

## Eletrônica II EE 640

### Fotodetectores e Sensor de Pixel Ativo

Prof. Fabiano Fruett

UNICAMP – FEEC - DSIF  
Sala 207

[www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano](http://www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano)

1

## Fotodetectores

Sensores (conversores de energia no domínio radiante - distribuída no espectro eletromagnético - para energia no domínio elétrico).

Alguns tipos são:

Fotoresistores ou *Light Dependent Resistor* (LDR)

Fotodiodos

Fototransistores

*Charge-Coupled Device* (CCD)

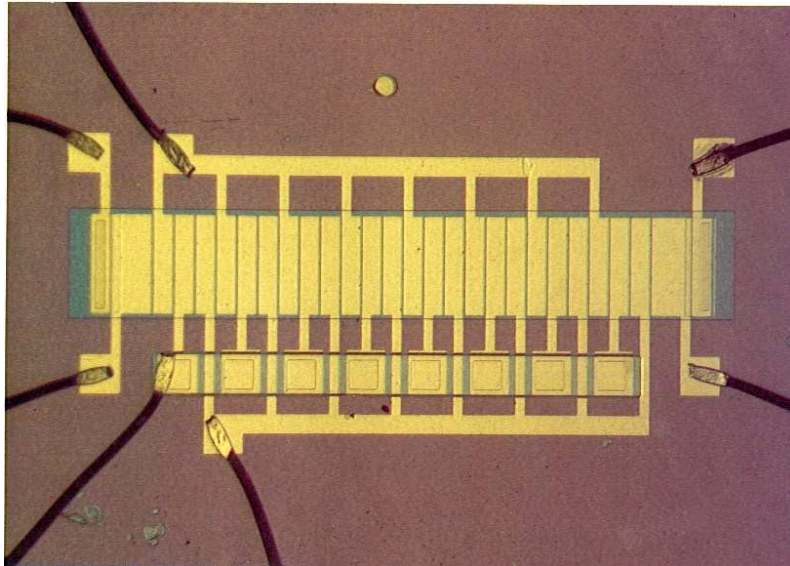
## Active-Pixel Sensor (APS)

- Cada pixel (sensor radiante) contém, além do fotodetector, um circuito eletrônico (amplificador)
- CMOS APS estão se tornando extremamente comuns em câmeras de telefones celulares e computadores
- Os APSs são normalmente apresentados na forma de Circuito Integrado, sendo dispostos em um array de pixels ou *Focal Plane Array* (FPA)
- Os APSs surgiram como uma alternativa aos *Charge-Coupled Devices* (CCDs)

## APS vs. CCD

- APSs surgiu como alternativa aos sensores CCDs que eram padrão para imagem digital
- APSs combinam sensor e eletrônica em um mesmo chip
- APSs são mais baratos que os CCDs
- Consumo de potências e escalonamento também são favoráveis aos APSs

## 1970 – Primeiro CCD 8 Bit, Bell Labs

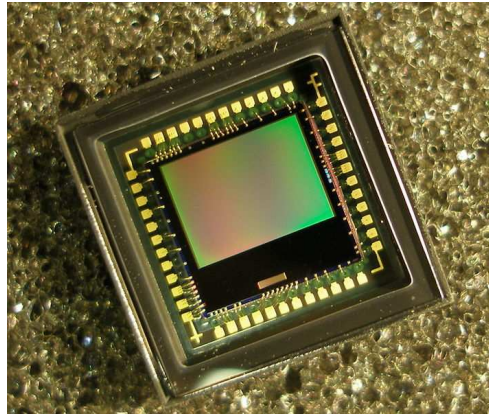


*Willard Boyle (left) and George Smith (right). Courtesy of Lucent Technologies.*

Década de 70

6

## CMOS APS



Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Matrixw.jpg#filelinks>

Etapas de processo de conversão de energia entre os domínios radiante e elétrico em um sensor semicondutor genérico

- Luz incide na superfície do semicondutor
- A Luz é transmitida passando pela cobertura e sendo absorvida pelo silício
- Fótons absorvidos geram pares elétron-lacuna
- Excesso de carga é gerado
- Carga é convertida em um sinal elétrico

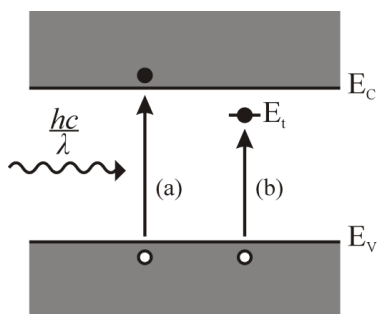
ADICIONAR AO CAPÍTULO EFICIÊNCIA QUÂNTICA

## Geração radiante em um semiconductor

Energia do fóton:

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

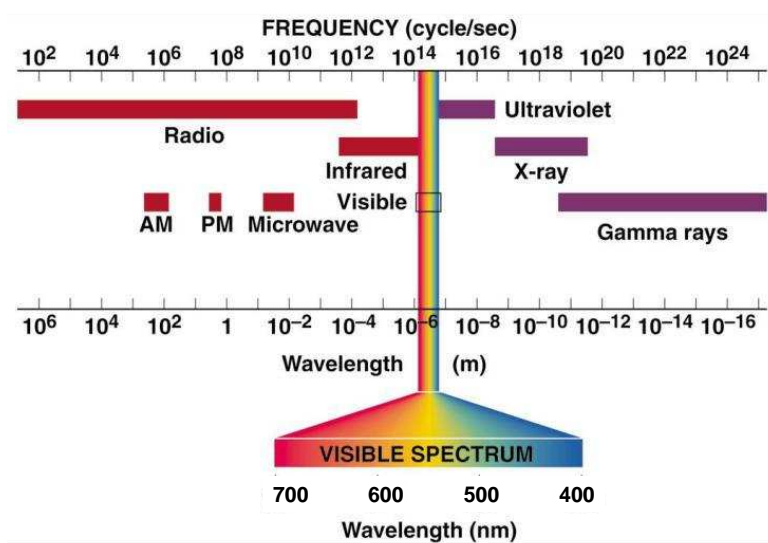
$h$  é a constante de Planck  
 $c$  a velocidade da luz no vácuo  
 $\lambda$  é o comprimento de onda do fóton  
 $\nu$  é a frequência do fóton



$$\text{a) } E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} > E_g$$

$$\text{b) } E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} < E_g$$

## Espectro Eletromagnético



10

## Radiometria e Fotometria

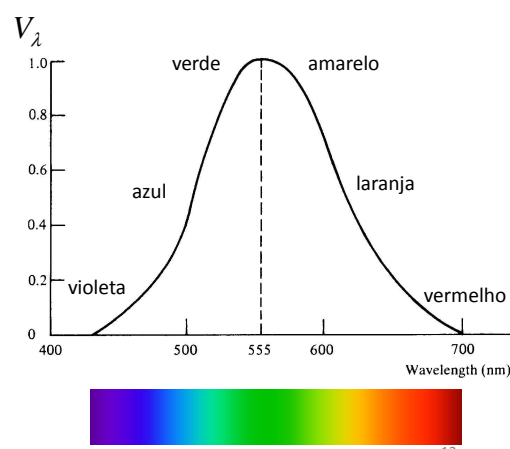
- Radiometria refere-se a medida da energia eletromagnética. Os termos de radiometria aplicam-se em qualquer parte do espectro eletromagnético.
- Fotometria refere-se a parte do espectro visível. Fotometria leva em conta a eficiência visual da luz pelo olho humano

11

### Curva de eficiência luminosa relativa

- Radiometria aplica-se a todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético
- Fotometria aplica-se apenas a porção do espectro visível

$$P_V = P_R V_\lambda$$



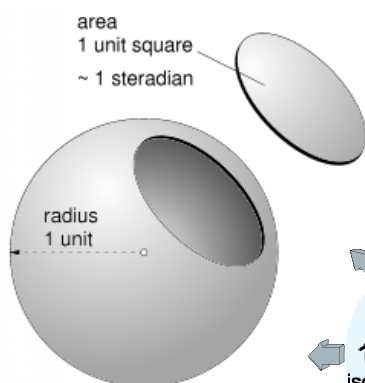
12

## Unidades radiométricas e fotométricas

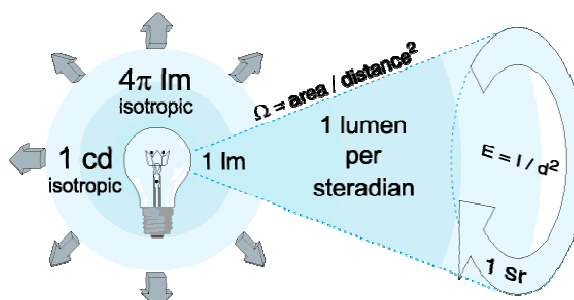
Symbol (SI units)	Radiometric	Fotometric	Definition
$Q$	Radiant energy [J]	Luminous energy [Talbot]	
$P, \Phi$	Radiant power or flux [W]	Luminous power or flux [lm]	$\Phi = dQ / dt$
$E$	Irradiance [ $\text{W m}^{-2}$ ]	Illuminance [ $\text{lm m}^{-2}$ ]	Power per unit area
$I$	Radiant intensit [ $\text{W sr}^{-1}$ ]	Luminous intensity [ $\text{lm sr}^{-1}$ ]	Power per unit solid angle
$L$	Radiance [ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ]	Luminance [ $\text{lm m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ]	Radiant/luminous intensity per unit projected area in a given direction

13

### Ângulo sólido Steradian (sr)



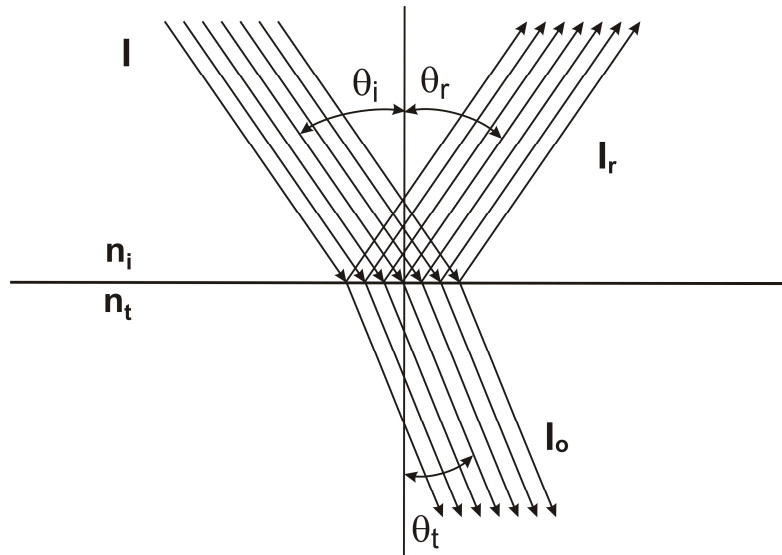
### Intensidade radiante



14

Fonte: [http://www.schorsch.com/kbase/glossary/solid\\_angle.html](http://www.schorsch.com/kbase/glossary/solid_angle.html)

