

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-53226

(P2008-53226A)

(43) 公開日 平成20年3月6日(2008.3.6)

(51) Int.Cl.

H01J 37/063 (2006.01)

F1

H01J 37/063

テーマコード (参考)

5C030

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 41 頁)

(21) 出願番号 特願2007-193452 (P2007-193452)  
 (22) 出願日 平成19年7月25日 (2007.7.25)  
 (31) 優先権主張番号 特願2006-224699 (P2006-224699)  
 (32) 優先日 平成18年7月26日 (2006.7.26)  
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 500159772  
 中筋 護  
 神奈川県横浜市港南区芹が谷2丁目15番  
 11号  
 (72) 発明者 中筋 護  
 神奈川県横浜市港南区芹が谷2丁目15番  
 11号  
 Fターム(参考) 5C030 BB05 BB06 BB17 BC06

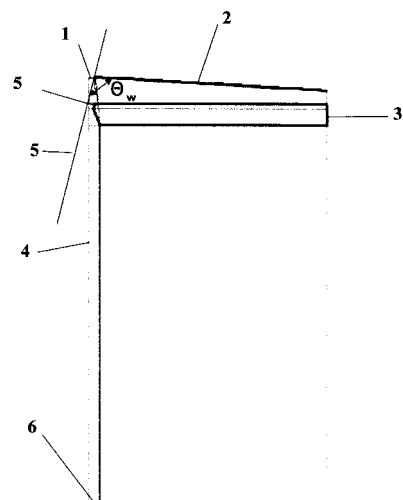
(54) 【発明の名称】 電子銃及び電子線装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】平面カソード、ウエーネルト、引き出し電極又はアノードを有する平面引き出し電極電子銃で、Langmuir限界を越える高輝度、高エミッタンスのビームを得る。

【解決手段】円形平面のカソード1、球面の一部の形状を有する引出し電極又はアノード3、及び円錐台形状のウエーネルト電極2を有し、カソードの外周と引き出し電極位置で光軸と交わる仮想的な円錐と67.5の角度差を有する仮想的な円錐台を想定し、その外側に、ウエーネルト電極を設ける。特に、カソード半径が $10\ \mu\text{m}$   $R$  から $960\ \mu\text{m}R$  では高輝度がシミュレーションで得られている。また、光陰極のカソードから放出させた電子線が、カソードから引き出し電極間はそのビーム径を単調に減少させ、引き出し電極の後方でクロスオーバーを形成するように制御するようにした電子銃では、高輝度で、エネルギー幅の小さいビームを利用することができる。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

円形平面のカソード、球面の一部の形状を有する引出し電極又はアノード、及び円錐台形状のウーネルト電極を有し、上記カソードの外周と引き出し電極位置で光軸と交わる仮想的な円錐と 67.5 の角度差を有する仮想的な円錐台を想定し、その外側に、上記ウーネルト電極を設ける事を特徴とする電子銃。

## 【請求項 2】

請求項 1 において、上記仮想円錐台とウーネルトとの同じ Z 位置での半径は、カソードに近い側が小さいようにした事を特徴とする電子銃。

## 【請求項 3】

請求項 1 の手段の電子銃から放出された電子線で複数の開口を照射しそれらの開口で整形された複数の電子線で試料面を走査し、走査点から放出された 2 次電子を拡大光学系で検出器に結像させ試料面の情報を得る装置において、上記拡大光学系の最終拡大レンズの手前に 2 次電子のクロスオーバー像を制御する補助レンズを設けるようにした事を特徴とする電子線装置。

## 【請求項 4】

円形状カソード、ウーネルト電極、引き出し電極又はアノード電極を有し、上記カソードから放出させた電子線が、カソードから引き出し電極間はそのビーム径を単調に減少させ、引き出し電極の後方で最小ビーム径を形成するように制御するようにした事を特徴とする電子銃。

## 【請求項 5】

円形のカソード、引出し電極又はアノード、及びウーネルト電極を有し、カソード電流:  $I_e$  を

$$0.0062R_c - 0.0487 \leq I_e \leq 0.0101R_c + 4.73 \quad R_c \geq 0.3 \text{ mm}, \text{あるいは}$$

$$0.0062R_c - 0.0487 \leq I_e \leq 0.0266R_c - 0.225 \quad R_c < 0.3 \text{ mm}.$$

の範囲内の値にし、あるいは、

電子銃電流:  $I_e$  を

$$0.204/D_{ac} - 0.0086 \leq I_e \leq 40/D_{ac} - 2.24$$

の範囲内の値にした事を特徴とする電子線装置。

## 【請求項 6】

円形平面のカソード、凸面の形状を有する引出し電極又はアノード、円錐の一部の形状のウーネルト電極を有し、電子銃電流:  $I_e$  を

$$0.388/D_{ac} - 0.046 \leq I_e \leq 92.8/D_{ac} + 9.28, \quad D_{ac} \geq 3 \text{ mm}, \text{あるいは}$$

$0.388/D_{ac} - 0.046 \leq I_e \leq 22/D_{ac} + 32.7, \quad D_{ac} < 3 \text{ mm}.$  の範囲内の値にする事を特徴とする電子線装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、超高輝度が得られる電子銃に関し、またその様な電子銃を用い、表面にパターンが形成された試料の評価をするための電子線装置に関し、より詳細には、半導体製造各工程後等におけるウエハ等の試料に電子ビームを照射し、その表面の性状に応じて変化する二次電子等を捕捉して画像データを形成し、該画像データに基づいて試料表面に形成されたパターンの欠陥等を高スループットで評価するための電子線装置に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

半導体製造プロセスにおいて、デザインルールは 45 nm の時代を迎えようとしており、また生産形態は DRAM に代表される少品種大量生産から SOC (Silicon on n-chip) のように多品種少量生産へ移行しつつある。それに伴い、製造工程数が増

10

20

30

40

50

加し、工程毎の歩留まり向上は必須となり、プロセス起因の欠陥検査が重要になる。

そして、半導体デバイスの高集積化及びパターンの微細化に伴い、高分解能、高スループットの検査装置が要求されている。45nmデザインルールของ ueha の欠陥を調べるためには、40nm以下の分解能が必要であり、デバイスの高集積化による製造工程の増加により、検査量が増大するため、高スループットが要求されている。また、デバイスの多層化が進むにつれて、層間の配線をつなぐビアのコンタクト不良（電氣的欠陥）を検出する機能も、検査装置に要求されている。

このような状況において、1本の光軸の近傍に複数のビームを形成し高スループット化する装置が検討されている。(Mamoru Nakasuji et al, Jpn. J, Appl., Phys., Vol 44, No. 7B 2005, P 5570) この様なマルチビーム装置では高輝度は勿論、高エミッタンスの電子銃が要求される。

ERL放射光源の入射用に用いる電子源では、超高輝度で大ビーム電流の電子銃が要求される。(西谷他、第53回応用物理学関連講演会講演予講習No2, 2006 春 p 798)

電子銃の輝度に関しては、Langmuir限界と呼ばれる最高値があると、従来から信じられていた。それは、次式で示される値であった。

カソード電流密度を $J_c$ 、とすると、得られる最大電流密度 $J_{max}$  は、

$$J_{max} = J_c (1 + e / kT) \sin^2 \quad (1)$$

最大輝度 $B_{max}$ は、

$$B_{max} = J_{max} / \sin^2 = J_c (1 + e / kT) / \quad (2)$$

例えば、 $J_c = 10A/cm^2$ ,  $V = 4500V$ では、 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ ,  $k = 1.38 \times 10^{-23}$ を(2)式に代入すると、 $B_{max} = 9.23 \times 10^4 A/cm^2 sr$ となる。

しかし、これらの式は、電子銃が光学モデルに合うと仮定して得られる式で、光学モデルから外れている場合は、このような限界の有無は不明である。言い方を変えれば、このような値より遙かに大きい輝度をうるには、光学モデルから著しくはずれた電子ビームを作れば、得られる可能性がある。

上記した従来装置における電子銃は、カソード表面に高電界がかかる様曲率半径の小さい凸型の球面形状を有するカソードと平面アノード、平面ウエーネルト電極を有する3電極電子銃が主流であった。しかしながら、このような電子銃の輝度は限界があり、所望の輝度より遙かに小さいという問題があった。

更に、これに関し曲率半径25 ~ 40  $\mu R$ の球面カソードと平面アノード及び平面ウエーネルト電極を有する3電極電子銃で、Langmuir限界を超えるシミュレーション結果が提案されている。

【特許文献1】特開2003 - 2977272号公報

【特許文献2】特開2004 - 22235号公報

【特許文献3】特開2003 - 323860号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

しかしこのような電子銃では、カソード寸法が小さいので、少しの組み立て精度の悪さ等で、シミュレーション結果の性能が、実際には得られていない問題があった。

【0004】

また、従来のタイプの電子銃ではカソードの近辺で電流密度が高いため、カソード付近でビームエネルギーの小さい時に電子同士が相互作用を起こしエネルギー幅が広がる問題点があった。本発明は上記問題点を解決するためのもので、Langmuir限界を超える輝度を確実に得られる電子銃を提供し、更にマルチビーム発生に適し、エネルギー幅の小さい電子銃を提供する事を目的とし、さらに本発明で得られる電子銃の性能を充分生かせるマルチビームの電子光学系を提供することも目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0005】

上記した目的を達成するために、本発明に係る電子線装置においては、円形平面のカソ

10

20

30

40

50

ード、凸面の形状を有する引出し電極又はアノード、円錐の一部の形状のウエーネルト電極を有する電子銃とし、電子銃電流を

$$0.388/Dac - 0.046 \leq I_e \leq 92.8/Dac + 9.28, \quad Dac \leq 3 \text{ mm}, \text{ あるいは}$$

$0.388/Dac - 0.046 \leq I_e \leq 22/Dac + 32.7, \quad Dac < 3 \text{ mm}.$  の範囲内の値にする様にした。さらに、上記の手段において、上記カソード半径は、 $20 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$  の範囲とした。

#### 【0006】

また、負の電子親和力を有する光陰極のカソード、平面の一部の形状を有する引出し電極又はアノード、及び円錐台形状のウエーネルト電極を有し、カソード電流をmA、カソード半径 $R_c$ を $\mu\text{m}$ とした時、カソード電流を、

$$0.5 + 0.0098R_c < \text{カソード電流} < 2.3 + 0.026R_c \quad \text{の範囲内の値にした。}$$

更に上記手段において、カソード曲率半径を1.5mm以上の凹面、凸面あるいは平面とした。

#### 【0007】

更に、円形のカソード、平面の一部の形状を有する引出し電極又はアノード、及び円錐台形状のウエーネルト電極を有し、上記アノードとカソード間に形成される電界強度を1.6~5.53 kV/mmの範囲内とした。

#### 【0008】

さらに、円形のカソード、平面の一部の形状を有する引出し電極又はアノード、及び円錐台形状のウエーネルト電極を有し、上記カソード直径を、 $20 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$  の範囲とし、カソードとアノード間距離を0.8~3mmの範囲とした。

#### 【0009】

円形のカソード、平面の一部の形状を有する引出し電極又はアノード、及び円錐台形状のウエーネルト電極を有し、上記円錐台形状のウエーネルト電極とビーム外周との角度は、 $69.4 \sim 93.2$ 度にした。ただし、ビーム外周はカソード外周とアノード位置での光軸とを結んだ円錐で近似した。

#### 【0010】

光陰極のカソード、ウエーネルト電極、引き出し電極又はアノード電極を有し、上記カソードから放出させた電子線が、カソードから引き出し電極間はそのビーム径を単調に減少させ、引き出し電極の後方で最小ビーム径を形成するよう制御するようにした。

さらに、上記手段において、上記カソード直径は、 $40 \mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$  の範囲とした。

また、上記第1の手段の電子銃の後方にレンズを設け、該レンズの励磁あるいは励起電圧を調整して、電子銃輝度を調整するようにした。

#### 【0011】

更に、光陰極のカソード、ウエーネルト電極、引き出し電極又はアノード電極を有し、カソード電流 $I_e$  を

$$0.5 + 0.0098R_c > I_e > 2.4 + 0.026R_c$$

とした。なお、この手段において上記カソード半径は $20 \sim 500 \mu\text{m}$  の範囲とした。

#### 【0012】

更に、光陰極のカソード、ウエーネルト電極、引き出し電極又はアノード電極を有し、カソード電流 $I_e$  を

$$I_e > 1.4 + 0.019R_c$$

とした。なお、上記第1の手段において上記カソードとアノード間にかかる電界強度は、 $1.6 \text{ kV/mm}$ 以上とした。

#### 【0013】

更に、円形平面の光電子放出カソード、ウエーネルト電極、平面の形状を有する引出し電極又はアノード、円錐の一部の形状のウエーネルト電極を有する電子銃とし、電子銃電流をカソード半径から決まる所定値流す様にした。また、上記手段の電子銃の後方にレンズを設け、該レンズの励磁あるいは励起電圧を調整して、電子銃輝度を調整するよう

10

20

30

40

50

た。

【 0 0 1 4 】

また、上記第 1 の手段の電子銃から放出された電子線で開口を照射しその開口で整形された電子線で試料面を走査し、走査点から放出された 2 次電子を検出し、試料面の情報を得るようにした。

更に、上記最後の手段において上記電子銃と開口間に 2 段のコンデンサーレンズを設け、第 1 コンデンサーレンズと開口間にクロスオーバを形成しないで上記開口を照射する電流密度を調整するようにした。

【 0 0 1 5 】

また、プランクの常数を  $h$ 、照射レーザー波長を  $\lambda$ 、カソードの仕事関数を  $e$  としたとき、カソード励起レーザー波長は  $h = e$  で決まる限界波長の  $\pm 20\%$  以内の波長を用いた。

更に、カソードを冷却し、カソード励起レーザー波長は  $h = e$  で決まる限界波長の  $0 \sim 10\%$  以内の波長を用いるようにした。

さらに、光陰極のカソード、平面の一部の形状を有する引出し電極又はアノード、及び円錐台形状のウーネルト電極を有し、カソード電流を  $\text{mA}$ 、カソード半径  $R_c$  を  $\mu\text{m}$  とした時、カソード電流を  $0.0107R_c < \text{カソード電流} < 0.06R_c$  の範囲内の値にした。

【 0 0 1 6 】

また、カソード電流:  $I_e$  を

$$0.0062R_c - 0.0487 \quad I_e \quad 0.0101R_c + 4.73 \quad R_c \quad 0.3 \text{ mm}, \text{ あるいは}$$

$$0.0062R_c - 0.0487 \quad I_e \quad 0.0266R_c - 0.225 \quad R_c < 0.3 \text{ mm}.$$

の範囲内の値にした。さらに、

電子銃電流:  $I_e$  を

$$0.204/Dac - 0.0086 \quad I_e \quad 40/Dac - 2.24 \text{ の範囲内の値にした。}$$

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 1 7 】

表 1 は、Langmuir 限界を超える輝度を得るのに用いた電子銃モデル例である。このようなモデルで MEBS 社 シミュレーションソフト “Source” を用いて、計算を行った。また、“sourcea” を行うための条件も表 1 の最後に記載した。表 1、2 で太字はパラメータとして変化させた箇所である。シミュレーション手順は、

1) ウーネルト電圧をある値に設定し、“SourceV” を実行するとカソード電流  $I_e$  が算出される。

2) “SourceA” を実行するとカソード電流密度  $J_c$  とクロスオーバ径  $D_{co}$ 、クロスオーバ位置:  $Z_{co}$  が算出される。

3) “SourceB” を実行すると輝度の放出角度依存性が出力される。軸上輝度  $B$  と輝度が軸上輝度の  $90\%$  又は  $110\%$  になる放出角を読み取り、該放出角と上記クロスオーバの積からエミッタンスが算出される。

【表 1】

図 1 の電子銃モデルのシミュレーション用データ。

## 電子銃データ

High Brightness Gun 20ff.dat 4.5kV	•	1	5	71	81	89	201	
• Cathode	•	1	0.	0.	0.	0.	0.	0.
• Region 22 61	•	20	0.	0.	0.	0.	0.	0.
• Temperature 1800	•	22	0.	0.	0.	0.	0.	0.
• Work function 2.35	•	61	0.	0.	0.	0.	0.	0.
• Richardson constant 43								
• Space Charge on	•	1	5	71	81	89	201	
• Rays 15	•	1	0.	0.	0.	0.	0.	0.
• Cycles 30	•	20	0.	0.	0.	0.	0.	0.
• Time step factor 0.33	•	22	0.	0.	-.2	0.	0.	0.
• Convergence 0.002	•	61	0.	0.	0.	0.	0.	0.
• Save Trajectories on								
• Relativity on								
• Rotational Symmetry	•	1	1	1	20	-641.		
• Mesh	•	71	89	1	22	4500.		
	•	1	5	71	81	89	201	
• 1 1.4 1.42 2. 2.2 3. 20.	•	1						-641.
• 20 0.8 .85 2. 2.2 3. 20.	•	20						-641.
• 22 0.8 .85 2. 2.2 3. 20.	•	22	0.					
• 61 0.8 .85 2. 2.2 3. 20.	•	61	0.					
	•	1						-641.
• 1 5 71 81 89 201	•	61						4500.
• 1 10.5 10.5 10.5 10.5 10.5	•	201	4500.					
• 20 .3 .31 .42 .42 .5 .5	•	1	4500.					
• 22 .2 .21 .4 .2 .48 .48	•	61	4500.					
• 61 0. 0. 0. 0. 0. 0.								
	•	20ff.con	データ					
	•	Time step factor	0.3					
	•	Rays	90					

【 0 0 1 8 】

図 1 は、本発明に係る電子銃の概念的断面モデル図である。形状は光軸 4 の回わりに回転対称形で、平面引き出し電極電子銃である。カソード 1 は電子線放出面が平面円板状で、 $\text{LaB}_6$ 、 $\text{CeB}_6$ 、 $\text{W-ZrO}$ 等の低仕事関数材料あるいは光陰極である。ウエーネルト電極 2 は、円錐台の内面の一部の形状であるのは従来の電子銃と共通であるが、その位置と寸法は次の特徴がある。カソードの外周からアノード位置で光軸と交わる仮想的な円錐を仮定し、この円錐と  $w$  度の角度差を有し、カソード外周と同じ Z 座標、R 座標はカソード外周 + 100  $\mu\text{m}$  位置から始まる円錐 2 で示したウエーネルトを設けた。円錐 7 は近似的にビームの外周である。ビーム外周面はビーム電流を変えると変化するため仮想円錐は上記の様に定義した。ここでは上記ウエーネルト角： $w$  は 90.5 度とした。アノード電極のカソード側端 5 には放電を避けるため曲面にした。ビームが通る穴は光軸と平行な 0.2 mm R の穴とした。カソード 1 はウエーネルト 2 に対して組み込み前に大気中で軸あわせ可能な構造とし、これら 2 電極とアノードとは図示の無い電子銃外側に設けた微調整機構によってビームを見ながら軸調整を行えるようにした。

## 【 0 0 1 9 】

図 1 のモデルでの電子銃で、カソード半径  $R_c$  を 80、100、120、140、160、180、200  $\mu\text{m}$  と変化させたシミュレーション結果を図 2 に示した。アノード電圧：4.5 kV、カソード：0V、ウエーネルト電圧を変えて電子銃電流を変化させた。電子銃 631、電流を変えて輝度を変化させた。図 2 で横軸は電子銃電流  $I_e$  (mA)、縦軸は輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{sr}$ )、エミッタンス ( $\mu\text{mmrad}$ )、及びカソード電流密度  $J_c (\text{A/cm}^2)$  である。図 1 で、カソードとアノード電極間距離： $D_{ac}$  は 1.2 mm である。

20 はカソード半径 80  $\mu\text{m}$ 、21 はカソード半径 100  $\mu\text{m}$ 、22 は、カソード半径 120  $\mu\text{m}$ 、23 はカソード半径 140  $\mu\text{m}$ 、24 はカソード半径 160  $\mu\text{m}$ 、25 はカソード半径 180  $\mu\text{m}$ 、26 はカソード半径 200  $\mu\text{m}$  の電子銃である。点線はエミッタンスであり、直線に近い実線はカソード電流密度であり、実線の曲線は輝度である。カソード半径に依存して変わるが、80  $\mu\text{m}$   $R_c$  以外の各電子銃は特定の  $I_e$  で輝度が大きくなり、Langmuir 限界値を遙かに超えた値が得られている。用いたシミュレーションはカソードでの電子の初期速度分布は無視した計算のため、輝度の絶対値はやや信頼性に欠けるが、初期エネルギー幅は計算に用いられているので相対値は真値に近いと考えられる。

