

## **Sensor de Imagem CMOS Logarítmico com Ampla Faixa de Excursão de Sinal**

**Fernando de Souza Campos<sup>1</sup>**

**Mário Eduardo Bordon<sup>2</sup>**

**Marcelo Macchi da Silva<sup>3</sup>**

**Jacobus W. Swart<sup>4</sup>**

### **Resumo:**

Este artigo apresenta um sensor de imagem CMOS logarítmico com ampla faixa de oscilação de tensão de saída. O método proposto para aumentar o número de transistores em série de sensor de imagem CMOS logarítmico, a fim de aumentar a sua faixa de variação de tensão de saída muito pequena. Nossos resultados mostram que a faixa de variação de tensão de saída aumenta proporcionalmente ao número de transistores usados em série. Um protótipo foi fabricado em processo óptico AMS de 0,35  $\mu\text{m}$ . Nossos pixels foram fabricados usando fotodiodos  $N_{\text{wel}} / P_{\text{sub}}$  de  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  com um, dois, três e quatro transistores em série. Eles mostram sensibilidade de 136mV / Dec, 191mV / Dec e 281mV / Dec usando um, dois e três transistores em série, respectivamente. Uma gama total de oscilação de tensão de saída de 2,65V é conseguida usando quatro transistores em série operando na faixa dinâmica de 120dB e tensão de alimentação de 3,3V. Nossa análise indica que, para o nosso protótipo, um máximo de cinco transistores em série deve ser implementado para alcançar a máxima faixa de variação de tensão de saída.

Palavras-chave — sensor de imagem; CMOS, pixel logarítmico; faixa de excursão de saída

1 Electrical Engineering Department, FEB – UNESP Bauru, Brazil, fcampos@feb.unesp.br

2 Electrical Engineering Department, FEB – UNESP Bauru, Brazil, mbordon@feb.unesp.br

3 Computer and Electrical Engineering Department, UNICAMP, Campinas, Brazil

4 Computer and Electrical Engineering Department, UNICAMP, Campinas, Brazil, jacobus@fee.unicamp.br

## 1 Introduction

Várias áreas, tais como vigilância, robótica, multimídia e biomedicina têm vindo a utilizar sensores CMOS [1 - 6]. Os sensores de imagem CMOS são particularmente atraentes devido a sua alta capacidade de nível de integração com alto nível de processamento. Além disso, o alto alcance dinâmico é uma das vantagens mais importantes dos sensores de imagem CMOS sobre CCDs. Enquanto CCDs fornece cerca de 60dB de faixa dinâmica, sensores de imagem CMOS pode fornecer mais de 100dB de faixa dinâmica.

Várias arquiteturas diferentes de sensores de imagem CMOS com alto alcance dinâmico usando sensores CMOS lineares têm sido propostas na literatura [7-12]. Essas arquiteturas de sensores CMOS são capazes de alcançar imagens com faixa dinâmica de 100dB ou até mais. No entanto, eles apresentam como inconvenientes baixo fator de preenchimento e alto padrão de ruído padrão (FPN). Quase todos eles não incorporam qualquer FPN redução circuitos.

Um sensor CMOS importante com alto alcance dinâmico (> 120dB) é o sensor CMOS logarítmico. Ele mostra como vantagem maior fator de preenchimento, maior eficiência quântica e resposta logarítmica semelhante à resposta do olho humano [13 - 15]. No entanto, o sensor de imagem CMOS logarítmico tem desvantagens importantes como balanço de tensão pequeno que degrada o nível de SNR e FPN grande.

Recentemente sensores CMOS linear-logarítmicos têm sido propostos como sensores de imagem CMOS com alta faixa dinâmica [16]. A fotorresposta combinada linear e logarítmica permitem obter uma gama dinâmica elevada. No entanto, com maior intensidade de luz, o sensor de imagem proposto opera no intervalo logarítmico, a tensão de saída tem uma gama de oscilação de tensão de saída curta. Portanto, quando o sensor está operando na faixa logarítmica com pequena faixa de tensão de saída, o sinal de saída ainda está presente como ruído de sinal, além de uma representação pobre da imagem com um pequeno número de bits ao longo de uma década ou mais.

