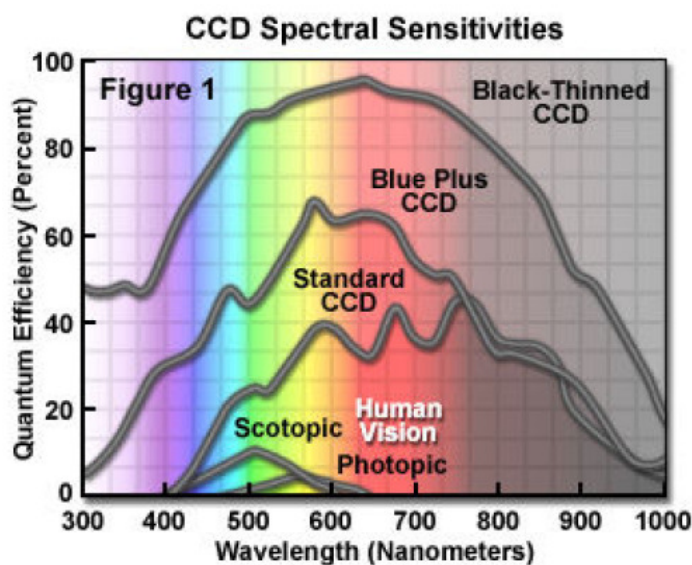


EFICIÊNCIA QUÂNTICA

A eficiência quântica de um CCD (*charge-coupled device*) é uma propriedade de resposta foto voltaica definida como o número de electrões criados e lidos satisfatoriamente pelo dispositivo para cada fotão colectado pelo sistema óptico. Esta propriedade é especialmente importante nas aplicações com fraca intensidade luminosa, como é o caso de alguns ramos da ciência, como as imagens astronómicas. Os CCDs padrão, que são iluminados de frente, através da porta de eléctrodos e do revestimento de óxido, são mais sensíveis à região do espectro com comprimentos de onda que vão do verde ao vermelho, dos 550 aos 900 nanómetros (nm).



A sensibilidade espectral do CCD diferencia-se das de um simples detector de fotodiodos de silício porque a superfície do CCD tem canais para a transferência da carga, blindados / protegidos (*shielded*) por portas de eléctrodos de polisilício, películas finas de dióxido de silício e uma capa de passivação de silício nitrado. Estas estruturas, empregues na transferência de carga desde a sua “produção” na

imagem e proteger o CCD de humidade e da descarga electrostática, absorvem nos comprimentos de onda mais curtos (450 nm e níveis mais baixos), reduzindo a sensibilidade do dispositivo no azul. A transmissão do polisilício começa a reduzir-se abaixo dos 600 nm e o material é praticamente opaco aos fotões nos 400 nm, mas a absorção depende da espessura da porta e dos efeitos de interferência da luz que passa através de finas películas que existem na superfície do CCD.

CCDs com transferência interlinha têm fotodiodos que se desviam da estrutura padrão da porta de polisilício, um factor que reduz os efeitos de interferência e produz uma resposta espectral melhor e mais uniforme. Estes dispositivos também estão normalmente equipados com drenos *antiblooming* que produzem uma resposta reduzida a fotões com comprimentos de onda mais largos. Como os fotões acima dos 700 nm penetram profundamente no substrato de silício, nas zonas perto do dreno, têm mais oportunidades de libertar electrões, entrar no dreno e ser eliminados instantaneamente. A eficiência quântica também depende da voltagem da porta, com voltagens baixas que produzem pequenas regiões de redução e o oposto. As películas de emulsão tradicionais, são hipersensíveis à região azul do espectro de luz visível, ao contrario da resposta dos CCDs, uma característica que acentua os

diferentes resultados nas cores das imagens capturadas em película e as registradas com um CCD. Devido á geometria do pixel de diminutas dimensões, o problema da absorção da luz azul aumenta porque a resposta do sensor ao azul diminui rapidamente junto com o tamanho do mesmo.

A figura 1 mostra uma típica curva de sensibilidade espectral para um CCD padrão, com um pico máximo de eficiência quântica de 40%. As variações no espectro são devidas a efeitos de interferência produzidos pelas películas existentes na superfície do CCD.