100  $\mu\text{m}$   $R_c$  で 6.4 mA、120  $\mu\text{m}$   $R_c$  で 7.26 mA、140  $\mu\text{m}$   $R_c$  で 8.4 mA、160  $\mu\text{m}$   $R_c$  で 10.1 mA、180  $\mu\text{m}$   $R_c$  で 12 mA、200  $\mu\text{m}$   $R_c$  で 12.8 mA で高輝度が得られている。これらの電子銃電流は、従来の高輝度電子銃では、数 100  $\mu\text{A}$  以下であったのに対して、本結果は、10 倍以上の電子銃電流にしているのが特徴である。即ち電子銃電流を大きくすることによって、光学モデルからはずした条件にすることによって、Langmuir 限界値を遙かに超えた値が得られたといえる。

100、120、及び 140  $\mu\text{m}$   $R_c$  の電子銃では  $I_e$  を増加すると輝度は増加し、超高輝度になった直後、急減している。これに対して 180  $\mu\text{m}$   $R_c$  と 200  $\mu\text{m}$   $R_c$  では、電子銃電流  $I_e$  を上げていくと一度輝度が大幅に小さくなり、更に  $I_e$  を上げると超高輝度が得られているのが見られる。従って 180  $\mu\text{m}$   $R_c$  と 200  $\mu\text{m}$   $R_c$  電子銃では、超高輝度条件を探すには、輝度が低下する条件を探し、その電子銃電流より少し大きい電子銃条件を調べればよい。

また、最大輝度が得られるカソード電流  $I_{e\text{max}}$  とそのカソード半径  $R_c$  の比 ( $I_{e\text{max}}/R_c$ ) を算出すると、100、120、140、160、180、200  $\mu\text{m}$   $R_c$  で順に、0.064、0.0605、0.06、0.0631、0.066、0.064 (mA/ $\mu\text{m}$ ) が得られた。従って、カソード半径 ( $\mu\text{m}$ ) に 0.0638 を掛けた値のカソード電流で、Langmuir 限界値を遙かに超えた輝度が得られる。

## 【 0 0 2 0 】

図 3 は図 2 から、輝度 エミッタンス曲線および輝度 カソード電流密度特性に変えたグラフである。右下がりの曲線は輝度 エミッタンス曲線で、ここでは図の右、あるいは上の曲線が高性能である。水平に近い実線のデータは、輝度 カソード電流密度特性であり、図の下、下の線が高性能である。31、32、33、34 の各曲線はわずかに右上がりになっているのは、図 2 の輝度最大値より低電子銃電流側をグラフ化したからである。35、36 の各曲線はわずかに右下がりになっているのは、図 2 の輝度最大値より高電子銃電流側をグラフ化したからである。30、31、32、33、34、35、36 は順に 80  $\mu\text{m}$   $R_c$ 、100  $\mu\text{m}$   $R_c$ 、120  $\mu\text{m}$   $R_c$ 、140  $\mu\text{m}$   $R_c$ 、160  $\mu\text{m}$   $R_c$ 、180  $\mu\text{m}$   $R_c$ 、及び 200  $\mu\text{m}$   $R_c$  である。37 は Langmuir 限界値の  $J_c$  依存性で、従来の理論では、37 の右には  $B-J_c$  の曲線は存在しない筈である。38 は (輝度)  $\times$  (エミッタンス)<sup>2</sup> に比例する値で、この点線に平行な線が、輝度 エミッタンス特性で、より右上の動作点では、開口でビームを遮らない場合に得られる最大電流が見積もれる。34、35、36 の曲線の傾斜は、38 の傾斜より垂直に近いので同じ電子銃では、低輝度、高エミッタンス条件が大きいビーム電流が得られる。31、32、33 曲線の傾斜は、38 の傾斜より水平に近いので同じ電子銃では、高輝度、低エミッタンス条件が大きいビーム電流が得られる。

この図で次のような事が言える。

1) 平面カソード平面アノード電極電子銃は、100  $\mu\text{m}$   $R_c$  から 200  $\mu\text{m}$   $R_c$  で Langmuir 限界値を遙かに超える特性が得られる。

10

20

30

40

50

2) カソード半径が大きいほうが、小さいカソード電流密度でLangmuir限界値を超える高輝度が得られる。

3)  $80 \mu R_c$  では上記条件ではLangmuir限界値を超える高輝度は得られなかった。

4) 超高輝度条件を探すには、カソード半径 $R_c(\mu m)$ とし、 $R_c \times 0.0638 (mA)$ の電子銃電流を調べればよい。

図4は高輝度が得られなかった場合、図5は高輝度が得られる場合の電子軌道をカソード半径 $80 \mu m$ 電子銃で比較した例である。カソード1、ウエーネルト2、アノード3、光軸4は図1と同じである。42、43、44は、それぞれ0、100、4400Vの等電位線である。図4ではクロスオーバ41がカソードとアノード間に形成されている。図5では光軸に近い軌道40では、アノード電極を過ぎるまで、クロスオーバを作らず、層流モデルに近い軌道になっている。図4と図5の比較から、クロスオーバを作る光学モデルに近い電子軌道ではなく、層流モデルに近い電子軌道になる様電子銃条件を制御することが、超高輝度を得る1条件であると言える。

以上述べた様に、カソード半径に依存する所定の電子銃電流を流せば、超高輝度が得られることを示した。しかし、これらの電流は大きいので、より小さい電流でLangmuir限界値を超える高輝度が得られるかを調べた。図6は図1のモデルの後方に静電レンズを設けた場合である。3枚の電極61、62、63をもうけ、61、63にアノードと同電位、中央電極62に種々の電圧を与えて、シミュレーションを行った。図6のモデル例を表2に示した。"Sourcea"を実行するための.conデータは表1のものと同一である。



【表 2】

図 6 の電子銃モデルのシミュレーション用データ。

## レンズ付電子銃データ

• Title High Brightness Gun 8ff.dat 4.5kV	
• Cathode	
• Region 22 61	
• Temperature 1800	• 1 1 1 20 10.2
• Work function 2.36	• 41 81 1 22 4500.
• Richardson constant 60	• 111 116 1 22 4500.
	• 121 126 1 22 14000.
	• 131 136 1 22 4500.
• Space Charge on	
• Rays 15	
• Cycles 30	
• Time step factor 0.33	• 1 10.2.
• Convergence 0.002	• 20 10.2
	• 22 0.
• Save Trajectories on	• 61 0.
	• 1 10.2
• Relativity on	• 41 4500.
	• 116 4500.
• Rotational Symmetry	• 121 14000.
• Mesh	• 126 14000.
• 1 5 41 71 81 141 201	• 131 4500.
• 1 1.4 1.42 2. 2.2 3.6 18.4 35.	• 201 4500.
• 20 .8 .85 2. 2.2 3.6 18.4 35.	• 1 4500.
• 22 .8 .85 2. 2.2 3.6 18.4 35.	• 61 4500.
• 61 .8 .85 2. 2.2 3.6 18.4 35.	
•	
• 1 5 41 71 81 141 201	
• 1 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1.	
• 20 .1 .11 .42 .22 .3 .3 .3	
• 22 .08 .09 .4 .2 .28 .28 .28	
• 61 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.	
•	
• 1 5 41 71 81 141 201	
• 1 0.0. 0. 0.0. 0. 0.	
• 20 0.0. 0. 0.0. 0. 0.	
• 22 0.0. 0. 0.0. 0. 0.	
• 61 0.0. 0. 0.0. 0. 0.	
•	
• 1 5 41 71 81 141 201	
• 1 0.0. 0. 0. 0. 0. 0.	
• 20 0.0. 0. 0. 0. 0. 0.	
• 22 0.0. -.2 0. 0. 0. 0.	
• 61 0.0. 0. 0. 0. 0. 0.	

## 【 0 0 2 1 】

結果を図 7 及び図 8 に示す。図 7 は輝度(実線)、エミッタンス(点線)及びカソード電流密度(実線)の電子銃電流  $I_e$  依存性である。中央電極 6 2 に与えた電位は、それぞれ、71 , は 1 2 . 5 kV, 7 2 は 1 4 kV; 7 3 は 1 5 kV; 7 4 は 1 2 kV; 7 5 は 4 . 5 kV である。アノード電位が 0V の場合は、これらの値から 4 . 5 kV を差し引く必要がある。カソード半径  $R_c$  は 140  $\mu\text{m}$  の場合についての結果である。レンズの励起が無い 7 5 が 9 . 4 mA で高輝度になっているのに対して、1 2 . 5 kV では 4 . 7 5 mA; 14kV では 5 . 7 mA , 1 5 kV では 7 . 2 5 mA; 1 2 kV では 9 . 2 3 mA でそれぞれ最高輝度が得られている。つまり、レンズを通すことによって、より小さい電流で最高輝度が得られている。

全てのレンズ条件に共通して、電子銃電流  $I_e$  を上げていくと輝度が単純増加し、更に  $I_e$  を上げると超高輝度が得られ、その後輝度が急減し、最低輝度になる。エミッタンスは輝度が最大になった条件で最小になり、その後輝度の急減に一致して最大になっているのが

見られる。従って超高輝度条件を探すには、輝度を測定可能な開口を設け輝度測定を行うか、あるいはエミッタンスが大きくなる条件を探し、その電子銃電流より少し小さい電子銃条件を調べればよい。

#### 【 0 0 2 2 】

図 8 は図 7 を輝度  $B$  - エミッタンス  $E$  特性 ( ほぼ右下がりの曲線群 ) と  $B$ - $J_c$  ( カソード電流密度 ) で示したものである。8 1 , 8 2 , 8 3 , 8 4 , 8 5 , 8 6 はそれぞれ、12.5kV, 13kV, 14kV, 12kV, 4.5kV の電圧をレンズの中央電極に印加した場合である。これらの電圧は、カソードを 0V とした場合の値で、カソードが  $-4.5\text{ kV}$  の場合は、 $4.5\text{ kV}$  を引いた値となる。3 7 は Langmuir 限界で、従来の理論ではこの線の右側には  $B$ - $J_c$  特性のデータは存在しない筈である。3 8 は図 3 で説明した直線で、ここでも  $B$ - $E$  特性の傾斜が 3 8 の傾斜より大きいので、得られる最大ビーム電流は、低輝度、高エミッタンス条件の方が大きくなる。レンズ作用が無い場合の  $B$ - $E$  曲線 8 6 がレンズ作用のある場合 8 1 , 8 2 , 8 3 , 8 4 , 8 5 より上にあるので、残念ながらレンズ作用を利用すると、同じ輝度で得られる最大ビーム電流は小さくなる。

#### 【 0 0 2 3 】

図 9 は、なぜレンズを通すと輝度が向上するかを調べるため、カソードの面から垂直に放出された電子の軌道を示した図である。9 1 に示した様に、カソードから等間隔で放出された軌道は、空間電荷効果のため中央で密度が小さくなっているのがみられる。しかし、レンズを通過した後、9 2 に示した様に評価面 6 では密度分布が大幅に改善され、空間電荷効果による輝度の低下を補っているといえる。9 3 は正電圧駆動レンズの等ポテンシャル分布である。

#### 【 0 0 2 4 】

図 1 0 は負電圧駆動レンズを用いた場合の軌道を示したものである。図 9 の場合と同様に、レンズに入射する前 1 0 1 に比較してレンズを通過後密度分布が大幅に改善され、高輝度を裏づけている。103 は負電圧駆動レンズの等ポテンシャル分布である。

#### 【 0 0 2 5 】

図 1 1 は円錐ウエーネルトの角度を変化させてシュミレーションした結果である。カソード半径  $R_c$  は  $80\text{ }\mu\text{m}$  の結果である。ウエーネルト電極とビーム外周の近似的な面との角度を、93.2度、90.5度、83.6度、69.4度及び57.6度の場合を順に、110、111、112、113、114、に示した。点線はエミッタンス、右上がりの実線はカソード電流密度、右肩で急に上昇しているのが輝度である。ウエーネルト電極とビーム外周の近似的な面との角度が93.2度から69.4度のものは、 $1 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2\text{sr}$  を超える超高輝度が得られているが、57.6度の条件では、最高輝度は  $4.6 \times 10^{-5}\text{ A/cm}^2\text{sr}$  であった。このことから、ウエーネルト電極とビーム外周の近似的な面との角度は69.4度より大きい必要がある。

ここで、ウエーネルト角度：90.5度：111と69.4度：113を比較すると、Langmuir 限界を超える輝度が得られるカソード電流の比は  $2.8\text{mA}/3.6\text{mA}=0.777$  倍である。

#### 【 0 0 2 6 】

図 1 2 は、図 1 1 の結果を輝度  $B$  - エミッタンス  $E$  特性 ( 右下がりの曲線 ) と  $B$ - $J_c$  特性で表したグラフである。120、121、122、123、及び124はそれぞれウエーネルト電極とビーム外周の近似的な面との角度が、93.2度、90.5度、83.6度、69.4度及び57.6度の場合である。37は、カソード温度1800KでのLangmuir 限界で、従来の理論では、この右側には  $B$ - $J_c$  特性は存在しない。121：92度は  $B$ - $E$  特性が右側にあり、おなじエミッタンスで大きい輝度が得られ、良い性能である。120：90.5度はカソード電流密度が高すぎる。123：69.5度はカソード電流密度が低い特徴がある。以上から、ウエーネルト電極とビーム外周の近似的な面との角度は、69.4～90.5度が最適で、67.5度より大きければLangmuir 限界を超える輝度が得られる。124：57.6度は、値は小さいがLangmuir 限界を超える輝度が得られている。

#### 【 0 0 2 7 】

図 1 3 はカソード半径  $R_c$  を40、80、120、160、及び200  $\mu\text{m}$  の電子銃について電子銃電流  $I_e$  を変化させてシュミレーションした結果である。レンズ電圧は  $12.5\text{ kV}$  であり

、図7の説明で述べたように、Langmuir限界を超える輝度を得られるカソード電流が最も小さくなった条件である。また、ウーネルト角は90.5度、カソードとアノード間隔Dacは1.2mmである。これらの結果は、順に130, 131, 132, 133、及び134に示した。直線に近い実線はカソード電流密度(単位はA/cm<sup>2</sup>)実線の曲線は輝度(単位は10<sup>-5</sup>A/cm<sup>2</sup>sr)点線の曲線はエミッタンス(μmrad)であり、横軸はカソード電流Ie,単位はmAである。輝度が最大になるカソード電流値は、40~200μmRcに対して、順に1.82, 2.93, 4.24, 5.4, 6.58 mAである。これらの電流値は、

$$I_e = 0.5 + 0.0304R_c$$

の直線上にほぼ乗っている。従ってLangmuir限界を超える輝度を得られる条件は、カソード電流(mA) = 0.5 + 0.0304 Xカソード半径(μm)にすれば良い。レンズを使わない場合の結果、カソード電流 = 0.0658 X Rcを考慮すれば、レンズ条件が最適でない場合は、これら2つの式の間であるから、

$$0.5 + 0.0304R_c < \text{カソード電流} < 0.0658R_c \quad (3)$$

である。

#### 【0028】

図14は図13の結果を輝度B-エミッタンスE特性(右下がりの曲線)とB-Jc特性で表したグラフである。140, 141, 142, 143, 及び144はカソード半径Rcが40, 80, 120, 160, 及び200μmの電子銃に対応する。輝度カソード電流密度特性がほぼ水平に近い所ではLangmuir限界に対応する直線37の右側にあり、輝度が急速に大きくなる条件にも対応しているので、上で述べた“Langmuir限界を超える輝度を得られる条件は、カソード電流 > 0.5 + 0.0304 Xカソード半径(μm)にすれば良い。”の主張を支持している。

輝度カソード電流密度特性で、カソード半径が大きいほうが、小さいカソード電流密度でLangmuir限界を超える輝度を得られる。また、顕著ではないがB-E特性で、カソード半径が小さい方が同じ輝度で大きいエミッタンスが得られる傾向がある。

#### 【0029】

図15はカソードとアノード間隔:Dcaをパラメータとし、電子銃電流Ieを変化させてシュミレーションした結果である。カソード半径Rcは120μm、レンズ電圧は14kV, ウーネルト角度は90.5度の条件とした。Dacは3, 2.8, 1.8, 1.6, 1.2, 及び1mmの寸法で行った。これらの結果は、順に150, 151, 152, 153, 154及び155に示した。点線の曲線はエミッタンス(μmrad)、実曲線は輝度(x10<sup>-5</sup>A/cm<sup>2</sup>sr), 直線に近い曲線はカソード電流密度(A/cm<sup>2</sup>)で前のグラフも今後のグラフもこれは、光軸近くの値である。カソードとアノード間隔:Dcaが3mmの電子銃では、輝度は最大でも5.6x10<sup>-5</sup>A/cm<sup>2</sup>srにしかならなかった。カソードとアノード間隔:Dcaが2.8mm以下の条件では、輝度は1x10<sup>-7</sup>A/cm<sup>2</sup>srを遙かに超える値が得られた。カソードとアノード間には4.5kVの電圧が印加されているので、このことから、カソードとアノード間の電界強度は、ほぼ1.6~4.5kV/mmであれば、Langmuir限界を超える輝度が得られると言える。

更に、151と154をLangmuir限界を超える輝度を得られるIeを比較すると、Dac:1.2mmでは2.5mAに対してDac:2.8mmでは4.5mAである。従って、Dac:1.2mmの図13の結果をDac:2.8mmの場合に換算すると、(3)式は(4)式になる。

$$0.278 + 0.0169R_c < \text{カソード電流} < 0.0658R_c \quad (4)$$

さらに、最適ウーネルト角度を用いると、[0026]で述べた比0.777倍を考慮すると、(4)は、

$$0.168 + 0.0131R_c < \text{カソード電流} < 0.0658R_c \quad (5)$$

になる。

#### 【0030】

図16は図15の結果を輝度B-エミッタンスE特性(右下がりの曲線)とB-Jc特性で表したグラフである。Dcaが3, 2.8, 2.2, 1.8, 1.4, 及び1mmの寸法の特性が、順に160, 161, 162, 163及び164に対応している。輝度B-エミッタンスE特性から160のDacが3

mm の場合が良くない。また、この条件では、輝度も最大でも  $5.6 \times 10^5 \text{ A/cm}^2\text{sr}$  であるが B-Jc 特性が直線 37 の右側にあるので Langmuir 限界を超える輝度は得られている。

カソードとアノード間の電界強度が大きいものは、同じ輝度では大きいエミッタンスが得られる傾向がある代わりに高輝度でのカソード電流密度が大きい問題がある。従ってこの図からも、カソードとアノード間の電界強度は、ほぼ  $1.6 \sim 4.5 \text{ kV/mm}$  の条件が最適である。

#### 【0031】

次にカソード温度を変化させた場合について図 17 及び図 18 で述べる。レンズの無い図 1 のモデルで、カソード半径  $140 \mu\text{m}$  R<sub>c</sub>、アノード-カソード間距離 D<sub>ac</sub>:  $1.2\text{mm}$ 、ウエーネルト角度:  $90.5^\circ$  の構造で、カソード温度を、 $1800\text{K}$ 、 $1100\text{K}$ 、 $450\text{K}$ 、 $292\text{K}$  について計算し、結果を順に 170、171、172、及び 173 に示した。 $1800\text{K}$  では、CeB6 カソードで、仕事関数は  $2.35 \text{ eV}$  とし、 $1100\text{K}$  は Ba 等の酸化物陰極で仕事関数は  $1.15 \text{ eV}$ 、 $450\text{K}$  では光陰極カソードを想定したが、仕事関数と照射レーザエネルギーとの差が  $0.1 \text{ eV}$  以下のレーザーとカソード材料とを仮定した。 $292\text{K}$  は、負の電子親和力を有する光陰極を仮定し、仕事関数は  $-0.01 \text{ eV}$  とした。

実線の曲線は輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ )、点線はエミッタンス ( $\mu\text{mmrad}$ )、直線に近い実線はカソード電流密度であり、各温度条件で同じカソード電流:  $I_e$  ではほとんど同じ値であった。 $1800\text{K}$  の 170 では、 $I_e$  が増加すると輝度が減少し始め、 $9.2 \text{ mA}$  で最小値になり、その直後最大値になり、その後急速に減少する。エミッタンスはこれと対照的に、一定値から急減し、最初より小さい値に落ち着く。 $171$  の  $1100\text{K}$  では  $I_e$  が増加すると輝度が減少し始め、 $7.25 \text{ mA}$  で最小値になり、その直後  $7.55 \text{ mA}$  で最大値になり、その後急速に減少する。エミッタンスはこれと対照的に、一定値から急減し、最初より小さい値に落ち着く。 $450\text{K}$  の 172 では、前記 2 者と異なり、 $I_e$  が増加すると輝度は単調増加し、 $4.2 \text{ mA}$  で最大値になり、その後急速に減少する。エミッタンスはこれと対照的に、一定値から急減し、すぐ急速増加し、最大値を取る。 $173$  の  $292\text{K}$  では  $450\text{K}$  とほぼ同じ  $I_e$  依存性をしめし、輝度最大になる電子銃電流  $I_e$  は  $4.02 \text{ mA}$  で、 $1800\text{K}$  の場合  $9.45 \text{ mA}$  に比べると大幅に減少する。従って、酸化物陰極、光電子カソードあるいは、負の電子親和力をもつカソードでは、LaB6 や CeB6 の熱カソードに比べて、容易に Langmuir 限界を超える輝度が得られると言える。

