

天文 CCD 的技术现状与发展

余 宁

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文概述了用于天文低光度测量的 CCD 技术现状以及它在低噪声、蓝敏技术、电荷转移效率、小像素和大面阵等诸方面的新进展。

一、引 言

最近几年来随着 MOS 半导体制作技术和计算机技术的迅速发展, CCD 在天文上的应用已日益广泛并获得了极大的成功。CCD 探测器的灵敏、方便、快速、精确等特点十分适合天文观测的需要,因而成为装备在现代天文望远镜上最主要的检测工具。此外由于投资少,效益高,对原有的小型望远镜而言 CCD 也是一个最好的补充手段。

天文学科与 CCD 的关系非常紧密。以至从 CCD 的诞生之日起, CCD 的天文应用就对其发展给予了很大的影响。天文观测的特点,包括低光度、宽频谱、大动态范围、大视场和高空间分辨率对探测器提出了很高的要求。而这些严格要求实际上促进了 CCD 各项性能的改进。可以明显地看出最近几年里 CCD 的某些特性参数例如读出噪声、量子效率和电荷转移效率等正在更快地趋近理论极限。

本文以 CCD 的各个特性参数为线索,论述适用于天文微光探测的慢扫描 CCD 的发展和近况。

二、CCD 器件的特性参数

当描述一个 CCD 的特性或评价其品质优劣时,人们定义了下述特性参数:1. 量子效率与光谱响应;2. 读出噪声;3. 暗流;4. 电荷转移效率;5. 动态范围;6. 线性;7. 满阱电荷能力;8. 空间分辨率;9. 电荷收集能力;其中某些参数为其他光电器件所共有,而电荷转移效率、满阱电荷能力和电荷收集能力则是 CCD 器件所特有。电荷收集能力特性仅当 CCD 被用于光子计数模式时才特别有意义。

一般而言,作为一个高质量 CCD 芯片,上述参数应尽量达到完美。然而实现这一点并非易事。这不仅仅是一个制造技术问题。从工作原理上来讲,某些参数就是互相制约的。例

1990年3月5日收到。

1990年9月3日收到修改稿。

如暗流与电荷转移效率之间, 满阱能力与空间分辨率之间近乎是一对矛盾。事实上不同的天文课题对不同的 CCD 特性有所偏重。若从通用出发按优先排队的话, 对天文应用来说, CCD 的量子效率、读出噪声和电荷转移效率最为重要。

改进 CCD 特性有两个方向。第一个方向是尽量优化某一类参数如量子效率、满阱能力、电荷转移效率等, 使其达到极限水平。第二个方向是尽量设法减少某些参数如读出噪声、暗流所表征的有害影响。经过近 20 年的努力, 这些 CCD 参数已经得到了明显的改善。回顾历史, 70 年代的 CCD 在光学短波段(4000 Å 附近)的量子效率至多为 5%, 而今天已经可以达到 50% 以上。读出噪声则降低了十几倍, 由 $100e^-$ 以上降到了 $10e^-$ 以下。暗流的减小也十分显著, 由 $2nA/cm^2$ 下降到了十几 pA/cm^2 ^[1]。至于电荷转移效率, 它在早期的表面沟道器件中仅为 0.99。采用了埋沟技术以后, 这项指标已经达到了 0.999999。具有上述综合水平的 CCD 器件在地面望远镜上观测 26mag 的天体并非一件难事了。

三、减少噪声与暗流

1. 器件读出噪声

读出噪声的影响对许多科学应用来说是首要考虑的问题。各种来源的噪声限制了 CCD 信号测量的灵敏度和精确性。天文观测中经常有一些暗弱的研究对象, 光度仅为 1 光子/每秒 × 每像素。这就要求探测器具有高量子效率的同时还要有低的读出噪声, 以期达到足够的信噪比。

