レーザーオリジナル 4

均一電子ビーム励起大容量エキシマー
レーザー装置

藤原 関夫*・加藤 義章*・山中千代衛*

(1980年11月29日 受理)

Electron-Beam Pumped Excimer Laser Device for
Uniform, Large Volume Excitation

Etsuo FUJIWARA*, Yoshiaki KATO*, and Chiyoe YAMANAKA*

(Received November 29, 1980)

Coaxial diode electron-beam device for excimer laser pumping has been designed and constructed. In designing this device, we have especially considered spatial uniformity of energy deposition, pumping efficiency and electron-beam pinch. Experimental observation on diode impedance, beam pinch, and energy deposition uniformity are compared with standard formula or a code calculation on electron transport.

1. はじめに

希ガスハロゲンエキシマーレーザーはレーザー核融合や同位体分離などのエネルギー開発、光化学、マイクロエレクトロニクス加工或いはN₂レーザーに変わる色素レーザー励起光源など多種多様な応用の可能性を秘めている。KrFレーザー(249nm)に代表されるこの種のレーザーの励起方法は放電励起と電子ビーム励起に大別される。この中で放電励起レーザーは安価で手軽な反面、大きな体積にわたって均一に安定な放電を得ることが難しく高出力化は困難である。他方電子ビーム励起レーザーの場合、装置が大掛りになる事を省けば容易にスケールアップが可能で高出力パルス動作に適している。レーザー効率に関しては紫外線又はX線予備電離KrF

レーザーの1%前後¹⁾の効率に対して、電子ビーム励起の場合ガス中に注入されたエネルギー比で9%の効率²⁾が報告されている。

我々は電子ビーム励起レーザー装置の高出力・高効率化に関する問題点を明らかにするために、装置を試作し、増幅特性の測定を行ってきた。これと平行してアノード膜及びレーザー気体中での電子ビーム伝搬の様子をモンテカルロシミュレーションコードを用いて解析し³⁾、これにもとづいて装置の改良を行った。これらの過程で電子ビーム励起気体レーザー装置の設計・製作・動作特性に関するいくつかの知見が得られた。本論文ではこれらのうち技術的な問題を中心に報告し、将来エキシマーレーザーを高出力化する際の参考資料として供したい。

* 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田上)

* Institute of Laser Engineering, Osaka University (Yamadakami, Suita, Osaka 565)

2. 電子ビーム励起エキシマーレーザー装置の設計

2.1 基本設計

電子ビーム励起レーザー装置は使用目的により大きく3種類に分類できる。すなわち(1)マルクス電源の出力をダイオードに直結する方式⁴⁾、(2)マルクス電源にインダクタンスの小さいコンデンサーを多数使って同軸構造のPFN(Pulse Forming Network)回路を構成し、数10ns程度のパルス幅を得る方式⁵⁾、及び(3)マルクス電源の出力を一旦低インピーダンスのパルス整形ラインに移し、その後ダイオードに導く方式⁶⁾である。(1)は約500ns~3 μ sの高エネルギー励起に、(2)はコンパクトな短パルス低エネルギー励起(≤ 1 kJ)に、また(3)は短パルス・高エネルギー励起(≥ 1 kJ)に適している。またダイオード形状についても3種類に大別でき、(1)平面アノードを通して電子ビームを光軸の横方向から照射するタイプ⁷⁾、(2)やはり横方向励起であるがカソードとアノードをシリンダリカルな同軸構造とし、回りから照射するタイプ⁸⁾、(3)光軸方向から電子ビームを強い磁場でガイドして打ち込むタイプ⁹⁾などである。この中で(1)は一方向のみの場合には励起の均一性が悪いので2方向から電子ビームを照射する必要がある、また(3)は複雑な構造のガイド磁場を必要とする。これらに比べて(2)は単一電源で均一な励起が容易に得られ、またアノード表面での電子ビーム電流密度を最も小さくできる特長がある。

我々はできるだけ大容量のレーザー気体を短パルス電子ビームで均一に励起し得る装置の開発を目的として、パルス整形ラインを有する同軸ダイオード構造を選んだ。装置の全体構成の

Fig.1 Coaxial diode electron-beam device for excimer laser pumping.

