



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, ELÉTRICA E RADIOMÉTRICA DE UM SENSOR DE IMAGEM CMOS APS PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS**

Henrique Perrenoud Duarte

Relatório de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientada pelo Dr. Márcio  
Afonso Arimura Fialho.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE

São José dos Campos

2021





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, ELÉTRICA E RADIOMÉTRICA DE UM SENSOR DE IMAGEM CMOS APS PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS**

Henrique Perrenoud Duarte

Relatório de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientada pelo Dr. Márcio  
Afonso Arimura Fialho.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE

São José dos Campos

2021



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivos a investigação de como a resposta eletro óptica de um sensor de imagem com aplicações espaciais varia em função da sua temperatura de operação e de suas várias tensões de polarização, a obtenção de um melhor entendimento de como sensores de imagem baseados em silício se comportam e o desenvolvimento e estudo de um sistema de controle térmico ativo para sua caracterização. Assim, pretende-se otimizar o desempenho radiométrico e reduzir o consumo elétrico de equipamentos que empregam esse tipo de sensores de imagem, entre os quais um sensor de estrelas em desenvolvimento no INPE. A partir da revisão bibliográfica realizada sobre Sensores de Pixel Ativo (3T-APS CMOS), observou-se a existência de alguns tipos de ruídos de origem térmica, sendo de maior destaque o ruído associado à *dark current*, apresentando uma dependência exponencial com a temperatura e proveniente das junções p-n reversamente polarizadas dos fotodiodos. Desse modo, para se estudar o comportamento do sensor STAR-1000 em função da temperatura e reduzir esse tipo de ruído, projetou-se um sistema para controle ativo da temperatura do sensor para instalação em seu kit de desenvolvimento, levando em conta o custo de um sistema de refrigeração e os ganhos na qualidade das imagens. Quanto ao projeto do circuito, divide-se este em duas partes principais: Amostragem de temperatura e resposta de controle, ambas interligadas por um Arduino. O subcircuito de amostragem de temperatura torna possível a leitura da resistência do termistor colado no mesmo bloco térmico do sensor APS, a partir do qual pode-se calcular a temperatura do sensor APS. Esta informação é utilizada pelo software de controle implementado no Arduino de forma a estabilizar a temperatura do sensor APS. A lei de controle utilizada foi obtida com base na linearização de dados do termistor MF51E103E3950 (Cantherm) fornecidos pelo fabricante.

Palavras-chave: Aquisição de imagem. Controle térmico. Eletrônica de proximidade. CMOS. Sensor de píxel ativo. 3T-APS. Módulo peltier.



## LISTA DE FIGURAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Figura 1 - Layout Componentes Kit STAR1000.....	14
Figura 2 - Exemplo de Uso do sensor STAR-1000.....	15
Figura 3 - Circuito para Controle Ativo da Temperatura.....	16



## LISTA DE GRÁFICOS

	<b><u>Pág.</u></b>
Gráfico 1 - <i>Dark Current</i> x <i>Temperature</i> .....	12
Gráfico 2 - T x R.....	17
Gráfico 3 - T x $\ln(R/1\Omega)$ .....	17



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>13</b>
<b>3 CONCLUSÕES.....</b>	<b>18</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>19</b>