## Reflexão, refração e retransmissão



15

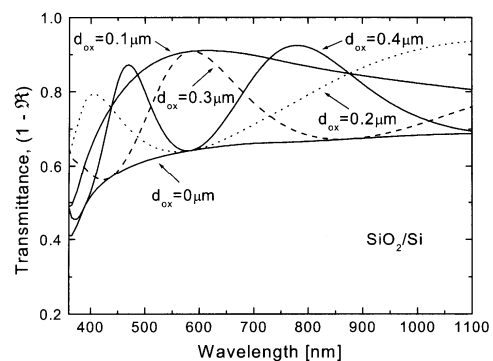
### Refletância $\mathfrak{R}$

$$I_0 = I - I_r$$

A refletância da interface determina a quantidade da intensidade transmitida, que efetivamente penetra na mídia:

$$I_0 = (1 - \mathfrak{R})I$$

Transmitância  $(1 - \mathfrak{R})$  da interface Si-ar para diferentes espessuras da camada do óxido



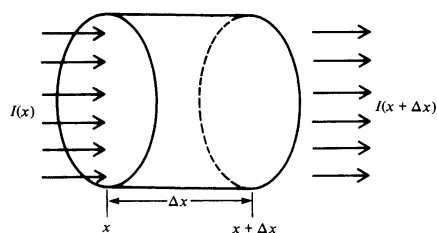
16

Fonte: D.W. de Lima Monteiro, CMOS-based integrated wavefront sensor, Ph.D. Thesis TU Delft, 2002



## Absorção

A absorção de fótons refere-se a atenuação de sua energia por um processo de conversão para outras formas de energia.



Consideramos aqui que a irradiação monocromática transmitida é:  $I(x) = I_0$

$$\Delta I(x) = I(x + \Delta x) - I(x)$$

$$\Delta I(x) = -\alpha I(x) \Delta x$$

$\alpha$  é o coeficiente de absorção

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} = -\alpha I(x)$$

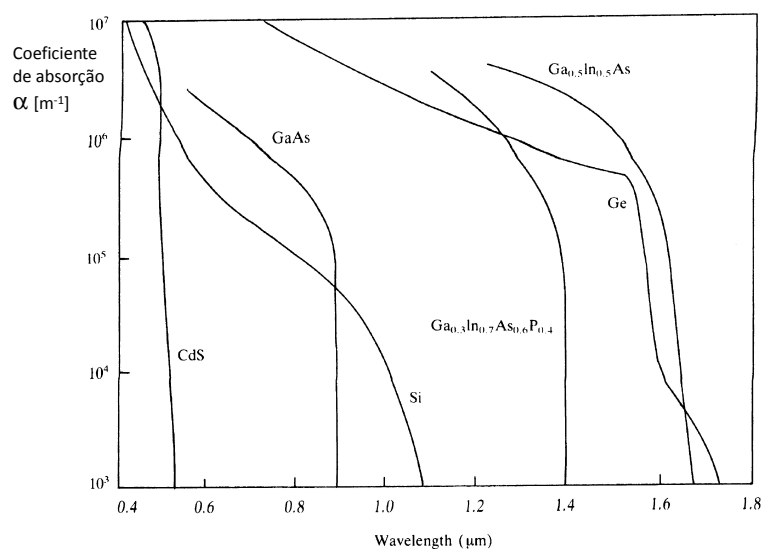
Integrando esta equação diferencial temos:

**Beer's law:**

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$$

17

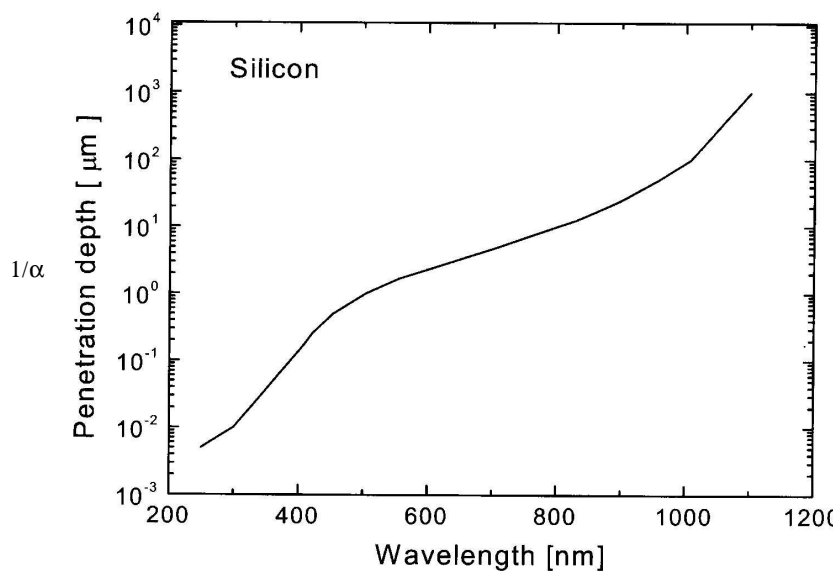
## Variação do coeficiente de absorção $\alpha$ com $\lambda$ para diferentes semicondutores



