

3-5. 電子ビームを作ろう

【目的】

ビーム状にした電子（電子束）はブラウン管テレビや電子顕微鏡などで利用されており、我々の生活に必要な不可欠な科学技術である。しかし、実際に自分の手で電子を物質内から取り出し電子ビームとして利用するためにはどうしたらよいかわかりますか？本実験では、自分の手で物質内から電子を取り出しかつ電子ビームを作ることとを目的としています。（→熱電子放出現象の理解と電子顕微鏡理解への第一歩となります。）

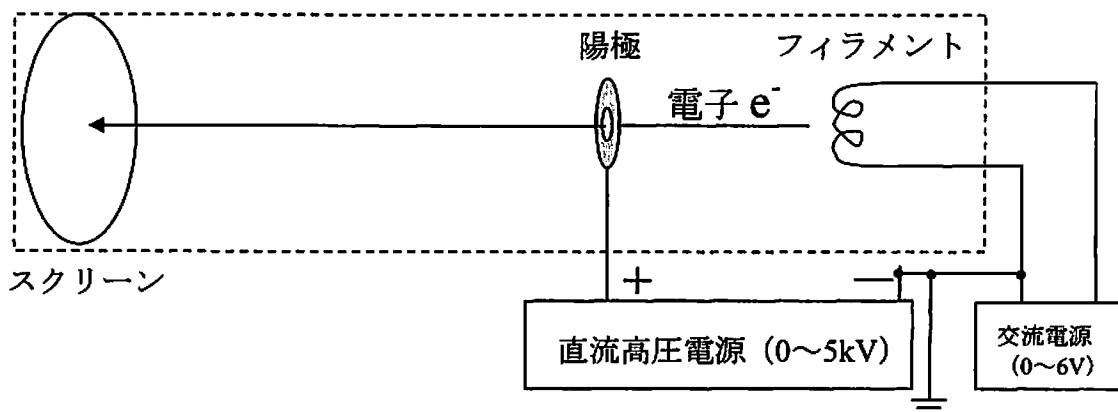
【原理】

電子は物質を構成する一番の元になる粒子（素粒子）の一つである。実際、我々の体や鉛筆や10円玉などの中にもたくさんの電子が詰まっている。そのように身の回りにたくさんある電子ではあるが、誰一人として10円玉から勝手に電子がビームのように出てくる様子を見たことはないだろう。熱力学の法則に基づいてこのことを考えると、10円玉の中の電子のエネルギー $E_{\text{中}}$ は、10円玉の外の電子のエネルギー $E_{\text{外}}$ より低い状態（→安定）であるといえる。したがって、10円玉の中の電子を外に取り出すためには、その電子に少なくとも $(E_{\text{外}} - E_{\text{中}})$ のエネルギー（それを仕事関数 ϕ と呼ぶ）を外部から与える必要がある。その外部からのエネルギーとしては、熱や光などのエネルギーが挙げられる。今回の実験では、金属（例えばCuやW）を熱することにより電子を取り出すことを考える。（そのような方法により取り出した電子を熱電子と呼ぶ。）金属を高温に熱する一つの方法に、金属に電流を流すという簡便な方法がある。電球は電球の中の金属線（フィラメントと呼ぶ：W製）に電流を流すことにより、フィラメントが発熱して高温状態（約2000℃）になって光り輝いているのである。

さて、フィラメントに電流を流して高温状態にして電子に $(E_{\text{外}} - E_{\text{中}})$ 以上のエネルギーを与えてやれば熱電子が取り出せるはずだが、外に出てきた電子は四方八方に飛び出してしまっていて、電子ビーム（電子束）としては使えない。出てきた電子を電子ビームとして利用するためには、一方向に電子を導く必要がある。幸い、電子（マイナス電荷）は電場の影響を受けてプラス極側へと引き寄せられるので、熱電子を放出しているフィラメントを電場の中へ置いてやれば熱電子を一方向へと導くことができる。

ここで、さらに考慮すべきことがある。それは電子が障害物にぶつからないで進める距離（平均自由行程）は、真空中では長く大気中ではすごく短いということである。よって、電子をビームとして利用するためには、高真空環境を作る必要があるといえる。