$292\text{K}$  と  $1800\text{K}$  とを Langmuir 限界を超える輝度が得られる  $I_e$  を比較すると、 $4.02/9.45 = 0.425$  倍である。従って、負の電子親和力を有する光陰極の場合は、Langmuir 限界を超える輝度が得られる条件は、

$$0.0714 + 0.00557R_c < \text{カソード電流} < 0.0658R_c \quad (6)$$

になる。これについては図 26 で更に詳しく述べる。

#### 【0032】

図 18 は図 17 の結果を、輝度 B - エミッタンス E 特性 (右下がりの曲線) と B-Jc 特性で表したグラフである。B-Jc 特性では、輝度が最大値を取る値から  $I_e$  の大きい側のデータのみを使用した。図 18 では、カソード温度の  $1800\text{K}$ 、 $1100\text{K}$ 、 $450\text{K}$ 、 $292\text{K}$  の結果を順に 180、181、182、及び 183 に示した。カソード温度が  $1100\text{K}$ 、 $450\text{K}$ 、 $292\text{K}$  の場合の Langmuir 限界は、(2) 式から算出し、39、185、186 に示した。

B-E 特性から、輝度が  $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2\text{sr}$  程度の条件では、光電子陰極では CeB6 や酸化物陰極に比較して大きいエミッタンスが得られる。

B-Jc 特性で、180 は直線 37 より右、181 は直線 39 より右、182 は 185 より右、184 は 186 より右にそれぞれデータが存在し、低い温度での Langmuir 限界を超える輝度が得られると言える。

#### 【0033】

図 7 で静電レンズを設けた場合より小さい電流で Langmuir 限界値を超える高輝度が得られることを示した。静電レンズを電磁レンズに変えた場合に Langmuir 限界値を超える高輝度が得られるかを調べた。ボア径  $1 \text{ mm}$  R、ギャップ  $1 \text{ mm}$  の電磁レンズに種々の励磁 AT

を与えて、シミュレーションを行った。結果を図19及び図20に示す。図19は輝度(実線)、エミッタンス(点線)及びカソード電流密度の電子銃電流 $I_e$ 依存性である。励磁ATは、それぞれ、191, 192は500AT, 193は550AT; 194は600AT; 195は400AT; 196は0ATである。

レンズの励起が無い196が9.4 mAで高輝度になっているのに対して、500ATでは4.6 mA; 550ATでは5.85 mA, 600ATでは7.4 mA; 400ATでは8.6 mAでそれぞれ最高輝度が得られている。つまり、磁気レンズを通すことによって、より小さい電流で最高輝度が得られている。

全てのレンズ条件に共通して、電子銃電流 $I_e$ を上げていくと輝度が単調増加し、更に $I_e$ を上げると超高輝度を得られ、その後輝度が急減し、最低輝度になる。エミッタンスは輝度と逆に $I_e$ を増加すると、単調増加し、最小エミッタンスになった後、急増しているのが見られる。従って超高輝度条件を探すには、輝度を測定可能な開口を設け輝度測定を行うか、あるいはエミッタンスが大きくなる条件を探し、その電子銃電流より少し小さい電子銃条件を調べればよい。

#### 【0034】

図20は図19を輝度:B-エミッタンス:E特性(ほぼ右下がりの曲線群)とB-Jc(カソード電流密度)で示したものである。201、202、203、204、205、206はそれぞれ順に、500、550、600、400、0 AT, の励磁をレンズに与えた場合である。37はLangmuir 限界で、従来の理論ではこの線の右側にはB-Jc特性のデータは存在しない筈である。38は図3で説明した直線で、ここでもB-E特性の傾斜が38の傾斜より大きいので、得られる最大ビーム電流は、低輝度、高エミッタンス条件の方が大きくなる。レンズ作用が無い場合のB-E曲線206がレンズ作用のある場合201, 202, 203, 204, 205より上にあるので、残念ながらレンズ作用を利用すると、同じ輝度で得られるビーム電流は小さくなる。

#### 【0035】

図21は、電磁レンズを用いるとなぜ高輝度条件が得られる場合があるかを調べるため、電子軌道を示したものである。この場合静電レンズの中央電極211に印加される電圧は、この前後の電極電圧と同じで4.5 kVである。210の縦線は、等磁気ポテンシャル線で、レンズ位置を示している。静電レンズの図4, 図5の場合と同じくレンズに入射前と評価面6とでは、後者の軌道の密度のパラッキが大幅に改善されている。更に、光軸近くの軌道のクロスオーバー212が光軸から遠い軌道のクロスオーバー213よりカソードに近い側に形成されているのが見える。これは負の球面収差が発生していることになる。負の球面収差が発生するのは、アノード穴のレンズ作用と空間電荷効果であり、アノード穴のレンズ作用は、ビーム電流に依存しないので、従来の電子銃と大きく異なるのは、電子銃電流が大きいことによる空間電荷効果で発生した大きい負の球面収差を電子銃と磁気レンズが作る正の球面収差で打ち消した条件で高輝度が発生していると解釈できる。この解釈が正しいかは分からないが、レンズで輝度を変えられないとの常識は、少なくともシミュレーション上は否定されたことになる。

#### 【0036】

図22は、光陰極電子銃を用いた電子銃の実施の形態である。カソード1、ウエーネルト2、アノード3は光軸4のまわりに軸対称である。ウエーネルトとビーム外周との角度が69.4度以上と比較的大きいので、アノードとウエーネルトの間からレンズ222を通し、レーザー光源223からのレーザー光をカソード1の電子線放出面に照射する。電極電圧はハメックシールド221から供給する。224は電子銃に接続される光学系の一部である。

#### 【0037】

図23は、高輝度電子銃が使用される電子光学系である。高輝度を有効利用して1本の光軸のまわりに大電流のマルチビームを形成できる。当然光軸から離れた位置にもビームが形成されるので、1本のビームの場合より細かい注意が必要である。電子銃はカソード1、ウエーネルト2、アノード3を有する3電極電子銃である。電子銃から放出されたビームは軸あわせ偏向器234でコンデンサーレンズ235に軸あわせされる。コンデンサーレンズ235で収束されたビームは2段の軸あわせ偏向器236, 237で第2コンデン

サーレンズ 2 3 8 とマルチ開口 239 に軸あわせされる。マルチ開口で成型されたマルチビームは回転調整レンズ 2 4 3 で縮小され、2 段の軸あわせ偏向器 245, 247 で NA 開口 242 と縮小レンズ 243 への軸あわせが行われ、244 にマルチビームの縮小像を作り、静電偏向器 245 と電磁偏向器 246 とで光軸のオフセットが修正され、対物レンズ 248 に垂直入射し、試料面 250 にマルチビームを照射し走査する。試料面を走査するのは、静電偏向器 245 に重畳された走査信号と静電偏向器 247 とで行われる。249 はマルチビームの軸上色収差を低減するための軸対称電極で、正の高電圧が印加される。試料面から放出された 2 次電子は電磁偏向器 246 及び 251 で一次光学系から離され静電偏向器 255 で垂直に直される。対物レンズ 248、静電レンズ 253、及び 2 段レンズ 256, 258 で拡大され検出器 259 で各マルチビームからの 2 次電子が独立に検出される。

対物レンズ 248 は、レンズギャップ 467 が試料 250 の側に形成された電磁レンズであり、軸上色収差が小さく、さらに、軸対称電極 249 に高電圧を印加することにより、軸上色収差がより低減される構成を有している。該対物レンズの断面図を図 4 6 に示す。レンズ励磁コイル 4 6 1 の周りをパーマロイコア 460 の外側磁極とパメンジュールコアより成る内側磁極 4 6 2 で囲まれた構造で、断面が L 字型の非磁性金属部材 463 と 2 本の O - リング 465 とで真空封じされる。ーリングの当たる面 464 はコア 460 とコア 462 間の磁気抵抗を小さくするため、図示したテーパ状、あるいは O - リング側に凹の曲面形状が良い。固定ねじ 468 で光軸方向に 2 個のコア 460 と 462 を固定できるので、高精度に製作できる。以上をまとめると、内側磁極と外側磁極で形成される磁気ギャップが試料方向にある磁気レンズで、内側磁極を飽和磁束密度の大きい強磁性体で、外側磁極を高透磁率材料で製作し、内側磁極の外側で外側磁極コアとの接続部に断面が 3 角形あるいは該 3 角形の最大辺が凹面形状の強磁性体リングを有する様にすればよい。この結果、2 つの磁極の接続部での磁気抵抗が小さくなり、このレンズの軸上磁場分布が単 1 ピークになり、このレンズの収差を小さくできる。

図 24 は図 23 の電子光学系の 1 次系のみを偏向を無視単純化した図を詳細にした図である。

図 2 4 で 244 はマルチ開口 239 の結像を示す線である。241 はクロスオーバの結像を示した線である。電子銃から放出されるビームのクロスオーバを 2 段のレンズ 235 及び 238 でマルチ開口 239 の先で拡大像にし、かつ拡大率を調整可能にした。この結果、マルチ開口での電流密度を大きくし、照射強度一様性の良い領域をマルチ開口全体に丁度広げる調整を可能にした。この場合、2 段のコンデンサーレンズの間でクロスオーバを作らないので、空間電荷効果によるエネルギー幅の増加が少なく、負の電子親和力を有する光陰極を用いた効果が大きい。

#### 【 0 0 3 8 】

図 2 5 はカソード曲率半径を平面 : 252 のみでなく、5 mm R の凸面 : 253、凹面 : 251 ; 1.5 mm の凸面 : 250、凹面 : 254 と変化させシミュレーションした結果を示したものである。カソード半径は 200  $\mu$ m に固定した。レンズ電圧は 12.5 kV, ウエーネルト角度  $w$  は 90 . 5 度、Dac は 1.2 mm である。平面カソード 252 ではカソード電流 7.6 mA で最大輝度になるのに対して、1.5 mm 凸面では 6.4 mA で最大輝度になっている。Langmuir 限界を超える輝度が得られるカソード電流条件は、 $6.4/7.6 = 0.842$  倍に減少している。従って、Dac : 2.5 mm, 最適ウエーネルト角度 : 69.5 度の ( 5 ) 式は、左辺が 0.842 倍され、

$$0.141 + 0.0142R_c < \text{カソード電流} < 0.0658R_c \quad (7)$$

になる。

1.5 mm R の凹面では Langmuir 限界を超える輝度が得られるカソード電流条件  $I_e$  は 9.38 mA と大きい、その場合のカソード電流密度  $J_c$  は  $26 \text{ A/cm}^2$  から  $23 \text{ A/cm}^2$  に減少する特徴がある。 $I_e$  は  $9.38/7.6 = 1.234$  倍になるので、( 5 ) 式は、左辺が 1.234 倍され、

$$0.207 + 0.0162R_c < \text{カソード電流} < 0.06R_c \quad (8)$$

になる。

#### 【 0 0 3 9 】

図 2 6 は図 2 5 を輝度 : B - エミッタンス : E 特性 ( ほぼ右下がりの曲線群 ) と B -  $J_c$  (カ

10

20

30

40

50

ソード電流密度)特性：ほぼ水平の線とで示したものである。260、261、262、263、264、265 & 266はそれぞれカソード曲率半径：1.5mmの凸、3mmの凸、5mmの凸、フラット、5mmの凹、3mmの凹、1.5mmの凹に対応する。260の1.5mmの凸カソードでは、B-E曲線が最も左側に位置し、同じ輝度で得られる最大電流は小さく、最悪であり、B-Jc特性も上側に位置し、最悪、これに対して266の1.5mm凹面カソードは、B-E特性は右側に位置し、しかもB-Jc特性も最も下側に位置し、最良である。

#### 【0040】

図27は負の電子親和力を有する光陰極のカソード、平面の一部の形状を有する引出し電極又はアノード、及び円錐台形状のウエーネルト電極を有する電子銃のシミュレーション結果である。Dac:1.2mm、 $w$  : 90.2度、レンズ ; 6 . 5 kV , カソード温度293K、カソード仕事関数 : - 0.01 eV の条件で、カソード半径Rcを30, 40, 80, 120, 160, 200  $\mu$  mと変化させた。結果を順に、270、271、272、273、274、275、276、277に示す。点線はエミッタンス ( $\mu$  mmrad)、実線は輝度 ( $1 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>sr)、少し右上がりの線はカソード電流密度 (A/cm<sup>2</sup>) である。各カソード半径での最大輝度が得られるカソード電流  $I_e$  を図から読み取ると、順に1.85、2.2、2.95、3.55、4.4、6.1、7.05、8.9 mA、が得られた。これらの数字は、後(図45)で使う。

図28は図27を輝度 : B - エミッタンス : E特性 (ほぼ右下がりの曲線群) とB-Jc(カソード電流密度)特性：ほぼ水平の線とで示したものである。カソード半径Rcを30, 40, 80, 120, 160, 200  $\mu$  mと変化させた結果を順に、280、281、282、283、284、285、2876、287に示す。

#### 【0041】

図29はカソード仕事関数 : - 0.01eV, 動作温度293K, Dac:2.5mm,  $w$  : 90.5度、でカソード半径Rcをパラメータとしたシミュレーション結果である。Rcを、20, 100, 200, 300, 400, 及び500  $\mu$  mとした結果を、順に290, 291, 292, 293, 294, 及び295に示した。各カソード半径で、最大輝度が得られるカソード電流  $I_e$  は順に、0.361, 1.8, 2.45, 3.39, 4.34及び5.36mAであった。これらの数字は後(図45)で使う。

図30は図29を輝度 : B - エミッタンス : E特性 (ほぼ右下がりの曲線群) とB-Jc(カソード電流密度)特性：ほぼ水平の線とで示したものである。カソード半径Rcを20, 100, 200, 300, 400, 及び500  $\mu$  mと変化させた結果を順に、300、301、302、303、304、及び305、に示す。Langmuir 限界の線 : 186の右側に非常に小さいカソード電流密度JcでB-Jc曲線が存在している。即ち、Rcが20, 100, 200, 300, 400, 及び500  $\mu$  mと変化させた時、カソード電流密度Jcは順に、30、13、7.7、6、5.1、4.6 A/cm<sup>2</sup>でLangmuir 限界をこえている。このように、小さい電流密度でLangmuir 限界を超える輝度がえられるのは非常に実用性がある。

#### 【0042】

図31はカソード仕事関数 : - 0.01eV, 動作温度293K, Dac: 0.8 mm,  $w$  : 90.5度、でカソード半径Rcをパラメータとしたシミュレーション結果である。Rcを、20, 30, 40, 120, 200, 300, 400, 及び500  $\mu$  mとした結果を、順に310, 311, 312, 313, 314, 及び315に示した。各カソード半径で、最大輝度が得られるカソード電流  $I_e$  は順に、1.78、2.98、3.42、5.38、7.69、10.2, 12.76、及び15.4mAであった。これらの数字は後(図45)で使う。

図32は図31を輝度 : B - エミッタンス : E特性 (ほぼ右下がりの曲線群) とB-Jc(カソード電流密度)特性：ほぼ水平の線とで示したものである。カソード半径Rcを20, 30, 40, 120, 200, 300, 400, 及び500  $\mu$  mとした結果を、順に320, 321, 322, 323, 324, 及び325に示した。Langmuir 限界の線 : 186の右側にB-Jc曲線が存在している。即ち、Rcを20, 30, 40, 120, 200, 300, 400, 及び500  $\mu$  mと変化させた時、カソード電流密度Jcは順に、160、100、49、38、30、27、26 A/cm<sup>2</sup>でLangmuir 限界をこえている。このカソードとアノード間距離Dac : 0.8mmでの特徴は、Langmuir 限界を超える輝度でのエミッタンスEが非常に大きいことである。例えば輝度 $1 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>srで図30と図32を比較すると、前者のDac:2.5mmでは1.4 ~ 9  $\mu$  mmrad であるのに対して、後者

のDac:0.8mmでは、12~65μmmradの値である。高輝度で高エミッタンスが得られるのは非常に実用性がある。

ここで光陰極について検討する。カソードの仕事関数を $\phi$ 、照射レーザー波長を $\lambda$ 、その光子エネルギーを $h\nu$  (eV)、カソード温度を $T$  (K)、とすると、ベルシェ効果を見視したビームエネルギー幅  $E$ は

$$E^2 = (kT)^2 + (h\nu - \phi)^2 \quad (7)$$

になる。従ってエネルギー幅  $E$ を小さくするにはレーザー波長のエネルギーをカソード材料の仕事関数より僅かに大きい値とし、かつカソード温度を低くすればよい。

カソード温度が低い場合の結果を次に示す。図33はカソード仕事関数: 0.01eV, 動作温度77K, Dac: 2.5 mm,  $\omega$ : 90.5度、でカソード半径 $R_c$ をパラメータとしたシミュレーション結果である。 $R_c$ を、2, 100, 200, 300, 400, 及び500μmとした結果を、順に330, 331, 332, 333, 334, 及び335に示した。各カソード半径で、最大輝度を得られるカソード電流 $I_e$ は順に、0.321, 0.923, 1.485, 2.13, 2.83及び3.69 mAであった。これらの数字は後(図45)で使う。

図34は図33を輝度: B-エミッタンス:  $E$ 特性(ほぼ右下がりの曲線群)とB-Jc(カソード電流密度)特性: ほぼ水平の線とで示したものである。カソード半径 $R_c$ を20, 100, 200, 300, 400, 及び500μmとした結果を、順に340, 341, 342, 343, 344, 及び345に示した。Langmuir 限界の線: 186の右側にB-Jc 曲線が存在している。即ち、 $R_c$ を20, 100, 200, 300, 400, 及び 500 μmと変化した時、カソード電流密度 $J_c$ は順に、28, 91, 59, 46, 30, 27 A/cm<sup>2</sup>でLangmuir 限界をこえている。このカソードとアノード間距離Dac: 2.5mmでの特徴は、Langmuir 限界を超える輝度での電流密度 $J_c$ とカソード電流 $I_e$ が非常に小さいことである。このように高輝度が小さい電流密度 $J_c$ とカソード電流 $I_e$ で高エミッタンスが得られるのは非常に実用性がある。

図35はカソード材料の仕事関数を $\phi$ と光電限界波長との関係を示したものである。350, 351, 352, 353, 354, 355, 及び356は順にPt上のCs, Pt上のK, Ba, Al, Ag, Pt及びWである(電気通信学会編、通信工学ハンドブック、丸善、1957年、p470)。太い線は $h\nu = \phi$ で決まる限界波長である。金属材料ではW以外はこの直線より限界波長は長波長側へ20%程度シフトしている。逆にタングステン: Wでは短波長側にシフトしている。これらは表面の汚染によって仕事関数が変化した結果、及びカソード温度に依存する熱運動のためより小さいエネルギーの光子で電子放出を可能にする効果だと推測できる。この様に仕事関数の変化を考慮し、367、358で示した範囲内のレーザー波長でカソードを励起するのが好ましい。例えばCeB<sub>6</sub>カソード359では、490~550nmの範囲で、527nm, 532nm; LaB<sub>6</sub>では410~550nmの範囲で、532nm, 527nmの波長で、いずれも半導体励起固体レーザ(緑色)が良い。プランクの常数を $h$ 、波長を $\lambda$ 、カソードの仕事関数を $\phi$ としたとき、カソード励起レーザー波長は $h\nu = \phi$ で決まる限界波長の±20%以内の波長を用いればよい。カソードを冷却した場合は、カソード励起レーザー波長は $h\nu = \phi$ で決まる限界波長の0~-10%以内の波長を用いればよい。

#### 【0043】

次に高輝度がなぜ得られるかを調べるため、カソード仕事関数-0.01eV, 動作温度293K, Dac: 0.8 mm,  $\omega$ : 90.5、カソード半径 $R_c$ : 0.5mm での条件で、普通輝度、中程度の輝度、及び高輝度での電子軌道を比較する。これらの軌道を作成する場合、カソード中心付近の軌道のみを出力するため、表2の斜体字で22と記した数字を55に変更した結果である。レンズは励起していない。

