

# 低功率软X光源及其辐射特性

杨 名 恪

**摘要：** 本文介绍了工作于 $1\sim 67\text{\AA}$ 波谱范围的多靶面低功率软X光源的工作原理、具体结构及实验结果。文章推导了电子束斜入射条件下极值靶电压的计算公式，并详尽地讨论了靶电压的选定。

该X光源通过可转动的靶面支承轮，使4个（或8个）不同元素的靶面依次接受高速电子的轰击，从而获得4种（或8种）元素的特征X射线。靶极消耗功率为 $12\text{mW}$ ，无需冷却即能正常工作。文中示出了 $\text{Al-K}\alpha$  ( $8.34\text{\AA}$ )、 $\text{C-K}\alpha$  ( $44.7\text{\AA}$ )及 $\text{B-K}\alpha$  ( $67.6\text{\AA}$ )等特征谱线测试结果。

## 一、前 言

通常，采用电子激发的特征谱线X光源不能直接作为单色光源用。特别是对于较硬的X射线，其连续谱背景相当严重，欲获得单色光，必须加入适当的分光晶体（或光栅）。软X光源的靶材料多为轻元素，原子序数小，靶电压也很低。因此，背景比较小。通过光源各参数的适当选定，降低特征谱线的背景，突出其单色性，直接作为单色X光源用，在许多情况下是简便可行的。尤其是对于低功率X光源更为合适。

## 二、工作原理及结构

多靶面软X光源的原理结构图示于图1。光管包括电子枪、可转动靶及腔体三部分。该

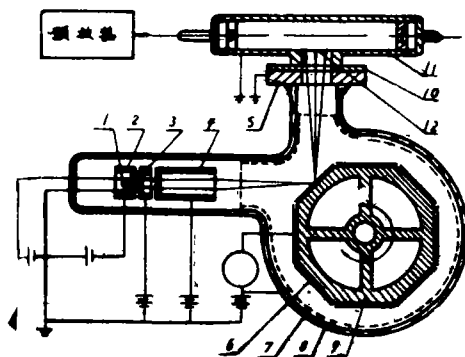


图1 多靶面软X光源原理结构图

电子枪与常规X光管的电子枪不同，它由阴极1、栅极2、阳极3和聚焦极4组成。阴极发出的电子聚焦于阳极圆筒端面（接近聚焦极端）附近，称为第一焦点（或交叉点）。第一焦点经过聚焦极的进一步聚焦在靶面上获得了直径约50~100μm的焦斑。电子束密度通过改变栅压可独立调节，不受靶电压的影响。阴极是用直径0.15mm的纯钨丝绕制的平栅状直热式阴极。其功率为4~6W，加热电流为0~1.25A（可调）。栅极电压在0~-90V内可调。改变栅压，可使靶电流在0~16μA内变化。阳极和聚焦极电压在0~300V内可调。调节阳极和聚焦极电压可获得最佳焦斑。由不同材料制成的靶面6，由可转动的支承轮9运载，依次接受电子轰击，从而获得各种特征X射线。入射电子束与靶面成45°角。导电腔体7由黄铜制成、外部有绝缘防护层8。X射线出口处装有工作平台5，此台接零电位，与腔体正高压形成阻尼场，防止散射电子到达计数管窗口。测量用的正比计数管11，通过真空密封圈10与光源出口对接。12是计数管的有机膜窗口。

该X光源的优点之一是，电子束焦斑小，从而径向散热作用明显<sup>[1]</sup>，靶极允许功率密度大。另一优点是，靶电流与靶极电压无关，仅取决于电子枪的栅压和阴极加热电流。

### 三、X光源的辐射特性

#### 1. 波长范围及波长的标定

由于该X光源是可拆卸型的，通过更换靶面可以获得各种不同元素的谱线，所以，其波长可在1~100Å波长范围内变更，由于探测器的限制，本文只测量到B-K<sub>α</sub>谱线（67.6Å）。测量系统的方块图示于图2。光源产生的X射线由封闭型软X射线正比计数管<sup>[2]</sup>接收后，产生输出脉冲信号。该信号通过低噪声电荷灵敏前置放大器、主放大器、多道脉冲幅度分析器进入记录仪进行记录。由于长波X光子能量低，要求前置放大器的噪声非常低，否则，B-K<sub>α</sub>谱线将被噪声淹没。另外，应当采用无油真空系统以避免油蒸气的污染。

