

Bloco 8A

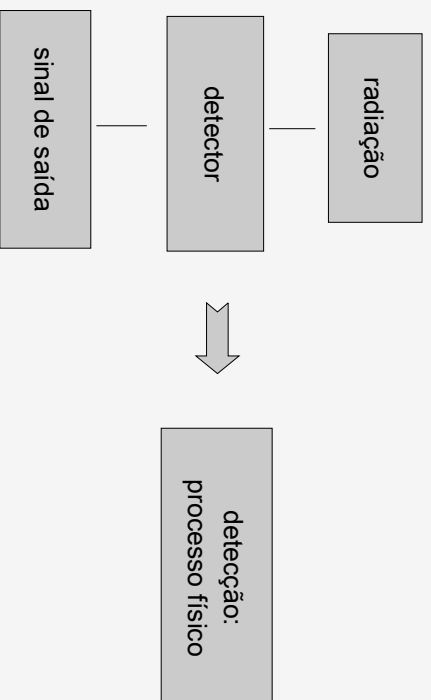
Detetores: Introdução e detetores no óptico

Atualizado: 2014

AST203 – CVR

8A-1

Introdução



AST203 – CVR

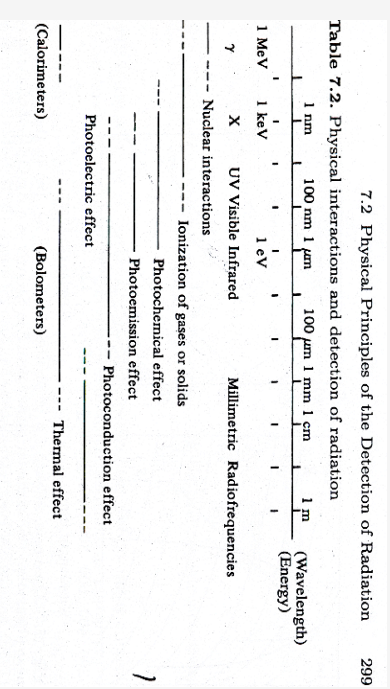
8A-4

Bibliografia

- ↳ Léna – Cap. 5 (1 ed.) e Cap. 7 (2 ed.)
- ↳ Kitchin – Caps. 1.1 e 2
- ↳ Walker – Caps. 7 e 8
- ↳ McLean – Caps. 1 e 6
- ↳ Howell, S. - Handbook of CCD Astronomy, 2006, Cambridge Univ. Press

AST203 – CVR

8A-3



Léna

AST203 – CVR

8A-5

Detetores quadráticos e de amplitude

- Um detetor pode responder de modo linear à amplitude ou à potência (energia). Pode ser, então, classificado como:
 - ↳ de amplitude = coerente
 - sinal proporcional à amplitude. Sinal pode conter a fase
 - * frequências baixas: rádio ($\sim \lambda < 200 \mu\text{m}$)
 - ↳ quadrático = incoerente
 - sinal proporcional à potência
 - * infravermelho, óptico e altas energias
- quânticos ou térmicos

Caracterizando um detetor

298 7. Detectors

Table 7.1. Detector characteristics

Dynamic range	Sensitivity threshold Domain of linearity Saturation level
Spectral properties	Quantum efficiency η Domain of sensitivity $\Delta\nu$ (or $\Delta\lambda$, or ΔE) Spectral response $\eta(\nu)$ Spectral resolution $\bar{\nu}/\Delta\nu$
Temporal response	Impulsive response $H(t)$ Response time Temporal filter function $\tilde{H}(s)$
Geometrical properties	Geometrical dimensions Modulation transfer function $\tilde{G}(w)$ Homogeneity of spatial properties Multichannel: pixel number or format, $N \times M$
Noise	Amplifier noise: gain g , fluctuations σ_g Readout noise: NRC or σ_r Intrinsic noise: NEP or noise temperature Spatial noise characteristics: PSD Temporal noise characteristics: PSD Detector Quantum Efficiency DQE
Polarisation	Polarisation selectivity

