

# 同步辐射低能 X 射线的照射量测量与剂量计算

靳 涛

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

戴慧莹

(空军电讯工程学院 西安 710077)

**摘要** 用自制自由空气电离室,在能量为  $2\sim 12\text{keV}$  同步辐射光束线现场测量了单能 X 射线的电离量,依据 X 射线在空气中的传输和衰减特性及能量转移系数,计算了电离室入射口的照射剂量值。进而求出在空气中的相应比释动能和光子通量。讨论了软 X 射线照射量随能量的分布特性及混合能量 X 射线(白光)的照射量测量方法。

**关键词** 低能 X 射线,剂量测量

低能 X 射线在高技术产业和科学研究等方面有广泛的应用,由于  $10\text{keV}$  能量以下的 X 射线在物质中存在着很大的吸收,而且这种辐射吸收又对波长有很大的依赖性,使得准确测量低能 X 射线的剂量学参数变得比较困难<sup>[1]</sup>。70 年代以后,随着同步辐射新技术的兴起,软 X 射线对超大规模集成电路光刻、广延 X 射线吸收精细结构分析、晶体结构及电子能谱分析、软 X 射线显微术和辐射效应及辐射损伤等方面的研究和应用,都不同程度涉及到剂量学参数问题,因此,低能 X 射线剂量学数据的测量和计算越来越引起人们的重视。

Hoshi 等<sup>[2]</sup>用外推电离室测量了冷发射软 X 线管  $0.3\sim 5\text{keV}$  能量范围的剂量。Bohm 和 Scheider<sup>[3]</sup>研究了软 X 射线在二次电子平衡条件下的空腔电离性质,Meger 等<sup>[4]</sup>用量热计测量了  $0.5\sim 6\text{keV}$  同步辐射 X 射线的能量通量,Kobayashi 等<sup>[5]</sup>用自由空气电离室作为现场仪器测量了  $3.1\sim 15.4\text{keV}$  单能 X 射线的照射量,Suzuki 等<sup>[6]</sup>用正比计数器测量了  $1.5\sim 4.5\text{keV}$  同步辐射 X 光的光子通量。但在如何使现场剂量仪器更精确实时地测量单能低能 X 射线剂量数据,还有许多工作要做。

根据从自由空气电离室测量到的单能 X 射线的电离量,依据同步辐射 X 射线在空气中的传输、衰减特性及能量转移数据,可以计算出电离室入射窗口处准确的照射量值,进而求出相应的光子通量和在物质中的吸收剂量。本实验测定了能量为  $2\sim 12\text{keV}$  单能 X 射线的照射量。其测量结果和外推电离室的测量值及理论计算值进行了比较,具有较好的一致性。本文还讨论了将此方法运用到同步辐射混合能量 X 射线剂量测量中的可能性。

## 1 实验和计算

实验工作在日本国家高能物理研究所同步辐射实验室完成。 $2\sim 4\text{keV}$  和  $4\sim 12\text{keV}$  单能 X 射线分别出自 BL-27A 和 BL-27B 两条光束线<sup>[5]</sup>。光束线 BL-27B 出口处紧插着一个监测束流强度

国家自然科学基金资助项目

收稿日期:初稿 1997-10-10,修回 1998-04-03

强度用的透射电离室,测量是在常温条件下进行的,剂量仪用自制自由空气电离室<sup>[7]</sup>。铝制外壳上下为收集极板,距离为 40.20 mm,收集电压为 4kV,收集极面积为 30×68.04mm<sup>2</sup>,有效收集长度为 31mm,可使 40keV 以下的电子既不能逃逸出该电离室的收集范围,也不会直接撞击到收集极板。故保证了软 X 射线产生的次级电子能量将全部用于电离室内引起空气电离。由于光阑的尺寸为 2.25×4.03mm<sup>2</sup>,有效的测量体积实际上为 0.281cm<sup>3</sup>,其中心点距电离室入射窗口为 60.0mm。自由空气电离室内部和外界连通,其内部空气的温度和压力由外部环境(隔离箱或实验室)决定,其测量到的空气电离电荷需做温度和压力修正。该电离室经美国国家标准技术研究所(NIST)物理实验室国家剂量基准仪器校正刻度,在 10kVX 射线条件下,刻度因子不确定度为 1%<sup>[8]</sup>。