本文采用<sup>56</sup>Fe同位素放射源作为特征谱线波长测定的基准。根据正比计数管的输出脉冲高度与入射X光子的能量成正比特性，可得如下公式：

$$\lambda_x = 2.1 \frac{H_{Fc}}{H} (\text{Å})$$

式中，λ<sub>x</sub>为待测谱线的波长；

H为特征X射线的输出脉冲高度（道数），H<sub>Fc</sub>为<sup>56</sup>Fe同位素源的输出脉冲高度（道数）。利用该公式分别测量了Al-K<sub>α</sub>（8.34Å）、Cu-L<sub>α<sub>1,2</sub></sub>（13.34Å）、C-K<sub>α</sub>（4.47Å）、B-K<sub>α</sub>（67.6Å）等特征谱线，测量结果分别示于图3和图4。

#### 2. 辐射强度的角分布

对于小焦斑X光源，因其焦斑小，可视为点光源，故采用单位时间单位立体角内X光源发出的光子数表征其辐射强度。当用正比计数管进行测量时，辐射强度可示为<sup>[3]</sup>：

$$I = \frac{n}{\eta\theta}$$

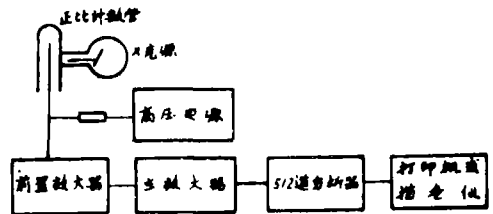


图2 测试系统方块图

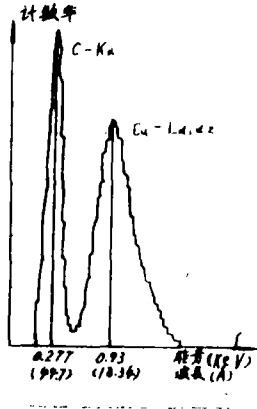


图3 炭和铜的特征X射线  
C-K<sub>α</sub>、Cu-L<sub>α1,2</sub>

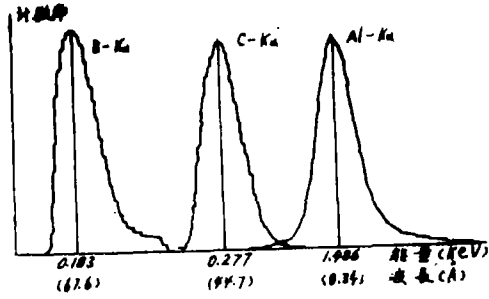


图4 B-K<sub>α</sub>、C-K<sub>α</sub>和Al-K<sub>α</sub>谱线

式中， $I$ 为X光管的辐射强度（光子数/秒、球面度）；

$n$  为计数管实测计数率（扣除本底计数）；

$\Omega$  为计数管窗口所对应的立体角（本文为0.3球面度）；

$\eta$  为测量系统的总探测效率，由正比计数管的探测效率和测试系统的分辨时间确定。

计算方法见文献<sup>[9]</sup>。

本文采用上述方法测量了X光源辐射强度的角分布。测量是在电子枪对称轴与X光源出口的中心轴所构成的平面内进行的，纵座标为X光源出口的中心轴。测量结果示于图5。

### 3. 辐射强度随靶流的变化

实验结果表明：特征谱线的辐射强度与靶电流成正比关系，靶电压决定其直线的斜率。测试结果如图6所示。该测试是在靶电压分别为1000V和700V情况下测得的C-K<sub>α</sub>谱线。