概念図をFig.1に示す。マルクス電源に蓄えられた電気エネルギーによってパルス整形ラインを充電し、その形状によって決まる高電圧短パルスを電子ビームに変換する。電子ビームは陽極を兼ねた金属薄膜を透過して後方のレーザー気体を励起する。この様な電子ビーム励起レーザーを設計する場合、レーザー特性、装置全体のエネルギー利用効率、高電圧パルス技術等に関する諸問題を考慮する必要があるが、我々は特に下記の点に注意して装置設計を行なった。

- (1) 均一なレーザーパターンを得るために、励起をレーザーガス全体にわたってできるだけ一様にする。
- (2) 電子ビームはアノード膜透過過程で散乱やエネルギー損失を受け、またレーザー気体中においても多くの衝突・散乱を繰り返してその運動エネルギーを失って行く。そこで膜での損失も考慮して、入射電子ビームエネルギーをレーザー気体の励起に有効に利用する。
- (3) 大電流動作に伴う自己磁場により電子ビームがセルフピンチを起し、励起の均一性が失われるので、ピンチ領域以下の電流で動作させる。

2.2 設計の詳細と製作

装置の製作と特性測定は2段階に分けて行った。第1の段階では同軸型ダイオードのアノードの直径を12mmとし、第2の段階ではこれを100mmとした。これに伴ってパルス整形ラインの構造もやや変更したので、以下これらを区別するため、前者(12mm ϕ)をI型、後者(100mm ϕ)をII型とする。

2.2.1 マルクス電源

本装置に使用したマルクス電源のブロック図をFig.2に示す。マルクス電源は ± 50 kV充電で $0.3+0.3\mu$ Fのオイルコンデンサー7段からなり、最大出力電圧は700kV、この時の蓄積エネルギーは5.25kJである。スイッチは7段のSF₆ガスギャップであり、全段トリガー方式のため自爆

Fig. 2 Circuit diagram of the Marx generator.

電圧よりかなり低い電圧でも安定に動作させることができる。またジッターは充電電圧が $\pm 20 \sim 50 \text{ kV}$ の範囲で 50 ns 以内が得られている。全インダクタンスは $4.9 \mu\text{H}$ であり、マルクス電源からパルス整形ラインへの充電時間は $0.5 \mu\text{s}$ である。

2.2.2 パルス整形ライン

パルス整形ラインはマルクス電源で発生した電圧・電流パルスを一旦伝送線を兼ねたコンデンサーに蓄え、ここでコンデンサーの形状によって決まるパルス幅とインピーダンスにパルス整形する部分である。Fig. 3にパルス整形ライン及びダイオード部の略図を示す。パルス整形ラインはインピーダンスを変えることが容易な平行平板型のブルムライン回路を採用した。充電電圧がピーク値の $8 \sim 9$ 割に達した時、自爆タイプの主スイッチが動作し、これにより発生した電圧・電流パルスはナイフエッジ型のプレパルススイッチを通してダイオード部に印加される。ブルムラインの誘電体としては純水（比誘電率80）を用いており、イオン交換樹脂により非イオン化され常時循環によって比抵抗が $1 \text{ M}\Omega\text{cm}$ 以上に保たれている。水の絶縁破壊強度は実験的にJ. C. Martin¹⁰⁾により次式で与えられた。

$$E t^{1/3} A^{1/10} = k \quad (1)$$

ここで E は電界強度で MV/cm 、 t は電圧の印加時間で μs 、 A は表面積で cm^2 単位で与えられ、こ

Fig. 3 Blumlein type parallel plane pulse forming line and coaxial diode. 1. Main switch 2. Parallel plane capacitor 3. Insulator 4. Prepulse switch 5. Cathode 6. Anode 7. Metal grading rings 8. Acrylic insulator rings.

のとき k は負電圧充電の時0.6、正充電の時0.3である。コンデンサーは幅 50 cm 長さ 80 cm でその電極間隔は容易に変更でき、Ⅰ型では 6 cm 、Ⅱ型では 5 cm である。また導体末端においては電界集中がおこり、これを防止するため曲率半径 3 cm の電界緩和コロナリングを設けた。コロナリングを近似的に円筒対円筒と考えると、電界 E_m は

$$E_m = fV/D \quad (2)$$

ここで V は印加電圧、 D は電極間隔であり、 f は次式により与えられる。

$$f = \frac{\sqrt{(D/r)^2 + 4D/r}}{2 \ln [D/2r + 1 + \frac{1}{2} \sqrt{(D/r)^2 + 4D/r}]} \quad (3)$$