以上の条件をそろえ、後は電子ビームを観察するスクリーンとして電子線によって発光する蛍光塗料を塗ったガラスを用意すれば、電子ビームを自分の目で確認できるはずである。上記の原理を模式図に表すと下図のようになる。（破線四角領域内は真空中）



【実験方法】

本実験の流れを 1～9 に列記する。特に電子ビームを出す部分の「3.の電子銃作製」が本実験の一番重要なところであり、各自の創意工夫を要する。

1. 使用装置の理解（真空および真空装置の理解）
2. フィラメント金属の電圧電流特性評価→（オームの法則、比抵抗の概念理解）
3. 電子銃作製
4. フィラメント温度の評価（比抵抗値（電圧・電流値）と温度との関係）
5. 真空 2 極管の実験（熱電子放出実験）→（Richardson-Dushman の式（飽和電流と温度）、ダイオードとしての働き）
6. 仕事関数や Richardson 定数の評価
7. 電子銃の作製→電子ビームの発生
8. 実験に関する議論
9. 電子顕微鏡で材料の内部を観察

以下に、上記項目の補足説明を示す。

【2. フィラメントの実験（大気中）】

フィラメント材料について調べる方法としては、フィラメントを電流導入端子にスポット溶接装置で取り付け、回路配線後、スライダックにて電圧を調整しながら交流電流を流します。その際、フィラメントに流した電圧、電流を記録します。また、フィラメントの状態も良く観察します。（ある程度電流を流すと発光するのでその色も詳細に観察し、色と温度との関係を後で理解できるように記録します。）

【2. フィラメントの実験（真空中）】

大気中の実験とおおよそ同じ長さ、断面積を持つように新しいフィラメントを取り付けた状態で電流導入端子を装置本体に取り付けます。（白塗りの六角ネジで取り付けます。）②リークバルブを閉めた後、V2バルブを閉じて（スイッチを下に下ろす）V3バルブを開けます。③10分後、V3バルブを閉めてV2バルブを開けて（スイッチ上げる）V1バルブを開けて10分待ちます。大気中で行ったフィラメントの実験と同様の実験を真空中で行い、大気中と真空中との相違について確認します。

各条件（大気中、真空中）のフィラメント（材質や断面積が異なる）の電流電圧測定結果をグラフに表します。

【3～7. 熱電子放出実験（電子ビームの発生および仕事関数の評価）】

フィラメントから放出される熱電子の単位時間当たりの数はフィラメントの温度に依存し、フィラメント（陰極）と陽極間に流れる電流はフィラメント（陰極）・陽極間の電圧をある値以上にすれば一定値となります（飽和電流値）。この飽和電流密度の温度依存性は Richardson-Dushman の式として知られており次式で表されます。

$$\frac{I_s}{S} = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right) \rightarrow \text{Richardson-Dushman の式}$$

Richardson-Dushman の式中の各記号は、

I_s : 飽和電流 [A]

S : フィラメントの表面積 [m^2]

A : Richardson 定数 [$A/m^2 \cdot K^2$]

k : ボルツマン定数 ($=1.38066 \times 10^{-23}$) [J/K]

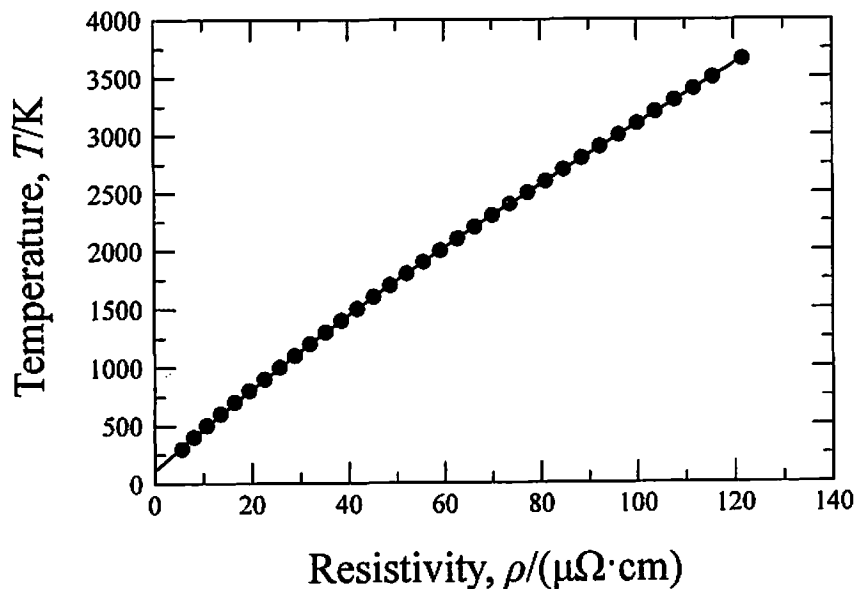
T : フィラメント温度 [K]

