

# 弱光探测器中复合抛物面聚光镜\*

牛丽红, 廖华, 张劲松, 王鑫

(深圳大学 光电子学研究所, 深圳 518060)

**摘 要:**基于非成像光学的原理,设计并研制了一种用于弱光探测器的复合抛物面聚光镜.提出基于遗传算法的优化设计聚光镜电子光学系统的新方法,将探测器阳极对光电子的接收率作为遗传进化的目标函数,把复合抛物面聚光镜系统的几何结构参量和电参量作为优化设计的搜索变量,通过控制遗传算法的遗传进化方向,进行全局优化调整.仿真实验结果表明,优化后的聚光镜在会聚光线的同时可以对光电子实现有效的会聚.当入射角为  $30^\circ$  时,光透过率高于 75%,电子收集率为 100%,可以满足具有反射式光电阴极和大探测面积的弱光探测器要求.

**关键词:**优化设计;复合抛物面聚光器;遗传算法;光电倍增管

**中图分类号:** TB133; TN152

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)12-3079-5

## 0 引言

光电探测是物理学研究中的重要方法之一.其核心部件光电倍增器<sup>[1-2]</sup>在诸如高分辨率的光谱测量、高速现象检测、生物发光、高能物理、天文测光等领域有着广泛的应用.目前,光电倍增器件概括起来分为三类:固体半导体光电倍增器、真空光电倍增管以及真空器件与固体器件组合工作的混合型光电倍增器.固体半导体光电倍增器具有量子效率和抗强光照射的能力、功耗低、工作频谱范围大、体积小等优点.但是,如果以单位面积的成本计算,半导体光电倍增器高于真空器件,并且这类器件具有噪声较大、增益低、外围控制电路及热电制冷电路较复杂等缺点.因此很难真正用于光子计数,并且光敏面积很难做大,目前探测面积最大可达  $200\text{ mm}^2$ .真空光电倍增管<sup>[3-5]</sup>(Photomultiplier Tube, PMT)是一种非常有效的弱光探测器件.与通常的半导体光电探测器相比,PMT 具有高增益( $10^6 \sim 10^7$ )、高灵敏度、低噪声、大光敏区面积.大部分 PMT 均由光电阴极、具有二次电子倍增功能的打拿极和用于收集光电子的阳极组成.但是通常的 PMT 打拿极结构复杂、反向偏压高、抗外部磁场能力较差,并且量子效率低.特别是当采用高量子效率的反射式光电阴极时,探测光接收角度相对较小,阴极光电响应的一致性差,故在大多数 PMT 中无法采用反射式光电阴极.近几年,真空器件与固体器件组合工作的混合型光电倍增管迅速发展起来,它既可以实现真空器件大的光敏面积,同时又可以获得更好的性能参量.

在该类管子中,打拿极和阳极由雪崩二极管(AD)取代,其特点是低噪音、抗磁干扰能力强、探测光谱范围宽等特点.但是为了获得高的增益,阴极和 AD 之间需要加足够高的电压(通常:  $8\text{ kV} \sim 20\text{ kV}$ ),因此被电子轰击的 AD 会同时释放离子,这些离子被加速并轰击阴极,从而降低阴极的工作寿命.

虽然上述三类光电倍增技术已经比较成熟,市场上也有不少类似的产品.然而,随着人们对高技术研究的不断深入,特别是近年来核物理、中微子探测等领域不断引起各国的重视,对光电倍增探测器的改进需要突显<sup>[6]</sup>.要求光电倍增器量子效率高、光电增益高、时间响应快、暗背景计数低、探测面积大、成本低、易制作等.因此,本文设计并研制了一种新的基于复合抛物面聚光镜结构的 PMT.从结构上突破以往反射式光电阴极对入射角度的限制,不仅量子效率高、光电增益高、探测面积大还同时具备时间响应快、易制作等特点.由于采用了(Compound Parabolic Concentrator, CPC)结构,可以在大的光输入窗即大探测面积情况下,采用小面积的反射式光电阴极.因此,在获得足够光通量的同时,减小了阴极噪音和光电子的渡越时间弥散.同传统管型相比,如果在同样大的光接收面积下,阴极量子效率、阴极噪音、电子收集率和时间特性以及抗磁场干扰的能力都会得到显著的改善.

