 4に示す d_1, d_2 を20cmとした。

この結果、 $s\ell = 100 \text{ l}$ を得るには $\ell = 250 \text{ cm}$ となる。

3.1.2 レーザ媒質中に蓄えられるエネルギー密度 $\alpha_0 w_0 T_p$

小信号利得係数 α_0 及び飽和定数 w_0 はそれぞれ次のように表わすことができる。

$$\alpha_0 = K \frac{N_2 - N_1}{\Delta\nu} \quad (2)$$

$$w_0 = K' \frac{\Delta\nu}{\tau_2 - \tau_1} \quad (3)$$

上2式において、 $N_2 - N_1$ はレーザ上位、下位準位間の分布数の差、 $\tau_2 - \tau_1$ はレーザ上位、下位準位間の緩和時間の差、 $\Delta\nu$ は τ_2, τ_1 により決まるレーザ遷移スペクトルの半値半幅、 K, K' は定数とする。

(1) α_0 の見積り

ここで、励起エネルギー一定の条件のもとに検討する。この条件は前述の目標の可変パルス幅内にそれぞれ一定の電気エネルギーを注入

することである。放電している場合、放電電流に比例する量として電子密度を N_e とすると、

$$N_e T_p = k \text{ (定数)} \quad (4)$$

と表わされる。

Fig. 5 に示すエネルギー準位についてレート方程式を解き、 $N_2 - N_1$ のピーク値を求めると、次のようになる。

Fig. 5 Schematic energy diagram.

$$N_2 - N_1 = \tau_2 R_2 \{1 - \exp(-T_p/\tau_2)\} - \tau_1 R_1 \{1 - \exp(-T_p/\tau_1)\} \quad (5)$$

ここで、 $R_2 = k_2 N_0 N_e$ 、 $R_1 = k_1 N_0 N_e$ と与えられ、 k_2, k_1 は定数であり、 $\tau_2, \tau_1 \propto 1/p$ 、 $\Delta\nu \propto p$ 、 $N_0 \propto p$ であることを考慮すると、

$T_p \gg \tau_2 > \tau_1$ のとき

$$\alpha_0 \propto \frac{1 - \exp(-T_p/\tau_2)}{T_p p} \quad (6)$$

$T_p \ll \tau_1 < \tau_2$ のとき

$$\alpha_0 = \text{一定} \quad (7)$$

と表わされる。上述の式中、 p はガス圧力、 N_0 は Fig. 5 のモデルの基底準位の分布数である。ここで、電子ビーム制御型レーザーの一般的値として、 $p = 1 \text{ atm}$ において、 $\tau_2 = 10 \mu\text{s}$ 、 T_p の小さいとき $\alpha_0 = 5 \text{ \%}/\text{cm}$ とおき、 p をパラメータとして α_0 と T_p の関係を図示したものが Fig. 6 である。同図より、 $T_p = 0.1 \sim 10 \text{ ms}$ において、 α_0 、 T_p 、 p の関係をプロットしたものが、Fig. 7 である。なお、Fig. 7 の関係は次のようにかける。

Fig. 6 Small signal gain coefficient versus pulse duration for gaseous pressure.

Fig. 7 Diagram for determination of small signal gain coefficient.

$$\alpha_0 (\text{\%/cm}) \cdot T_p (\text{ms}) \cdot p (\text{atm}) = 0.05 \quad (8)$$

(2) w_0 の見積り

文献(4)の結果を引用すれば、 w_0 と p の関係は Fig. 8 のようになり、これはほぼ $w_0 \propto p^2$ といえる。

上述した α_0 、 w_0 を用いて、 $\alpha_0 w_0 T_p$ と T_p の関係

を示すと Fig. 9 のようになる。

Fig. 8 Saturation parameter versus gaseous pressure.

Fig. 9 Diagram for determination of energy density stored in laser medium.

3.1.3 出力取り出し能率 η

(1)式右辺の $\{ \}$ 内を η とおくと、 η は共振器の構成と α_0 とで決まり、 $(sl)(\alpha_0 w_0) T_p$ を共振器内部に蓄えられるレーザーエネルギーと見なせば、出力取り出し能率といえる。

ミラーの損失を極力小さくし、かつ、 α_0 の大きい状態を形成すれば、適当な透過率 t を設定することにより、より大きい出力が得られることを示す。

いま、実用的な値として $a=0.02$ とおき、 $t=0.05 \sim 0.4$ における η と $\alpha_0 l$ の関係はFig. 10のようになる。

以上の考察に基づき、(1)式により、 U_L と T_p の関係を表わすと Fig. 11 のようになる。

Fig. 10 Curves of η as a function of $\alpha_0 l$.

Fig. 11 Laser output energy-pulse duration plots.