ϕ : 仕事関数 [J]

である。

Richardson-Dushman の式において、 I_s : 飽和電流、 S : フィラメントの表面積、 T : フィラメント温度を測定することにより、仕事関数 ϕ と Richardson 定数 A を求めることができます。ここで、飽和電流値 I_s は、フィラメント温度を一定にした状態（フィラメントに流す電流電圧を一定にした状態）で、フィラメントと陽極間に加える電圧を上昇させ、フィラメントと陽極との間に流れる電流を測定することから求められます。

また、 W フィラメントの電気比抵抗とフィラメント温度との関係はすでに調べられているので、フィラメント温度 T は電気比抵抗の測定から求めることができます。



文献: W. E. Forsythe and A. G. Worthing, *Astrophysical Journal*, 61(1925), pp. 146-185. より、 W フィラメントの電気比抵抗($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)とフィラメント温度(K)との関係（上のグラフ参照）は次式で表されることが分かります。

$$T = 110.939590 + 36.930951 \times \rho - 0.101406 \times \rho^2 + 0.000307 \times \rho^3$$

実際の実験においては、1800~2300K 付近でフィラメント温度を3つ以上変化させたときの飽和電流 I_s をそれぞれ求めて、縦軸を $(I_s/(ST^2))$ の対数、横軸を $(1/T)$ としてそれら数値をグラフ化することにより、フィラメントの仕事関数と Richardson 定数を求めることができます。

【実験装置についての補足説明】

・ロータリーポンプ(RP)ならびにディフュージョンポンプ (DP) について
 電子をビームとして飛ばすためには、電子が気体分子などに衝突せずに飛んでいく必要があり、そのため、真空排気装置を利用して気体分子を取り除く作業を行います。作業上注意すべき点は、(1)DP を利用する時は冷却水を必ず流すこと。(2)RP で十分に装置を真空排気したのちに DP を用いて排気すること。(3)DP は ON にしてから約 30 分後から利用できることに注意すること。

真空とは？ →大気に対して圧力の低い空間

真空度とは？→残留気体の示す圧力であって、圧力が低いと真空度は高い。

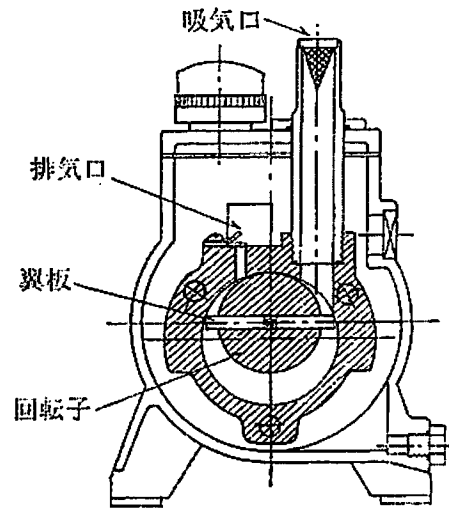
(真空度の単位)

$$1[\text{Torr}] = 1[\text{mmHg}] = 133.3224[\text{Pa} = \text{N/m}^2] = 1.333224[\text{mb}]$$