## 1 CPC 基本原理与光学设计

CPC 在探测器中的工作原理如图 1.由于 CPC 既要入射光反射并会聚至光电阴极,同时又作为聚焦电极将阴极发射的光电子加速和聚焦到微通道板上.为了获得满足上述要求的 CPC,需要同时对 CPC 进行光学设计和电子光学设计.

\*国家自然科学基金(10575072)和广东省高等学校科技创新团队计划(06CXD009)资助

Tel: 0755-26538558

Email: NIULH@szu.edu.cn

收稿日期: 2008-12-11

修回日期: 2008-12-24

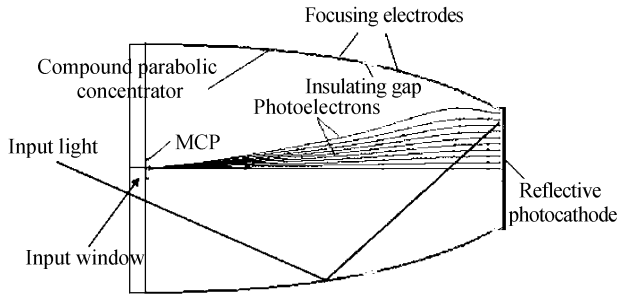


图 1 CPC 工作原理  
Fig. 1 Scheme of the detector

复合抛物面聚光镜是一种根据边缘光线原理设计的非成像光学聚光器<sup>[7]</sup>,目的是通过抛物面对光线的反射使从入射口入射的光在出射口单位面积上获得最大强度,如图 2.

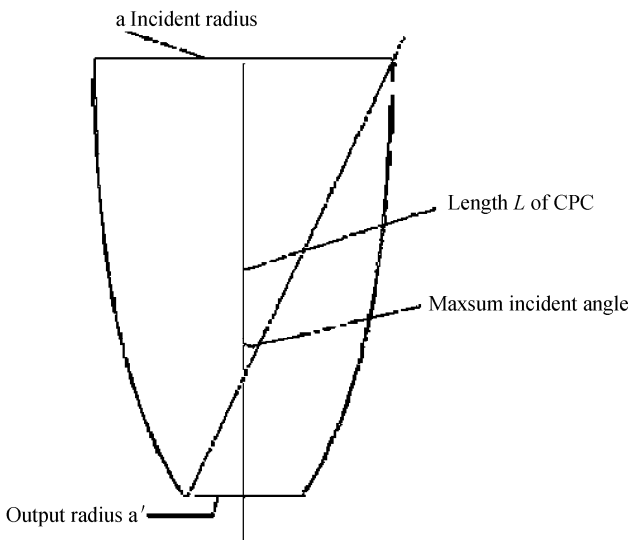


图 2 标准 CPC 示意  
Fig. 2 Principle of general CPC

图 2 中

$$CPC \text{ 的长度: } L = (a + a') \cot \theta_{\max}$$

$$\text{理想聚光比 } C: C_{\max} = a/a' = 1/\sin \theta_{\max}$$

根据应用需要,本文要求聚光镜入射孔径 100 mm,出射孔径 40 mm,最大入射角不小于 30°,并且要求光透过率尽可能高,轴向长度尽可能短.本文采用截短和多极 CPC 组合方法<sup>[8]</sup>对 CPC 结构进行光学设计,并对光线进行追踪分析.

首先对 CPC 的长度进行截短,CPC 经过截取后的高度与原高度的比值,称之为截取比  $k$ . 截取比减小会造成聚光比减小.图 3 是分别采用截底和截顶两种方法得到的入射角与透过率之间的关系曲线.计算结果表明,截短法可以起到一定的补偿效果.与标准 CPC 比较,若接收大角度光,可采用截顶法对 CPC 进行截取,长度变小且透过率较高;以小角度入射时,可采用截底法对 CPC 进行截取,可获得足够高的透过率.

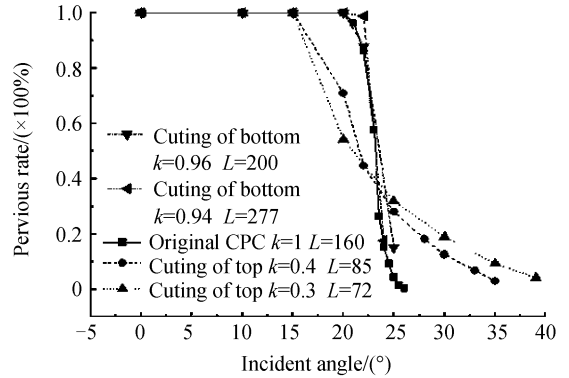


图 3 采用截顶法和截底法的 CPC 性能曲线  
Fig. 3 Plots of CPC performance by cutting off top and bottom

将 CPC 的轴向分成若干不同部分加以组合连接,即上一级 CPC 的出射孔径为下一级 CPC 的入射孔径.在不增大聚光比的情况下大角度入射时可以取得较高的透过率.依据上述思想将两个和三个标准 CPC 组合,对其进行计算和光线追踪,结果如图 4.计算结果表明,两个或三个标准 CPC 相连,角度稍大时,可以获得相对较高的透过率.

