

電子衝撃加熱型電子銃の改良

飯 吉 僚・竹 松 英 夫

Improvements of an Electron-heated Point Cathode Gun

Ryo IIYOSHI and Hideo TAKEMATSU

An electron-heated point cathode gun has been studied for the development of a high brightness gun with a long cathode life. In this gun, only the tip part of the tungsten point cathode is heated by the bombardment of the electrons emitted from an annular gun set inside of the Wehnelt cylinder. The emission characteristics of the gun show that this gun can be operated in the same way as a conventional triode gun. Besides the electron beam emitted thermally from the cathode tip, however, the backscattered and secondary electrons arrive at the anode. It was found that most of these electrons are caused by the bombarding electrons hitting the Wehnelt aperture and are suppressed by modification of the electrodes arrangement.

1. はじめに

電子顕微鏡や電子線微量分析装置などの各種電子ビーム応用機器においては、その性能向上のため高輝度電子銃が望まれている。現在これらの機器に広く使用されているタングステン熱陰極電子銃は、比較的低い真空度でも安定に動作する利点をもつが、高輝度動作を阻む次のような欠点がある。即ち、輝度を増加するためにヘアピン陰極温度を上昇すると、陰極材料自体の蒸発量も同時に増加して陰極寿命が著しく減少してしまうこと¹⁾²⁾、また陰極前面に形成される空間電荷の影響で輝度の増加が制限されてしまうこと³⁾である。空間電荷による制限は、鋭い先端をもつポイント陰極の使用で除去できる⁴⁾。しかし寿命の減少はヘアピン陰極と同様避けられない。

このような欠点を克服し、低真空でも安定に動作する高輝度電子銃を実現するため、ポイント陰極の先端部のみを高温度に加熱する方法を採用する試みがなされている。レーザー光による加熱を採用した実験が行なわれているが⁵⁾⁶⁾、我々は電子衝撃加熱を採用した銃の開発を進めている。電子衝撃加熱は Bolt 陰極⁷⁾や LaB₆陰極⁸⁾を用いた銃で採用されているように、ウェーネルト電極内部に配置した比較的簡単な電極系で陰極を安定に加熱できる特長をもつ。しかしながら、ポイント陰極先端部のみを加熱するには、従来の銃とは異なる電極構造が必要である。このためウェーネルト電極内部に環状電子銃を配置した新しい型の電子銃の基礎実験に着手し、数値解析による検討を並行して進めながら改良を重ねている。

数値解析結果の一部は既に報告したが⁹⁾¹⁰⁾、これらの検討を基に行なった改良で、動作安定度や電子衝撃の加熱効率が向上した結果、電子放出特性の測定が可能になった。この型の電子銃では、陰極先端から放出される電子ビームの他に、衝撃加熱時に発生し陽極に達する反射電子や2次電子（漏れ電子と呼ぶ）が存在する。その発生源が陰極先端だけでなくウェーネルト開口部付近にもあることがわかり、改良は漏れ電子の低減に進んでいる。本報告では、既に数値解析結果を報告した銃（I）の電子放出特性、漏れ電子発生源と漏れ電子を低減する目的でさらに改良を加えた銃（II）の構造と特性を述べ、本電子銃の問題点と改良を報告する。

2. 銃（I）の電子放出特性

図1に銃（I）の構造を示す。ポイント陰極、ウェーネルト、陽極から成る3電極電子銃のウェーネルト電極内部に環状電子銃を配置した構造である。ループ・フィラメント（ループ直径8 mm）、環状ウェーネルト、ウェーネルトとシールドが環状電子銃を構成し、通電加熱したループ・フィラメントから放出する衝撃電子を中心にに向けて加速する。衝撃電子はディスク状ビームを形成し、陰極先端部を衝撃してこれを加熱する。ループ・フィラメントはウェーネルトとシールド（ウェーネルトと同電位）に対して-5 kVの電位におかれている。陰極先端からの放出電子ビームは普通の3電極電子銃と同様にウェーネルト電圧で調整する。