この結果、 $T_p = 0.1 \sim 1 \text{ ms}$ においては、 $p = 1 \text{ atm}$ とすれば 1 kJ 以上の出力が期待できる。また $T_p = 1 \sim 10 \text{ ms}$ では、ガス圧力をパルス幅とともに小さくし、各パルス幅において $\alpha_0 = 0.05\%/\text{cm}$ となるようにすれば、数 100 J の出力は可能と思われる。このことから、設計上、パルス幅に対するガス圧力を、 $T_p = 0.1 \sim 1 \text{ ms}$ において $p = 1 \text{ atm}$ 、 $T_p = 1 \sim 10 \text{ ms}$ において $p T_p = 1$ と設定する。

3.2 電気入力算定の

放電に必要な電気入力を算定するにあたって、(出力エネルギー/入力エネルギー)で定義するエネルギー効率を $5 \sim 10\%$ と仮定する。Fig. 11 と上述の p と T_p の関係とを用いて、 U_L と T_p の関係を表わすと Fig. 12 のようになる。この U_L にエネルギー効率を考慮して、入力エネルギー U_d と T_p の関係を Fig. 12 中に示す。なお、設計にあたっては、同図中の実線のように U_d を設定した。

Fig. 12 Electrical energy-pulse duration plots.

3.2.1 入力基本式

入力エネルギー算定のための基本式は、

$$U_d = s \ell E_d J_d T_p \quad (9)$$

とかける。ここで、 E_d は放電中の電界強度、 J_d は放電電流密度である。さらに、 J_d は次のようにかける。

$$J_d = N_e e v_D \quad (10)$$

上式において、 e は電子の電荷、 v_D は電子のドリフト速度である。

v_D は E_d/p の関数である。本設計においては、 $E_d/p = 5 \text{ kV/cm} \cdot \text{atm}$ と設定したが、このとき $v_D \approx 4.5 \times 10^6 \text{ cm/s}$ である⁽⁵⁾。ここで、 T_p に対する p 、 E_d/p 、 E_d 及び V_d の関係を Fig. 13 に示す。 V_d は $d_1 = 20 \text{ cm}$ のときの放電電圧を表わす。

Fig. 13 V_d , E_d/p , E_d and p versus T_p .

(9)式により、Fig. 12, 13を用いて J_d 及び放電電流 $I_d = J_d d_2 l$ を求め、Fig. 14 に示す。さらに、(10)式より、 N_e を求め同図に示す。

3.2.2 電子ビーム源諸元の設定

電子銃から打込まれた電子ビームにより、レーザー媒質を形成する分子は電離し、放電

Fig. 14 Plots of electron density, discharge current and discharge current density as a function of pulse duration.

電圧の印加により放電電流を生ずる。放電電流を形成する電子の生成、消滅についてのレート方程式は次のようになる。

$$\frac{dN_e}{dt} = S_e - \alpha_r N_e^2 \quad (11)$$

ここで、 S_e は単位時間当りの電離生成密度、 α_r は電子消滅の体積再結合係数であり、気体レーザーでは、 $\alpha_r \approx 2 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ である⁶⁾。上式の右辺第2項は電子とイオンの結合による電子の消滅を表わす。

定常状態について解くと、

$$N_e = \left(\frac{S_e}{\alpha_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

となる。また、 S_e は次のようにかける。

$$S_e = \left(\frac{J_{eb}}{e} \right) \left(\frac{dE_{eb}}{dx} \right) \left(\frac{1}{E_s} \right) \quad (13)$$

ここで、 J_{eb} は電子ビームの電流密度、 dE_{eb}/dx は放電空間における電子の単位長さ当りのエ

ネルギー損失、 E_s は電子、イオン対をつくるに要した電子のエネルギー損失であり、 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:8$ では $E_s \approx 40 \text{ eV}$ である⁷⁾。

あるエネルギー E_{ebo} をもってレーザー媒質中に打込まれた電子はエネルギーを失いながら進行し、ある距離 x においてエネルギー損失 dE_{eb}/dx が最大となる。また、このエネルギー損失が最大となる距離とそのときの最大値は入射時の電子のエネルギーによって異なる。文献(8)を引用すれば、進行距離 x と密度 ρ の積と単位密度当りのエネルギー損失 $(1/\rho)(dE_{eb}/dx)$ の最大値との関係はFig.15中の $(1/\rho)(dE_{eb}/dx)-\rho$ のようになる。また、同図中に E_{ebo} と ρ の関係を示す。さらに、レーザー媒質として $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:8$ とし、 $\rho-p$ の関係を同図中に示す。

Fig. 15 Diagram for estimation of dE_{eb}/dx .