Recentemente foi bastante melhorada a transparência dos canais enquanto a sensibilidade aos azuis e verdes dos CCDs de aplicações científicas, mediante o uso de materiais inovadores nas portas e revestimentos patenteados de fósforo. Revestimentos deste tipo (Lumogen), são colocados directamente na superfície da matriz e emitem luz na região de 500 a 580 nm, quando são excitados por fótons com comprimentos de onda muito curtos, na região do ultravioleta á luz visível (129 a 450 nm). Os materiais de fósforos que se encontram no revestimento produzem uma fluorescência secundária que é emitida em todas as direcções, mas só os fótons que entram na matriz são absorvidos para produzir uma eficiência quântica entre 15 a 20% aproximadamente. Estes revestimentos são transparentes para a luz visível e por isso no afectam a absorção de fótons com comprimentos de onda que excedam os 450 nm, produzindo uma resposta espectral de quase 1.000 nm (entre os 120 e os 1.000 nm).

Na figura 1 também se mostram as curvas de sensibilidade espectral do olho humano que correspondem á visão fotópica (responsável pela distinção dos comprimentos de onda do vermelho, verde e azul) e escotópica (que distingue as diferenças entre claros e escuros) procedentes dos cones e dos bastonetes respectivamente. O pico de sensibilidade é no verde (a sensibilidade fotópica é nos 555 nm e a escotópica nos 507 nm) com uma eficiência quântica máxima de 3% para a visão fotópica e de uns 10% para a visão escotópica. Da análise destes dados deduzimos que, comparando com os nossos olhos, um CCD de qualidade científica tem obviamente uma sensibilidade espectral muito mais ampla e apresenta uma eficiência quântica igualmente muito superior.

Os CCDs iluminados por trás eliminam completamente as perdas devidas ás estruturas das portas dos canais. Neste desenho, a luz incide na parte traseira do CCD numa região que foi previamente rebaixada (decapada) mediante a aplicação de uma solução ácida, até ficar transparente (a sua espessura aproximada é de uns 10 a 15 μm). A curva de sensibilidade espectral resultante, mostrada nas figuras 1 e 3, ilustram que

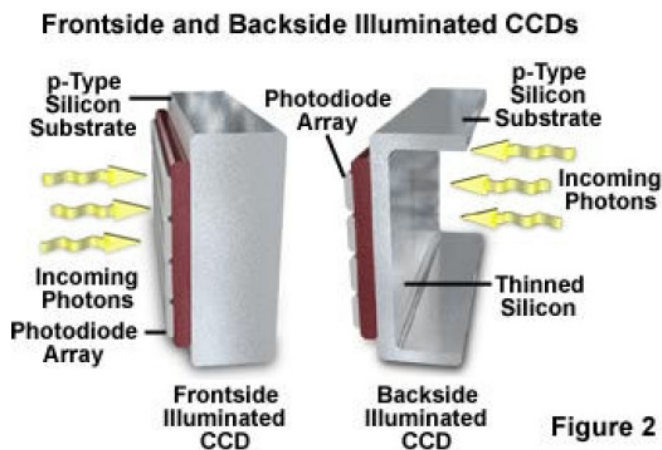
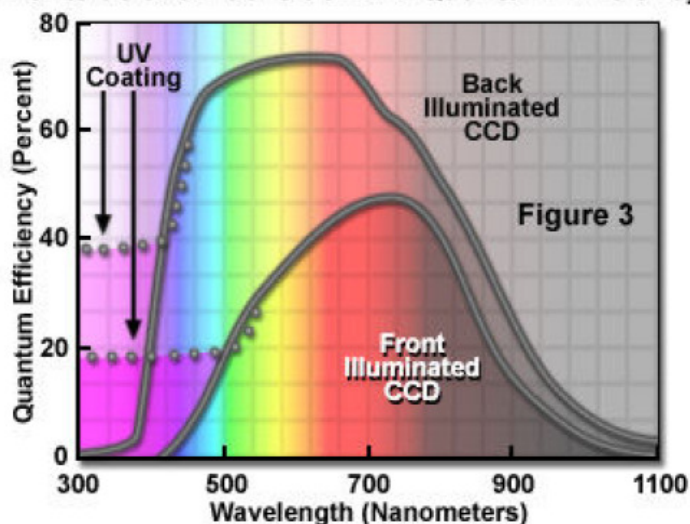


Figure 2

se pode alcançar, com esta configuração, uma eficiência quântica muito elevada. Sem embargo, o rebaixamento posterior produz um sensor mais delicado e relativamente mais caro que, até hoje, apenas foi unicamente empregue em câmaras com CCD para aplicações científicas de alto nível.