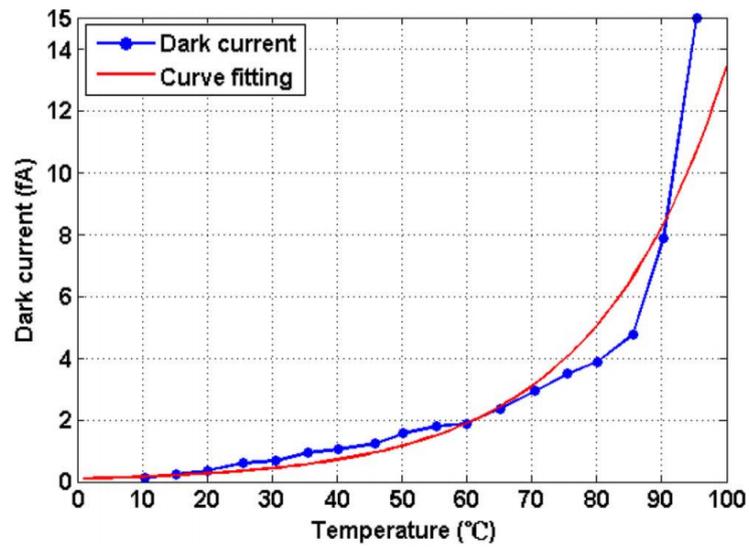
## 1 Introdução

Os sensores de imagem são dispositivos semicondutores que trabalham com tensões e correntes de baixa intensidade, e funcionam a partir de cargas geradas por um feixe luminoso incidente em suas matrizes de elementos fotossensíveis. O processamento dessas informações se dá por meio de um circuito eletrônico, que mapeia o nível de intensidade luminosa recebido sobre sua superfície com um sinal elétrico analógico proporcional, repassando este sinal para um elemento processador, que vai digitalizar e armazená-lo. De maneira figurativa, um sensor pode ser representado por uma matriz na qual se faz a amostragem de uma imagem bidimensional nas direções dos eixos cartesianos  $O_x$  e  $O_y$ . Após essa amostragem gera-se uma matriz matemática em que seus termos são interpretados e processados por um algoritmo (FIALHO, 2007).

A utilização de imageadores de tecnologia CMOS mostra-se vantajosa à missões envolvendo veículos espaciais, tanto pela redução de peso quanto por sua maior autonomia e possibilidade de integração de circuitos digitais e analógicos ao sensor (SALOMON et al., 1996). De uma forma geral, em um sensor CMOS-APS, a unidade pixelar pode ser constituída de capacitores, transistores e fotodiodos que, quando integrados, formam um circuito individual para cada *pixel*, acarretando em um grande nível de precisão (FOSSUM, 1993).

No entanto, a presença de ruídos nos sensores representa um grande problema quando se refere à deterioração das imagens. Durante a realização deste trabalho, destacaram-se alguns tipos de ruídos de origem térmica, sendo o maior deles associado à *dark current*, que dobra seu valor a cada acréscimo de  $10^{\circ}\text{C}$  (FIALHO, 2007).

Gráfico 1 - *Dark Current x Temperature*



Fonte: LIN et al. (2010)

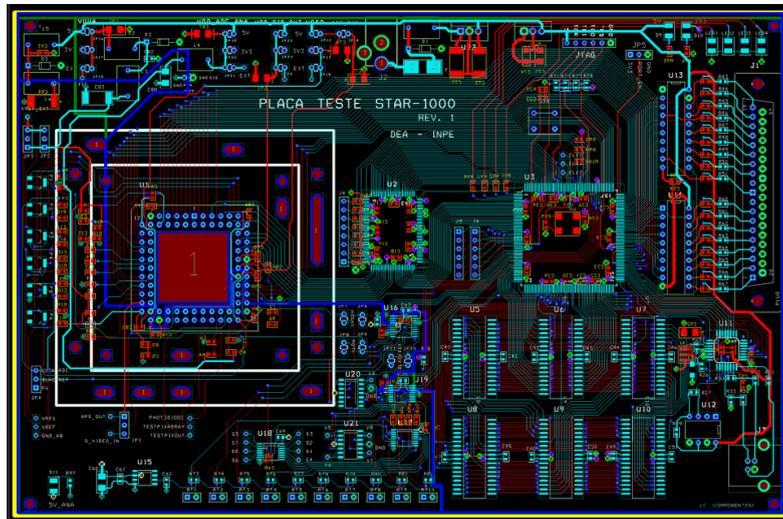
Desse modo, para se estudar o comportamento do sensor STAR-1000 em função da temperatura e eliminar a componente determinística (valor médio) da corrente de escuro por meio da caracterização do sensor e conhecimento de sua temperatura, desenvolveu-se um sistema preliminar para controle ativo da temperatura do sensor para instalação em seu kit de caracterização no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

