

文章编号: 0253-2239(2007)11-1973-7

# 基于增加光电子积分时间的磁镜装置研究\*

独育飞 唐远河 刘 镨 屈光辉 宁 辉 张 磊 李皓伟

(西安理工大学应用物理系, 西安 710054)

**摘要:** 阐述了提高微光成像系统低照度探测极限的本质是需保证成像系统对光信号足够的积累时间,从理论上指出降低 CCD 温度实现低照度探测的局限性和实现技术的复杂性后,提出在光阴极与光电子接收器(屏靶)之间耦合一个磁镜装置(即微通道电子瓶板结构)作为一种新的光电子接收器,即可有效保证图像信号的积分时间,提高成像系统的探测信噪比,达到拓展微光成像系统低照度探测极限的目的。论证了磁镜场的物理机理,并用计算机模拟显示出了预期的结果。该方案在常温下能实现当前微光成像系统低温探测灵敏度极限  $10^{-11}$  lx 的目标。

**关键词:** 成像系统; 微光成像; 磁镜; 探测极限; 微通道电子瓶板

中图分类号: TN223; TL631 文献标识码: A

## Study of the Magnetic Mirror Device to Enhance the Photoelectron's Accumulation Time

Du Yufei Tang Yuanhe Liu Kai Qu Guanghui Ning Hui Zhang Lei Li Haowei

(Department of Applied Physics, Xian University of Technology, Xian 710054)

**Abstract:** The essential factors of enhancing the detecting limitation of low-light imaging system are enough accumulation time to the light signal. After the principle is demonstrated for the accumulation time of CCD to low temperature, it shows the localization and complexity. So, we put forward a device for promoting the low-light level imaging system' detection limit in which a magnetic mirror structure is coupled between the photocathode and the photoelectron acceptor (screen target), viz. this is the method of microchannel electron vase plate. It can be used in the small-scale integration imaging system respectively to enhance the detection limit of low-light level by the new way. The new photoelectron acceptor can assure the image signal's accumulation time. By this new way, the signal-to-noise of imaging system can be improved and detection limit of low-light imaging system is expanded. The physics principle of the field of magnetic mirror is demonstrated and the simulation values showed the expected result sensitive detection limit  $10^{-11}$  lx can be realized at the room temperature instead low temperature.

**Key words:** imaging system; low-light imaging; magnetic mirror; detection limit; microchannel electronic vase plate

## 1 引 言

微光探测 CCD 领域,目前已推出探测照度为  $10^{-9}$  lx 的 CCD 摄像机。德国 B&M 光谱公司出售的制冷 CCD 摄像机,在  $-150$  °C 特殊低温条件下灵敏度达  $10^{-11}$  lx<sup>[1]</sup>。对于目前常温下微光探测  $10^{-6}$  lx 照度的国际水平显示出广阔的发展空间。微光 CCD 在天文观测、卫星遥感探测上层大气风场的极光光源<sup>[2]</sup>及航天、军事、生物医学<sup>[3]</sup>等方面均有重要的应用。

解决微光( $10^{-6}$  lx)成像 CCD 的方案目前有 4 种:像增强型(Intensified charge coupled devices, ICCD)<sup>[4]</sup>、电子轰击型(Electron bombarded charge coupled devices, EBCCD)<sup>[5]</sup>、积分延迟型(Time delay integration charge coupled devices, TDICCD)<sup>[6]</sup>和电子倍增型(Electron multiplying charge coupled devices, EMCCD)<sup>[7]</sup> CCD。这 4 种方案有不同的光信号增强方式,对信号的积累均由

\* 陕西省自然科学基金研究项目(2006A08)、西安理工大学创新基金和 B 类基金(108-210605)资助课题。

作者简介: 独育飞(1984—),男,陕西武功人,西安理工大学物理系三年级学生,主要从事微光成像方面的研究。

E-mail: duyufei. xaut. cn@163. com

导师简介: 唐远河(1965—),女,四川蓬溪人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事大气光学和微光成像方面的研究。

E-mail: ttp1801@163. com

收稿日期: 2007-01-31; 收到修改稿日期: 2007-05-21

CCD 完成。但是, ICCD 和 EBCCD 结构均采用光阴极实现光电转换, 系统中光阴极直接与光电子接收器(屏靶)耦合, 分别存在着探测噪声大、使用寿命短和常温下短暂的信号积累时间等共同缺点, 进一步提高微光成像系统探测的极限就受到了限制。