ここで r は円筒半径で、Ⅱ型に対して $f = 1.265$ と計算される。 400 kV 正充電の場合、末端での

絶縁破壊時間はⅡ型では $3.5\mu\text{s}$ と計算され、充電時間の $0.5\mu\text{s}$ に比べて十分長い。平行平板コンデンサの容量はⅠ型では $5.9+5.9\text{nF}$ 、Ⅱ型では $6.8+6.8\text{nF}$ でインピーダンスはそれぞれ 9Ω 及び 7.7Ω である。またパルス幅の設計値は共に 50ns である。

主スイッチはⅠ型では水中の自爆タイプであったが、動作時の水中でのショック波が大きく絶縁ボルトなど弱い部分を破損する事があり、Ⅱ型では取扱いの容易な SF_6 ガススイッチタイプに改めた。またⅠ型の負充電をⅡ型では正充電に変更し、これに伴って主スイッチの位置を接地電極と中間電極の間に移動させて外部トリガーを行い易い様にした。

2.2.3 ダイオード

通常の電子ビーム発生装置ではパルス整形ラインとダイオード部を分離する構造が取られるが、同軸ダイオードの場合、この構造では、カソードと外壁との絶縁のためにダイオード部は大きな容積を必要とする。我々はダイオード部をパルス整形ラインと共に水槽に入れ、純水によって絶縁を持たせてコンパクト化を計った。ダイオード部は電子ビーム発生領域とレーザー気体励起領域を含んでいて、レーザーの性能に直接影響を及ぼす部分である。励起の空間的均一性と電子ビームエネルギーの有効利用については我々の作成した電子ビーム伝搬コード³⁾でシミュレーションした。Ⅱ型のダイオードの場合の励起の空間分布のシミュレーション結果をFig. 4に示す。これから電子ビームエネルギーが 400kV 及び 500kV において中心附近がやや強いがかなり均一な励起が可能である。次に電子ビームのエネルギー利用効率に関するシミュレーション結果をFig. 5に示す。ここでRはアノード半径、Pは気体圧力であり、アノード膜に入射する電子ビームエネルギーの中でレーザー気体中で失われるエネルギーの割合を表わしている。アノード膜としては厚さ $100\mu\text{m}$ のアルミニウムを想定している。図で破線部分は励起の空間的均一性が失われる領域である。エネルギー

Fig. 4 Energy deposition profile for cylindrical electron-beam excitation. The gas mixture is 94% argon and 6% krypton.

Fig. 5 Energy deposition efficiency of electron-beam in the laser gas as a function of PR where P is gas pressure and R is anode radius. The arrow shows the design value for operation.

ー利用効率はⅠ型では直径が小さいために1%以下と非常に小さいのに比べて、Ⅱ型では最大圧力3気圧を予定して(矢印)計算結果から 400kV 動作で30%が期待できる。ガス中の蓄積エネルギーの観点からは 300kV 動作に比べて

400kV動作の場合は33%増加し、また400kV動作に比べて500kV動作は9%の増加に留まるため、Ⅱ型の動作電圧を400kVに設定した。

またビームピンチは電子ビーム電流に上限を与える重要な問題である。電子ビームは自己磁場によりその軌道を曲げられ、アノードに斜めに入射する。同軸構造の場合自己磁場は電子ビームの両端で最も強くなり、両端での電子ビームのアノード入射角度 θ は次式で与えられる¹¹⁾。

$$\sin \theta = -\frac{e\mu_0}{4\pi mc} \frac{I}{\gamma\beta} \ln \frac{r_a}{r_c} \quad (4)$$

ここで $\beta = v/c$, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ である。最大電流として $\theta = 90$ 度(水平入射)の場合をFig. 6に示す。ここで r_a はアノード半径, r_c はカソード半径であり、図で△印はⅠ型の、また○印はⅡ型の設計値を示している。

Fig. 6 Maximum electron-beam current limited by beam pinch for cylindrical pumping geometry. The ordinate is the ratio of radii of anode and cathode.

次に具体的な形状について以下に述べよう。Fig. 7はⅡ型のダイオード部の断面を示す。電子ビーム発生部は約 10^{-4} torrの真空中に保たれている。カソード材料はⅠ型ではチタン $25\mu\text{m}$ を使用した、Ⅱ型では寿命などの点¹²⁾から炭素繊維を用いた。炭素繊維は切断面をアノードに向けて取り付けられている。アノードに関しては、Ⅰ型では厚さ $50\mu\text{m}$ 及び $100\mu\text{m}$ のチタンシートを

Fig. 7 Cross section of the coaxial diode (Type II).