## 2 Desenvolvimento

A caracterização de sensores de imagem CCD e CMOS utilizados em astronomia e astrofotografia é dada por dois métodos principais: *dark field* e *flat field*. O *dark field* trata-se de um registro de imagem em um ambiente com ausência de luz. Ao se obter esse *dark frame*, subtraindo-o de uma posterior imagem registrada apresentando as mesmas configurações, tem por objetivo reduzir certos ruídos presentes nela já que o *frame* em questão é essencialmente um registro do ruído gerado pelo sensor. De forma oposta ao método anterior, *flat fields* são registros obtidos de uma fonte de luminosidade e cor uniforme, e seu intuito é a equalização da discrepância de ganho de sinal e corrente de escuro entre os pixels do imageador. Ambos os métodos auxiliam na obtenção de melhores resultados operacionais que, aliados a um sistema de refrigeração e controle ativo da temperatura durante o processo de caracterização, colaboram com a precisão necessária para o uso do STAR-1000 em Sensores de Estrelas Autônomos (PEREIRA, 2013).

Para desenvolvimento do sistema de controle ativo de temperatura, fez-se necessário um melhor entendimento sobre o kit de caracterização do sensor STAR-1000. Seu funcionamento ocorre, de maneira geral, por meio do envio de sinais de controle gerados pela CPLD (sigla para a expressão em inglês "Complex Programmable Logic Device", que talvez pudesse ser traduzida para o nosso idioma como "Dispositivo Lógico Complexo Programável"), que controla a operação de todos os componentes presentes e do sensor imagem. A imagem obtida por este fica disponível, posteriormente, no banco de memórias da SRAM, podendo ser acessada por USB ou interface paralela (extensão do barramento ISA). Outra característica importante analisada está presente na base do sensor STAR-1000, um furo de aproximadamente 2,5cm x 2,5cm na placa de circuito impresso do kit de desenvolvimento, permitindo o contato direto entre o sensor e um bloco metálico ligado ao módulo Peltier para controle de temperatura durante uma caracterização eletro-óptica do imageador.

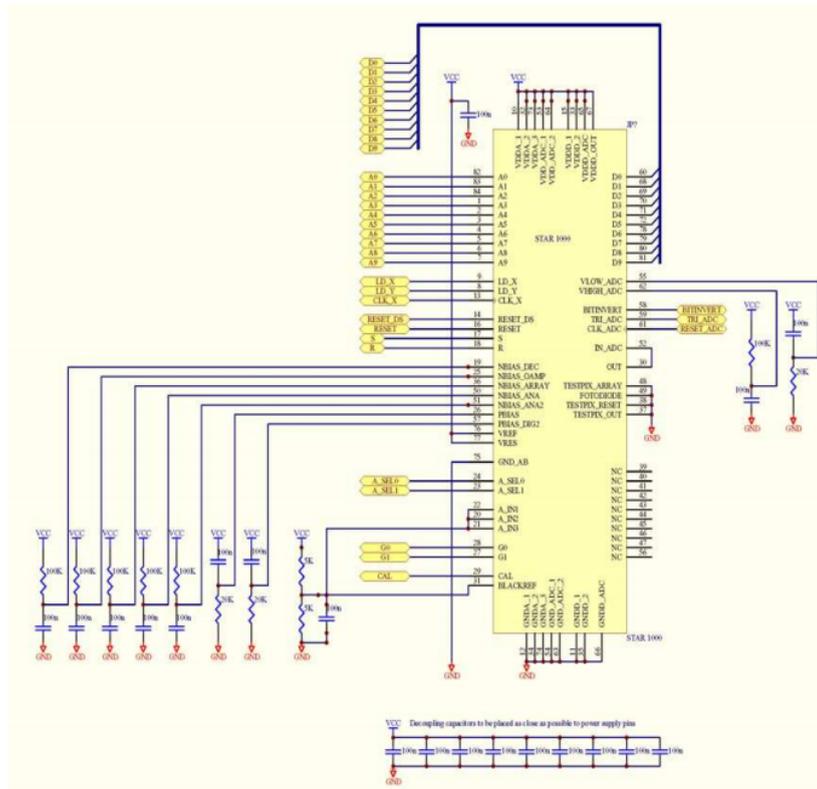
Figura 1 - Layout Componentes Kit STAR1000