为提高微光成像系统的探测极限, 很多研究放在了降低系统噪声和延长 CCD 信号积累时间方面, 这些措施均不能从根本上解决问题。我们的前期工作已对微光 CCD 原理以及降噪措施作过研究<sup>[6,8~10]</sup>。本文基于提高微光成像系统 (ICCD、EBCCD) 的探测极限, 对像增强器提出改进方案, 设计出磁镜装置, 即使用微通道电子瓶板结构的方法, 来提高光电子的积分时间, 把光信号积累的任务由不受温度限制的磁镜装置来完成, 从而得到更高信噪比和更低照度的微光常温探测目的。

## 2 改进微光探测像增强器的理论分析

### 2.1 有用光信号的积累增强

为得到更高的微光成像系统的探测本领, 根本的问题是要解决低照度下如何进行长时间的光子信号积累, 这种方法不易直接办到, 只能对光生电子进行积累。成像系统光信号积累时间的阈值与照度有关。由照度的定义, 探测器光敏元在积累时间内接受的光信号总能量  $Q_L$  为

$$Q_L = \frac{1}{683} \iint E_V dA dt, \quad (1)$$

其中  $E_V$  为光阴极表面接受的光照度, 当  $E_V$  随时间及空间分布不变时, 所得电子数为

$$N = \eta \frac{Q_L}{E} = \frac{1}{683} \eta \frac{E_V A \lambda}{hc} t, \quad (2)$$

其中  $N$  为光电子数,  $E$  为单光子能量,  $A$  为光阴极探测器的光敏元面积,  $t$  为积累时间,  $\eta$  为光阴极量子效率。从(2)式可见, 更低照度需要更长的光照积累时间。如果代入微光成像系统的相关参量, 取  $\eta = 0.1$ ,  $A = 10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ , 光波长  $600 \text{ nm}$ 。假设只产生 1 个电子 ( $N = 1$ ), 则积累时间为

$$t = 2.263 \times 10^{-5} / E_V. \quad (3)$$

如果  $E_V = 10^{-6} \text{ lx}$ , 则  $t = 22.63 \text{ s}$ , 这是现有微光成像技术能实现的积累时间, 需相当好的噪声处理技术才能实现这样的照度要求。如果  $E_V = 10^{-11} \text{ lx}$  时, 按(3)式需要  $t = 26.2 \text{ d}$  的长时间。当增加探测单元的面积, 取  $A = 50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ , 当  $E_V = 10^{-11} \text{ lx}$  时, 则  $t = 1.048 \text{ d}$ 。可见改变探测器的单元面积是提高积累时间的途径之一, 但这不利于成像系统集

成和分辨力, 不是提高微光探测极限的有效途径。

### 2.2 降低温度增加 CCD 积分时间

降低温度有助于提高系统的成像质量, 因此低温光学系统的研制得到不断发展<sup>[11]</sup>。基于优质硅单晶, 常温下 CCD 最长的光生电子积累时间只有几十秒<sup>[12]</sup>。下面我们给出 CCD 的积累时间与温度关系的理论分析。由于在 CCD 中常见 p 型硅衬底, 少数载流子即传递信号的粒子是电子, 故以下参量只对 p 型硅。CCD 的存储时间, 即热激发产生的电子填满势阱所需的时间为<sup>[12]</sup>

$$t = 2\tau_0 N_A / n_i, \quad (4)$$

其中  $\tau_0$  为耗尽区的少子寿命,  $N_A$  为掺杂浓度,  $n_i$  为本征半导体载流子浓度,  $n_i$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$n_i = 4.82 \times 10^{15} \left( \frac{m_p^* m_n^*}{m_0^2} \right)^{3/4} T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_0 T}\right), \quad (5)$$

其中  $m_n^*$  为导带底电子的有效质量,  $m_n^* = 1.08m_0$ ;  $m_p^*$  为价带顶空穴的有效质量,  $m_p^* = 0.59m_0$ ,  $m_0$  为电子静止质量,  $T$  为热力学温度,  $k_0$  为玻耳兹曼常量,  $E_g$  表示温度为  $T$  时的禁带宽度<sup>[13]</sup>:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta), \quad (6)$$

