

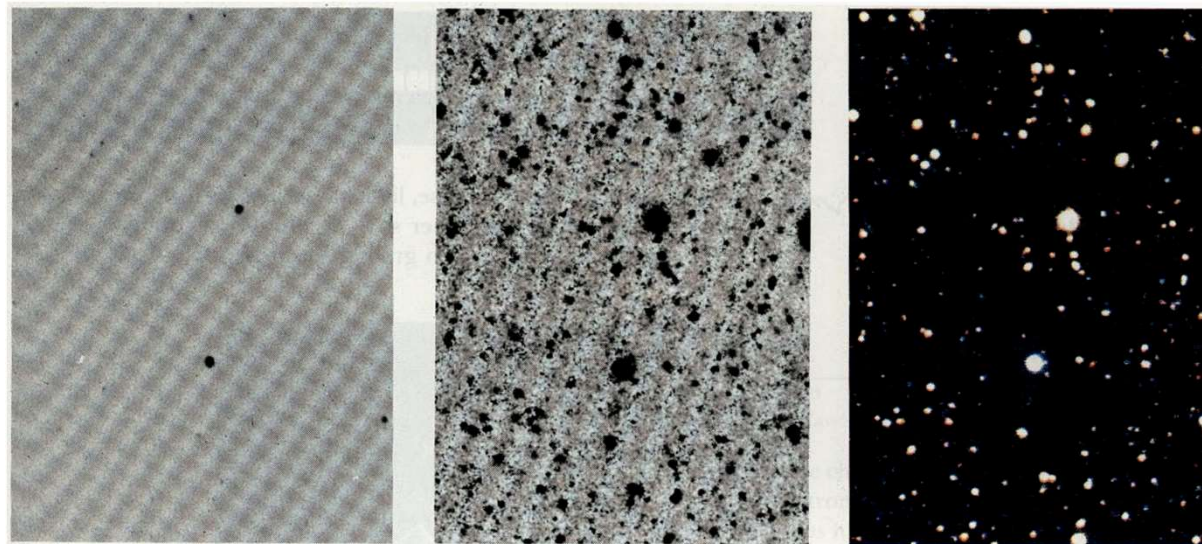
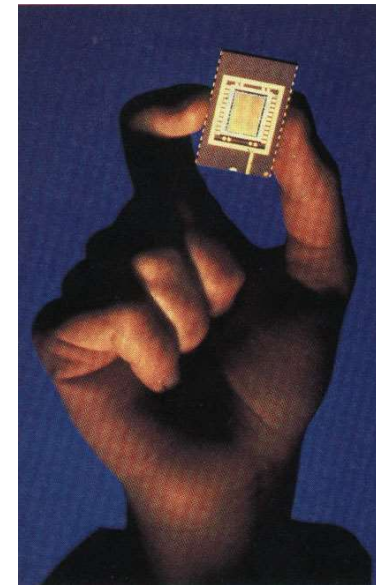
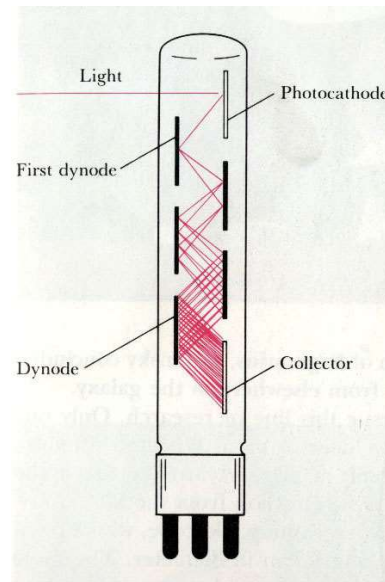
第三章 辐射探测器

《天文可见光探测器》 王传晋 叶彬浔

- 辐射探测器是将辐射能转化为可测量信号的器件。其原理是利用辐射和探测介质中的微粒结构的相互作用将辐射的能量全部或部分地转移给介质中的粒子，在一定的外界条件下，引起宏观尺度上可测量的信号。

- 常用的能量转化方式有下列几种：
 - 辐射能转化为**化学能**：辐射引起物质的化学变化，如照相底片。
 - 辐射能转化为**电能**：辐射作用使电子从物质中释放出来，产生光电流或光电压。这类器件称为光电器件，如光电倍增管。
 - 辐射能转化为**热能**：在辐射作用下，物质变热，温度升高，称为热探测器，如热电偶等。
 - 一种波长的辐射转化为**另一种波长的辐射**，如闪烁体。

- 照相底片
- 光电倍增管
- CCD



§ 1 反映辐射探测器性能的参数

一、量子效率（QE）和可探测量子效率（DQE）

- **量子效率**：光子和探测器作用时，产生的光子事件和入射光子数之比。
 - 是用来判断探测器潜在灵敏度的指标

- **可探测量子效率**：探测器输出信噪比的平方与输入信噪比的平方之比。

$$DQE = \frac{(S/N)_{out}^2}{(S/N)_{in}^2}$$

– 表示信号由于通过探测而引起的变坏。

- 从天体来的光子在各个相继的等时间间隔内到达辐射探测器的光子数不是一个常数，而是一个沿某一平均值上下随机起伏的值，经验表明它符合Poisson（泊松）分布，即单位时间间隔内入射 r 个光子的几率为：

$$p(r) = e^{-k} k^r / r!$$

– 信号 n_{in} 就是其平均数 k

– 均方根噪声等于 \sqrt{k}

– 输入信噪比 $(S / N)_{in} = \frac{k}{\sqrt{k}} = \sqrt{k} = \sqrt{n_{in}}$

- 在理想情况下（即在探测过程中没有伴随噪声事件），那么探测器输出的可记录事件数：

$$n_{out} = QE \cdot n_{in}$$

也将满足泊松分布，同样它的均方根噪声可以写为： $\sqrt{n_{out}}$

则输出信噪比： $(S / N)_{out} = \frac{n_{out}}{\sqrt{n_{out}}} = \sqrt{n_{out}}$

- 可探测量子效率：

$$DQE = \frac{(S / N)_{out}^2}{(S / N)_{in}^2} = \frac{n_{out}}{n_{in}} = QE$$

– 即对于理想探测器： DQE=QE

– 而一般情况下： DQE<QE

二、响应度（R）和线性：

- **响应度**：又称灵敏度，它定义为入射单位功率的辐射流所引起的探测器输出信号的反应（对于人眼、光电管），或入射单位辐射能所引起探测器输出信号的反映（对于照相底片）。
- 当探测器的输出信号和输入通量的比率固定不变时，亦即当输入通量增加，而输出信号将随之成正比增加，这种探测器称为**线性探测器**，反之称为非线性探测器。

三、光谱响应 (R_λ)

- 光谱响应又称为分光灵敏度、分光响应。
- 是指单色辐射作用时探测器的响应度，用于表示探测器对不同波长辐射的响应特性。
- 探测器的光谱响应常用量子效率来表征，量子效率随波长的变化即为光谱响应曲线。
- 光谱响应是描述探测器对不同光谱区等辐射量具有的不同反应，亦即探测器所谓的选择性。

四、分辨率：

- **空间分辨率**：描述探测器鉴别空间密集像点的能力，通常以每毫米所能分辨的线对的数目来表示。
- **时间分辨率**：指探测器记录或反应辐射快速变化的能力。从辐射进入探测器，到探测器发生反应的这段时间称为响应时间。

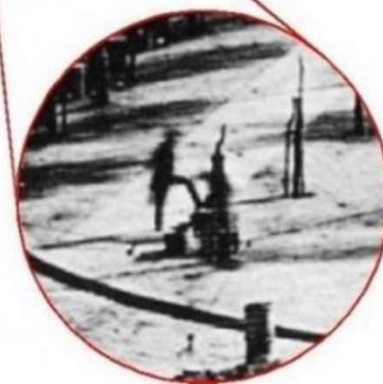
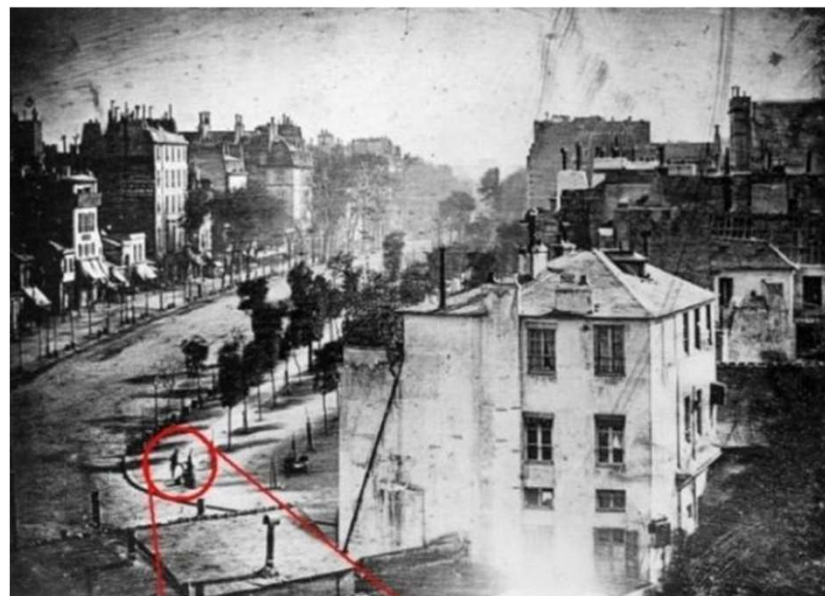
五、探测率：

- 探测器能探测到的最小辐射功率的倒数称为探测率。
- 用噪声等效功率（NEP）来表示，产生如噪声那样大的信号所需的辐射功率即为噪声等效功率。
- 探测率是噪声等效功率的倒数。

§ 2 照相底片:

- 1839年达盖尔发明照相乳胶
- 1845年太阳黑子像
- 1860年恒星观测

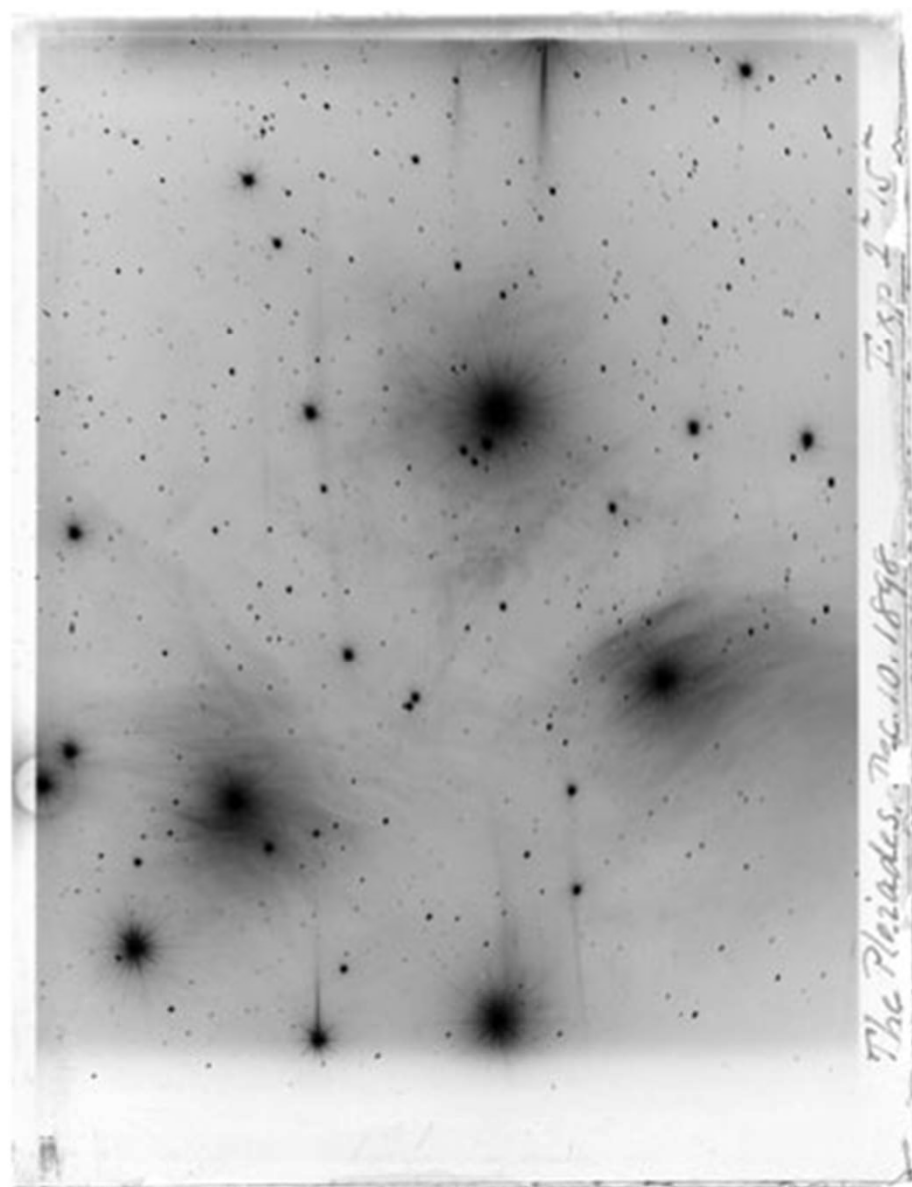
图2 银版摄影发明者达盖尔肖像。



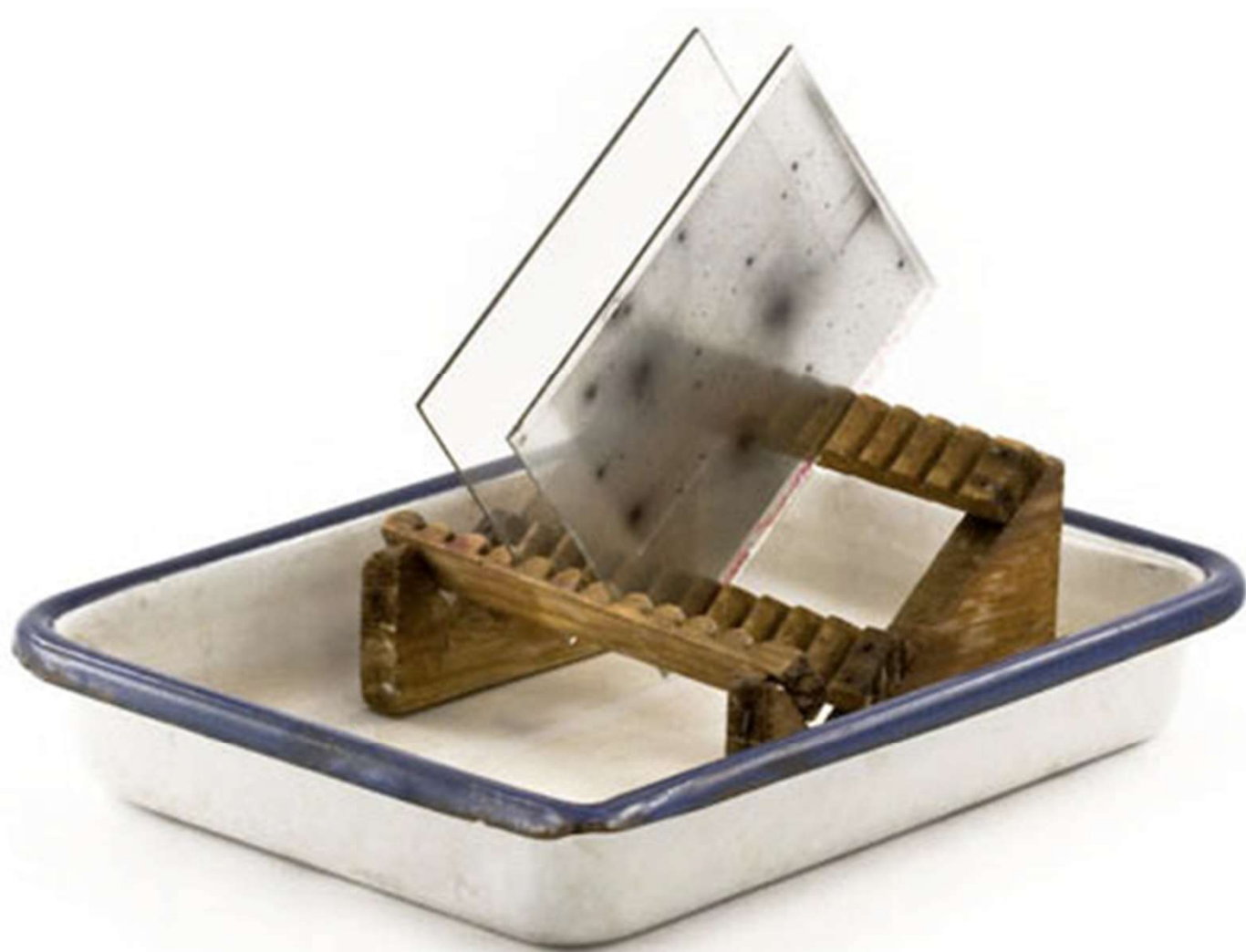
《坦普尔大街街景》，1838年于巴黎



Plate of the eight-day old moon, 1893
(Lick observatory)



Pleiades star cluster, 1898, original glass plate negative and a positive print



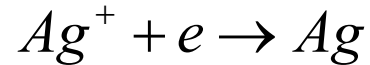
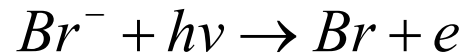
1898 Pleiades negative, drying rack, and darkroom tray



The Plate Vault

一、照相原理：

- 照相的基本原理是利用某些物质在辐射照射下发生化学变化这一特性
- 常用的这类物质是卤族元素和银的化合物，即卤化银（如 AgBr ， AgI ），当它们受到光的照射时会分离出银来。



- 现代照相材料的感光层是由大量卤化银小晶体和明胶组成的，称为照相乳胶，最敏感的感光层往往是在溴化银内加入碘化银的杂质。
- 把照相乳胶均匀地涂布在玻璃底板（硬片）或赛璐璐薄片（软片）上就成了照相底片。
- 像中心包含的银毕竟太少，还不足以形成底片上可见的像，只有经过显影和定影后，才能得到所需要物体的像。

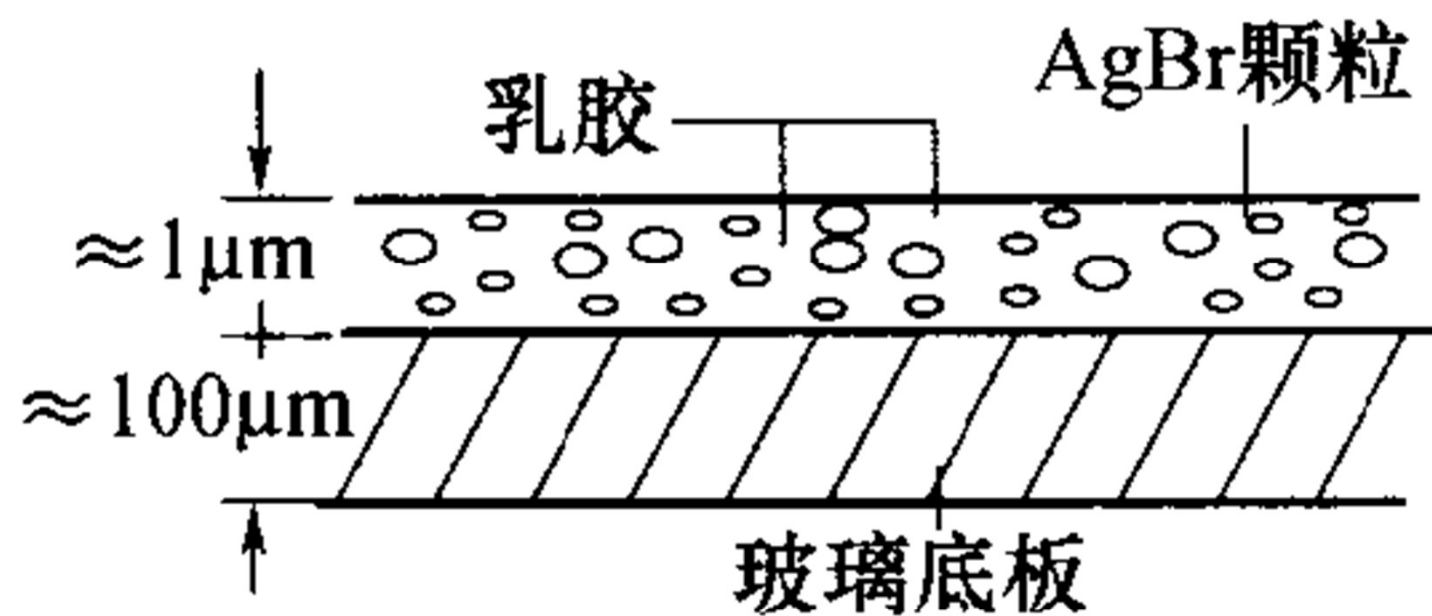


图 3 - 2 天文照相底片的结构

二、照相底片的优点：

1、可以具有与望远镜大视场相匹配的尺寸。

- Mt. Palomar的Schmidt望远镜采用的底片尺寸：
 $365 \times 365 \text{mm}^2$
- 最大的底片是Lick天文台的Double Astrograph：
 $500 \times 500 \text{mm}^2$
- 而Tek 1024CCD相机的像面尺寸：
 $24.57 \times 24.57 \text{mm}^2$

Unexposed 8x10-inch Kodak Plate



2、底片颗粒非常细

- 如KodakIIIa系列底片，其分辨率可达200lp/mm，即像素尺寸为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 。
- 而Tek 1024 CCD相机的像素尺寸为 $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ 。

3、每一像素可储存6bits信息。

4、上述三个特点使得照相底片有着巨大的信息容量：

- 例如Lick天文台的 $500 \times 500\text{mm}^2$ 底片的信息容量： $500 \times 500 \times 200 \times 200 \times 6 \approx 60\text{Gb}$

三、照相底片的缺点：

1、量子效率低

- 一般照相底片的DQE为0.1-1%
- 最好底片（敏化）的DQE值也不会超过4%
- 敏化：
 - 干燥的纯氮气中烘烤
 - 放在氢气中
 - 预照光
 -

2、响应的非线性

- 底片上的照相密度不与入射辐射成正比。
- 且特性曲线决定于具体的乳胶性质、显影过程、入射光的颜色等等。
- 这些因素十分复杂，不可能找到一般的函数形式。
- 故用照相方法对天体进行测光时，对每张底片都必须进行定标，大大增加了处理的工作量。

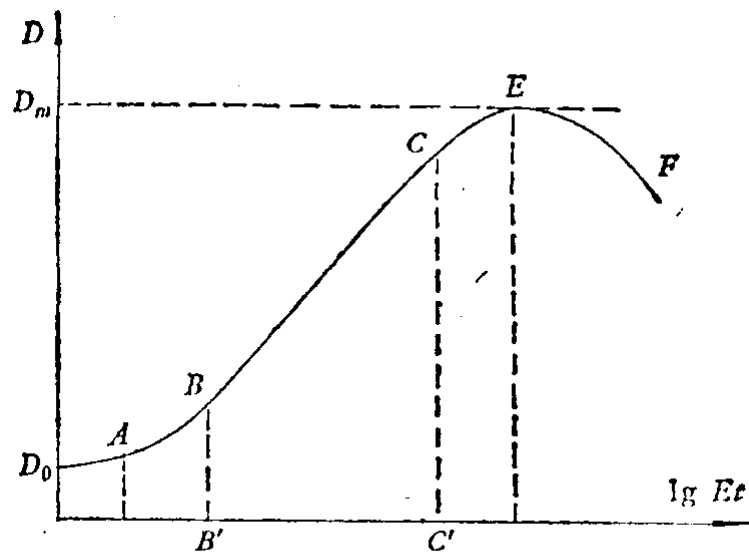


图 3.3 照相底片的特性曲线。

- D : 照相密度
- Et : 曝光量

- 曝光不足部分 AB
- 正常曝光部分 BC
- 曝光过度部分 CE
- 翻转显影部分 EF

3、动态范围小（即宽容度小）

一般照相底片的动态范围为30，亦即宽容度 $B'C'$ 约为1.5，远小于光电倍增管和二维光电器件的动态范围。

4、响应的不均匀性

在10cm范围内，一般可达到2%。由于底片是一次性读出的探测器，所以其响应的不均匀性无法改正。

5、存在一些影响测量精度的效应：例如扩散圆、反光晕、边缘效应。

6、无法对其进行实时监视，它所记录的信息不能直接送计算机处理。



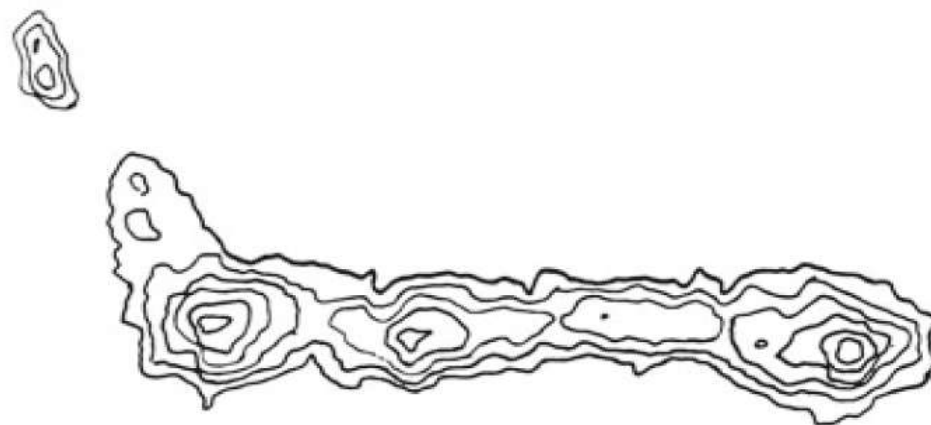
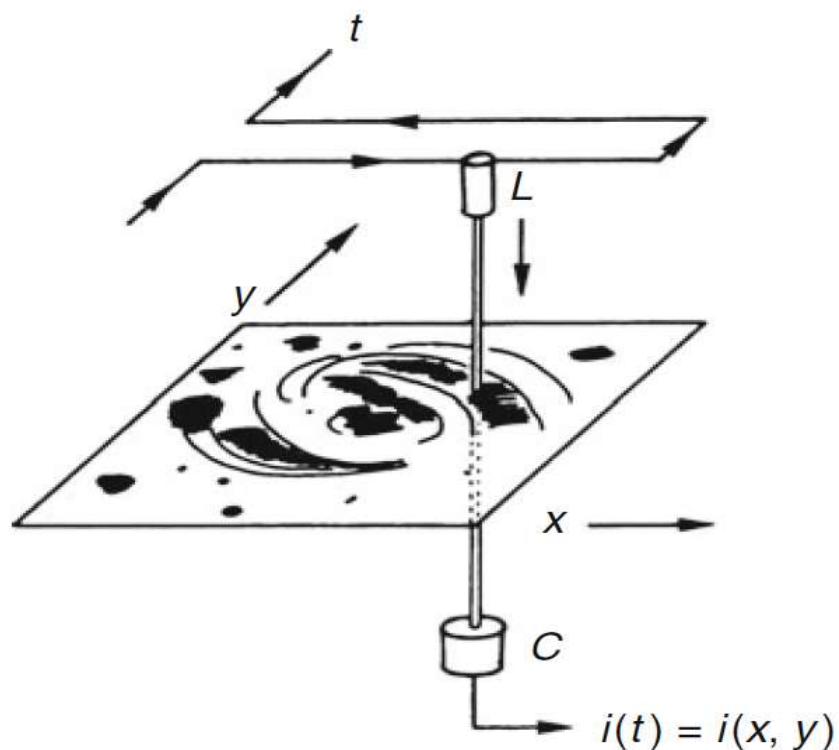




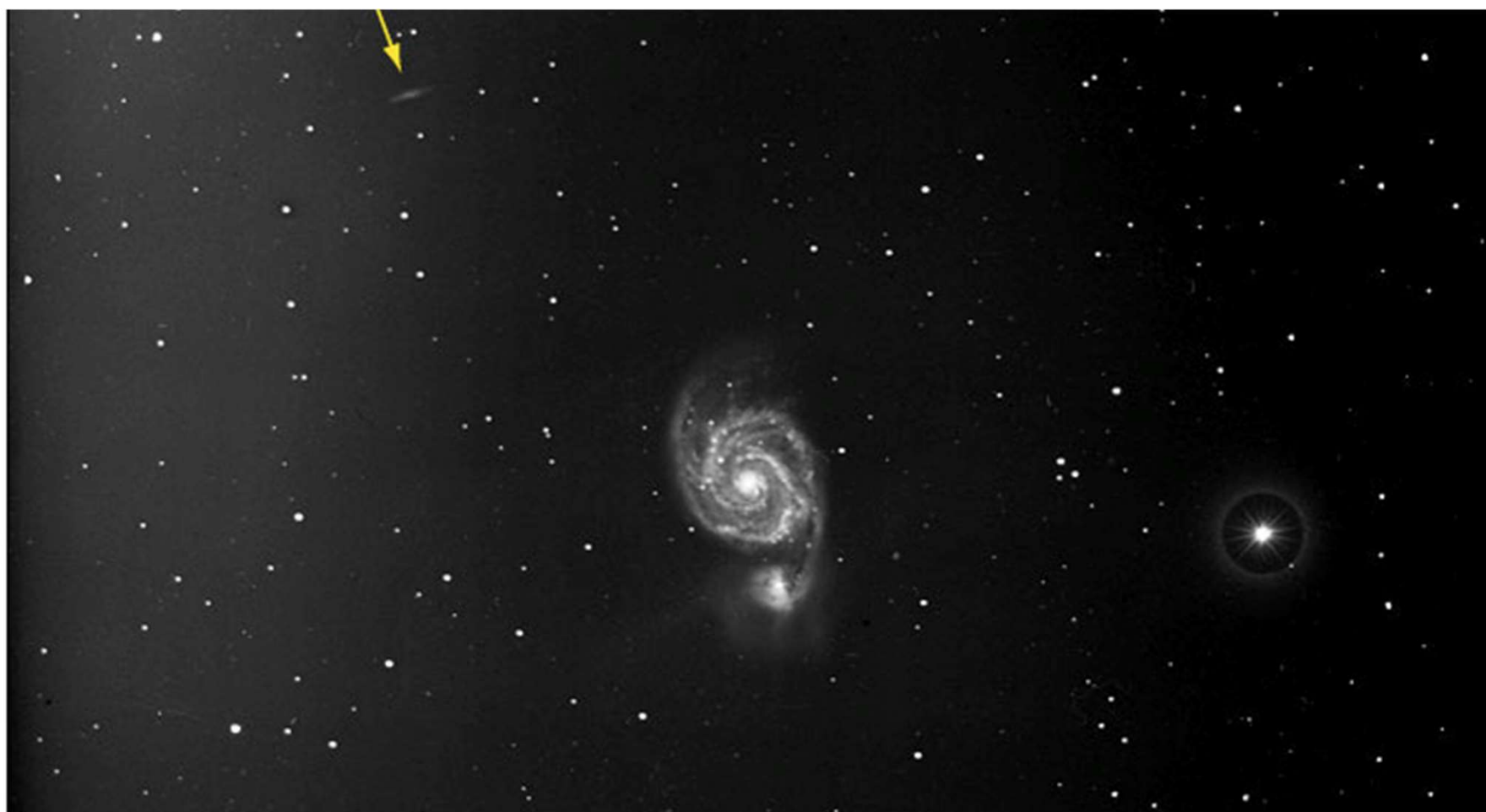




显微密度计



- 左图: 照相底片或电子成像板的显微测光示意图。光源L发出一束光线, 由光敏单元C所接收。测得的强度 i , 与由位置传感器读出的 x 和 y 坐标, 都是数字化值。L所做的是二维光栅扫描。右图: 数字化底片后得到的类星体3C273发出的喷流的等辐射线。



Xinglong Station (NAOC)



闪视比较仪

这是一台由前民主德国 Carl Zeiss Jena 工厂制造的闪视比较仪。利用闪视比较仪，将不同时间拍摄的同一天区的两底片交替出现在目镜视场内加以比较，以确定该天区内有无位置或亮度发生变化的天体。1930 年，美国天文学家汤博就是利用了这一仪器发现冥王星的。

星系 (M)

系，是后发座的-
67618。这个长有
戏打闹的老鼠，因
可能已经穿越对方
聚合到一起为止。
碰撞是一种很缓慢的
老鼠星系距离地球
星系团的成员。上面
“高级巡天相机”所拍

四、底片数字化

天文照相底片与数字化

- ❖ 1840年 欧洲开始有照相底片保存记载
- ❖ 1901年 中国第一张照相底片在佘山天文台诞生
- ❖ 1994年 上海天文台结束了照相底片时代，前后拍摄4000张底片。全国天文台约存30000张。
- ❖ 1991年 保加利亚科学院空间研究所率先建立底片信息库，2000年开始底片数字化。欧洲底片中心和国际虚拟天文台（IVO）相继成立。
- ❖ 2000年 IAU第5专业委员会（学术资料与天文数据）成立“底片保存与数字化工作组（PDPP）”
- ❖ 2012年 IAU北京大会决定成立Division B Facilities, Technologies, & Data Science

中国底片数字化经纬

- 2004年** 国内天文界赵永恒、唐正宏、王叔和等人 向中国天文学会提交建立中国天文底片库的提案。
- 2008年** 经国内天文界各方人士的呼吁和支持，国台从大型设备专项中，立项拨款给上海台建立中国底片信息库。
- 2009年** 全国各台站底片陆续运抵佘山底片库，登记注册建立底片信息库。**8月**上海台“底片数字化”课题立项。
- 2010年** 底片数字化预研究开始，申请的天文专项经费，国家自然科学基金委主任基金陆续到位。
- 2012年** 底片数字化立项为科技部专项重点项目，天文信息学科类申请科技部项目成功首例。

中国天文底片信息库

天文台名	望远镜	起止年份	底片数量	底片库
上海天文台	40 cm 折光双筒镜	1901-1998	~4000	佘山站
	1.56 m 天测镜	1988-1994	~350	
国家天文台	40 cm 双筒折光镜	1968-1990	~4000	兴隆基地
	60/90 cm 施密特镜	1968-	~3200	
	加物端棱镜	??	~1600	
紫金山天文台	15 cm 折光镜	1949-1986	~6000	紫金山
	40 cm 双筒折光镜	1964-1986	~4000	
	60 cm 反射镜	1954-1965	~2000	
	加棱镜摄谱仪 1	1956-1966	~1200	
云南天文台	1 m 反射镜	1979-1985	~1000	云台本部
	40 cm 太阳光谱仪	1976-1997	~3000	云台本部
青岛观象台	32 cm 天体折光镜	1960-1997	~1300	青岛观象台
西沙群岛	15 cm 天体照相机	1986.3-4	27	青岛观象台
紫台云南站	10 cm Ross 广角镜	1935-1937	286	紫金山
		1951-1957	153	紫金山
合计			~30000	

中国科学院
北京天文台

底片袋

底片号: DAN-89 (4)

观测日期: 1976 年 6 月 25 日

底片中心坐标: 赤经 _____

() 赤纬 _____

观测目的和对象: M4

观测对象坐标: 赤经 _____

() 赤纬 _____

观测时刻: 22^h50^m15^s - 55^m15^s

底片和滤光片: _____

曝光时间: 55

观测者: 姚 洗片者: 姚

备注: 无消光

像无

虚拟天文台



虚拟天文台

青島現象台底片袋

[illegible]

底片號: DA193

$$d: 18^h 26^m \quad f: +38^\circ 45'$$

观測日期: 1965 年 6 月 17-18 日 観測者: 山. 三. 子. 藤

观测目的和对象: α Lyr (左阿哈路曼斯除片)

曝光时间: 10^s 天气状况: 女子 月相:

底片型号: Kodak 0a0, 9x12 滤光片: GG13

摄影: D196, +20°C, 5^{mm} 底片状况: 尚可

备注: 储前位置 5.0 mm. $+22.8^{\circ}\text{C}$.

对应的售后意见 DA194.