Lêna

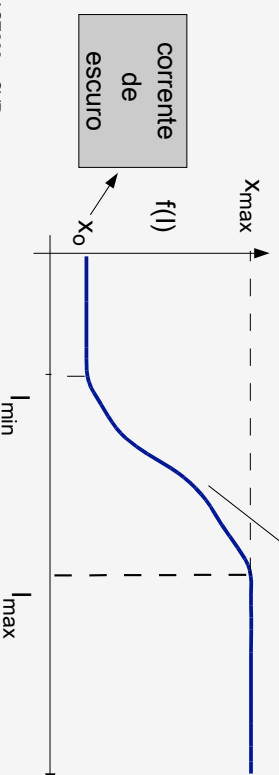
Propriedades gerais de detetores

- A transformação da radiação eletromagnética em um sinal no detetor pode ser expressa como:

$$x(t) = x_0(t) + f \left\{ \int_{\Delta\nu} \int_{\Delta\omega} I(\theta, \nu, t) P(\theta) \Phi(\nu) d\theta d\nu \right\}$$
- onde:
 - ↳ θ é a direção angular
 - ↳ $I(\theta, \nu, t)$ é a intensidade específica da radiação incidente
 - ↳ $P(\theta)$ é a resposta angular do detetor
 - ↳ $\Phi(\nu)$ é a resposta espectral do detetor
 - ↳ $x_0(t)$ é o sinal de escuro (ruído aditivo)
 - ↳ f é a função que relaciona entrada e saída do detetor

Intervalo dinâmico de um detetor

- Limite de detecção, I_{\min}
 - ↳ $f(I) = 0$, se $I < I_{\min}$
 - Saturação, I_{\max}
 - ↳ $f(I) = \text{constante}$, se $I > I_{\max}$
 - Intervalo dinâmico: X_{\max}/X_0
- Idealmente, a resposta deveria ser linear.



Resposta espacial de um detector

- Detectores unidimensionais
 - ↳ Um detector pode ter apenas um canal. Nesse caso, o sinal representa um ângulo sólido do céu e um intervalo de comprimento de onda
 - ↳ uma imagem (ou espectro) da fonte é obtida por varredura. Esse procedimento tem a vantagem de que todos os pontos foram obtidos com o mesmo detector (portanto com exatamente a mesma transformação)
- Detectores multicanais
 - ↳ cada canal (pixel = picture element) recebe um ângulo sólido ou intervalo de comprimento de onda
 - ↳ cada canal pode possuir características diferentes, o que impõe cuidados na redução de dados

AST203 – CVR

8A-10

Eficiência quântica

- A eficiência quântica, η , é definida como:

$$\eta = \frac{\text{número médio de fótons detectados}}{\text{número médio de fótons incidentes no detector}}$$
- A eficiência quântica de um detector, δ (DQE), é o quadrado da razão entre o sinal/ruído de saída e o sinal/ruído de entrada

$$\delta = \text{DQE} = \frac{\left(\frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\langle N^2 \rangle} \right)_{\text{detector ideal}}}{\left(\frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\langle N^2 \rangle} \right)_{\text{detector real}}}$$

No Léma, a expressão acima está invertida.

Pode ser mostrado que $\delta = \eta$, no caso em que a única flutuação do sinal é a de Poisson, isto é, quando o detector não acrescenta outras flutuações à medida.

AST203 – CVR

8A-12

Ruído de amplificação (ruído multiplicativo)

- É bastante comum que o processo de detecção inclua uma amplificação do sinal = ganho
- Podemos estimá-lo por sua média e desvio padrão:
 - ↳ \bar{g} e σ_g
→ assim, o sinal observado, S, é: $S = \bar{g}N = \bar{g}N\eta$
- Nesse caso, temos que:

$$\text{DQE} = \eta \frac{1}{1 + \eta \frac{\sigma_g^2}{\bar{g}^2}}$$

em CCDs, o ganho é menor que 1

AST203 – CVR

8A-13

Ruído de leitura (ruído aditivo)

- O ruído de leitura é associado a uma flutuação adicional no processo de mensuração do sinal

$$S = \langle N \rangle + \langle R \rangle$$
- Ele não altera o valor médio da medida (o valor médio do ruído de leitura é nulo), mas apenas aumenta sua flutuação. Pode, portanto, ser descrito apenas por seu desvio padrão:
 - ↳ σ_R
- Considerando apenas essa contribuição, a DQE é dada por:

$$\text{DQE} = \delta = \eta \left(1 + \frac{\sigma_R^2}{\eta N} \right)^{-1}$$

AST203 – CVR

8A-14

- No caso dos dois ruídos existirem, temos:

$$\delta = \eta \left[1 + \eta N \frac{\sigma_g^2}{g^2} + \frac{\sigma_R^2}{g^2 \eta N} \right]^{-1}$$

As expressões de DQE não me parecem corretas. Eu utilizo a formulação do MacLellan p. 319.