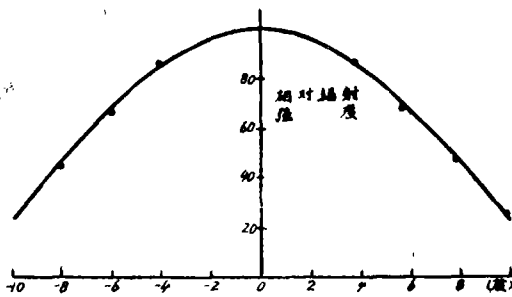


图5 辐射强度的角分布

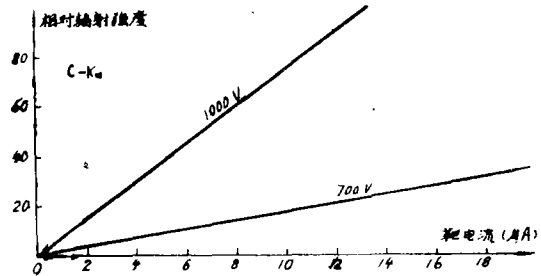


图6 辐射强度随靶电流的变化

### 4. 辐射强度随靶电压的变化特性

靶电流为4 $\mu$ A时辐射强度随靶电压的变化特性测试结果示于图7。实验结果表明：辐射强度随靶压的增加而增加，当靶压增加到一定值时，辐射强度出现极值（本文称该靶压为极值靶压）。极值靶压因特征谱线而异，并与靶的结构有关。极值靶压的出现限制了辐射强度的

提高, 对于X光管的设计和应用是极为重要的问题。本文将推导电子束斜入射条件下的极值靶压公式。

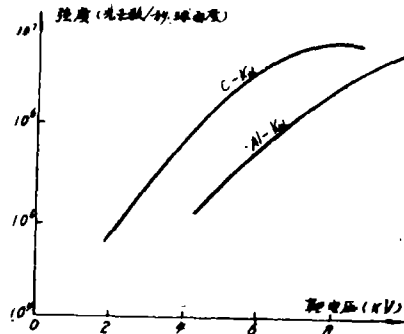


图7 C-K $\alpha$  和Al-K $\alpha$  谱线随靶电压的变化特性

#### 四、电子束斜入射的极值靶压

特征X射线主要是由特定原子壳层被电离而产生的。其强度 $I$ 可用电离总数 $n$ 和荧光产额 $\omega$ 之积表示:

$$I = n\omega \quad (1)$$

初能量为 $E_0$ 的入射电子, 在靶内沿其路径所产生的电离总数 $n$ 可用下式表示<sup>[4]</sup>:

$$n = 9.54 \times 10^{10} \frac{R}{AC} (u_0 \ln u_0 - u_0 + 1) \quad (2)$$

式中,  $u_0 = \frac{E_0}{E_c}$ ,  $E_c$ 为临界激发能量;

$R$  为入射电子的背散系数;

$A$  为原子量(靶元素的);

$c$  为常数, 该常数随加速电压的改变有微小的变化, 其值列入表1<sup>[4]</sup>。

表 1

| $V_0$ (V)                      | 5000                 | 7500                  | 10000                | 15000                | 20000                |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\frac{C}{(eV^2 cm^2 g^{-1})}$ | $1.8 \times 10^{11}$ | $2.05 \times 10^{11}$ | $2.3 \times 10^{11}$ | $2.6 \times 10^{11}$ | $2.9 \times 10^{11}$ |

将(2)式代入(1)式对于K系特征X射线有:

$$I_k = 9.54 \times 10^{10} \frac{\omega_k R}{AC} (u_0 \ln u_0 - u_0 + 1) \quad (3)$$

Green和Cosslett<sup>[4]</sup>用 $0.365(u_0 - 1)^{1.67}$ 代替(3)式中的 $(u_0 \ln u_0 - u_0 + 1)$ 项:

$$I_k = 3.48 \times 10^{10} \frac{\omega_k R}{AC} (u_0 - 1)^{1.67} \quad (4)$$

对于 $1.5 < u_0 < 16$ 时, 这种代替引入的误差不超过10%, 对于硬X射线是完全适用的。但是我们所研究的是软X光管, 在多数情况下,  $12 \leq u_0 \leq 56$ , 因此Green—Cosslett的替代式不

再适用。为此，我们重新验算发现：用 $(u_0 - 1)^B$ 代替 $(u_0 \ln u_0 - u_0 + 1)$ 更为准确，其引入的误差 $\leq 5.6\%$ ， $B$ 是随 $u_0$ 略有变化的常数，其值列入表2。