其中  $E_g(0)$  为 0 K 温度时的禁带宽度, 硅的禁带宽度约为  $1.170 \text{ eV}$ 。温度系数  $\alpha$  和  $\beta$  分别为:  $\alpha = 4.73 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ,  $\beta = 636 \text{ K}$ 。由(4)式~(6)式得到 CCD 的上限积累时间与温度的关系:

$$t = 2\tau_0 N_A / n_i = 2.909 \times 10^{-5} \cdot T^{-3/2} \times \exp\left[\frac{E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta)}{2k_0 T}\right], \quad (7)$$

由(7)式所描述的积累时间与温度的关系如图 1 所示, 可见降低 CCD 温度确实可以提高积分时间。

(7)式中, 影响少数载流子寿命  $\tau_0$  的因素是硅的纯度和完整性, 在平面器件中硅的  $\tau_0$  一般为  $10 \sim 10^3 \mu\text{s}$ 。掺杂浓度  $N_A$  由 CCD 器件的设计决定。当  $\tau_0 = 100 \mu\text{s}$ ,  $N_A = 5 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ , 常温  $T = 300 \text{ K}$  下, 由(7)式得  $t = 13.662 \text{ s}$ , 再由(3)式, 可得探测照度为  $1.656 \times 10^{-6} \text{ lx}$ ; 当温度  $T = 225 \text{ K}$  时,  $t = 4.493 \times 10^4 \text{ s} = 12.48 \text{ h}$ , 可探测的照度为  $5.037 \times 10^{-10} \text{ lx}$ ; 探测照度是  $10^{-11} \text{ lx}$  时的积累时间为  $2.263 \times 10^6 \text{ s}$ , 要达到这个积累时间, 由(7)式可知, 需将 CCD 冷却到  $202 \text{ K}$ 。由于在实际 CCD 器件中, 当温度降低, 热产生的少数载流子噪声降低的同时, 其它诸如散粒噪声、转移噪声和信号电荷检出噪声等因素就会显得更加突出, 影响 CCD 的存储时间, 故以上计算结果与实际应用会有偏差。

用控制温度的方法实现低照度探测的缺点有:

1)低温下,从(5)式可见,微小温度的变化将影响本征载流子浓度的巨大变化,继而影响 CCD 的上限积累时间,如图 1 所示,间接影响信号电子的稳定性,不利于成像;2) 由于其它噪声的作用,限制了 CCD 存储时间的进一步提高;3) 实现低温的设备相对复杂,不利成像系统的集成。

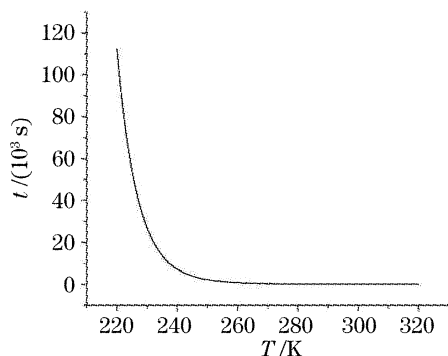


图 1 CCD 积累时间与温度的关系

Fig.1 Relation of CCD accumulation time to temperature

鉴于上述原因,为提高常温微光 CCD 系统的探测能力,我们借鉴核聚变中的磁镜原理,提出在近贴光阴极与光电子接收器之间设置一个磁镜装置作为微通道电子瓶板,构成一种新的光电子接收器。作为示例,图 2 显示的是将磁镜装置应用于二代静电聚焦倒像式像增强器的结构。微通道电子瓶板的目的是收集光阴极产生的光电子,把光信号积累的任务由不受温度限制的磁镜装置来完成,确保有用光信号所需的积分时间;通过对电子的长时间约束,可以平衡微光探测所需时间长而 CCD 的信号积累时间短的矛盾,以提高微弱照度光电成像系统的探测极限。下面具体阐述这种装置及原理。

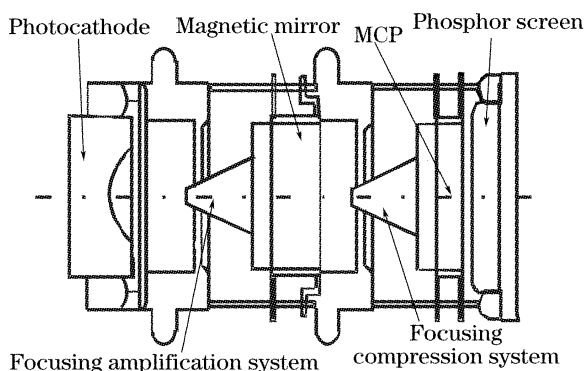


图 2 磁镜装置在二代静电聚焦倒像式像增强器中的位置  
Fig.2 Position of magnetic mirror structure in the second-generation electrostatic focusing inverted image intensifier