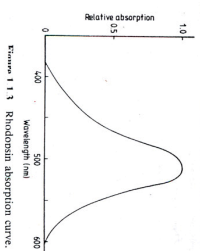
- Como levar δ a η ?
 - ↳ aumentando o ganho CU
 - ↳ diminuindo ruído

Detetores no óptico

Olho humano

- Primeiro e único detetor astronômico até o século XIX
- não permite o armazenamento de informações
 - ↳ no máximo desenho e anotações
- não permite integrações

Visão noturna: mais sensível, porém em preto e branco



Bastonetes: visão noturna

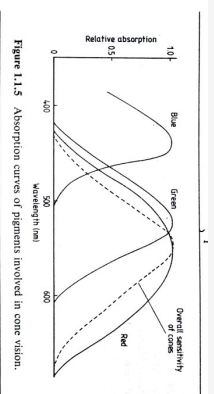


Figure 11.15 Absorption curves of pigments involved in cone vision.

Cones: visão diurna

Kitchen

Placas fotográficas

- primeiro detetector após o olho humano
- aparece na segunda metade do século XIX
- processo fotoquímico de detecção
- uso de microdensitômetro para determinar a densidade, d , que é a medida

$$d = -\log \frac{I}{I_0}$$

↳ I/I_0 : fração da intensidade transmitida por uma placa em um microdensitômetro

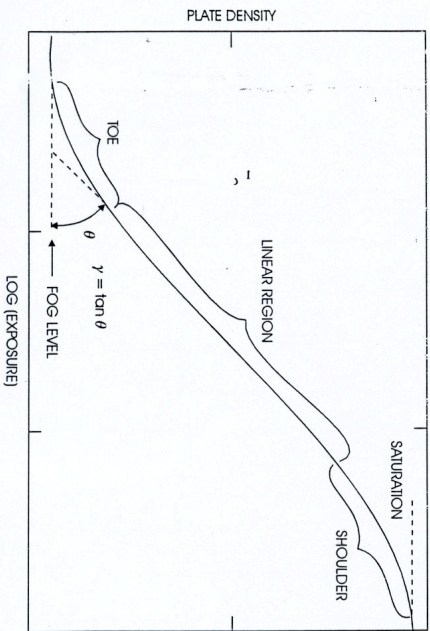


Fig. 1.4. The characteristic curve of a photographic plate is a plot of density versus exposure. The plate is linear over a limited range of exposure.

McLean

Fotomultiplicadoras

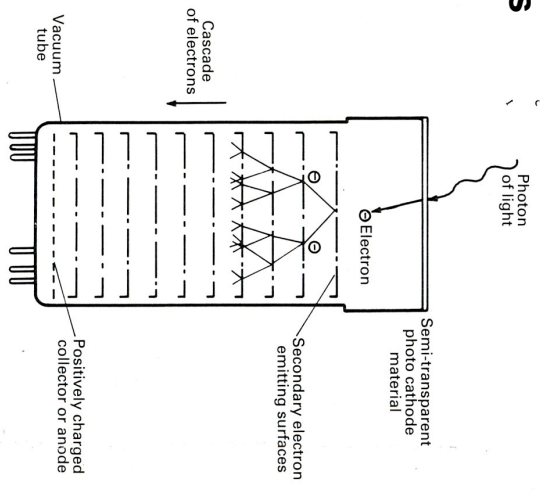


Fig. 1.5. The photomultiplier tube produces a large cascade of electrical current when illuminated with faint light. It employs the photoelectric effect in which very thin slabs of certain materials emit electrons when they are struck by a photon of sufficient energy. The electrons are drawn toward the positively charged anode.

McLean

- **Vantagens** 😊
 - ↳ permite integração
 - ↳ armazenamento permanente da informação
 - ↳ grande área e grande número de pixels

- **Desvantagens** 😞
 - ↳ intervalo dinâmico pequeno
 - ↳ pouco eficiente/lenta
 - ↳ não uniformidade
 - ↳ falha de reciprocidade
 - ↳ mudança de velocidade para um dado nível de iluminância total quando tempo de integração muda

- **Processo físico de detecção**
 - ↳ **Efeito fotoelétrico: elétron criado a partir da absorção de fóton no fotocátodo**

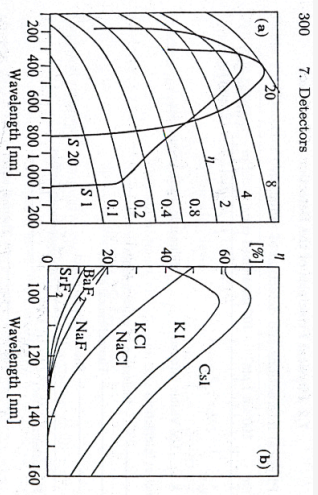
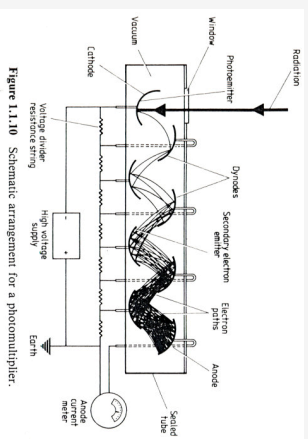


Fig. 7.7. Quantum efficiency η of photocathodes (in %): (a) in the visible and near ultraviolet; (b) in the far ultraviolet. The Si layer is a Ag-O-Cs photocathode (1990), and the S20 layer is tri-alkaline Na₂K₂Sb (Sommer, 1985). Note the extremely low quantum yield and excellent response in the far UV.