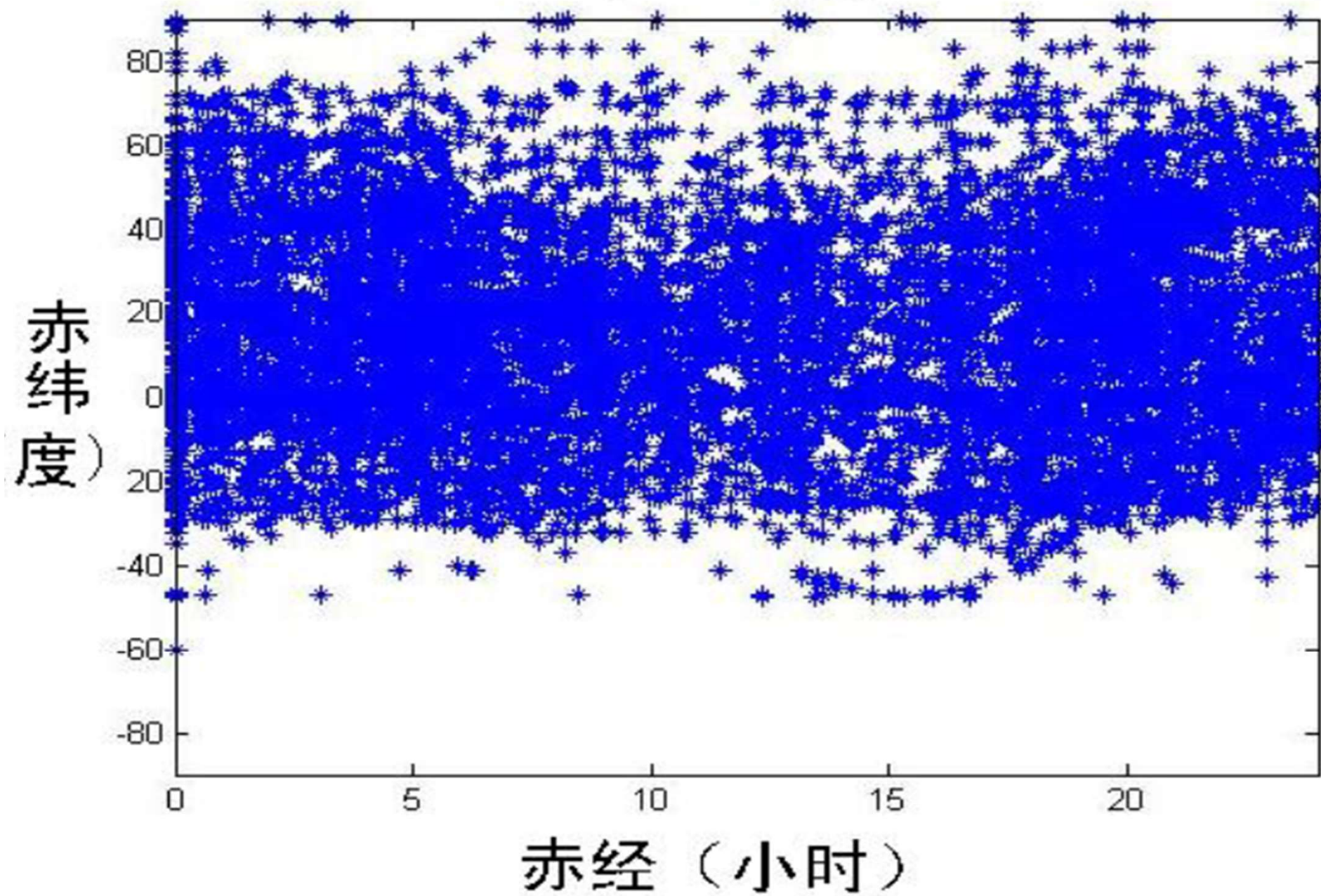
5

余山觀象台

天體攝影照片記錄

照片號碼	照像時間				露光長短		照像對象	照像者	備註
	年	月	日	時	分	秒			
0168	1957	10	11						
0169	1957	10	11						
0170	1957	10	11						
0171	1957	10	11						
0172	1957	10	11						
0173	1957	10	11						
0174	1957	10	11						
0175	1957	10	11						
0176	1957	10	11						
0177	1957	10	11						
0178	1957	10	11						
0179	1957	10	11						
0180	1957	10	11						
0181	1957	10	11						
0182	1957	10	11						
0183	1957	10	11						
0184	1957	10	11						
0185	1957	10	11						
0186	1957	10	11						
0187	1957	10	11						
0188	1957	10	11						
0189	1957	10	11						
0190	1957	10	11						
0191	1957	10	11						
0192	1957	10	11						
0193	1957	10	11						
0194	1957	10	11						
0195	1957	10	11						
0196	1957	10	11						
0197	1957	10	11						
0198	1957	10	11						
0199	1957	10	11						
0200	1957	10	11						

全国天文底片覆盖天区



底片数字化预研究结果

三台线扫描方式扫描仪的测试

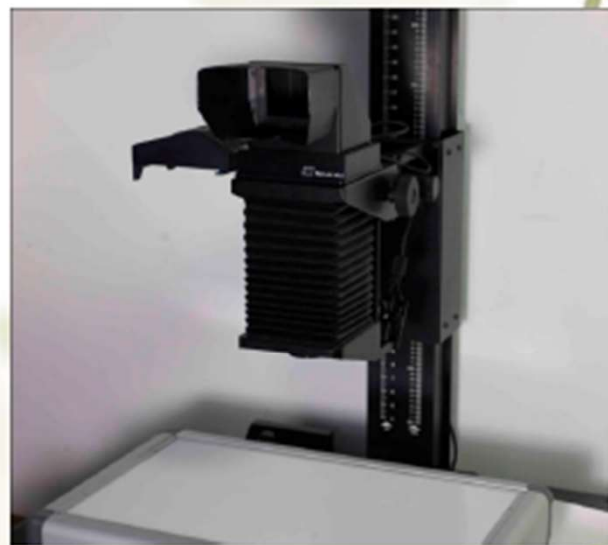
Epson v750 pro



Epson 10000XL



PowerPhase FX⁺



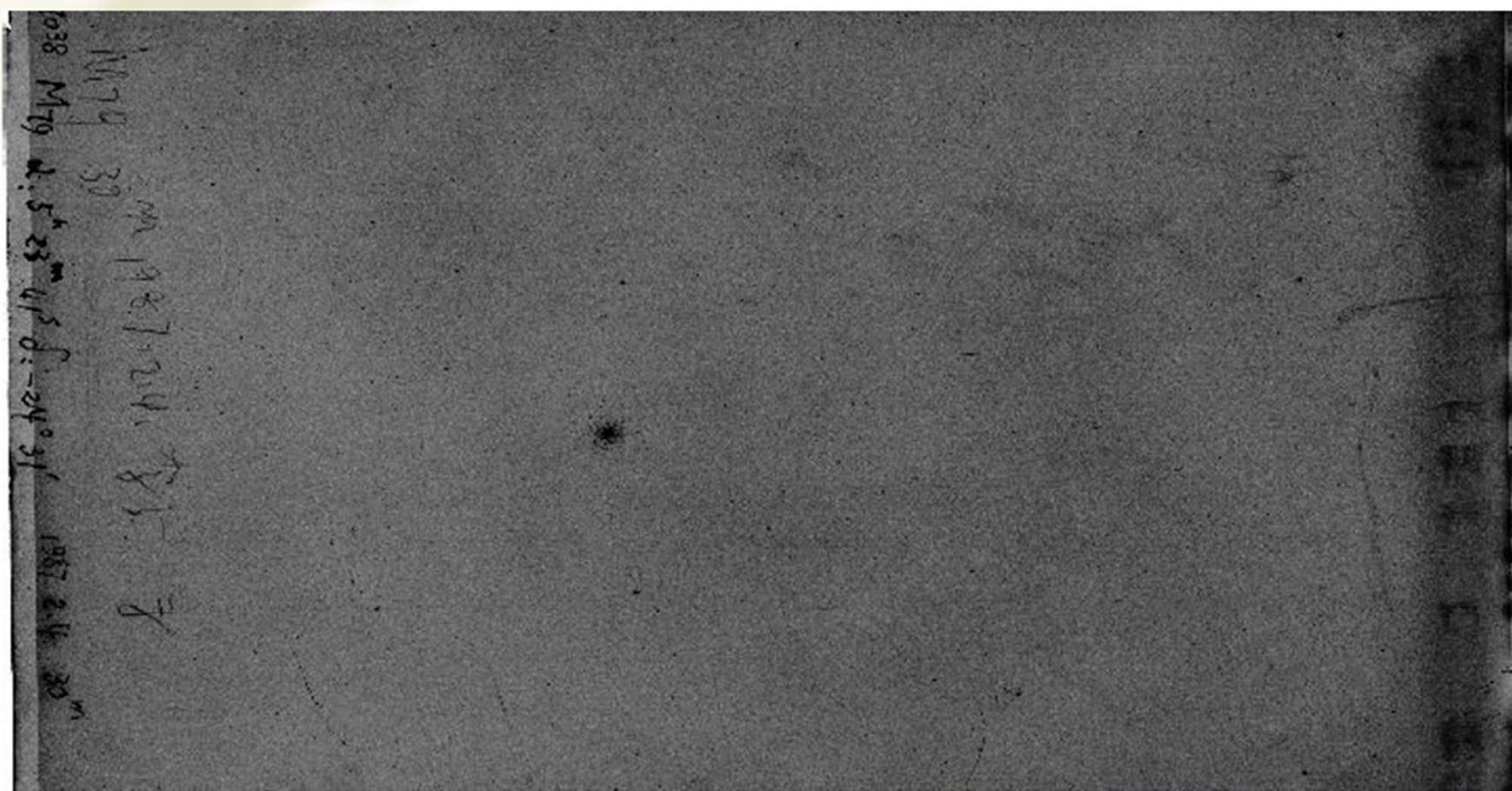


底片清洁



底片扫描

底片数字化研究样片



国外历史底片的研究成果

- ① 恒星运动学研究，大自行恒星运动精确测定。如用**1900年AC**星表推导**Tycho-2**、**UCAC**等星表自行的推算。
- ② 太阳系动力学研究。**2002**年发现第一颗与冥王星卫星**Charon**大小相同柯伊伯天体，它的轨道是由**1997**年后**CCD**观测与**20**世纪**80**年代拍摄太阳系巡天底片相结合确定的。
- ③ 长周期双星、聚星的动力学研究。**Girard**用相距**83**年**250**张底片和**HST**的观测得到**40**年周期目视双星**Procyon (CMi α)**的质量，解决了由理论和天体测量轨道推导主星质量不符合。
- ④ 长时间尺度下天体（变星、类星体、伽马暴等）光变的研究。**Angione**利用长达**93**年的观测资料研究活动星系核**3C273**的光变特征，发现它存在周期约**16**年的光变规律。

国内历史底片的科学目标

- ❖ 利用天文底片做恒星及星团的运动学和动力学研究
- ❖ 利用自然卫星精密定轨做行星列表，观测历年越长精度越高
- ❖ 伽马暴等暂现源的信息挖掘
- ❖ 历史底片的科学史研究

§ 3 光电倍增管

- 光电效应：辐射能转化为电能的现象称为光电效应。
- 光电器件：利用光电效应制成的辐射探测器。

- 光电效应分为三类：
 - 外光电效应：在辐射作用下，电子从电极物质的表面发射出来。利用外光电效应的光电器件有光电管和光电倍增管。
 - 内光电效应（光电导效应）：在辐射作用下半导体材料的电阻发生变化。利用内光电效应的探测器有光敏电阻等。
 - 阻挡层光电效应（光伏效应）：在辐射作用下，产生一定方向的电动势。利用此效应的光电材料是各种光电池。

光电倍增管

- 1、结构：光电倍增管一般由光敏阴极和加在其后的若干电子倍增级（称为倍增系统）以及最后的一个电子收集极（阳极）组成。

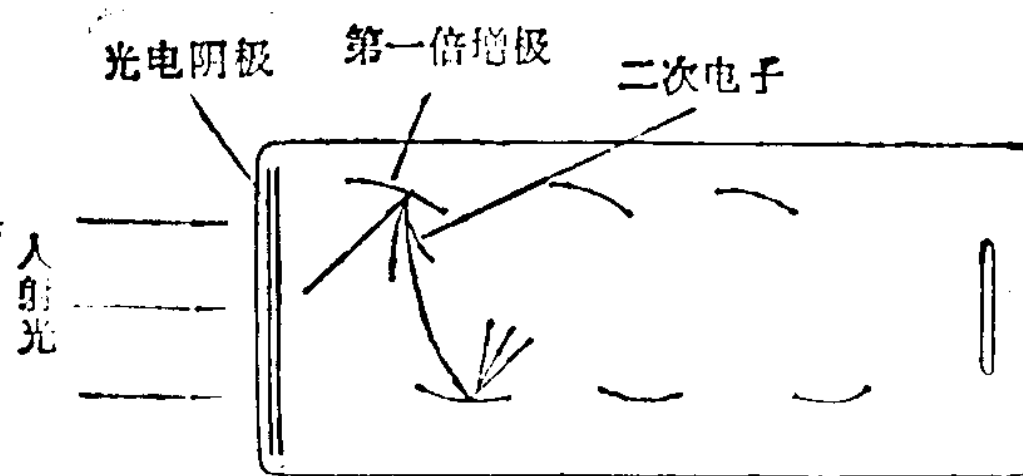


图 3.8 光电倍增管的结构示意图。

(a)鼠笼式
(側窗)



(b)鼠笼式(端窗)



(c)盒式



(d)线性聚焦式



(e)百页窗式





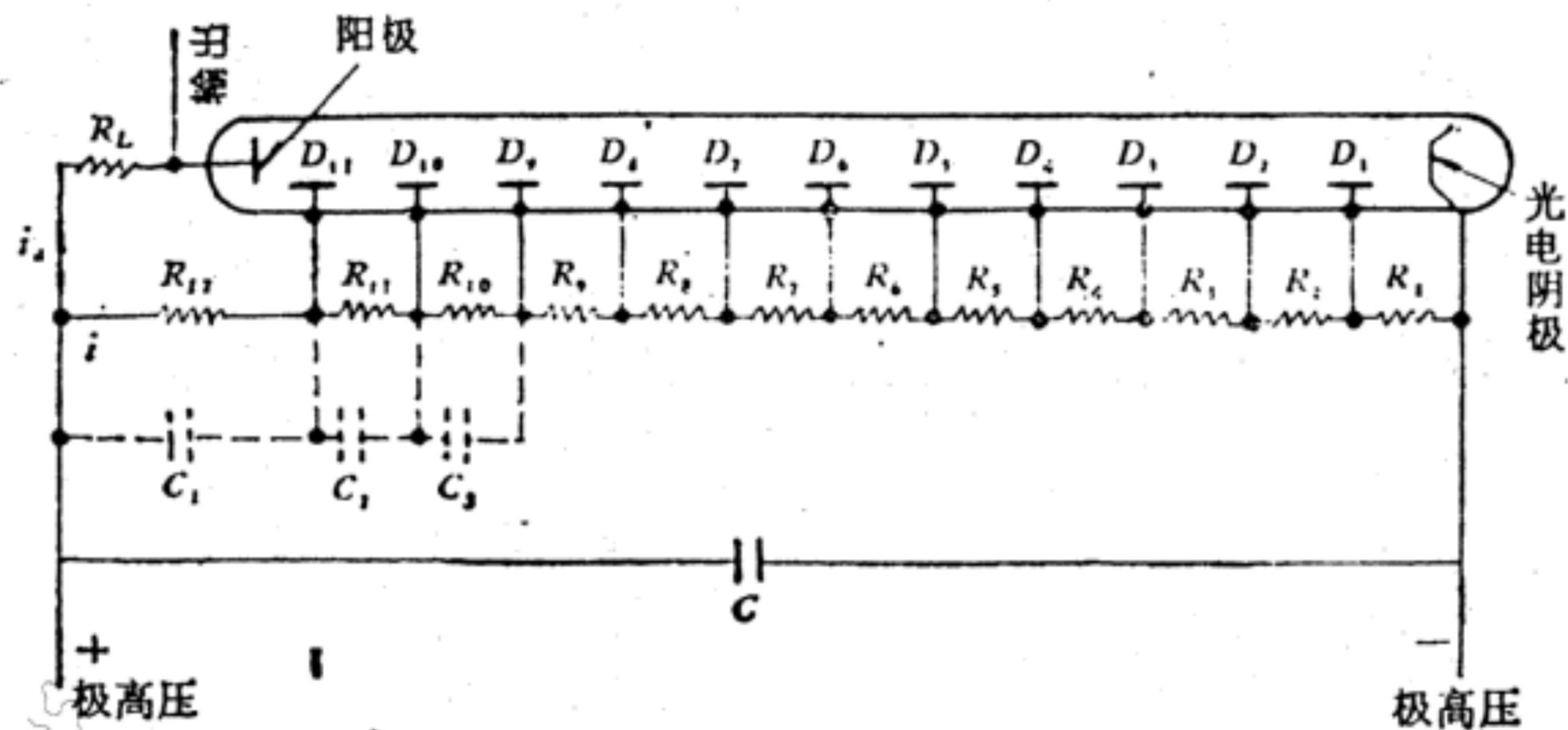


图 3.10 光电倍增管的基本电路.

2、原理：

3、测量方式：

- **脉冲计数**：每 $10^8 - 10^{10}$ 个电子组成的单个脉冲被当做一个单位来进行计数，它相当于阴极面上的一个被检测光子，每个脉冲持续 10^{-8} s。
- **电流测量**：测量阳极的电流。
- 一般说来，对弱光源脉冲计数较好，对亮光源则电流测量方式较好。

4、光电倍增管的光谱响应：

光谱响应取决于光电阴极材料的性能，
及辐射照到阴极之前所经过的窗材料特性。

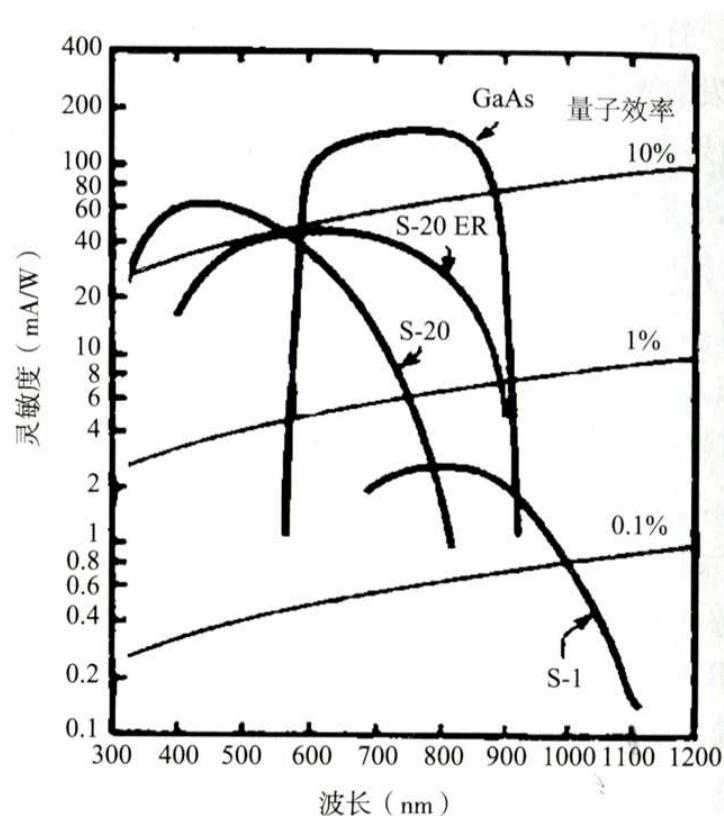


图 2.7 几种光电阴极的光谱响应

5、电流增益：

- 次极电子发射因子 δ 与其上所加电场 E （或电压 V ）有关系：

$$\delta = AE^{\alpha}$$

其中 A 为常数， α 是与次极的材料和结构有关的参数，通常在0.7—0.8之间。

- 对于具有 n 级次极的光电倍增管，其光电子增益为：

$$G = (AE^{\alpha})^n = \left[B \left(\frac{V}{n+1} \right)^{\alpha} \right]^n = \frac{B^n V^{\alpha n}}{(n+1)^{\alpha n}} = k V^{\alpha n}$$

- 通常对于 $n=10$ 的光电倍增管， $G \sim 10^6$

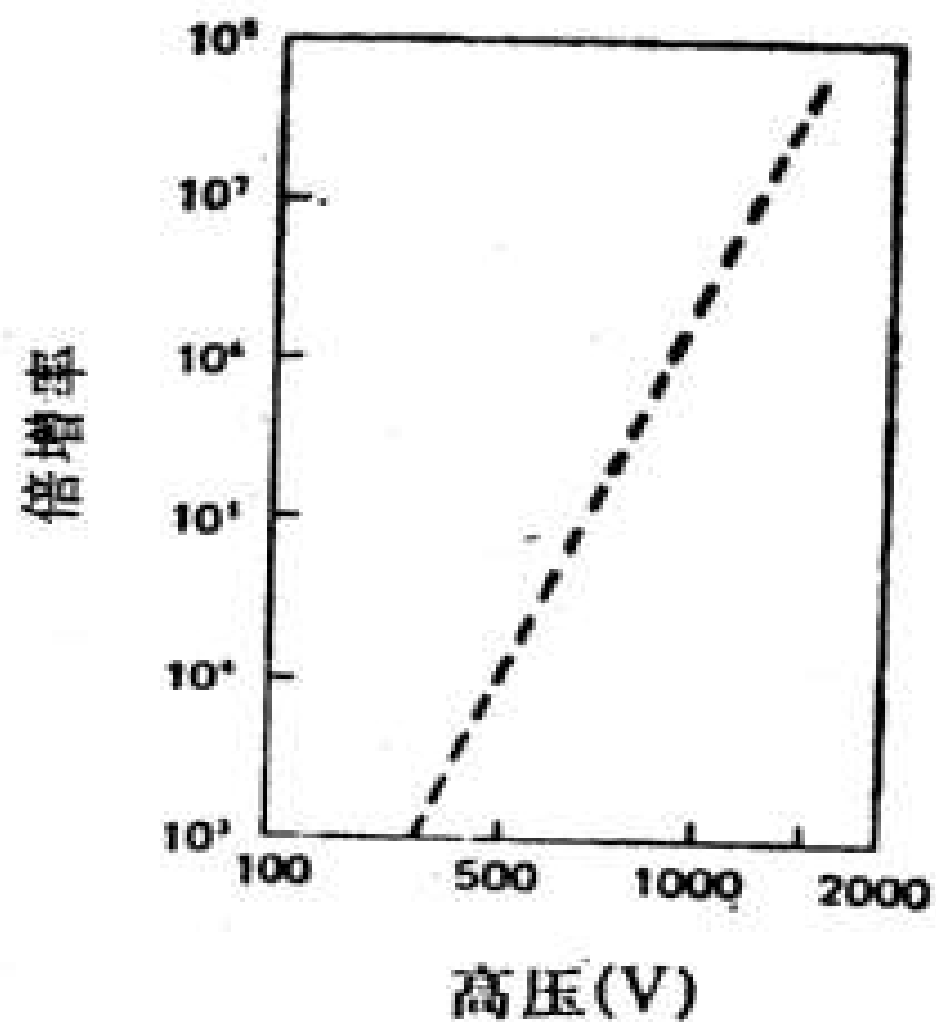


图 4.11 PMT 中 G 与工作电压 V 的关系

6、暗电流：

- 即使是在严格无光照射的条件下，光电倍增管仍然会有信号输出，此即暗电流。
- 暗电流主要来自：
 - 管脚的漏电流；
 - 光电阴极或次极的热辐射；
 - 管内残留气体的电离；
 - 场致发射
- 一般说来，采用脉冲计数可以消除漏电流的影响；通过降温，能降低热发射；而利用阴极上接正电压的方法，则可在很大程度上排除场致发射的影响。

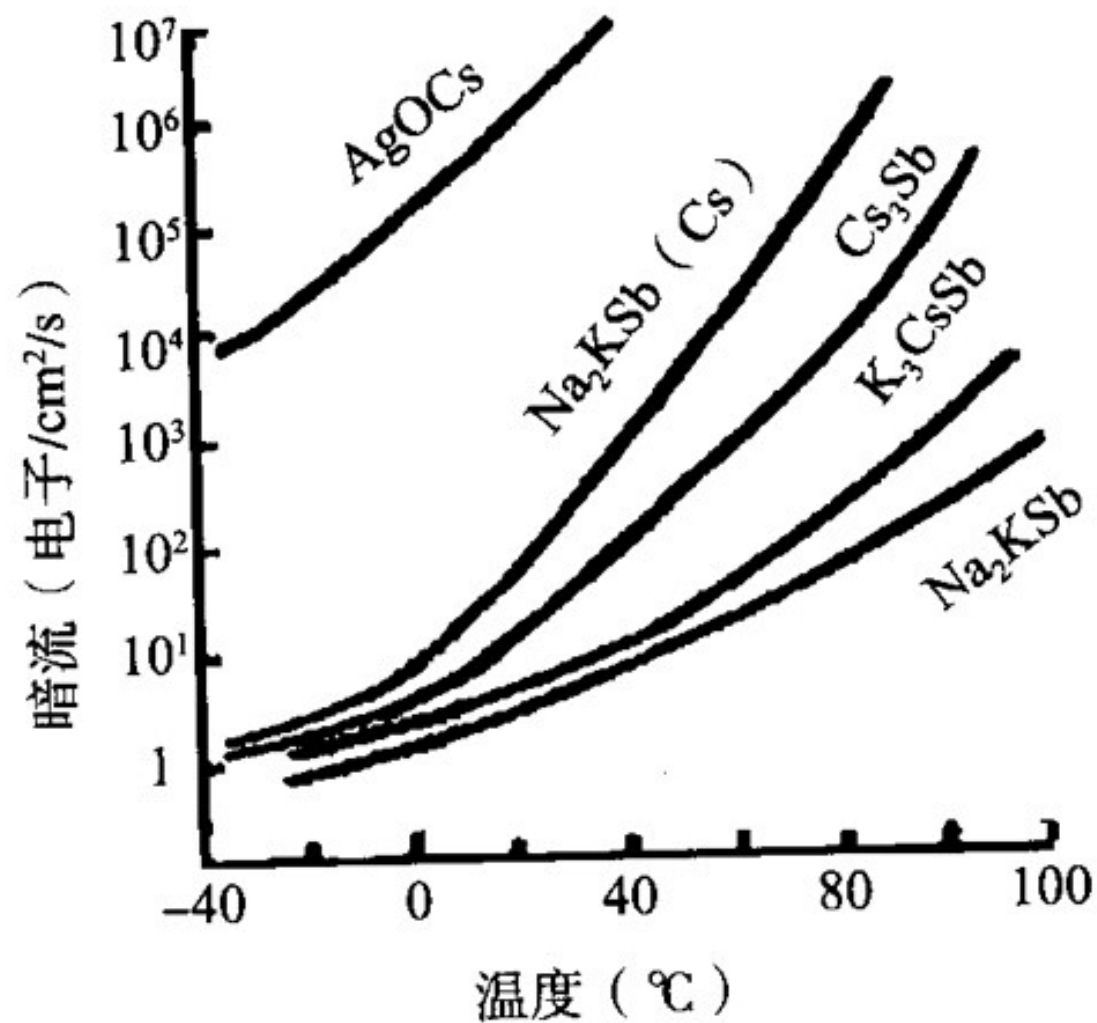


图 2.12 几种光电阴极暗流随温度变化情况

表 2.2 几种光电阴极的特性

光电阴极 (S 编号)	材料	窗口材料	峰值灵敏波长 (nm)	量子效率 (%)	暗流 (电子/ s/mm ²)
S4	Cs - Sb 反射式	石灰玻璃	400	12.4	0.05
S11	Cs - Sb 透射式	石灰玻璃	400	21	0.75
S20	Na ₂ KCsSb 透射式	石灰玻璃	420	22	3
S20ER	Na ₂ KCsSb 透射式	7741 派来克 斯玻璃	400	20	4
双碱	K ₂ CsSb 透射式	石灰玻璃	380	27	0.15
31034	GaAs 反射式	9741 玻璃	短于 900nm 可 见区基本上不变	20	0.12

7、光电倍增管的优缺点：

- 优点：

- 量子效率高（ $\sim 30\%$ ）。
- 动态范围大：对于变化于 $0-10^7$ （或 10^8 ）范围的辐射呈线性反应。
- 与计算机联机使用方便，大大提高了速度和效率。
- 时间分辨率高。由于光电倍增管增益高，响应时间短，特别适合观测快速变化的弱源。
- 噪声小。

- 缺点：

- 一元探测器

§ 4 像 管

- 光电阴极本身是一个二维光敏面，每点发射光电子的数量和该点照光强度成正比。
- 如果能分别记录下光电阴极各点发射的光电子数，就可以制成同时记录二维图像的光电探测器件。

像 管

- 光电阴极
- 涂荧光层的阳极
- 电子透镜

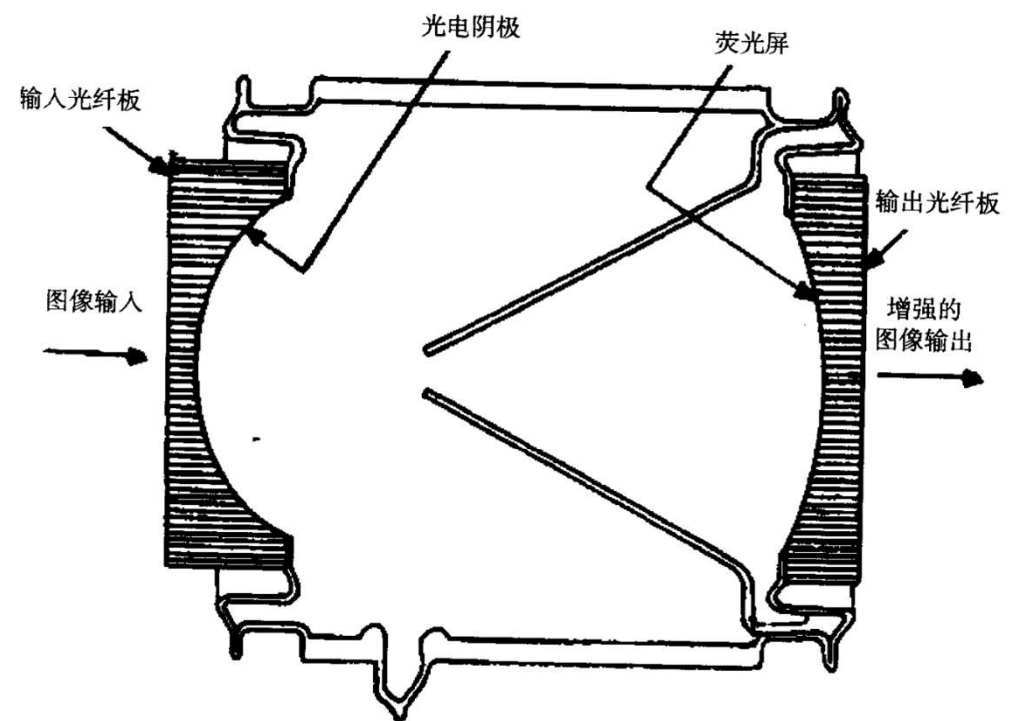


图 2.14 像管基本结构
(单级静电聚焦)

像管（像增强器）

- 工作原理：当把光学像投在光电阴极上时，所产生的光电子将被静电场加速，若再用由磁场组成的电子透镜进行成像，那么，便在其像面上得到了与光学像对应的电子像。
- 在军事上有广泛应用

多级像管

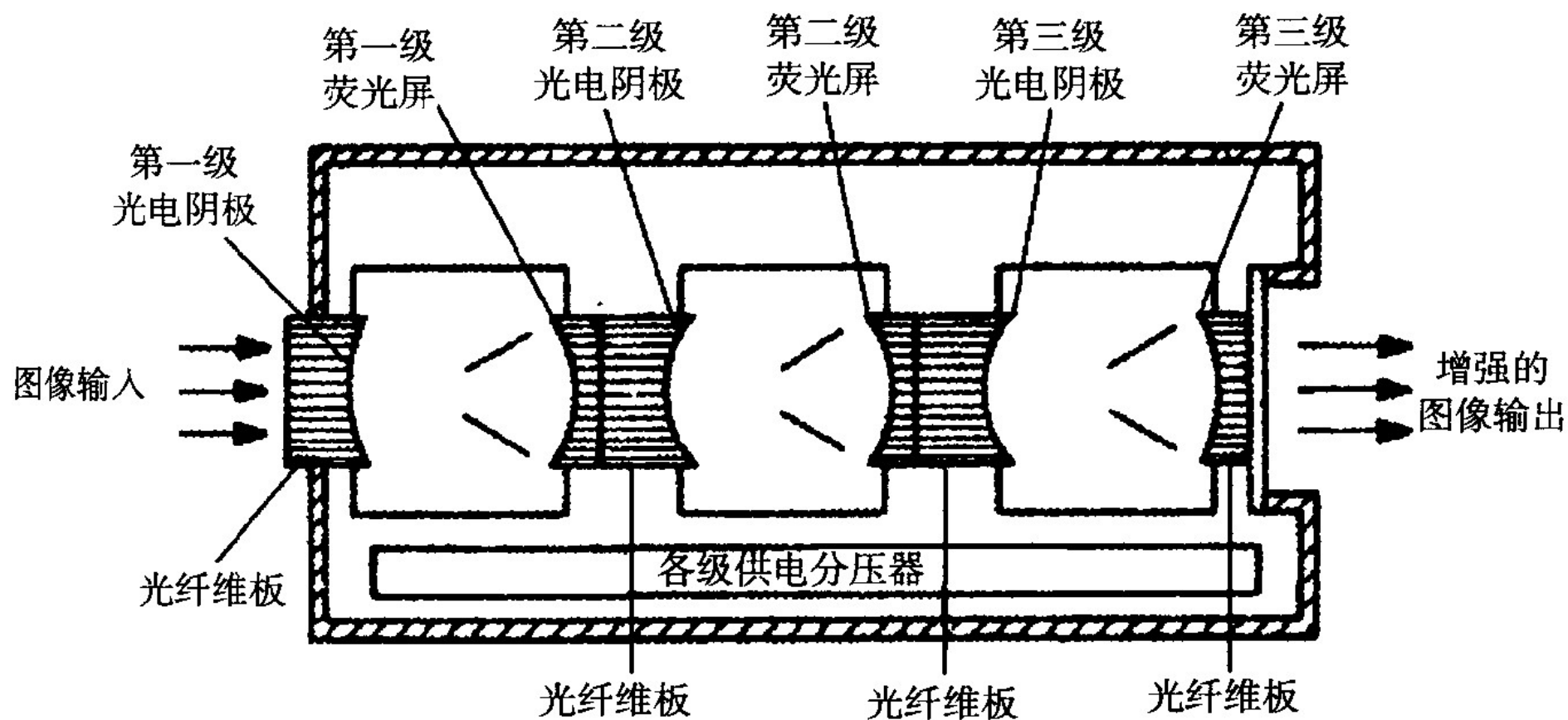


图 2.15 多级像管（三级静电聚焦）

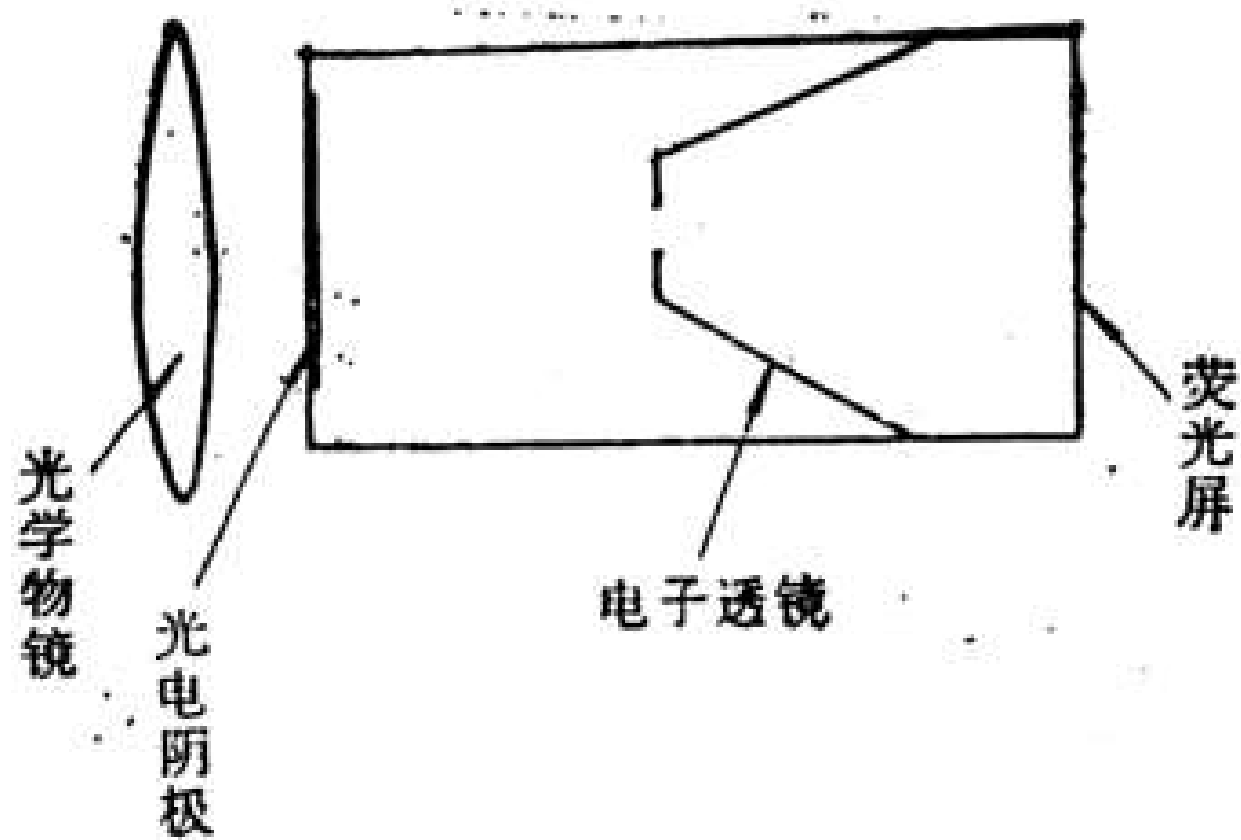


图 3.35 像增强器示意图.

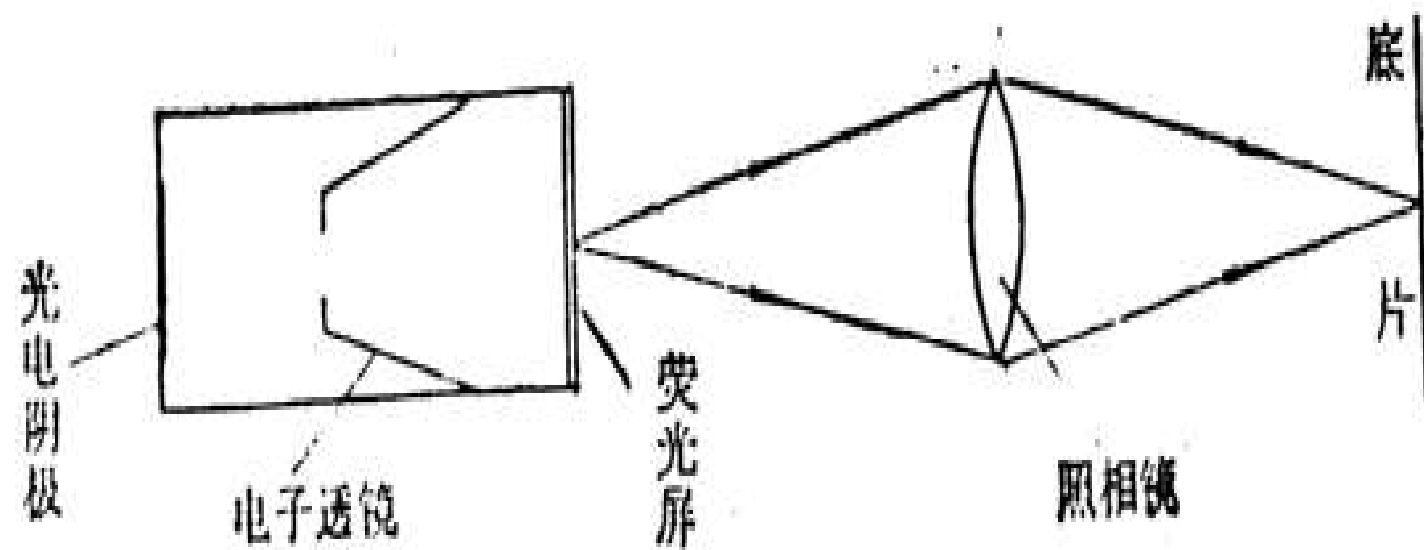


图 3.36 像增强器工作示意图.