### 3 基于磁镜装置拓展常温微光成像系统的探测极限

图 3 是我们提出的微通道电子瓶板结构的侧视

图,其中 1 为电子能量释放线圈(自身闭路),2 为抗磁质材料(如铜),3 为光阴极,4 为励磁线圈,5 为紧固圈,6 为电子引出电极层(微通道板的输入端或加速电场正电极)。

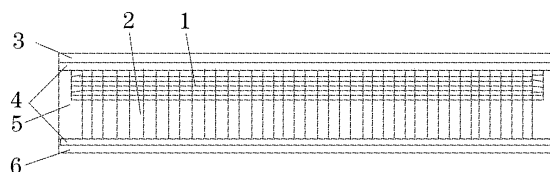


图 3 微通道电子瓶板结构的侧视图

Fig.3 The microchannel electron vane plate structure by looking down of side view

图 4 是微通道电子瓶板结构的前视图,其中 7 为单通道磁镜端口(直径 6~50 μm),8 为轴向磁化永磁质材料(其磁化方向与线圈励磁场方向相反),励磁线圈结构 4 与永磁质材料 8 等厚且各端面两两平齐,前者紧绕在后者侧面之上。

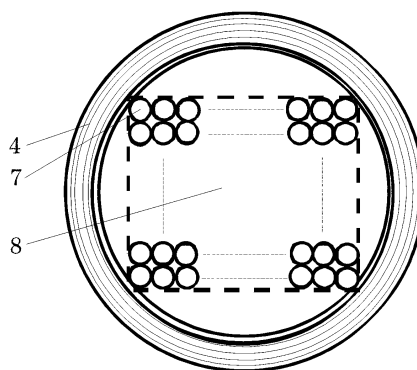


图 4 微通道电子瓶板结构的前视图

Fig.4 The microchannel electron vane plate structure by front view

图 5 是微通道电子瓶板结构的内部视图。与微通道板的设计思想一样,微通道电子瓶板是由大量平行堆积的单通道微细磁镜组成的薄板,单通道微细磁镜结构如图 6 所示,其中 9 为电子。

由于电子在磁镜场中具有横向分布,而大空间

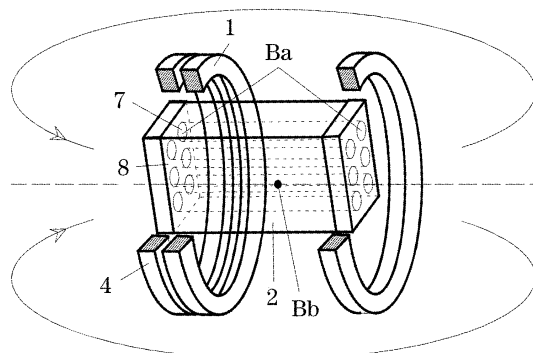


图 5 微通道电子瓶板结构的内部视图

Fig.5 The microchannel electron vane plate structure by inside view

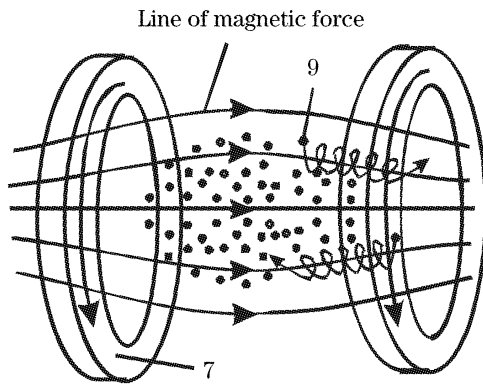


图 6 单通道磁镜原理

Fig. 6 Principle of the single-channel magnetic mirror  
磁镜场更利于电子的收集,但是这将增大成像端面的面积,致使成像系统空间分辨力下降,所以,在我们的结构中还应 在光阴极与微通道电子瓶板之间设置静电聚焦放大电子光学系统,且在微通道电子瓶板与后继光电子接收器之间设置静电聚焦缩小电子光学系统,如图 2 所示,来降低磁镜装置对于空间分辨力的影响。