- Mecanismo de multiplicação

- ↳ g → foto e⁻ no fotocátodo
 - ↳ → acelerado até o 1o. dinodo
 - ↳ → multiplicados
 - ↳ → acelerado até o 2o. dinodo
 - ↳ → multiplicados
 - ↳ ...
 - ↳ → cargas coletadas no anodo (positivo)
- Dinodo: material/superfície fotoemissiva
 - ↳ ~ 10 dinodos
 - ↳ ddp entre dinodos: 100-150V
 - ↳ ddp total entre 1000 e 1500V



Kitchin

- surgimento: final da década de 1940
- vantagem com relação a placa fotográfica
 - ↳ mais precisa
 - ↳ mais sensível
 - ↳ resposta mais uniforme
- problema (enorme)
 - ↳ é um detector unidimensional

- Dois modos de detecção

- ↳ analógico: medida da tensão
- ↳ contagem de fótons = detecção de bursts
 - discriminador: elimina bursts espúrios
 - estatística de Poisson: $\sigma = N^{1/2}$

- Características

- ↳ ganho: $10^5 - 10^6$
- ↳ não existe limite mínimo de detecção – threshold
- ↳ linear
- ↳ sensível entre 20nm e 1200nm
- ↳ tempo de resposta: alguns ns
- ↳ sensibilidade praticamente constante com λ
- ↳ se temperatura não nula possui corrente de escuro
 - elétrons térmicos emitidos no fotocátodo ou dinodo
- ↳ resposta não-uniforme
 - existe diferença entre instrumentos nominalmente iguais
 - diferença na sensibilidade de acordo com a região de incidência

Níveis de energia em um sólido

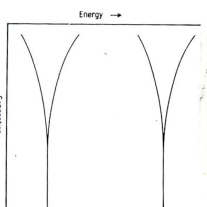


Figure 1.1.6 Schematic diagram of the splitting of two of the energy levels of an atom due to its proximity to another similar atom.

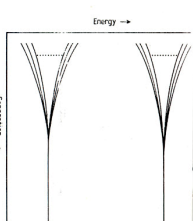


Figure 1.1.7 Schematic diagram of the splitting of two of the energy levels of an atom due to its proximity to many similar atoms.

Kitchin

Níveis de energia de um átomo transformam-se em bandas em um sólido

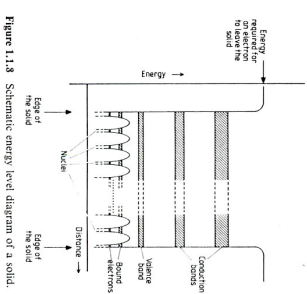


Figure 1.1.8 Schematic energy level diagram of a solid.

8A-28

CCD

AST203 – CVR

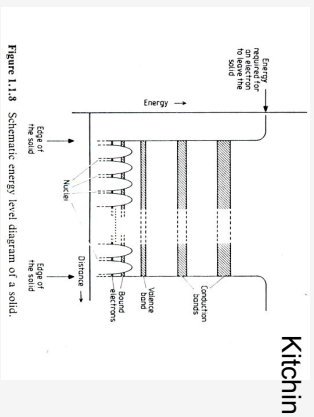
8A-27

Semicondutores

Condução ocorre por movimento de elétrons nas bandas de valência ou condução

Isolante: banda de valência completamente ocupada e banda de condução com energia muito mais alta

Semicondutor: separação entre bandas de valência e condução é pequena



Kitchin

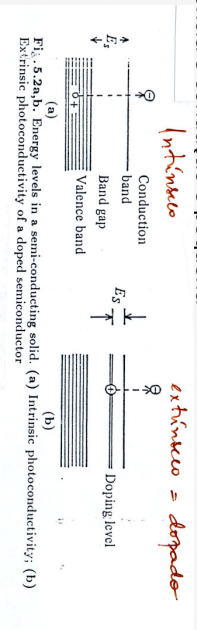


Fig. 5.2a,b. Energy levels in a semi-conducting solid. (a) Intrinsic photoconductivity of a doped semiconductor.

AST203 – CVR

8A-29

Níveis de energia em um sólido

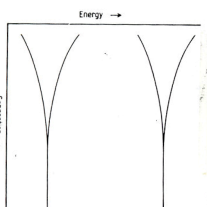


Figure 1.1.6 Schematic diagram of the splitting of two of the energy levels of an atom due to its proximity to another similar atom.