18

Fonte: J. Wilson and J. Hawkes, Optoelectronics, Prentice Hall

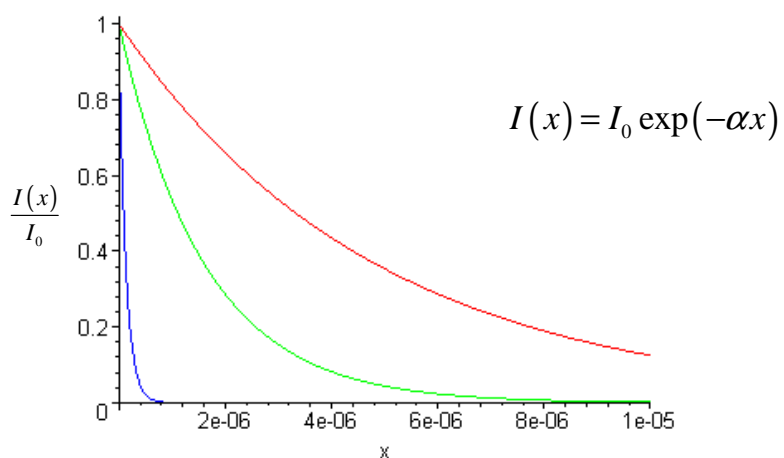
### Coeficiente de penetração no Si



Fonte: D.W. de Lima Monteiro, CMOS-based integrated wavefront sensor, Ph.D. Thesis TU Delft, 2002

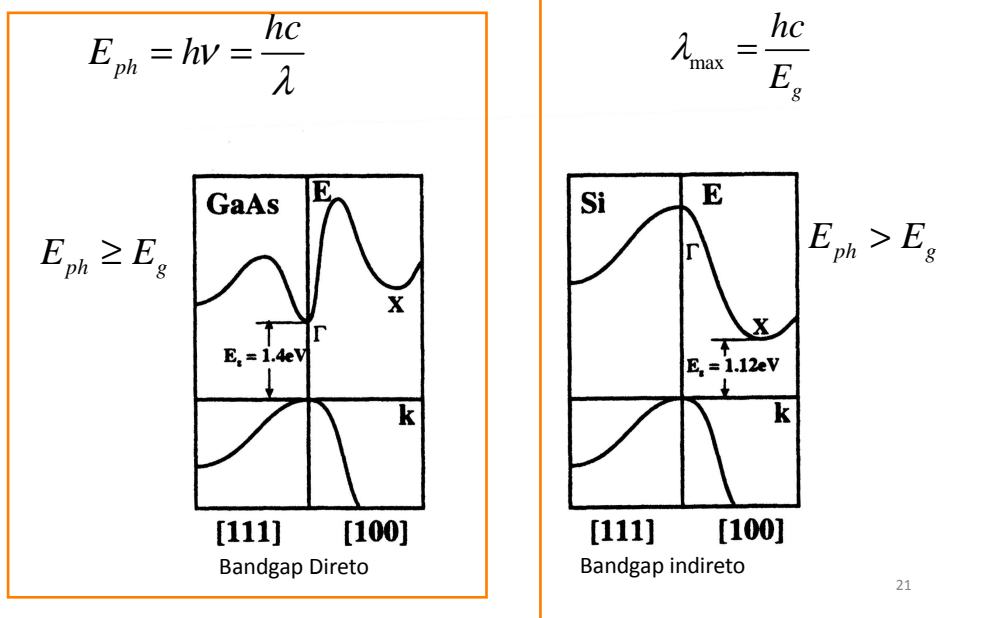
19

### Absorção da intensidade radiante em função da profundidade no Si



20

## Geração



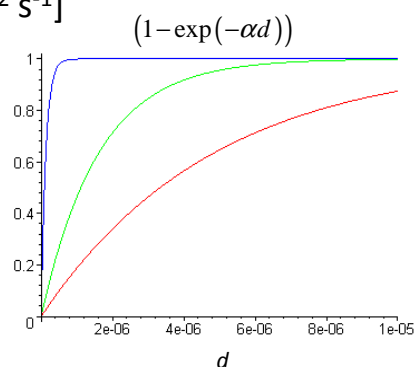
## Geração

A quantidade de portadores gerados, a partir da superfície até uma determinada profundidade ( $d$ ), devido a uma irradiação monocromática  $E_0$  com  $\lambda < \lambda_{\max}$  sendo transmitida através de um semiconductor, pode ser calculada da seguinte forma:

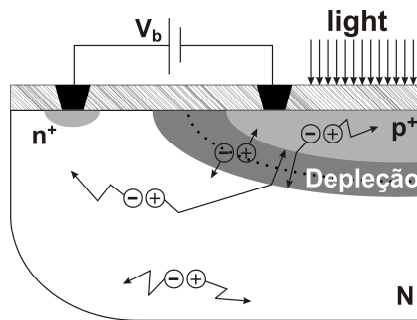
$$r_g = \eta_i \frac{E_0 \lambda}{hc} (1 - \exp(-\alpha d)) \quad [\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}]$$

$\eta_i$  eficiência quântica interna  
 - Conversão térmica  
 - Bandgap indireto

	$\eta_i^{\max}$
Si	40%
GaAs	70%



## Portadores fotogerados em diferentes regiões de uma estrutura p-n



Os portadores fotogerados podem:

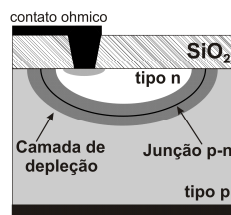
- Recombinar imediatamente
- Recombinar depois de algum tempo
- Separar imediatamente pela ação de um campo elétrico

23

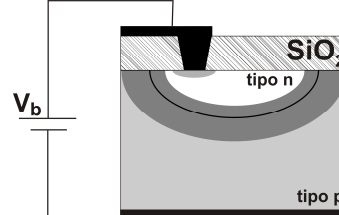
Fonte: D.W. de Lima Monteiro, CMOS-based integrated wavefront sensor, Ph.D. Thesis TU Delft, 2002

## Camada de depleção - junção pn

Junção pn sem polarização



Junção pn com polarização reversa



$$W_d = \left( \frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}\phi}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

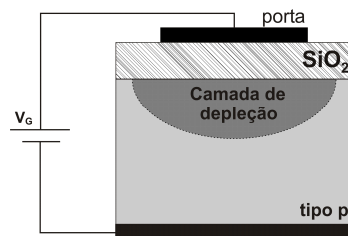
$$W_d = \left( \frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (\phi + V_b) \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\phi = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

24

Fonte: D.W. de Lima Monteiro, CMOS-based integrated wavefront sensor, Ph.D. Thesis TU Delft, 2002

## Camada de depleção - MOS



$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_A} \phi_s}$$

$\phi_s$  é o potencial na superfície do semiconductor

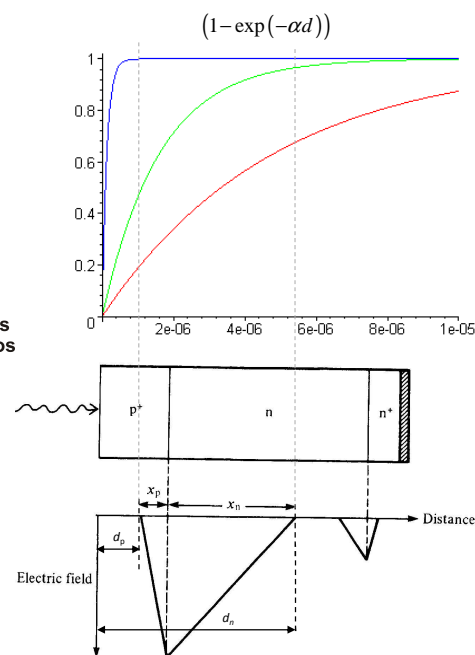
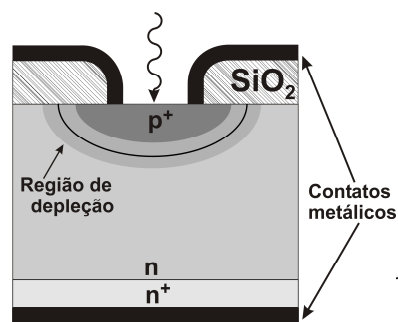
$$V_G = \frac{\sqrt{2\epsilon N_A \phi_s}}{C_{ox}} + \phi_s$$

Cria-se um “poço potencial”, onde elétrons gerados fotonicamente serão armazenados e posteriormente transferidos. Este é o princípio de funcionamento de um Charge-Couple-Device (CCD).

25

Fonte: D.W. de Lima Monteiro, CMOS-based integrated wavefront sensor, Ph.D. Thesis TU Delft, 2002

## Fotodiodo



Fonte: J. Wilson and J. Hawkes, Optoelectronics, Prentice Hall

## Fotodiodo em modo fotocondutivo

Quando uma junção semicondutora é polarizada reversamente e uma fonte de luz monocromática, com  $E_{ph} > E_g$ , incide sobre sua superfície, tem-se um acréscimo na corrente de polarização reversa, sendo:

$$i_\lambda = \frac{\eta EAq\lambda}{hc} \quad \eta = (1 - \mathfrak{R})\eta_i (e^{-\alpha d_p} - e^{-\alpha d_n})$$