表 2

| $u_0$ | 1.5~11 | 12~20 | 21~34 | 35~56 |
|-------|--------|-------|-------|-------|
| $B$   | 1.670  | 1.620 | 1.58  | 1.547 |

这样，便得到强度公式如下形式：

$$I_x = 3.48 \times 10^{10} \frac{\omega_x R}{AC} (u_0 - 1)^B \quad (5)$$

在软X光谱范围内，取 $12 \leq u_0 \leq 56$ 范围内各 $B$ 值之平均值 $\bar{B} = 1.58$ 代替 $B$ 值，其引入的误差约为1%，这样便得到了适用于软X光管的强度公式：

$$I_x = 3.48 \times 10^{10} \frac{\omega_x R}{AC} (u_0 - 1)^{1.58} \quad (6)$$

以上推导的是单个入射线电子在靶元素内使原子电离所产生的特征X射线强度公式。但是产生的X射线不等于出射的。尤其对于软X射线，靶材料对其吸收非常严重。考虑到靶吸收而引起的X射线的衰减，真正出射的特征X射线的强度 $I_{x_0}$ 可用Lenard定律表征如下：

$$I_{x_0} = I_x \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho x\right) \quad (7)$$

式中， $\frac{\mu}{\rho}$ 为靶元素的质量吸收系数， $x$ 为电子穿透深度，并假定电子能量 $\geq E_c$ 时不被散射的穿透， $\rho$ 为靶元素密度。

由于该X光管的电子是非垂直入射，X射线亦非垂直出射，因此上式需进行修正。考虑了电子入射角 $\beta$ 及X射线出射角 $\varphi$ 的影响之后有<sup>[5]</sup>：

$$I_{x_0} = I_x \exp\left[-\frac{\mu}{\rho} \rho x \cdot \csc\varphi (1 - 0.5 \cos^2 \beta)\right] \quad (8)$$

将(6)式代入(8)式则得：

$$I_{x_0} = 3.48 \times 10^{10} \frac{\omega_x R}{AC} (u_0 - 1)^{1.58} \exp\left[-\frac{\mu}{\rho} \rho x \cdot \csc\varphi (1 - 0.5 \cos^2 \beta)\right] \quad (9)$$

式中， $\varphi$  为特征X射线与靶表面的夹角；

$\beta$  为入射电子与靶表面的夹角。

根据汤姆逊——惠丁顿(Thomson—Whiddington)定律，电子在靶内的穿透深度由下式表示<sup>[6]</sup>： $E_0^2 - E^2 = C\rho x$  (10)

式中， $E_0$ 为电子初能量； $E$ 为电子穿透 $x$ 深度的能量； $C$ 为常数（与(2)式中同）。将(10)式代入(9)式并将 $K$ 系激发能量 $E_k$ 代入：

$$I_{x_0} = 3.48 \times 10^{10} \frac{\omega_x R}{AC} (u_0 - 1)^{1.58} \cdot \exp\left[-\frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{E_0^2}{C} (u_0^2 - 1) \cdot \csc\varphi \cdot (1 - 0.5 \cos^2 \beta)\right] \quad (11)$$

取,  $D = 3.48 \times 10^{10} \frac{\omega_e R}{AC}$       $M = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{E_e^2}{C} \cdot \csc\varphi \cdot (1 - 0.5\cos^2\beta)$

则:  $I_e = D(u_0 - 1)^{1.58} \cdot \exp[-M(u_0^2 - 1)]$  (12)

对(12)式微分并令  $\frac{dI_e}{du_0} = 0$ , 则有:

$(u_0 - 1)^{0.58} [1.58 - 2Mu_0(u_0 - 1)] = 0$  (13)

$1.58 - 2Mu_0(u_0 - 1) = 0$  (14)

解方程(14)得:

$u_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{3.16}{M}} \right)$  (15)

将M代入(15)式

$u_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{3.16C}{\frac{\mu}{\rho} \cdot E_e^2 \csc\varphi \cdot (1 - 0.5\cos^2\beta)}} \right]$  (16)