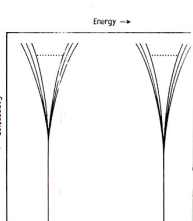


Figure 1.1.7 Schematic diagram of the splitting of two of the energy levels of an atom due to its proximity to many similar atoms.

Kitchin

Níveis de energia de um átomo transformam-se em bandas em um sólido

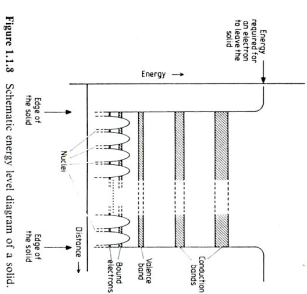


Figure 1.1.8 Schematic energy level diagram of a solid.

8A-28

Table 7.3. Intrinsic photoconductivity

Material	Threshold wavelength [μm]	Working temperature [K]	Applications
Germanium Ge	1.88	77	Solar energy
Silicon Si	1.14	300	Astronomical detectors
Cadmium sulphide	0.52	77 to 150	Photography (exposure meters)
CdS		4 to 77	Astronomical detectors
Indium antimonide InSb	5.50 (77 K)	20 to 300	Thermal surveillance and astronomical detectors
Hg _{1-x} Cd _x Te	Varies with x but ≈ 20 μm		

Silício: de 3000 a 11000 Å

AST203 – CVR

8A-30

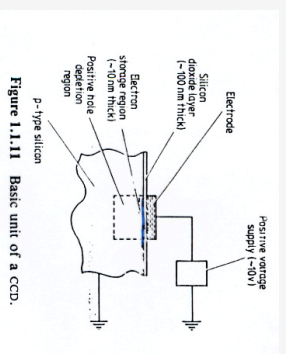
CCD: *charged coupled device*

- Princípio físico de detecção
 - ↳ produção de carga em um semicondutor a partir da incidência de fótons ($\eta > 0.5$, tipicamente 0,9)
- As cargas produzidas em uma dada região do semicondutor ficam confinadas durante o tempo de integração (armazenamento)
- Com o final da integração, as cargas são transportadas (charge transfer = charge coupling)
- registro das cargas: pacotes individuais são convertidos a uma ddp e digitalizados em um (ou poucos) ponto(s) de leitura

AST203 – CVR

8A-31

- Um CCD é uma matriz de
 - ↳ MIS (metal insulator semiconductor capacitor) ou
 - ↳ MOS (metal oxide semiconductor)
- Componentes de cada capacitor
 - ↳ eletrodos (=portões, gates)
 - placas de metal que submetem o cristal a uma tensão
 - ↳ os eletrodos são separados do semicondutor por uma camada isolante (óxido)
 - ↳ semicondutor (onde o fóton é convertido em elétron)



Kitchin

AST203 – CVR

8A-33

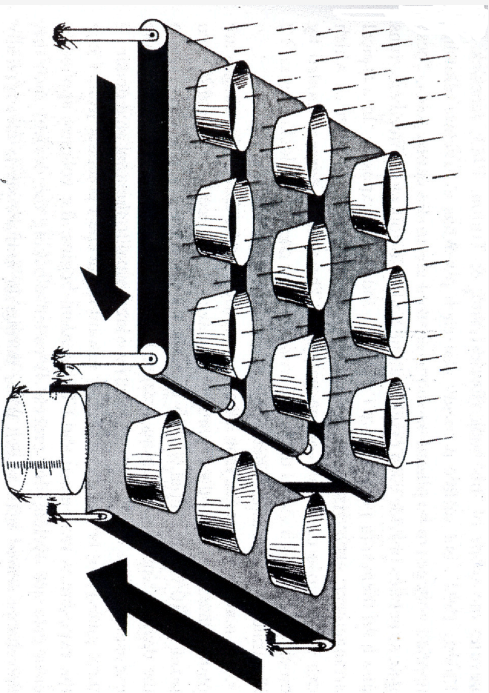


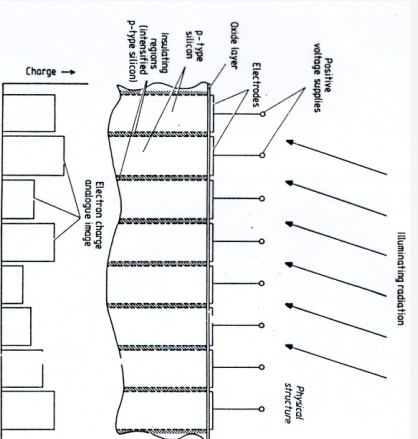
Fig. 2.1. CCDs can be likened to an array of buckets that are placed in a field and collect water during a rainstorm. After the storm, each bucket is moved along conveyor belts until it reaches a metering station. The water collected in each field bucket is then emptied into the metering bucket within which it can be measured. From Janesick & Blouke (1987).