由于软 X 光子在空气中的平均自由程比相同能量电子的射程大若干个数量级,所以在测量体积的空气中实际存在着带电粒子平衡,因此根据照射量的定义,能量为 E(keV)的单能软 X 射线在测量体积中的平均照射量为 $\bar{X}$ (C/kg)为:

$$\bar{X} = \frac{Q}{V\rho} \tag{1}$$

公式中 Q 为测量到的电离电荷(库仑),V 为有效测量体积(m<sup>3</sup>)。ρ 为空气密度(1.205kg/m<sup>3</sup>)。为了确定测量体积中心点的照射量值 X<sub>C</sub>,需计算出收集电极有效收集长度 L(cm)内 X 射线平均强度 I<sub>L</sub> 和中心点强度 I<sub>C</sub> 的比例因子 γ。根据光子的减弱规律

$$\gamma = \frac{I_C}{I_L} = \mu L \frac{e^{-\mu L/2}}{1 - e^{-\mu L}} \tag{2}$$

μ 为光子线衰减系数(cm<sup>-1</sup>),对低能 X 射线,线性衰减系数和能量吸收系数基本相同,而且它的次级电子通过韧致辐射损失的能量极少,因而,其线能吸收系数近似于线能转移系数。所以 γ 因子也可以视为低能 X 射线在有效测量体积中平均照射量 $\bar{X}$ 和其中中心点处照射量 X<sub>C</sub> 之间的比例因子,因此:

$$X_C = \gamma \bar{X} \tag{3}$$

同理,低能 X 射线在自由空气电离室入射窗口处的照射量:

$$X_w = \frac{X_c}{e^{-\mu(d+L/2)}} \tag{4}$$

式中 d 为自由空气电离室窗口到有效收集长度起始点的距离(cm)。对于同步辐射软 X 光束线,目前测量最多的还是照射量,所以只要知道光子辐射场某点处的照射量,即可由公式(5)求得同一点上空气碰撞比释动能[K<sub>C</sub>]<sub>a</sub>(Gy)

$$[K_C]_a = X \frac{W_a}{e} \tag{5}$$

在公式中, W<sub>a</sub>/e 为电子在干燥空气中产生每单位电荷所需平均能量,一般取 33.97(J/C)。相应的光子注量 Ψ(1/cm<sup>2</sup>)为:

$$\Psi = 6.24 \times 10^{16} \frac{X \frac{W_a}{e}}{\mu_{tr}/\rho E} \tag{6}$$

式中 μ<sub>tr</sub>/ρ 是质能转移系数(cm<sup>2</sup>/g)。

图 1 是 4~12keV 单能 X 射线在收集长度中心点处照射量(X<sub>C</sub>)的分布。图 2 为 2~3keV 能量的 X<sub>C</sub> 分布。在能量为 3keV 时,从照射量测量值推算出的射线衰减数据和直接从理论上计算出的射线衰减数据的比较曲线显示在图 3 中。表 1 列出了外推电离室和自由空气电离室在 12.4,4 和

2keV 三个能量点照射量测量值。在 12.4 和 4keV 时用的外推电离室型号为 PTW-360。在 2keV 时用 EIC-1 型超薄窗外推电离室。这两个外推电离室经日本国家软 X 射线标准实验室校正,测量误差为±3%。

Tab.1 Comparing of X-ray exposure values  
measured by the free air chamber and the  
extrapolation chamber

| Energy/keV | X-ray exposure rate<br>/10 <sup>-3</sup> C.kg <sup>-1</sup> mA <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> |                          |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
|            | Free air<br>chamber                                                                            | Extrapolation<br>chamber |
| 12.4       | 2.962                                                                                          | 2.645                    |
| 4          | 4.450                                                                                          | 4.448                    |
| 2          | 6.592                                                                                          | 6.447                    |