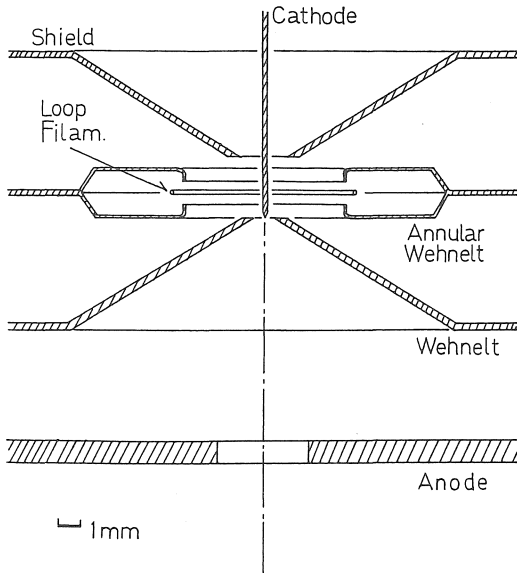


図1 銃(I)の構造

安定な銃動作を実現するには、環状電子銃の特性が重要である。環状電子銃が陰極先端部を安定かつ高い効率で電子衝撃加熱できるようにするため、予備実験と数値解析によって図1の形状を求めたのである。環状ウェーネルトはループ・フィラメントに対して負のバイアス電圧を印加し、主として衝撃電子ビームの縦方向の拡がり調整を目的で設けたが、この電圧変化は同時にループ・フィラメントの電子放出面積を変えるため、衝撃電子量にも大きな変化をもたらす。ループ・フィラメント温度の調整で衝撃電子量を一定に保つことができるが、安定な陰極加熱のためには環状ウェーネルトの大きな電圧変化に対しても衝撃電子ビームの拡がり小さく保たれることが必要であり、調整も容易になる。環状ウェーネルトのポイント陰極に対向する面の形状によって、バイアス電圧変化に対する拡がり幅が異なることが明らかになったので⁹⁾、図1の形状を採用してより安定な動作を可能にした。また、ループ・フィラメント加熱電流は、磁界を発生し衝撃電子の軌道を偏向するため、電子衝撃加熱の効率を低下させる主要原因になることがわかったので¹⁰⁾、直径0.2mm タングステン線であったループ・フィラメントを0.1mm タングステン線に変更した。この改良でフィラメントを同一温度に加熱するために必要な電流は約1/3に減少し、加熱効率が向上した。

上述の改良を行なった結果、銃(I)の動作安定度や加熱効率は向上し、電子放出特性の測定が可能になった。図2に実験結果を示す。衝撃電子加速電圧5 kV、電子量1 mA (衝撃電力5 W) と1.5mA (7.5W) で、針状ポイント陰極(直径0.2mm タングステン線)先端部を加熱

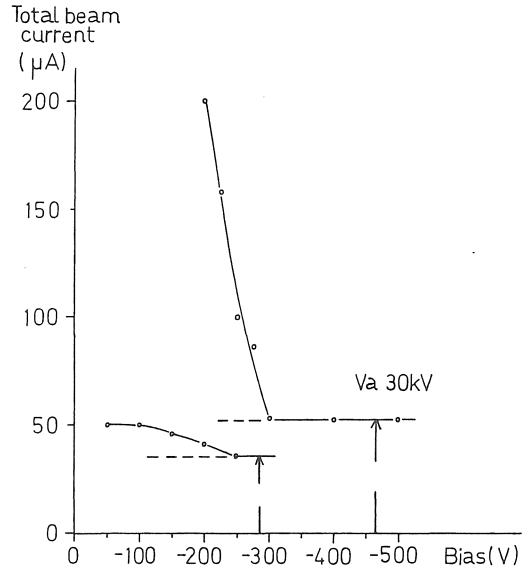


図2 銃(I)の電子放出特性

加熱条件: 衝撃電子量 1mA, 1.5mA

加速電圧 5 kV

陽極電圧: 30kV

(陰極は直径0.2mm タングステン)

しながら、ウェーネルト・バイアス電圧に対して測定した全放出電流である(陽極電圧30kV)。衝撃電子量1 mA (1.5mA)のとき、バイアス電圧 $> -250V$ ($-300V$)で、ポイント陰極先端からの電子放出によって放出電流が増加する。一方、陰極先端からの放出がないカット・オフ・バイアス時にも陽極に達する電子が存在する。我々はこれを漏れ電子と呼び、陰極先端から放出される電子と区別している。漏れ電子は衝撃加熱の際に発生した反射電子や2次電子の一部が陽極に達したものである。陽極下方に蛍光板を置き全放出パターンを観察すると、陰極先端からの放出電子ビームは小さな明るいスポットであるのに対して、漏れ電子は広い範囲にわたって分布している。放出ビーム・スポット径はウェーネルトバイアス電圧とともに変化し、カットオフバイアス時には消失するが、漏れ電子の分布は一定のままであった。漏れ電子の存在を別にすれば、普通の3電極電子銃と同様に動作できることが確かめられた。