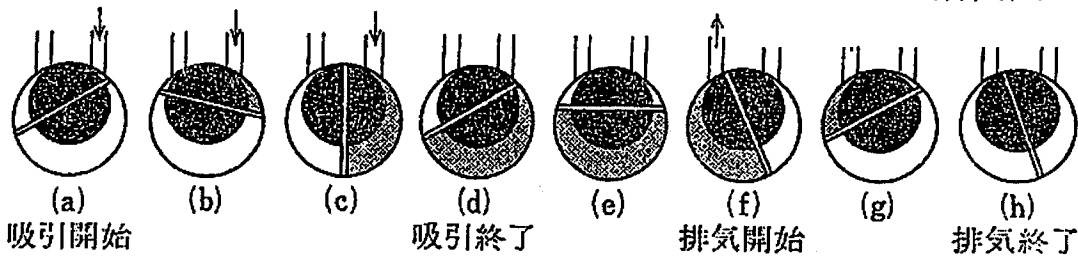
低真空 : $1 \sim 10^{-3} \sim 10^{-4}$ [Torr]
 高真空 : $10^{-4} \sim 10^{-7}$ [Torr]
 超高真空 : 10^{-8} 以下 [Torr]

(真空排気装置)

(i) 油回転ポンプ (ロータリーポンプ:RP)
 到達真空度 : $10^{-3} \sim 10^{-4}$ [Torr]
 (大気圧から使用できるが、水分などを含んだ気体を排気するとオイルが著しく劣化する。)



RP の断面図

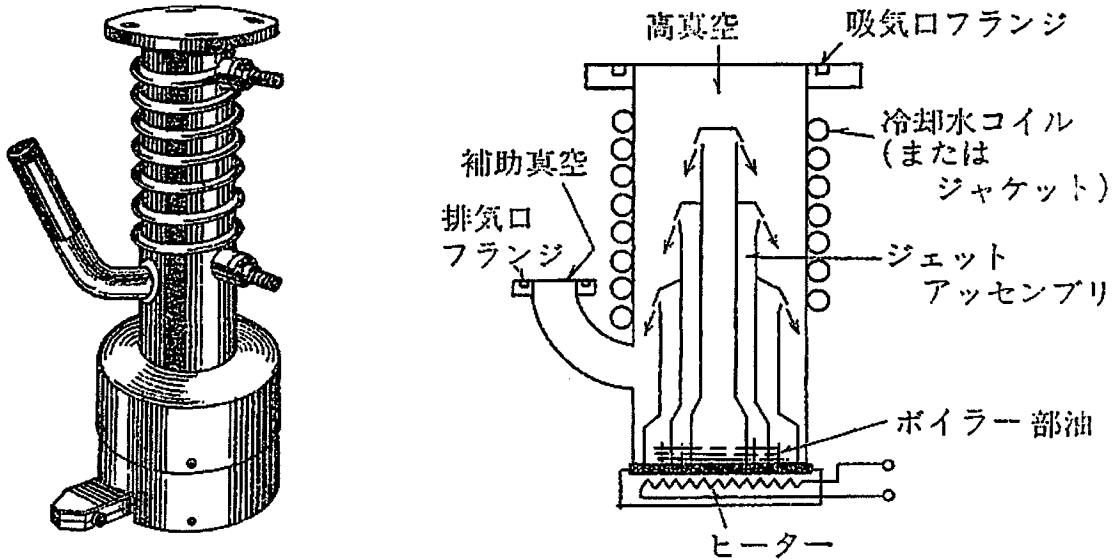


RP の吸排気行程

(ii) 油拡散ポンプ (ディフュージョンポンプ:DP)

到達真空度: $10^{-5} \sim 10^{-7}$ [Torr]

(大気圧からは使用できないため (大気圧から使用するとオイルが酸化してしまう)、RP などにより 10^{-3} Torr 程度まで真空度を高めてから利用される。また、オイルの焼きつき防止のために冷却水を流す必要がある。)



DP の断面図

(その他の装置の注意点)

1. スポット溶接装置はフィラメントを電極に取り付ける際などに利用します。この装置は、以下の(1)~(3)の事項を守らないと感電により大きな怪我を負う危険がありますので、十分に注意して作業すること。(1) フットボタンを踏んで溶接する際に、電極露出部 (材料をはさむ銅の端子部分) を絶対に触らない。(2)ぬれた手で作業しない。(3)使用後は VOLUME を最小 (MIN)に戻しておく。
2. 次のページに示した「装置概略図」にある「②電流導入端子部」を「①本体」から取り外す際には、白ペイントが六角ネジ頭部に施されているネジだけを緩めて下さい。ペイントがないネジを外すと真空漏れ (リーク) の原因となり、再度ネジを締めてもそれは直りません。(その部分の真空はメタルパッキンによって保持されているためです。)

【装置概略図】