### 3.1 微通道电子瓶板的工作过程

为便于成像系统的集成,我们设计的微通道电子瓶板结构的工作原理如下:拍摄图像开始,开户光阴极、静电聚焦放大电子光学系统和微通道电子瓶板的 两端励磁线圈结构 4(图 5 中)同时通入相同的稳恒电流,建立磁镜场,此时成像系统的后续部件不开启,只进行光学图像信息光电子的积累。每个光子作用光阴极所产生的一个电子,对应的单通道磁镜入射端口处就捕获到该电子,然后电子在单通磁

镜场中来回运动,当电子积累达到(3)式所需的时间后时,开启静电聚焦缩小电子光学系统、微通道板 (ICCD)或加速电场 (EBCCD)和 CCD,在图 3 的光阴极 3 和电子引出电极层 6 之间加上引出电压,将光电子从大量的微通道磁镜场引出。因为单个微通道磁镜对应 CCD 的一个感光单元,所以不考虑电子在各磁镜场中的磁力线跃迁,总会保持图像信息的完整,完成二维电子图像的传递。

由于图 3 的结构 1 将以热能形式释放光电子能量,防止光电子轰击光阴极,又因为抗磁材料(结构 2)在两线圈之间起到磁屏蔽效果,其内部微通道与永磁质材料的微通道相对应,且通道内表面具有较低二次电子发射性能,不利于电子的增益,这样的结构便可产生高度集成的大量微细磁镜场,每个磁镜场对应微通道板的一个微电子倍增通道 (ICCD 技术方案)或经过加速电场直接对应 CCD 的一个感光单元(EBCCD 技术方案),每个磁镜场也起到透镜的作用,使进入电子与引出电子的位置一一对应。这样设计的装置,把光信号积累的任务由不受温度限制的磁镜装置来完成,提高光电子的积分时间,从而得到更高信噪比和更低照度的微光常温探测目的。

### 3.2 磁镜装置对光电子的磁约束原理

将图 5 中的结构 8 简化为同轴且间隔为  $2d$  的两个轴向磁化的永磁环。单个永磁环的轴向横截面宽度为  $2l$ ,外半径为  $R_2$ ,内半径为  $R_1$ ,剩余磁感应强度为  $B_r$ 。根据电磁定律,沿磁环轴线的磁感应强度分布为<sup>[14]</sup>

$$B_1(z) = \frac{B_r}{2} \left\{ \left[ \frac{z-2l-d}{\sqrt{(z-2l-d)^2 + R_2^2}} - \frac{z-d}{\sqrt{(z-d)^2 + R_2^2}} \right] - \left[ \frac{z-2l-d}{\sqrt{(z-2l-d)^2 + R_1^2}} - \frac{z-d}{\sqrt{(z-d)^2 + R_1^2}} \right] \right\} - \frac{B_r}{2} \left\{ \left[ \frac{z+2l+d}{\sqrt{(z+2l+d)^2 + R_2^2}} - \frac{z+d}{\sqrt{(z+d)^2 + R_2^2}} \right] - \left[ \frac{z+2l+d}{\sqrt{(z+2l+d)^2 + R_1^2}} - \frac{z+d}{\sqrt{(z+d)^2 + R_1^2}} \right] \right\}, \quad (8)$$

其内孔场强方向与磁化方向相反。

图 4 是微通道电子瓶板一端的多匝螺线管。假设其外半径为  $r_0$ ,内半径为  $r_1$ ,轴向横截面宽度为  $2l$ ,轴向单位匝数为  $n_1$ ,横向单位匝数为  $n_2$ ,通电电流强度为  $I$ , $\mu_0$  为真空磁导率。若把两个环向电流相同的多匝螺线管间隔  $2d$  同轴放置,则得到轴线上磁场的分布为

$$B_2(z) = \frac{1}{2} \mu_0 n_1 n_2 I \left[ (l+z-l-d) \ln \frac{r_0 + \sqrt{r_0^2 + (l+z-l-d)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (l+z-l-d)^2}} + (l-z+l+d) \ln \frac{r_0 + \sqrt{r_0^2 + (l-z+l+d)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (l-z+l+d)^2}} \right] - \mu_0 n_1 n_2 I \left[ (l+z+l+d) \ln \frac{r_0 + \sqrt{r_0^2 + (l+z+l+d)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (l+z+l+d)^2}} + \right]$$

$$(l - z - l - d) \ln \frac{r_0 + \sqrt{r_0^2 + (l - z - l - d)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (l - z - l - d)^2}}, \quad (9)$$