これに関連して、空間電荷効果を低減するため、アノード後面に小開口を設け、不要な周辺ビームをなるべく早く取り除くのが良い。

図36は普通輝度で、360の軌道で乱れがあるのが見られる。

図37は中程度の輝度で、370、371で軌道は密集し過ぎ、372で軌道は疎になっているのが見られる。



図 3 8 は高輝度での軌道で、非常に乱れの無い層流に近い軌道が得られた。層流に近い軌道では、軌道が互いに交差することが無いので、電子同士の衝突が少なくベルシェ効果でエネルギー幅が広がる効果が少なく、しかもビームが最小径になるのがカソードから1.5mmで、アノード位置：0.8mm より後方でビームは十分に加速されているので電子同志の相互作用はさらに小さい。当然このような層流に近い電子軌道では、光学モデルから大きくはずれているので、Langmuir 限界を超える輝度を得られても何も矛盾はない。結局カソードでは電流密度が小さく、ビーム径がアノードを過ぎるまでは単調減少する軌道になるようウエーネルト電圧を制御すれば、高輝度でエネルギー幅の小さいビームが得られ、軸上色収差が小さく、大電流を小さく絞れる。

#### 【 0 0 4 4 】

図 3 9 は熱電子カソードでLangmuir 限界を超える輝度のカソード電流  $I_e$  の各カソード半径での最小値を調べた結果である。カソード半径  $R_c$  を80、100、200、300、400及び500  $\mu\text{m}$  にし、レンズ条件は12.5 kV,  $Dac$  : 2.5 mm、2.35 eV, ウエーネルト角度 : 90.5度の電子銃について電子銃電流  $I_e$  を変化させてシミュレーションした。結果は、順に390, 391, 392, 393, 394, 395 及び396に示した。直線に近い実線はカソード電流密度 (単位は  $\text{A}/\text{cm}^2$ ) 実線の曲線は輝度 (単位は  $10^5 \text{ A}/\text{cm}^2\text{sr}$ ) 点線の曲線はエミッタンス ( $\mu\text{mrad}$ ) であり、横軸はカソード電流  $I_e$ , 単位はmAである。輝度が大きくなるカソード電流値は、順に1.81, 2.31, 3.26, 4.69, 6.25 mA である。500  $\mu\text{m}$  半径カソードはこの条件では上記限界を超えられなかった。これらの数字は後 (図 4 5) で使用する。

図 4 0 は図 3 9 の結果を輝度B - エミッタンスE特性 (右下がりの曲線) とB-Jc特性で表したグラフである。400、401、402、403、404、及び405 はカソード半径  $R_c$  が80、100、200、300、400、及び500  $\mu\text{m}$  の電子銃に対応する。輝度 カソード電流密度特性がほぼ水平に近い所ではLangmuir限界に対応する直線 3 7 の右側にあり、“Langmuir限界を超える輝度”が得られている。カソード半径500  $\mu\text{m}$  の405の曲線は、37の右には出ていなく上記限界を超えられなかった。

#### 【 0 0 4 5 】

図 4 1 は熱電子カソードでLangmuir 限界を超える輝度の各カソード半径での最大値を調べた結果である。カソード半径  $R_c$  を80、100、200、300、400及び500  $\mu\text{m}$  にし、レンズ励起なし,  $Dac$  : 0.8 mm、仕事関数 : 2.35 eV, ウエーネルト角度 : 90.5度の電子銃について電子銃電流  $I_e$  を変化させてシミュレーションした。結果は、順に410, 411, 412, 413, 414, 415 及び416に示した。直線に近い実線はカソード電流密度 (単位は  $\text{A}/\text{cm}^2$ ) 実線の曲線は輝度 (単位は  $10^5 \text{ A}/\text{cm}^2\text{sr}$ ) 点線の曲線はエミッタンス ( $\mu\text{mrad}$ ) であり、横軸はカソード電流  $I_e$ , 単位はmAである。輝度が大きくなるカソード電流値は、順に

1.81, 2.31, 3.26, 4.69, 6.25 mA である。500  $\mu\text{m}$  半径カソードはこの条件では上記限界を超えられなかった。これらの数字は後 (図 4 5) で使用する。

図 4 2 は図 4 1 の結果を輝度B - エミッタンスE特性 (右下がりの曲線) とB-Jc特性で表したグラフである。420、421、422、423、424、及び425 はカソード半径  $R_c$  が80、100、200、300、400、及び500  $\mu\text{m}$  の電子銃に対応する。輝度 カソード電流密度特性がほぼ水平に近い所ではLangmuir限界に対応する直線 3 7 の右側にあり、“Langmuir限界を超える輝度”が得られている。カソード半径500  $\mu\text{m}$  の405の曲線は、37の右には出ていなく上記限界を超えられなかった。

#### 【 0 0 4 6 】

図 4 3 は図 3 3 と同様にカソード仕事関数: 0.01 eV, 動作温度 77 K,  $Dac$ : 2.5 mm,  $w$ : 90.5度、でカソード半径  $R_c$  をパラメータとしたシミュレーション結果である。但し、ここでは、空間電荷効果を減少させるため、アノード後面に小開口 (43.1  $\mu\text{m}$  R) を設け、ビーム電流を1/10 以下に減少させた。 $R_c$  を、2, 100, 200, 300, 400, 及び500  $\mu\text{m}$  とした結果を、順に430, 431, 432, 433, 434, 及び435に示した。各カソード半径で、最大輝度が得られるカソード電流  $I_e$  は順に、0.323、0.868、1.47、2.038、2.791及び3.561 mAであった。これらの数字は図 3 3 の結果とほとんど差はない。また、この図

では、クロスオーバー位置： $Z_{co}$  の値（ほぼ山形の実線）も表示した。 $20\mu m R_c$  では、 $Z_{co}$  が負の値になったが、 $R_c$  が  $100 \sim 400\mu m$  では、 $10mm$  前後の値であった。 $500\mu m R_c$  では表示しなかった。開口位置は、アノード後面  $Z = 3.6mm$  であるから、クロスオーバーを形成する前でビーム電流を  $1/10$  以下に減少させた場合も“Langmuir 限界を超える輝度”が得られている。

図 4 4 は図 4 3 を輝度： $B$  - エミッタンス： $E$  特性（ほぼ右下がりの曲線群）と  $B$ - $J_c$  (カソード電流密度) 特性：ほぼ水平の線とで示したものである。カソード半径  $R_c$  を  $20, 100, 200, 300, 400$ , 及び  $500\mu m$  とした結果を、順に 440, 441, 442, 443, 444, 及び 445 に示した。Langmuir 限界の線：186 の右側に  $B$ - $J_c$  曲線が存在している。即ち、 $R_c$  を  $20, 100, 200, 300, 400$ , 及び  $500\mu m$  と変化させた時、カソード電流密度  $J_c$  は順に、 $28, 91, 59, 46, 30, 27 A/cm^2$  で Langmuir 限界をこえている。この場合と図 4 をエミッタンスで比較すると、ビーム電流が  $1/10$  以下に減少しているにもかかわらず、エミッタンスは減少せず、むしろ微増している。ビーム電流が  $1/10$  以下に減少すれば、確実に、空間電荷効果は  $1/10$  以下に減少するので、この様に電子銃が作るクロスオーバーより手前にビームの大部分を取り除く開口を設けることは実用性がある。

今まで説明してきた Langmuir 限界をこえる輝度が得られるカソード電流のカソード半径依存性を図 4 5 にまとめた。

450：図 4 1 の結果をまとめた。 ;  $I_e = 10.5 + 0.0296R_c$   $120 < R_c < 500$

451：図 4 1 の結果をまとめた。 ;  $I_e = 0.116R_c$   $R_c < 120\mu m$

452：図 2 図の結果をまとめた。 ;  $I_e = 0.0645R_c$

453：図 3 1 の結果をまとめた。 ;  $I_e = 2.6 + 0.0254R_c$

454：図 13 の結果をまとめた。 ;  $I_e = 0.9 + 0.027R_c$

455：図 27 の結果をまとめた。 ;  $I_e = 1.5 + 0.0183R_c$

456：図 29 の結果をまとめた。 ;  $I_e = 1 + 0.0086R_c$

457：図 33 & 34 図の結果をまとめた。 ;  $I_e = 0.4 + 0.0064R_c$

この図から、カソード半径  $R_c$  が、 $120\mu m$  より小さいかあるいは等しいとき、

$0.4 + 0.0064R_c$   $I_e$   $0.116 R_c$  の範囲で、Langmuir 限界をこえる輝度が得られる条件を作れる。

また、カソード半径  $R_c$  が、 $120\mu m$  より大きいとき、

$0.4 + 0.0064R_c$   $I_e$   $10.5 + 0.0296 R_c$  の範囲で、Langmuir 限界をこえる輝度が得られる条件を作れる。

さらに、高輝度、高エミッタンスを得たい場合は、451又は450と453の間の範囲のカソード電流にすればよい、即ちカソード半径  $R_c$  が、 $120\mu m$  より小さいかあるいは等しいとき、

$2.6 + 0.0254R_c$   $I_e$   $0.116 R_c$  の範囲 にすればよく、カソード半径  $R_c$  が、 $120\mu m$  より大きいとき、

$2.6 + 0.0254R_c$   $I_e$   $10.5 + 0.0296 R_c$  の範囲にすればよい。

また、比較的小さいカソード電流あるいは、比較的小さいカソード電流密度で、Langmuir 限界をこえる輝度を得たい場合は、457と453の間の範囲のカソード電流にすればよい。即ち、 $0.4 + 0.0064R_c$   $I_e$   $2.6 + 0.0254R_c$  の範囲にすればよい。

さらに、カソード半径は、比較的小さいカソード電流で Langmuir 限界をこえる輝度が得られるのは、 $20 < R_c (\mu m) < 200$  であり、比較的小さいカソード電流密度で Langmuir 限界をこえる輝度が得られるのは、 $200 < R_c (\mu m) < 500$  である。

#### 【0047】

以上の実施の形態では電子銃電流の比較的大きい範囲で超高輝度を得られた。より使い易い電子銃を得るため、より小さい電子銃電流で Langmuir limit を超える超高輝度を得る条件を調べた。電子銃モデルは図 4 7 に示した。カソード：471, ウエーネルト：472, 凸型球面アノード：473, の後方に静電レンズ：474を設け、静電レンズ電極474に与える電圧やウエーネルトと光軸との角度を最適化した。475は光軸であり、476は評価面である

。

## 【 0 0 4 8 】

図 4 8 はカソード半径  $R_c$  を  $10\ \mu\text{m}$  に固定し、カソードとアノード間距離  $D_{ac}$  を  $10\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm}$ 、 $4\text{ mm}$  及び  $3\text{ mm}$  と変化した結果をそれぞれ 481, 482, 483 及び 484 に示す。これらの  $D_{ac}$  の条件ではそれぞれ電子銃電流が  $13.3$ ,  $24$ ,  $40.8$  及び  $61\ \mu\text{A}$  で超高輝度が得られた。図ではカソードとアノード間距離の逆数 ( $1/D_{ac}$ ) を横軸にプロットした図を図 5 3、5 4 に示した。

## 【 0 0 4 9 】

図 4 9 はカソード半径  $R_c$  を  $300\ \mu\text{m}$  に固定し、カソードとアノード間距離  $D_{ac}$  を  $10\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm}$  及び  $4\text{ mm}$  と変化した結果をそれぞれ 491, 492, 及び 493 に示す。これらの  $D_{ac}$  の条件ではそれぞれ電子銃電流が  $1.82$ ,  $4.55$  及び  $7.76\text{ mA}$  で超高輝度が得られている。超高輝度が得られた電子銃電流  $I_{e(\text{max } B)}$  を縦軸、カソードとアノード間距離の逆数 ( $1/D_{ac}$ ) を横軸にプロットした図を図 5 3 と 5 4 に示した。

## 【 0 0 5 0 】

図 5 0 はカソードとアノード間距離  $D_{ac}$  を  $10\text{ mm}$  に固定し、カソード半径  $R_c$  を  $10\ \mu\text{m}$ 、 $300\ \mu\text{m}$  及び  $500\ \mu\text{m}$  と変化した結果をそれぞれ 501, 502, 及び 503 に示す。これらの  $R_c$  の条件ではそれぞれ電子銃電流が  $0.00133$ ,  $1.82$  及び  $3.05\text{ mA}$  で超高輝度が得られている。超高輝度が得られた電子銃電流  $I_{e(\text{max } B)}$  を縦軸、カソード半径  $R_c$  を横軸にプロットした図を図 5 2 に示した。

## 【 0 0 5 1 】

図 5 1 はカソードとアノード間距離  $D_{ac}$  を  $4\text{ mm}$  に固定し、カソード半径  $R_c$  を  $10\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 、 $300\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$  及び  $700\ \mu\text{m}$  と変化した結果をそれぞれ 511, 512, 513, 514, 515 及び 516 に示す。これらの  $R_c$  の条件ではそれぞれ電子銃電流が  $0.0408$ ,  $2.4$ ,  $5.23$ ,  $9.75$  及び  $11.8\text{ mA}$  で超高輝度が得られている。超高輝度が得られた電子銃電流  $I_{e(\text{max } B)}$  を縦軸、カソード半径  $R_c$  を横軸にプロットした図を図 5 2 の直線 5 22 及び 523 に示した。

## 【 0 0 5 2 】

図 5 2 において、カソードとアノード間隔  $D_{ac}$  が  $10\text{ mm}$  の場合はカソード半径  $R_c$  と最大輝度を与える電子銃電流  $I_e$  の関係はほぼ直線 5 2 1 に乗っている。またカソードとアノード間隔  $D_{ac}$  が  $4\text{ mm}$  の場合はカソード半径  $R_c$  と最大輝度を与える電子銃電流  $I_e$  の関係は  $R_c$  が  $300\ \mu\text{m}$  以下ではほぼ直線 5 2 2 に乗り、 $R_c$  が  $300\ \mu\text{m}$  以上ではほぼ直線 5 2 3 に乗っている。直線 5 2 1、5 2 2 及び 5 2 3 はそれぞれ次式で与えられる。

$$5\ 2\ 1 : I_e = 0.0062R_c - 0.0487,$$

$$5\ 2\ 2 : I_e = 0.0266R_c - 0.225,$$

$$5\ 2\ 3 : I_e = 0.0101R_c + 4.73, \quad \text{ここで } I_e : \text{mA}, R_c : \mu\text{m}$$

従ってカソードとアノード間隔  $D_{ac}$  が  $4\text{ mm}$  から  $10\text{ mm}$  の範囲では超高輝度が得られる  $I_e$  の条件は、

$$0.0062R_c - 0.0487 \leq I_e \leq 0.0101R_c + 4.73 \quad R_c \geq 0.3\text{ mm}, \text{ あるいは}$$

$0.0062R_c - 0.0487 \leq I_e \leq 0.0266R_c - 0.225 \quad R_c < 0.3\text{ mm}.$  の範囲内の値にすればよい。

## 【 0 0 5 3 】

図 5 3, 5 4 において最大輝度が得られる電子銃電流  $I_e$  を縦軸、カソードとアノード間隔  $D_{ac}$  の逆数 ( $1/D_{ac}$ ) を横軸で表示すると、カソード半径  $300\ \mu\text{m}$  の場合は直線 5 3 1 に、カソード半径  $10\ \mu\text{m}$  の場合は直線 5 3 2 にほぼ乗っている。直線 5 3 1 及び 5 3 2 はそれぞれ次式で与えられる。

$$5\ 3\ 1 : I_e = 0.0204/D_{ac} - 0.0086,$$

$$5\ 3\ 2 : I_e = 40/D_{ac} - 2.24, \quad \text{ここで } I_e : \text{mA}, D_{ac} : \text{mm}$$

従ってカソード半径  $R_c$  が  $10\ \mu\text{m}$  から  $300\ \mu\text{m}$  の範囲では超高輝度が得られる  $I_e$  の条件は、

電子銃電流 :  $I_e$  を

10

20

30

40

50

$0.204/Dac - 0.0086 \quad I_e \quad 40/Dac - 2.24$  の範囲内の値にすればよい。

図 5 4 の縦軸は  $100 \mu m$  以下であり、非常に小さい電子銃電流で超高輝度が得られている。このような条件では空間電荷効果によるエネルギー幅の増加も小さくなる。

#### 【0054】

以上はシミュレーションについてのみ述べた。過去の実験結果とシミュレーション結果とを比較した結果を次に示す。

図 5 5 は M. Nakasuji and H. Wada, J. Vac. Sci. & Technol., 17(6) Nov. /Dec. 1980 p1367 に掲載された図である。実測データ 5 5 1 と 5 5 2 についてシミュレーションを行った。結果を図 5 6 と 5 7 に示す。ここでカソード電流密度は実測がないのでシミュレーションの値を用いた。図 5 6 で 5 6 1 はビームエネルギー  $20 keV$ , カソード温度  $1800 K$  での Langmuir limit, 562 はシミュレーションの値、563 は実測である。輝度の実測値はシミュレーションの値よりやや小さい値であるが、Langmuir limit は十分超えている。輝度がシミュレーションの値より小さいのは電子銃電極の組立て精度の不十分さ等で予想できる。

図 5 7 で、5 7 3 はビームエネルギー  $20 keV$ , カソード温度  $1800 K$  での Langmuir limit, 571 はシミュレーションの値、572 は実測である。輝度が小さい領域ではシミュレーション値 5 7 1 と実測値 5 7 2 は比較的良く一致しているので、これらの実験値は信頼でき、1 点のみだが Langmuir limit を十分超えた実測値もある。これらの比較から前に述べたシミュレーションは実現可能であると言える。

#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0055】

以上、本発明に係る電子線装置の発明を実施するための最良の形態を説明したところから理解されるように、本発明は、Langmuir 限界を超える輝度が得られる電子銃を利用可能にし、エネルギー幅が小さいと予想される電子銃が得られる。従って、1 本の光軸の周りに複数の細く絞った大電流のマルチビームを形成し、また光軸から遠い位置にあるビームからの 2 次電子検出も問題なく可能にし、電子銃から試料面までの距離を短くでき空間電荷効果でのボケも小さくできる。さらに、アノード背面に小開口を設け光軸から遠いビームを電子銃に近い場所に取り除けば、空間電荷効果によるエネルギー幅の増加も小さくなる。さらに、 $100 \mu m$  以下の小さい電子銃電流で超高輝度が得られるので空間電荷効果によるエネルギー幅の増加も小さくなる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0056】

【図 1】本発明に係る電子銃のモデル図である。

【図 2】図 1 に示した電子銃で、カソード半径をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 3】図 2 の結果を B-E 表示と B-Jc 表示とした図。

【図 4】Langmuir 限界を超えていない場合の電子軌道図である。

【図 5】Langmuir 限界を超えた輝度が得られた場合の電子軌道図である。

【図 6】図 1 に示した電子銃に静電レンズを追加したモデル図である。

【図 7】図 6 に示した電子銃で、レンズ電圧をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 8】図 7 の結果を B-E 表示と B-Jc 表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 A/cm^2 sr$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu mm rad$ ) とカソード電流密度:  $Jc (A/cm^2)$

【図 9】Langmuir 限界を超えた輝度が得られた場合の電子軌道図で、レンズは正の高電圧を与えた場合。

【図 10】Langmuir 限界を超えた輝度が得られた場合の電子軌道図で、レンズは負の高電圧を与えた場合。

【図 11】図 6 に示した電子銃で、ウエーネルト角度をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 12】図 11 の結果を B-E 表示と B-Jc 表示とした図。

【図 1 3】図 6 に示した電子銃で、カソード半径をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 1 4】図 1 3 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$

【図 1 5】図 6 に示した電子銃で、カソードとアノード間距離をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 1 6】図 1 5 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$

【図 1 7】図 1 に示した電子銃で、カソード温度をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 1 8】図 1 7 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$

【図 1 9】図 6 に示した電子銃に電磁レンズを追加し、レンズ励磁ATをパラメータとしたシミュレーション例であり、静電レンズは動作していない。

【図 2 0】図 1 9 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$

【図 2 1】Langmuir限界を超えた輝度を得られた場合の電子軌道図で、電磁レンズが動作した場合。

【図 2 2】光陰極電子銃を用いた電子銃の実施の形態である。

【図 2 3】高輝度電子銃が使用される電子光学系である。

【図 2 4】高輝度電子銃が使用される電子光学系の1次光学系である。

【図 2 5】図 6 に示した電子銃で、カソード曲率半径をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 2 6】図 2 5 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$ 。

【図 2 7】光陰極を用いた電子銃で、カソード半径:  $R_c$  をパラメータとしたシミュレーション結果である。

【図 2 8】図 2 5 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^6 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$ 。