Fonte: FIALHO (2007)

O sensor STAR-1000 apresenta uma matriz de 1024 x 1024 pixels, corretor de *Fixed Pattern Noise*, ruído que ocorre de maneira fixa em determinadas posições no decorrer da formação da imagem bidimensional, gerado no descarregamento do sinal de cada pixel pelas colunas da matriz pixelar (GOY et al., 2001), amplificadores de ganho de corrente programáveis e um conversor analógico-digital de 10 bits. Também apresenta alta tolerância à radiação, sensibilidade, baixa quantidade de ruídos e é monocromático, sem filtro Bayer (arranjo de quadros vermelhos, azul e verde, divididos em proporções de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{2}$ , respectivamente), capturando apenas a intensidade luminosa, já que a presença de filtros espectrais diferentes em cima de cada pixel degrada a precisão com que se consegue calcular os centróides das imagens das estrelas.

Figura 2 - Exemplo de uso do sensor STAR-1000



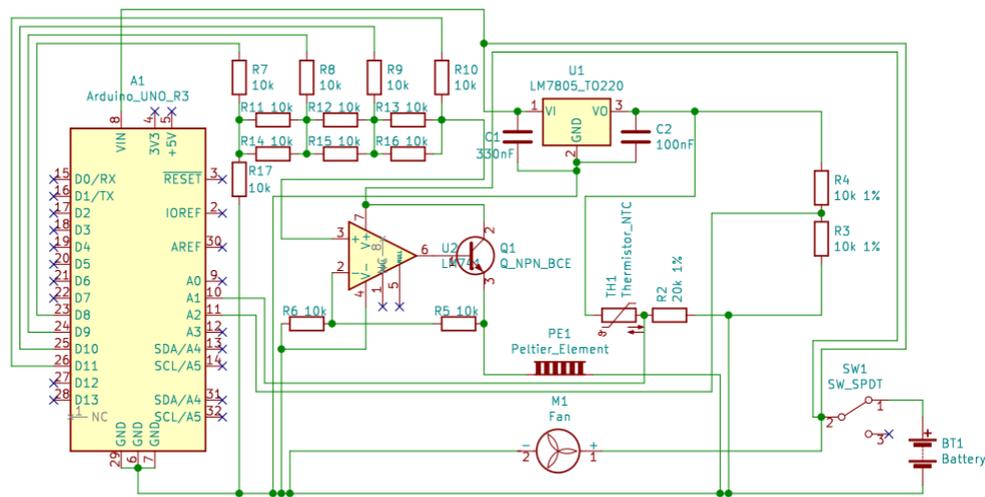
Fonte: ON Semiconductor (2014)

Quanto à sua arquitetura de pixel, este apresenta três transistores, sendo eles: *reset*, seguidor de fonte e de endereçamento. Seu ciclo de funcionamento começa através da polarização reversa do fotodiodo no momento de seu *reset*. Após isso, ocorre uma diminuição da tensão devido à incidência de fótons na superfície do fotodiodo e por fim, o pixel é endereçado e a tensão remanescente do diodo, através do transistor seguidor de fonte, é levada para a saída do pixel (THEUWISSEN, 2007).