- 在电子透镜的像面上置CCD或Reticon读出，那么电信号的像将与光学像对应。
 - 对于配置Reticon器件的电子成像仪器，通常称为Digicon。
 - 对于配置CCD器件的电子成像仪器，通常称为I+CCD。

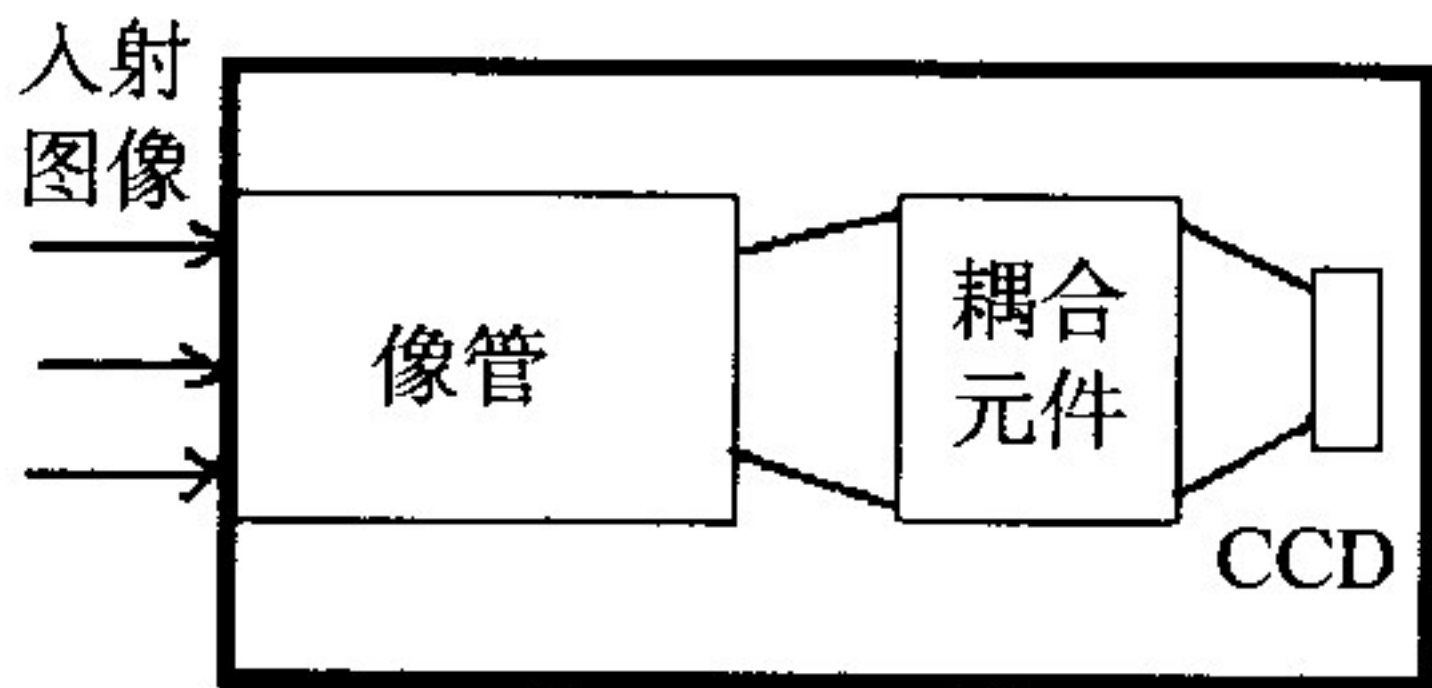


图 4.2 组合增强 CCD 示意图

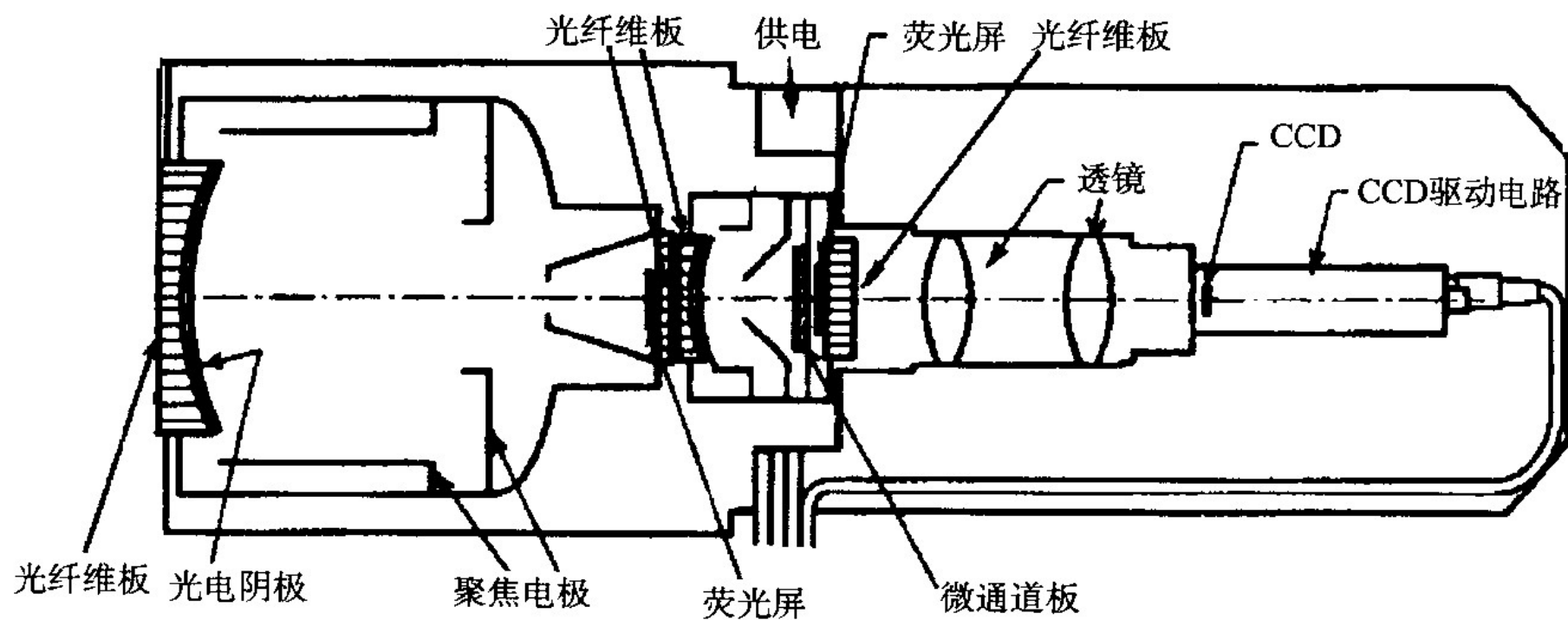
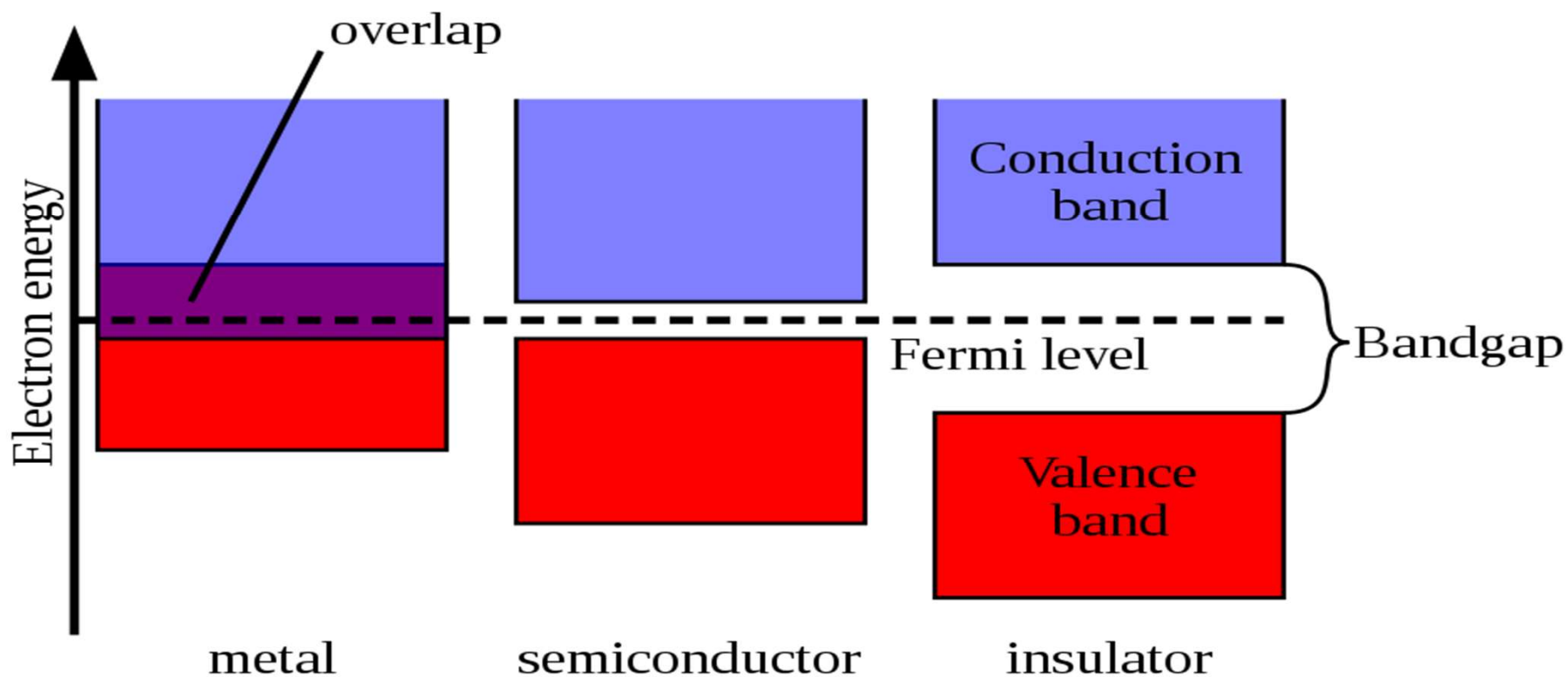


图 4.3 真空像管加微通道板兼用光纤纤维板和透镜耦合的 ICCD

§ 5 固体器件

- 利用**半导体**材料的光敏特性制成的光电探测器。



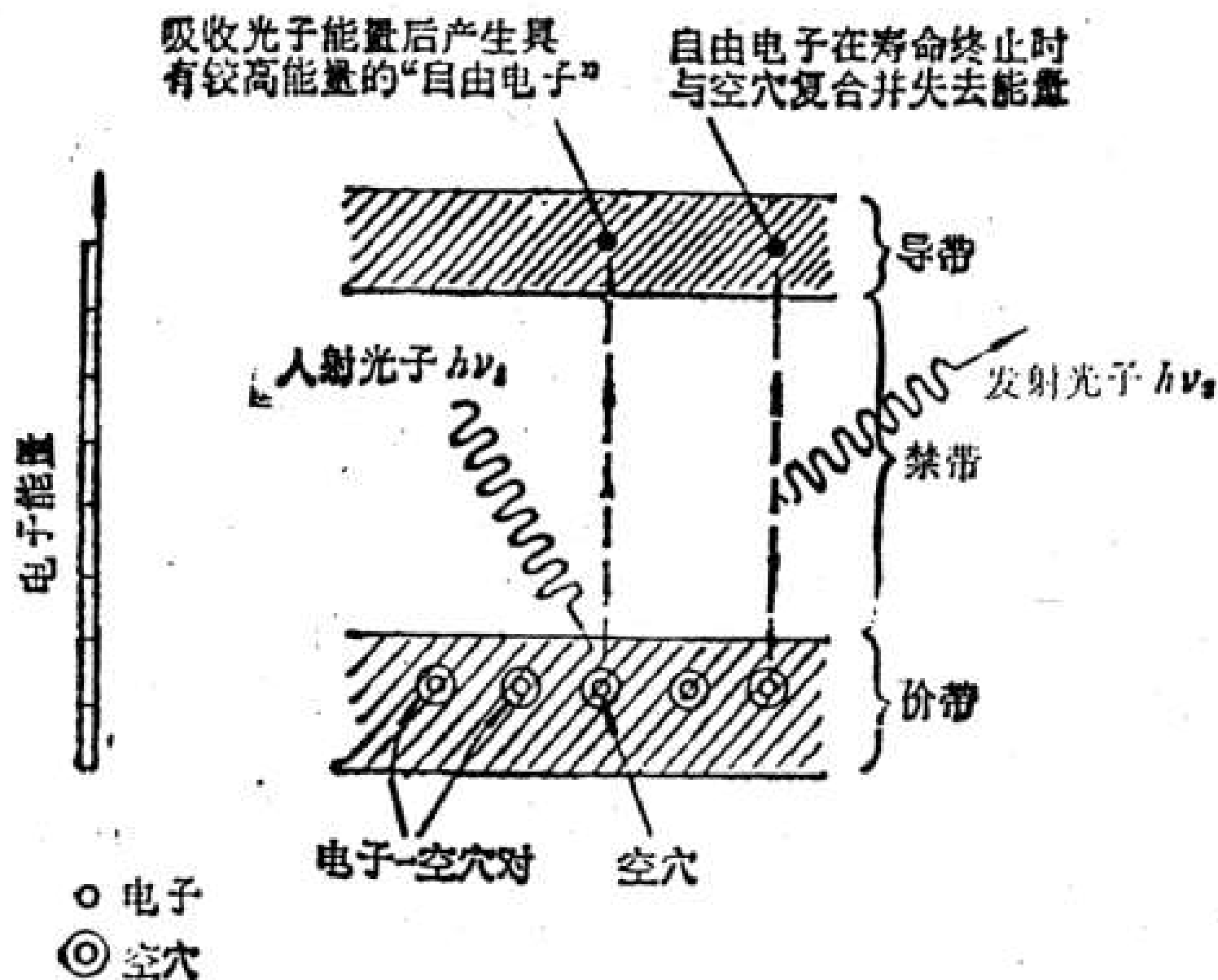


图 3.15 半导体的能带结构.

- 半导体的能带结构可以简单地分为：
 - 价带：电子处于束缚态
 - 禁带：
 - 导带：自由电子
- 电子从束缚态变成自由态，必须越过禁带，也即必须获得足够的能量。

半导体

- N型：原子外层电子除组成原子间共价键结构外还有多余的电子，它们被驱使到高能级的导带上。外加电压时，由导带上的电子输运电荷。
- P型：如果原子在组成原子间共键时，电子数不足，就存在空键，称为“空穴”，在外电压的作用下这些空穴会逐次被临近价电子填充，形成空穴的迁移。

- **PN结：** 当把**P**型和**N**型半导体接触起来，就形成一个**PN结**。
 - 此时，**N**型物质中的自由电子因能级较高，会扩散到**P**型物质中，使**N**型物质中正电荷过剩，而在**P**型物质中则负电荷过剩，从而在**PN结**两边产生一个内部电位差。
 - 当这种内部电位差达到足以阻止这一电子流动时，平衡产生，形成一个简单的**PN结二极管**。

硅二极管

- p-n结光敏二极管。
- 在硅片上涂一层氧化物绝缘层，然后在上面制成电极，形成一个小电容。
- 工作时，先将二极管偏置，即将小电容充电到一定偏压。当受到光照射时，光子的能量使硅片释放出电子一空穴对，二极管因此放电。
- 或者说，入射在硅片上的光产生电荷，在积分周期内被收集和储存在二极管电容内。然后，存储的电荷转化成视频输出。

- 将很多硅二极管制作在一个很小的面积上，即组成一个硅二极管阵。
- 把这种二极管阵曝光于要观测的天体像，像上照度强的地方二极管储存的电荷就多些，照度低的地方储存的电荷就少些。
- 因此形成了相应的电潜像，测量出这些电潜像各部分的强弱，就测得了待观测天体的光学像。

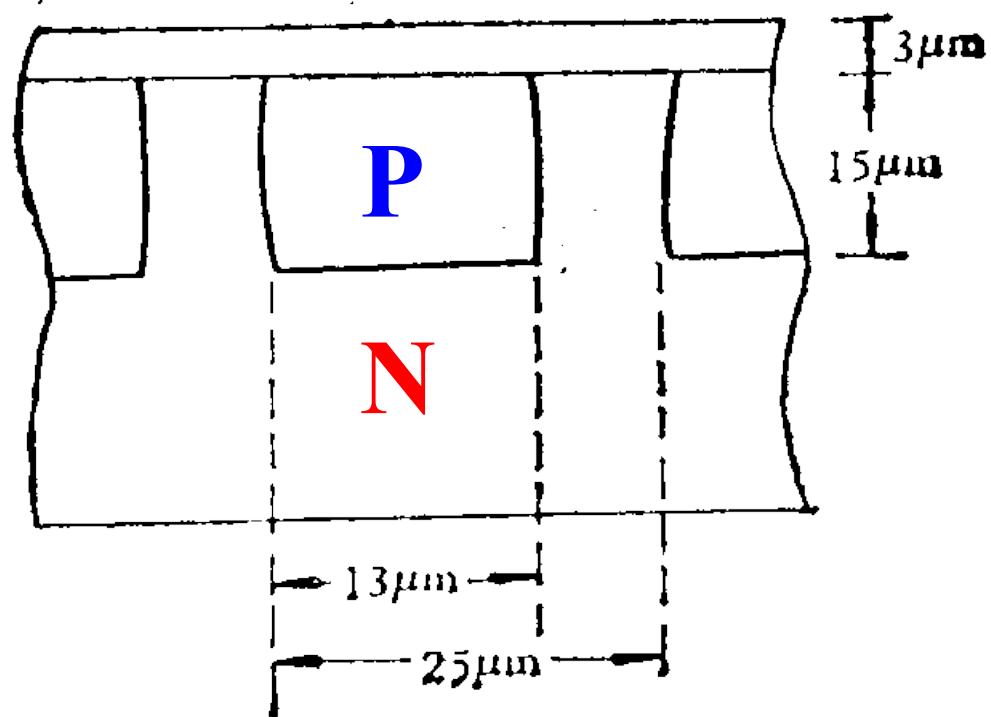
读出方式不同

- 集成硅二极管阵（IDA）
- 电荷注入器件（CID）
- 电荷耦合器件（CCD）

一、自扫描硅二极管阵 IDA (集成型硅二极管阵)

- 在n型硅衬底上扩散一层厚约 $15\mu\text{m}$ 的p型硅，构成p-n二极管阵列，相邻两二极管的中心距离约为 $25\mu\text{m}$ ，在二极管上再扩散一层硅的氧化物 SiO_2 。对应每个二极管再制作一个场效应管开关。
- 通过开关，使所有二极管都和一个公共母线相连，场效应管开关受一个移位寄存器控制。

自扫描硅二极管阵



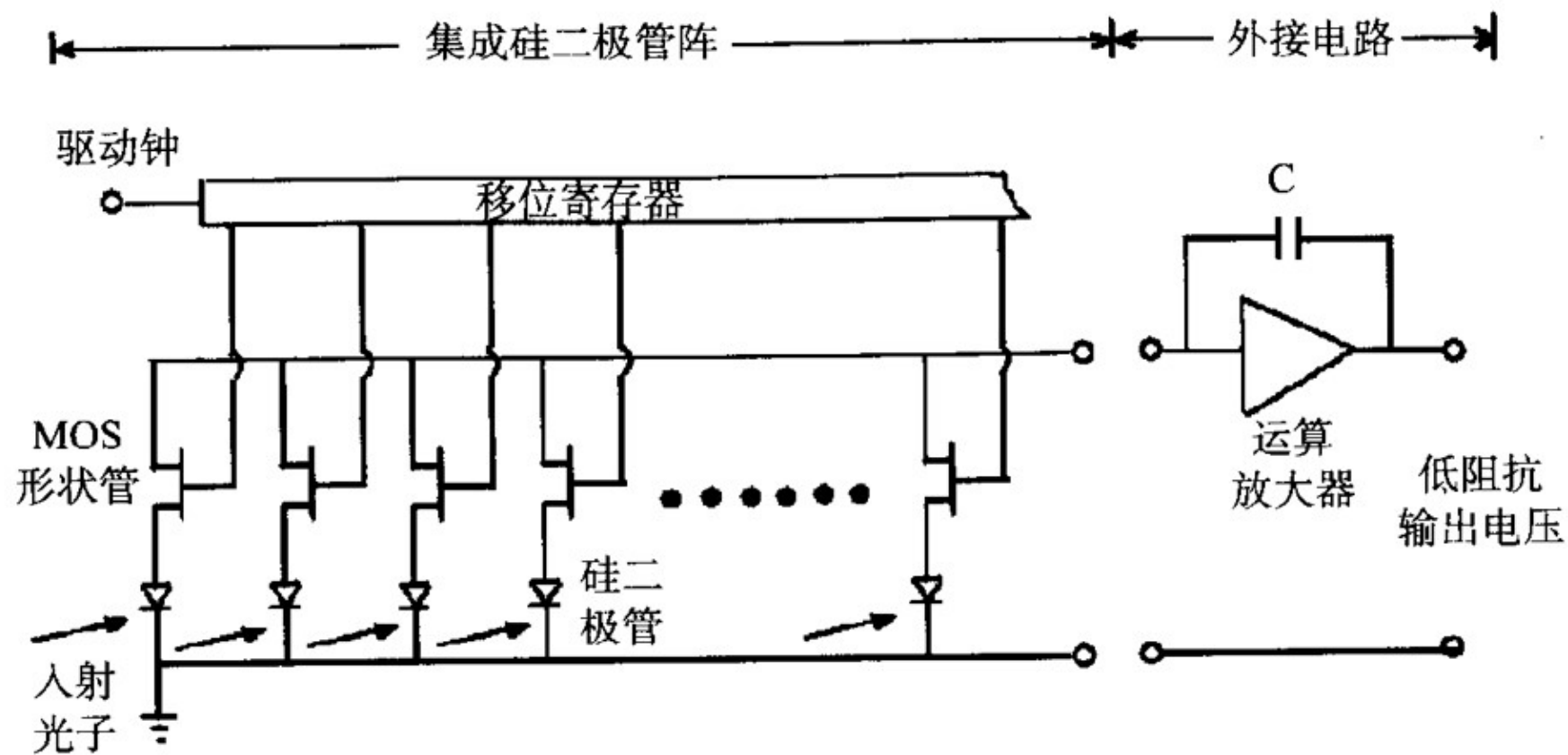


图 2.25 集成硅二极管阵 (一维)

- 当移位寄存器输入移位脉冲（时钟脉冲）时，在每一瞬间，顺序打开每个开关，使每个二极管顺次和公共母线相通，这样收集和存储在二极管内的电荷就按顺序输出。
- 自扫描二极管阵的主要生产厂是美国雷迪康公司，所以有时也将这种器件称为：

Reticon

自扫描二极管阵的量子效率

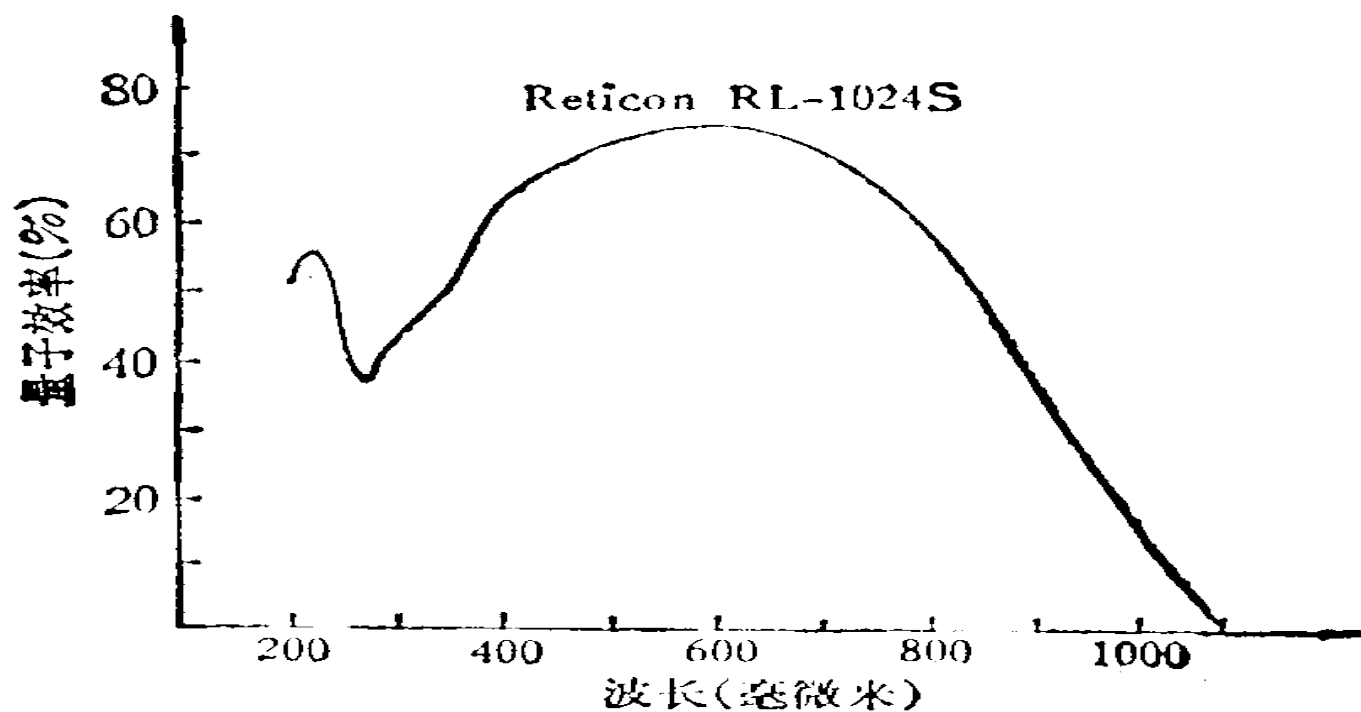


图 3.29 自扫描二极管阵的量子效率

自扫描二极管阵的典型的光谱响应曲线

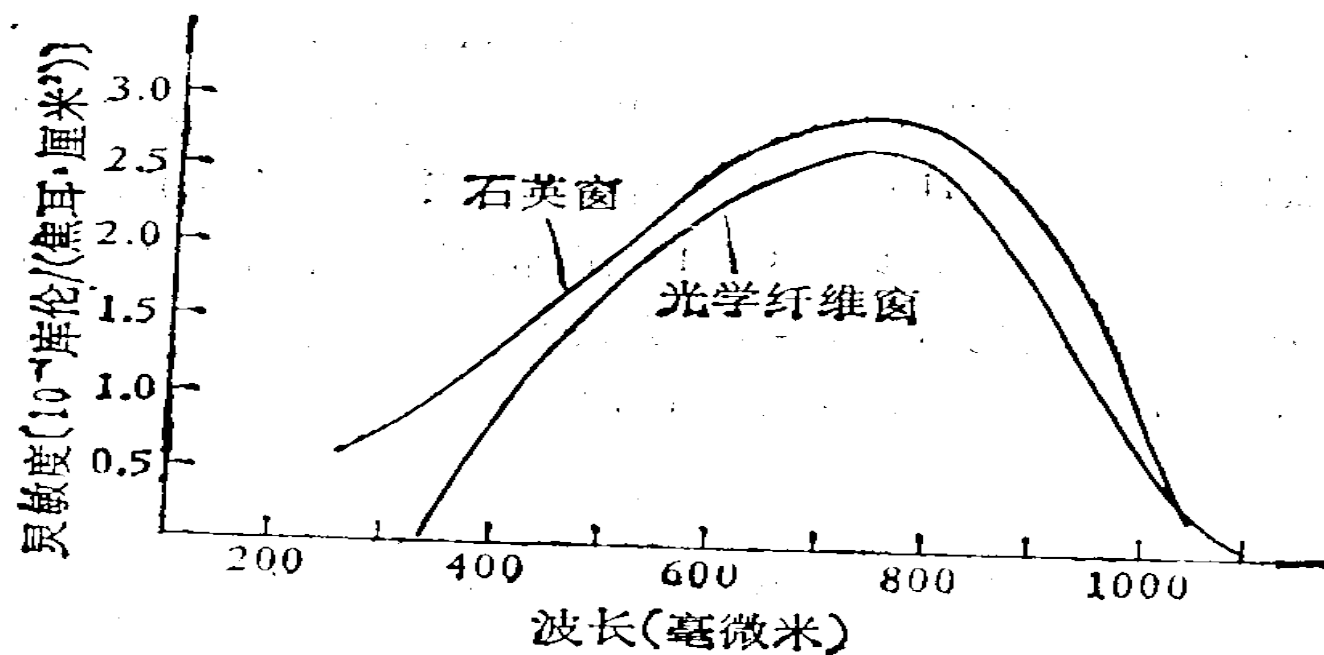


图 3.31 自扫描二极管阵的典型的光谱响应曲线。

信号电荷与曝光量的关系

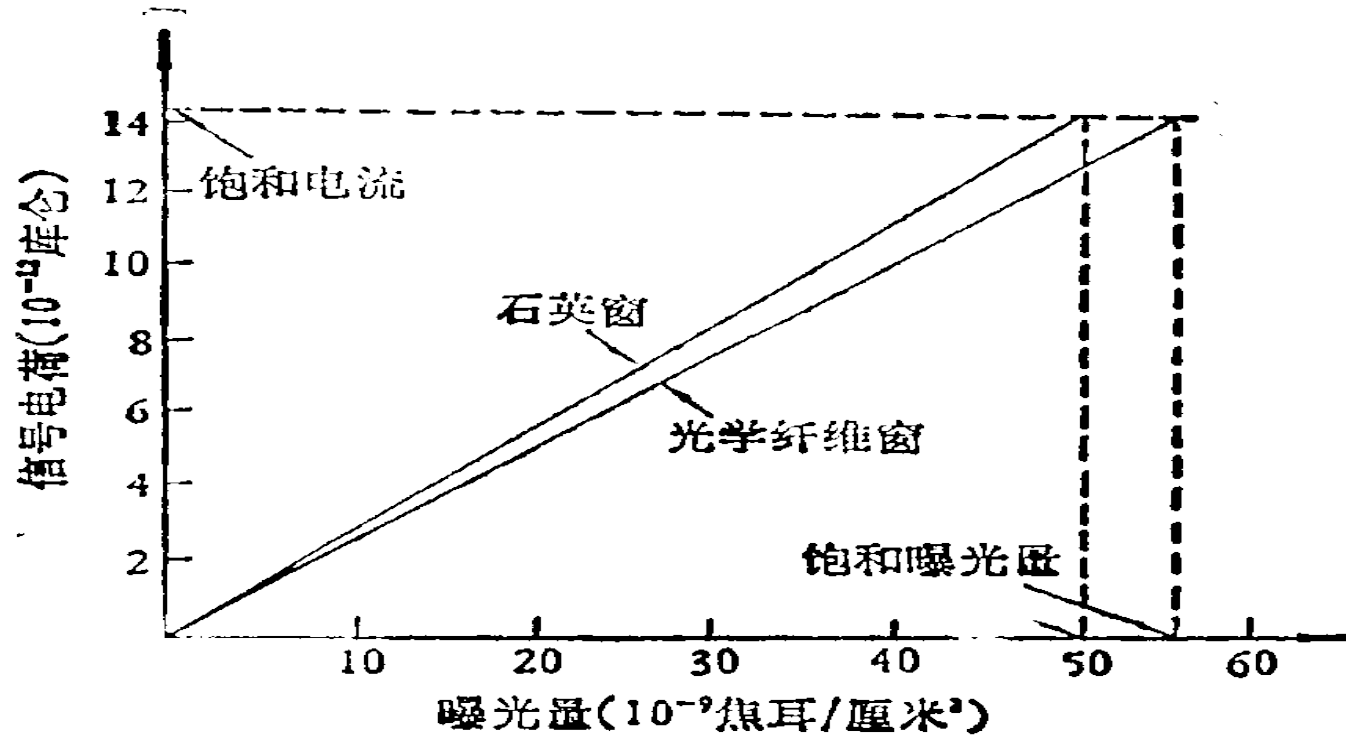


图 3.30 $\lambda = 7500$ 埃时信号电荷与曝光量的关系。

暗流与温度的依赖关系

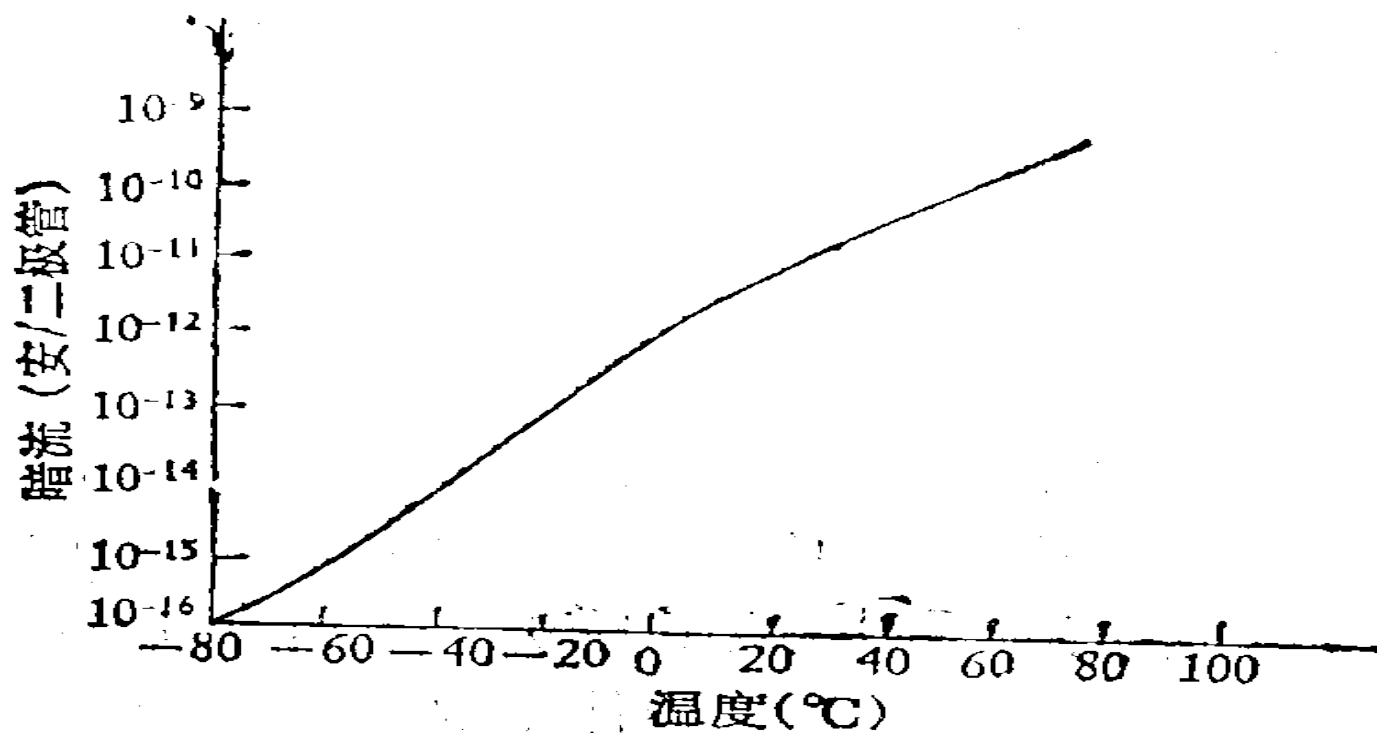


图 3.32 暗流对温度的依赖关系.

二、电荷注入器件（CID）

- 硅片上每个光敏像元由两个电容组成：
 - 一个连在行母线上，称为行电容
 - 另一个连在列母线上，称为列电容
 - 两个电容间有一个p型扩散层相耦合。通过这一扩散层，电容内的电荷可以用控制电容电极的电压变化来互相转移
 - 在硅二极管阵的两侧，沿行和列各有一个寻址器。通过寻址器选定要读的像元。

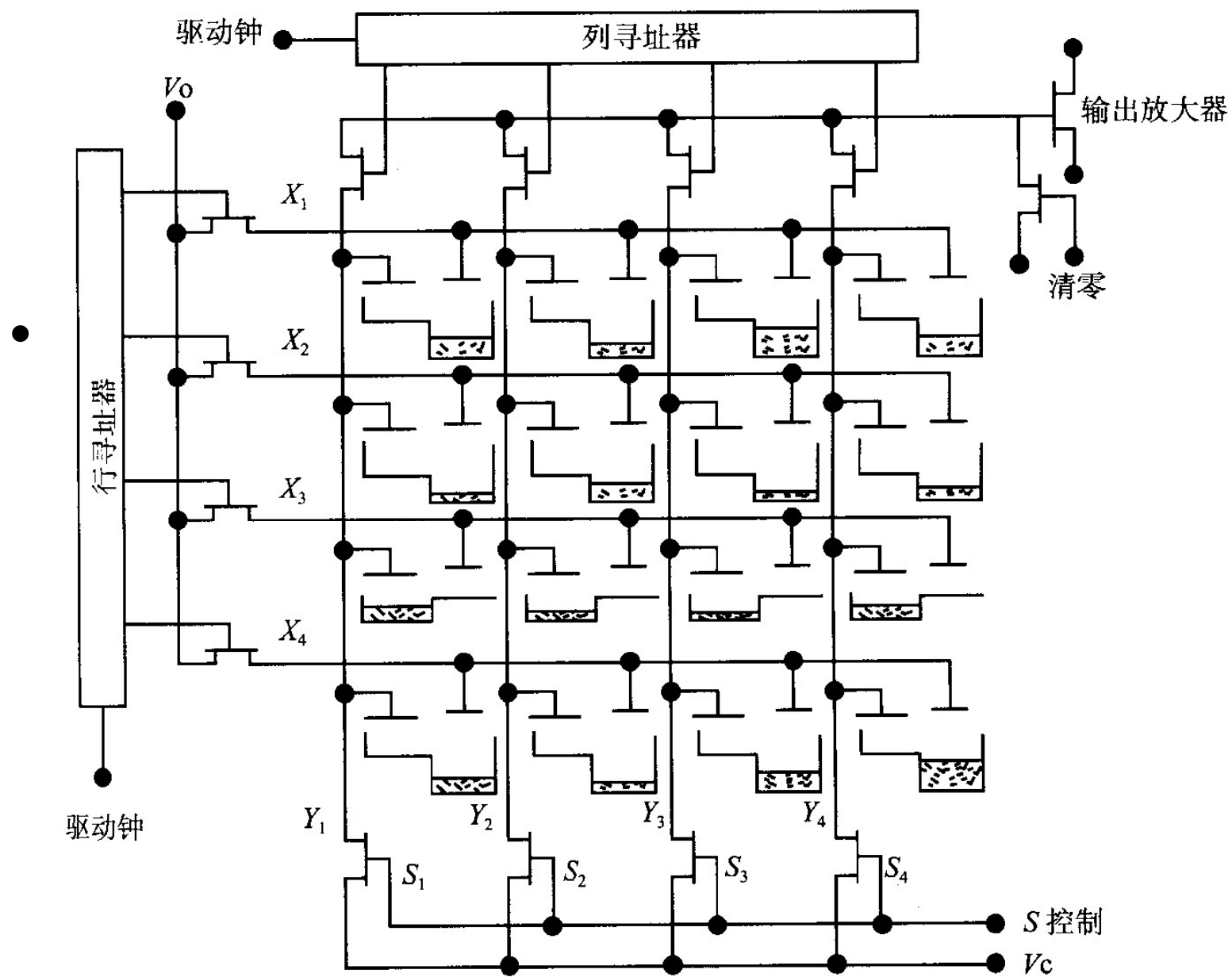


图 2.26 电荷注入器件

- 开始时，各二极管都加以偏置。
- 曝光后，光生电荷使二极管放电，在光敏上形成电荷潜像。
- 读出时，如果要读第 n 行，第 m 列的像元：
 - 先把要读的 n 行悬浮，测出该行的行电容内的总电荷。
 - 将要读的 m 列置为0V。这样第 m 列电容的电荷都转移到相应的行电容中，而使各行电容的电位发生变化。
 - 第二次测出第 n 行的电容总电荷。
 - 将得到的结果和第一次结果相减，就可以得到第 n 行，第 m 列的像元中因曝光所储存的电荷量。

- 读出后，如果要将该像元清零，则将第n行置为0V，将电荷注入基板。
- 如果要恢复读出前状态，则将该行恢复偏置状态。这样使第n行的各行电容内部份电荷，重新注回相应的列电容，该像元就回到读出前状态。

特 点

- 从上述读出过程可见，像元经过一次读出，若有需要，可以把电荷回注到行电容，并不像IDA或CCD那样读出一一次后像元内的电荷团就被清除掉，不能再复原。
 - 这种所谓的“无破坏读出”可以实现一帧电荷潜像反复读出多次，从而将得到的结果相加以降低随机噪声。
 - 代价是多次读出耗费同样倍数的时间。
- 另一个特点是它可以在任何时刻通过行和列的选址，选择任一像元读出，而不像CCD那样必需按行和列顺序读出。
 - CID可以只读感兴趣的一小块，从而节省读出时间。
 - 如有需要，可以实现回过来再读前面的部分。