Para aumentar a eficiência quântica dos CCD com rebaixamento posterior, utilizam-se revestimentos antirreflectores, mas não é possível produzir revestimentos que sejam efectivos em todo o espectro visível. Os revestimentos que aumentam a resposta espectral (transmissão) nos comprimentos de onda maiores, produzem também uma diminuição na transmissão para a absorção dos fotões de pequeno comprimento de onda, pelo que as investigações estão centradas na produção de revestimentos antirreflectores que sejam efectivos ao longo de todo o espectro de luz visível.

Frontside and Backside CCD Quantum Efficiency



O efeito fotovoltaico, no qual a energia da luz sob a forma de fotões se converte em potencial electrónico, depende de um amplo espectro de condições. Quando os fotões visíveis e infravermelhos de 400 a 1.100 nm colidem com um átomo de silício do substrato do CCD, os electrões deste se excitam desde a banda de valência a banda de

condução devido a uma reacção entre os fotões e os electrões orbitais do silício. Uma série de factores determinam a quantidade de carga electrónica gerada por um quanto de energia de luz, incluindo o coeficiente de absorção, a vida útil da recombinação dos fotões, longitude de difusão e da natureza química e física dos materiais que cobrem a superfície do CCD. O coeficiente de absorção dos fotões no silício depende do comprimento de onda, com um comprimento de onda grande (maior que 800 nm) os fotões penetram mais profundamente no substrato de silício do que aqueles cujos comprimentos de onda são menores.

Nos casos em que a energia do fotão é maior que a energia de transição, um electrão tem uma probabilidade muito alta de excitação dentro da banda de condução, passando assim a adquirir movimento (energia cinética). Esta interacção também é por nos conhecida como - o efeito fotoeléctrico - e depende de um comprimento de onda crítico, a partir do qual os fotões carecem de energia suficiente para excitar e o remover um electrão colocado na banda de valência. Quando os fotões ultrapassam o comprimento de onda crítico (normalmente superior aos 1.100 nm), a energia de transição, é maior que a energia intrínseca do fotão, e os fotões atravessam completamente o substrato de silício. Na tabela 1 temos uma lista com a profundidade (em μm)

na qual 90% dos fótons incidentes são absorvidos por um típico CCD. A maioria dos fótons com comprimento de onda entre 450 e 700 nm são bem absorvidos na região de depleção ou dentro do substrato de silício do CCD. Os fótons absorvidos na região de depleção tendem a uma eficiência quântica perto dos 100%, enquanto que os fótons que entram no substrato libertam electrões que percorrem um caminho a três dimensões aleatório e ou se recombinam ou se espalham pela região de depleção. A sua eficiência quântica é muito baixa, mas no entanto existem aqueles que alcançam um poço de carga.

Wavelength [Nanometers]	Penetration/Depth [Micrometers]
400	0.19
450	1.0
500	2.3
550	3.3
600	5.0
650	7.6
700	8.5
750	16
800	23
850	46
900	62
950	150
1000	470
1050	1500
1100	7600

Tabela 1 - Profundidade de absorção dos fótons no silício

A maioria dos sistemas empregues nas câmaras digitais desenhadas para aplicações científicas, são colocados dentro de um meio protector que reduz os artifícios (efeitos visíveis não desejados, produto das limitações técnicas), que melhora a resposta e prolonga a vida útil do CCD. Os fótons que entram no sistema têm de atravessar uma janela óptica, normalmente uma janela de cristal ou de quartzo para chegar á matriz de pixeis e entrar no substrato de silício. Para todos os comprimentos de onda dos fótons ocorrem percas pela reflexão na superfície da janela óptica de cristal e a transmissão de fótons através do cristal diminui drasticamente (o que não ocorre com o quartzo), para comprimento de onda abaixo dos 400 nm. Os sensores CCD científicos estão desenhados para aplicações que requerem uma sensibilidade elevada e utilizam revestimentos de quartzo para diminuir a reflexão em todos os comprimentos de onda.

Adaptado de:

Kenneth R. Spring - Scientific Consultant, Lusby, Maryland, 20657.

Michael W. Davidson - National High Magnetic Field Laboratory, 1800 East Paul Dirac Dr., The Florida State University, Tallahassee, Florida, 32310.