3. 漏れ電子

漏れ電子の存在は、電子ビーム加速用高圧電源の負荷を増加する原因になるだけでなく、実際に利用する放出電子ビーム中への混入も問題になる。漏れ電子の量は衝撃電子量に比例して増加する傾向をもつ。より少ない衝撃電子量でも陰極加熱に必要な衝撃電力を供給できるようにするため、図2に示した電子放出特性の測定では、

衝撃電子加速電圧を5 kV に上げて、漏れ電子を $50\mu\text{A}$ 程度に軽減している。しかしながら、この方法は環状電子銃部の絶縁の面からは問題があるので、さらに漏れ電子を減少するには発生源を明らかにしてこれを除く改良が必要である。

これまで漏れ電子はポイント陰極先端付近で発生した反射および2次電子が主であろうと考えていたが、蛍光板で観察した分布や放出特性で得られたその量はウェーネルトバイアス電圧に関係なく一定であることから次のことがわかる。即ち、

①ポイント陰極から陽極に達するのは高エネルギーをもつ反射電子だけであること。(もし低エネルギーの2次電子があるとすれば、放出パターンに変化が現われるはずである。)

②ポイント陰極以外に、陽極に向かい合うウェーネルト電極表面を発生源と考えても実験観察両結果と矛盾しないこと、である。

②を説明するために、図3に環状電子銃部分の数値解析例を示す。ループ・フィラメントと環状ウェーネルト

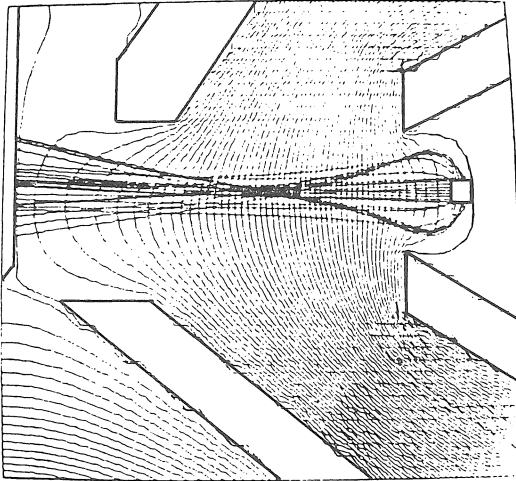


図3 数値解析例

間に印加するバイアス電圧を小さくしたときの結果で、衝撃電子の拡がりが増加している。環状ウェーネルト形状の改良で拡がり小さく抑えられているが、ループ・フィラメント温度を低く保って衝撃電子量を増加する場合にはこの程度の拡がりが生じる。衝撃範囲が下がって陰極先端部になると、一部の衝撃電子は陰極先端下を通過し反対側のウェーネルト電極開口部や下面を直接衝撃するようになる。ここで発生した反射および2次電子は全て陽極に向かって加速されるため漏れ電子となる。その量はもちろんウェーネルト電圧に関係しないので測定結果に一致する。これは故意に環状ウェーネルト・バイアス電圧を大きく変えて行なった実験で、衝撃電子量1

mA 以下の場合にも漏れ電子量が $100\mu\text{A}$ 近くまで増加するという結果によっても確かめられた。

環状ウェーネルト・バイアスで衝撃電子の拡がりを小さく抑え、ループ・フィラメント温度($\leq 2,700\text{K}$)をさらに上昇すれば漏れ電子を減少できる。しかし高温に通電加熱したフィラメントの寿命は減少し、長時間にわたる高輝度動作の達成を目的とした銃にとって好ましい動作でない。ウェーネルト電極開口部付近にも漏れ電子の発生源が存在することが明らかになったので、これを除く改良に進んだ。