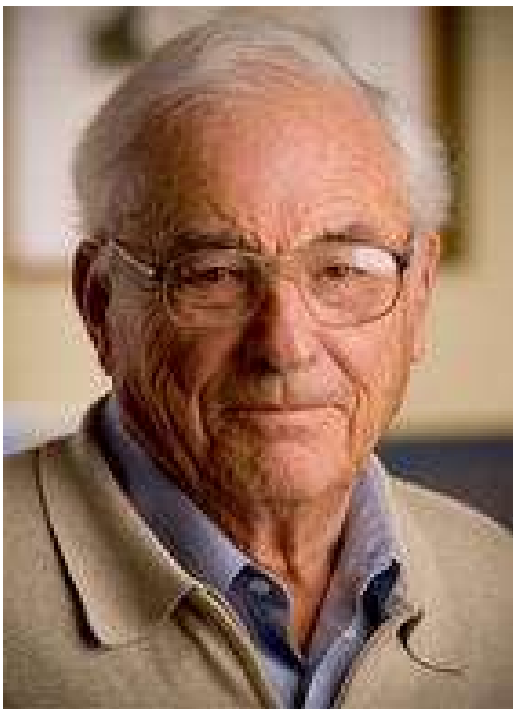
§ 6 CCD

Charge Coupled Device

电荷耦合器件

1970年由美国贝尔实验室的Willard Boyle和George Smith首先提出的。

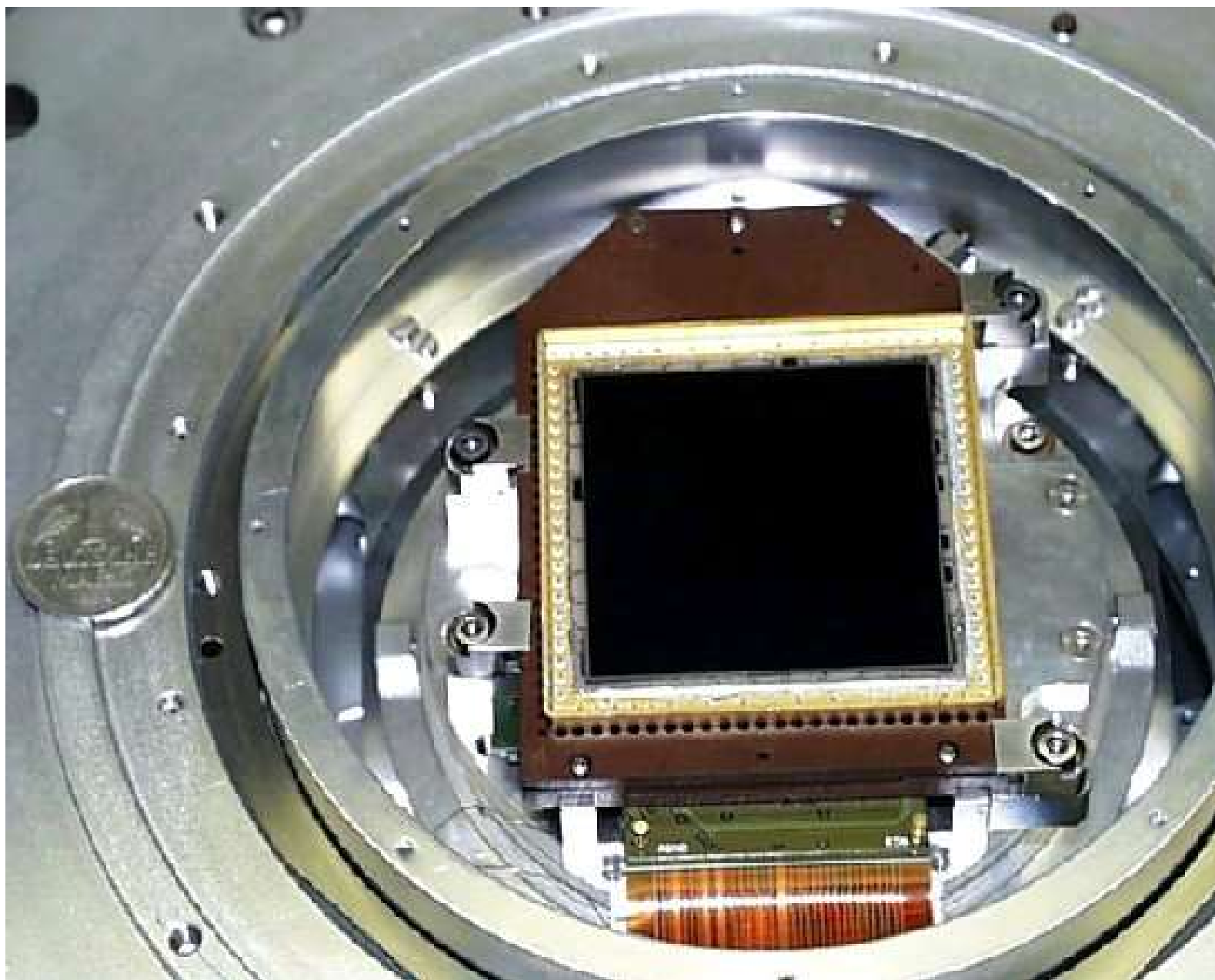
2009年诺贝尔物理学奖



威拉德·博伊尔



乔治·史密斯



1、CCD的结构：

在p型（或n型）硅衬底表面生成一层绝缘层 SiO_2 ，约 1200\AA 厚，然后用光刻技术在 SiO_2 上制造一系列间隔很小（ $<3\mu\text{m}$ ）的电极，形成金属—氧化物—半导体电容（即MOS电容）阵列，通过金属化布线，形成三相结构。

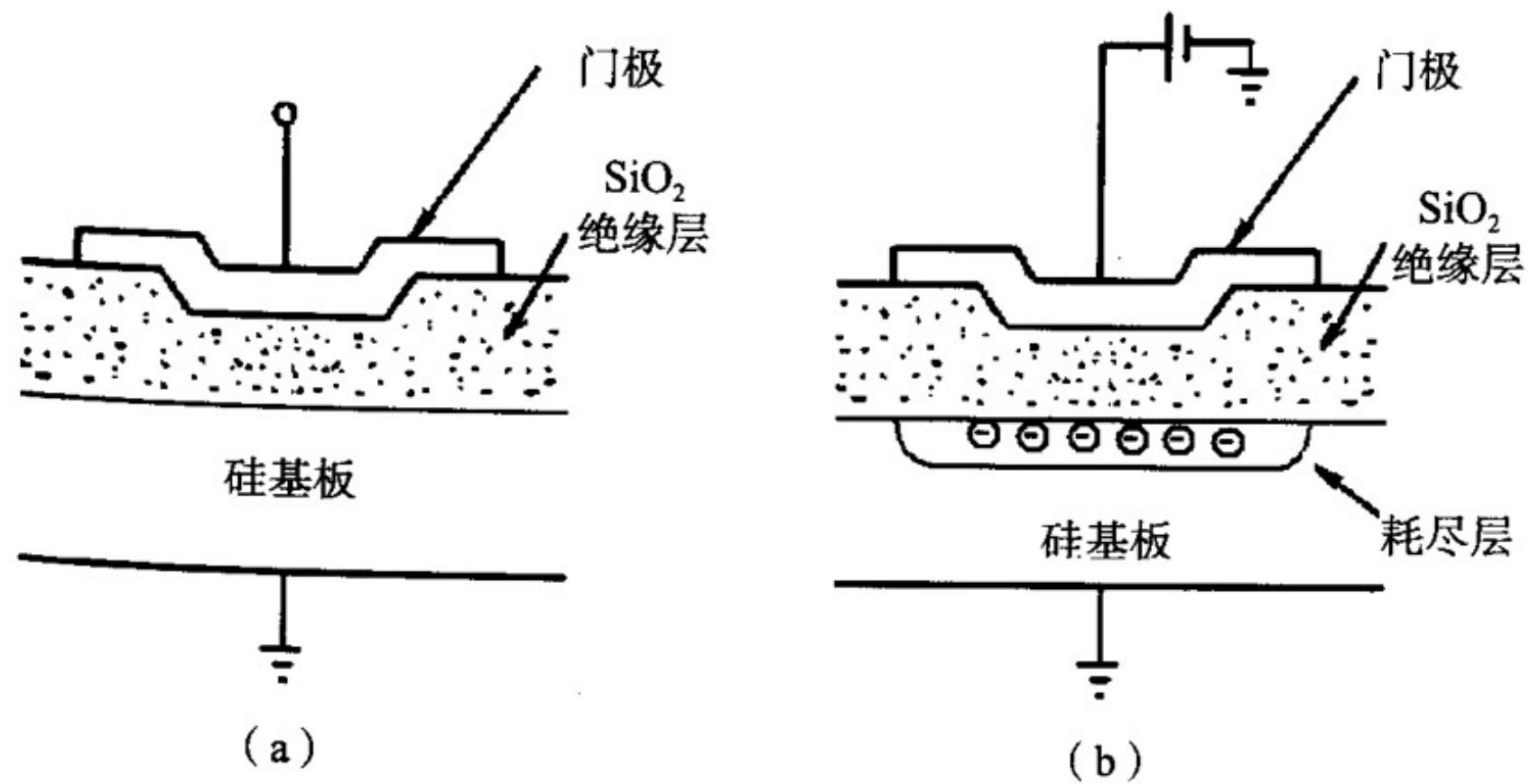


图 3.2 (a) MOS 电容和 (b) 偏置后的 MOS 电容

2、CCD的工作原理：

- 当在器件表面的某一个电极加上电压（对于p型衬底的CCD加正电压，对于n型衬底的CCD加负电压），则在该电极下面形成势阱，代表信息的少数载流子可以储存在势阱中。势阱的深度取决于所加电压和少数载流子的数目。

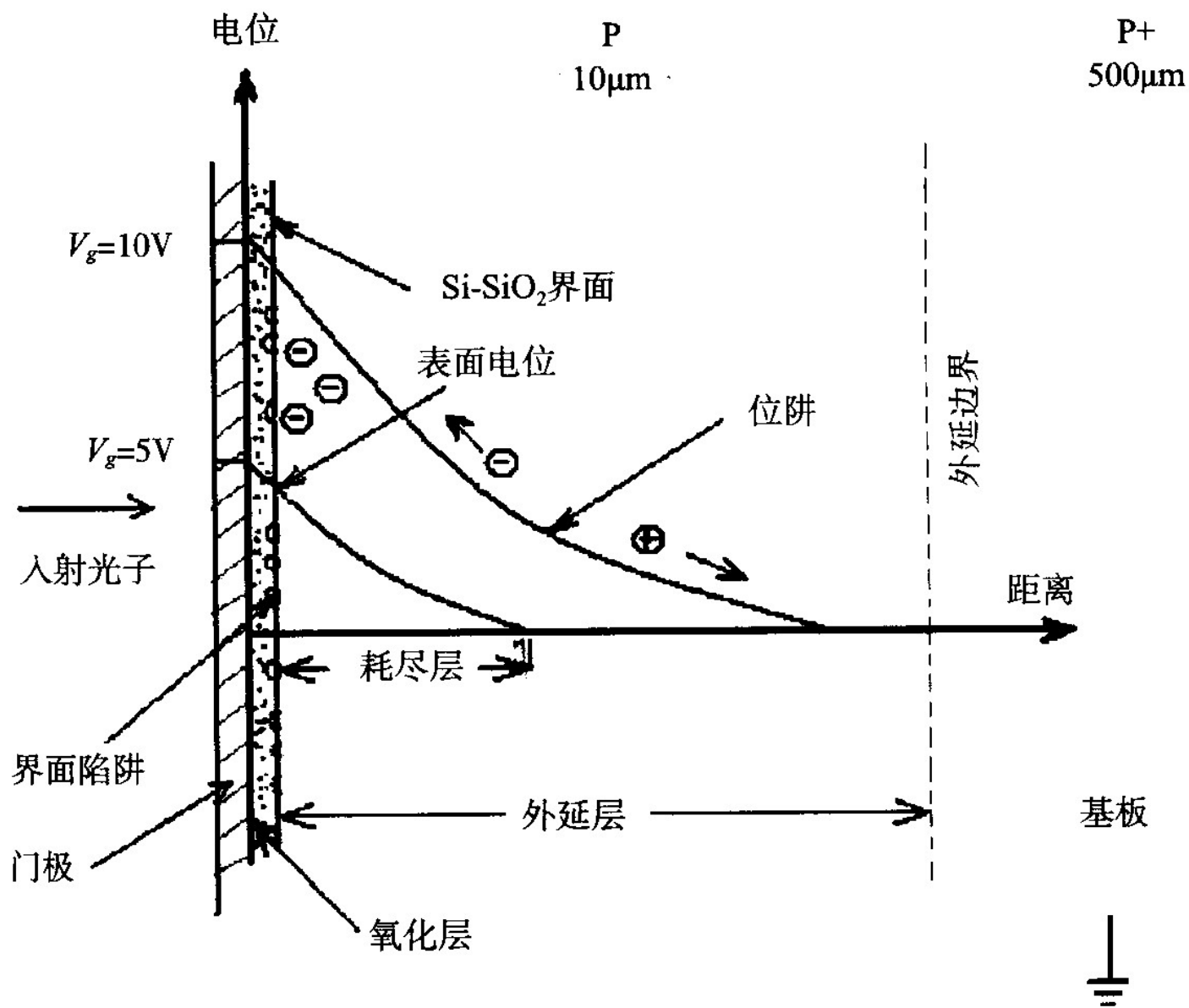
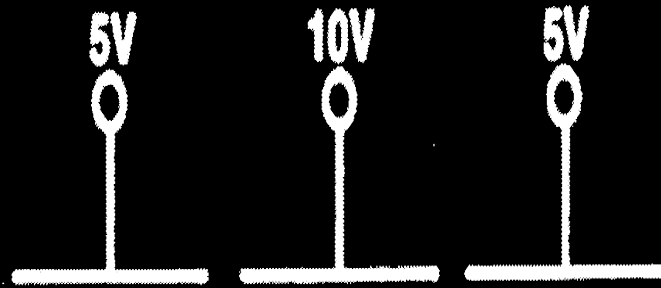
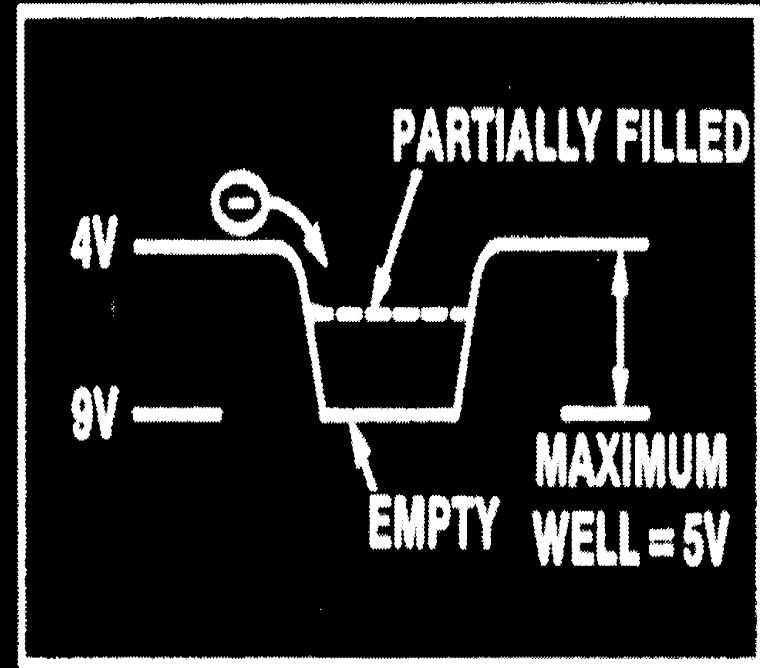
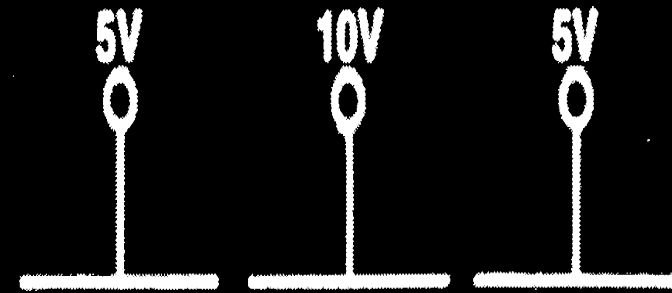


图 3.4 表面型 CCD 内部电位状态



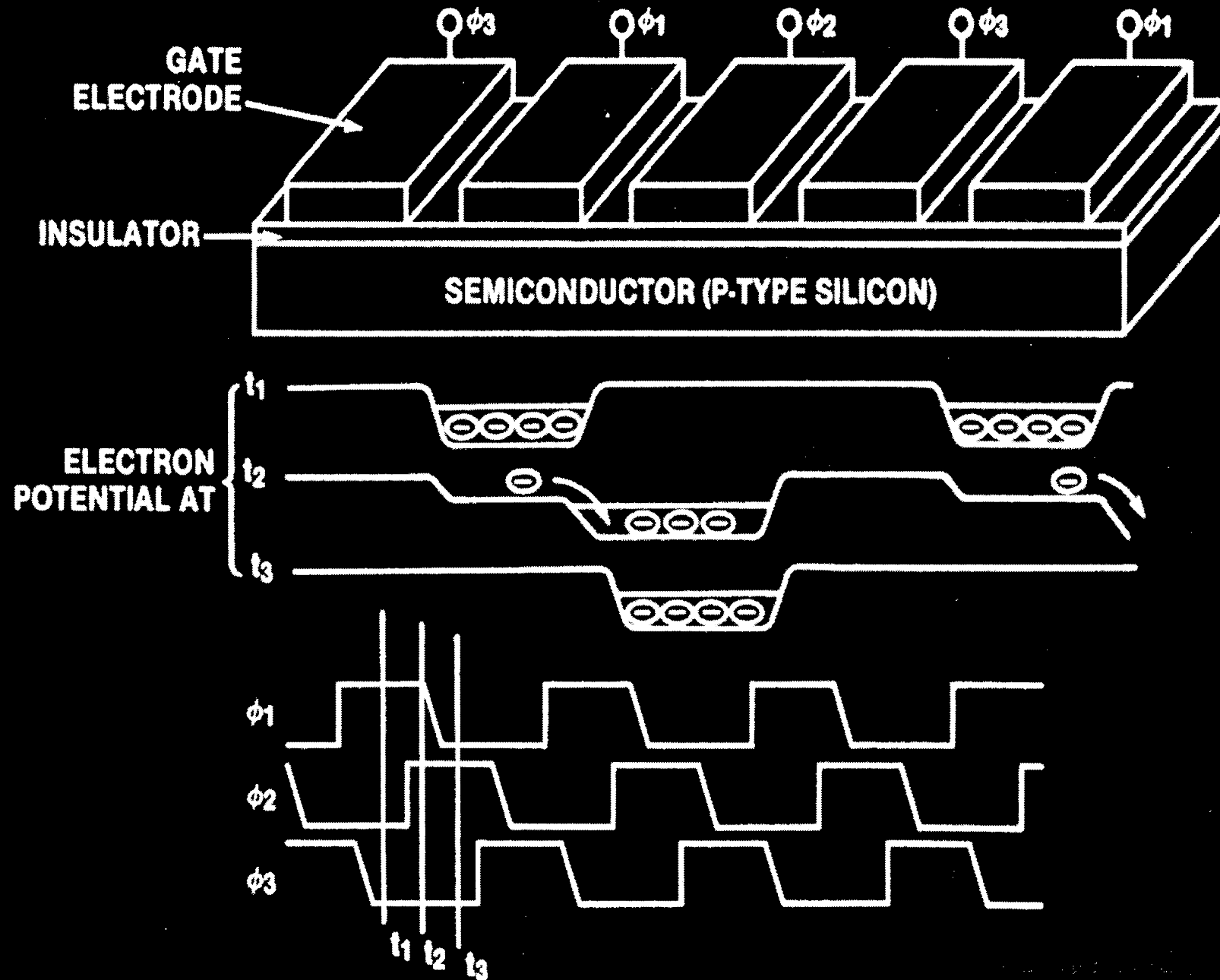
4	9V	4
2	7V	2
0	5V	0
0	3V	0
0	1V	0
0	0V	0
0	0V	0
0	0V	0



- 对于一个未致冷的MOS电容，由热所至的自由电子将很快充满这一电容。
- 但对致冷的器件则不然，除非因光子轰击而产生光致电离，否则它将不被充满。
- 这说明该电容可以积累由光致电离而产生的电子，并且电子的数目与入射光子数成正比。因此电容中电子的多少反映了光的强弱，进而反映了天体像的明暗程度，这样就实现了光辐射信息和电信号之间的转换。

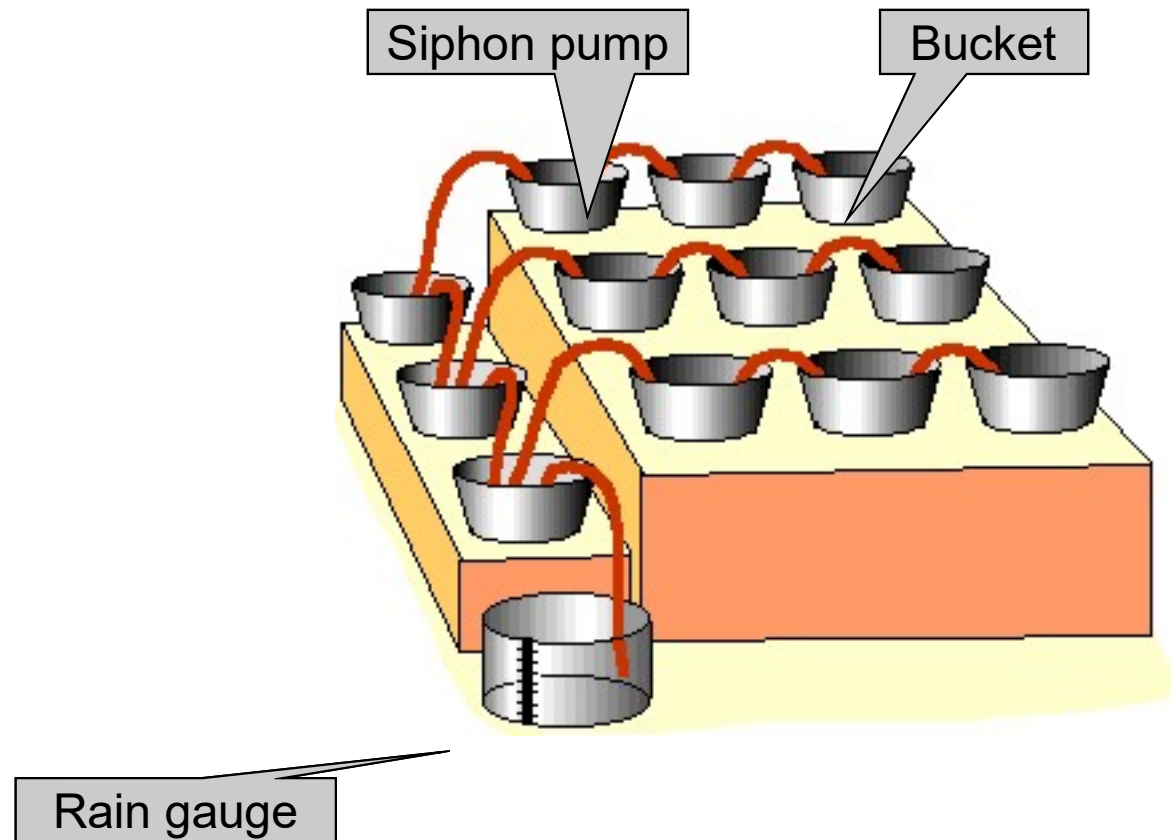
3. CCD图像的读出

3-Phase

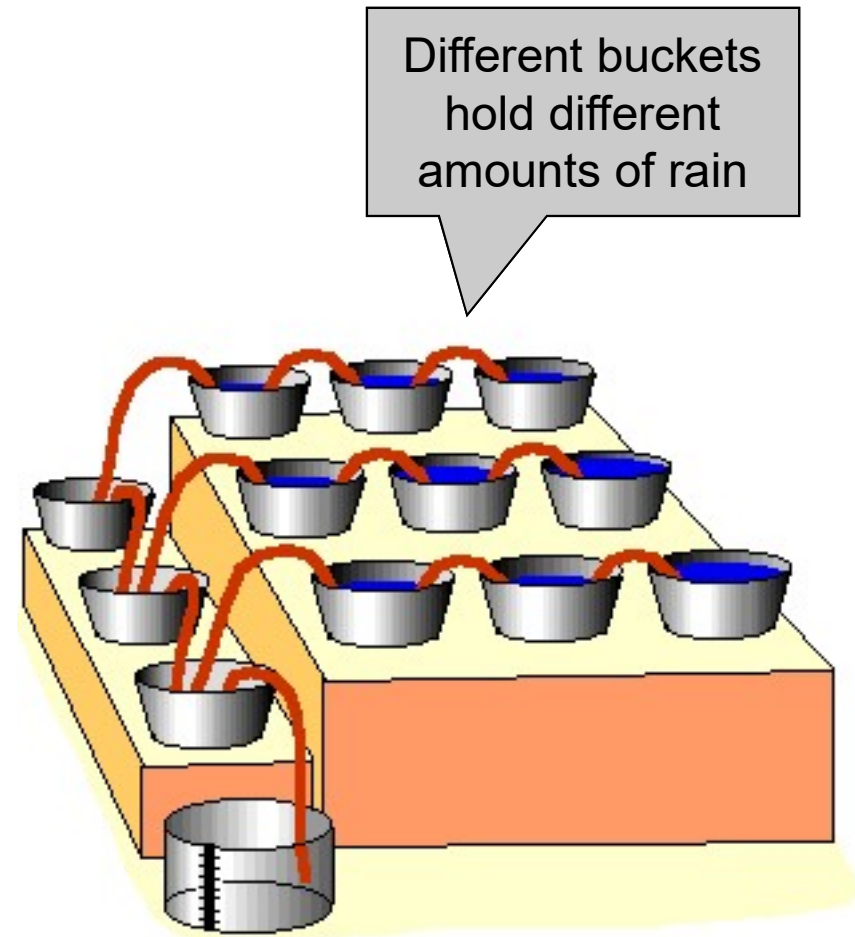


- t_1 时刻: V_1 有最大值, 1、4、7电极下面势阱最深。当有少数载流子时, 势阱变浅。
- t_2 时刻: V_2 上升, V_1 并未下降, 由于电极1下有电荷, 势阱浅些, 因而电荷由电极1向电极2转移。
- t_3 时刻: V_1 下降, 电极1下面势阱更浅, 有更多电荷转移到电极2下。
- t_4 时刻: $t_4 - t_1 = T/3$, 电荷由电极1下转移到电极2下。
- 这样, $t = t_1 + T$ 时, 注入的信号电荷就可以从电极1下的势阱中转移到电极4下面的势阱中, 即完成一个完全的转移。

Imagine an array of
buckets ready to catch
rain.

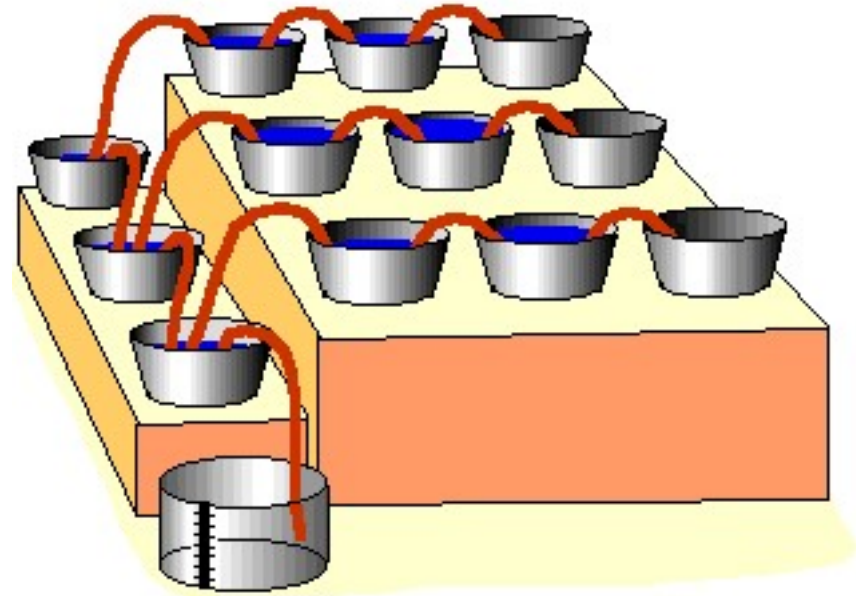


- To measure the rain in each bucket (after the rain has stopped), the siphon pumps are used to move the accumulated rain towards the master rain gauge.



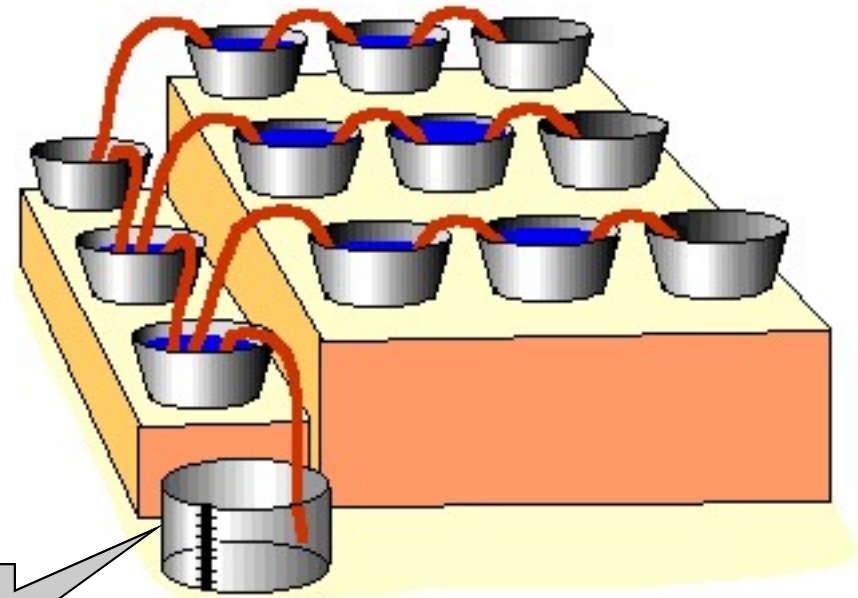
First, the end line of buckets are emptied into the empty row lined up with the master gauge.

Contents of all buckets move to left

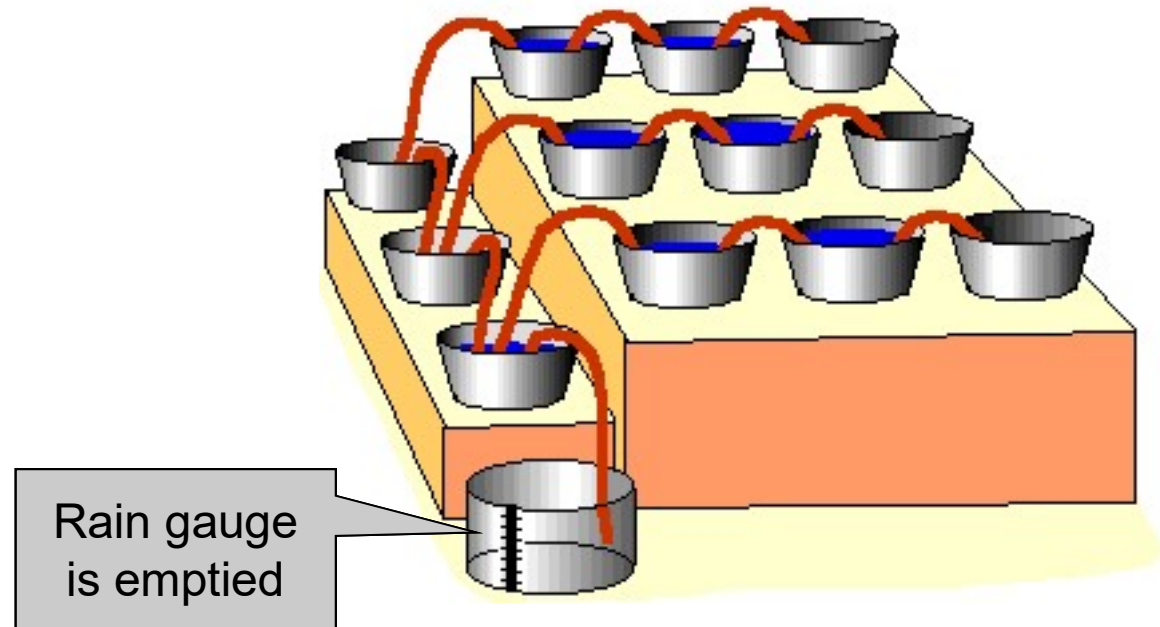


Then each bucket in turn is siphoned into the master gauge for measuring.

After each measurement, the master gauge must be emptied before a new measure can be taken.

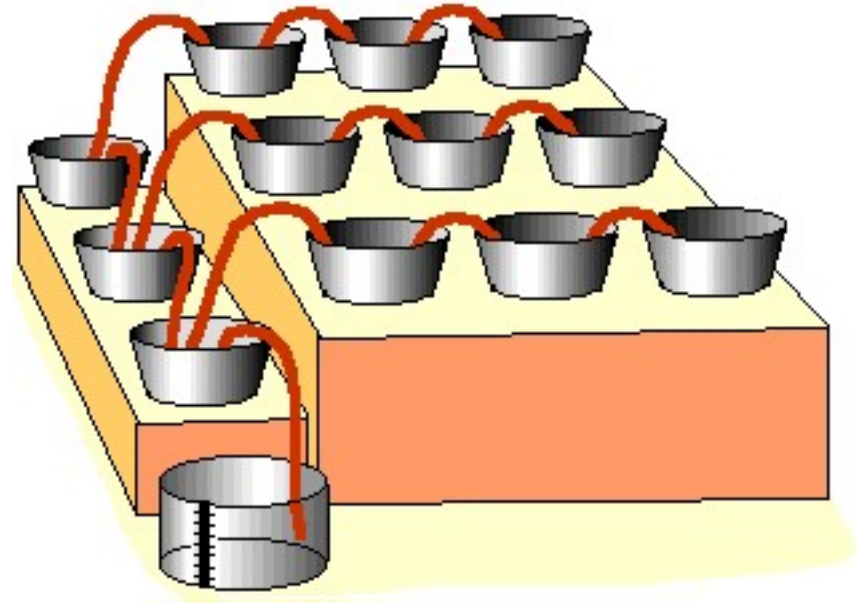


Then each bucket in turn is siphoned into the master gauge for measuring.



- This shift-and-measure is carried on until all the water along the “readout register” has been measured.

The remaining water to be measured is siphoned along into the now empty buckets (the readout register) and the process of shifting-and-measuring is repeated.



