

转移电子光阴极调制传递函数的理论计算*

The Theoretical Calculation for Modulation Transfer Function of Transferred-Electron Photocathode

李相民

侯 洵

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)** (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)***

【提要】 本文利用蒙特卡罗模拟的方法计算了 Ag/p-InP/p-InGaAsP/InP 转移电子光阴极的调制传递函数, 计算结果表明转移电子光阴极具有较高的空间分辨率, 并与阴极材料的吸收系数、有源层厚度及场助偏压有关, 为获得较高的调制传递函数, 应当尽量降低吸收系数和缩短有源层厚度, 提高场助电压。

关键词: 转移电子, 光阴极, 调制传递函数, 蒙特卡罗模拟

Abstract: The modulation transfer function of Ag/p-InP/p-InGaAsP/InP transferred-electron photocathode has been calculated using Monte Carlo simulation. The results show that low absorption coefficient, short active layer thickness and high field-assisted bias are needed if high MTF is wanted.

Key words: Transferred-electron, Photocathode, MTF, Monte Carlo simulation

一、引 言

传统的多碱阴极和负电子亲合势 (NEA) 光阴极的长波响应阈值被限制在 $1.1\mu\text{m}^{[1]}$, 因而限制了它的应用范围。而转移电子 (Transferred-Electron, 简称 TE) 光阴极的近红外响应波长可扩展到 $2\mu\text{m}^{[2]}$, 恰好覆盖夜天光辐射范围, 因而在夜视领域里具有广泛的应用前景, 并受到人们的普遍关注。1981 年 J. Escher 等人在实验室首次实现转移电子光阴极成像, 并用分辨力测试板测得其分辨力为 20—22 线对/毫米^[3]。

然而, 用分辨力表征成像质量时, 并不能全面客观地反映出影响成像质量各种因素所起的作用, 它的确定与测试条件及观察者的主观因素都有关。正是由于存在这些问题, 新的光学传递函数 (Optical Transfer Function, 简称 OTF) 的评定方法应用于

光学成像系统逐渐发展和完善起来, OTF 理论现已成为评价像质最有效的工具。

尽管转移电子光阴极取得了很大发展, 并实现成像, 但至今没有发现对其成像能力进行详细理论计算方面的文献, 因此, 利用 OTF 理论对典型的 Ag/p-InP/p-InGaAsP/InP 透射式转移电子光阴极进行理论分析是十分必要的。

二、OTF 理论的应用^[4]

假定成像系统为线性系统, 即输入和输出满足线性叠加原理, 同时又具有平移不变性 (在光学系统内又称为渐晕不变), 令 $g_{in}(\mathbf{r})$ 为系统的输入函数, $g_{out}(\mathbf{r})$ 为系统的输出函数, 则 $g_{in}(\mathbf{r})$ 和 $g_{out}(\mathbf{r})$ 之间满足如下关系式

$$\begin{aligned} g_{out}(\mathbf{r}) &= \int d\mathbf{r}' g_{in}(\mathbf{r}') h(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \\ &= g_{in}(\mathbf{r}) * h(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (1)$$

* 1996 年 1 月收到, 1995 年 10 月修改定稿

** Li Xiangmin (Dept. of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

... Hou Xun (Xi'an Institute of Optical Precision Mechanism, Academia Sinica, Xi'an 710068)

可见对于线性平移不变系统,输出与输入间的关系就是输入 $g_{in}(r)$ 与 $h(r)$ 的卷积,也就是说, $h(r)$ 完全表征了成像系统的行为,称之为系统的点扩散函数。