4. 銃(II)の構造と電子放出特性

漏れ電子を低減する目的で電極配置を改良した銃(II)の構造を図4に示す。ループ・フィラメントをウェーネ

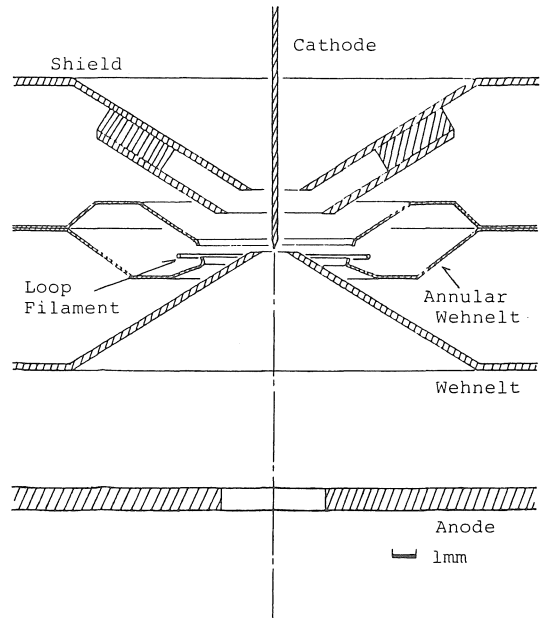


図4 銃(II)の構造

ルト開口部より低い位置に置き、下方から陰極を衝撃するようにして、ウェーネルト開口部が直接電子衝撃を受けない構造にしている(②の防止)。反射電子の主放出方向は衝撃電子の入射方向とほぼ鏡面反射の関係をもつことから¹¹⁾、下からの衝撃によってポイント陰極で発生し陽極に達する反射電子量の減少も期待できる(①の軽減)。

ループ・フィラメント位置の変更に伴う、他の電極配置や形状の変更は、銃(I)の設計に使用した数値解析プログラム⁹⁾を利用し、解析結果を基に行なった。環状ウェーネルトの配置と形状の変更だけでは、陰極先端部を電子衝撃できないことがわかったので、シールド電極にも変更を加えている。解析例を図5に示す。衝撃位置は

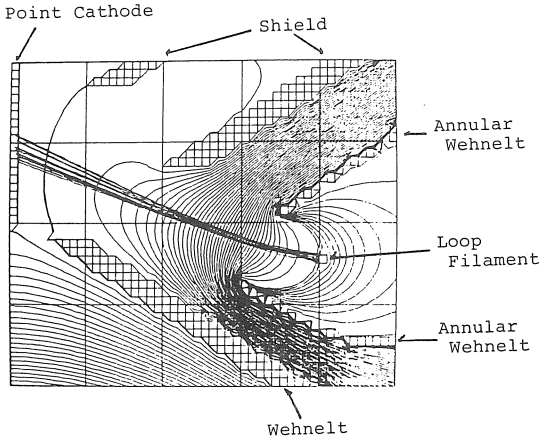


図5 銃(II)の解析例

陰極先端より1 mmの所であるが、電位分布の様子と衝撃電子軌道から、シールド位置を上に移すれば先端に近づけられることがわかる。銃(II)の電極配置(図4)でシールド位置が異なるのはこのためである。環状ウェーネルト開口部の実際の形状も異なっているが、これは銃(I)の改良と同様に衝撃電子の縦方向の拡がりを小さく抑えるのに実際の形状が有利なためである。

銃(II)の実験結果を図6に示す。実線は銃(I)と

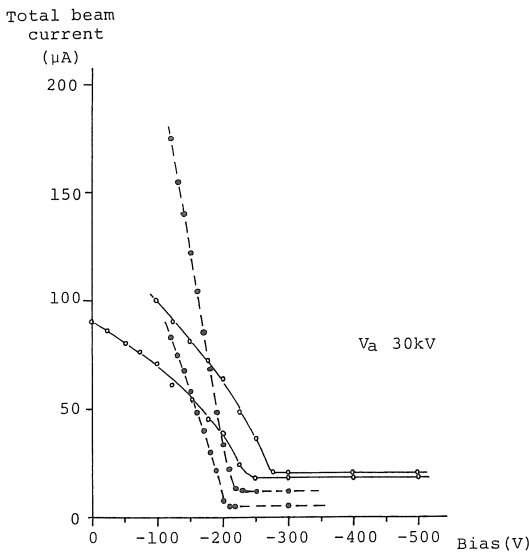


図6 銃(II)の電子放出特性
 実線は直径0.2mmタングステン陰極
 加熱条件：衝撃電子量 1mA, 1.5mA
 加速電圧 5kV
 破線は直径0.1mmタングステン陰極
 加熱条件：衝撃電子量 0.9mA, 1.1mA
 加速電圧 5kV
 (陽極電圧 30kV)