【図 2 9】光陰極を用いた電子銃で、カソード半径:  $R_c$  をパラメータとしたシミュレーション結果である。Dac: 2 . 5 mm。

【図 3 0】図 2 9 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$ 。

【図 3 1】光陰極を用いた電子銃で、カソード半径:  $R_c$  をパラメータとしたシミュレーション結果である。Dac: 0 . 8 mm。

【図 3 2】図 3 1 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$ 。

【図 3 3】77Kに冷却した光陰極を用いた電子銃で、カソード半径:  $R_c$  とLangmuir限界を超えた輝度を得られるカソード電流 $I_e$ との関係。

【図 3 4】図 3 3 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$ 。

【図 3 5】仕事関数と光電限界波長との関係

【図 3 6】普通輝度電子銃での電子軌道

【図 3 7】中程度の輝度の電子銃での電子軌道高輝度

【図 3 8】高輝度電子銃での電子軌道

【図 3 9】熱電子カソードでの輝度、エミッタンス、カソード電流密度のカソード電流依存性

【図 4 0】図 3 9 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度:  $J_c (\text{A/cm}^2)$ 。

【図 4 1】1800 K , D a c : . 8 mm、 w : 90.5度での光陰極を用いた電子銃で、カソ

10

20

30

40

50

ード半径： $R_c$ をパラメータとしたシミュレーション結果。

【図 4 2】図 4 1 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度： $J_c(\text{A/cm}^2)$ 。

【図 4 3】光陰極を用いたカソードを77 Kに冷却し、アノード後面に小開口を設けた電子銃で、カソード半径： $R_c$ をパラメータとしたシミュレーション結果であり、 $D_{ac}$ : 2.5 mm。

【図 4 4】図 4 3 の結果をB-E表示とB-Jc表示とした図。横軸は、輝度 ( $\times 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ )、縦軸はエミッタンス ( $\mu \text{ mm rad}$ ) とカソード電流密度： $J_c(\text{A/cm}^2)$ 。

【図 4 5】カソード半径： $R_c$ とLangmuir限界を超える輝度が得られるカソード電流 $I_e$ との関係。

【図 4 6】磁気ギャップが試料側にある対物レンズ。

【図 4 7】電子銃モデル。

【図 4 8】図 4 7 に示した電子銃で、カソードとアノード間隔 $D_{ac}$ をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 4 9】図 4 7 に示した電子銃で、カソード半径 $R_c$ を0.3 mmとし、カソードとアノード間隔 $D_{ac}$ をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 5 0】図 4 7 に示した電子銃で、カソード半径 $R_c$ をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 5 1】図 4 7 に示した電子銃で、カソードとアノード間隔 $D_{ac}$ を4 mmに固定し、カソード半径 $R_c$  をパラメータとしたシミュレーション例である。

【図 5 2】カソード半径： $R_c$ とLangmuir限界を超える輝度が得られるカソード電流 $I_e$ との関係。

【図 5 3】カソードとアノード間隔 $D_{ac}$ とLangmuir限界を超える輝度が得られるカソード電流 $I_e$ との関係。

【図 5 4】図 5 3 の縦軸を拡大した図。

【図 5 5】過去の実測データとシミュレーションとの比較。

【図 5 6】カソード曲率半径 20  $\mu\text{m}$ での過去の実測データとシミュレーションとの比較。

【図 5 7】カソード曲率半径 480  $\mu\text{m}$ での過去の実測データとシミュレーションとの比較。

【符号の説明】

【0057】

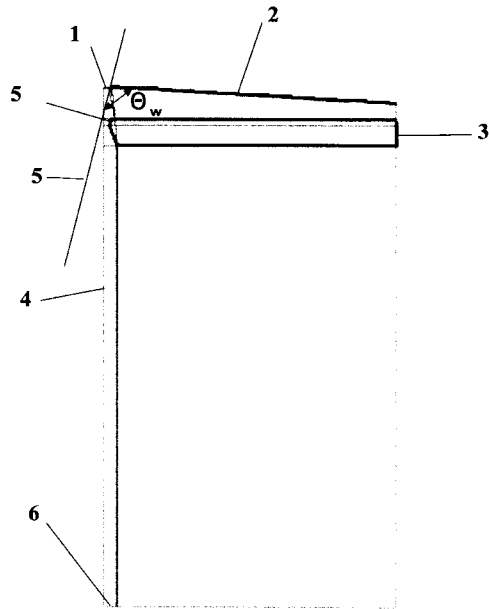
7：仮想円錐台、5：アノード穴の放電回避の曲面、6：評価面、61, 62, 63：静電レンズ、254：1次ビームの走査に同期して軸を補正する2段の静電偏向器、259：マルチビームの検出器、242：電子銃のクロスオーバの結像を示す線、244：マルチ開口からのビームの結像線、

10

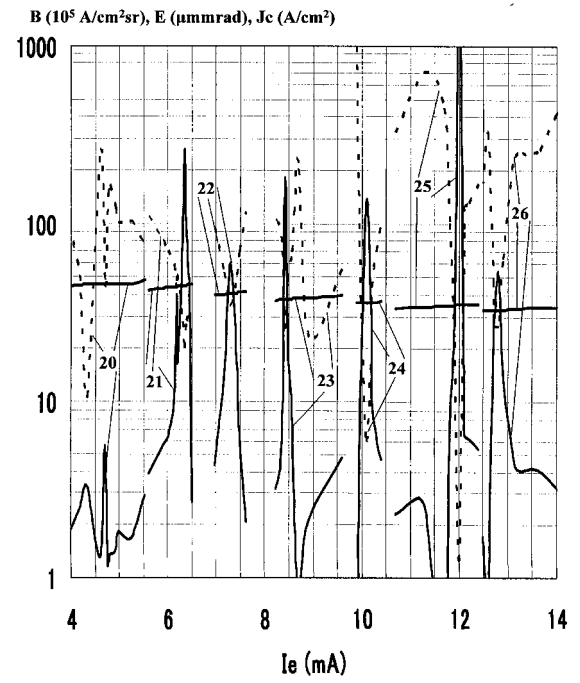
20

30

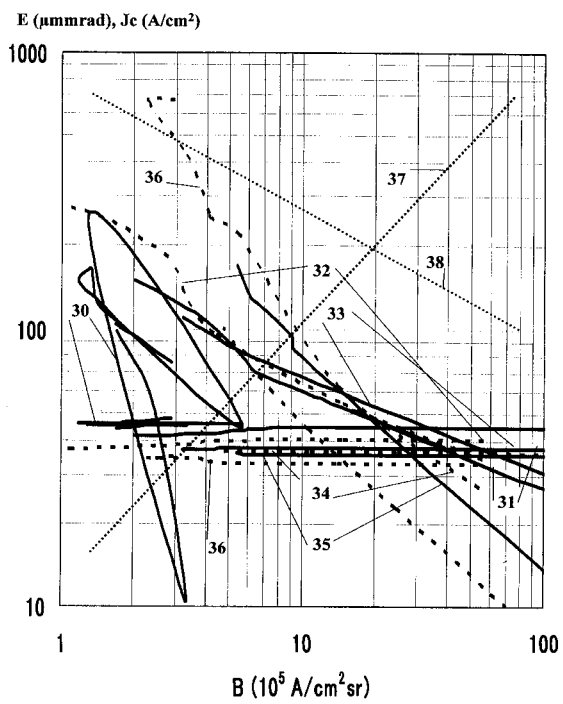
【 図 1 】



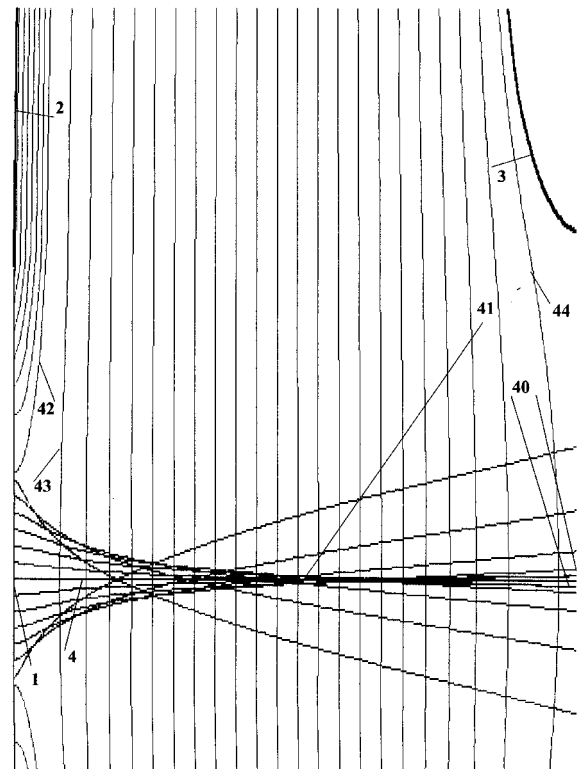
【 図 2 】



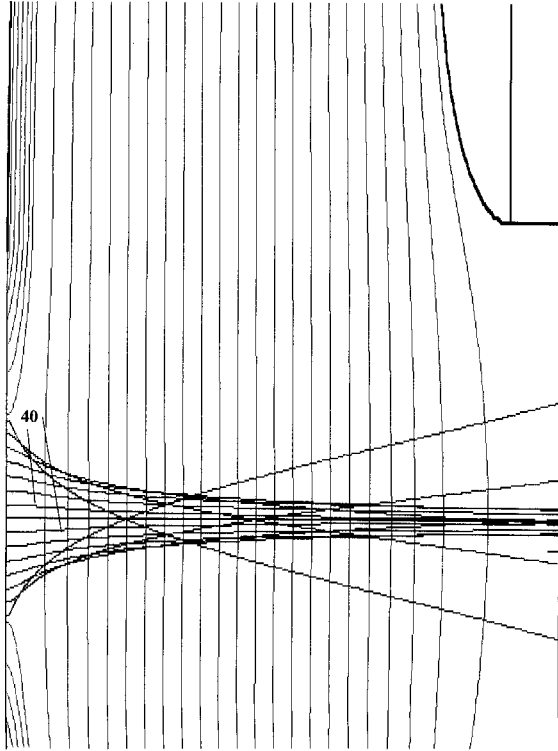
【 図 3 】



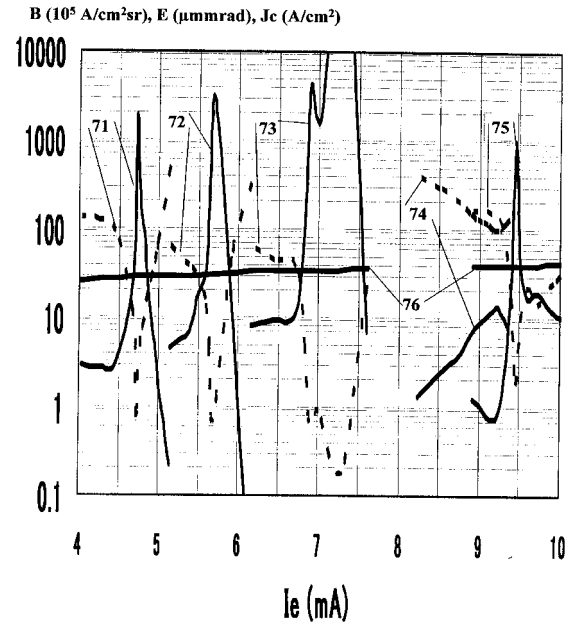
【 図 4 】



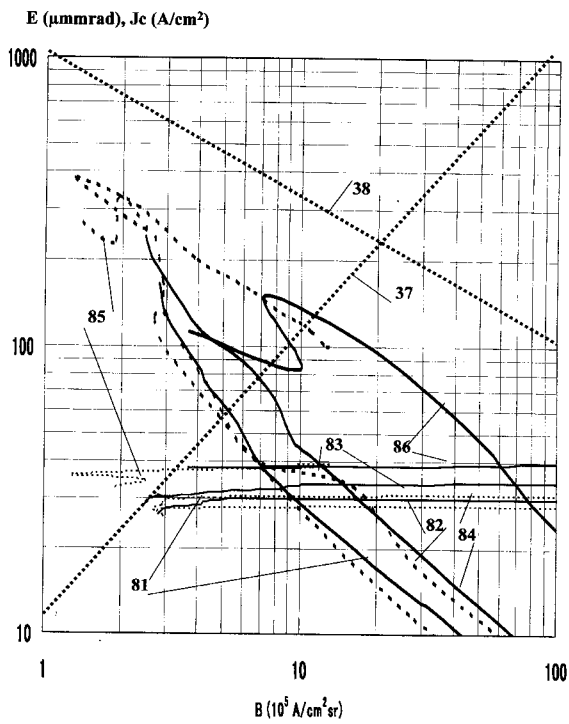
【 図 5 】



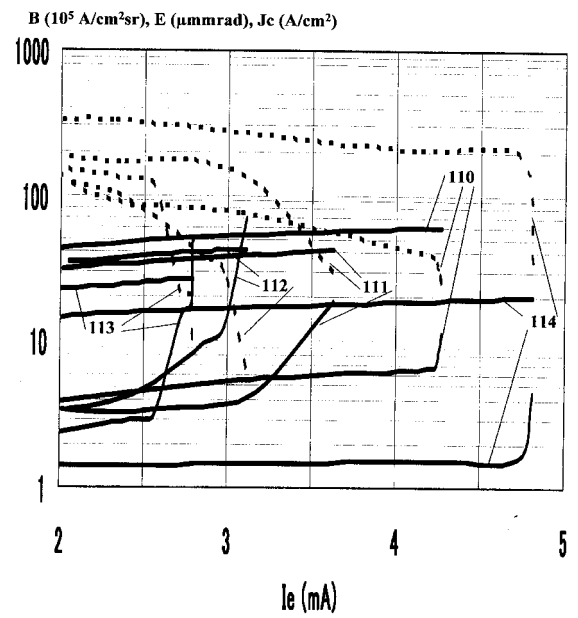
【 図 7 】



【 図 8 】

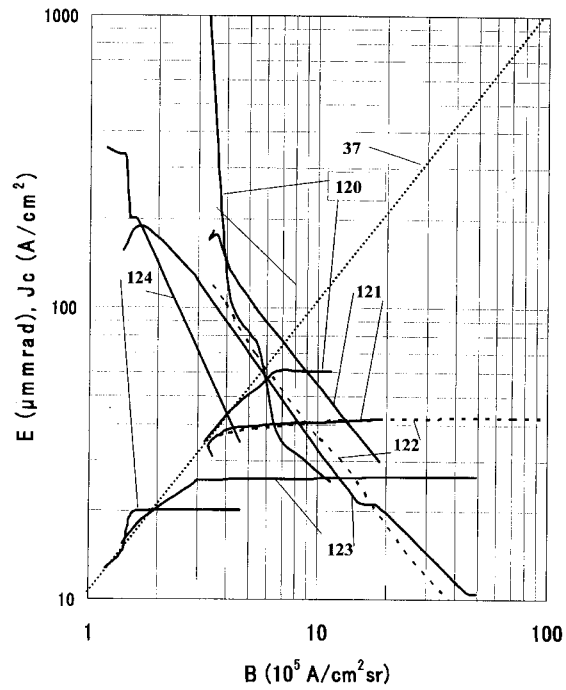


【 図 11 】

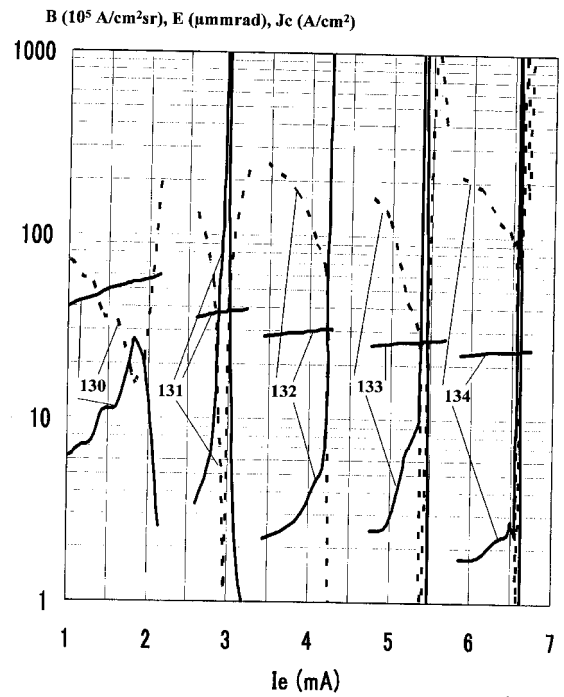




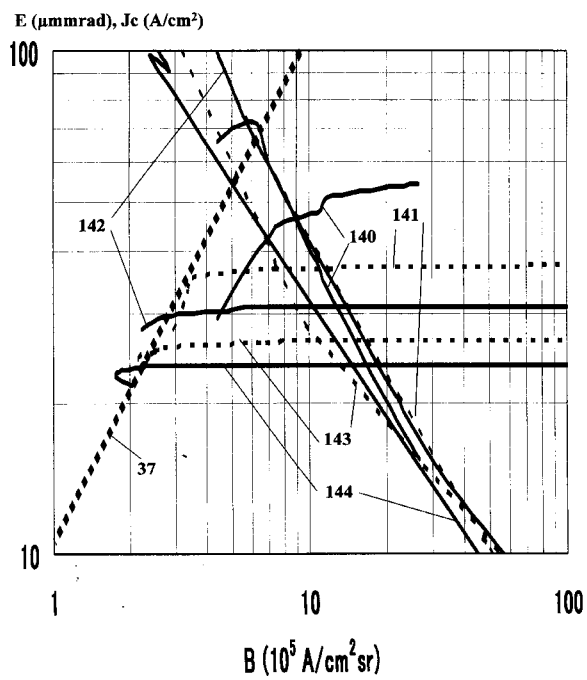
【図 1 2】



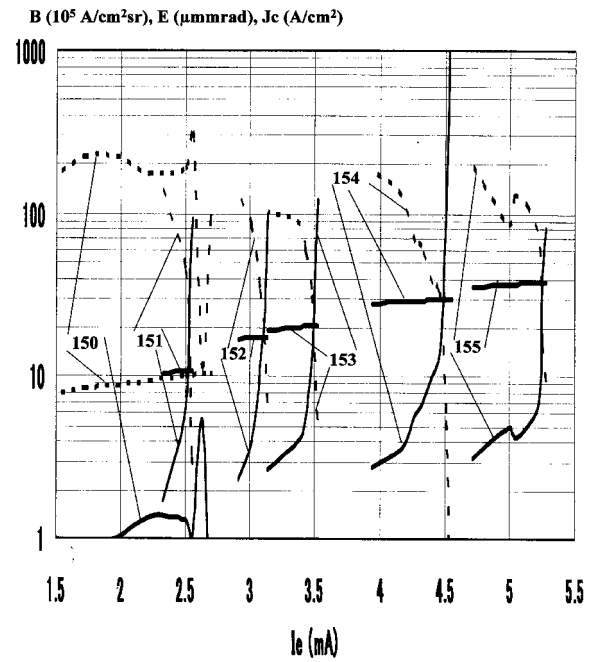
【図 1 3】

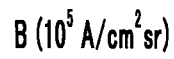


【図 1 4】



【図 1 5】

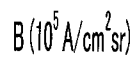


E ( $\mu\text{mmrad}$ ), Jc ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

**B ( $10^5$  A/cm<sup>2</sup>sr), E ( $\mu$ mmrad), Jc (A/cm<sup>2</sup>)**



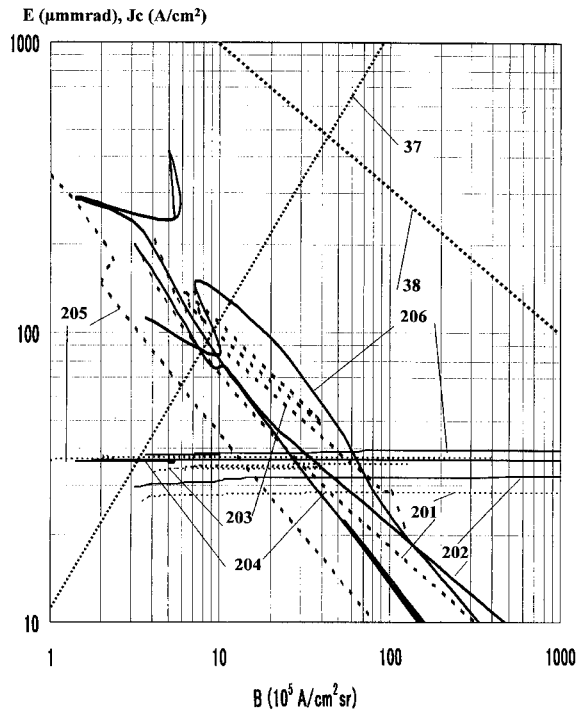
**B ( $10^5$  A/cm<sup>2</sup>sr), E ( $\mu$ mrad), Jc (A/cm<sup>2</sup>)**