- 雨滴 = 光子
- 水桶 = CCD的像素
- 水桶的深度 = CCD的势阱
- 抽水泵 = CCD的转移寄存器
- 雨水计量器 = CCD的数模转换器



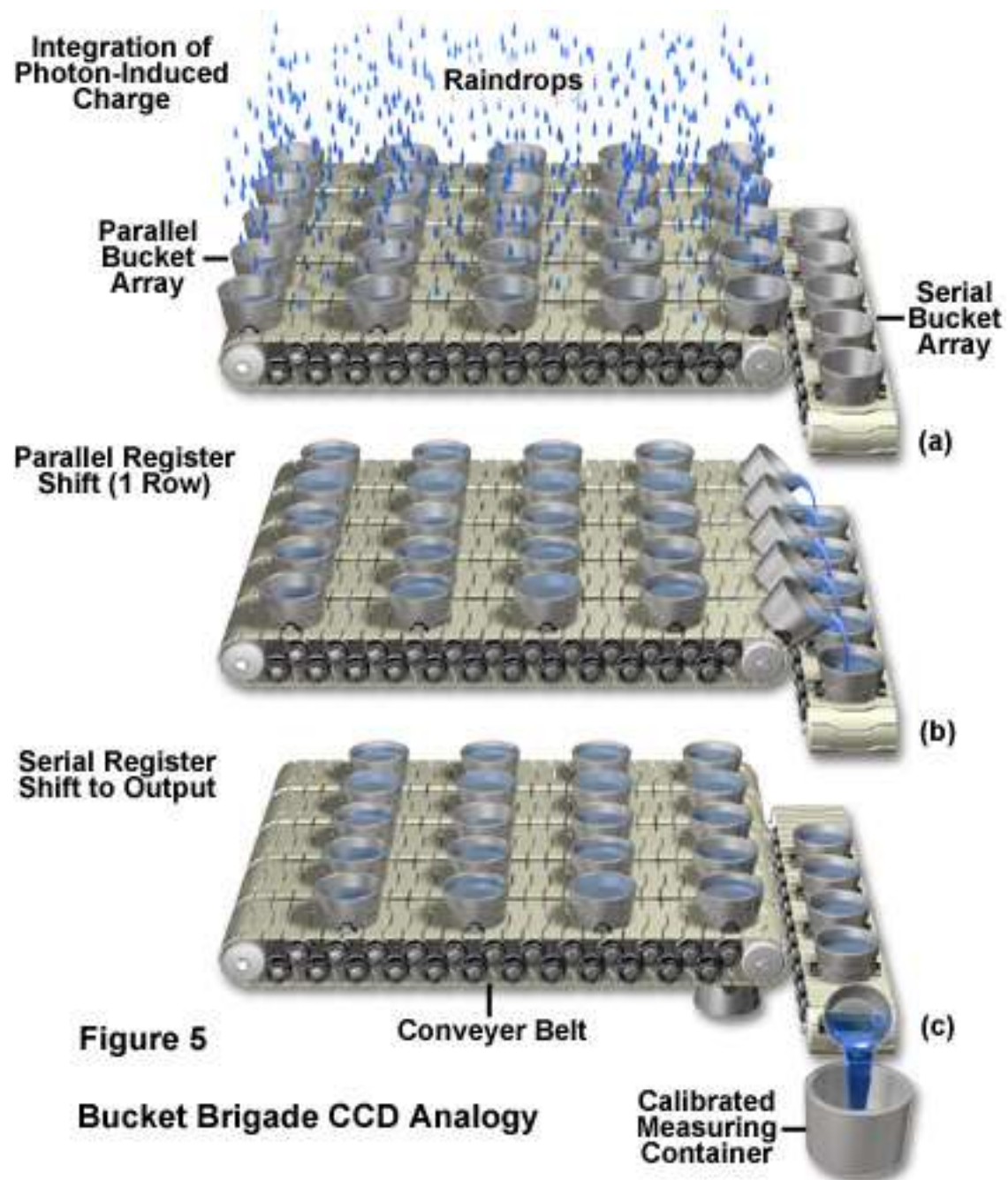


Image area

Metal, ceramic or plastic package

Connection pins

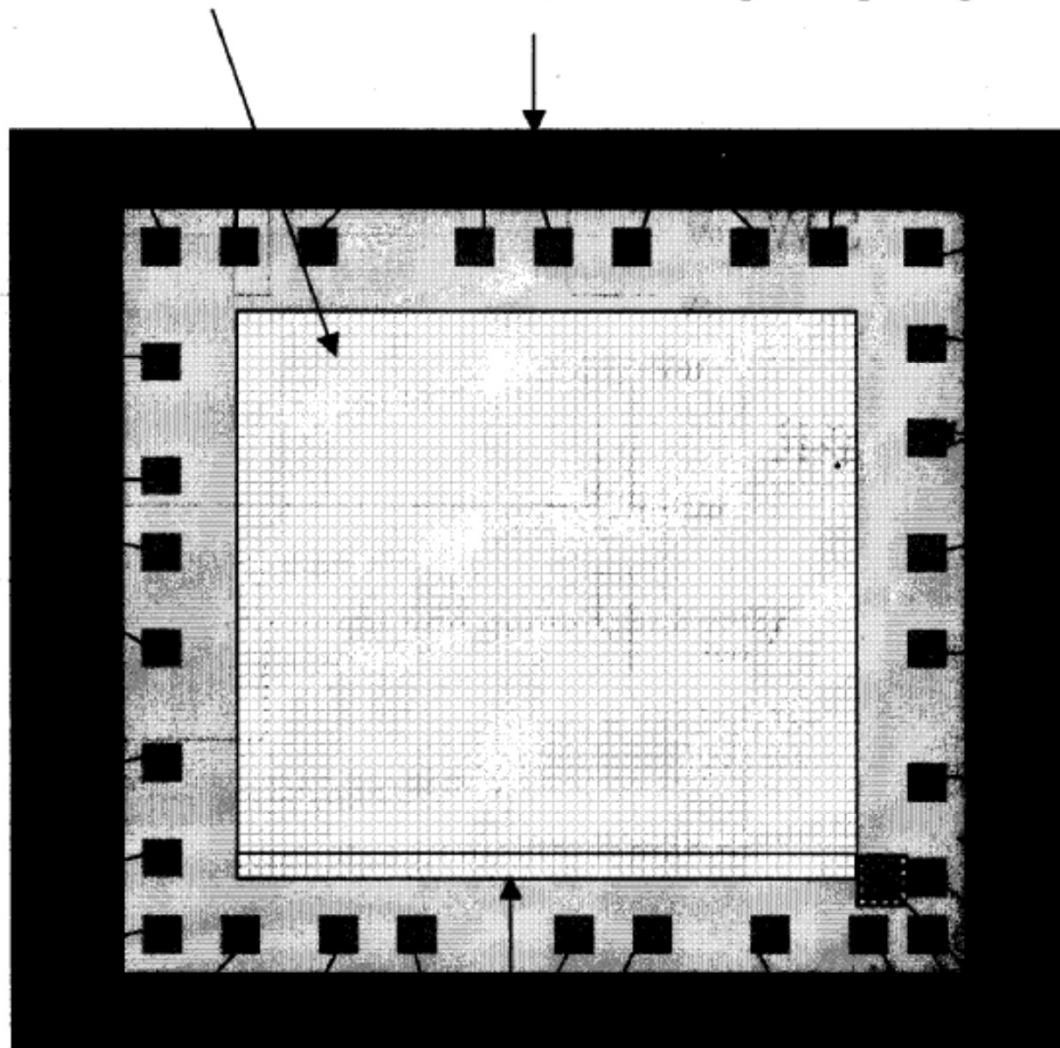
Gold bond wire

Bond pads

Silicon chip

On-chip amplifier

Serial register



天文可见光探测器

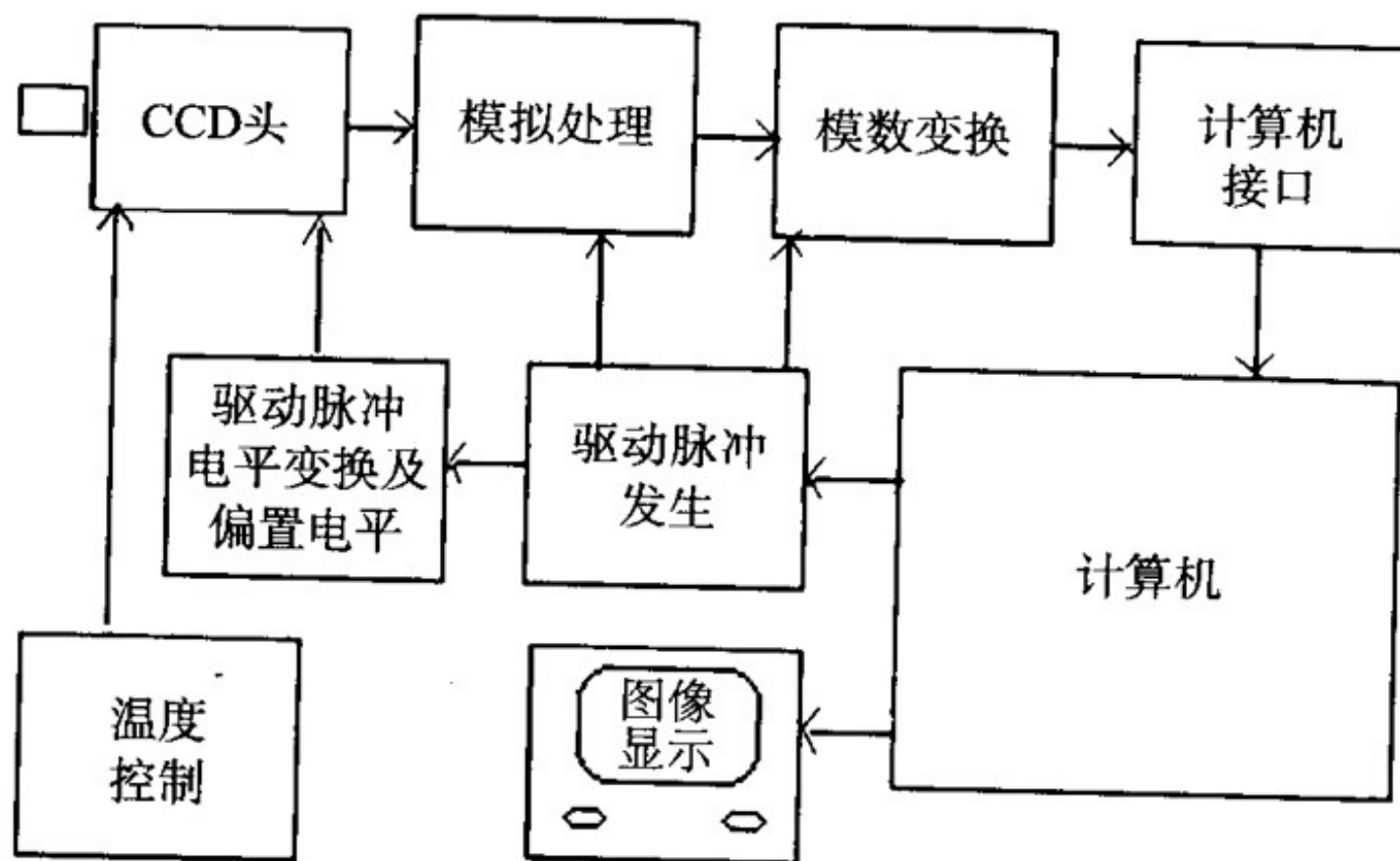
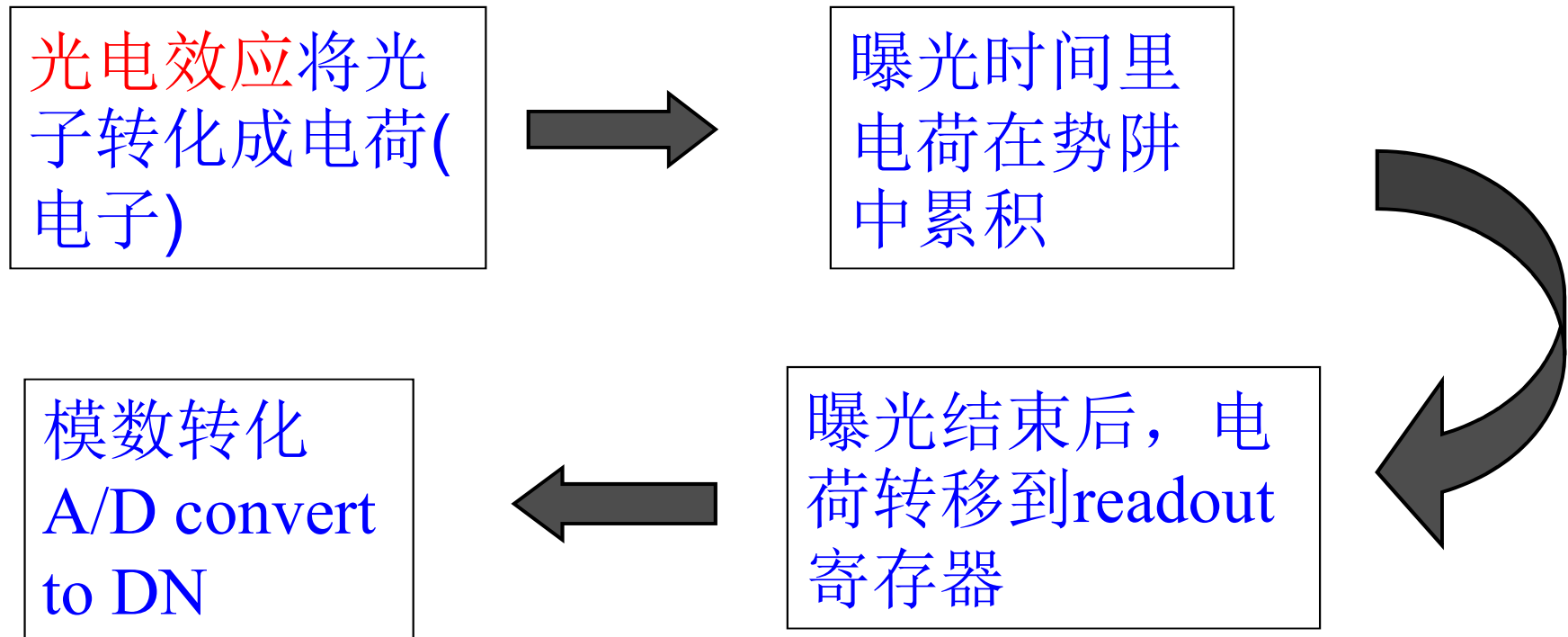
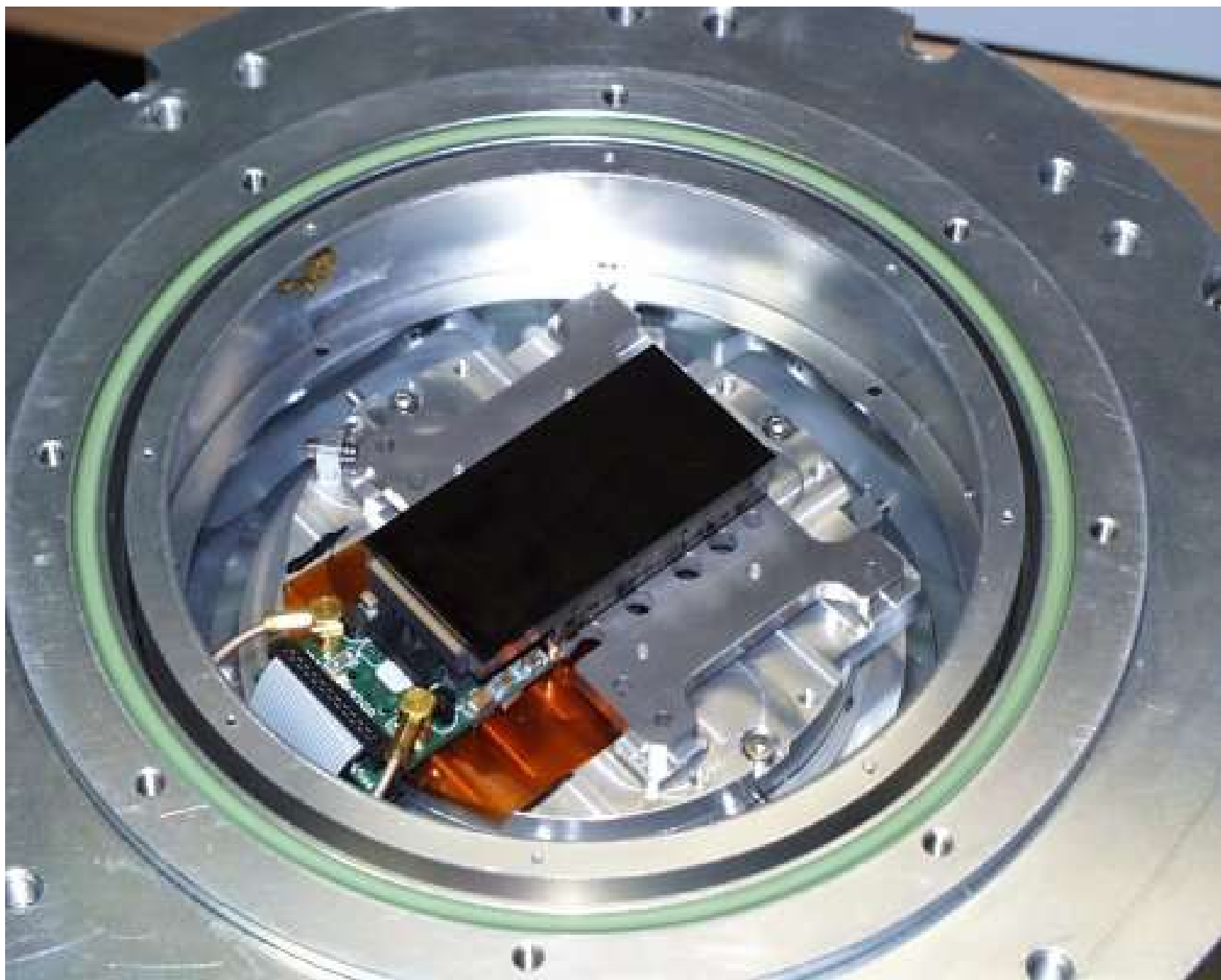


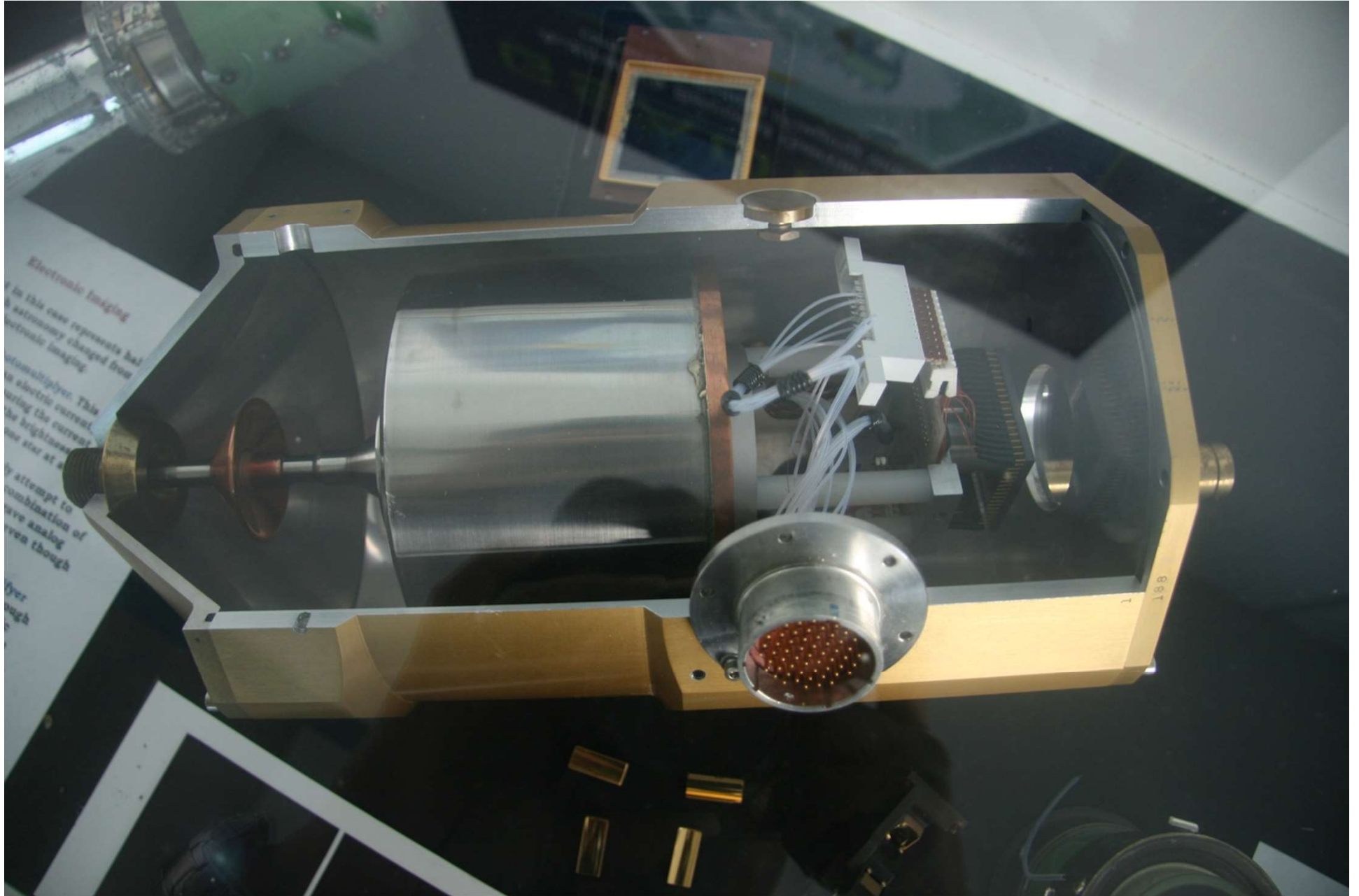
图 3.22 CCD 系统方框图

CCDs:工作方式









Electronic Imaging

In this case represents hal-
a astronomy changed from
electronic imaging.

Electronmultiplier. This
is electron current.
during the current
the brightness
one star at a

attempt to
combination of
have analog
even though

lyer
ough

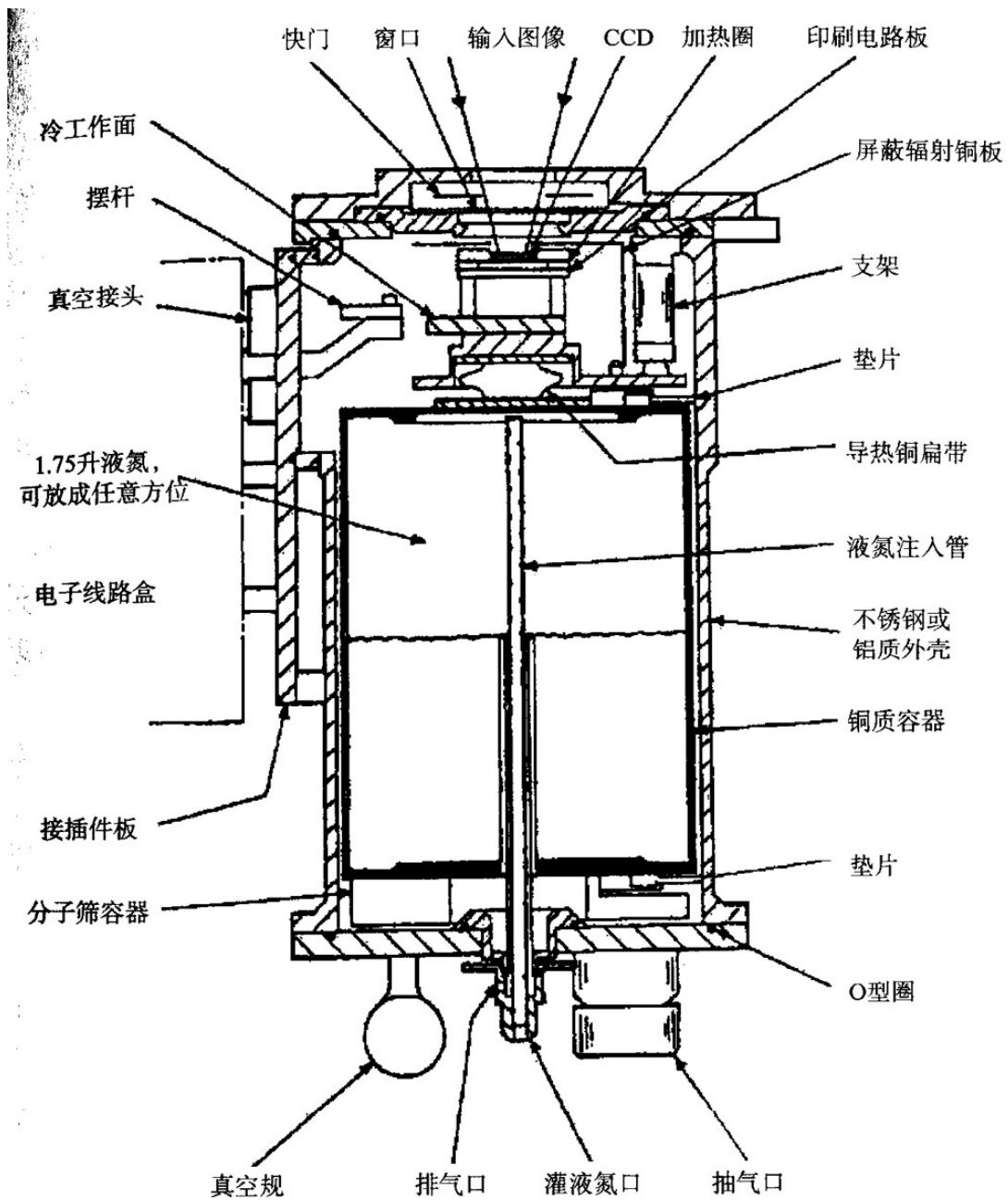


图 3.23 经典液氮冷却 CCD 头

常用CCD冷却方式

- 经典杜瓦瓶：液氮
- 连续流动制冷器
- 闭环制冷机：机械制冷
- 热电冷却器

4. 不同的读出方法

- 逐行读出：经典读出方法
- 帧转移读出
- 行间转移读出
- 漂移扫描读出
- 可变积分时间的漂移扫描读出
- 简并读出
- 局部读出
- 分块读出

帧转移读出

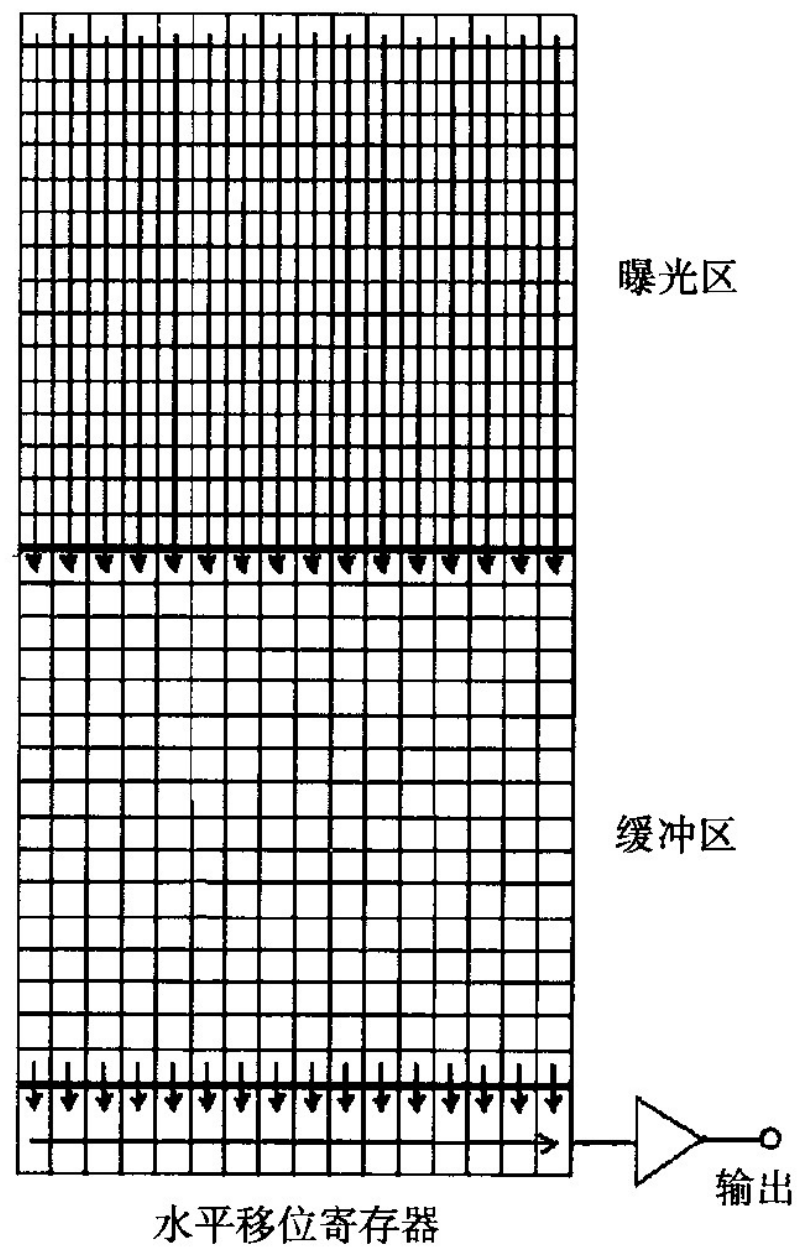


图 3.17 帧转移读出

行间转移读出

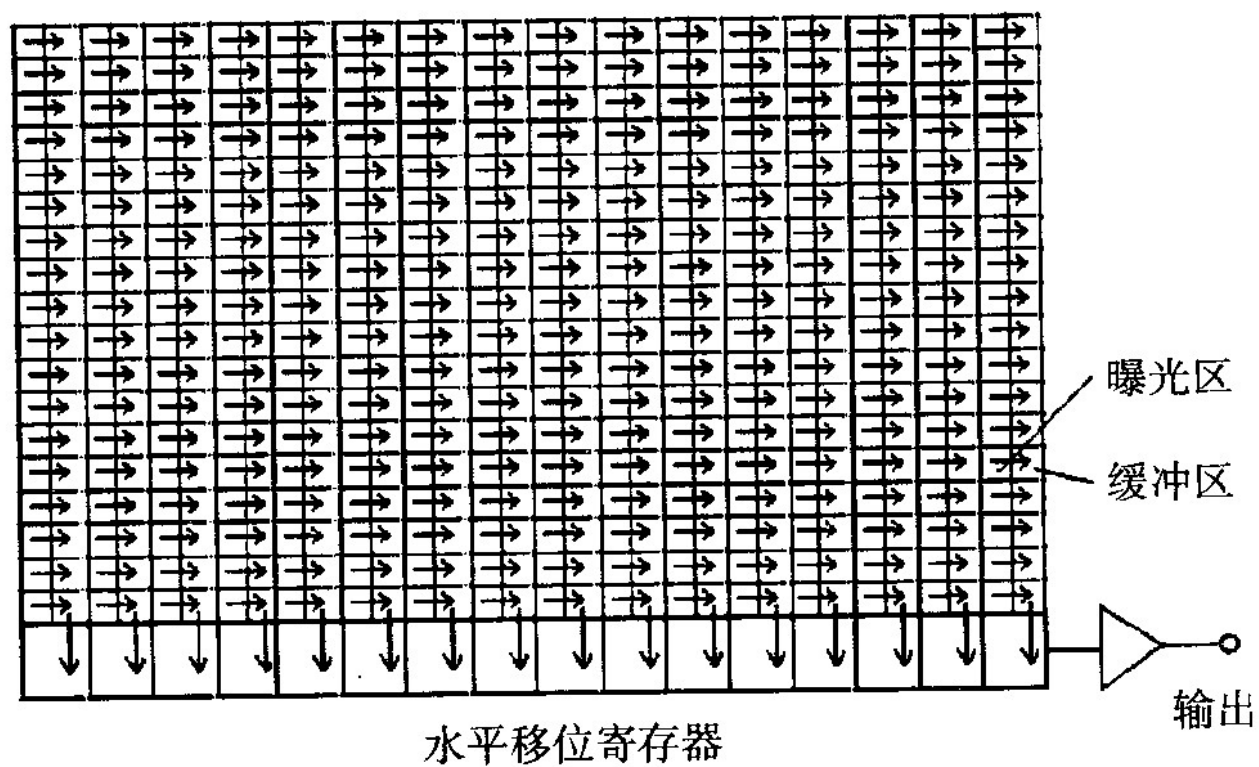


图 3.18 行间转移 CCD

简并读出

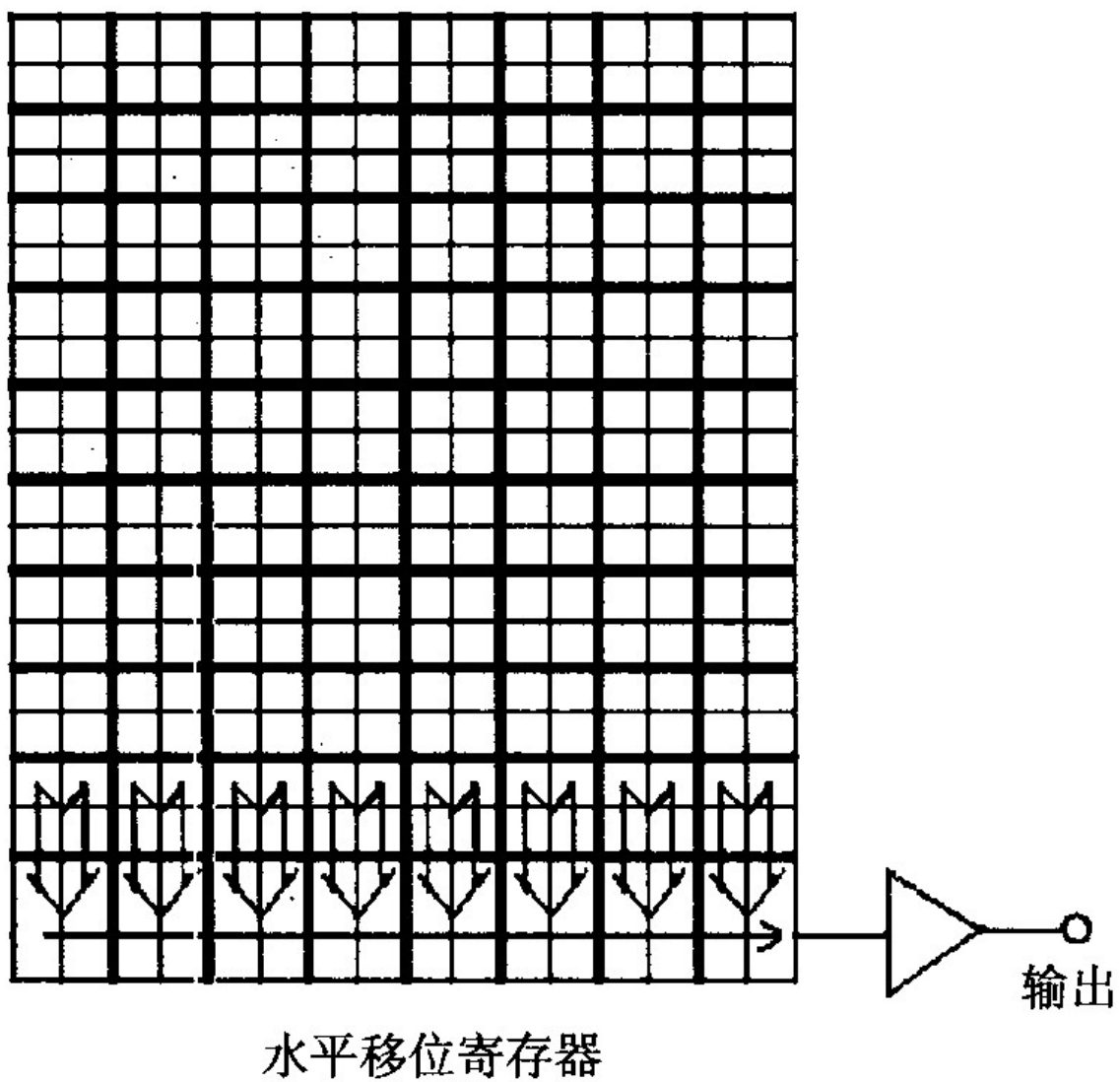


图 3.19 2×2 简并读出

局部读出

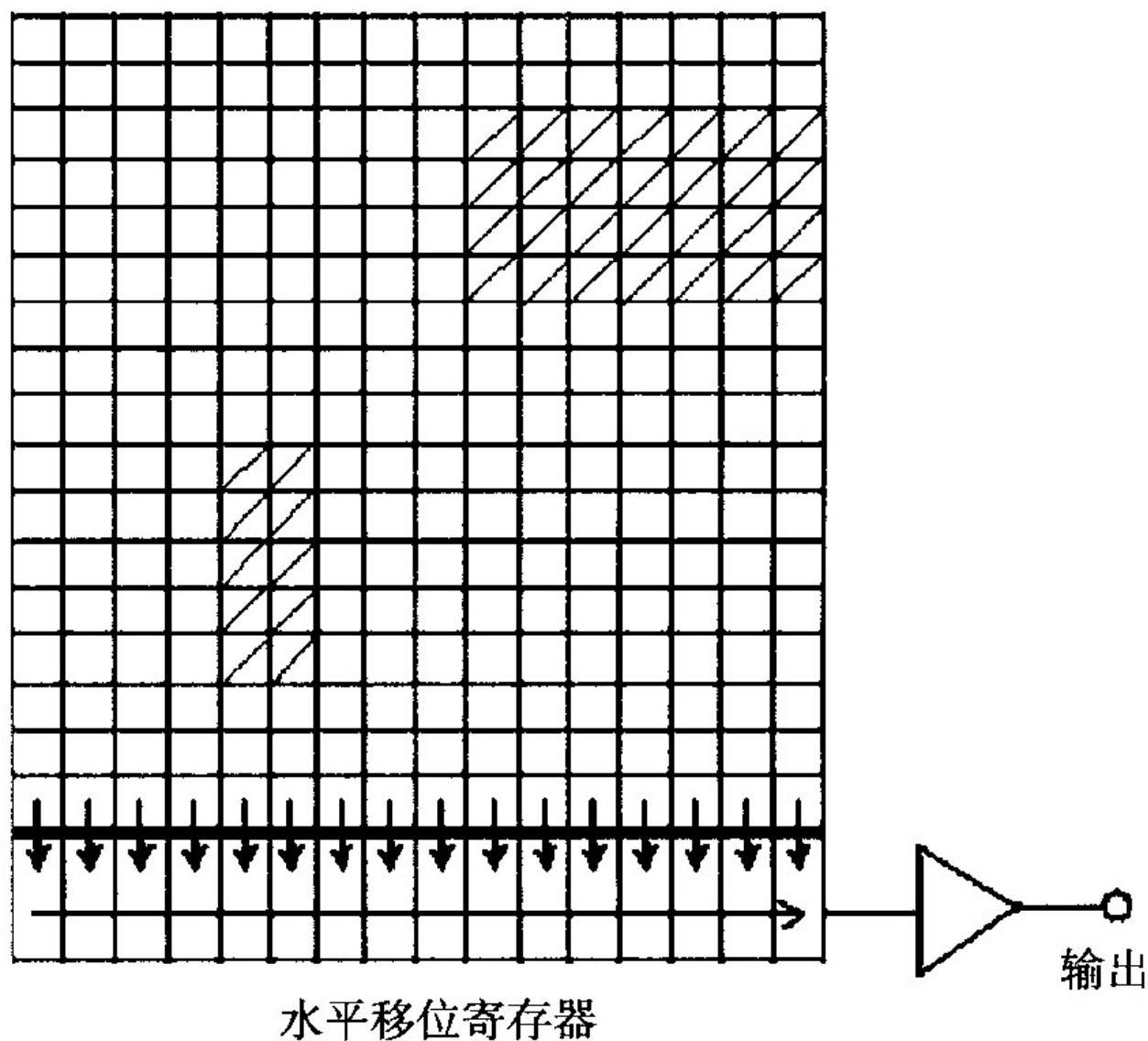


图 3.20 局部读出

(斜线部分正常读出，其他部分快速读出)