除了具有泊松统计律的信号光子噪声和天光背景噪声不可避免以外(这将是噪声的理论极限), 人们主要致力于减少 CCD 系统内部的各种噪声。这包括两个方面的工作。(1) CCD 芯片本身。这涉及到改进芯片结构、消除像素缺陷(含设计缺陷、半导体材料缺陷和制造缺陷)、减小芯片输出放大器的 $1/f$ 噪声等。CCD 采用埋沟技术以后, 减弱了电子在硅界面上的相互作用, 对降低 CCD 固有噪声起了相当大的作用。(2) 改进外部电路。这部工作 CCD 用户能够有所作为的。降低噪声的有效措施有:(1) 选用低噪声的 FET 放大器和低噪声放大, 积分电路设计;(2) 模拟电路与数字电路隔离, 包括电源隔离和布线设计;(3) 有效的滤波和适当的电压钳位;(4) 精确、稳定的直流偏置, 尤其是 CCD 芯片的直流偏置;(5) 仔细调整逻辑时钟驱动脉冲的相位和幅度;(6) 把前置放大器放入杜瓦瓶低温环境中。采取上述做法后, 北京天文台的两台 CCD 探测器的读出噪声分别只有 $11.2e^-$ 和 $8.7e^-$, 这在国内已是最好水平。而在国外有 $4e^-$ 水平的读出噪声的报道^[2]。也许在最近几年里读出噪声能够最终跨过 $1e^-$ 的门槛。这个界限对进行光子计数的低能软 X 射线($\sim 300eV$) 和 EUV 波段的能谱测量有着重要意义。由于需要 $3.65eV$ 的辐射能量才能够在硅半导体中打出一个电子空穴对, 那么只有以 $1e^-$ 低噪声的水平才能获得足够好的能量分辨率。

2. 暗流与 MPP-CCD

暗流对低光度成像的危害甚大。它主要产生于半导体中电子无规则热运动。暗流增加了噪声背景而使器件很快饱和, 导致对暗天体的观测无法完成必要的积分时间。降低暗流的通用方法是对 CCD 进行冷却。然而深度冷却将同时降低了电荷转移效率。这种现象对某些器

件尤为严重。如图 1 所示，我们对 Tektronix CCD 所做的某次测试定性地说明当工作温度由 -82°C 降低至 -120°C 时，所读出像素的电荷尾大大地增加了。

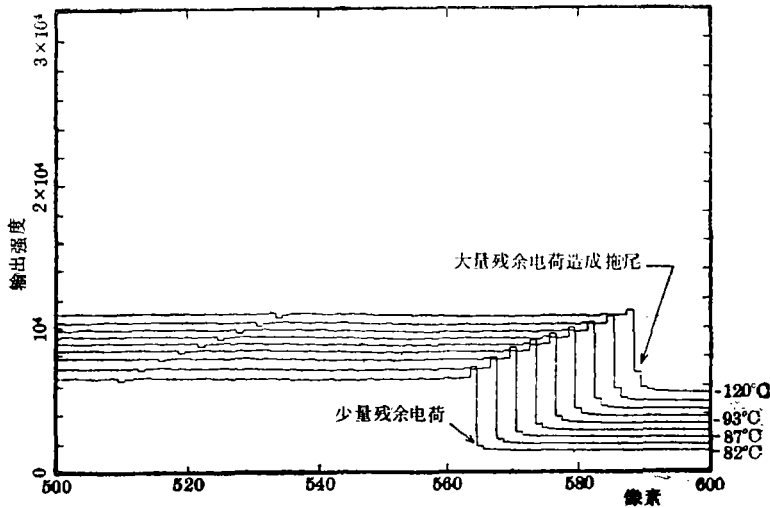


图 1 当温度下降时，电荷转移效率渐劣

为解决上述困难和获得一种能够在室温下工作的 CCD，人们突破了多相 CCD 的传统设计思想。这便是 MPP-CCD (multi-pinned-phase CCD)^[3] 的问世。MPP-CCD 运用了在信号积分周期里全部的电极都加以反相偏置 (加负电压) 的新概念。它使得在硅衬层中由热运动生成的电子无法跳到上层 Si-SiO₂ 界面上，因而不能形成暗流。至于用来收集信号电荷的势阱则另行设法解决，即由注入 n 沟道的硼 P 离子形成势垒，每个势垒之间构成势阱。读出时仍用多相时钟驱动。