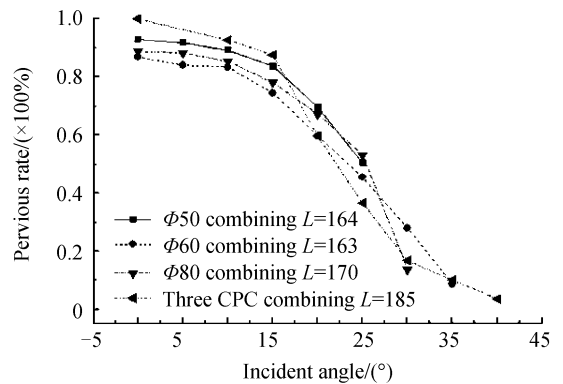


图 4 在不同孔径处组合的多极 CPC 性能曲线  
Fig. 4 Plots of combining CPC performance

本文将上述两种方法结合起来,组成多极截短复合抛物面聚光器,第一极截取比  $k=0.3$ ,第二极截取比  $k=0.4$ ,长  $L=84$  mm.根据光学模拟分析后,其透射率曲线与标准 CPC 的对比如图 5.

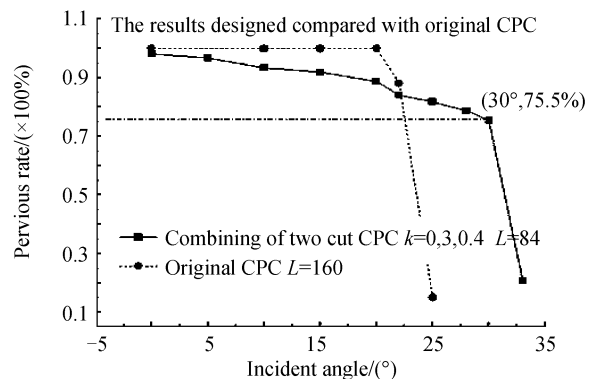


图 5 组合 CPC 透射率曲线与标准 CPC 的对比  
Fig. 5 Plots of penetrating rate of combining and general CPCs

## 2 基于遗传算法的 CPC 电子光学优化设计

常见的优化设计方法有两种:一是解析法,另一是直接法.解析法要求目标函数和搜索变量之间能用函数形式解析表达,易陷入局部最优点,不易得到全局最优解.并且,显然对电子光学设计问题来说,给出一个适当的解析目标函数是困难的.直接法只需要计算目标函数值而不必求其导数.因此,直接法可用于电子光学优化设计中难以用函数形式解析表达目标函数和搜索变量之间的场合,然而,直接法每次只改变一个解,对电子光学设计问题来说,由于搜索变量较多,即维数高,因此收敛速度慢.本文提出的基于遗传算法(Genetic Algorithms, GA)的 CPC 电子光学优化设计旨在克服传统优化方法的设计缺陷.

### 2.1 遗传算法及其改进算法

GA 是借鉴于自然选择和自然进化的机理而产生的一种求解问题的高效并行全局搜索方法,具有简单、鲁棒性强以及不受搜索空间限制性条件约束等特点. GA 是一个群体优化过程,为了得到目标函数最大(或最小)值,GA 不是从一个初值出发,而是从一组初始值出发进行优化,这一初始值好比一个生物群体,优化的过程就是这个群体繁衍、竞争和遗传、变异的过程. GA 能够从整个搜索空间寻找满意解,避免优化过程陷入局部最优问题.为了避免 GA 存在的成熟过早收敛问题<sup>[9-10]</sup>,以获得最佳优化结果,本文在标准 GA 的基础上设计了改进的遗传算法.改进遗传策略如下:

#### 2.1.1 个体的相关选择

为了保持种群的多样性,防止 GA 未成熟收敛.在 GA 的种群进化步骤中附加两个新的选择算子,即附加既与种群多样性有关、又与种群适应度有关的繁殖和接受新一代种群的准则.这里称之为相关竞争选择算子和家族相关选择算子.