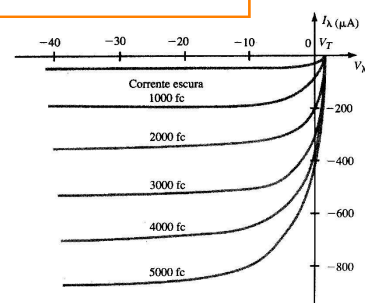
$E$  é a irradiação luminosa incidente

$A$  a área incidente

$q$  a carga do portador

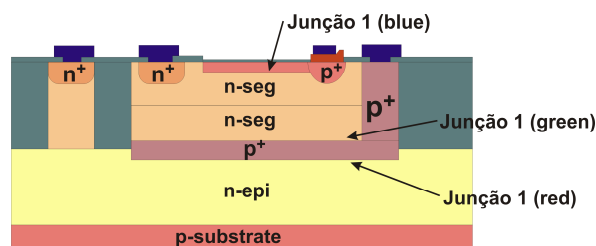
$\eta$  a eficiência quântica total

$\lambda$  o comprimento de onda da luz incidente



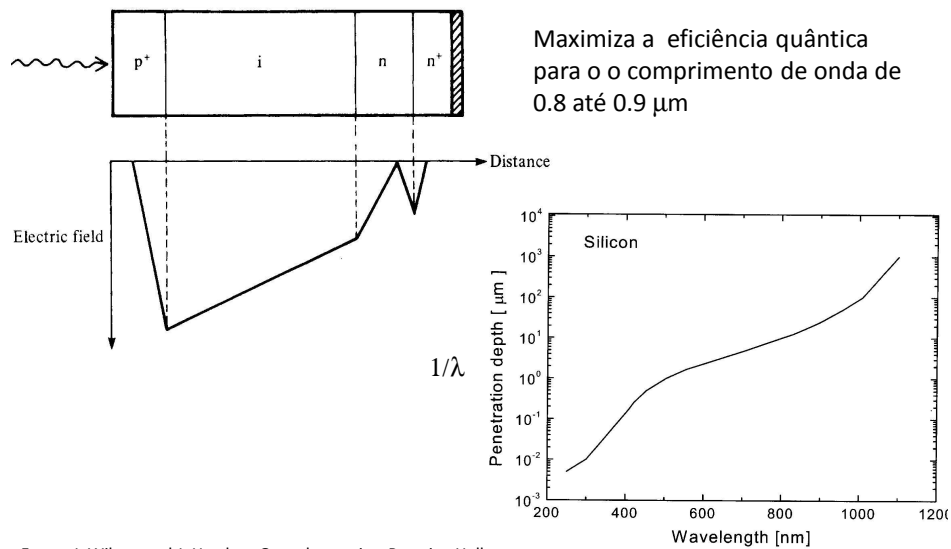
## Detectores coloridos

- Modulação da camada de depleção
- Filtros coloridos
- Junções empilhadas

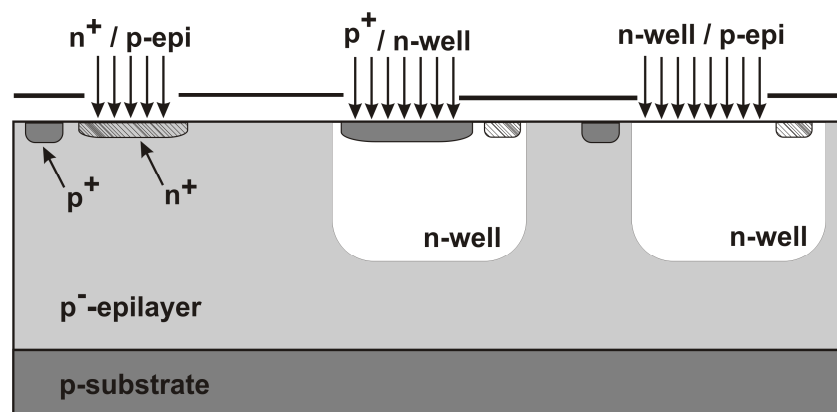


Ref: P. French and S. Middelhoeke, Sensors, TUDelft

## Fotodiodo p-i-n

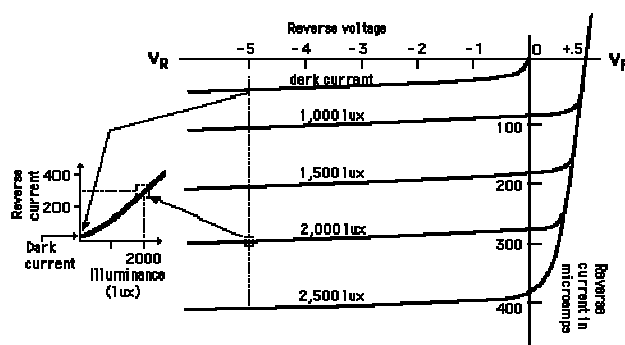


## Fotodiodos em um processo CMOS poço n



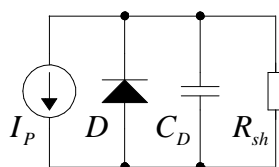
30  
Fonte: D.W. de Lima Monteiro, CMOS-based integrated wavefront sensor, Ph.D. Thesis TU Delft, 2002

## Característica I-V de uma junção pn



Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/ietron/pdio4.gif>

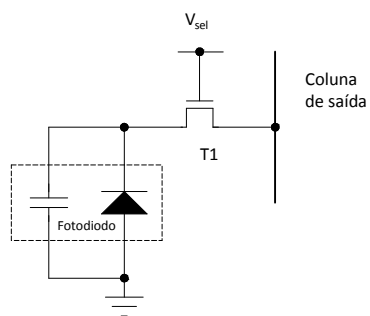
## Modelo Eletrônico do fotodiodo



- $I_p$  é a corrente fotogerada
- $R_{sh}$  é a resistência paralela
- $C_D$  é a capacitância de depleção do diodo em condição de polarização reversa



## Pixel Passivo

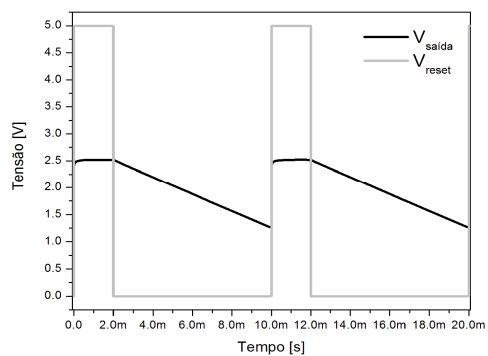
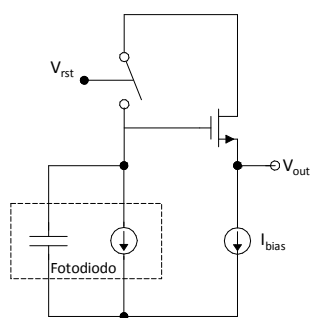