MPP-CCD 是最新一代的 CCD。它的低暗流产生率 ($30\text{pA}/\text{cm}^2$, 室温) 带来了一系列的好处：(1) 省去了昂贵的真空冷却系统，或用半导体致冷即可承担观测所需；(2) 常温下工作明显地改善了电荷转移效率，还可以略微增加量子效率；(3) 过度曝光之后造成的某些 CCD 的残像问题可获解决；(4) 无需再担心观测窗口凝结水汽。此外，MPP-CCD 的读出噪声也很小，为 $5e^-$ 。由势垒的间隙和高度所确定的满阱能力可达 $2 \times 10^6 e^-$ ^[4]。它的电荷转移效率也相当惊人，高达 0.9999995。综合上述特点，说它代表了当前 CCD 的发展方向一点也不过份。北京天文台已经购买了一片 Ford 2048×2048 MPP-CCD，正在研制其照相机。相信这项工作完成之后，效果一定不错。

四、量子效率和蓝敏技术

1. 量子效率和光谱响应

一般认为 CCD 具有比较高的量子效率和宽带响应。它的光谱范围从 1\AA 达 11000\AA 。此范围内包括 X 射线 ($1\text{\AA} - 100\text{\AA}$)、EUV 和 UV 波段 ($100\text{\AA} - 4000\text{\AA}$)、可见光区以及近

红外区($7000 \text{ \AA} - 1100 \text{ nm}$)。CCD 的峰值量子效率在 7000 \AA 左右, 在 X 射线区也有几乎同样高的量子效率。然而不幸的是从 4000 \AA 到 1000 \AA 的范围内硅对短波光子的吸收十分严重(图 2), 以致 CCD 在蓝光和紫外区的量子效率极低, 不足以胜任天文观测任务。

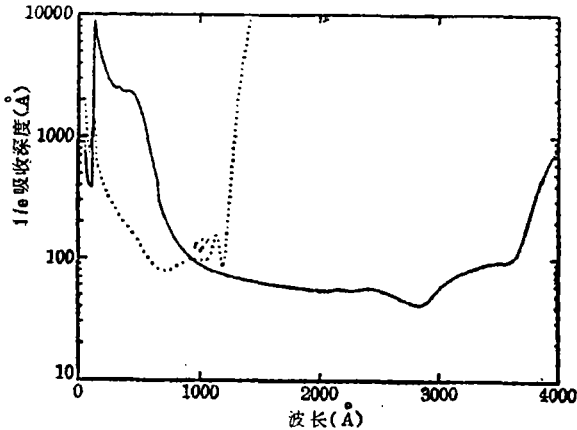


图 2 光子在 Si (实线)和 SiO_2 (虚线)中的吸收深度

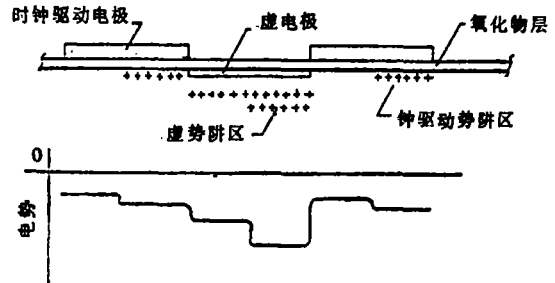


图 3 虚相 CCD 原理

为了弥补 CCD 蓝端灵敏度的先天不足, 人们采用了多种敏化 CCD 的技术。其中包括特殊设计的 CCD, 对普通 CCD 芯片再加工, 或者在观测之前对 CCD 进行某些物理、化学预处理等等。在实用中比较行之有效的方法有: 虚相 CCD、背照薄型 CCD 和镀膜 CCD。

2. 虚相 CCD

虚相 CCD (virtual-phase CCD)^[5] 是 TI 公司的产品。顾名思义, 它与多相 CCD 的原理不同, 实际上是工作于一种单相时钟方式。虚相 CCD 利用注入 SiO_2 绝缘层中的 n 离子构成“虚电极”, 由这些虚电极代替其所在位置那部份时钟驱动的功能。虚电极下方也可以形成相应的势阱(图 3)。