同じ加熱条件で直径0.2mm タングステン陰極を加熱した場合の結果で、漏れ電子は20 μ Aまで減少している。銃(I)の特性(図2)に比べ、陰極先端からの放出電子量はやや少なく加熱効率の点で問題を残すが、陰極以外の電極にもかなりの量の電子が衝撃していると考えられるこのような状況においても、銃(II)は漏れ電子を低く抑える構造であることが確かめられた。

ポイント陰極を直径0.1mm タングステン線に変えた場合の測定結果を図6に破線で示した。衝撃電子量0.9 mAと1.1mAで加熱したときの結果で、陰極径が小さいためより高温度に加熱され、陰極先端からの放出電子量は増加する。漏れ電子量は0.2mm タングステン陰極の場合に比べさらに減少している。銃(II)で残った漏れ電子は陰極径とともに減少することから、ポイント陰極で発生した反射電子が主であろうと考えている。蛍光板上の全放出パターンの様子は銃(I)と同様であった。

5. むすび

高輝度電子銃を実現する目的で開発を進めている電子衝撃加熱型電子銃の改良について報告した。本電子銃は漏れ電子の存在を別にすれば、普通の3電極電子銃と同様の動作が可能である。電子ビーム断面の観察から、陰極先端からの放出電子ビームに比べ、漏れ電子は広い角度範囲に分布していることがわかった。その発生源は陰極先端だけではなくウェーネルト電極の開口部付近にもあり、電極配置の改良でさらに減少できることを見出した。これらの改良結果によって本電子銃の実用化に明るい見通しが得られた。

引き続き実用化に向けて実験改良が進んでいるが、これらの結果は別の機会に逐次報告して行きたい。

終りに、本研究を進めるにあたり、当初より多くの有益な御助言、御指導をいただいた名古屋大学 丸勢 進教授、本研究の遂行に絶えざる激励を与えられた本学電子工学科 吉田 昭二 教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Bloomer R N : The lives of electron microscope filaments, Brit. J. Appl. Phys., Vol.8, 83-85 (1957)
- 2) Bloomer R N : High-temperature properties of tungsten which influence filament temperatures, lives and thermionic-emission densities, Proc. Int. Electr. Engrns., Vol.104B, 153-157 (1957)
- 3) Haine M E and Einstein P A : Characteristics of the hot cathode electron microscope gun, Brit. J. Appl. Phys., Vol.3, 40-46 (1952)

- 4) Ohshita A, Shimoyama H and Maruse S :
Brightness of the hot cathode electron gun at
high emission densities, J. Electron Microsc., Vol.
27, 253-257 (1978)
- 5) Van der Mast K D, Barth J E and LePoole J B :
A continuously renewed Laser heated tip in a TF
emission gun, Proc. 8th. Int. Congr. Electron
Microscopy, Vol.1, 120-121, Camberra (1974)
Van der Mast K D : A Laser heated schottky
emission gun for electron microscopy, Disserta-
tion, Delft Univ. Tech., (1975)
- 6) Möllenstedt G, Lichte H, Lau B und Uchikawa
Y : Die Anwendung eines fokussierten Laserstr-
rahls zur heizung der Kathode eines Elektro-
nenstrahl-Erzeugungssystems, Optik, Bd.51, 417-
421 (1978)
- 7) Bas E B : Die Bolzen-Kathode. Eine indirekt
geheizte Wolframkathode für Elektronenkan-
onen, Z. angew. Phys., Bd. 7, 337-344 (1955)
- 8) Broers A N : Electron gun using long-life
lanthanum hexaboride cathode, J. Appl. Phys.,
Vol. 38, 1991-1992 (1967) Vol.38, 3040 (1967)
(Erratum)
- 9) 飯吉 僚, 日置伸一, 竹松英夫 : 電子衝撃加熱型電
子銃の電位分布と衝撃電子軌道, 愛工大研報, No.
14B, 7-14 (1979)
- 10) 飯吉 僚, 竹松英夫 : 電子衝撃加熱型電子銃内の衝
撃電子軌道, 愛工大研報, No.17B, 27-32 (1982)
- 11) Kanter H : Zur Rückstreuung von Elektronen im
Energiebereich von 10 bis 100keV, Ann. Phys.,
Bd.20, 144-166 (1957)

(受理 昭和58年1月16日)