所以,微通道电子瓶板的轴向场强分布为: $B = B_2 - B_1$ 。

图 5 中的两个励磁线圈间距为特定值,设  $B_a$  为单通道磁镜场轴线上的最大磁感应强度, $B_b$  为同一单通道磁镜场轴线上的最小磁感应强度,使两个线圈产生的  $B_a > B_b$ ,则定义磁镜比  $\gamma$  为

$$\gamma = B_a/B_b. \quad (10)$$

根据洛伦兹力,电子在磁场中运动的回旋半径  $R$  与磁感应强度  $B$  的关系为:

$$R = mv_0/(eB), \quad (11)$$

其中  $e$  和  $m$  分别为电子的电量和质量, $v_0$  为速度。由于  $R \propto 1/B$ , $B$  愈强,则  $R$  愈小,所以,在强磁场中,每个电子的活动被约束在一根磁感应线附近的很小范围内,亦即,电子回旋轨道的中心只能沿磁感应线作纵向移动,如图 6 所示。当电子在磁场中运动时,其所受磁矩  $M$  与电子横向动能和磁感应强度  $B$  有如下关系:

$$M = \left( \frac{1}{2}mv_{\perp}^2 \right) / B. \quad (12)$$

在梯度不太大的非均匀磁场中,任一带电粒子的角动量、磁矩和穿过回旋轨道所围面积的磁通量均保持不变。即  $M$  不变,当电子进入强磁场时,横向动能增加,纵向动能减少,以至减为 0,这时电子被返回,这样电子就在单通道的磁镜场中来回运动,达到积累时间的目的,而最终电子分布只能是速度大的离出口端近一些,但不能逃出<sup>[15]</sup>。当积累到所需时间后,再加电压将电子从图 6 右端口引出,电子就作用到 CCD 的对应感光单元上。

### 3.3 噪声分析

将磁镜原理用于成像系统,由于其工作过程是先于成像系统的部件,它只会带来逃逸损失,而不对其它部件产生影响。因此,我们仅讨论逃逸损失带来的噪声。设与轴线夹角为  $\Phi_c$  的入射电子进入强磁场时将被临界返回,而速度在以  $\Phi_c$  为顶角的圆锥体内的电子将逃逸出磁镜,逃逸锥  $\sin \Phi_c$  为

$$\sin \Phi_c = \sqrt{B_b/B_a} = \sqrt{1/\gamma}, \quad (13)$$

逃逸概率与磁镜比  $\gamma$  的关系为<sup>[16]</sup>

$$P = 1/\sqrt{2\gamma}. \quad (14)$$

由于电子的横向漂移损失很缓慢,约束电子云主要集中在镜轴附近,所以横向损失相当小,而只计纵向逃逸损失。当把磁镜装置应用于成像系统,进行光电子约束时,由于从光阴极逸出电子方向的不

确定性,合理选择磁镜轴线与光阴极法线夹角,使得逸出电子速度在磁镜场中的最概然分布偏离逃逸锥,就可降低约束光电子的损失。

### 3.4 模拟结果

由于我们希望电子在图 6 所示的单通道磁镜场的入口和出口口的磁场较强,中间的磁场较弱,而总的磁场分布梯度不能太大,才能达到电子在单通道磁镜场中来回运动,实现积累时间的目的。为此,通过 Mathematica 编程对所提出的磁镜装置进行数值模拟。设  $B_r = 1.23 \text{ T}$ ,  $B_2 = 1 \text{ T}$ ,  $R_1 = 25 \mu\text{m}$ ,  $R_2 = 2500 \mu\text{m}$ ,  $r_0 = 50000 \mu\text{m}$ ,  $r_1 = 2500 \mu\text{m}$ ,  $l = 5000 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = n_2 = 10000 / \text{m}$ ,  $I = 0.6 \text{ A}$ ,  $l = 5000 \mu\text{m}$ 。为了将 1 eV 能量的光电子约束在  $1 \mu\text{m}$  尺度范围内,在磁镜场设计中应使轴心  $z = 0$  处场强  $B_2$  在 1 T 左右,理论计算得出  $d = 13.91 \mu\text{m}$ 。