Howell

AST203 – CVR

8A-32

- Linhas de um CCD são separadas por material isolante (channel stops)



Kitchin

Desse modo os fótons que incidem em uma dada linha produzem elétrons que ficam aprisionados nessa linha.
E como confinar os fótons incidentes na outra direção?

AST203 – CVR

8A-34

- Os CCDs possuem um mecanismo de aprisionamento de cargas através da aplicação de diferentes tensões em eletrodos adjacentes

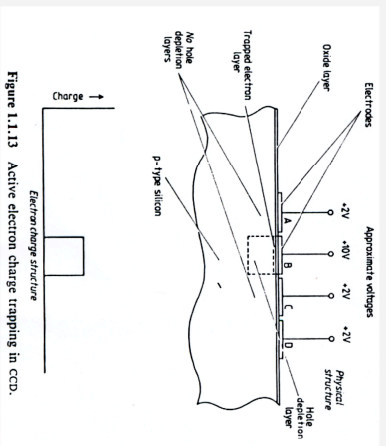


Figure 1.1.13 Active electron charge trapping in CCD.

Kitchin

Atenção!

Em uma direção os elétrons são confinados por uma camada isolante, na outra, através do processo ao lado.

Transferência de carga em um CCD

Eficiência de transferência de carga (CTE): fração de elétrons transportados em cada mudança de eletrodo. Valor típico: > 99.9999%

Eficiência total

pixels/CTE	0.999999	0.98
100	0.99990	0.13
1000	0.99900	2. 10 ⁻⁹

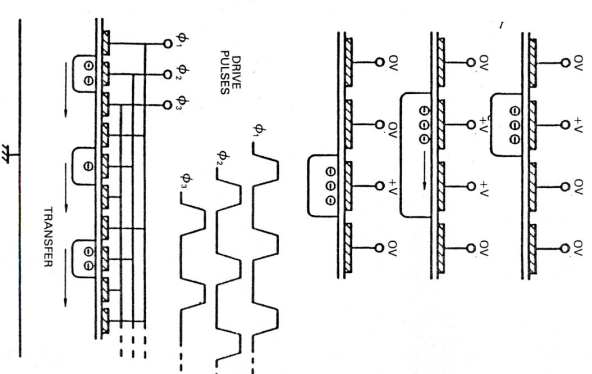


Fig. 6.9 Charge-coupling in a three-phase CCD and the associated timing waveform or clock pattern. In practice the degree of overlap between one electrode and the next depends on the design.

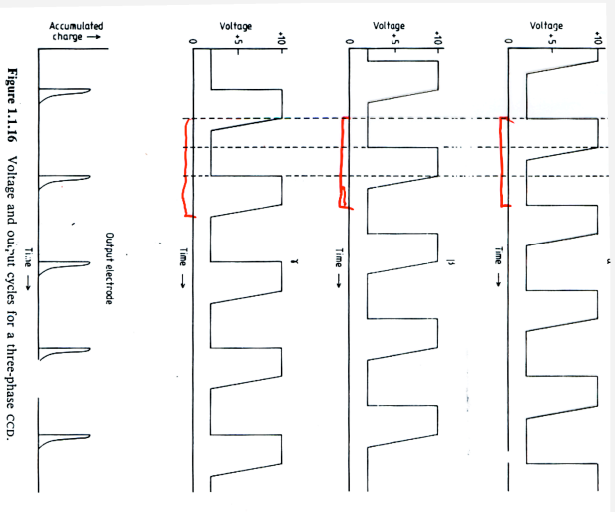
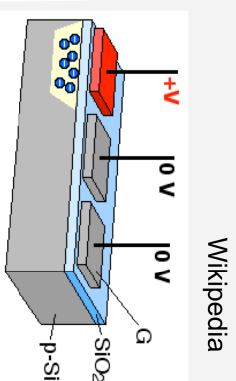


Figure 1.1.16 Voltage and output cycles for a three-phase CCD.