分块读出

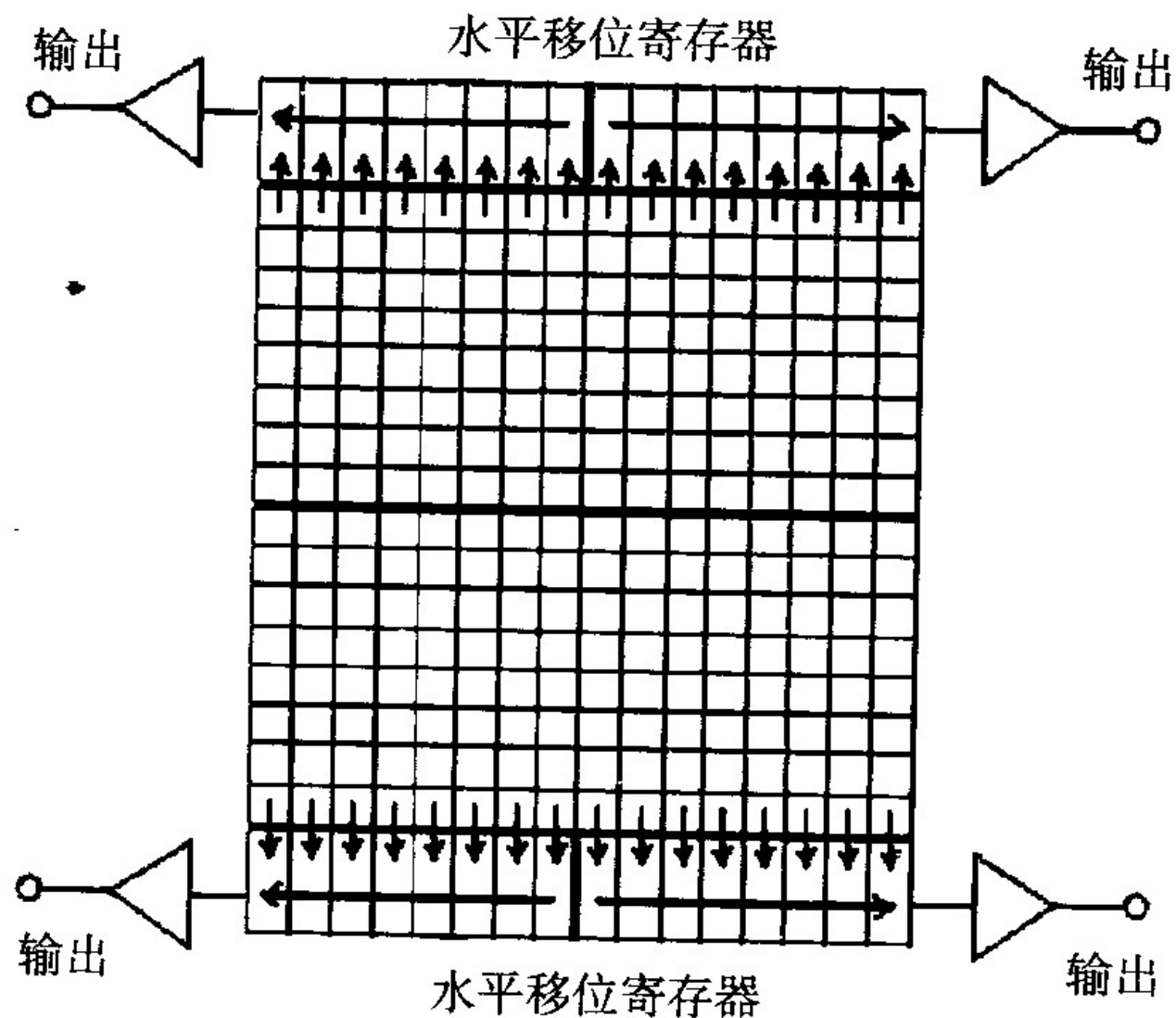
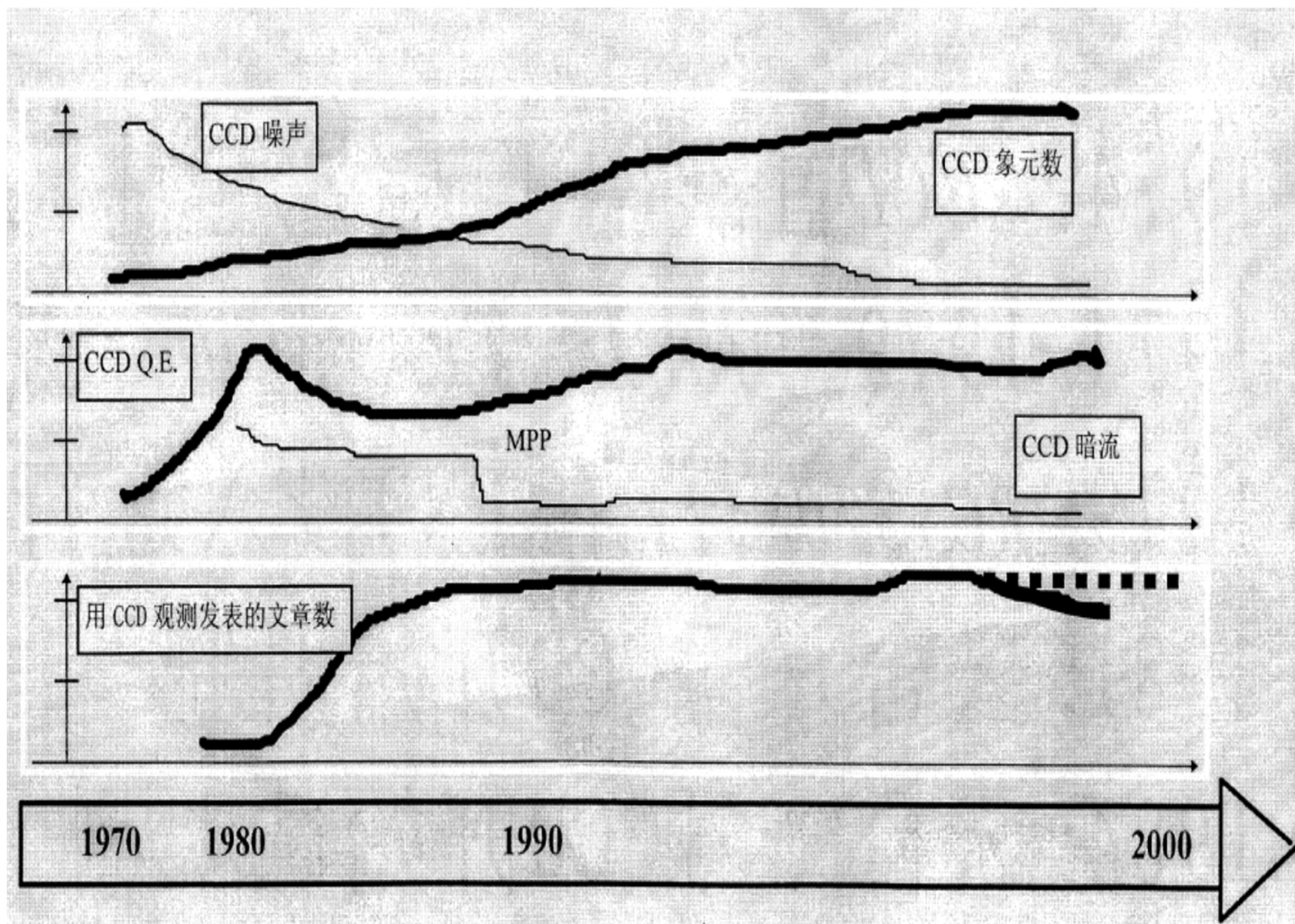
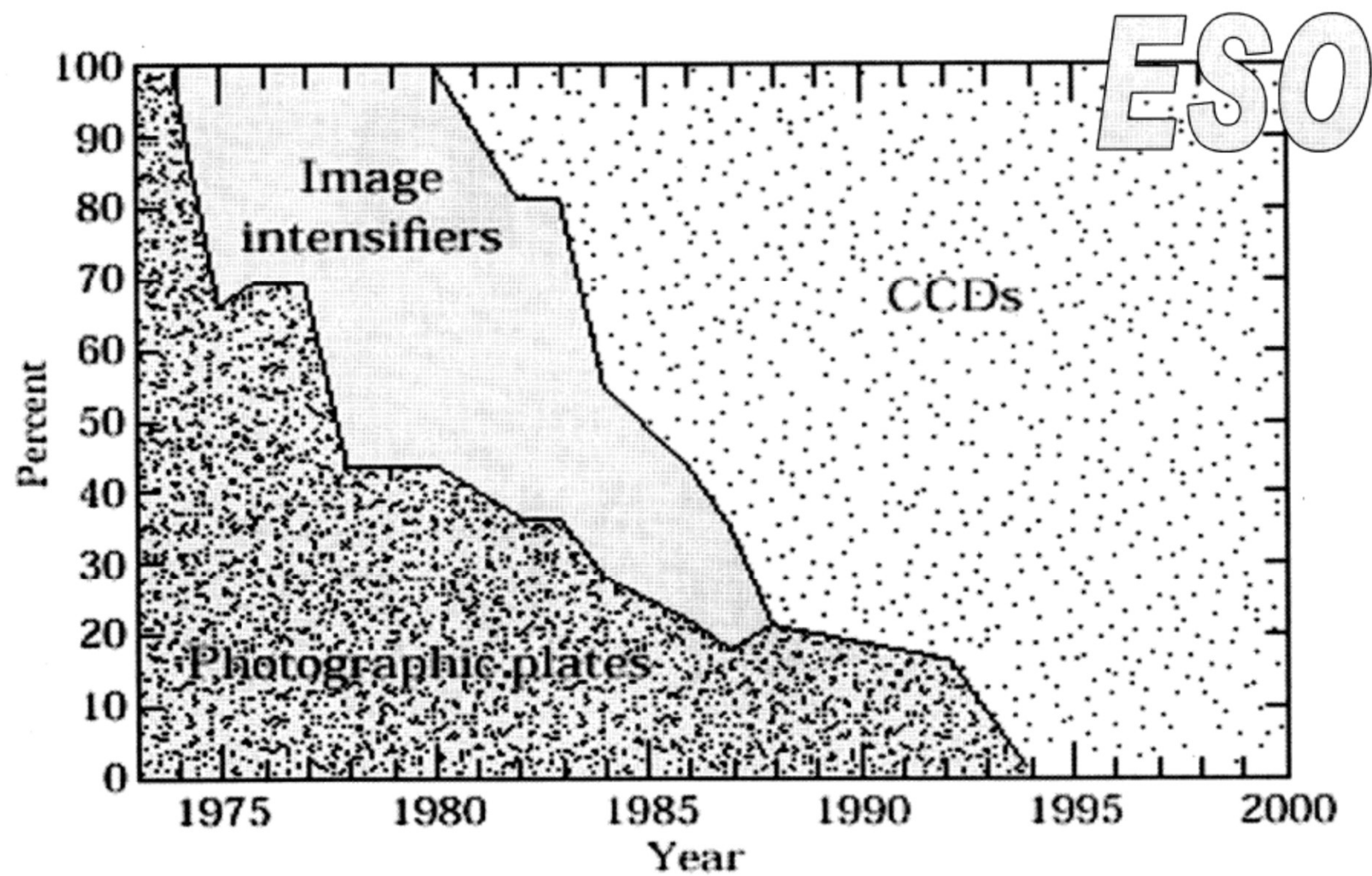


图 3.21 分块读出（四路输出）

CCD技术发展





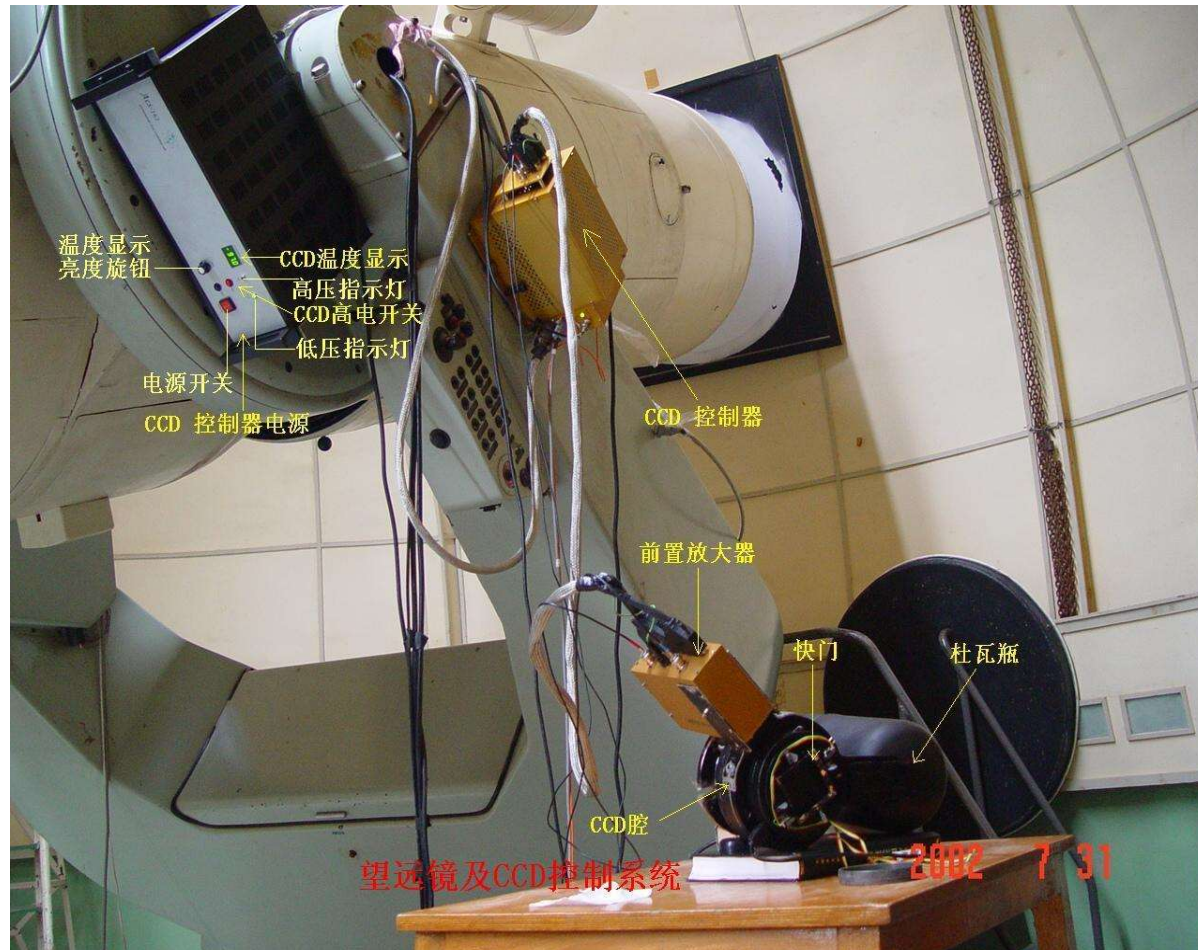
5、CCD图像的处理：做以下几方面改正：

- Flat Field（平场）：改正不同像元响应的不同。
- BIAS（偏场）：不开快门，直接读出。
- DARK（暗场）：不开快门，一定时间后读出。
- Cosmic Ray（宇宙线）：

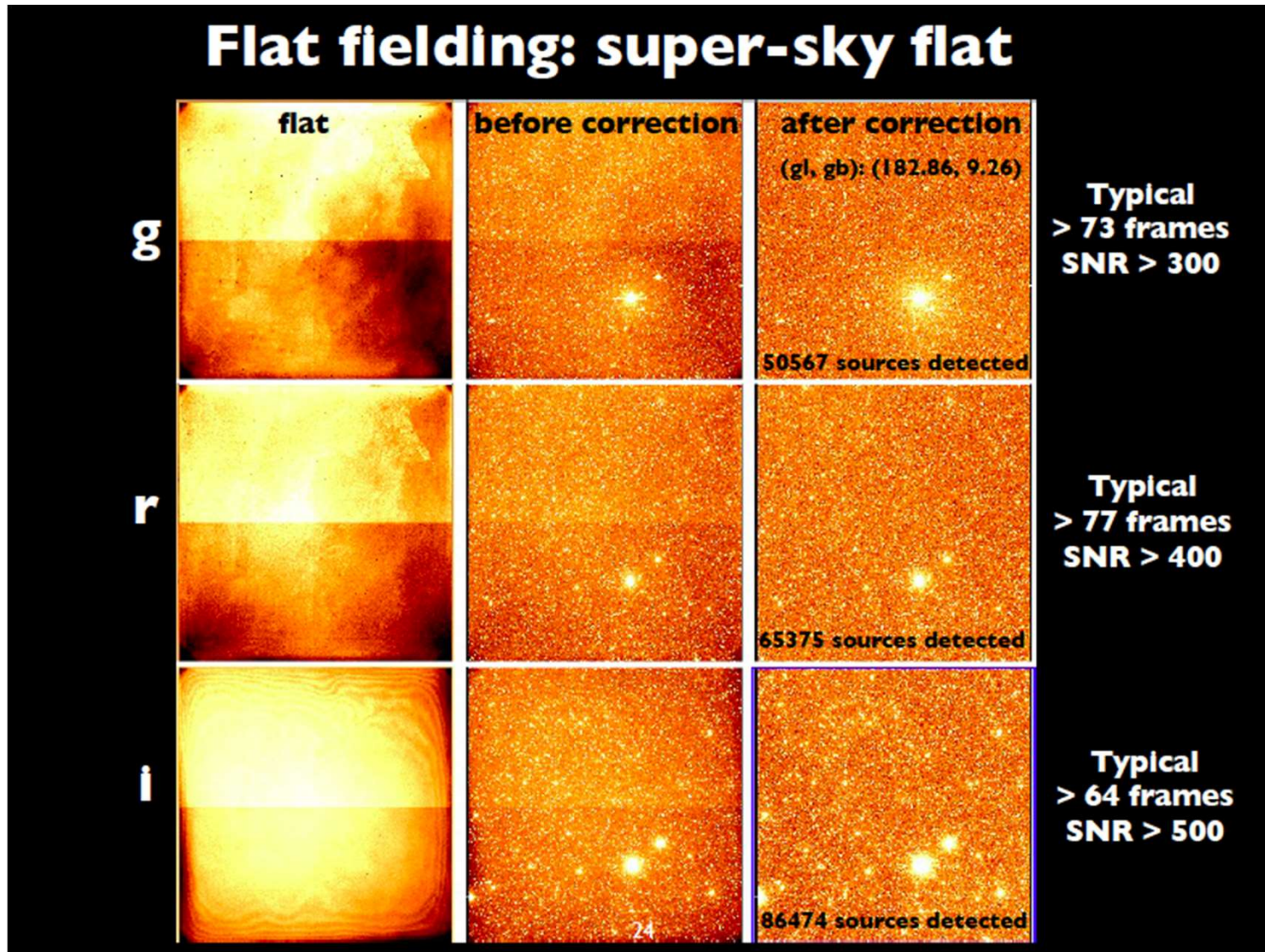
平 场

- 天光平场：清晨和黄昏太阳出没前后
- 圆顶平场：借用白色圆顶内侧作反射体
- 超级平场：用观测图像改造

Dome Flat



Super Sky Flat



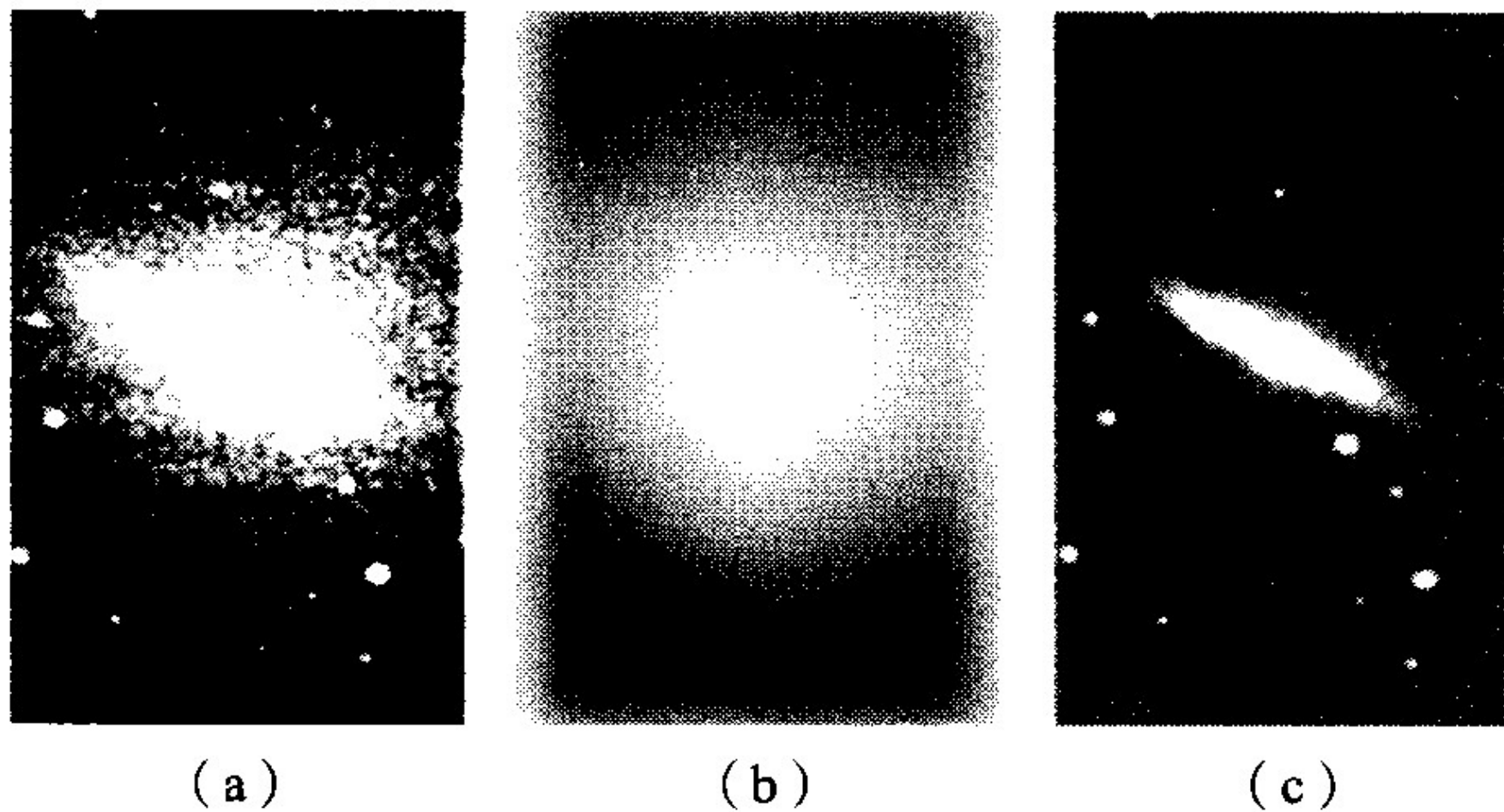


图 3.61 平场校正

(a) 星系 M82 摄得的原始图像, (b) 平场和 (c) 校正后图像



图 3.57 宇宙线效应

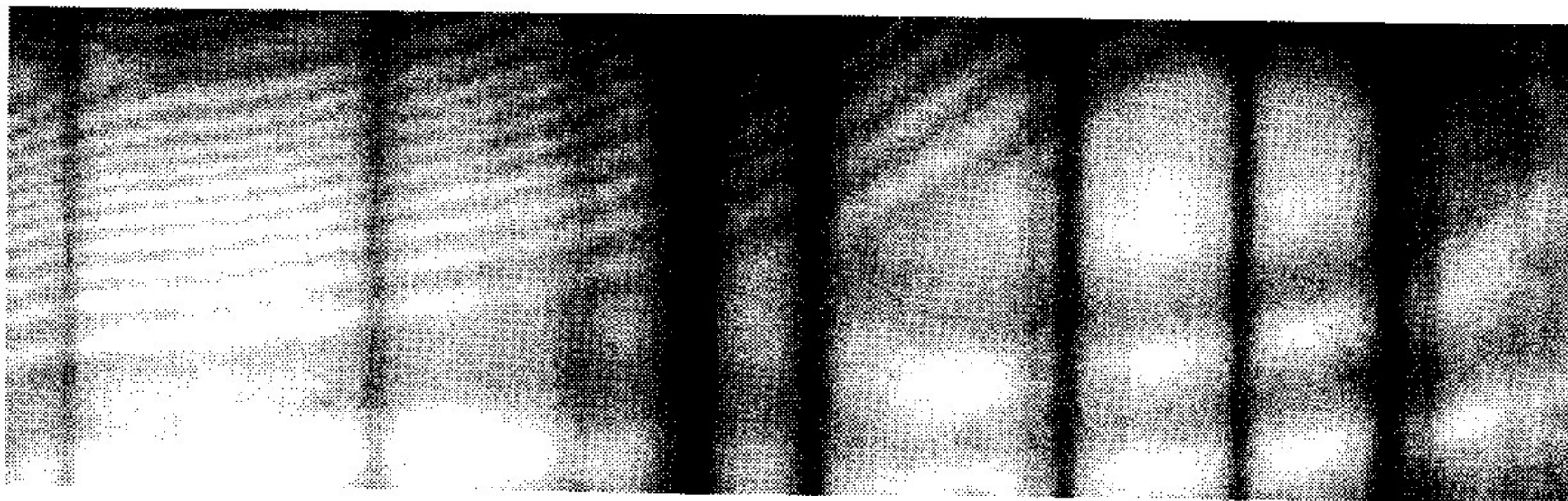
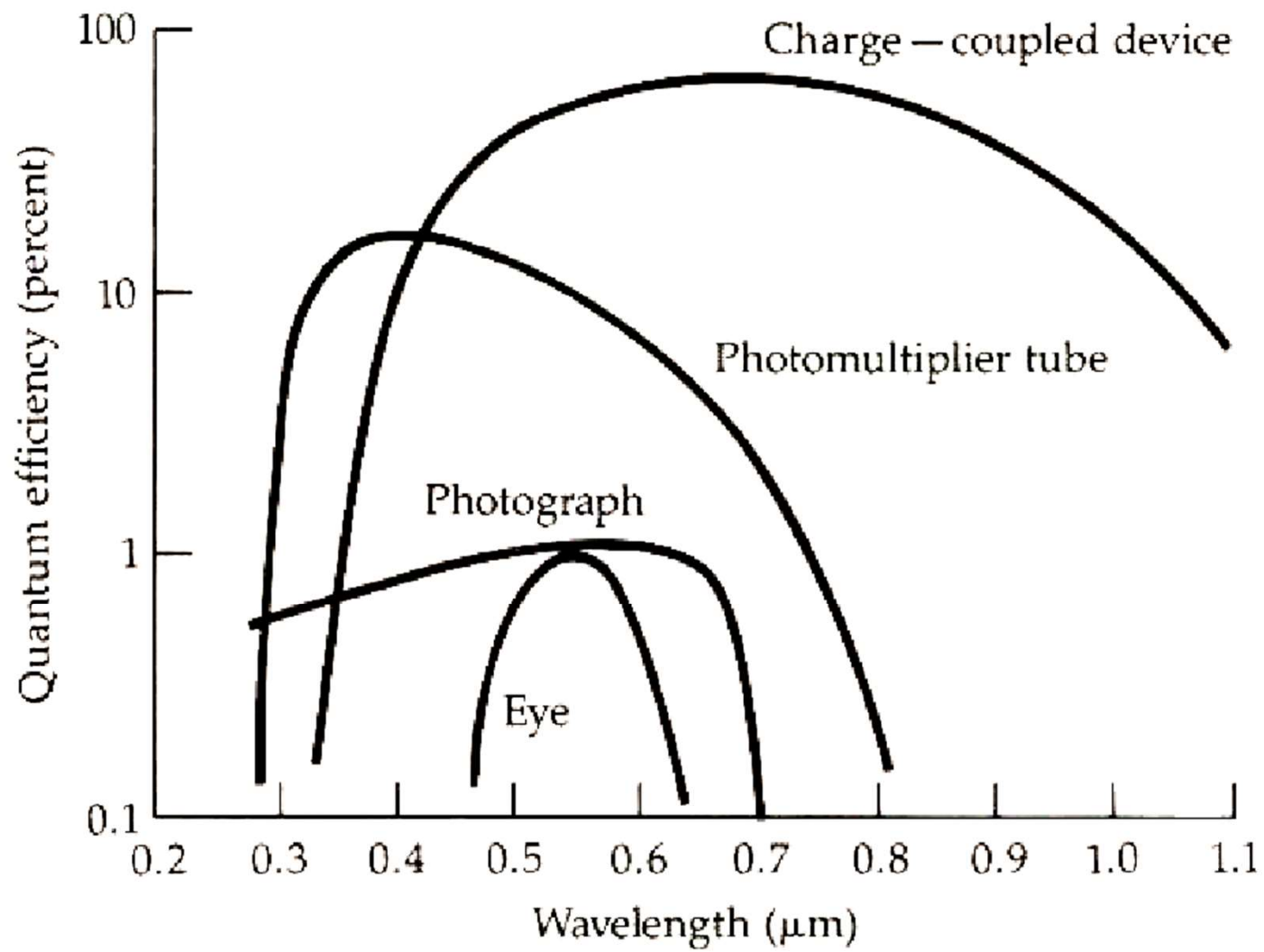


图 3.59 CCD 图像上的干涉条纹，红外波段大色散光谱上特别明显
竖线为太阳 1083nm 附近的光谱线和大气吸收线

6、优缺点：

优点：

- (1) 量子效率高，一般可达到60%，红区峰值可达80%
- (2) 空间分辨率高，可与照相底片相当。
- (3) 动态范围大，一般可达 10^4 — 10^5 ，远优于照相底片。
- (4) 工作范围内，线性响应好。
- (5) 有较好的累积效应，在冷却情况下可以累积几小时。



缺点:

- (1) 无内部增益，必须配备放大系统。
- (2) 紫区响应较差。
- (3) 需要冷却使用，以降低暗流。

由于CCD器件的优良性能，已经在天文上得到广泛的应用，基本上取代了照相底片。照相底片的优势在于成像面积大。

表 3.5 CCD 和照相乳胶的优缺点比较

	照相乳胶	CCD
探测器尺寸	最大可达 300mm × 300mm 以上	单片 100mm × 100mm 左右
像元尺寸	10 μ m × 10 μ m	5 μ m × 5 μ m ~ 24 μ m × 24 μ m (最小为 3 μ m × 3 μ m)
像元数	30K × 30K	4K × 4K (已有 10K × 10K 器件出现)
量子效率	<1%, 敏化后最大 4%	典型 60%, 最大 90%
光谱响应	300 ~ 650nm	350 ~ 1100nm
线性	差	可优于 1%
动态范围	<2 个量级 (须用特性曲线校正)	>4 个量级
暗流	一般短时期不存在, 长期存放出现起雾。	常温时很大, 必须冷却。工作于 -100℃ 时可忽略
噪声		典型 3 ~ 5 电子
空间分辨率 (尼奎斯特频率)	50 ~ 100 线对/mm	典型 50 线对/mm, 可达 120 线对/mm
失效像元	极少	根据等级不同而不同
电荷转移效率	—	>0.99999 以上
干涉条纹	—	在单色光工作时严重, 随波长增大而加剧
起晕	星像随亮度增大而扩散变大	超出位阱容量后起晕, 随亮度增大而越来越严重。防晕器件在相当程度上得以改善
宇宙线效应	—	常有发生, 可甄别消除
倒易律失效	严重	一般不存在
实时性	无	好

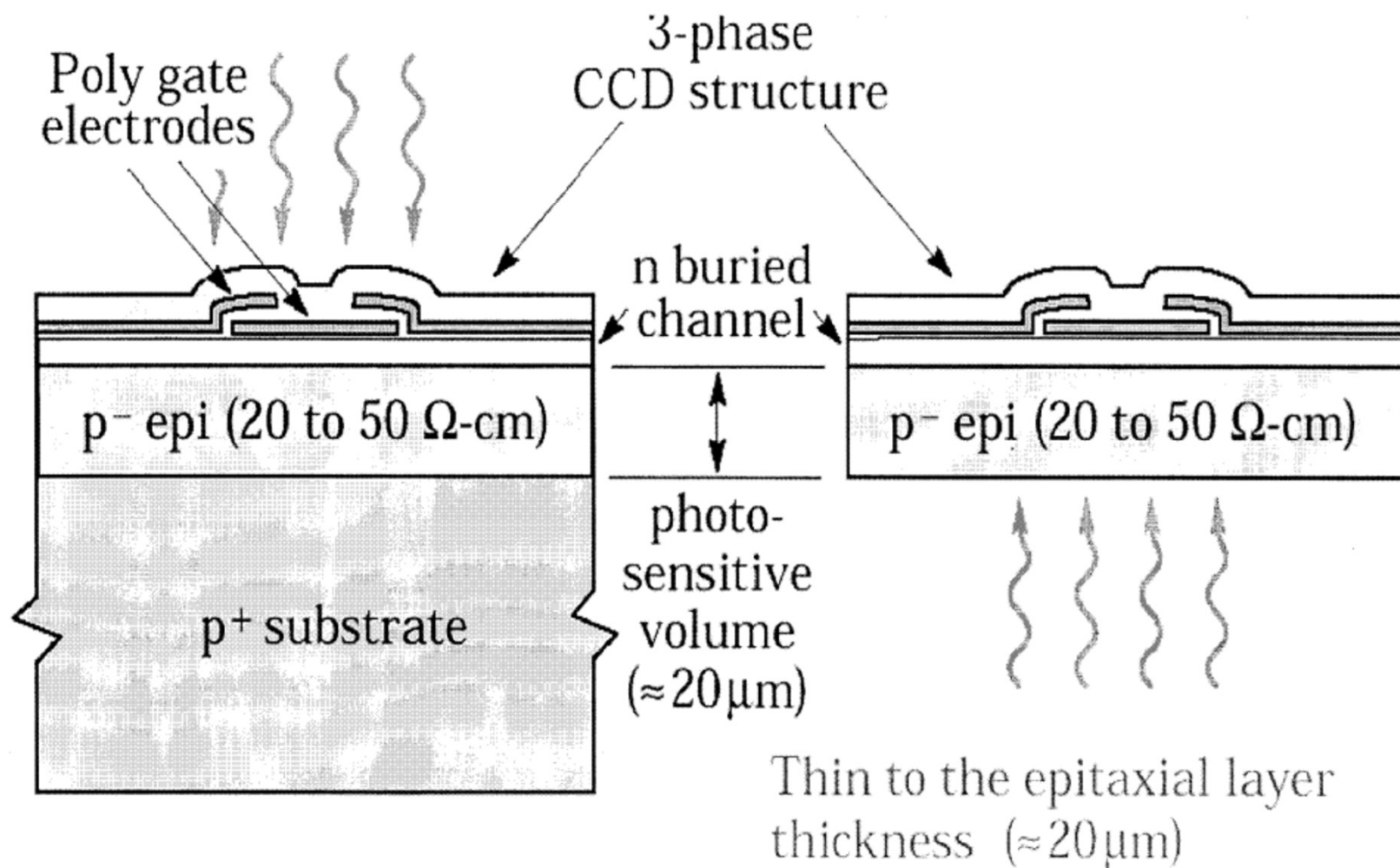
7、例子：

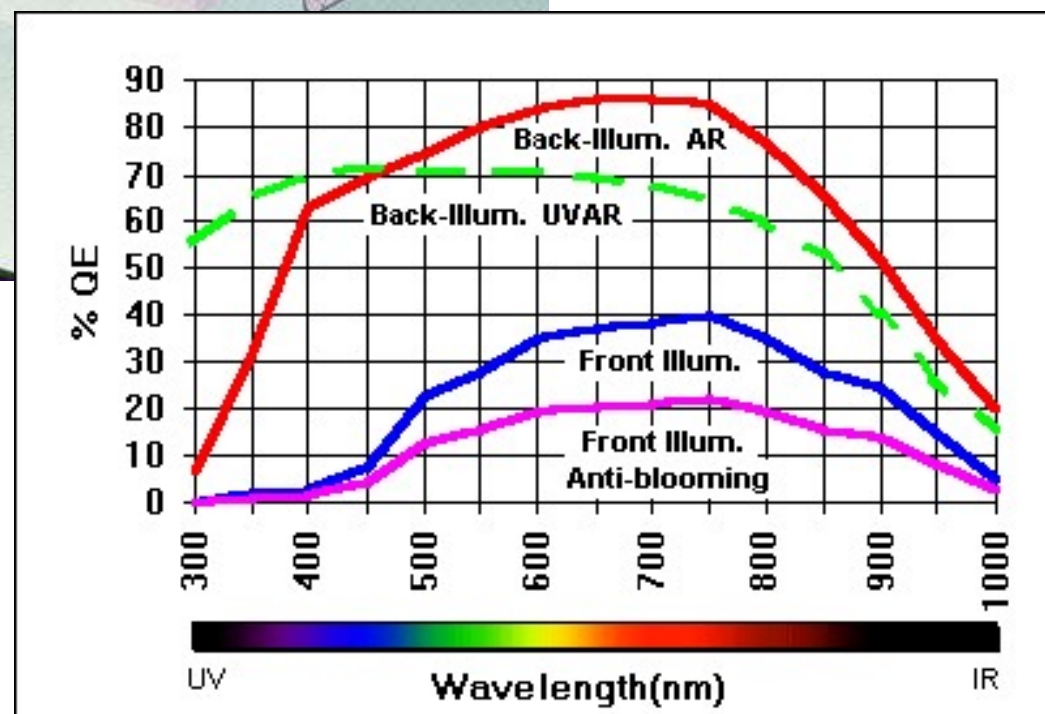
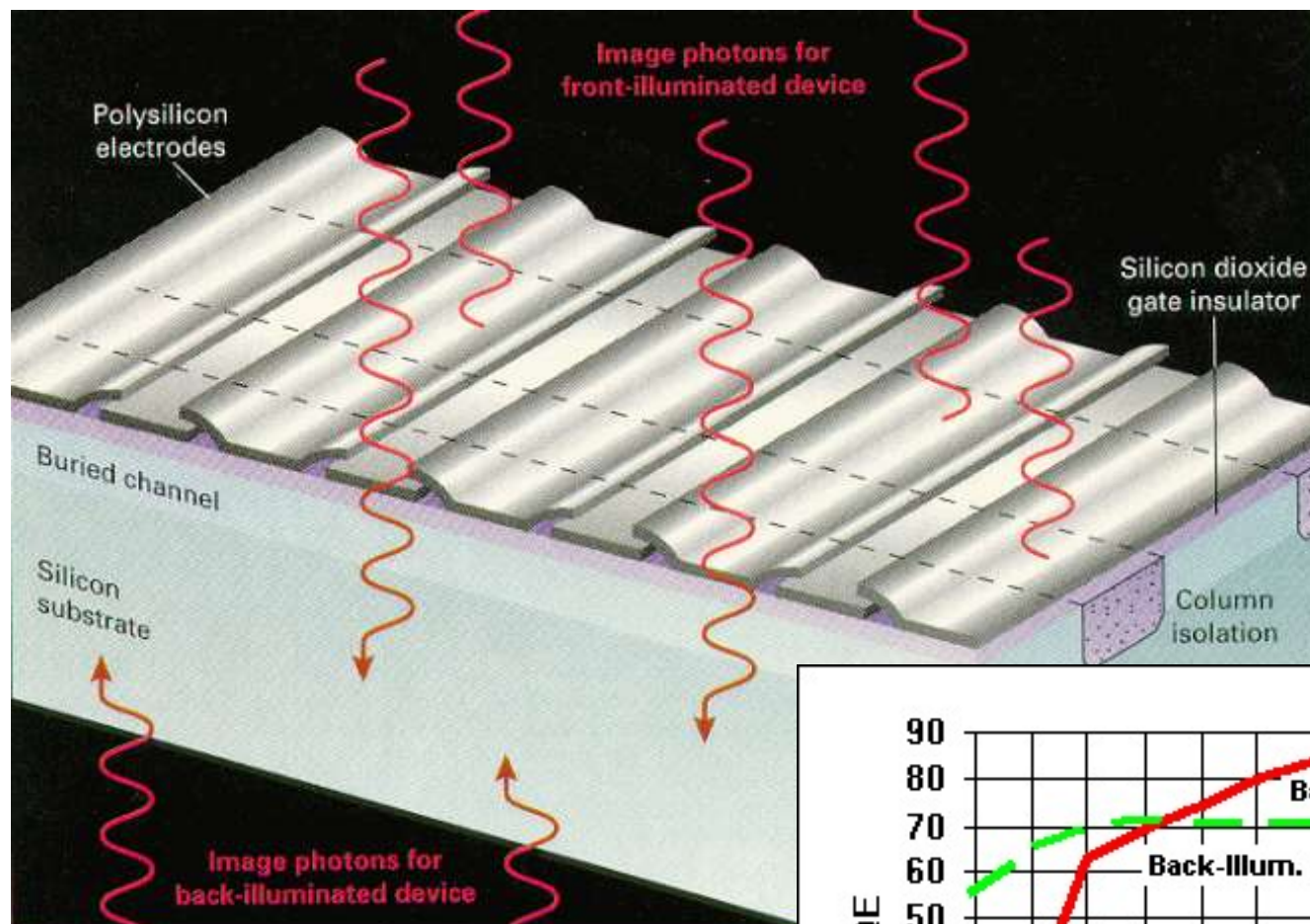
2.16m望远镜高分辨率光纤光谱仪上使用的CCD

- 型号：E2V CCD203-82
- 像元：4096×4096 Pixels
- 像元尺寸：12μm×12 μm
- 像面尺寸：49.2×49.2 mm
- 背照明一级红敏科研芯片
- 一次加注液氮维持20小时，液氮制冷温度为-106℃。
- 四门读出
- 增益1档时，读出速度和噪声： 50k: 2.84e- ; 100k: 4.29e-; 200k: 7.88e-