Assim, elaborou-se um projeto de circuito dividido em duas partes principais, sendo essas a amostragem de temperatura (circuito sensor) e a resposta de controle (circuito atuador), ambas utilizadas por um Arduino UNO R3, que atua como controlador, fechando a malha de controle. Do circuito sensor, obtém-se a resistência apresentada pelo termistor NTC (resistência diminui com o aumento da temperatura) acoplado ao mesmo bloco térmico do sensor APS. O valor da resistência é alcançado indiretamente, a partir de uma tensão lida no divisor resistivo formado entre o termistor e R2. Com base nesta tensão, na tensão lida entre R4 e R3 (necessária para compensar possíveis variações na saída de U1

ou no conversor A/D do Arduíno) e no conhecimento do valor de R2, R3 e R4, o software implementado no Arduíno consegue chegar ao valor da resistência do termistor. Este valor aplicado a uma lei de controle a qual, no subcircuito da resposta de controle, é responsável por gerar uma resposta proporcional e amplificada. O sinal passa por um conversor digital-analógico simples de rede R-2R, com precisão de 4 bits, ligado a um amplificador operacional de ganho 2 (para não ocasionar algum estresse desnecessário na pastilha justificado pela especificação dos materiais de sua composição) até chegar ao módulo Peltier TE-83-1.0-1.5. O controle do DAC se dá por um código de manipulação direta das portas (PORTB: pinos D8 a D13) do microcontrolador, proporcionando uma otimização de sua memória e maior velocidade de resposta. Para testar o funcionamento do código responsável por essa manipulação, foi desenvolvido um protótipo para teste das 2<sup>4</sup> combinações possíveis para valores de saída do Arduino. Quanto ao módulo Peltier e sua eficiência de refrigeração, também foram realizados testes com uma montagem simples de uma pastilha Peltier em contato com um dissipador térmico e uma ventoinha, atingindo uma variação de temperatura de 29.1°C, levando seu lado de resfriamento de 23.5 até -5.6°C.

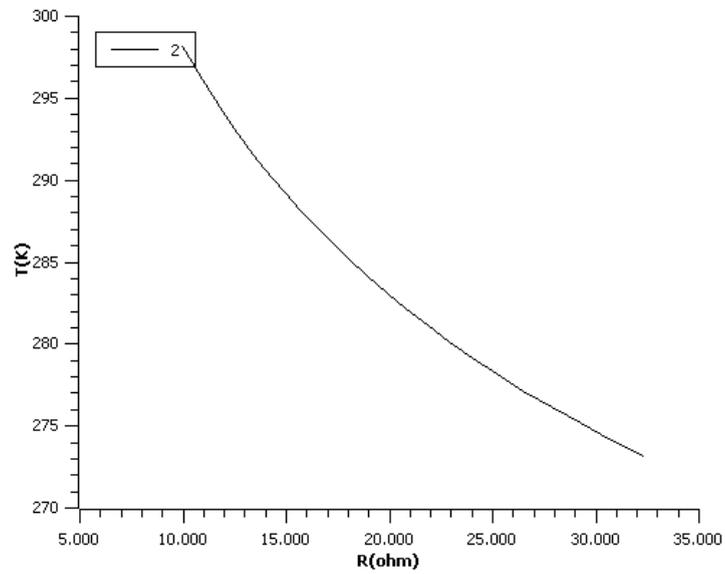
Figura 3 - Circuito para Controle Ativo da Temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor

Para definição da lei de controle, foi realizada uma análise referente aos dados de Temperatura, entre 273,15K e 298,15K, e Resistência (R) do termistor MF51E103E3950 (Cantherm) fornecidos pelo fabricante. Desses valores, montou-se o Gráfico 2 à seguir:

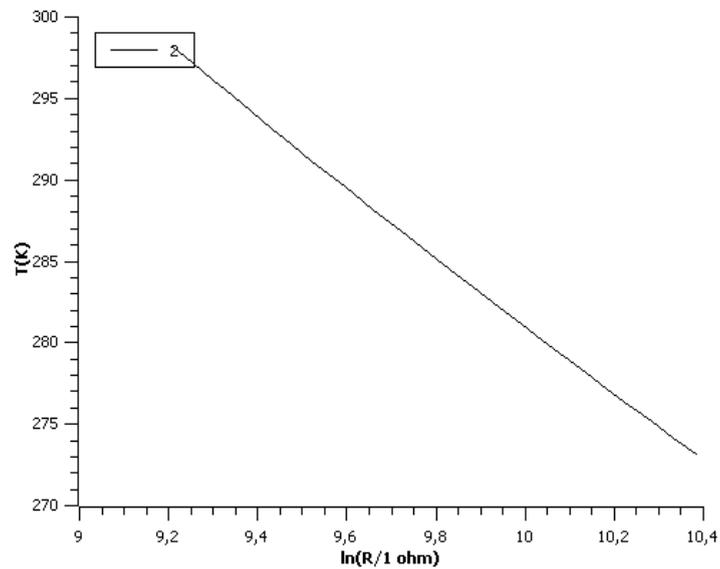
Gráfico 2 - T x R



Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio do método de troca de variáveis, fez a substituição de R por  $\ln(R/1\Omega)$  em relação ao eixo cartesiano Ox.

Gráfico 3 - T x  $\ln(R/1\Omega)$



Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, com a posterior linearização da curva gerada, foi possível obter a seguinte equação para a lei de controle:

$$T = [- 21,3112 \cdot \ln(R/1\Omega)] + 494,165$$

### 3 Conclusões

A partir dos estudos realizados durante o desenvolvimento do trabalho, observou-se que a corrente de escuro gera um deslocamento no nível de fundo da imagem (*bias*), sendo que a geração de portadores de carga que dão origem à essa corrente é um processo estocástico. Portanto, apenas é possível saber que a flutuação estatística em torno do valor médio do número de portadores de carga, dá origem a um ruído, que podemos chamar de ruído devido à corrente de escuro. Estes portadores de carga podem ser tanto elétrons quanto lacunas. Este ruído devido à corrente de escuro (*dark noise*) em junções p-n reversamente polarizadas dos fotodiodos apresenta uma dependência aproximadamente exponencial com a temperatura, como se verifica na expressão a seguir (COHEN; DAVID, 2000), que relaciona densidade da corrente de escuro ( $J$ ), constante  $A$ , referente à dopagem do silício, danos à estrutura cristalina, etc. (variável por pixel), energia de ativação relacionada à separação entre as bandas ( $E_a$ ), constante de Boltzmann ( $k_b$ ) e a temperatura absoluta ( $T$ ):

$$J = A \cdot e^{-E_a/k_b \cdot T}$$

Para se estudar o comportamento do sensor STAR-1000 em função da temperatura e eliminar a componente determinística da corrente de escuro, mostra-se fundamental o desenvolvimento e análise do sistema para controle ativo da temperatura do imageador para instalação em seu kit de desenvolvimento. Os testes relacionados ao software a ser implementado e a montagem do circuito seguem dando resultados positivos. Além de ser uma alternativa interessante quanto aos custos e ganhos na qualidade das imagens obtidas quando comparado à outras alternativas para refrigeração.

## Referências Bibliográficas

COHEN, M.; DAVID, J-P. Radiation-induced dark current in CMOS active pixel sensors. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.47, No.6, 2000.

FIALHO, M. Estudo comparativo entre dois algoritmos de identificação de estrelas para um sensor de estrelas autônomo de campo largo. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.

FOSSUM, E. Active pixel sensors: Are CCD's dinosaurs? Proc. SPIE 1900, Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors III, 1993.

GOY, J.; COURTOIS, B.; KARAM, J.; PRESSECQ, F. Design of an APS CMOS Image Sensor for Low Light Level Applications Using Standard CMOS Technology. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 29, 2001.

LIN, D.; WANG, C.; WEI, C. Quantified Temperature Effect in a CMOS Image Sensor. IEEE Transaction on Electron Devices, Vol.57, No.2, 2010.

PEREIRA, E. Determining the Fixed Pattern Noise of a CMOS Sensor: Improving the Sensibility of Autonomous Star Trackers. J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.5, No.2, 2013.

SALOMON, P.; FOSSUM, E.; CLARK, C.; DENNISON, E. Active Pixel Sensors for Autonomous Spacecraft Applications. Proc. SPIE 2810, Space Sciencecraft Control and Tracking in the New Millennium, 1996.

THEUWISSEN, A. CMOS image sensors: State-of-the-art and future perspectives. 33rd European Solid State Circuits Conference, 2007.