因为  $\frac{3.16C}{\frac{\mu}{\rho} \cdot E_e^2 \csc\varphi \cdot (1 - 0.5\cos^2\beta)} \gg 1$ , 所以:

$u_0 \approx \frac{1}{2E_e} (3.16C)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot [\csc\varphi \cdot (1 - 0.5\cos^2\beta)]^{-\frac{1}{2}}$  (17)

将  $u_0 = \frac{E_0}{E_e}$  代入(17)式:

$E_0 = 0.8888 \cdot C^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot [\csc\varphi \cdot (1 - 0.5\cos^2\beta)]^{-\frac{1}{2}}$

以伏表示极值靶压  $V_{0,m}$  时其数值与  $E_0$  相等, 故得:  $V_{0,m} = 0.8888 \cdot C^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot J$

(18)

式中  $J = [\csc\varphi \cdot (1 - 0.5\cos^2\beta)]^{-\frac{1}{2}}$  因为J是与X光管结构有关的系数, 所以本文命名为结构系数。利用(18)式算得的各特征X射线的极值靶压列入表3。

表 3

| 特征谱线(A)               | Al-K <sub>α</sub><br>(8.34) | Cu-L <sub>α1,2</sub><br>(13.34) | C-K <sub>α</sub><br>(44.7) | B-K <sub>α</sub><br>(67.6) | Be-K <sub>α</sub><br>(114) |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 极值靶压                  |                             |                                 |                            |                            |                            |
| V <sub>0,m</sub> (kV) | 23.15                       | 10.39                           | 8.03                       | 6.75                       | 5.06                       |

在上述推导过程中, 虽然是对K系特征X射线而言的, 但是由于在公式中标志特征谱线的  $E_e$  被消掉, 因而(18)式对于各系谱线均适用。其计算结果与实验测量结果符合得很好。

## 五、靶电压的选择

1. 由(4)式可知:  $I_k \propto (u_0 - 1)^{1.67}$   
 $u_0 = \frac{E_0}{E_k} = \frac{V_0}{V_k}$  所以:  $I_k \propto (V_0 - V_k)^{1.67}$  (19)

式中  $V_k$  为激发电位;  $V_0$  为靶电位。

由(19)式可知: 获得某一特征  $X$  射线的基本条件是靶电位  $V_0 > V_k$ , 亦即靶的工作电压必须大于特征谱线的激发电位。此为靶电压的下限。

2. 由(18)式可知: 特征  $X$  射线存在着极值靶压, 这就为靶压的确定给出了上限。

3. 在特征  $X$  射线产生的同时, 也产生连续谱, 形成背景。其特点是: 从一个突变的短波限  $\lambda_{m,n}$  开始上升到一个最大强度波长, 然后其强度向长波处递降, 如图 8 所示。(2) 连续谱最大强度波长  $\lambda_{i,max}$  发生在  $1.5\lambda_{m,n}$  处。

(3) 连续谱的分布可粗略地用 Kramer 公式<sup>[1]</sup>表示:

$$I_\lambda \propto iZ \left( \frac{1}{\lambda_{m,n}} - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{1}{\lambda^2} \quad (20)$$

式中,  $I_\lambda$  为波长  $\lambda$  的强度;  $i$  为靶电流;  $Z$  为靶原子序数。

$$\lambda_{m,n} = \frac{12.396}{V} \text{ (Å)}, \quad V \text{ 为靶电压 (kV)}。$$

连续谱的存在将降低特征  $X$  射线的峰背比。因此, 选定靶压时, 应尽可能使连续谱峰位远离特征谱线。提高靶压可使  $\lambda_{m,n}$  向短波移动, 从而连续谱峰位也向短波移动。特征谱线只随靶压的提高而增加其强度, 其位置固定不变。这样, 通过提高靶压可以避免连续谱峰位, 提高特征谱线的峰背比。