Fonte:

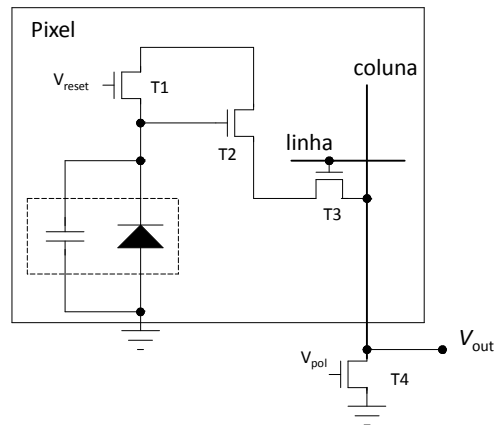
G. P. Weckler. Operation of p-n junction photodetectors in a photon flux integration mode. IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-2, 65–73, 1967.

D. W. de Lima Monteiro. CMOS Integrated Wavefront Sensor. DUP Science, 2002

## Pixel ativo – circuito conceitual



## Pixel ativo



Fotodiodo  
Transistor de Reset (T1)  
Seguidor de fonte (T2)  
Seletor de linha (T3)

A fonte de corrente T4  
não faz parte do pixel

Fonte:

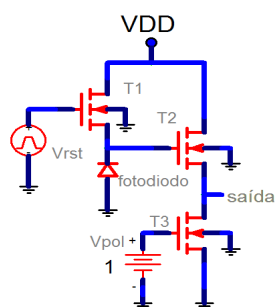
P. Noble. Self-scanned image detector arrays. IEEE Trans. Electron Devices, 15, 1968.

F. S. Campos. Sistemas de Imagem CMOS com Alta Responsividade e Elevada Faixa Dinâmica. Tese de Doutorado, FEEC, UNICAMP (2008).

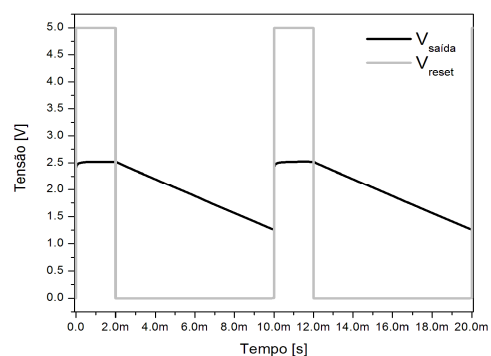
## Realizações

- APS em tecnologia NMOS porta metálica do CCS-UNICAMP

Projeto:

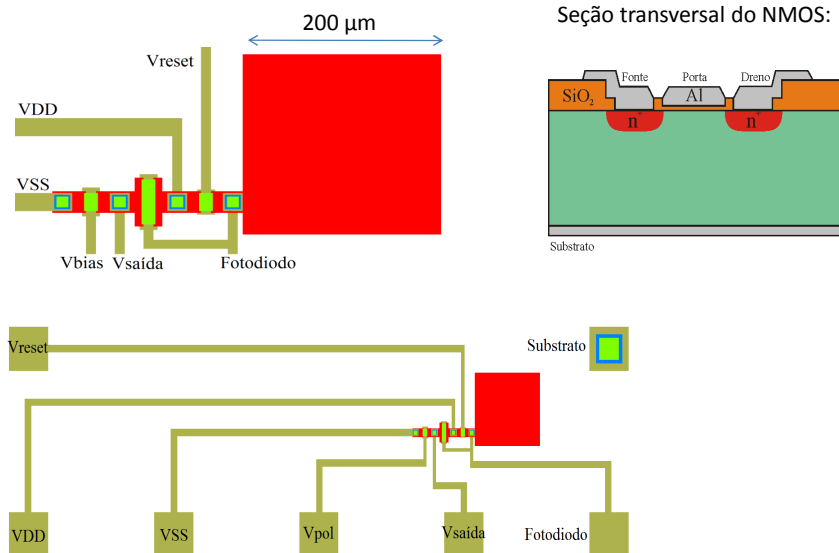


Simulação:



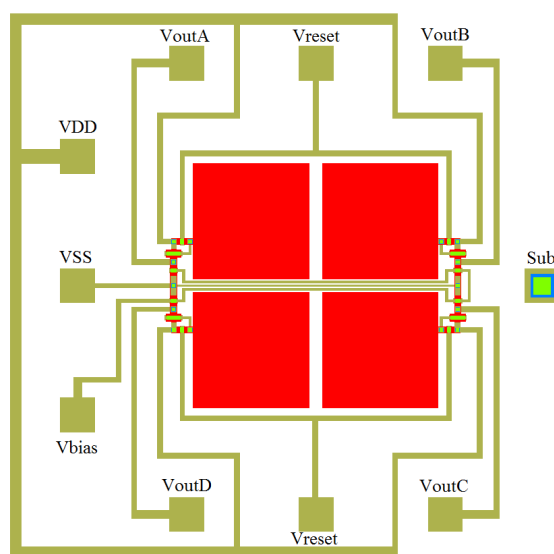
Fonte: André Furtado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Dissertação de mestrado, FEEC, UNICAMP, 2009