图 7 所示的模拟结果表明调节第 1 励磁线圈与第 2 励磁线圈的间距,可以获得不同的磁镜比  $\gamma$ 。

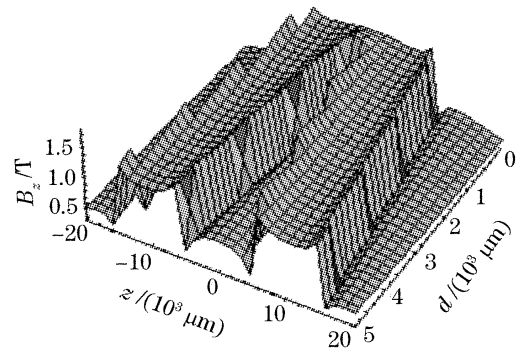


图 7 轴向磁场强度与间距和位置的模拟图

Fig. 7 Simulation figure of the intensity of axis magnetic field to distance and position

图 8 所示为微通道电子瓶板一端由永磁场和励磁场叠加形成的阵列磁镜场。

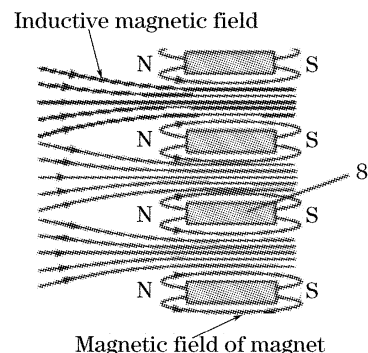
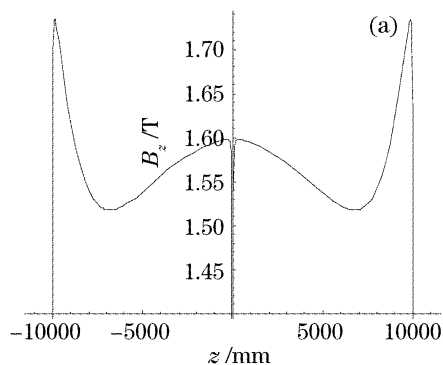


图 8 微通道电子瓶板内部一端的阵列磁镜场

Fig. 8 Magnetic mirror field array structure inside the microchannel electron vane plate

图9表明,混合结构形成的轴向场强分布在1 T以上有4个极大值:1.73 T、1.60 T、1.60 T、1.73 T,3个极小值:1.52 T、1 T、1.52 T,峰值位于 $\pm 331.78 \mu\text{m}$ 和 $\pm 9882.04 \mu\text{m}$ ,也就是说构成了3级磁镜的串联。轴心处约束电子的逃逸概率为



0.38, 低于单级磁镜的磁镜比1.73时的逃逸率0.54,确实提高了光电子的积累能力。又因峰值斜率为 $0.0000136[(1.73-1.6)/(9882.04-331.78)]$ ,所以,在磁镜端口将产生比较均匀的场强分布。至此证明了所提微通道电子瓶板即磁镜装置的可行性。

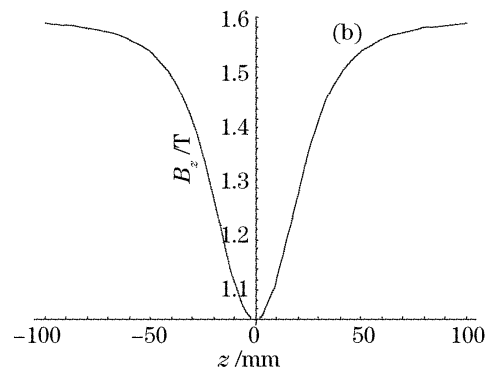


图9 轴向合磁场的分布

Fig.9 Axial distribution of magnetic field intensity

## 4 讨论及结论

现有微光探测技术要做到低照度探测,尽管采取降低 CCD 硅衬底的温度,可以提高电子的积累时间,但本文指出用控制温度的方法实现低照度探测的缺点后,设计了磁镜装置——微通道电子瓶板的方法,可以在常温下应用磁场约束光电子,使低照度的光通量达到时间上的积累,保证足够的光能,而又不会给微光成像系统其他噪声源带来附加噪声,从而实现常温下更低照度探测的目的。通过研究,本文得出如下结论:

1) 与现有技术方案比较后,给出国际技术中采取降低 CCD 温度实现低照度探测的理论解释,阐述了其更低照度探测的局限和实现技术中的复杂性。

2) 在成像系统中,提出在光阴极与光电子接收器之间耦合一个微通道电子瓶板结构的方法,以提高微光成像的低照度探测极限,并对磁镜场进行了理论论证。

3) 分析了将磁镜原理用于成像系统的逃逸损失所带来的噪声。

4) 计算机模拟结果证明我们设计的结构是可行的。

5) 该方案能实现常温下微光成像系统探测 $10^{-11} \text{lx}$  极限的目的。

## 参 考 文 献

1 Song Fenghua. *The Modern Space Photoelectricity System and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press 2004. 297~298 (in Chinese)