虚相 CCD 在整个软 X 射线到近红外区都有很好的谱响应。它的满阱能力也不错 ($\sim 300,000 e^-$), 因而能够提供比较大的动态范围。它的暗流可低至 10 pA/cm^2 。因为只用单相驱动, 虚相 CCD 的逻辑电路也很简单。但它有一个很大的缺陷即读出噪声比较大, 一般都在 $30 e^-$ 以上。它的电荷转移效率也不太好。这两条缺陷限制了虚相 CCD 的推广与应用。然而如果这两个问题能获解决, 虚相 CCD 将是很好的蓝敏器件。

3. 背照薄型 CCD

背照薄型技术是由 JPL 首先发展起来的, 尔后为其它公司所采用。如前所述, 正面照光的 CCD 由于多晶硅电极对短波光子的衰减很大, 造成了 UV 量子效率的严重下降, 所以人们自然地想到从背面对 CCD 进行照光的方法。然而 CCD 背面硅衬底层约 $260 \mu\text{m}$ 厚, 大大超过了一般光子的穿透深度。因此必须使用化学侵蚀方法把衬底厚度减薄至 $10 \mu\text{m}$ 左右。其处理过程是用蜡把 CCD 边缘保护起来, 按特定程序用氢氟酸、硝酸等对芯片背面浸蚀一定时间。问题的关键是精确控制浸蚀的厚度和均匀性。此外操作不慎可能损坏芯片。

背照薄型 CCD 已经成为天文观测中主要采用的蓝敏型 CCD。然而它还有一些美中不足。其一是干涉条纹效应, 这种干涉条纹在窄带或光谱观测时表现比较严重^[6], 需要做比较认真

的计算机改正^[7,8]。其二是量子效率的不稳定性, 或称为量子效率迟滞(QE Hysteresis)^[9]。它的表现是对不同的曝光过程量子效率略有不同。这种现象的发生机制比较复杂, 与 CCD 的初始能态、工作温度都有关系。量子效率的不稳定将会给天文测量的精度带来一定影响。它增加了平场改正的复杂性。应当注意到, 平场改正方法本质上只能改正量子效率随空间分布的不均匀性, 而对时间因素引起的变化几乎无能为力。薄型 CCD 的第三个缺点是在 Si-SiO₂ 界面上存在着一种势阱, 构成了所谓的“死层”。在死层中信号光电子会与空穴发生重新复合而损失掉一部分入射信号。

为了克服上述缺点, 人们采用了一些补救措施。有两种方法效果显著。

(1) 紫外预照射技术

“紫外预照射”(UV flood)利用一定强度的 UV 光源($\lambda \sim 2500 \text{ \AA}$)在观测前预照 CCD, 以便打出足够多的“剩余电荷”。这些负电荷与基底内的正电荷复合而减少了观测时信号电荷的损失。这种方法在一定程度上消除了死层的影响, 同时也改变了 Si-SiO₂ 界面状态从而改善了量子效率的不稳定性。Palomar 天文台近几年来一直使用紫外预照技术处理双通道摄谱仪上薄型 TICC D 芯片^[10]。Oke 等人使用汞灯(2537 \AA)或锌灯(2138 \AA)在室温下照射 CCD 约 15 分钟, 然后立刻加以冷却, 以便使紫外预照射产生的自由电子能够保持较长时间。他们还曾用干燥的纯氧充入杜瓦瓶, 用 CCD 芯片浸泡在纯氧中 1—3 天后再使用。此种方法能够提高平均 20% 左右的量子效率。其机理可能与吸附到硅表面的氧分子暂时改变了表面态有关。

紫外预照射技术的不足之处是 UV 灵敏度不易长时间保持。经过几天后剩余电荷便会消散而失去作用, 而每次观测前进行一次紫外照射操作确实不太方便。

(2) 电子预注入技术

电子预注入(Flash gate)^[11]避免了紫外预照射要反复进行的缺点。它将一层极薄的氧化物生长在 CCD 背面(图 4), 再在上面沉积一层铂单分子层(10 \AA 厚)。铂提供的自由电子不断地穿过氧化物层到达硅衬底。这些电子有效地把信号电荷驱赶到 CCD 正面的势阱。电子