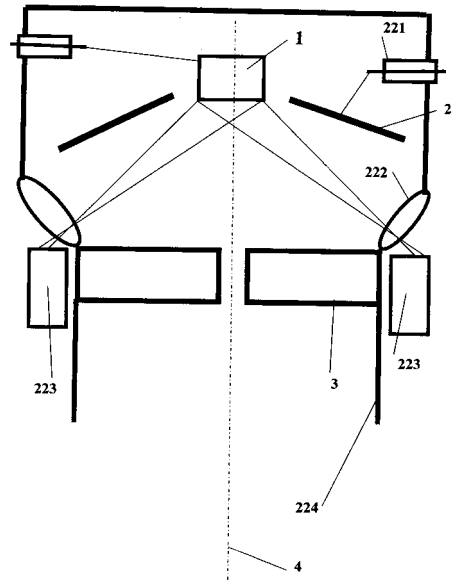
**B ( $10^5$  A/cm<sup>2</sup>sr), E ( $\mu$ mmrad), Jc (A/cm<sup>2</sup>)**



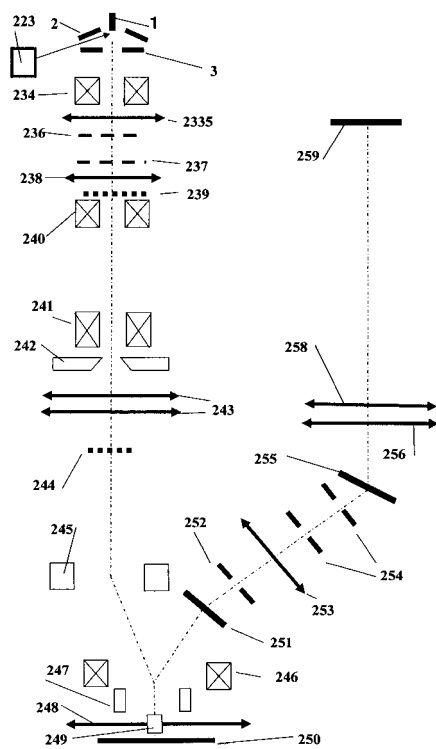
【図 20】



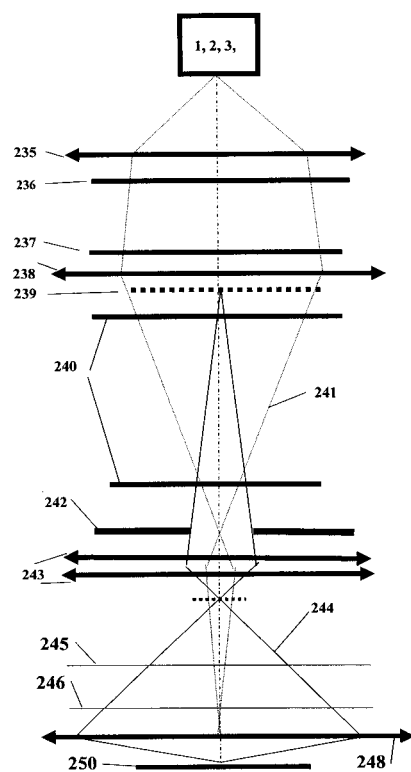
【図 22】



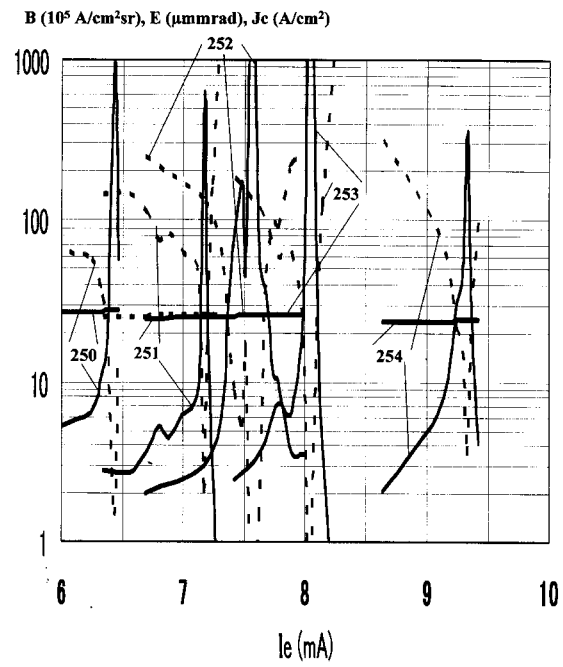
【図 23】



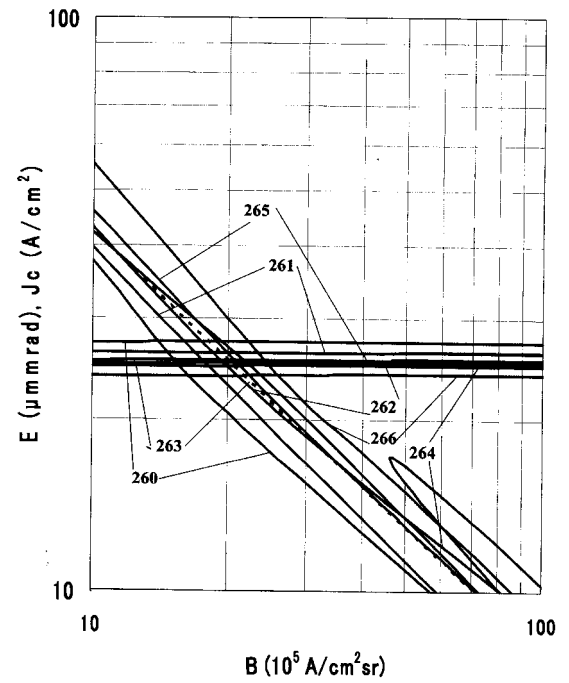
【図 24】



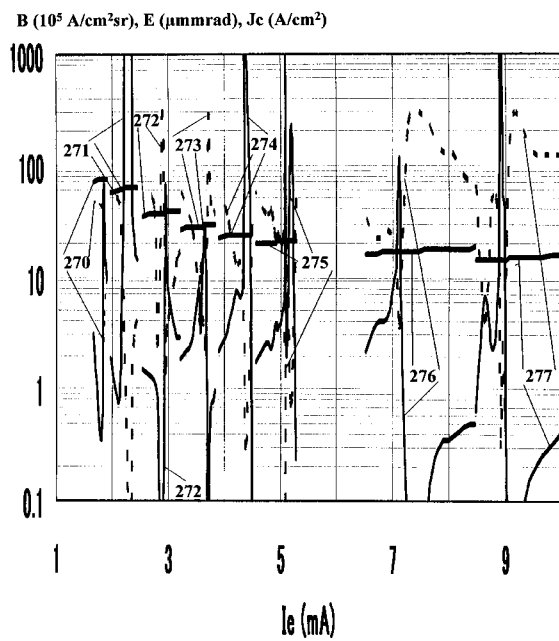
【 図 2 5 】



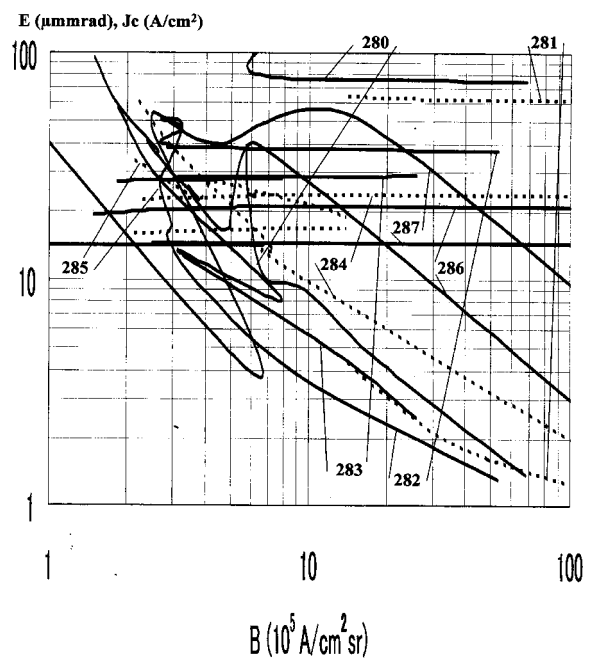
【 図 2 6 】



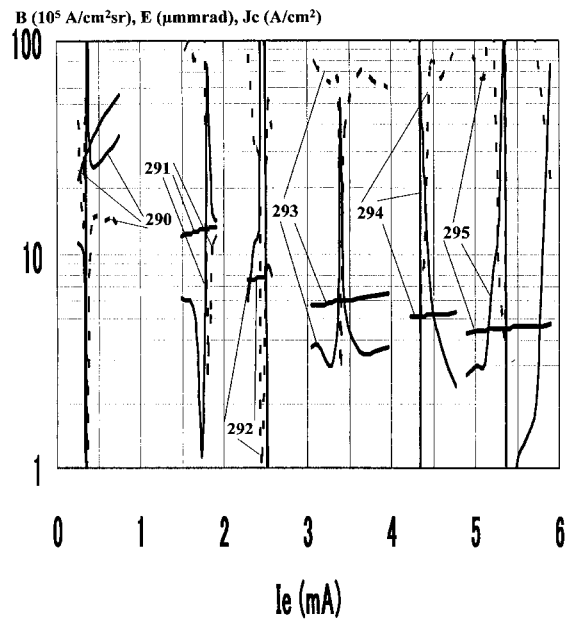
【 図 2 7 】



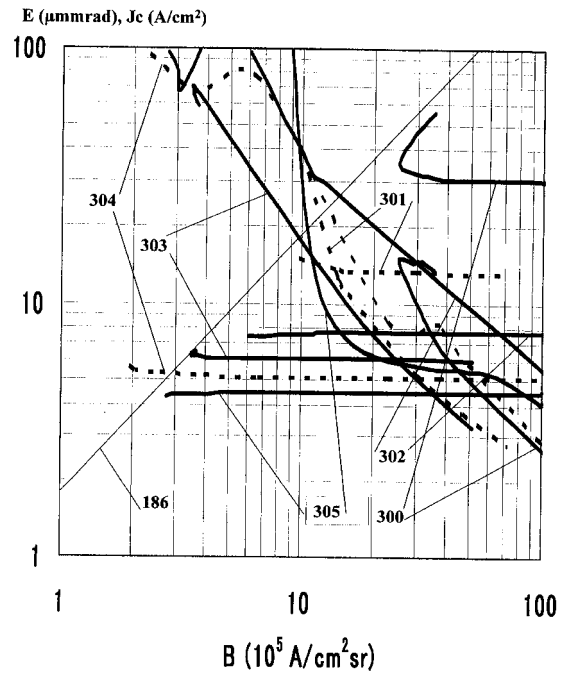
【 図 2 8 】



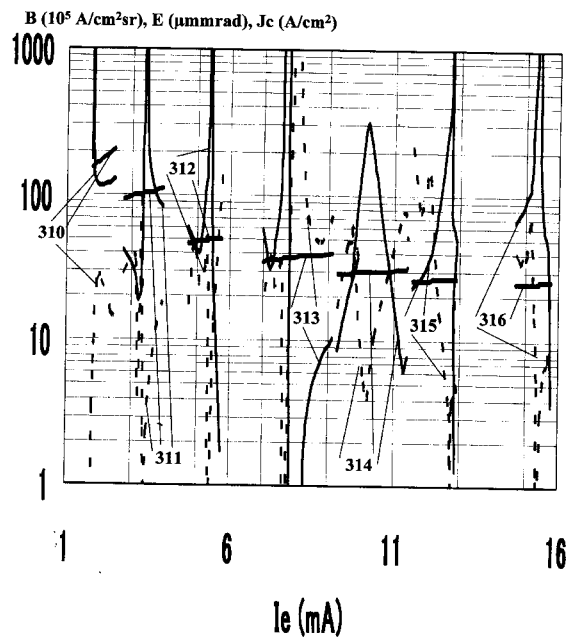
【 図 29 】



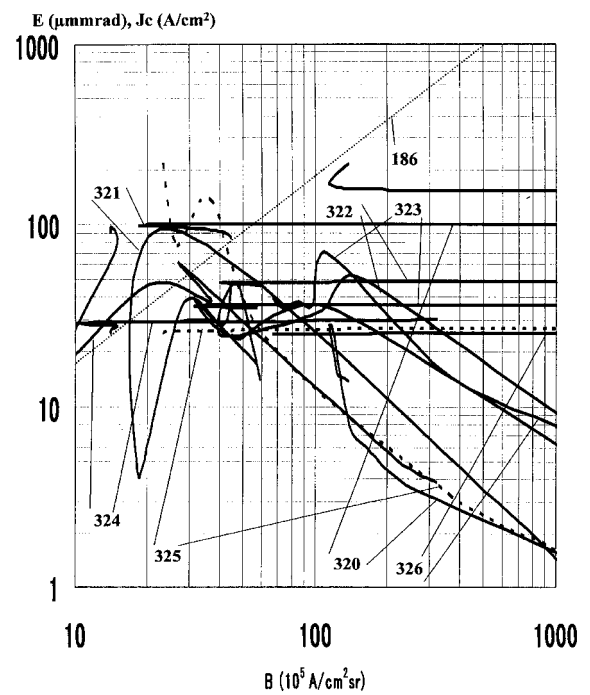
【 図 30 】



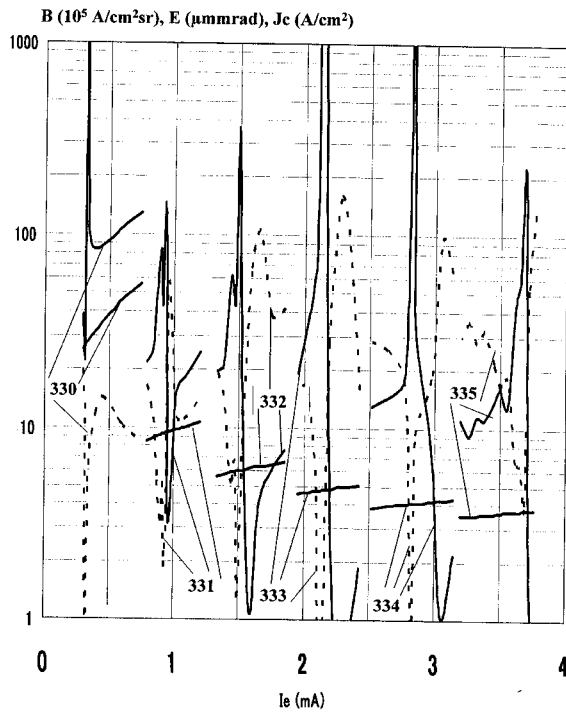
【 図 31 】



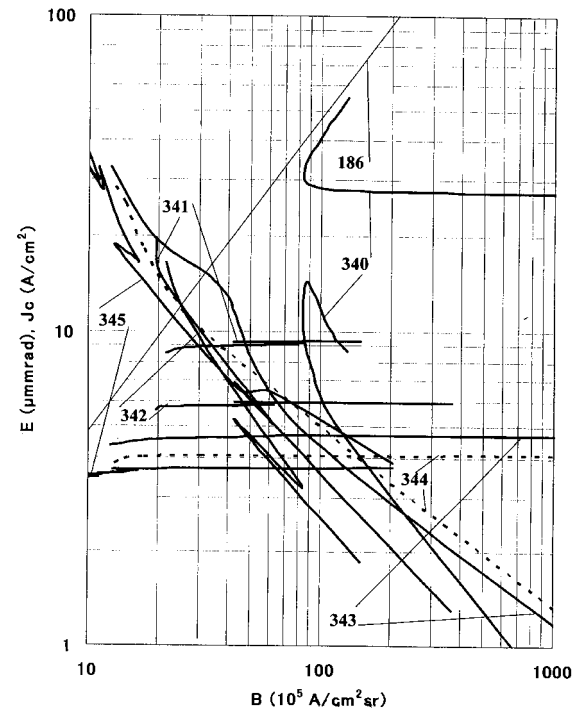