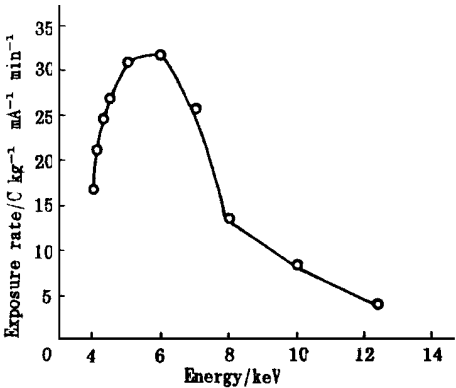


Fig.1 Exposure rate distribution of 4~12keV of  
BL-27B

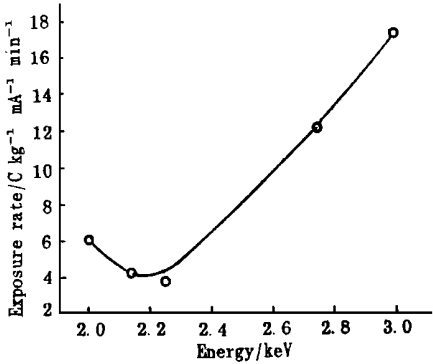


Fig.2 Exposure rate distribution of 2.0~3.0 keV of  
BL-27A

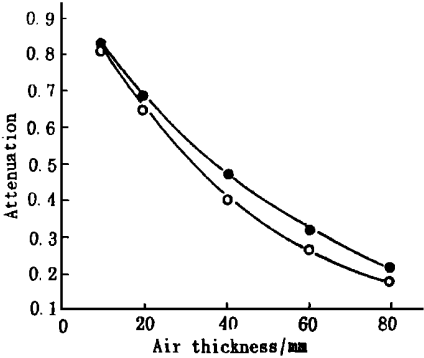


Fig.3 Comparison between calculation and  
experimentally obtained data at 3.0 keV  
(○) Calculated (●) Experiment

由于 X 线光子在介质中衰减明显、韧致辐射极小和次级带电粒子平衡,如果放置在光子场中的辐照样品很小,而且它的存在也不改变光子场原来的分布。这样,放置在光子场中极薄的小尺寸辐照样品的吸收剂量  $D_m$  和同一位置上空气的比释动能有如下关系:

$$D_m = [K_c]_a \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_a}$$

(7)

式中 $(\mu_{en}/\rho)_m$ 和 $(\mu_{en}/\rho)_a$ 分别是样品和空气的质量能量吸收系数。表 2 列出了在 BL-27A 光束线上厚度仅为 0.3mm 磷化铟芯片的辐照吸收剂量率。

Tab.2 The kerma rate of air, exposure rate and absorbed dose rate of InP around the energy of the K-shell absorption edge of phosphorus at the window of the free air chamber

| Energy/keV | Kerma rate/Gy s <sup>-1</sup> | Exposure rate/10 <sup>-3</sup> C kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> | Absorbed dose rate of InP/Gy s <sup>-1</sup> |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2.140      | 0.1894                        | 5.576                                                             | 0.4743                                       |
| 2.153      | 0.1712                        | 5.040                                                             | 0.6376                                       |
| 2.160      | 0.1493                        | 4.395                                                             | 0.5552                                       |
| 2.250      | 0.1425                        | 4.195                                                             | 0.4623                                       |