假定一线物体沿 Y 轴, $h(r)$ 是系统的点扩散函数,则有

$$L(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) dy \quad (2)$$

称为系统的线扩散函数。对于具有圆对称的成像系统, $h(r)$ 应具有如下形式,

$$h(r) = h(r) = h(x, y) \quad (3)$$

其中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 这时线扩散函数与方向无关,方程(2)可写成

$$L(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(r) dy \quad (4)$$

上式可简化为

$$L(x) = 2 \int_0^{\infty} h(r) (r^2 - x^2)^{-1/2} r dr \quad (5)$$

反之,从线扩散函数可以求出点扩散函数,定义函数

$$q(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} L(r) dy \quad (6)$$

这里 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 可以证明,其点扩散函数可表示为

$$h(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{dq(r)}{dr} \quad (7)$$

根据傅里叶变换的基本性质,对方程(1)作傅里叶变换,则有

$$G_{out}(f) = H(f) \cdot G_{in}(f) \quad (8)$$

其中大写字母函数分别为小写字母函数的傅里叶变换,通常称 $H(f)$ 为系统的频率传递函数,它等于点扩散函数 $h(r)$ 的傅里叶变换,即

$$H(f) = \int dr h(r) \exp(-j2\pi f \cdot r) \quad (9)$$

$H(f)$ 完全表征了系统的成像行为,称 $|H(f)|$ 为调制传递函数,用 MTF 表示。

三、蒙特卡罗方法^[5]

由于制作成像器件的转移电子光阴极应当是透射式的,其中最重要的一种结构就是 Ag/p-InP/p-InGaAsP/InP(衬底)双异质结光阴极,如图 1 所示,因此,本文计算该结构转移电子阴极的 MTF。

电子在向阴极发射表面运动的过程中,由于在垂直于 Z 轴的方向上产生的横向位移分布是各向同性的,这说明,阴极系统的点扩散函数是圆对称的,应具有方程(8) $h(r)$ 形式。实际上, $h(r)$ 给出了阴

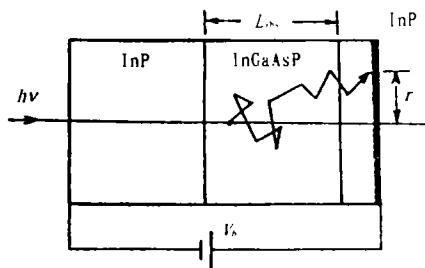


图 1 透射式转移电子光阴极结构示意图

极面上电荷密度表达式,式中分母 $2\pi r dr$ 表示圆环的面积, dqr 是落在该面积内的电子数。可见,如果能追踪大量光电子在阴极面上的落点,便能统计出电子的落点分布,即求出点扩散函数 $h(r)$ 。这里将采用蒙特卡罗模拟的方法给出 $h(r)$, 然后求出转移电子阴极的调制传递函数。下面简单介绍蒙特卡罗方法的基本思想。

以 Z 轴为圆心,把阴极面划分成许多等间距 Δr 的同心圆,假定光电子产生于 Z 轴上,利用蒙特卡罗模拟的方法追踪该光电子的运动轨迹,直到它到达阴极表面为止,记录该电子偏离 Z 轴的横向位移 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 根据 r 判断该电子落在哪一个圆环内,统计大量电子轨迹落点,就可以获得点扩散函数 $h(r)$ 的离散形式:

$$h(r_j) = \frac{q(r_j)}{2\pi r_j \Delta r} \quad (10)$$

其中 $q(r_j)$ 是第 j 个圆环内的电子数。

求出点扩散函数 $h(r_j)$ 之后,便可求解阴极 MTF。根据公式(6)可知,由点扩散函数 $h(r)$ 可求出线扩散函数 $L(x)$, 把公式(5)积分方程变成求和形式,有

$$L(x_i) = \sum_{r_j > x_i} 2h(r_j) (r_j^2 - x_i^2)^{-1/2} \Delta r \quad (11)$$

求得 $L(x_i)$ 之后,通过对公式(9)式进行离散和归一,便可求出阴极的调制传递函数 $H(f)$ 如下:

$$H(f) = \sum_{x_i=0}^{\infty} L(x_i) \cos(2\pi f x_i) \Delta x / \sum_{x_i=0}^{\infty} L(x_i) \quad (12)$$

四、计算结果和讨论

对于由图 1 给出的转移电子光阴极,其 InP 电子发射层和 InGaAsP 光吸收层的 P 型掺杂浓度(掺 Zn)分别为 $2.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。InP 发射层的厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 。吸收层的厚度 (L_{abs})、场助偏压 (V_b) 和光学吸收系数 (α) 由表 1 给出。

表 1 转移电子光阴极参数

No.	$L_{\text{abs}}(\mu\text{m})$	$V_b(\text{V})$	$\alpha(\text{cm}^{-1})$
A	1.5	10	3.0×10^3
B	1.5	10	3.0×10^4
C	3.0	10	3.0×10^3
D	3.0	5	3.0×10^3