【 図 32 】



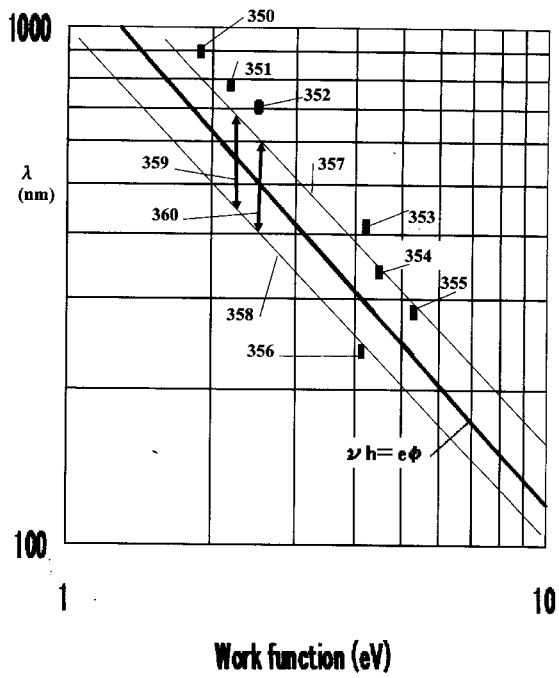
【 図 3 3 】



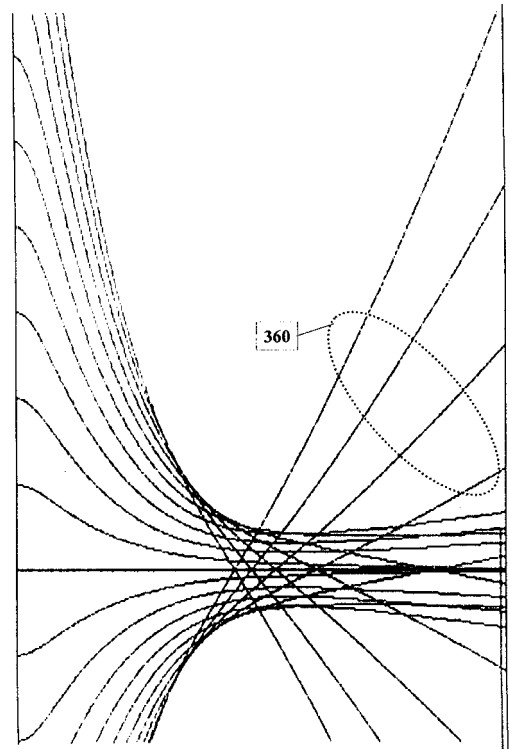
【 図 3 4 】



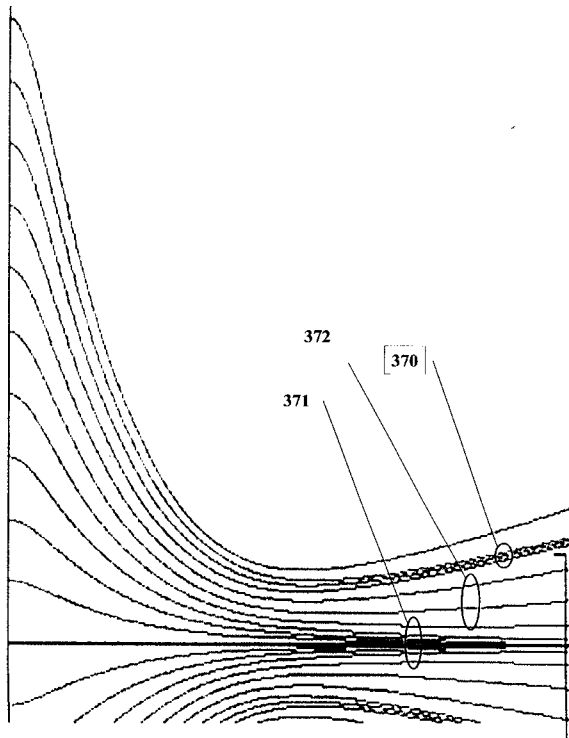
【 図 3 5 】



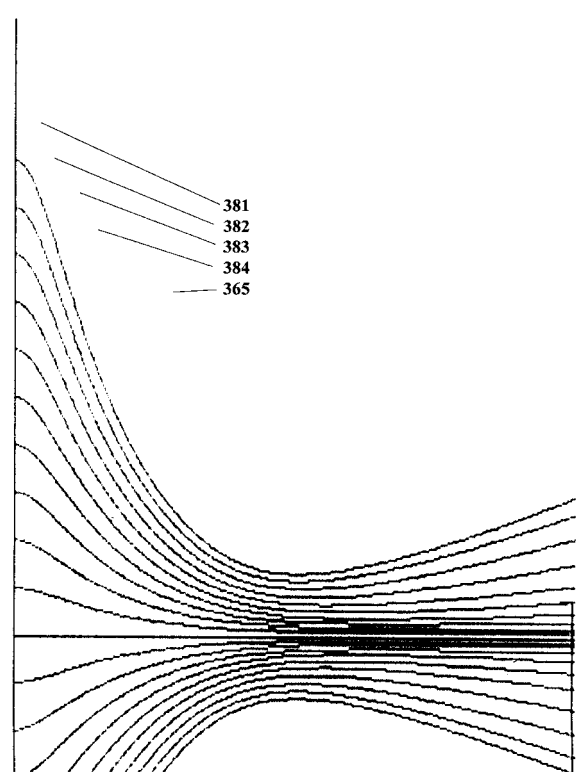
【 図 3 6 】



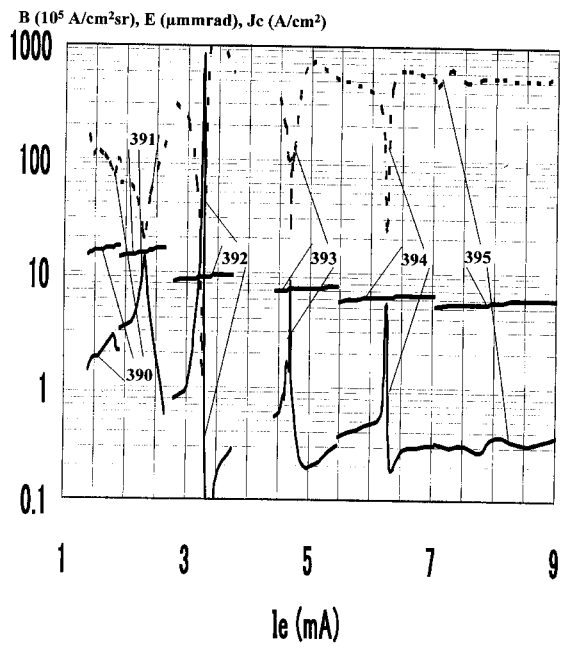
【 図 3 7 】



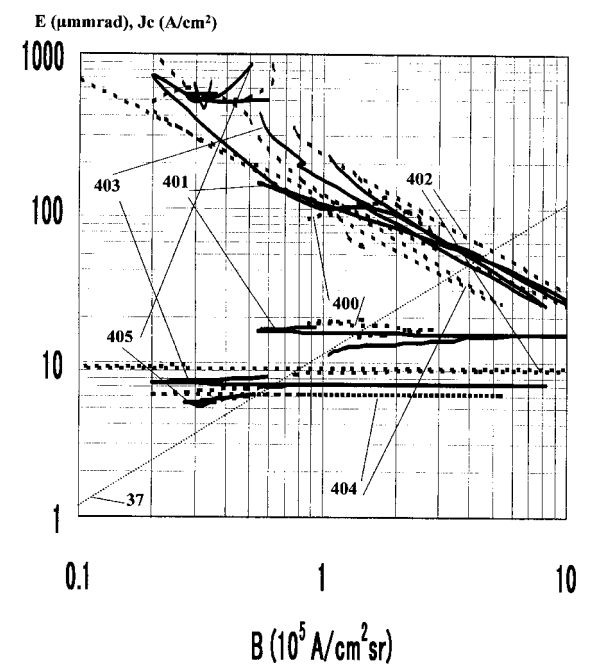
【 図 3 8 】



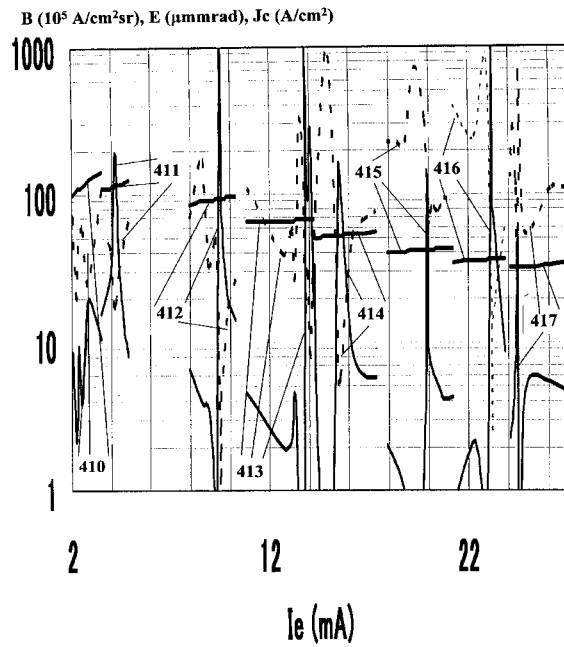
【 図 3 9 】



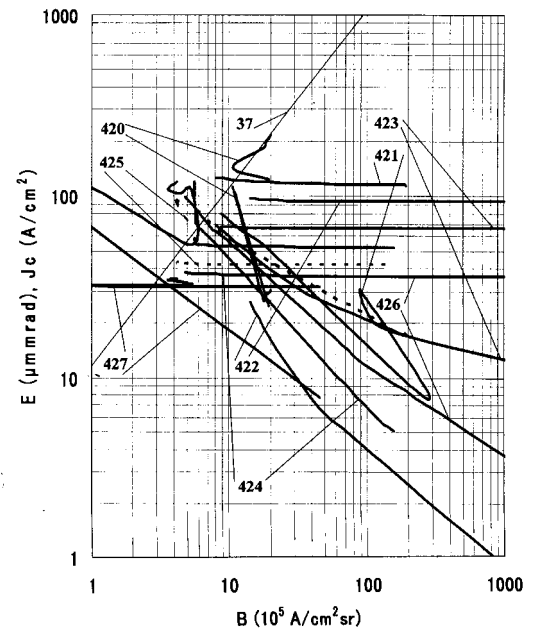
【 図 4 0 】



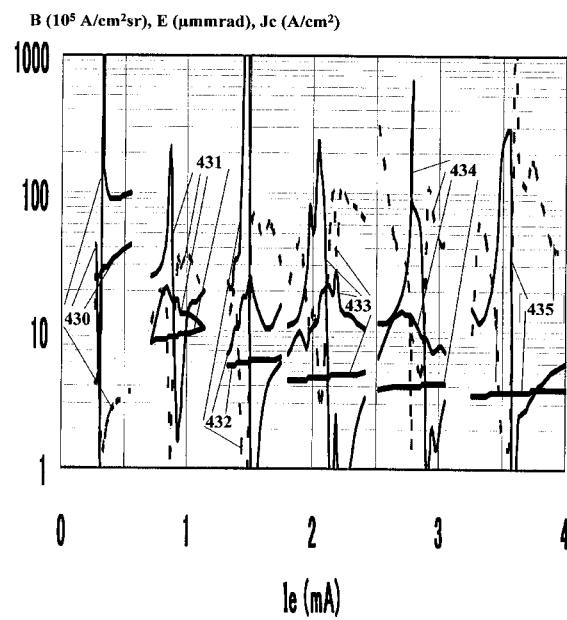
【 図 4 1 】



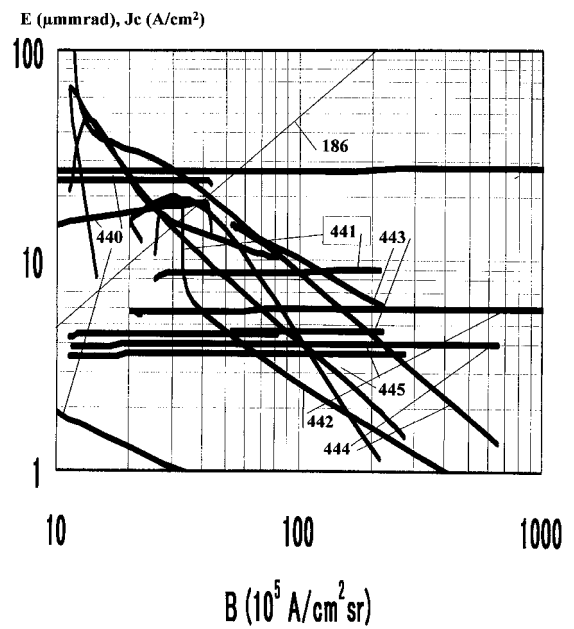
【 図 4 2 】



【 図 4 3 】

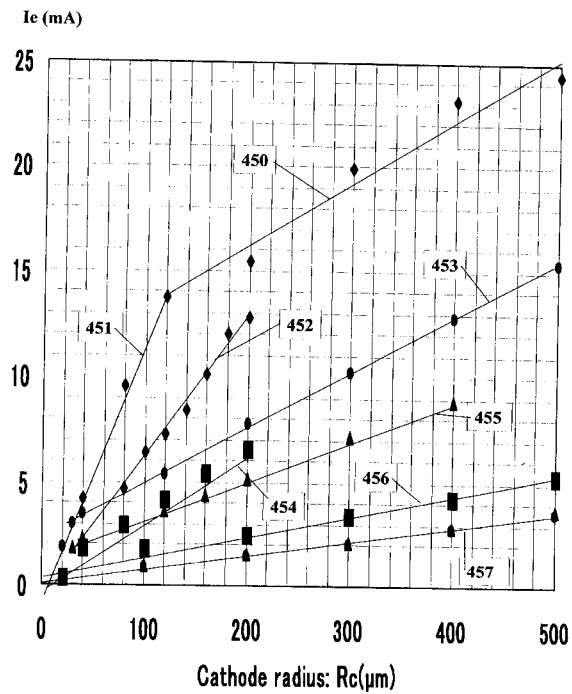


【 図 4 4 】

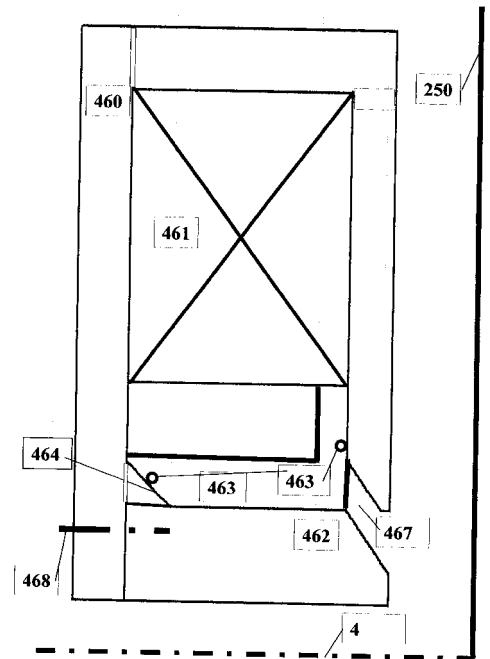




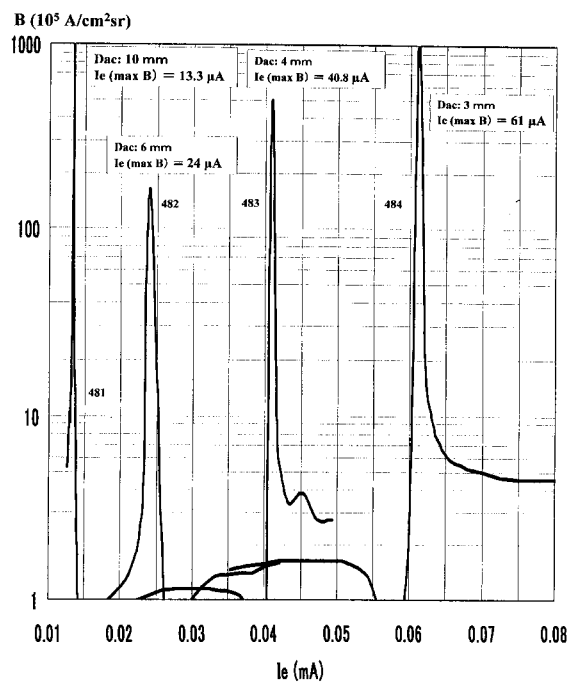