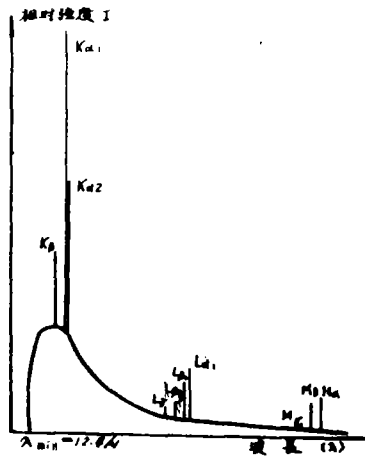


图 8 连续谱及特征谱线

4. 通常,  $K$  系谱线的强度高于  $L$ 、 $M$  等其他系谱线, 如图 8 所示。然而过电位 ( $V_0 - V_k$ ) 能强烈地改变各特征谱线的发射几率。因此, 靶压的选择应使所需要的谱线发射几率最高。但是, 对于原子序数小于 10 的靶元素如铍、硼、碳等, 它们的原子核外只有  $K$ 、 $L$  二个壳层, 因此只能产生  $K$  系一种特征谱线不须考虑发射几率的问题。

综上所述, 靶电压的选择应满足以下三条件: (1) 大于激发电位; (2) 预期的特征谱线发射几率最高; (3) 避开连续谱峰位。

## 六、结 束 语

该光源的设计充分考虑到软  $X$  波段和低功率二个特点, 通过靶流、靶压和特征谱线发射几率的适当选择和控制, 可以达到降低背景突出特征谱线的单色特征的目的。靶压和靶流可分别控制的电子枪结构, 就是适应这一目的而采用的。由于该种方法是基于充分利用特征谱

线固有的单色特性上，因此，具有结构简单效率高的特点。

本文实验结果表明：软 $X$ 光源的辐射强度随靶压的提高出现极大值，然后随靶压的继续提高而下降。这一特性向我们提供了二点有益的结论：(1)对于软 $X$ 光源，通过靶电压提高其辐射强度是有一定限度的。(2) $X$ 光源工作于极值靶压附近将获得高的稳定性。

本文推导了电子非垂直入射以及 $X$ 射线非垂直出射条件下的极值靶压公式。这是一通用公式，包括了电子垂直入射这一特殊情况。这一公式不仅表明决定极值靶压的主要因素是靶元素的质量吸收系数，同时也表明了 $X$ 光管结构因素的影响。这就比较全面地弄清了软 $X$ 光管出现极值辐射强度的原因。为 $X$ 光管的设计和应用提供了有用依据。

王春霞同志参加了实验工作并为该光源制备了钨阴极。

参 考 文 献

- [ 1 ] Cosslett, V. E., Proc. Phys. Soc., 1952, **B65**, 782
- [ 2 ] 杨名格, 崔松鹤:《核仪器与方法》, 1982, 2, 76
- [ 3 ] 杨名格: 光学机械, 1984, 1, 24
- [ 4 ] M. Green and Cosslett, V. E., Proc. Phys. Soc., 1961, **78**, 1206
- [ 5 ] Bishop, H. E., Proc. Phys. Soc., 1965, **85**, 855.
- [ 6 ] R. Whiddington, Proc. Roy. Soc., 1912, **A86**, 360
- [ 7 ] Eugene P. Bertin,《Introduction to X-Ray Spectrometric Analysis》, (New York, 1978)

## Low-power Ultra-soft X-ray Source and Radiation Characteristics

Yang Mingke

### Abstract

In this paper the structure and the operating principle of a low-power ultra-soft X-ray source are described and the measurement results of the source are shown. The choice of the operating voltage is discussed.

Eight targets made of different material are mounted on a carrying wheel which may be turned and are bombarded in turn by the electrons with high-velocity, and so the characteristic line spectra of eight kinds of elements are obtained. By using this X-ray source we have obtained the  $K_{\alpha}$  characteristic line spectra of aluminum ( $8.34 \text{ \AA}$ ), carbon ( $44.7 \text{ \AA}$ ) and boron ( $67.6 \text{ \AA}$ ).

The performances of this X-ray source are as follows:

(1) The operating wavelength region:  $10\text{--}67 \text{ \AA}$ . (2) The target power:  $12 \text{ mW}$ . (3) The target voltage:  $500\text{--}4000 \text{ V}$ . (4) The radiation intensity of this source is variable in the range of  $10\text{--}10^6$  photons/second/steradian.

The electron(primary)excitation mode is adopted in this source. It doesn't require any cooling because of the low power( $12\text{mW}$ ).