電子ビーム溶接によって長さ50cm直径12mm(有効径10mm)のパイプ状に溶接したものを使用した。他方Ⅱ型では励起体積の増加を計ってアノードの直径を10cm(有効径8.5cm)とし、材料としてアルミニウム $100\mu\text{m}$ を使用している。Fig. 7に示す様にアルミニウムシートを円筒状に丸め、Oリングで真空シールすることによりアノードの低価格化を可能にした。また電子ビーム溶接に比べて多種のアノード材料が選択でき、アノード膜の厚さの変更も容易である。またレーザー気体の内圧による膜の張力はその直径に比例して増加するため、直径の小さいⅠ型ではアノードの外部保持は不要であったが、Ⅱ型ではアノード膜の外側を金属メッシュで覆って内圧を支えている。

次にダイオードのインピーダンスについて述べる。電子ビーム電流は空間電荷制限によって決り、非相対論的領域ではLangmuir-Compton¹³⁾の次式で与えられる。

$$I = 1.47 \times 10^4 \frac{V^{3/2}}{\eta^2 r_a} W \quad (5)$$

$$\eta = \epsilon - \frac{2}{5} \epsilon^2 + \frac{11}{120} \epsilon^3 - \dots$$

$$\epsilon = \ln(r_a/r_c)$$

ここで W はビーム幅で電圧 V はMV単位である。我々の装置ではカソードの回りから一様に電子ビームが照射されるこのモデルと異なり刃状の

ブレードから不均一に照射されるため、(5)式から決めるアノード・カソード間隔より幾分短くしている。

またカソードの絶縁に関しては角度30度 (I型) 又は45度 (II型) に切ったアクリルと金属リングを交互に積み重ねた構造で、金属リングによって強制的に均一電界分布になる様に工夫されている。真空中でのアクリルの沿面放電耐圧は角度45度に対してJ. C. Martinによって次式で与えられている。

$$E \cdot t^{1/6} \cdot A^{1/10} = 175 \quad (6)$$

ここで E は kV/cm , t は μs , A は表面積で cm^2 の単位である。I型では2 cm厚のアクリルを9段、II型では6段で400 kV動作において上式の耐圧時間はそれぞれ1.7 ms及び190 μs である。

以上のI型及びII型の諸設計値をTable 1に示す。

Table 1 Designs of type I device and type II device.

Pulse Forming Line		
Capacitor space	6 cm	5 cm
Capacity	5.9+5.9 nF	6.8+6.8 nF
Impedance	9 Ω	7.7 Ω
Pulse width	50 ns	50 ns
Blumlein switch	water gap	SF ₆ gas gap
Diode		
Cathode	Ti 25 μm	carbon fiber
Anode	Ti 50 μm or 100 μm	Al 100 μm
Anode diameter	1.2 cm	10 cm
A-K space	20 mm	30 mm
Excitation length	41 cm	50 cm

3. 動作特性の測定

3.1 耐電圧特性

パルス整形ラインでのコンデンサの耐電圧はI、II型共に十分な安全係数を取ってあるため、絶縁破壊といった事故は一度も発生していない。しかし例えば主スイッチとパルス整形ラインとの結合部など電界集中の起り易い部分では小さなアークが発生しやすく、コロナリングによって電界集中を完全に防止する細心の注意が必要である。またカソードの絶縁に関しても沿面放電による事故は起っていない。しかしア

クリル表面が小さな沿面放電によって徐々に劣化していくのが見られ、劣化の著しい絶縁体は交換する必要がある。

3.2 ダイオードインピーダンス

ダイオード部の特性を調べるために、カソード電圧と電子ビーム電流をTektronix 7844ニベームオシロスコープで観測した。電圧モニターは2 k Ω の抵抗を通して流れる電流を出力1 V/Aの自己積分型ロゴスキーコイル(Ion Physics Company model CM-100-S)で測定した。ロゴスキーコイルの立上り応答時間は10 nsである。電流モニターはアノードを流れるリターン電流をロゴスキーコイルで測定した。ここで使用したロゴスキーコイルは文献(14)を参考にして製作したもので、応答時間は1 ns以下といわれる。

Fig. 8(a), (b)はそれぞれI型とII型のカソード電圧、電流及びインピーダンスを示す。I型

Fig. 8 Typical pulse forms of voltage and current. Also shown are temporal change of impedance calculated from these waveforms. (a) is for type I and (b) is for type II.