在标准的 GA 中,用于交叉操作的两个父代是独立选择的,为了利用个体之间的相关度选择父代显然更好,有效的交叉操作会增强算法的搜索能力.相关竞争选择算子的操作过程如下:

1) 首先用一般的繁殖选择算子(本文采用轮盘赌法)选择个体  $X_0$  作为第一个父代.

2) 从种群中随机选择  $N$  个个体  $X_i$  组成第二个父代的候选集  $P$ ,这里  $P = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ .

3) 计算  $P$  中的个体的相关估价函数  $g(X_i)$

$$g(X_i) = f(X_i) + c \cdot h(X_i, X_0) \quad (1)$$

式中  $f(X_i)$  为  $X_i$  的适应度函数;  $h(X_i, X_0)$  为个体

$X_i$  和  $X_0$  之间的基因相关度; 常量  $c$  为权重系数.

4) 选择具有最高  $g(X_i)$  的个体作为第二个父代,与  $X_0$  组成父本对.这里相关函数定义为汉明距离(Hamming Distance),即个体越相似,则相关值越小.两个个体  $X_i$  和  $X_j$  间的汉明距离为

$$D_{ij}^H = [(X_i - X_j) \cdot (X_i - X_j)]^{1/2} = \left[ \sum_m (X_{im} - X_{jm})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中  $X$  为基因的二值编码构成的矢量,  $X = (x_1, x_2, \dots, x_R)$ ,  $R$  为码长.

为了在保留高适应度个体的同时保持种群的多样性,这里用家族相关选择算子<sup>[4]</sup>来选择保留到下一代的种群.算法如下:

1) 在家族中选择适应度值最高的个体  $X$ .

2) 依据式(3)计算个体  $X$  与家族中其它 3 个个体  $X_i (i=1, 2, 3)$  基因间的汉明距离  $d_i = H(X_i, X)$ .

3) 选择在汉明距离  $\{d_1, d_2, d_3\}$  中具有最大值的个体  $X_k$

$$d_k = \max_i (d_i) \quad (3)$$

4) 将  $X$  和  $X_k$  保留到下一代,并删除其余两个个体.

5) 对全部家族应用 1)~4) 的算法进行个体保留操作.

#### 2.1.2 自适应遗传操作

固定的交叉概率和变异概率往往不能同时适合寻优搜索中不同情形的需要.文献<sup>[11]</sup>对交叉概率和变异概率的变化原则作了一般性的数学分析.根据文献<sup>[6]</sup>的思想,本文选择了下面的概率自适应变化方式.

在进化初期,个体之间的差异较大,随着进化代数的不断增加,种群差异度变小.为防止过早收敛,交叉概率应随着种群差异度的变化而变化.这里仍将 Hamming 距离作为个体基因差异的度量,以此自适应调节交叉概率. Hamming 距离  $D_{ij}^H$  的定义见式(3),交叉概率的自适应变化依据式(4)

$$P_s = \{1 + \exp[-(D_{ij}^H - \alpha_s)/\beta_s]\}^{-1} \quad (4)$$

式中  $\alpha_s$  和  $\beta_s$  为常量,需根据具体问题设定.

鉴于个体差异度大时的大变异概率及个体差异度小时的小变异概率都不利于算法收敛于全局最优.本文采用以下判据评价个体差异度,以自适应调节变异概率.定义种群离散度为

$$\Phi = \sum_{i=1}^N (X_i - M)^T \cdot (X_i - M) \quad (5)$$

式中  $M = \sum_{i=1}^N X_i / N$ ,  $N$  为种群的个体数目,  $t-1$  代的离散度  $\Phi(t-1)$  与  $t$  代的基变异概率  $P_m^{\text{base}}$  关系为

$$P_m^{\text{base}} = \frac{\exp[-(\Phi - \alpha_m)/\beta_m]}{1 + \exp[-(\Phi - \alpha_m)/\beta_m]} \quad (6)$$

这里  $\alpha_m$  和  $\beta_m$  为常量,根据具体问题设定.

从式(6)可知,当遗传处于后一阶段,个体之间的差异小,变异概率增大.维持种群多样性,逃离局部收敛状态.