【 図 4 5 】



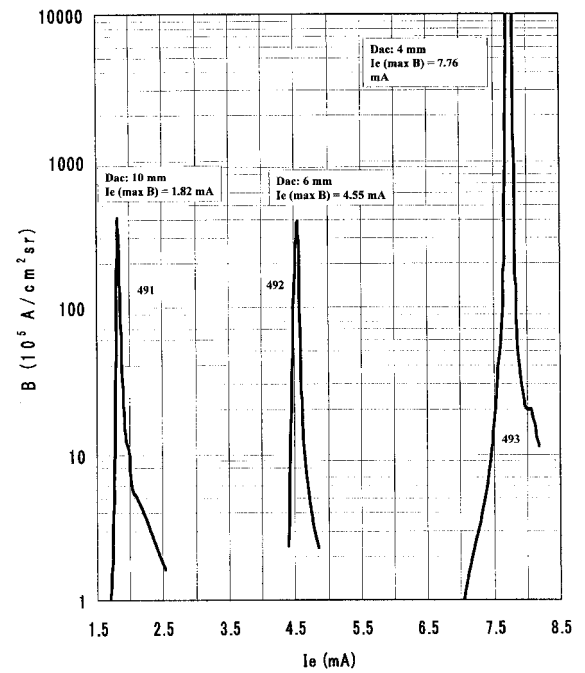
【 図 4 6 】



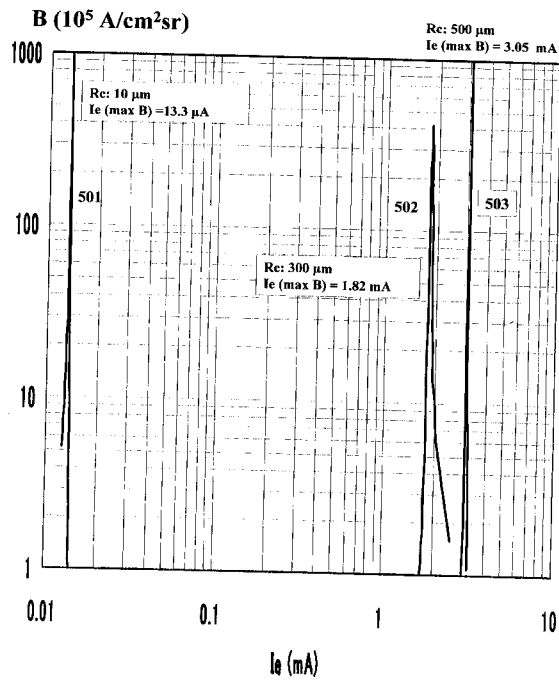
【 図 4 8 】



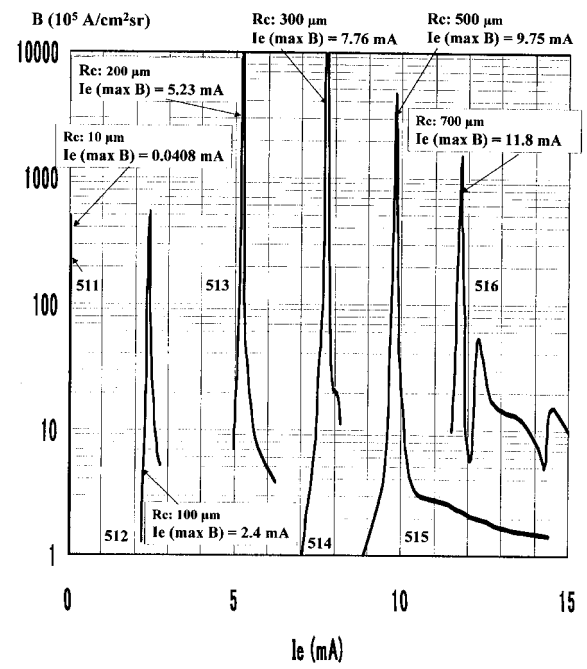
【 図 4 9 】



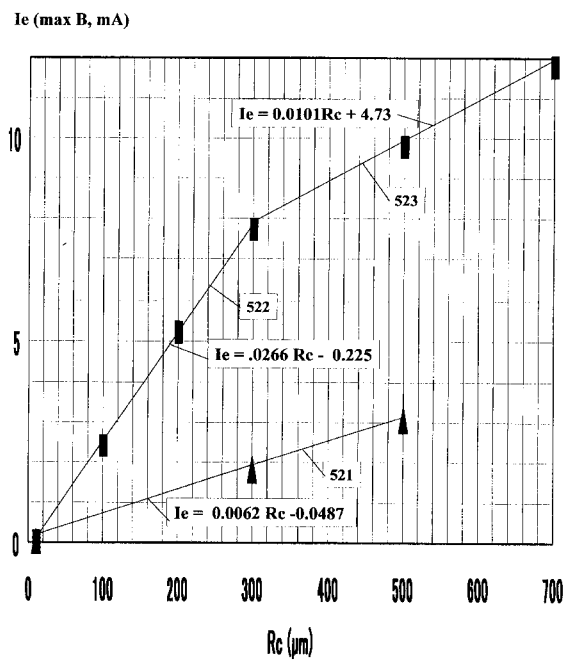
【図 50】



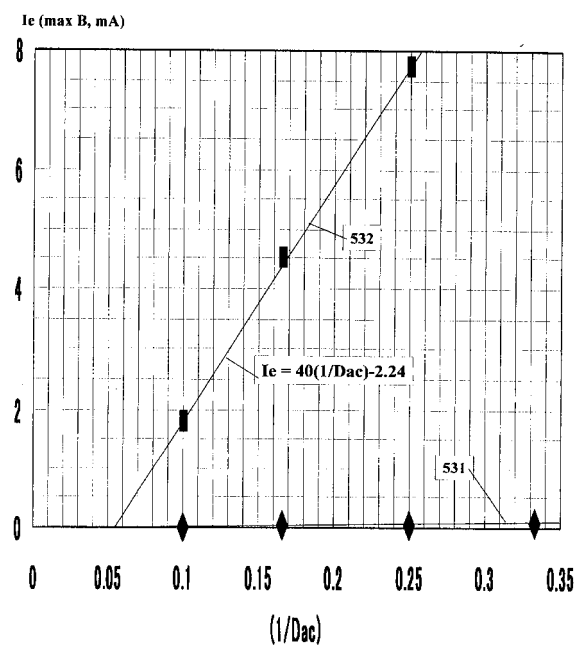
【図 51】



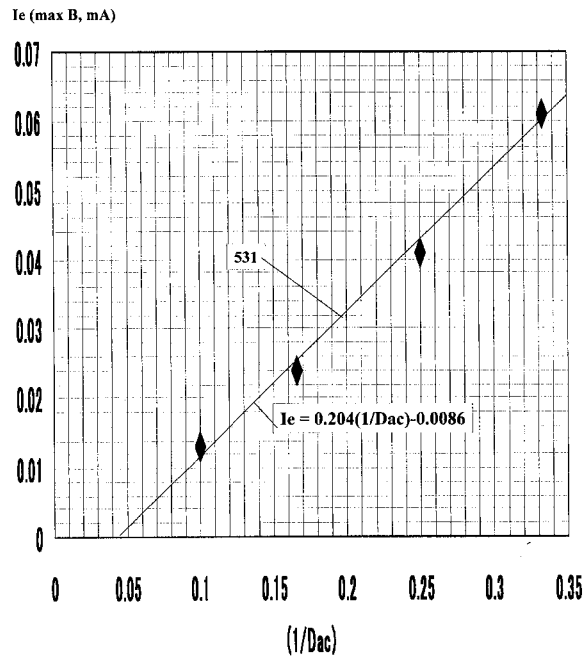
【図 52】



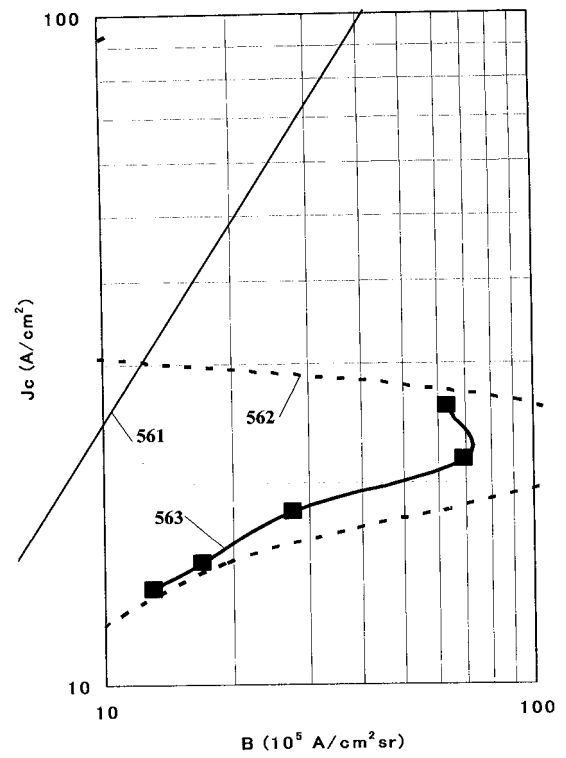
【図 53】



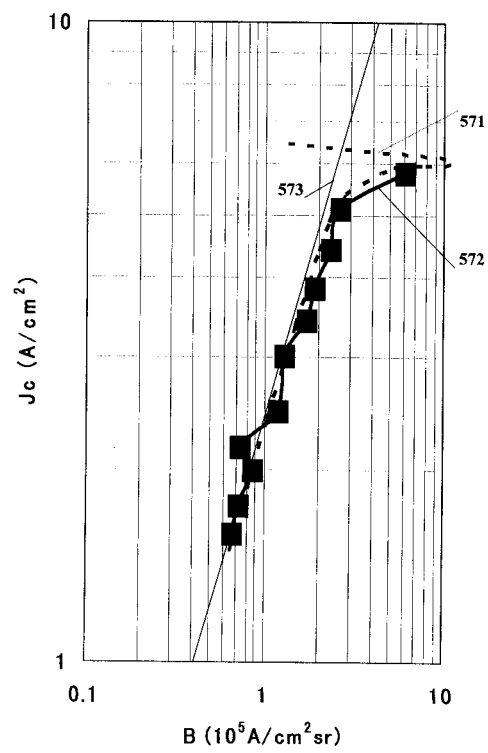
【 図 5 4 】



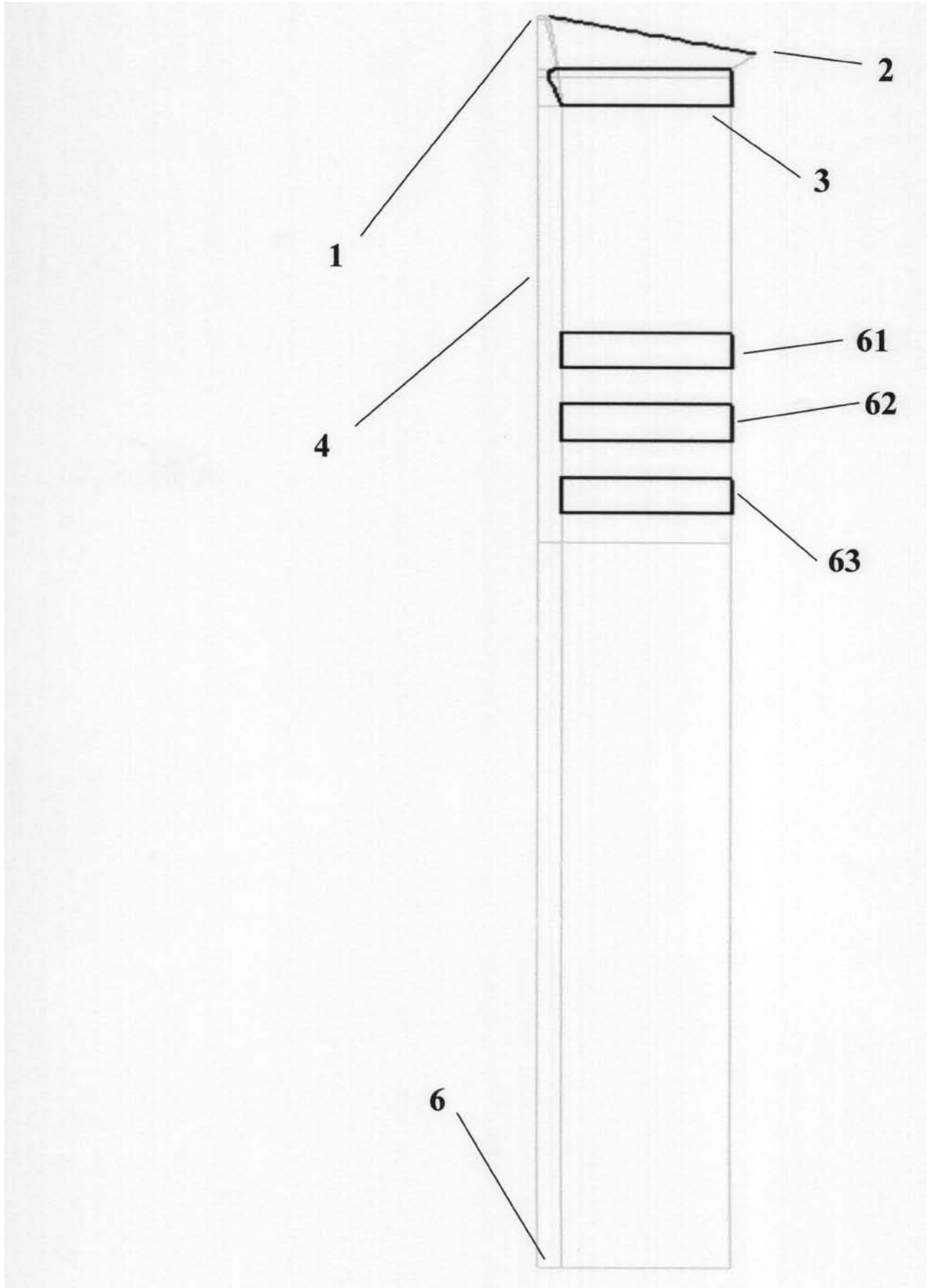
【 図 5 6 】



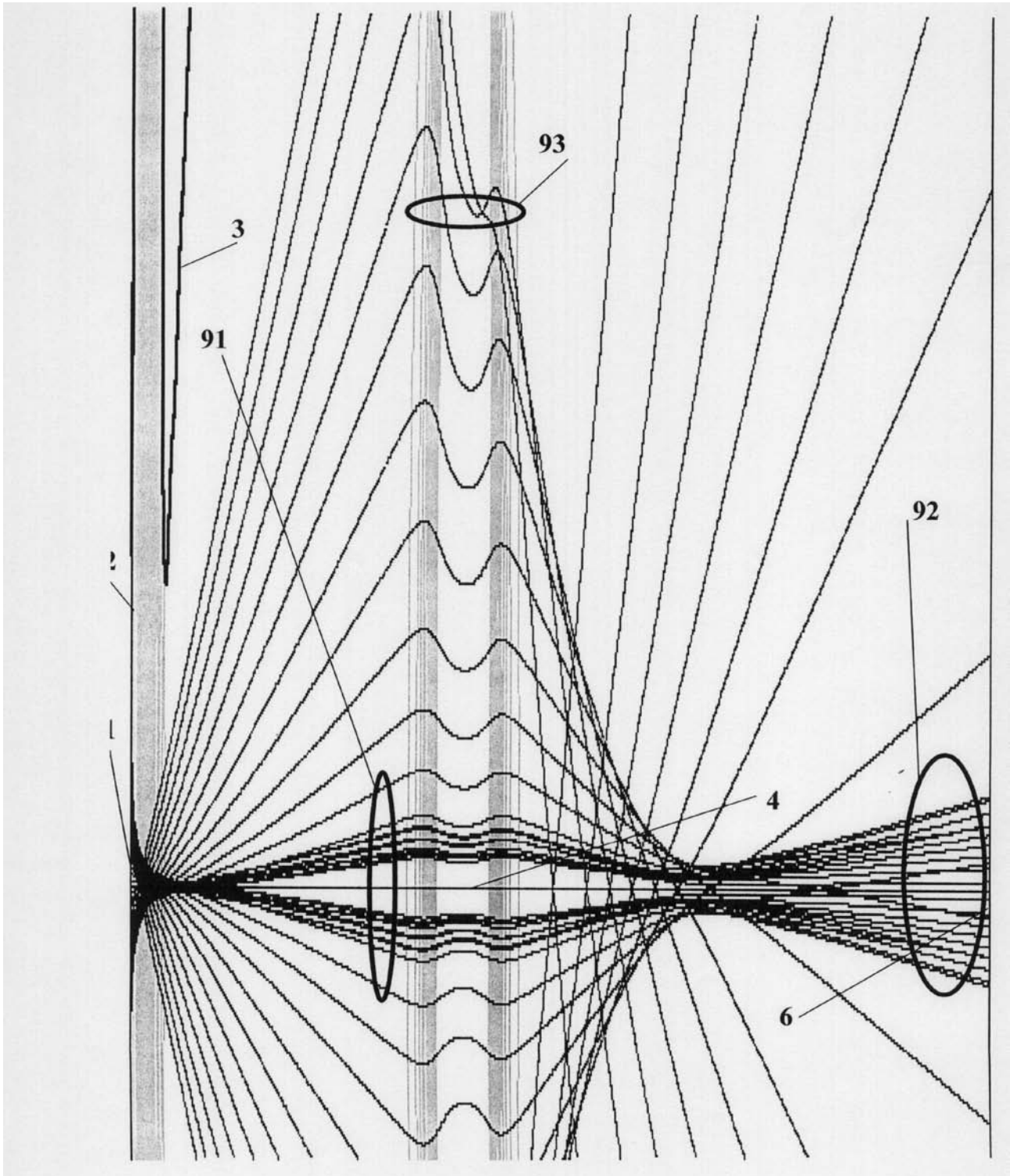
【 図 5 7 】



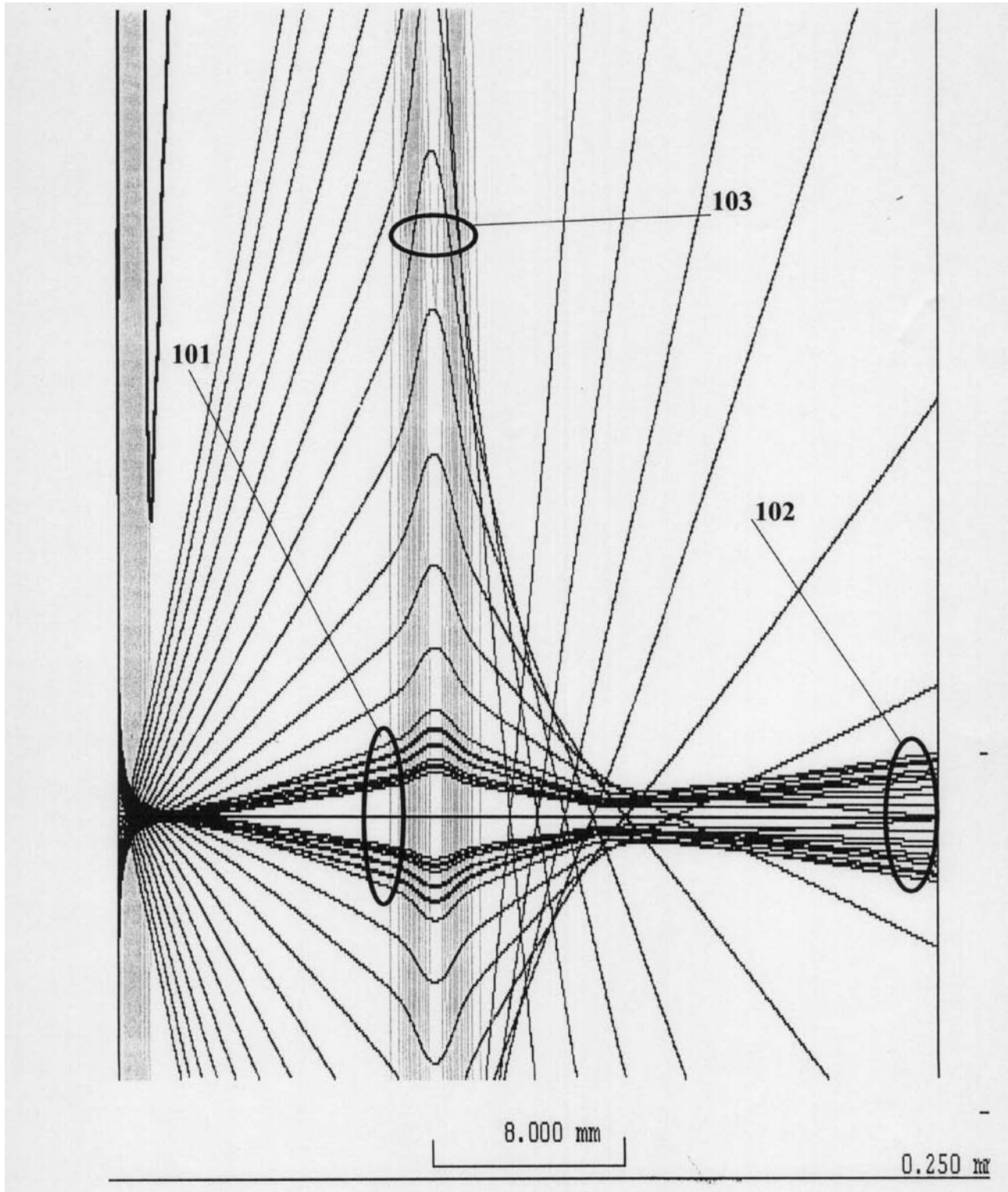
【図 6】



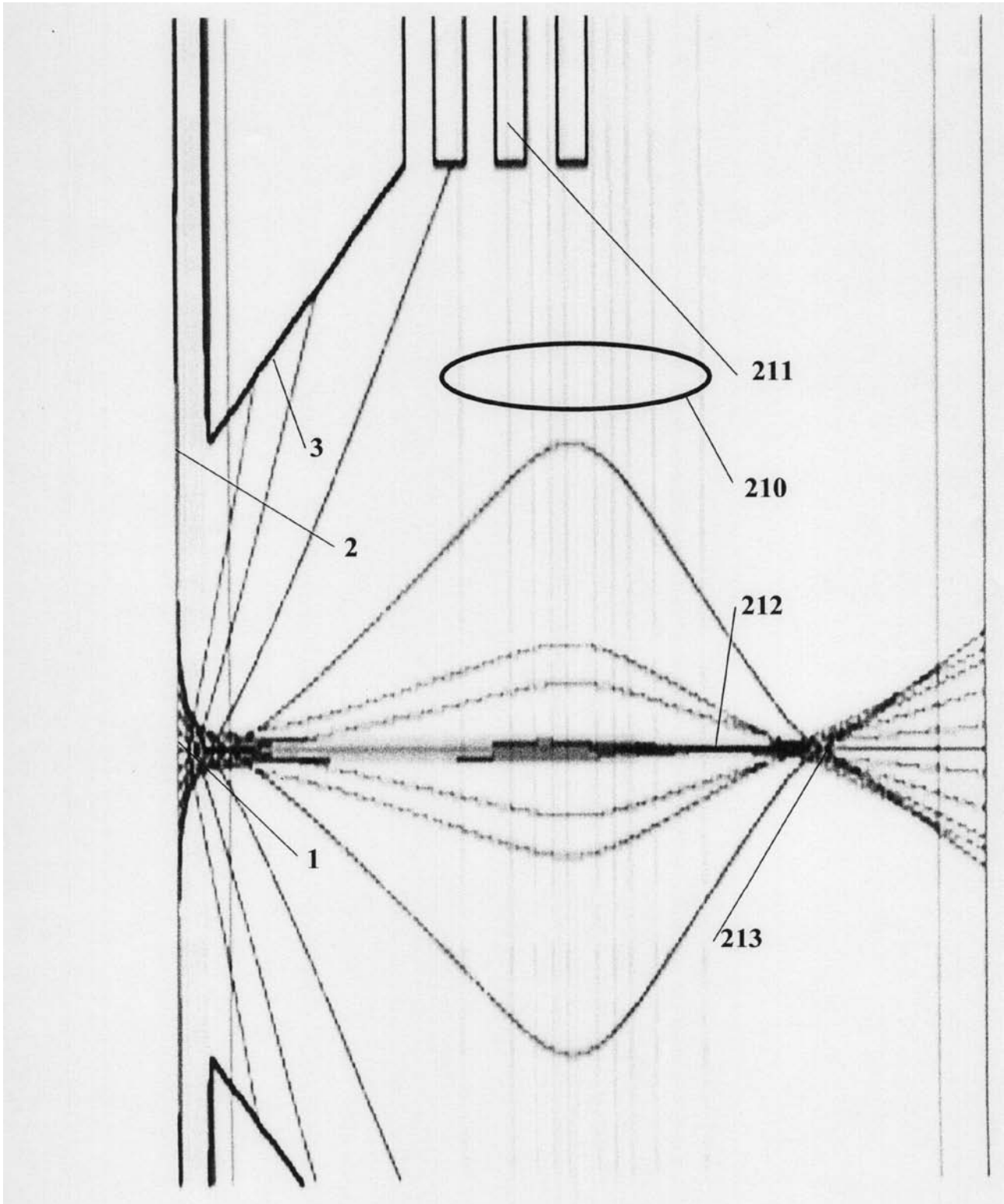
【図 9】



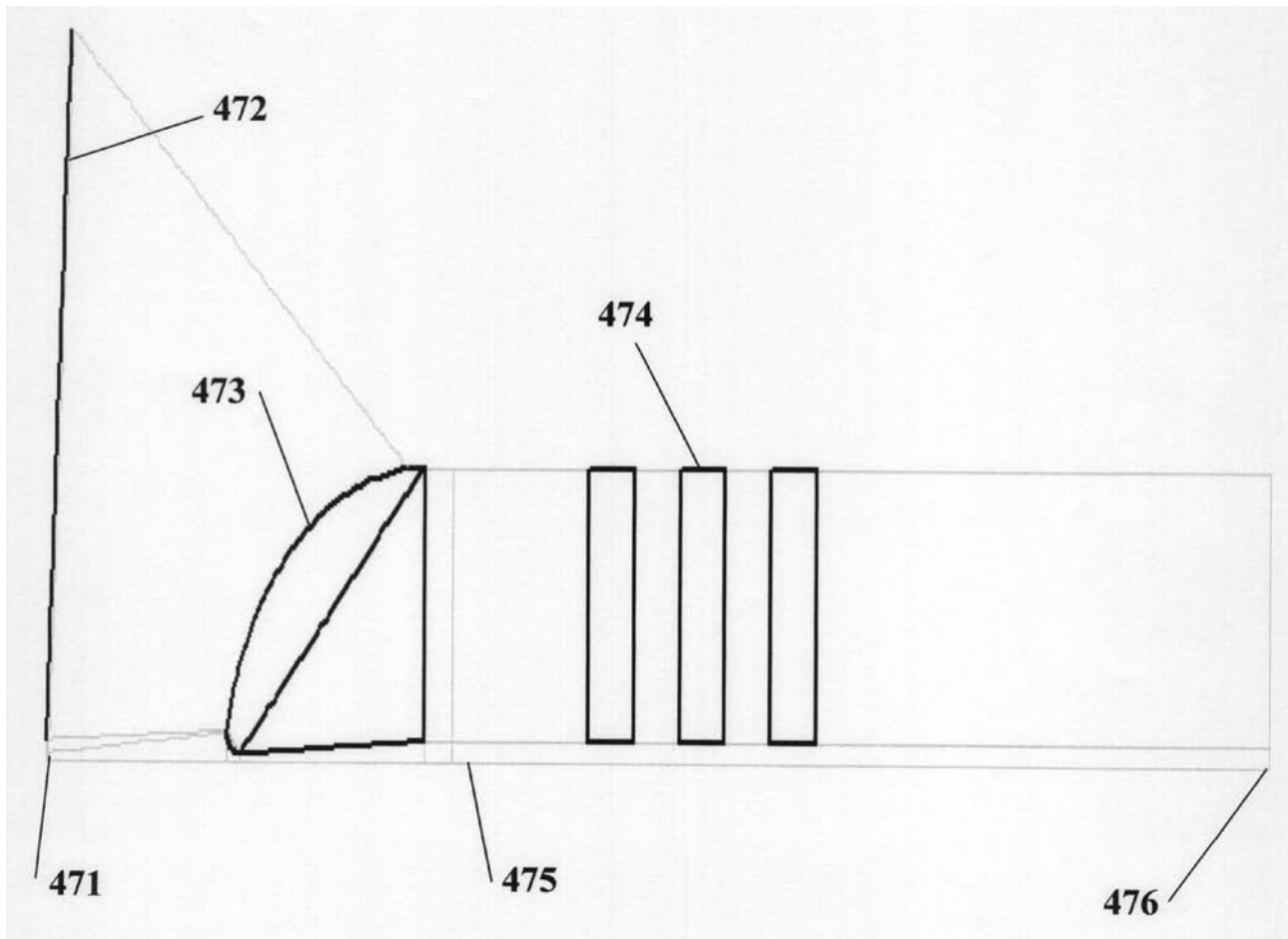
【図 10】



【図 21】



【図 47】





【 図 5 5 】