宋丰华. 现代空间光电系统及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 297~298

2 Tang Yuanhe, Zhang Chunmin, He Jian *et al.*. Study of the detection mode of upper atmospheric wind field based on Lorentzian profile aurora[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 721~725 (in Chinese)

唐远河,张淳民,贺健等. 基于洛伦兹线型极光的上层大气风场探测模式研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 721~725

3 Wang Susheng. Microscopic photon counting image system and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1072~1076 (in Chinese)

王苏生. 显微光子计数成像系统及其应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1072~1076

4 Shen Feng, Zhang Xuejun, Rao Changhui *et al.*. Optical performance of image intensified CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 601~606 (in Chinese)

沈锋,张学军,饶长辉等. 像增强型 CCD 探测器的光学特性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 601~606

5 Liu Guangrong, Zuo Fang, Zhou Liwei *et al.*. Research of gain and SNR of EBCCD[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 120~122 (in Chinese)

刘广荣,左昉,周立伟等. EBCCD 的增益及信噪比研究[J]. *光学技术*, 2002, **28**(2): 120~122

6 Peng Lü, Yuanhe Tang, Kai Liu *et al.*. Study CCD image motion for remote sensing detection [C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6279**: 62795S-1~62795S-7

7 EMCCD CCD. <http://www.emccd.com>

8 Du Yufei, Tang Yuanhe, Liu Kai *et al.*. A instrument of CCD (Charge coupled devices) of the circumambulate transferred area array[P]. No. 2006101045880 (in Chinese)

独育飞,唐远河,刘锴等. 绕行转移面阵电荷耦合器件 CCD [P]. 专利申请号 No. 2006101045880, 公开(公告)号 CN1921133

9 Du Yufei, Tang Yuanhe, Liu Kai *et al.*. Design and study of a new crepuscular imaging CCD [C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6279**: 62795P-1~62795P-7

10 Tang Yuanhe, Du Yufei, Liu Kai *et al.*. A instrument to enhance the detecting limitation of the low-light imaging system[P]. No. 200710017276.0 (in Chinese)

唐远河,独育飞,刘锴等. 一种提高成像系统微光探测性能的像增强器[P]. 专利申请号 No. 200710017276.0

- 11 Shen Mangzuo, Ma Wenli, Liao Sheng *et al.*. Development of a cryogenic optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 202~205 (in Chinese)  
沈忙作, 马文礼, 廖胜等. 低温光学系统的研制[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 202~205
- 12 Bai Tingzhu, Jin Weiqi. *The Principle and Technology of Photoelectricity Image* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 306 (in Chinese)  
白廷柱, 金伟其. *光电成像原理与技术*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 306
- 13 Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng *et al.*. *Semiconductor Physics* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003. 32, 75 (in Chinese)  
刘恩科, 朱秉升, 罗晋生等. *半导体物理学*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 32, 75
- 14 Peng Quanling, Zhao Qi. Using axial magnetized permanent rings to build axial gradient magnetic field[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2003, **27**(4): 363~366 (in Chinese)  
彭全岭, 赵起. 利用轴向磁化的永磁环制造轴向梯度磁场[J]. *高能物理与核物理*, 2003, **27**(4): 363~366
- 15 Yao Ruohe, Wu Weijing, Zhang Xiaodong *et al.*. Numerical simulation of charged particles motion in magnetic field confinement[J]. *Vacuum Science and Technology*. 2004, **24**(2): 105~108 (in Chinese)  
姚若河, 吴为敬, 张晓东等. 磁镜场约束中粒子运动的数值计算[J]. *真空科学与技术学报*, 2004, **24**(2): 105~108
- 16 Tan Baolin. Comparison and combination of MCF and ICF[J]. *Physics*, 2002, **31**(3): 159~161 (in Chinese)  
谭宝林. 受控核聚变两大途径的对比与结合[J]. *物理*, 2002, **31**(3): 159~161

## 《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

**具体要求:**综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

**引言,**要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

**正文,**是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

**结论,**是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

**参考文献,**是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

《中国激光》编辑部