图 2 给出对应表 1 中的四组参数计算出的阴极 MTF 曲线。很显然,转移电子场助光阴极具有较高的空间分辨率(和 NEA 光阴极的 MTF 特性相类似),并随空间频率 f_s 的增大而减小,这是由于光电子在向阴极表面的运动过程中的横向扩散引起的,从本质上讲,这种横向扩散是由电子遇到的各种散射引起的,其中主要有声子散射、电离杂质散射和其他散射机制。此外,转移电子阴极的结构参数也对 MTF 有影响,这些影响也可由电子的横向扩散来解释。由图 2 可以看出,当 $L_{\text{abs}} = 1.5 \mu\text{m}$, $V_b = 10\text{V}$ 时,MTF 值很高,对于吸收系数 α 分别为 $3 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$ 和 $3 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$, $f_s < 1000 \text{c/mm}$ 时,MTF 大于 0.5。此外,曲线 A 和 B 的 MTF 值随着空间频率 f_s 的增加下降很慢,这一结果表明当 L_{abs} 较小时,转移电子阴极的 MTF 较高。比较曲线 A、B 可以看出,随着 α 的增大,MTF 曲线下降很快,这是由于大部分光电子产生在吸收层与衬底界面附近,因而需要走较长距离才能到达阴极发射表面,结果加剧了电子的横向扩散,造成阴极分辨率下降。

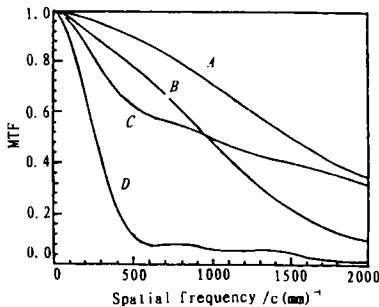


图 2 透射式转移电子光阴极 MTF 曲线

除了光学吸收系数 α 之外,吸收层厚度 L_{abs} 和场助偏压 V_b 也是影响阴极 MTF 的两个重要参数。当 α 和 V_b 不变时,比较曲线 A 和 C 可以发现, $L_{\text{abs}} = 3.0 \mu\text{m}$ 的曲线 C 的下降速率要比 $L_{\text{abs}} = 1.5 \mu\text{m}$ 的曲

线 A 快得多,当 $f_s < 500 \text{c/mm}$ 时更是如此。其原因和增大 α 是一致的,因为 L_{abs} 越大,电子的传输距离就越长。

曲线 C 和 D 也表明,当场助偏压从 5V 增大到 10V 时,阴极的 MTF 同样上升了许多。 V_b 的强烈作用是由于处于电场中的电子除了具有扩散运动之外,还具有沿 Z 方向的漂移运动,因此大大缩短了阴极内的渡越时间。随着 V_b 的增大,空间电荷区变宽,因此使更多的光电子受到电场力的作用。

五、结 论

本文采用 OTF 理论和蒙特卡罗模拟的方法计算了 Ag/p-InP/p-InGaAsP/InP(衬底)透射式转移电子光阴极的 MTF。结果表明光学吸收系数、有源层厚度和场助偏压对阴极的 MTF 都有很大影响,根据电子的传输机理可以很好的解释这些参数的作用。如果要获得较高的 MTF 值,则应当尽量减小光学吸收系数和有源层厚度,提高阴极的场助偏压。

参 考 文 献

- 1 R. U. Martinelli and D. G. Fisher. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(10):1339
- 2 J. S. Esher, R. L. Bell, P. E. Gregory, S. B. Hyder, T. J. Maloney, and G. A. Antypas. IEEE Transact. Electron Devices, 1980, ED-27:1244
- 3 J. S. Esher, P. E. Gregory, S. B. Hyder, R. R. Saxena, and R. L. Bell. J. Electron Device Letters, 1981, ED-2:123
- 4 王之江,伍树东. 成像光学. 科学出版社, 1991, 21
- 5 李相民,侯洵. 半导体学报, 1996, 17(5):328

李相民 1964 年生于辽宁北票, 1989 年毕业于西安电子科技大学微电子研究所, 并获得硕士学位。1991 年~1994 年在中科院西安光学精密机械研究所攻读博士学位。研究方向为光电器件。现在北京理工大学光电工程系做博士后工作。

侯 洵 中科院西安光学精密机械研究所研究员, 中科院院士。从事光阴极, 真空光电器件, 超短光脉冲诊断技术等方面的研究工作。