Kitchin



Wikipedia

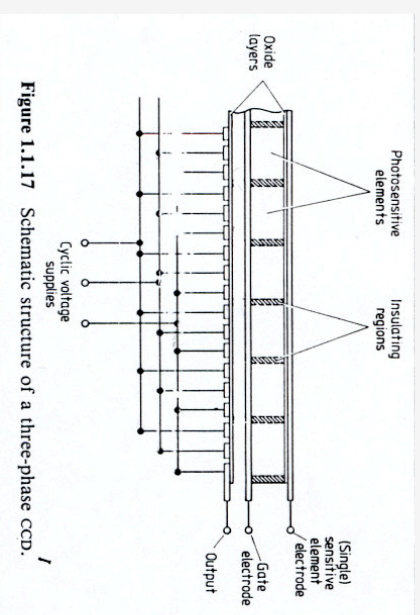


Figure 1.1.17 Schematic structure of a three-phase CCD.

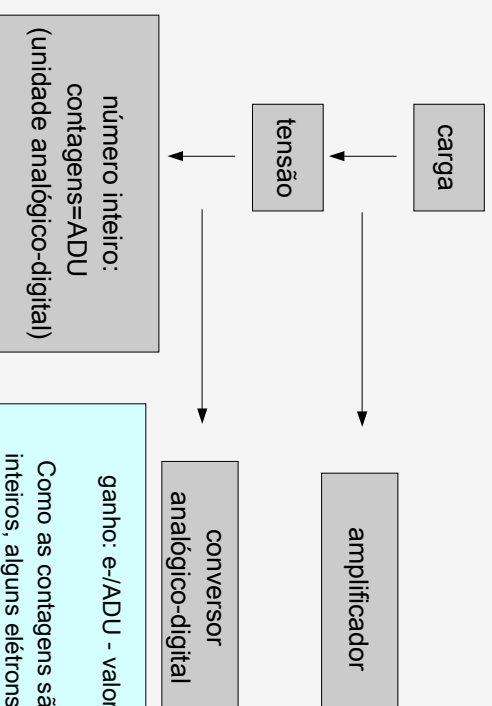
Leitura das cargas

- A última linha no sentido da transferência de cargas não incide luz
- Nessa linha, a transferência ocorre na direção contrária ao região que coleta fótons
- No final dessa linha encontra-se o dispositivo de leitura. Assim, cada pacote de cargas correspondente a cada pixel do CCD é lido nesse ponto
- O processo de leitura de um CCD é da ordem de dezenas de segundos (tempo morto importante para integrações curtas)

AST203 – CVR

8A-39

Transformando cargas em números



ganho: e-/ADU - valor típico 10
 Como as contagens são números inteiros, alguns elétrons podem ser perdidos de acordo com o ganho
 Exemplo: 111 e- = 11 ADUs

AST203 – CVR

8A-40

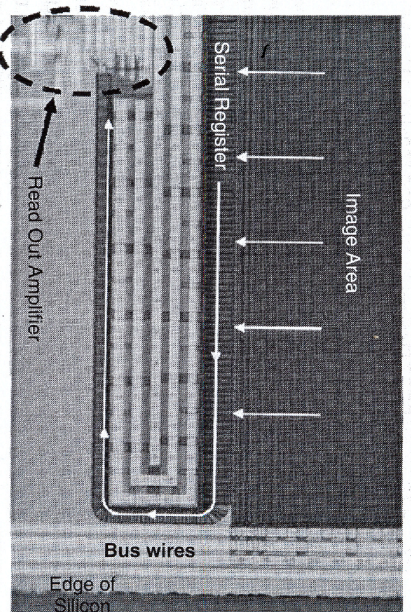


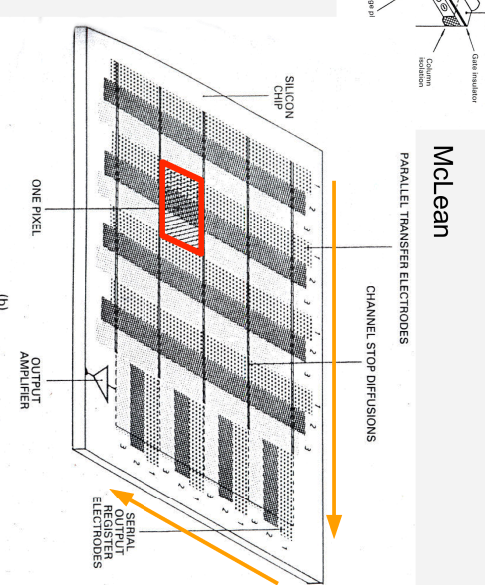
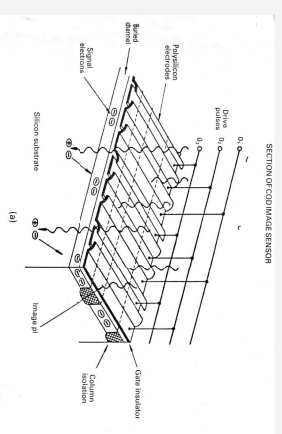
Fig. 2.3. Microphotograph of a E2V L3CCD (see Section 2.2.7) showing the image area (pixels), the serial register, and the on-chip readout amplifier. The other wiring and the bus wires are electrical connections that carry the clock signals and bias voltages to use. Added on to the normal CCD components is an extended serial register through which the readout occurs (the arrow indicates this flow) where the half after the bend is the gain register.