Neste trabalho apresentamos a análise de transistores em cascata em série no sensor de imagem CMOS logarítmico como um método para obter sensores de imagem CMOS logarítmicos com maior oscilação de tensão. Embora em [16] dois transistores em cascata sejam usados para aumentar a sensibilidade, o efeito de aumentar o número de transistores em séries de sensores de imagem CMOS logarítmicos ainda não está muito bem caracterizado na literatura. A nossa caracterização indica que é possível aumentar significativamente a gama total de swing de saída implementando ADCs com resolução mais alta. Uma desvantagem desta abordagem é reduzir o factor de enchimento.

## 2 Conceitos Básicos

A Figura 1 mostra o pixel logarítmico convencional composto por um fotodiodo e um transistor ligado como diodo.

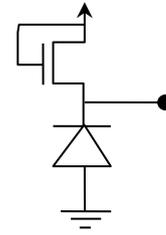


Figure 1: Conventional logarithmic CMOS sensor

Assumindo que a fotocorrente que flui através do transistor é pequena, o transistor opera com inversão fraca e a tensão de saída é dada por:

$$V_{out} = V_{DD} - nV_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (1)$$

onde  $n$  é o fator de idealidade,  $V_T$  é a tensão térmica constante,  $I_{ph}$  é a fotocorrente,  $I_0$  é uma constante.

Para aumentar a sensibilidade, dois ou mais transistores podem ser conectados em série, como mostrado na Figura 2. Supondo que haja  $N$  transistores em série, a tensão de saída é dada agora por

$$V_{out} = V_{DD} - NnV_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (2)$$

onde  $N$  é o número de transistores em série. Para este caso, a saída varia  $N$  vezes a variação usando apenas um transistor como no sensor CMOS logarítmico convencional.

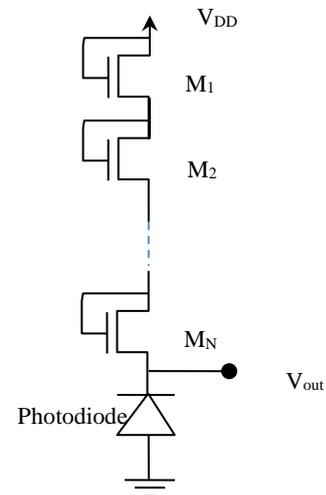
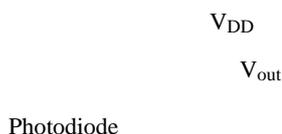


Figure 2: Sensor de imagem CMOS logarítmico proposto

## 3 Resultados de Simulação

Para verificar a proposta, realizamos simulações usando um kit de desenho de  $0,35 \mu\text{m}$  em uma ferramenta de simulação Pyxis da Mentor Graphics. Três pixels diferentes foram simulados usando um, dois e três transistores em série. A Figura 3 mostra a resposta dos três pixels diferentes. Nosso resultado de simulação mostra que a variação do pixel de saída aumenta à medida que o número de transistores em série aumenta,



de acordo com as explicações da seção anterior.

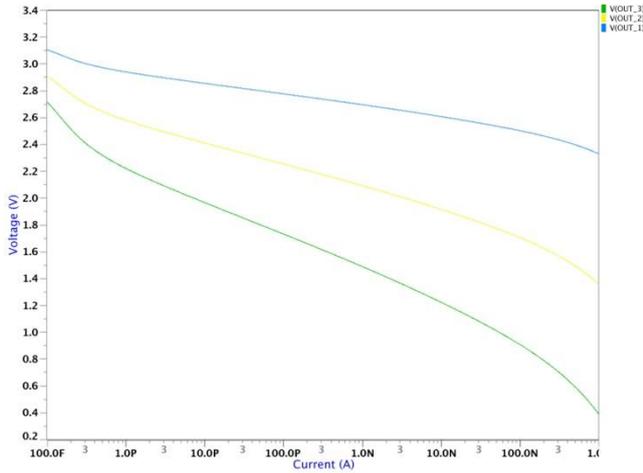
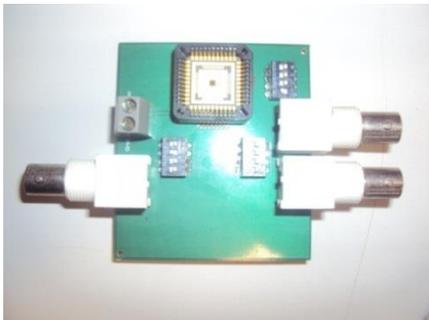


Figure 3: Tensão de saída do sensor logarítmico CMOS em função da fotocorrente utilizando um, dois e três transistores em série.