两个体交叉后变异概率与 Hamming 距离的关系为

$$P_m = P_m^{\text{base}} - \alpha \cdot D_{ij}^H \quad (7)$$

式中常量  $\alpha > 0$ ,是基变异概率  $P_m^{\text{base}}$  和 Hamming 距离  $D_{ij}^H$  之间的权重系数.

## 2.2 CPC 的电子光学优化设计

基于 GA 的 CPC 电子光学优化设计是指选取 CPC 适当的几何结构参量和电参量作为优化设计的搜索变量,在一定的约束条件下,使得电子光学参量的目标适应度函数为最大,从而得出电子光学系统的最优结构.

由于电子光学系统的电磁场分布决定了光电子的轨迹<sup>[12-13]</sup>,而电磁场分布由 CPC 系统的几何参量和电参量确定.可见,阳极光电子的收集率是 CPC 几何参量和电参量的函数.由于本文 CPC 的形状已由光学设计确定,几何参量仅指长度和电极间隙,电参量即 CPC 各电极上施加的电压.上述参量即为搜索变量.

基于 GA 的优化设计方法为:

### 1) 染色体编码

将待优化的搜索变量即 CPC 的几何参量和电参量组合进行染色体编码,考虑到探测器结构的限制和各个参量的显式约束条件,设定每个参量各占 5 个基因位,本文对电极长度、电极间隙及各电极上施加的电压共 7 个参量组合优化,则个体染色体的编码串长 35 bits.

例如个体  $P_k$

$$P_k = \underbrace{1010001011 \cdots 10010}_{35 \text{ bits}}$$

### 2) 适应度函数

适应度将用来度量群体中各个个体在优化计算中能达到或接近于最优解的优良程度,优化的目的即要得出搜索变量的一组数值使适应度函数最大.为了实现阳极对阴极出射的光电子的搜集率尽可能高,本文目标适应度函数  $f(\cdot)$  设为系统的光电子收集率与电子光学系统参量之间的关系.

由于不能直接给出电子光学参量与光电子收集率之间的函数关系表达式,因此,首先以矩形网格有限差分法求解给定边界条件下的拉普拉斯场方程计算出电场分布,其中,电极之间间隙和边界电位作线性插值处理.然后,根据电子轨迹方程进行轨迹追

踪,求得电子在阳极上的落点坐标值,对于本系统, MCP 有效工作半径为 3 mm,若电子在子午面上落点半径小于 3 mm,则认为被阳极俘获.

### 3) 复制选择算子

实验中,种群数目为 80.根据本文提出的相关竞争选择算子选择父代,用于产生新一代.

### 4) 交叉算子

根据父代的 Hamming 距离计算出交叉概率.交叉算子有多种,本设计中所得实验结果均是基于双点交叉完成的.

### 5) 变异算子

完成交叉操作后,对染色体中的每一位基因实施变异操作.如前所述,根据当前种群的离散度和父代的 Hamming 距离计算变异概率,如果在某一位出现变异,则该位的值反转.

### 6) 保留选择算子

根据前面所述的家族相关选择算子决定保留到下一代的个体.

根据上述优化方法对 CPC 的电子光学系统进行优化,电场分布计算和电子轨迹追踪采用已有计算程序.自适应交叉概率和变异概率分别在 0~1 和 0~0.005 之间取值,最大遗传代数 500,并设定如果阳极电子搜集率达到 100%,程序运行终止.为了限定各搜索变量的搜索范围,将各参量的显式约束条件作为搜索范围.优化后, CPC 的第一级长度  $L_1 = 29.4$  mm,第二级长度  $L_2 = 54.6$  mm,绝缘间隙  $\delta = 0.45$  mm,如果阳极电压  $V_a = 0$  V,则第一段电压  $V_1 = -700$  V,第二段电压  $V_2 = -1100$  V,阴极电压  $V_c = -1400$  V,电子光学轨迹追踪结果表明,对有效半径  $r = 3$  mm 的 MCP,其电子搜集率为 100%.

## 3 结论

本文采用截短组合设计的 CPC,在入射角为  $30^\circ$  和聚光比为 2:1 时,可以将 75% 以上的入射光线有效会聚到光电阴极上,该结果比标准 CPC 具有更好的性能.

在电子光学优化设计中,由于目标函数不能直接表示成系统几何参量和电参量的解析表达式,需先经过电场的数值计算,才能进行电子光学参量的计算,因而不能采用解析法求解.研究表明,本文提出的基于 GA 的电子光学优化设计方法,利用了 GA 极强的全局优化能力及其对初始点选择不敏感的特点,提高了优化设计效率.探索了一种有效的电子光学全局优化设计途径.通过对 CPC 电子光学系统优化设计,证明了该方法的有效性.