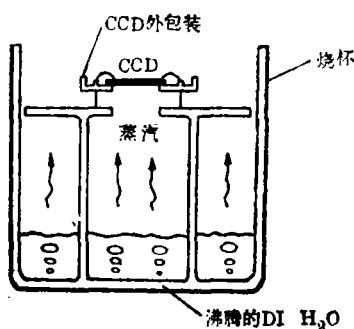


图 4 用于在 CCD 背面生长一层“氧化物”的装置

预注入的使用效果基本上与紫外预照射相同, 只不过它永久地提供了剩余电子的来源。

4. CCD 镀膜

虚相 CCD 和背照薄型 CCD 都可以在宽带范围内获得较高的量子效率。但由于它们的制作工艺复杂, 成本昂贵, 其销售价格可在预见的将来不会降下来。加之一些其他原因, 目前为止蓝敏 CCD 的商品化程度远不及红敏 CCD。为了满足对蓝敏 CCD 的需求, 人们尝试了更简单的方法去增加 CCD 的 UV 灵敏度。这就引入了镀膜方法。下面描述两种不同性质的镀膜。

第一种方法基于波长转换(down-converter)的原理。它把某些荧光物质(如六苯并苯)蒸发到 CCD 表面上形成一层薄膜。这层膜将吸收短波光光子并把它们在 5600 \AA 附近发射出来。一般而言 CCD 在此波长上的量子效率都是不错的。因而此方法间接地提高了 UV 波段

的量子效率。据说现在已经有了更好的涂料来进行波长转换^[12]。

此外值得说明的是由于这层膜极薄，所以它不会影响 CCD 在可见光和近红 外区的量子效率，也不会影响 CCD 器件的调制转移函数(MTF)。并且它也足够牢固，反复冷却时不会起皱也不产生裂缝。唯一的一个问题是经强光照射之后，薄膜的品质可能下降。但考虑到一般天文测量都属于低照度应用，不会对镀膜造成损害。

UV 波段的量子效率低除了由于短波光子被严重吸收之外，硅表面对短波长的反射指数较大也是一个原因。入射光的反射损失在 3700 \AA 处可达 50%。因此在 CCD 上涂一层增透膜也是很有有效的。用作增透膜的涂料有多种，例如 HfO_2 ， PbF_2 ，和 Al_2O_3 ^[13]。这些涂料可以单独使用也可以复合使用，效果略有差异。

当使用了增透膜以后，紫外预照射技术不再适用。这是因为增透膜对 CCD 表面起到了保护作用。但是具有电子预注入的薄型 CCD 加上了增透膜之后，两者的联合作用能取得非常好的效果。如图 5 所示，峰值量子效率几乎可达 90%。

尽管单纯的镀膜所改善的量子效率不如虚相 CCD 和薄型 CCD，但它还是有突出的优点。首先镀膜可以适用于各种类型的 CCD，必要时薄膜可以除去而恢复原状。并且这种方法成本低廉。例如一片 TH7882 CCD(厚型， 576×384 像素)售价 2300 美元。若请 Thomson 公司再镀膜加工成蓝敏 CCD，只需追加 2000 美元的费用。而类似尺寸的 Tetrionix 背照薄型 CCD 芯片(512×512 像素)则需要 8000 美元才能购得。相比之下，镀膜 CCD 不失为蓝敏 CCD 的一种好的选择。