2 结果与讨论

在 BL-27B 光束线上,当电离室入射窗口与透射电离室距离为 21mm 时,4~10 keV 单能 X 射线照射量在 6keV 能量时最高,随着能量的增加,照射量迅速下降,而在 6keV 到 4keV 这一区域,照射量随着能量的减少下降的稍微缓慢(图 1)。在 BL-27A 光束线上,当电离室入射窗口与光束线出束口距离为 10mm 时,2~3keV 区域照射量随能量的增加基本上是直线上升(图 2),和单能 X 射线质能吸收系数随能量的增长而下降的特性相比较,照射量随能量变化的分布既无一定规律,又和质能吸收系数的分布明显不一致。在能量为 6keV 时,质能吸收系数居中,但是其照射量最高,4keV 虽然质能吸收系数高于 6keV,但它的照射量低于 6keV 处。10keV 能量的 X 射线虽然衰减小,其空气对它的吸收也少,它的照射量低于 4~6keV 是正常的。在 2~3keV 能量区域,除 2.1keV 附近外,照量随能量的分布和质能吸收系数随能量的分布恰好相反,造成上述照射量随能量分布异常现象的原因主要是光束线的光子通量是随能量而变化的。光子通量—能量的分布曲线和该同步辐射加速器本身的特征波长和光束线结构有关,本实验用同步辐射加速器的贮存环电子能量为 2.5GeV,其特征能量在 6keV 附近,由于在 6keV 能量时,光束线的光子通量远高于在 4keV 时的,所以,在 6keV 处照射量率最大。根据 BL-27A 光束线插入件、单色器及窗口材料的有关参数,理论计算表明,在 BL-27A 光束线 2~3keV 能量区光子通量随能量的增加而增大,对于 2.25~3.0keV 能量段,测量到的照射量分布可以用这一点来解释,但对 2.0~2.25keV 能量段的照射量分布,我们还无法解释其原因。

图 3 显示出 3keV 单能 X 射线在空气中的实验和理论衰减曲线,随着距离的增大,两者的误差越来越大,其最大偏差为 7%。产生这种差别的原因既和实验操作时测量位置的偏离(±3%)和微电流测量仪的误差(±4%)有关,也与理论计算和实验测量条件不同有关。

从表 1 可知,用自由空气电离室和外推电离室测量的单能 X 射线照射量的结果差别不大。但外推室的测值普遍低一点。估计这与外推室窗口高压箔电极对射线的衰减有关。虽然将窗厚外推到零,但总归是有误差的。

对于混合能量的 X 射线,要测量其照射量,首先应测量其在测量点的能谱分布。然后根据测量到的能谱强度再加权,求出其混合能量 X 射线的质能转移系数。

$$\mu_{tr}/\rho = \sum_i (\mu_{tr}/\rho)_i f_i$$

(8)

式中 $(\mu_{tr}/\rho)_i$ 为某一单能 X 射线在空气中的质能转移系数。 $f_i$ 为该单能 X 射线强度在总的 X 射线强度中的权重因子。对于混合能量且发散的 X 射线,其照射量的计算较复杂。这要涉及到能量注量的测量,而且该能量注量是测量位置和发散角度的函数。将在另一论文中讨论。

## 参 考 文 献

- 1 阿蒂克斯 F H 辐射剂量学(补编第一卷), 原子能出版社, 北京: 1985, 278~279
- 2 Hoshi H, Goodhead D T, Brenner D J *et al.* Phys Med Biol, 1985, 30:1029
- 3 Bohm J, Schneider U. Radiation Protection Dosimetry, 1986, 14:193
- 4 Meger C M, Pearson D W, Deluac P M *et al.* Radiation Protection Dosimetry, 1987, 21:219
- 5 Kobayashi K, Hieda K, Maezawa H *et al.* J Radiat Res, 1987, 28:243
- 6 Suzuki I H, Saito N. Japanese Journal of Applied Physics, 1986, 25:130
- 7 靳 涛. 中国专利, Z L 96202310, 1997, 8
- 8 Lamperti P J, Loftus T P, Loevinger R *et al.* NBS Special Publication 1987, 250~16

## MEASURING EXPOSURE AND CALCULATING DOSE OF THE LOW ENERGY X-RAY

Jin Tao

( *Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011* )

Dai Huiyin

( *Communication Institute of Air Force, Xi'an 710077* )

**ABSTRACT** To measure exposure of low energy X-rays with a free air chamber, the range of X-ray energy is from 2 to 12keV. Based on the X-ray transmission, attenuation and energy transfer in the air, the X-ray exposure at the entrance window of the ionization chamber were calculated. Then both the karma in air and the X-ray flux were derived. The change of the X-ray exposure with increasing the X-ray energy and the measurement of multichromatic (white) X-ray exposures were also discussed, respectively.

**KEYWORDS** Low energy X-ray, Measurement of exposure