これらの関係から、 $dE_{eb}/dx-\rho$ 、 $E_{ebo}-\rho$ は図中に示すようになり、前者の関係をFig.14の N_e-T_p とを用いて、(11)、(12)式より J_{eb} を求め、Fig.16に示す。なお、図中の I_{eb} は電子ビーム電流

である。

Fig. 16 Plots of E-beam current and E-beam current density.

一方、 $E_{ebo} - p$, $p - T_p$ より、 $E_{ebo} - T_p$ を求め、厚さ $13\mu m$ のチタン薄膜についての電子銃内での電子エネルギー E'_{ebo} と薄膜通過後のエネルギー E_{ebo} との関係⁽²⁾を考慮して $E'_{ebo} - T_p$ を求める。これらの関係をFig. 17に示す。

Fig. 17 Electron energy versus pulse duration.

なお、 E'_{ebo} は電子銃加速電圧の設定基準となる。

以上の検討に基づき、前述した電子ビーム源の主要諸元を設定した。

3.3 放電用電源の設定

放電用電源の設計の前提条件として、本レーザー装置が実験装置であることを考慮し、放電パルス幅、放電電圧を容易に変更可変で、データの取得に支障のない繰返しを有するものとした。また、放電電圧は、Fig. 13からわかるように、長パルス領域では放電パルス幅によって異なることを考慮すべきである。

パルス繰返し数は単発又は(1パルス/2分)以上と設定し、短パルス領域ではコンデンサへの並列充電、直列放電により高電圧の印加を可能にした。また、長パルス領域においては、並列充放電方式を基本回路とした。なお、放電空間は純抵抗と見なし、放電エネルギーの供給はCRの充放電によるものとした。

さらに、放電パルス幅は、Fig. 18に示すように、放電電圧が80%まで低下する時間とした。この

Fig. 18 Profile of discharge voltage.

パルス幅の間にコンデンサに蓄積されるエネルギーの約36%が放電のための電気入力として消費される。

この放電入力を前述の所要入力と等しくなるようにコンデンサ容量を選定した。

以上のような検討に基づき、設定した電源の基本回路を Fig. 19 に示す。

Fig. 19 Basic circuit of power supply.

4. レーザー装置とその特性

前述の設計に基づき、試作されたレーザー装置の外観を Fig. 20～21 に示す。構成各部の外形寸法は次のとおりである。

放電チャンバ	440 ^L ×190 ^W ×175 ^H cm
共振器長	約470 cm
放電用電源	175 ^L ×328 ^W ×197 ^H cm
電子銃	376 ^L ×118 ^W ×148 ^H cm
電子銃用電源	164 ^L ×164 ^W ×159 ^H cm
操作盤 (I)	57 ^L ×63 ^W ×191 ^H cm
操作盤 (II)	60 ^L ×56 ^W ×211 ^H cm

Fig. 21 Photograph of E-beam gun.

Fig. 20 Photograph of E-beam laser.

Fig. 22 Voltage and current waveforms.

Fig. 23 Laser output waveform.

Fig. 22には、放電パルス幅0.4msにおける放電電圧、放電電流の観測波形を示す。また、レーザー出力の観測波形の一例をFig. 23に示す。さらに、 $T_p=0.4\text{ms}$, $E_d/p \approx 3.5\text{kV/cm} \cdot \text{atm}$, $p=1\text{atm}$, $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:8$, 加速電圧130kVのとき、レーザー出力1.2kJを得た。

5. まとめ

熱陰極電子ビーム源を用いた電子ビーム制御

型レーザーを設計、試作し、レーザー出力1kJを達成したことによって、本設計の妥当性が確認された。本レーザー装置は実験研究用に試作されたものであり、パラメータを広い範囲にわたって可変することに重点が置かれているが、使用目的が明らかなレーザー装置を製作する場合にはよりコンパクトで使い易いものになると思われる。また、本装置は長パルス動作であるため、熱陰極電子ビーム源を用いているが、陰極の選定はパルス幅に応じて適当なものを選ぶ必要がある。

引用文献

- (1) 実野孝久他, 第37回応物学会, 1a-R-11, 50年10月.
- (2) A. S. Denholm and B. S. Quintal, *Laser Focus*, 41, 1974.
- (3) C. Cason and G. J. Dezenberg, *Appl. Phys. Lett.* 23, 110, 1973.
- (4) M. C. Fowler, *J. Appl. Phys.* 43, 3480, 1972.
- (5) J. J. Lowke et al, *J. Appl. Phys.* 44, 4664, 1973.
- (6) C. A Fenstermacher, *Appl. Phys. Lett.* 20, 56, 1972.
- (7) *Am. Inst. of Phys. Hand book*.
- (8) S. J. Kast and C. Cason, *J. Appl. Phys.* 44, 1631, 1973.