正面照光器件

背面照光器件





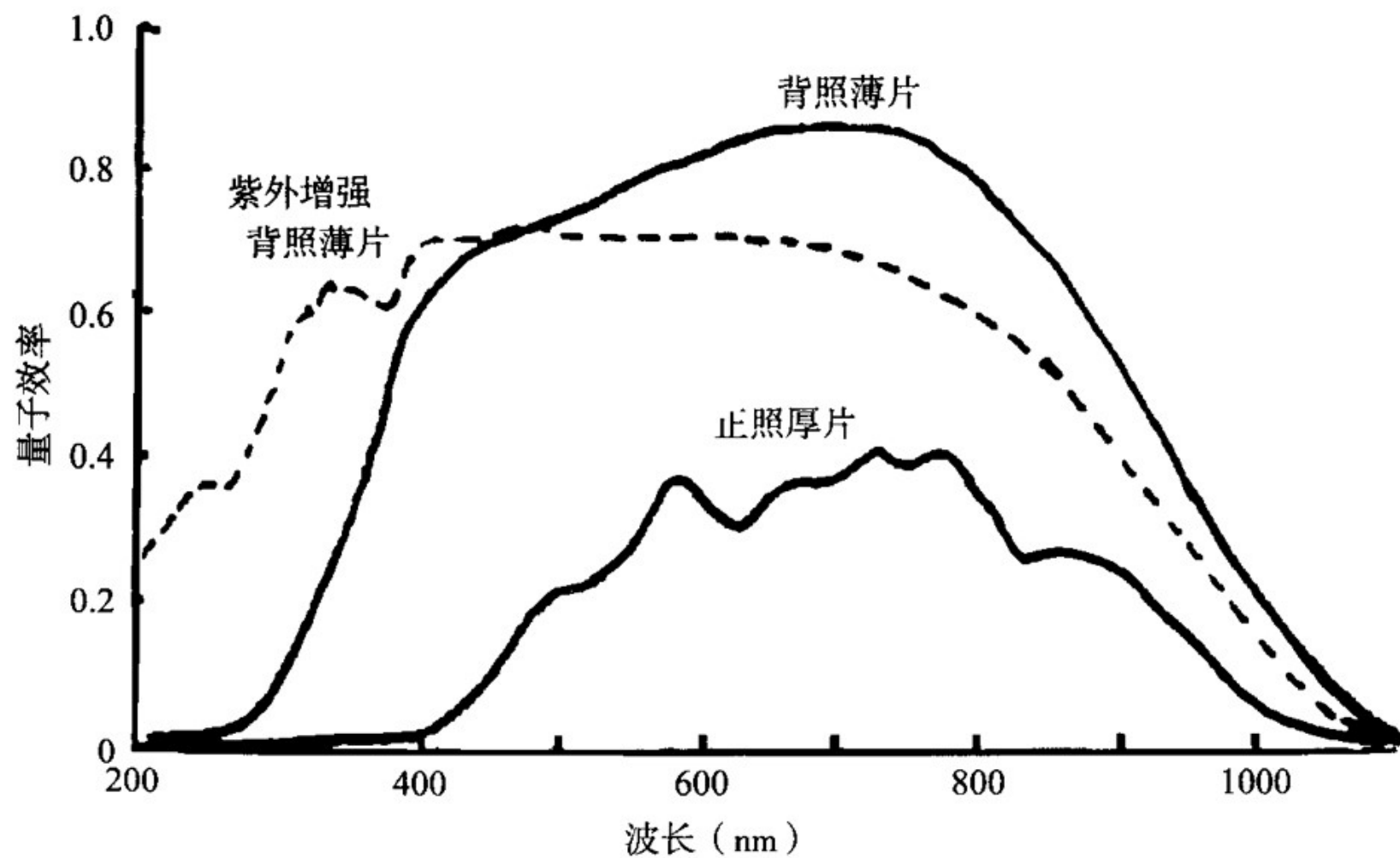


图 3.38 几种 CCD 芯片的典型光谱响应曲线

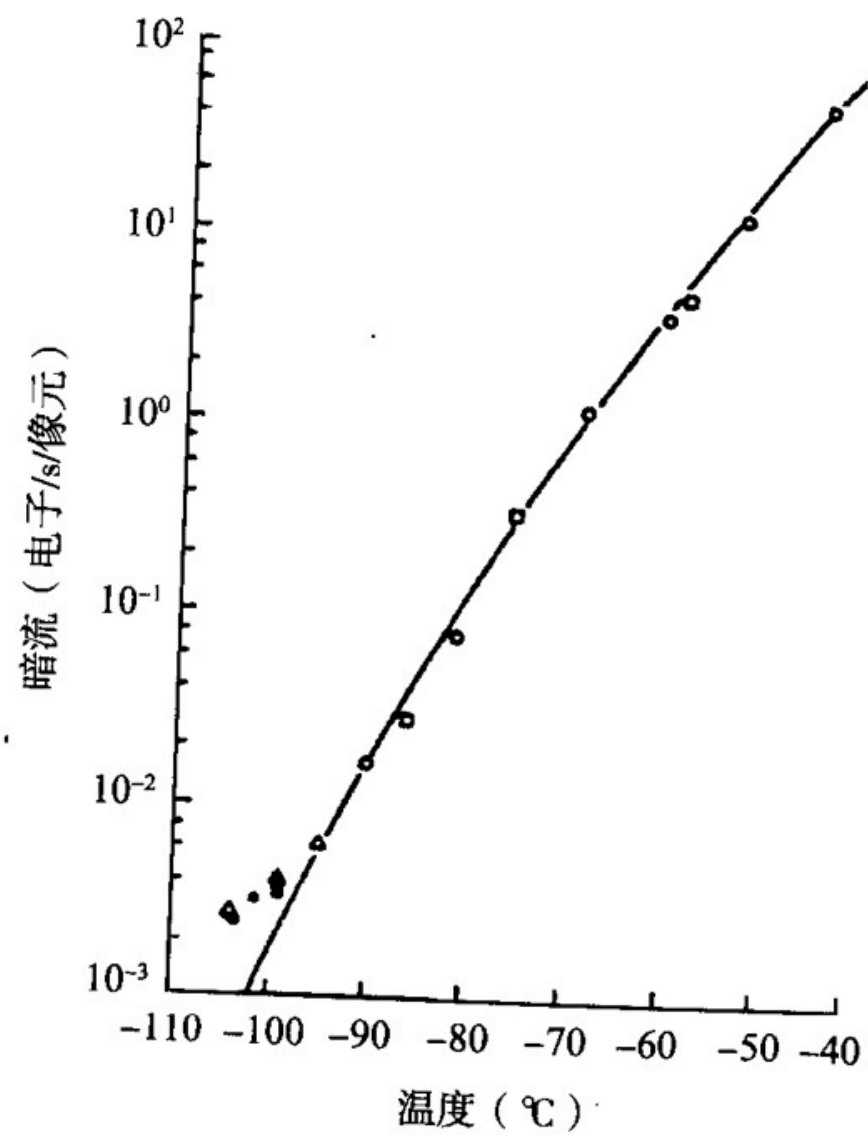


图 3.45 CCD 暗流和温度的关系

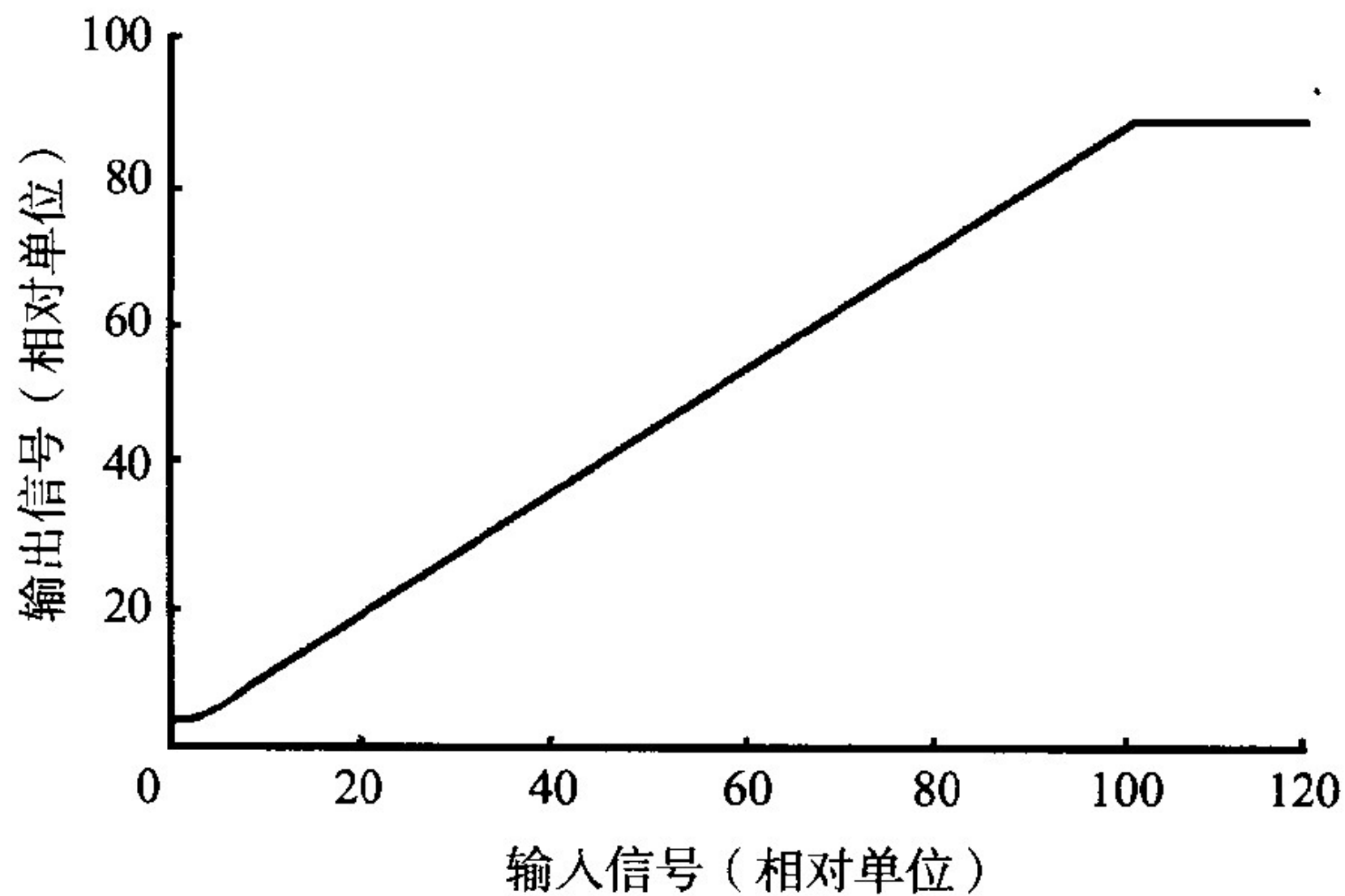
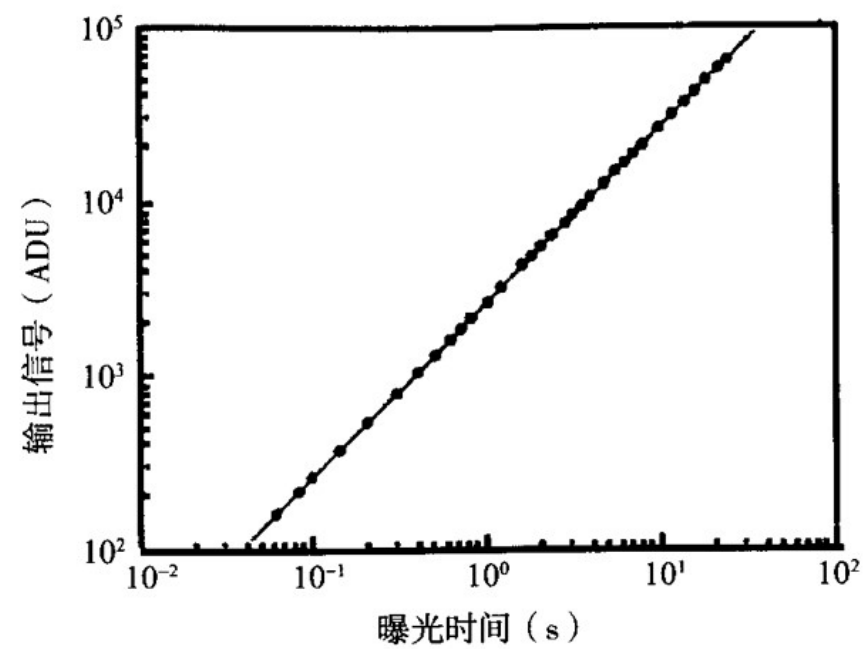
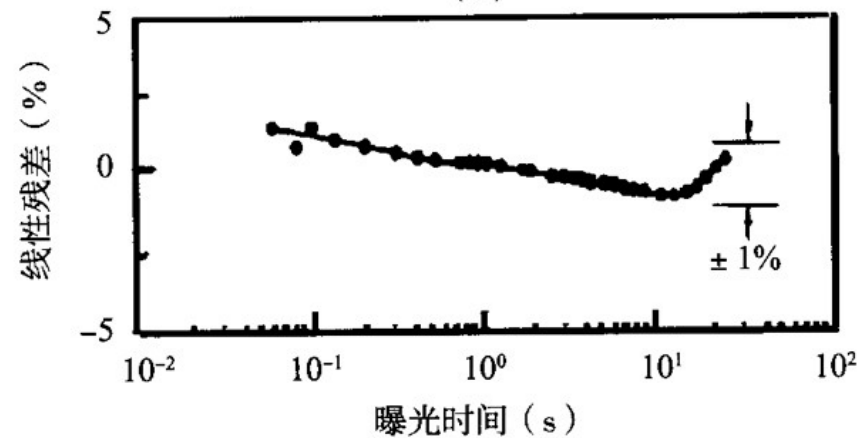


图 3.46 CCD 的典型线性曲线

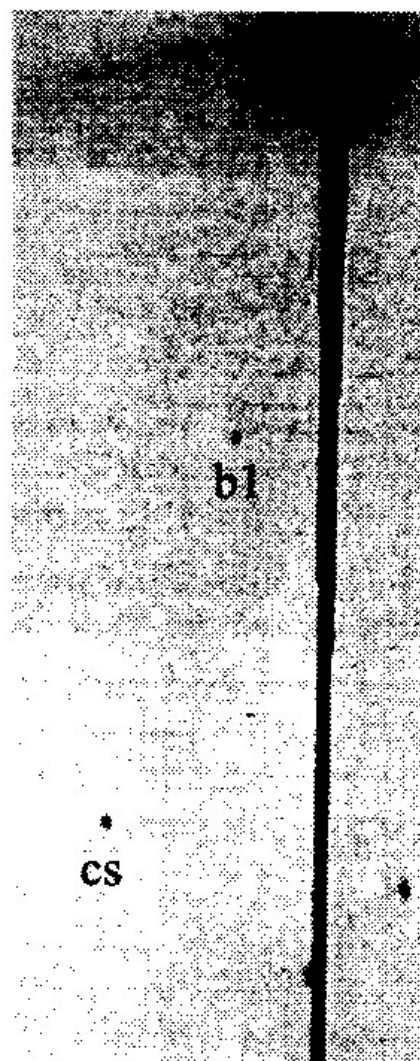


(a)

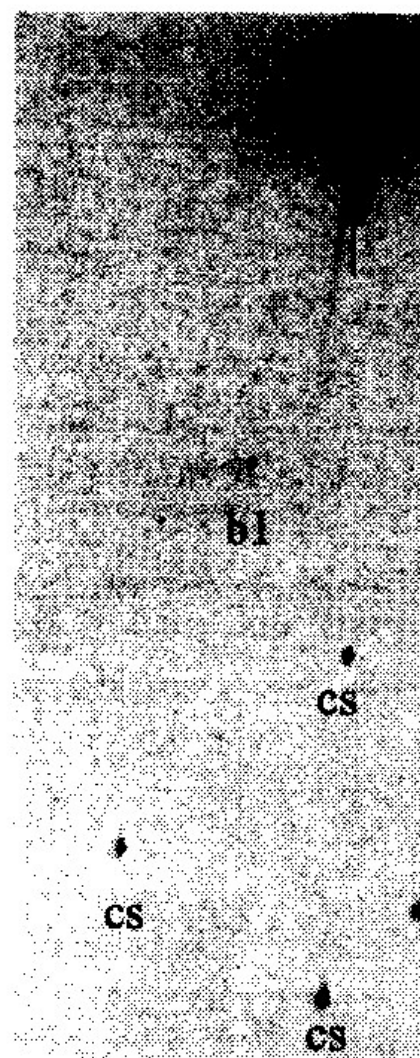


(b)

图 3.47 CCD 输出数据与曝光时间的关系 (a)
和对应数据的线性残差曲线 (b)



(a)



(b)

图 3.49 (a) 一般 CCD 和 (b) 防晕 CCD 所摄照片比较

BATC photometric system

温度显示
亮度旋钮

CCD温度显示

高压指示灯

CCD高电开关

低压指示灯

电源开关

CCD 控制器电源

CCD 控制器

前置放大器

快门

杜瓦瓶

CCD腔

Telescope: 60/90 cm f/3 Schmidt

CCD: E2V 4096x4096

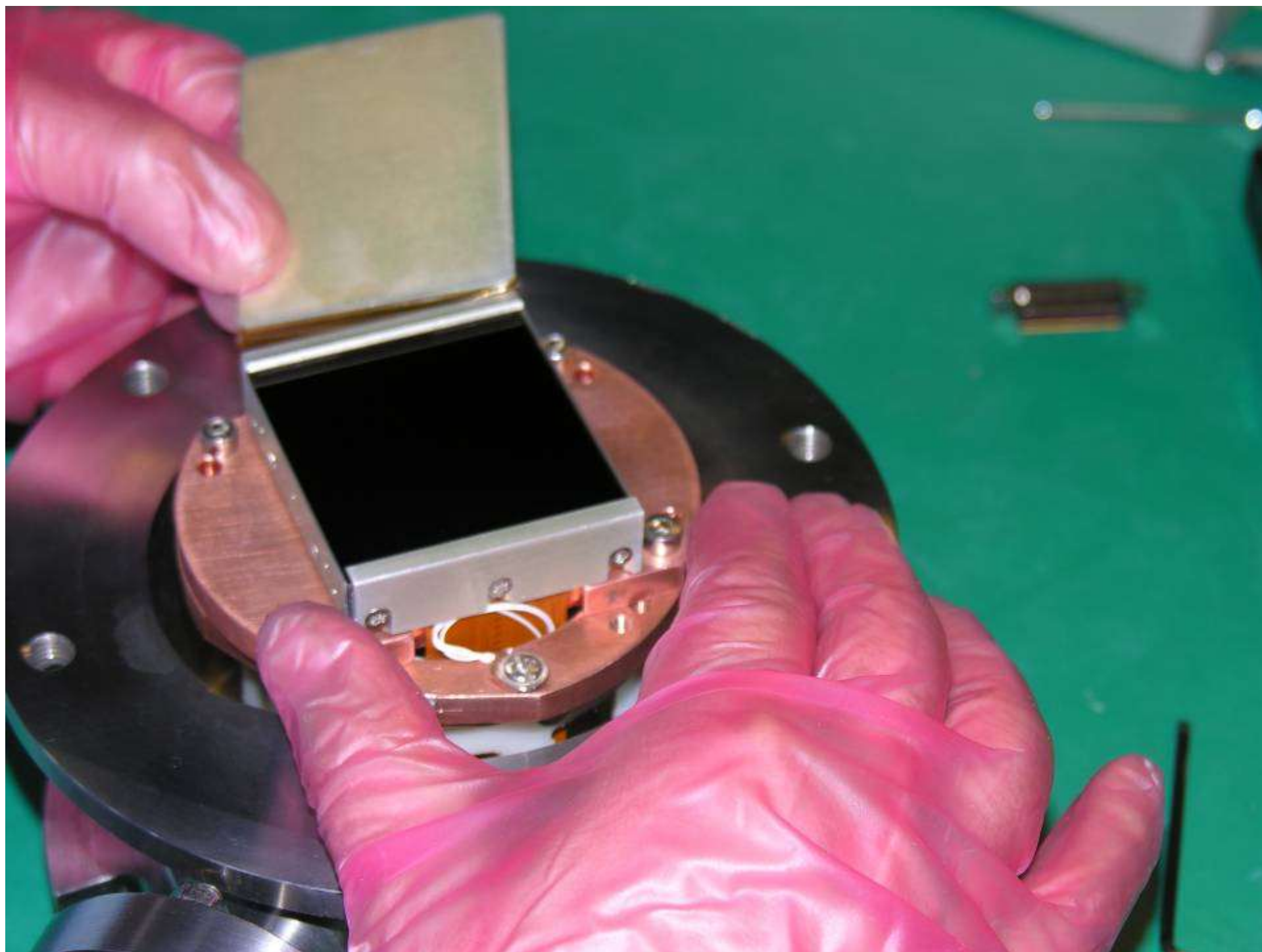
Blue sensitive 12um/pixel

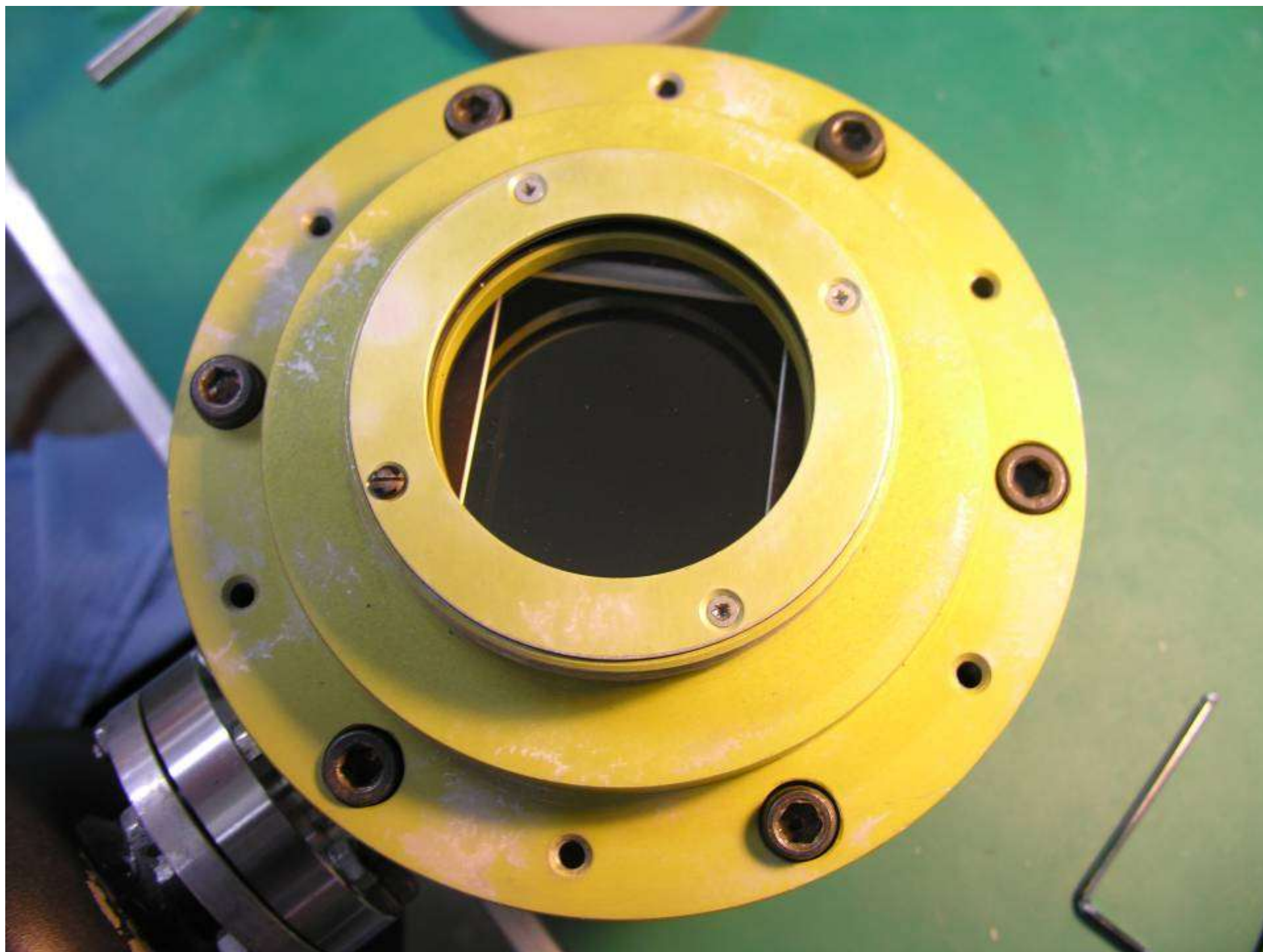
Filters: 15 intermediate bands

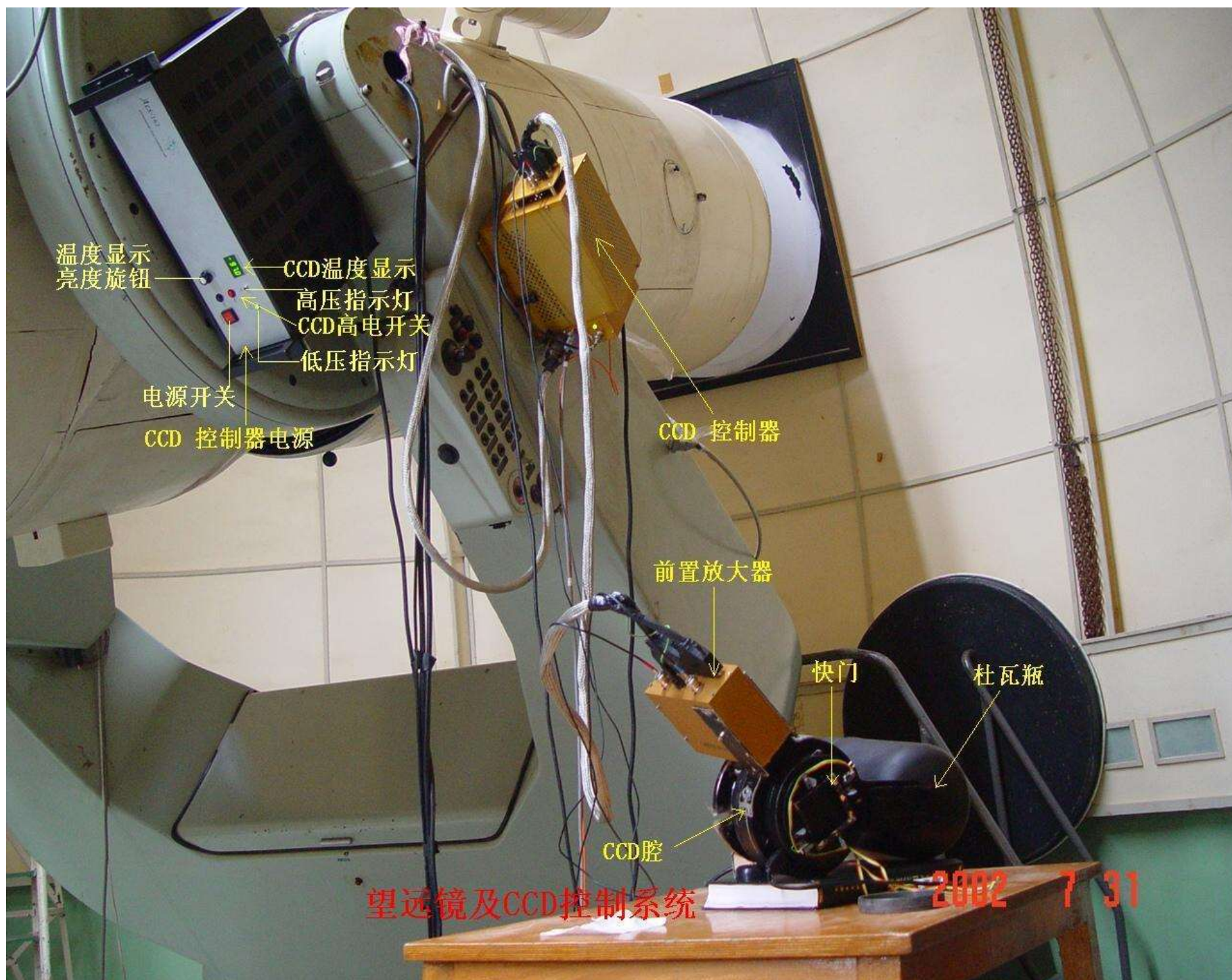
The field of view: $94 \times 94 \text{ arcmin}^2$

望远镜及CCD控制系统

2002 7 31





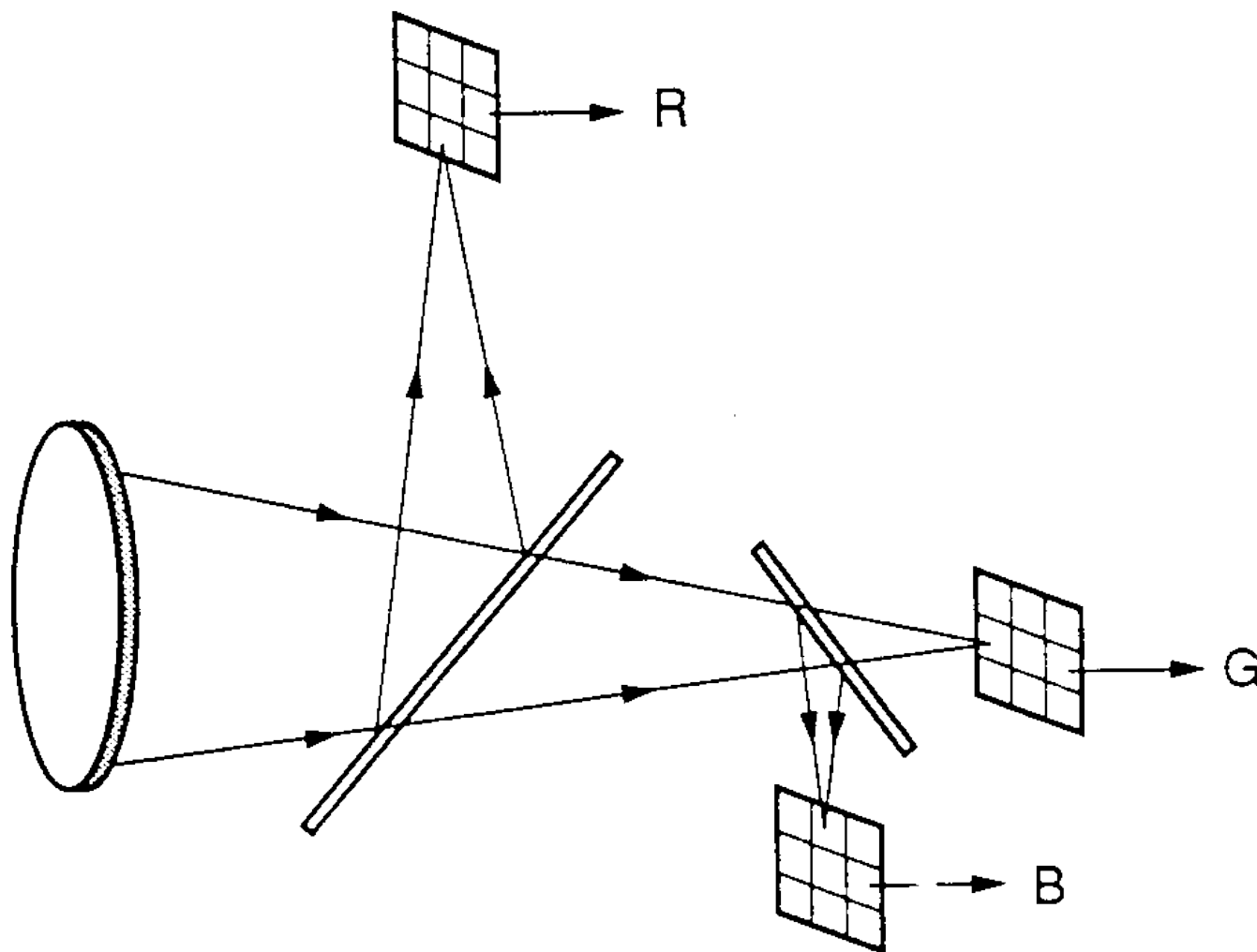


三色合成的真彩色CCD照片！！！！



数码照相机

3CCD Color Camera









8、探测器的新动向

- 对天文用CCD性能的追求
 - 更高的Q.E.
 - 更大的视场覆盖
 - 更大的动态范围（低噪声、暗流）
 - 更宽的响应波段（IR, EUV, X-ray）
 - 适应特殊使用要求（快速、正交、空间）

- 提高QE的方法：
 - 镀波段转换介质
 - 减薄
 - 镀抗反膜
 - 采用高阻半导体材料

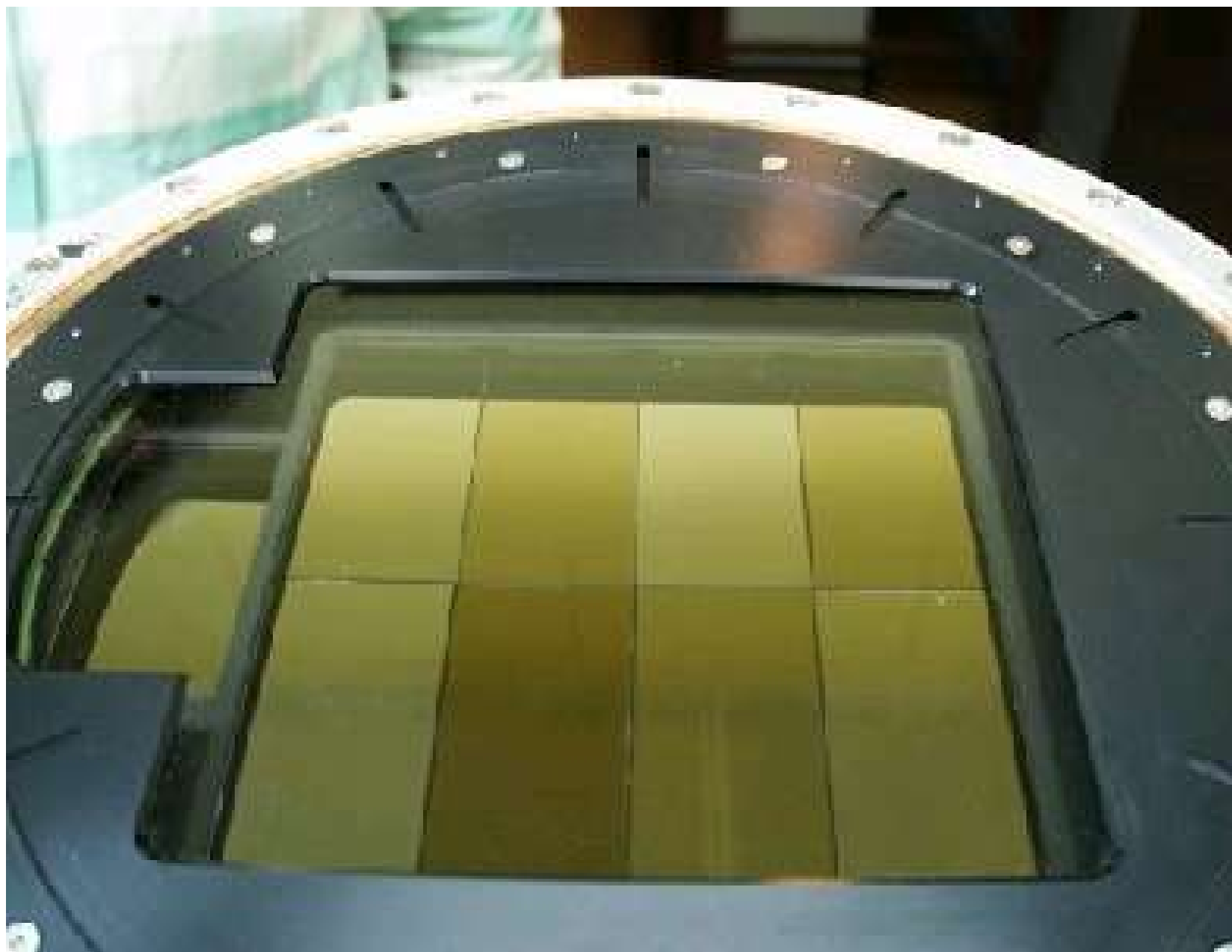
- 大的单片CCD

Philips 7K × 9K CCD

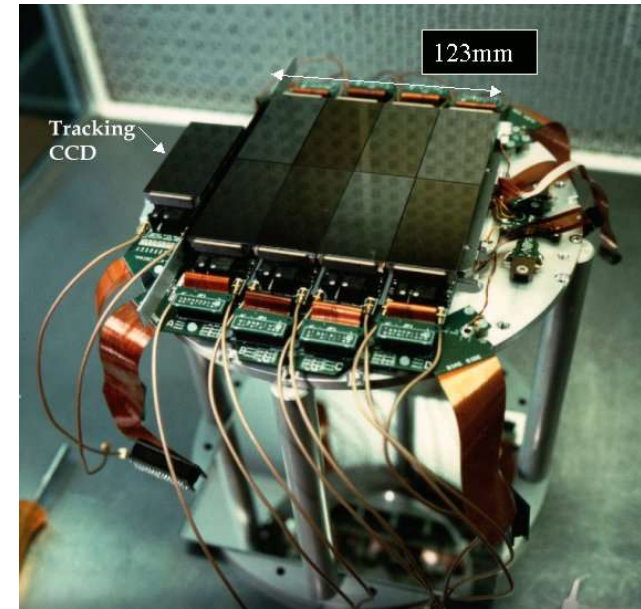
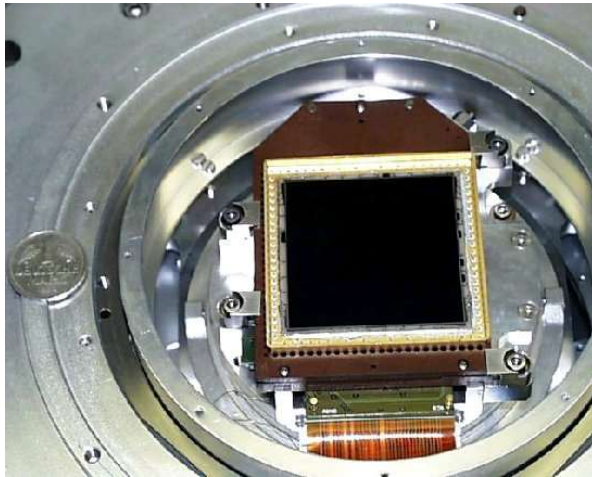
- 12 μm × 12 μm 像元
- 86.0mm × 110.6mm

照相底片： 500mm × 500mm

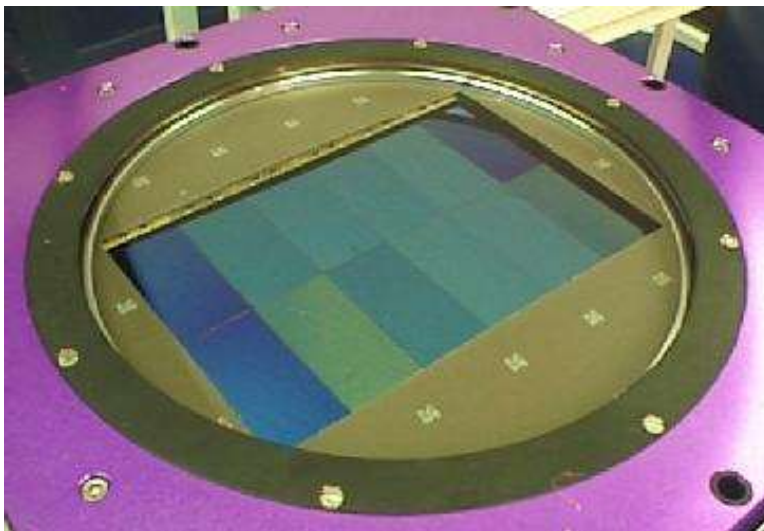
- 多片CCD拼接 (mosaic)