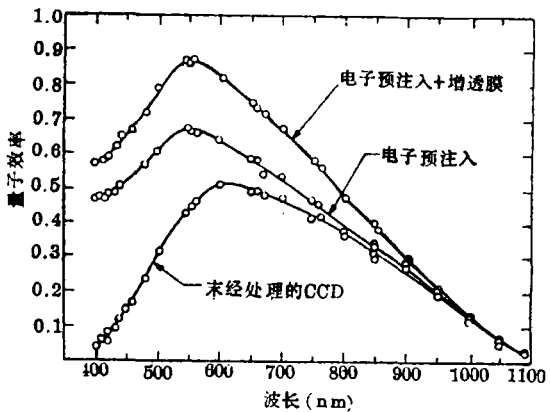


图 5 三种不同背照 CCD 的量子效率

五、小像素与大面阵 CCD

1. 像素尺寸与满阱电荷能力

目前制作的 CCD 在小像素尺寸和大满阱能力方面也取得了一定的进展。天文探测器常常需要有比较高的空间分辨率。而减小像素尺寸则意味着提高分辨本领。不言而喻制作小像素在工艺上有些困难，但更大的威胁是当像素变小时满阱能力会相应降低。为了解决这一矛盾，Ford Aerospace 又重新采用了表面沟道 CCD 技术。表面沟道比埋沟有更大的满阱能力，而且技术的进步使得今天的表面沟道 CCD 的噪声比过去小了许多倍。因此回到表面沟道也是顺理成章的事。今天 Ford Aerospace 和 Kodak 公司已经制作出 $7.5\mu\text{m}$ 和 $7\mu\text{m}$ 像素大小的 CCD，同时并未减小满阱能力。而 Ford Aerospace 的另一种 $18\mu\text{m}$ 像素的 CCD 则获得了 $350000e^-$ 的高满阱能力^[14]。

2. 大面阵 CCD 的发展

很显然, 天文观测对大面阵 CCD 的需求很迫切, 由大面阵 CCD 可获得更大的观测视场或提高工作效率。然而前些年天文学家一直感到缺乏优质的大面积 CCD。其原因是大面阵制作困难, 发生工艺缺陷的机会多, 例如产生各种热点、暗点和电荷陷阱(traps)。电荷陷阱如果出现在芯片串行输出寄存器上整个器件就报废了。其次大面阵 CCD 对电荷转移效率要求极高。设想读出一帧 2048×2048 CCD 像如同读出 16 帧 512×512 CCD 像, 这种要求决不是过份的。解决电荷转移效率问题除了在工艺、材料上想办法以外, 通常还需要在大面阵 CCD 上制备二个甚至四个输出端。这带来了几点好处: (1) 多个寄存器同时读出可以减少图像的读出时间; (2) 缩短了电荷转移的路径而减少了电荷损失; (3) 可以选择读出噪声相对最小的输出放大器作为信号输出端; (4) 可以任意选择电荷转移效率高的方向作为光谱色散方向。

现在有多家厂商已经制作了 1K 级别的 CCD, 如 1024×1024 或者其他规格的大面阵。在此基础上, 有三家公司率先跨入了制作 2048×2048 CCD 的阶段。它们分别是 Tektronix ($27\mu\text{m}$ 像素)、Ford Aerospace ($15\mu\text{m}$) 以及 Kodak。Ford Aerospace 甚至开始了 4096×4096 CCD ($7.5\mu\text{m}$) 的研制计划, 根据现在的发展速度来看很快就会问世。

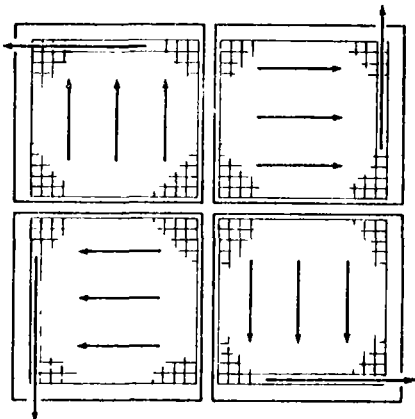


图 6 4 片 CCD 组合构成一个 CCD 平面, 间隙小于 2 个像素

另一种获得 CCD 大面阵的方法是利用多个 CCD 芯片拼接。拼接 CCD 的数目和格式是可变的。如 MIT 的 Barry Burke 等人利用 4 个 420×420 像素 CCD 拼接在一个焦平面上^[15]。(见图 6) 拼接过程中存在一些机械和电子方面的技术难点。最严格的要求是四个芯片平面的水平和垂直位置精度都要控制在 $1\mu\text{m}$ 以下。对成像无效的相邻芯片边缘的接缝宽度也应该尽量狭窄, 最好在 1 个像素宽度以下。具体处理的办法是利用钻石刀片将边缘上的多余部份切割掉。大面阵拼接 CCD 的冷却装置将会变得更为复杂。对各个导热面的设计要求对每个 CCD 芯片均匀

地传热, 否则会引起暗流和电荷转移效率的很大差异。然而无论如何, 各拼接 CCD 芯片之间的特性参数也不可能完全一致。这将造成在视场内观测结果的不均匀性。对这种不均匀除了量子效率差异可用通常的平场改正以外, 暗流和读出噪声的影响都要分别根据每个芯片的不同情况进行计算和修正。