## Layout do APS



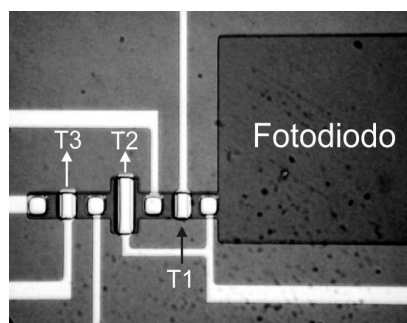
Fonte: André Furtado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Dissertação de mestrado, FEEC, UNICAMP, 2009

## Layout do FPA 2×2



Fonte: André Furtado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Dissertação de mestrado, FEEC, UNICAMP, 2009

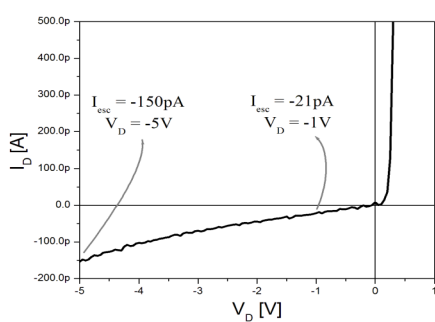
## Resultados experimentais fabricação do APS



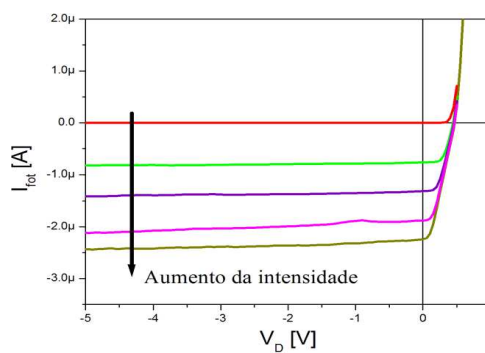
Fonte: André Furtado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Dissertação de mestrado, FEEC, UNICAMP, 2009

## Resultados experimentais Fotodiodo

Corrente de escuro:

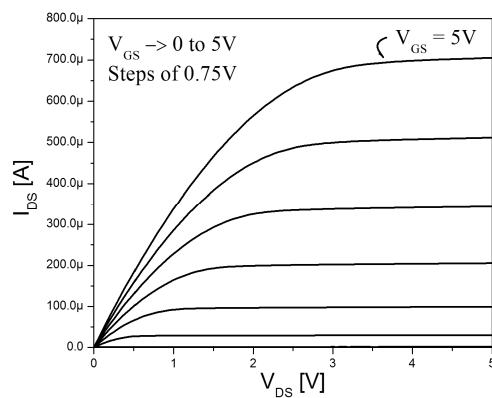


Fotocorrente:



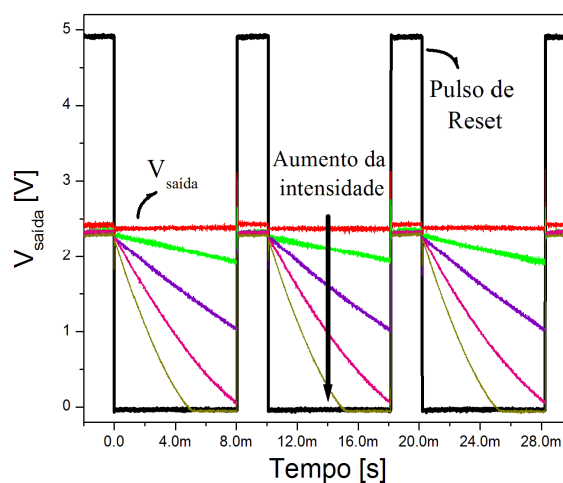
Fonte: André Furtado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Dissertação de mestrado, FEEC, UNICAMP, 2009

## Transistor NMOS porta metálica



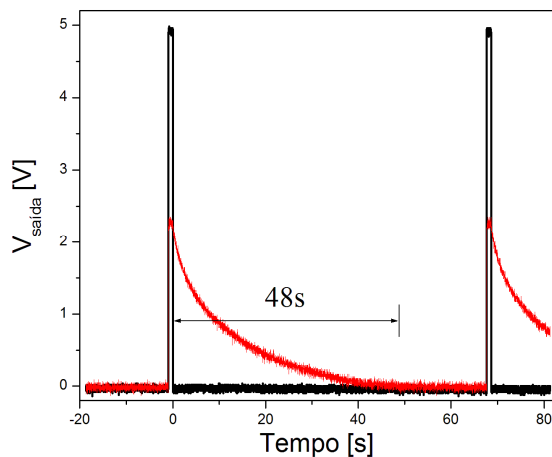
Fonte: André Furtado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Dissertação de mestrado, FEEC, UNICAMP, 2009

## APS



Fonte: André Furtado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Dissertação de mestrado, FEEC, UNICAMP, 2009

## APS – corrente de escuro



Fonte: André Furtado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Dissertação de mestrado, FEEC, UNICAMP, 2009

## Referências Bibliográficas

- André Santos de Oliveira Furtado, Dissertação de Mestrado, Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica, Unicamp, FEEC, dezembro 2009
- J. Wilson and J. Hawkes, Optoelectronics, Prentice Hall, ISBN 0-13-103961-X
- S. Middelhoek, S. A. Audet and P. J. French, "Silicon Sensors", Delf University of Technology, 2000

FIM