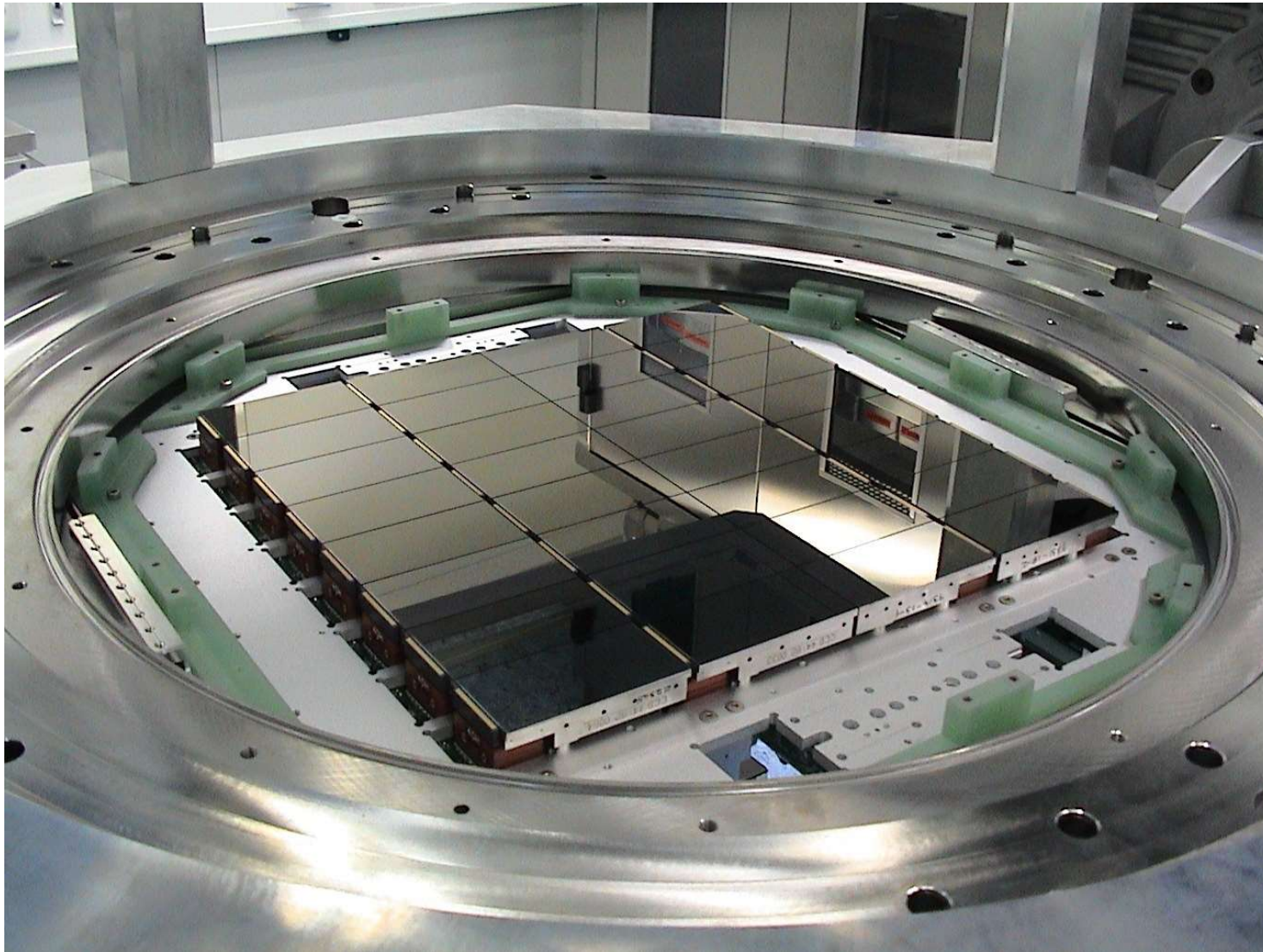




8K x 8K



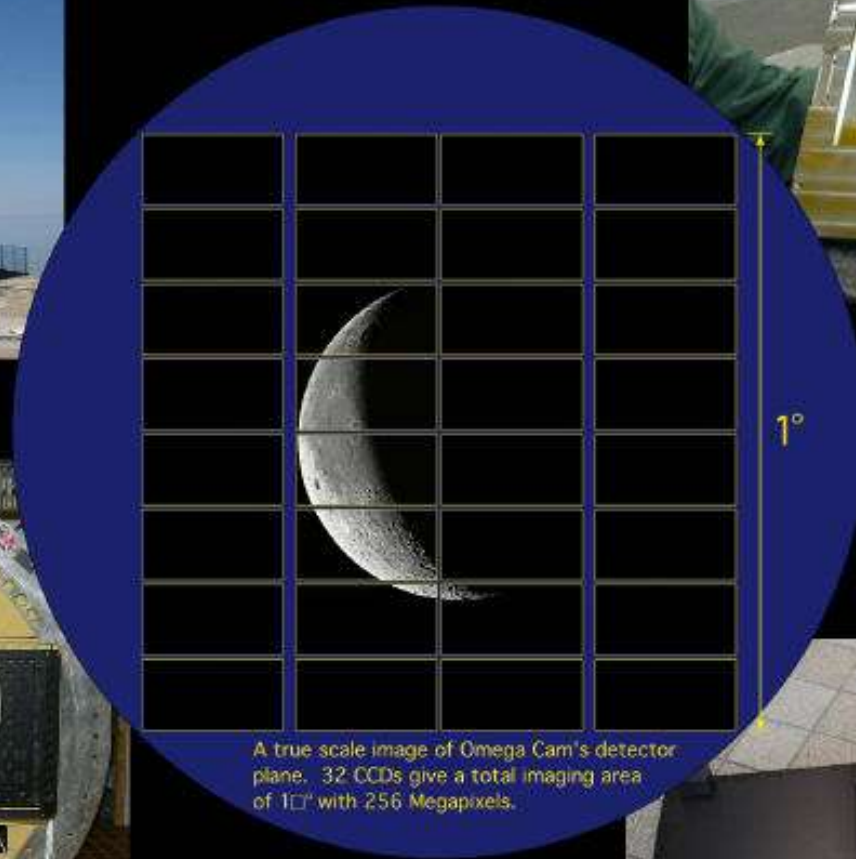
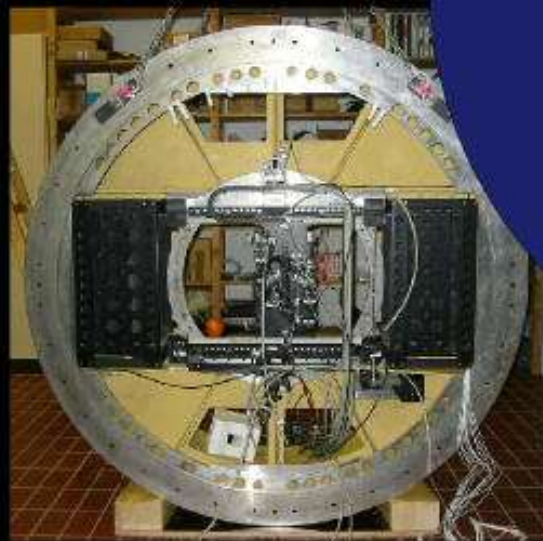
12k x 8k



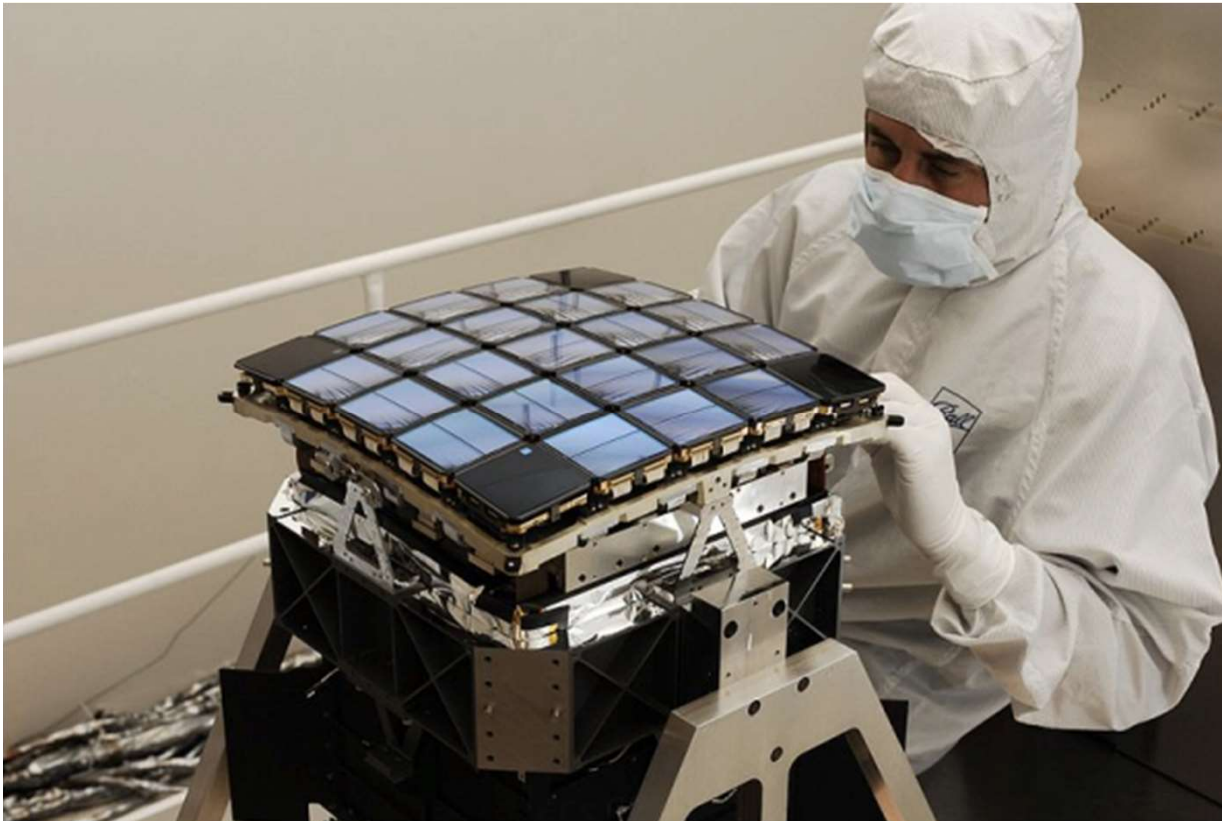
The OmegaCAM mosaic with its 32 2k*4k CCDs (pixel size: 15 μm)



Omega Cam



Kepler



24块 2200×1024 CCD
 50×25 mm
94.6m pixels

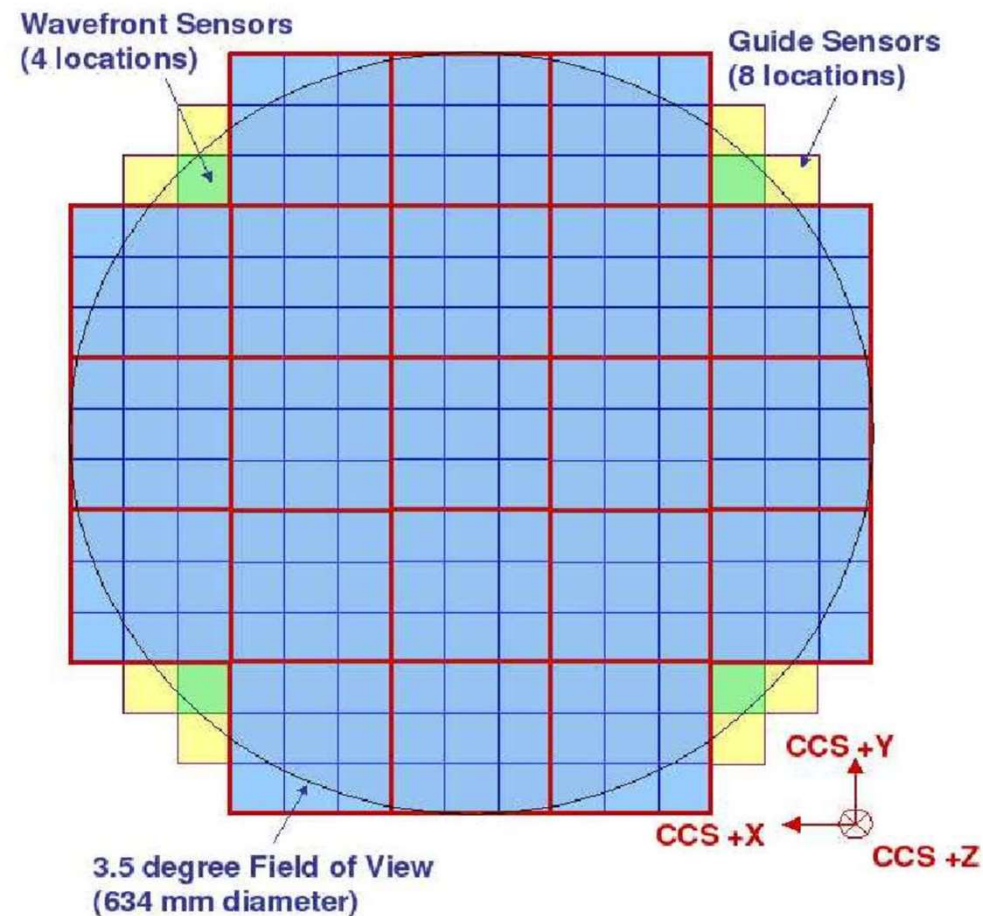
SDSS

30 SITe/Tektronix CCD

2048 by 2048 pixels



LSST focal plane: 189 science sensors
(4k * 4K pixels each)



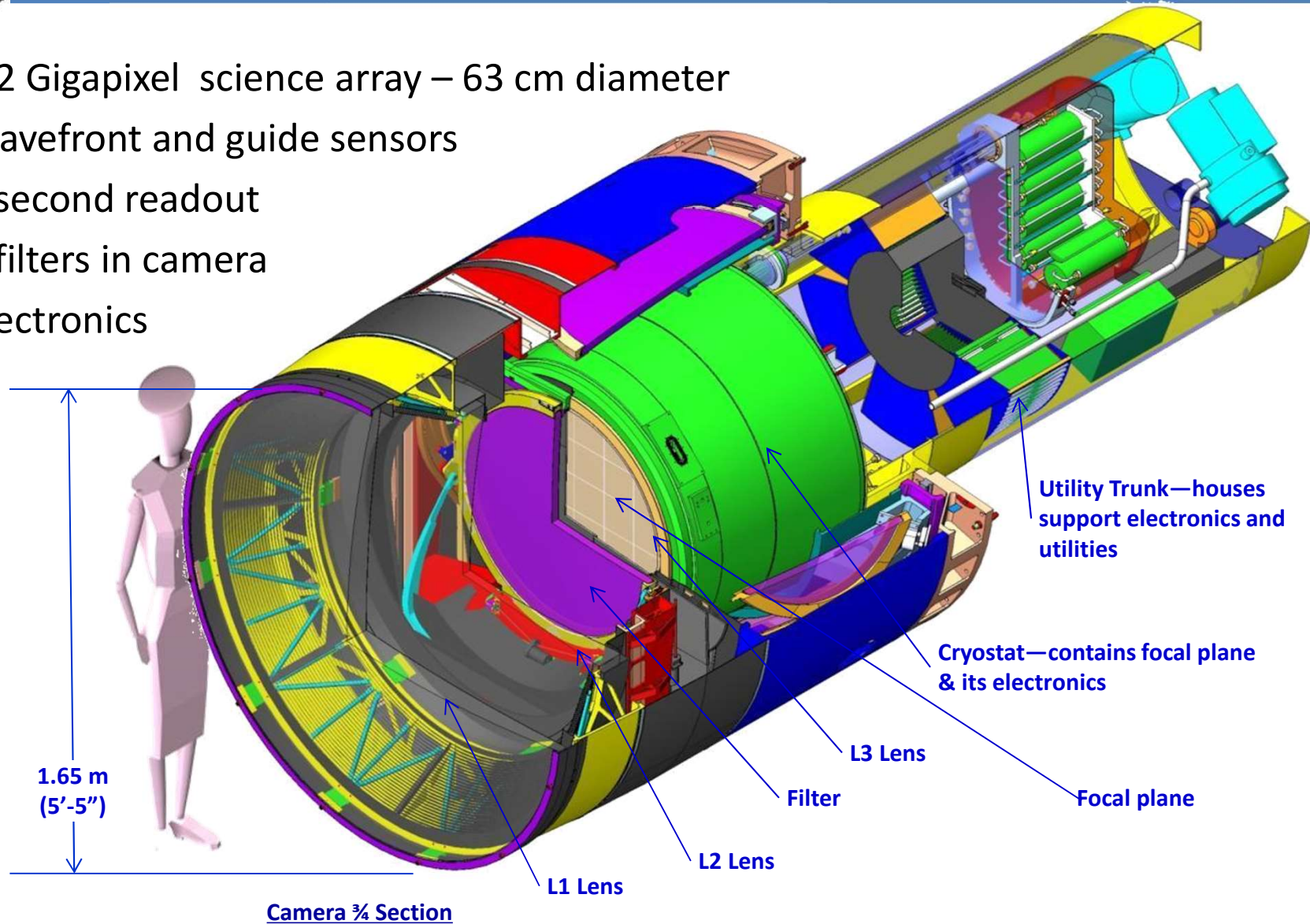




Camera



- 3.2 Gigapixel science array – 63 cm diameter
- Wavefront and guide sensors
- 2 second readout
- 5 filters in camera
- Electronics



其它器件

- CCD在问世后的短短几十年后发展成近乎完美的探测器件。
- 但不同天文研究提出种种特殊要求，还不是目前CCD都能满足的。
- 促使人们寻找各种有针对性特点的新探测器。
 -

微光电荷耦合器件（L3CCD，EMCCD）

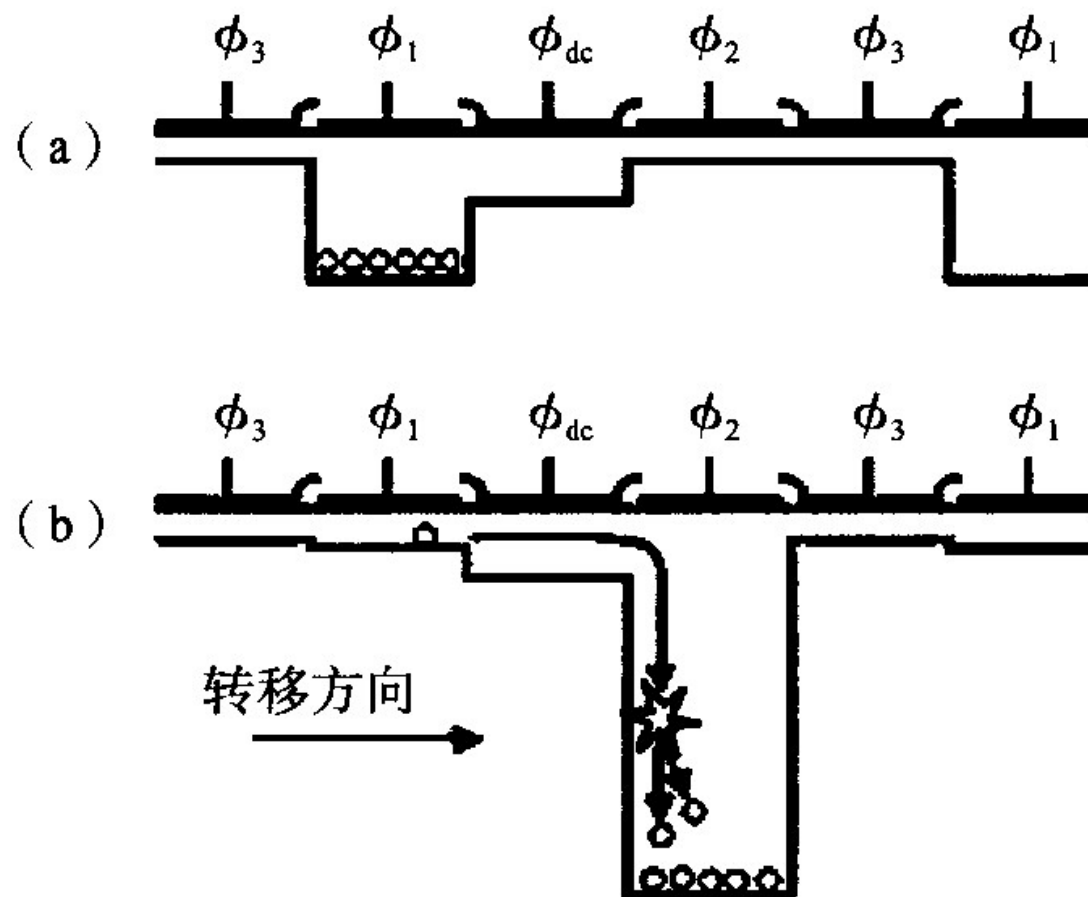


图 4.4 电荷在倍增水平寄存器内和原子碰撞引起电离而得到倍增

微光电荷耦合器件（L3CCD，EMCCD）

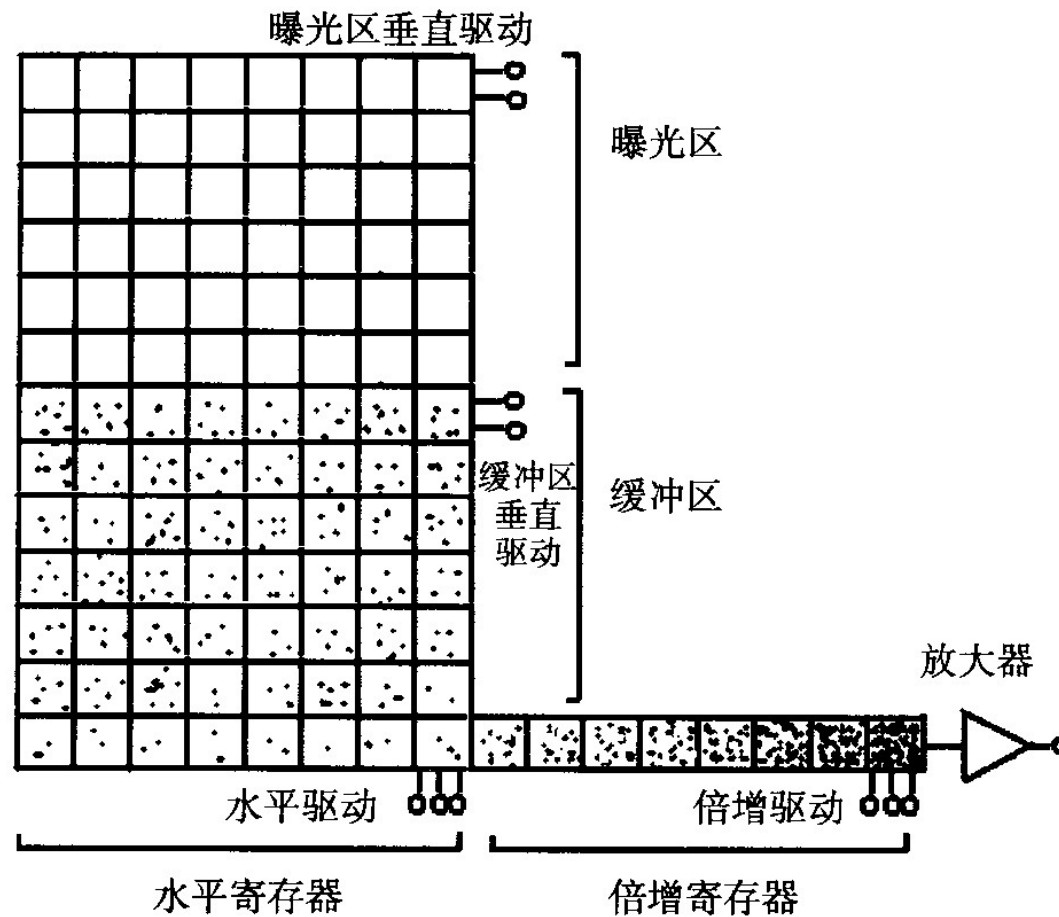


图 4.5 L3CCD 的结构示意图

正交转移CCD (OTCCD)

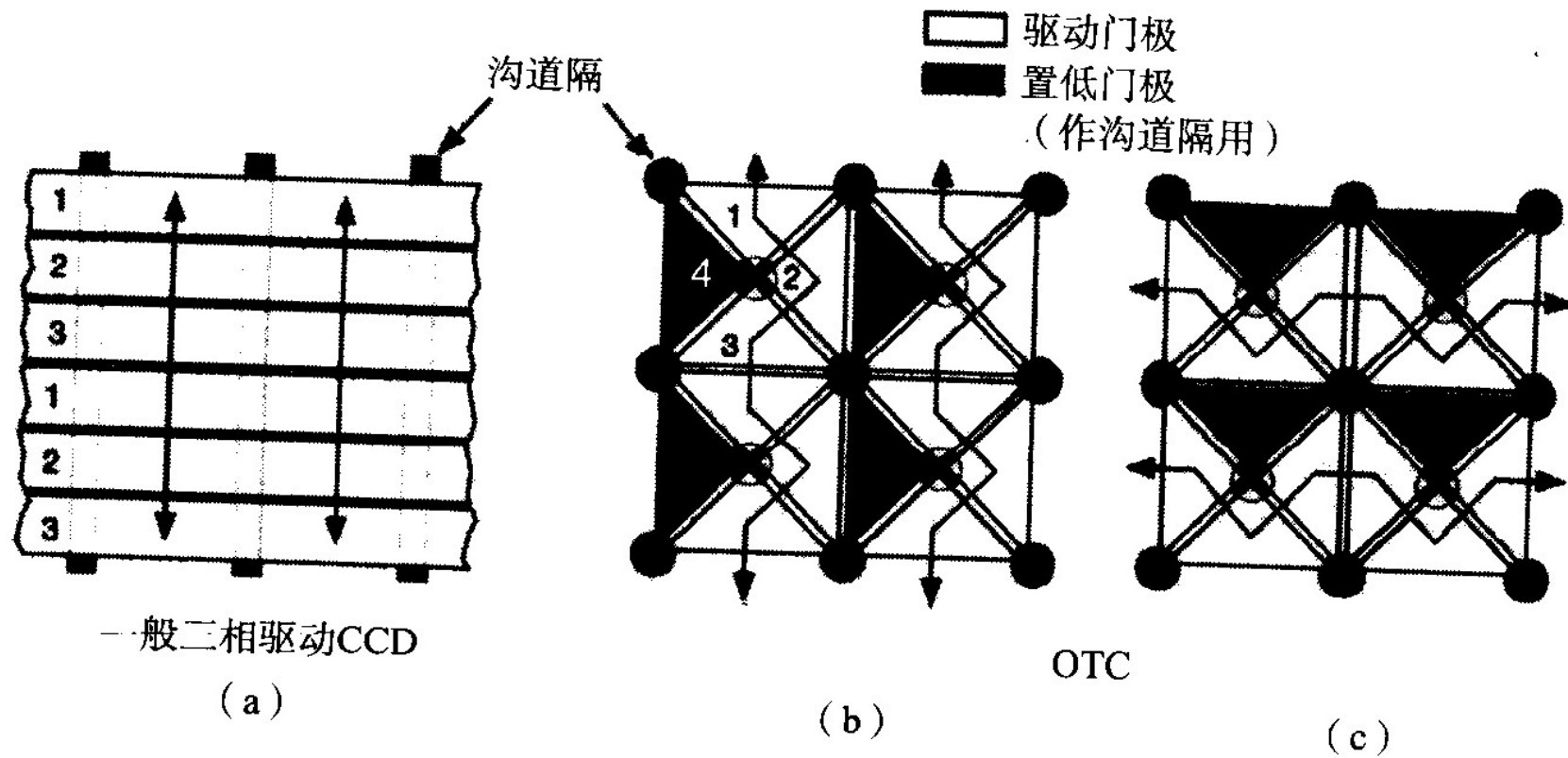


图 4.8 正交转移 CCD 像元结构示意图

(a) 常见三相驱动 CCD, (b) 列向阻塞, 上下转移和 (c) 行向阻塞, 左右转移

pnCCD

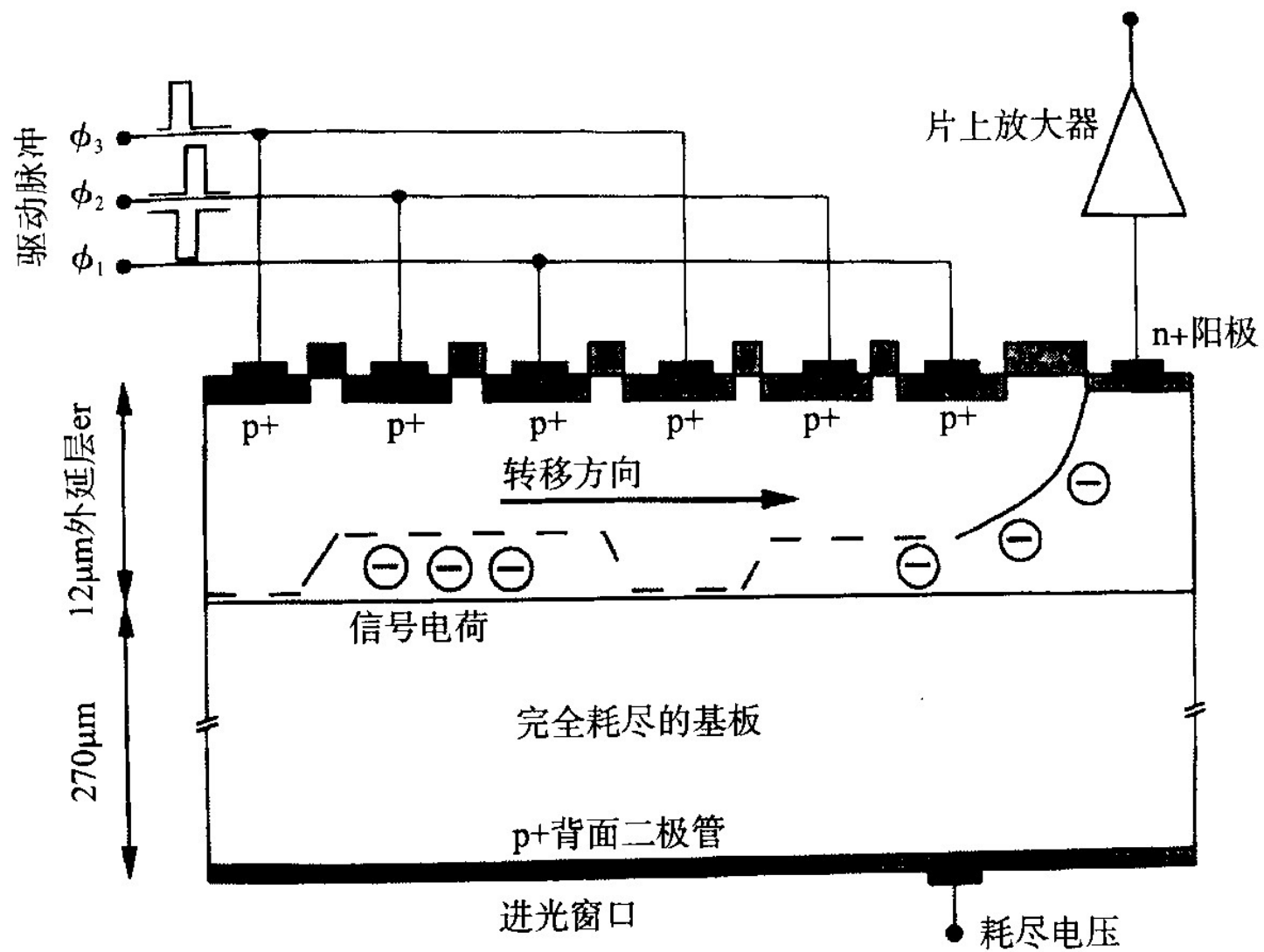


图 4.10 pnCCD 的原理示意图

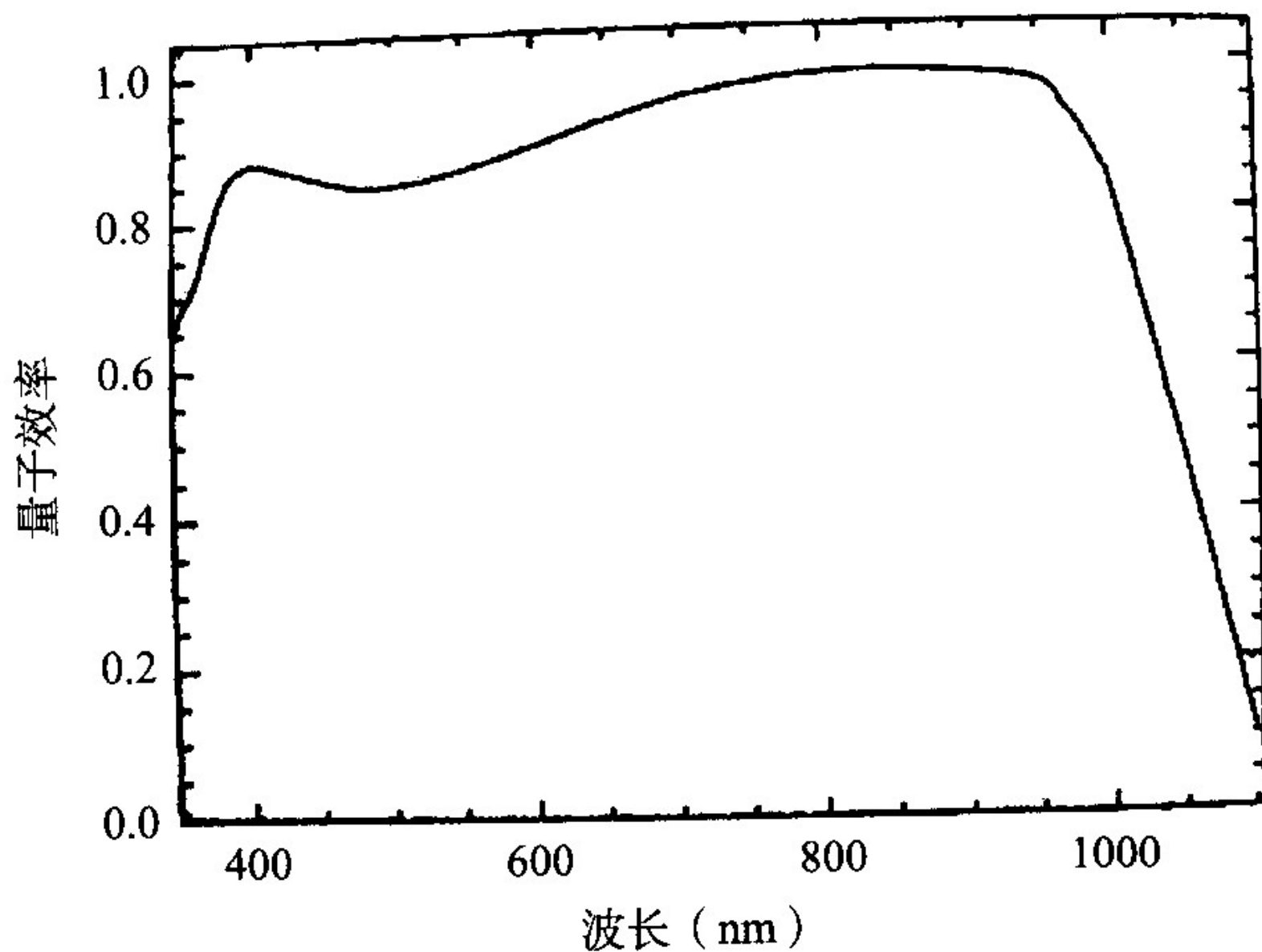


图4.13 pnCCD 在入射窗口镀有防反射层后的光谱响应

互补金属氧化物半导体（CMOS）

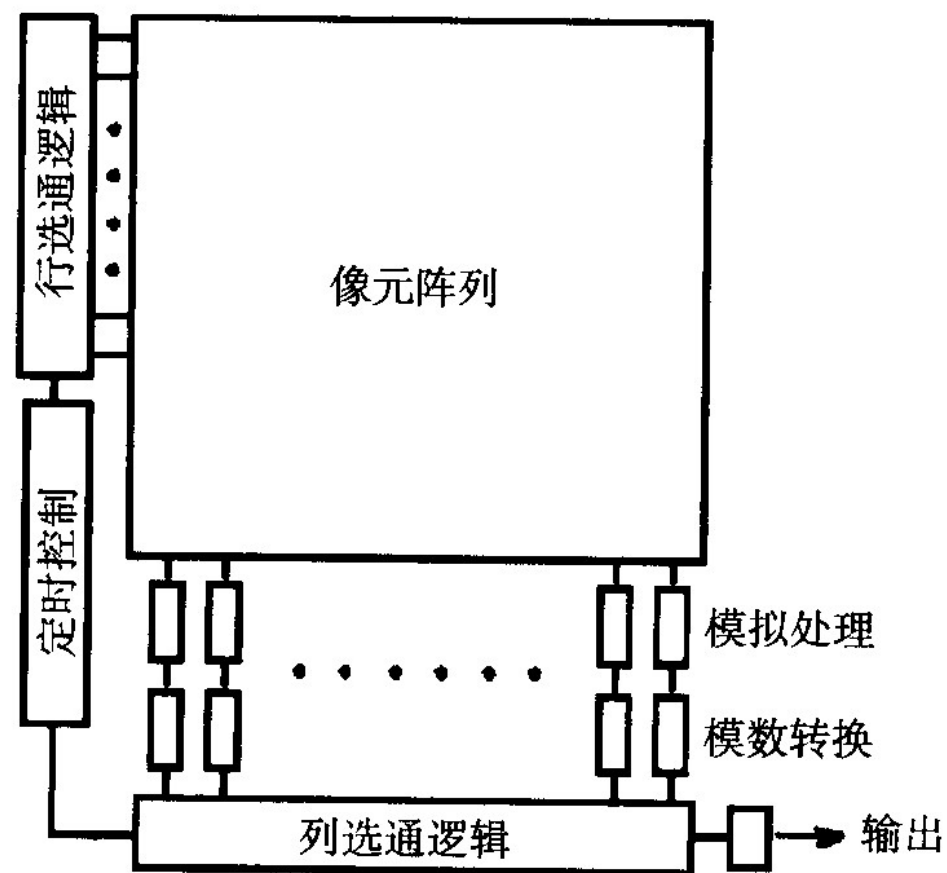


图 4.16 CMOS 光敏器件的基本结构

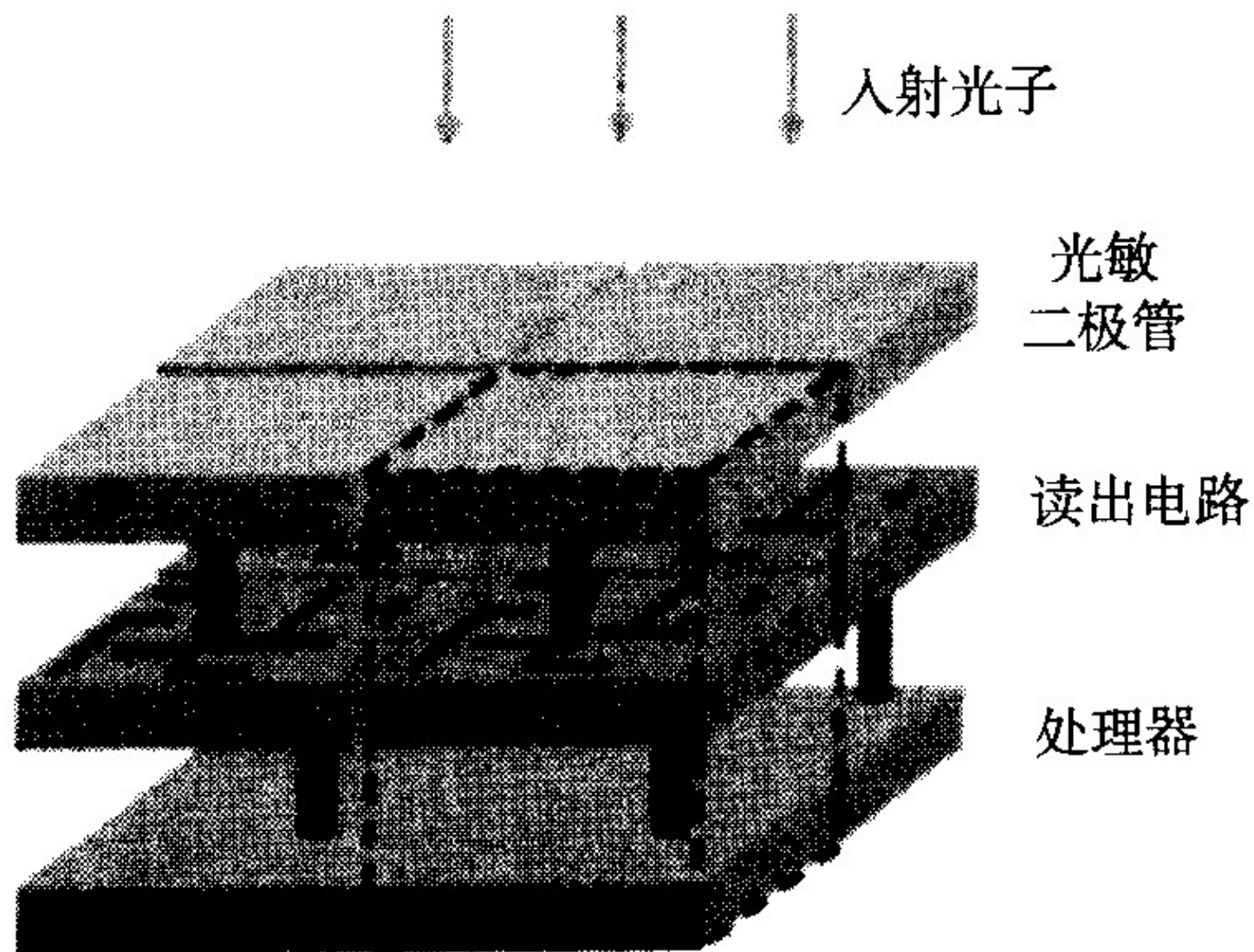


图 4. 21 三维立体集成结构 CMOS