对光电倍增管来说,由于采用 CPC 既作为反射式聚光镜同时作为电子聚焦镜,使大口径光探测和小面积反射式光电阴极结构得以实现。因此,探测器的暗电流降低,总体探测效率提高,探测性能将进一步改善。

#### 参考文献

- [1] SONG Deng-yuan, WANG Xiao-ping. APD, PMT and hybrid photodetectors with high end sensitivity [J]. *Semiconductor Technology*, 2000, **25**(3):5-12.  
宋登元,王小平. APD、PMT 及其混合型高灵敏度光电探测器 [J]. 半导体技术, 2000, **25**(3):5-12.
- [2] D'AMBROSIO C, LEUTZ H. Hybrid photon detectors [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, detectors and Associated Equipment*, 2003, **501**(2-3):463-498.
- [3] KEN K. Photomultipliers; low-light, high-speed specialists [M]. *The Photonics Handbook ~ (TM) 2004 Book 3*, 2004: 91-93.
- [4] The investigation of the parameters of the photomultiplier tubes with microchannel plates [C]. The 1st Siberian Russian Student Workshops on Electron Devices and Materials, Novosibirsk, Russia, 2000, 161-168.
- [5] WU Xing-jian, WU Jin-hong. Principle, characteristics and application of photoelectric magnification tube [J]. *International Electronic Elements*, 2001, **4**(8):13-17.  
武兴建,吴金宏. 光电倍增管原理、特性与应用 [J]. 国外电子元器件, 2001, **4**(8):13-17.
- [6] ZHU Yong. Design and implementation of the single photon counter system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(4):28-30.  
朱勇. 单光子计数系统的设计与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2007, **28**(4):28-30.
- [7] ROLAND W. Nonimaging optics [M]. Elsevier Academic Press, 2005.
- [8] ANDREAS T. Optimized CPC-type concentrators built of plane facets [C]. *SPIE*, 1999, **3781**:432-439.
- [9] MATSUI K. New selection method to improve the population diversity in genetic algorithms [C]. *IEEE International Conference on SMC*, 1999, **1**:625-630.
- [10] RUDOLPH G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1994, **5**(1):96-101.
- [11] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, 1994, **24**(4):656-667.
- [12] TIAN Jin-shou, BAI Yong-lin, LIU Bai-yu, et al. Design of a femto-second streak tube [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12):1786-1788.  
田进寿,白永林,刘百玉,等. 飞秒条纹变相管的设计 [J]. 光子学报, 2006, **35**(12):1786-1788.
- [13] WU Jian-jun, ZHAO Bao-sheng, TIAN Jin-shou, et al. Optimized design of ultrafast electron diffraction system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3):448-451.  
吴建军,赵宝升,田进寿,等. 超快电子枪发射系统的优化设计 [J]. 光子学报, 2008, **37**(3):448-451.

## Optimization Design of compound Parabolic Concentrator in the Weak Light Detector

NIU Li-hong, LIAO Hua, ZHANG Jin-song, WANG Xin

(Institute of Optoelectronics in Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract:** A Compound Parabolic Concentrator (CPC) is designed based on the principle of non-imaging optics to develop a novel Photomultiplier Tube (PMT). An efficient solution is proposed for the optimization design of CPC electron-optical parameters based on the Genetic Algorithm (GA). GA simulating the evolutionary mechanism of nature is a global optimization parallel searching method. The photoelectron collecting rate of anode is used as the fitness function of GA and the structure and electrical parameters as the optimization searching variables. By controlling the GA inheritance evolution direction, global optimization of CPC electron-optical system is realized. Simulation experimental results show that the optimized CPC is able to focus light and photoelectrons efficiently. As an example, for light incident angle of  $30^\circ$ , corresponding light transmission rate of above 75% and the photoelectron collecting rate of almost 100% are able to achieved respectively with the CPC. Such a design can be applied to develop the PMT of large detection area, and reflective photocathode for photon detection.

**Key words:** Compound parabolic concentrator; Optimization design; Genetic algorithm; Photomultiplier tube



**NIU Li-hong** received the Ph. D. degree in optical engineering from Beijing Institute of Technology. She is working at Institute of Optoelectronics, Shenzhen University as an assistant professor. Her research interests focus on photoelectronic detecting and imaging.