のアノード・カソード間隔は20 mmでカソードのチタンプレード数は8枚である。他方(5)式からは同一の電流を得るにはその間隔は28 mmと計算され、これからブレードの様な局所的な電子ビーム発生源に対しては(5)式で計算されるよりも幾分間隔を小さくする必要があることがわかる。

また炭素繊維をカソードに使ったⅡ型でも同様に計算との不一致が見られるが、電子ビーム発生面がチタンブレードに比較して広いためにⅠ型ほど顕著ではない。インピーダンスに関してはⅠ型では電子ビーム発生時間にわたってほぼ一定で、このパルス幅ではカソードプラズマの成長によるインピーダンス低下の影響は小さいことがわかる。他方Ⅱ型ではパルスの立上り部分でインピーダンスの低下が見られる。ここで2種のカソード材料を同一条件で比較した訳ではないので一概に優劣はつけられない。また、パルス整形ラインとダイオードとのインピーダンス整合が十分に取れない場合、電子ビーム照射後にパルス整形ラインに残留しているエネルギーがカソードプラズマによって短絡したアノード・カソード間でアーク電流として流れ、アノード膜を大きく破損する。完全にインピーダンス整合を取ることは難しく、この対策としてカソードとアース間にインダクタンスを付けてアーク電流を迂回させることによりその発生を防止できた。

3. 3 ビームピンチ効果

電子ビームのアノード膜透過後の軸方向分布をラドカラーフィルム（日東電工）で測定した。Ⅰ型及びⅡ型での一例をそれぞれFig. 9(a), (b)に示す。(a)においてアノードパイプの中心で電子ビームの透過が見られないのは、ここが2本のチタンチューブの結合部に当る為である。軸方向分布は中心附近に強い強度分布が見られるが、全体としてはカソードの長さ41cmにわたって一様な電子ビーム照射が得られている。中心附近が強い原因はビームピンチの影響と思われる。Ⅱ型での測定結果Fig. 9(b)は電子ビーム装置をビームピンチ領域で動作させたため、その影響を顕著に表わしてカソード長50cmに対して電子ビーム透過が見られるのは約30cmと短くなっている。

3. 4 アノード断面の電子ビーム励起強度分布

Fig. 9 Axial distribution of electron-beam transmitted through anode foil. (a) is for type I and (b) is for type II.

Ⅰ型では電子ビームのレーザー気体中での飛行に比べてアノード径が十分小さく、励起の均一性を失うことはなかった。このことは均一な

Fig. 10 Comparison of simulation and measurements for spatial profile of energy deposition.

レーザーパターンが得られた事からも明らかであった。従って励起の空間強度分布はⅡ型レーザー装置を使って測定し、シミュレーション結果と比較した。その結果をFig. 10に示す。この図においてダイオード電圧は200kVでアノードとして厚さ100 μm のアルミニウムを使用している。測定値は反射率の異なる出力ミラーを変えた場合のレーザー発振エネルギーの変化から概算した小信号利得を表わしている。測定はアノードの中心と、中心から3.5cm離れた2点で行なった。図で測定値の半径方向の誤差は出力ミラーの径に相当する。実線のシミュレーション結果は励起強度の空間分布を表わしており、アノードの中心で測定値とシミュレーション結果を規格化している。Fig. 10 よりこれらの間には比較的良好一致が得られており、励起強度の空間分布を予測する際にこのシミュレーション計算が重要な手段になり得ることを示している。

3. 5 KrFレーザー動作特性

Fig. 11にⅠ型における電子ビームの電流波形とレーザー発振波形を示す。共振器は曲率半径

Fig. 11 Typical pulse forms of electron-beam current and KrF laser output for the type I device.

4 mの全反射ミラーと石英板の表面反射を利用した出力ミラーからなり、その間隔は1.4 mである。レーザー発振は電子ビーム電流が最大となる領域で得られていて、高利得レーザーのためにレーザーの立上りが十分短い。次にアノード

ド膜厚50 μm と100 μm の場合のレーザーガス圧力変化に対するレーザー発振出力の変化をFig. 12に示す。ガス混合比は(F_2 , Kr, Ar)=(0.2%, 8%, 91.8%)である。膜厚50 μm の方がより高出力が得られていて、これは膜厚が厚くなるに

Fig. 12 Laser output energy as a function of the total gas pressure for the type I device for different thickness of the anode foil.