拼接 CCD 有多个输出端, 因此也有高速读出等优点。此外它还有一个特点, 即当某个芯片存在亮源而发生电荷溢出时, 光污染被局限在一个芯片内, 视场的其他部分不会受到丝毫影响。这在某种意义上使得 CCD 的整个动态范围得到了充分利用。

Thomson 公司等已有拼接 CCD 的成品出售, 也可代替用户拼接各种所需规格和特殊用途的 CCD, 当然价格不菲。

表 1 部分大面阵 CCD 的特性及价格(仅供参考)

厂 商	FORD	THOMSON	TI	KODAK	TEKTRONIX
芯片格式	1024×1024	1024×1024	1024×1024	1320×1035	2048×2048
像素尺寸(um)	12.3×12.3	19.0×19.0	12.0×12.0	6.8×6.8	27.0×27.0
成像面积(mm)	12.3×12.3	19.5×19.5	12.0×12.2	8.98×7.04	55.3×55.3
饱和信号(e ⁻)	35000	400000	60000	45000	400000
输出灵敏度	3.15μV/e ⁻	1.0μV/e ⁻	6.0μV/e ⁻	12μV/e ⁻	0.5μV/e ⁻
暗 流(e ⁻)	8e ⁻ (-50℃)	8e ⁻ (-40℃)	.1e ⁻ (-50℃)	1e ⁻ (-50℃)	—
动态范围	73db	—	60db	60db	80db
量子效率	—	42%(650nm)	60%(650nm)	45%(650nm)	60%(700nm)
电荷转移效率	0.99995	0.99999	0.99995	0.99999	0.99999
最大数据率	10 MHz	10 MHz	10 MHz	20 MHz	50 KHz
相位/照明	2/4 相, 前照	4 相, 前照	虚相, 前照	2 相, 前照	3 相, 背/前
输出放大器	单 FET	单 FET	双 FET	双 FET	双 FET
价格(\$)/等级	—	10—25k/1—2	6—6.5k/1	1—29k/1—3	6—40k/1—4

参 考 文 献

- [1] Blouk, M. M. and Yang, F. H. et al., in *Instruments for the Groundbased Optical Astronomy*, ed. by L. B. Robinson, p. 462. (1988).
- [2] Blouk, M. M. and corrie, B. et al., *Opt. Eng.*, 26 (1987), 838.
- [3] Janesick, J. R. and Elliott, T. et al., *SPIE, Opt. Sensors and Elec. Photography*, 1071 (1989), 11.
- [4] Janesick, J. R. 私人通信 (1988).
- [5] Hsieh, S. M. and Hosack, H. H., *Opt. Eng.*, 26 (1988), 884.
- [6] 叶彬浔, 孟新民, 王传晋, *天文学报*, 26 (1985), 290.
- [7] 陈建生, 范小明, 唐小英, *天文学报*, 28 (1987), 303.
- [8] 秦松年, 李如凤, 高彩, *天文学报*, 30 (1989), 387.
- [9] Janesick, J. R. 私人通信 (1988).
- [10] Oke, J. B. and Harris, F. H. et al., *Publ Astron. Soc. Pacific.*, 100 (1988), 118.
- [11] Janesick, J. R. and Campbell, J. et al., *Opt. Eng.*, 26 (1987), 853.
- [12] 王传晋, *紫金山天文台台刊*, 8 (1989), 130.
- [13] Lesser, M., *Opt. Eng.*, 26 (1987), 911.
- [14] Janesick, J. R., 私人通信 (1988).
- [15] Burke, B. E. and Mountain, R. W. et al., *Opt. Eng.*, 26 (1987), 890.

(责任编辑 舒似竹)

The Current Status and Progress of the CCD for Astronomical Observations in Recent Years

Yu Ning

(*Beijing Astronomical Observatory, Academia sinica*)

Abstract

This paper reviews that for astronomical observations the current technical status of the slow-scan, cooled CCDs, and describes some new progress on the dark current, readout noise, quantum efficiency in the UV and Blue, charge-transfer efficiency, small pixels and large well capacity, as well as large area CCD in recent years.