Howell

AST203 – CVR

8A-41

Visão integrada de um CCD



Mclean

AST203 – CVR

8A-42

Propriedades de CCDs

Tamanhos

- Pixel
 - ↪ valores típicos: 20 μm
 - ↪ valores mínimos: 2 - 10 μm
- CCD
 - ↪ valores típico: 2000 x 2000 pixels
 - ↪ tamanhos máximos: 5000 x 10000, 7200 x 9200
 - grandes CCD podem possuir mais de um ponto de leitura
 - ↪ mosaicos

Eficiência quântica

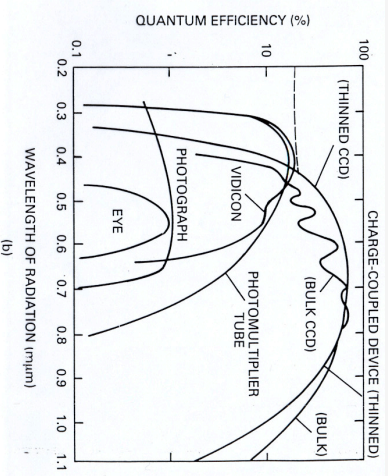


Fig. 1.9. (a) Comparing the sizes of a CCD chip, a photomultiplier tube and a large (black tube) image intensifier. The ruler is 12 inches long. (b) The sensitivity or quantum efficiency of certain CCDs to light of different wavelengths compared to other forms of light detectors. Note that the scale on the left increases by factors of ten. One of the CCD's main attributes is its extensive range in wavelength coverage.

Eficiência quântica x comprimento de onda

- *front-illuminated* x *back-illuminated*
 - ↪ Os primeiros CCD possuíam os eletrodos na superfície que recebe luz (iluminados pela frente). Nesse caso, parte da luz, principalmente a azul, é refletida, o que diminui η nessa faixa
 - ↪ Artificio: iluminar o CCD por trás (*back-illuminated*). Nesse caso, é necessário diminuir a espessura do semicondutor e, apesar da eficiência aumentar no azul, diminui no vermelho
 - *fringing* no vermelho
- Cobertura
 - ↪ CCDs podem ser recobertos de material fosforescente que converte o comprimento de onda da radiação incidente para um que seja detectado pelo CCD

Correção básica de imagens CCD

- Bias
 - ↳ ruído de leitura
 - ↳ nível de pedestal
- Flat-field
 - ↳ diferença de sensibilidade entre pixels devido a inhomogeneidade e também a iluminação não-uniforme
- Fringing
 - ↳ interferência de luz (quase) monocromática no detector
- Dark
 - ↳ contagens devida a elétrons térmicos
- Pixels ruins
 - ↳ defeitos...

AST203 – CVR

8A-47

Imagens de bias

- Imagens de bias são feitas com obturador fechado e tempo de exposição mínimo
- Imagens de bias contêm
 - ↳ Ruído de leitura: número de elétrons adicionado na contagem de um dado pixel
 - duas componentes (inseparáveis)
 - * flutuação na conversão analógico-digital
 - * elétrons espúrios adicionados pela eletrônica nas contagens
 - ruído aditivo e de valor diferente para cada pixel
 - ↳ nível de pedestal adicionado eletronicamente para evitar contagens nulas
- Correção da imagem é feita pela subtração de uma imagem média de bias

AST203 – CVR

8A-48

Imagens de dark

- Imagens de dark são realizadas com obturador fechado e com tempo de exposição igual as imagens de ciência
- Registram as contagens devida aos elétrons térmicos
- Representam um ruído aditivo
- O dark é um ruído desprezível em muitos casos. Exemplos
 - ↳ tempos de exposição curtos
 - ↳ medidas diferenciais

AST203 – CVR

8A-49

AST203 – CVR

8A-50

Máscara de pixels ruins

- Os CCDs podem possuir pixels com sensibilidade muita acima ou muito abaixo do valor médio
- Esses pixels podem ser mapeados e desconsiderados na redução de dados

Resumo das características

- intervalo dinâmico: da ordem de 10^5
- ganho: da ordem de 1
- ruído de leitura: 4-5 e-/pixel
- sensibilidade não-uniforme (correção por flat-fielding)
- curva característica linear
- eficiência quântica próxima de 1
- sensível em um grande intervalo de frequência
- corrente de escuro pequena (corrigida pelas imagens de dark)