従って電子ビームの膜の透過率が悪くためである。最大レーザー出力はチタン膜厚50 μm 、3気圧動作の時290mJ（ビーム直径9mm）で、これは取出エネルギー密度11J/lに相当する。またこのⅠ型を増幅器として動作させ、増幅・飽和特性の測定を通して小信号利得17%/cm、飽和強度5 MW/cm²の値が求められている¹⁵⁾。このときのアノード膜厚は100 μm で2気圧動作である。Fig. 13は増幅実験から求められた小信号利得 g_0 の時間変化(○印)と電圧・電流波形を基にシミュレーションした単位体積当りの励起強度 I_p (実線)を示していて、これから測定範囲内

Fig. 13 Time dependence of the small signal gain coefficient (open circles) and the calculated pumping intensity (solid line).

で小信号利得は励起強度に比例する。

実験を行う予定である。

4. むすび

高出力・高効率KrFレーザーを開発するために必要な基礎資料を得る事を目的として電子ビーム励起レーザー装置を設計・試作した。その動作特性の測定を通して明らかになった点をまとめると、

- 1) I型において400 keV・25kA, その改良型のII型で320keV・65kAの電子ビームを得た。II型はさらに高電圧化が可能である。
- 2) ダイオードインピーダンスは刃状の非一様な電子ビーム源のために理想状態を仮定した計算とは一致しない。
- 3) ダイオードインピーダンスはほぼ一定で、電子ビームパルス時間内ではカソードプラズマの成長による影響は小さい。
- 4) インピーダンス不整合に伴うアーク電流の発生があり、これはインダクタンスによる迂回路を設けることにより防止できる。
- 5) 光軸方向の電子ビーム強度はI型ではカソード長に相当する41cmにわたって、II型では中心部分30cmにわたってかなり一様な分布が得られた。しかしI型、II型共にカソードの中心部分が強く、ビームピンチの影響が見られた。
- 6) 光軸断面の励起強度分布に関して、3次元モンテカルロ・コードによる計算と測定結果との一致が見られ、このコードが大口径高出力レーザーを設計する際の指針を与え得る事がわかった。

今後II型レーザー装置の高出力化を進め、短パルス・高出力レーザー光によるエネルギー取出

参考文献

- (1) For example, J. I. Levatter and R. S. Bradford, Jr.; Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 742.
- (2) M. Rokni, J. A. Mangano, J. H. Jacob, and J. C. Hsia; IEEE J. Quantum Electron. **14** (1978) 464.
- (3) 藤原, 加藤, 一村, 志水; レーザー研究 **8** (1980) 524.
- (4) C. A. Brau and J. J. Ewing; J. Chem. Phys. **63** (1975) 4640.
- (5) Y. Kubota, S. Kawasaki, A. Miyahara, and H. M. Saad; Japan. J. Appl. Phys. **13** (1974) 260.
- (6) Alan C. Kolb; IEEE Transactions on Nuclear Science, **NS-22** (1975) 956.
- (7) J. A. Mangano and J. H. Jacob; Appl. Phys. Lett. **27** (1975) 495.
- (8) D. J. Bradley, D. R. Hull, M. H. R. Hutchinson, and M. W. McGeoch; Opt. Commun. **14** (1975) 1.
- (9) R. A. Gerber and E. L. Patterson; IEEE J. Quantum Electron. **QE-11** (1975) 642.
- (10) J. C. Martin; "Nanosecond Pulse Techniques" AWRE Report SSWA/JCM/709/49 UKEA, AWRE Aldermaston, England, P15 (April 1970).
- (11) L. G. Schlitt and L. P. Bradley; (unpublished)
- (12) J. G. Eden and D. Epp; Rev. Sci. Instrum. **51** (1980) 781.
- (13) I. Langmuir and K. T. Compton; Rev. Mod. Phys. **3** (1931) 191.
- (14) 根本, 矢野; 電子技術総合研究所彙報 **42** (1978) 363.
- (15) E. Fujiwara, Y. Kato, and C. Yamanaka; Japan. J. Appl. Phys. **20** (1981). (to be published).