De acordo com nossas simulações, o pixel de saída apresenta resposta logarítmica para fotocorrentes de 1pA a 100nA. Para correntes acima de 100nA, a curva não é mais logarítmica indicando que os transistores em série começam a operar na região de inversão moderada em direção a forte. Além disso, é possível observar que para fotocorrentes abaixo de 1pA o nível de corrente escura aumenta de acordo com o número do transistor aumenta.

#### 4 Resultados Experimentais

O IC foi fabricado num processo opto de tecnologia de 0,35  $\mu\text{m}$  de Austriamicrosystems (Figura 4 (a)). Quatro diferentes pixels foram integrados com um, dois, três e quatro transistores em série. Todos os quatro pixels foram projetados com um fotodiodo Nwell / Psub de 20  $\mu\text{m}$ . O IC foi iluminado por uma fonte de luz controlada de Spectra Physics através de um filtro de 650 nm (Figura 4 (b)). A intensidade da luz foi medida por um medidor óptico de energia Orion (Figura 4 (c)).



(a)



(b)

Figure 4: Montagem experimental (a) placa de circuito impresso com o CI fabricado (b) fonte de luz e a fonte de alimentação da lâmpada controladora de potência.

A Figura 5 mostra a resposta de pixels ( $V_{out} \times \text{Light Intensity}$ ) medidos dos pixels com um, dois, três e quatro transistores em série. Como se pode ver, a tensão de saída diminui à medida que aumenta o número de transistores em série. A partir das medições da Figura 5, a Tabela I resume a sensibilidade  $V / \text{dec}$  e a constante  $nV_T$  para cada pixel. A sensibilidade aumenta em quatro comparando a sensibilidade para  $N = 1$  e  $N = 4$ . No entanto, a sensibilidade também não pode aumentar exatamente pelo número de transistores em série, como se pode ver comparando a sensibilidade  $N = 1$ ,  $N = 2$  e  $N = 3$ . Para  $N = 2$  e  $N = 3$  o aumento de sensibilidade mas não exatamente o valor teórico esperado. Estas discrepâncias podem ser devidas ao fator de idealidade  $n$  que pode mudar de transistor para transistor.

A gama total de oscilação de saída também aumenta com o número de transistores em série como mostrado na Tabela II. Para  $N = 4$  uma operação com 120dB resulta em uma faixa de oscilação de saída de 2.65V. Sabendo que para esta tecnologia a tensão de alimentação é de 3,3V, podemos concluir que o número máximo de transistores em série pode ser cerca de 5 transistores.

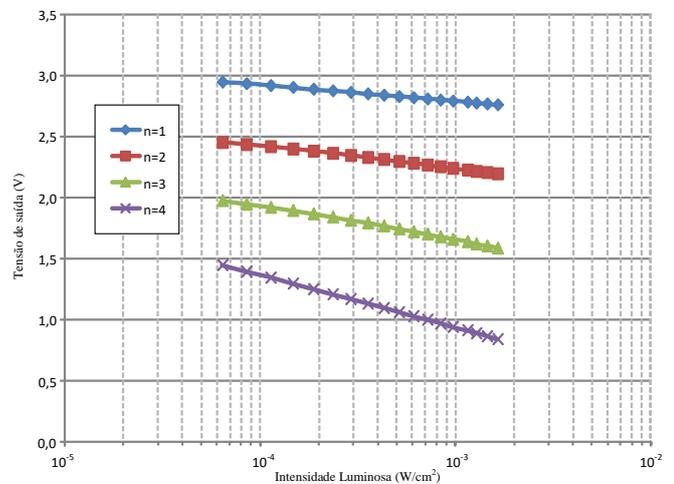


Figure 5: Fotoresposta dos pixels com diferentes números de transistores em série ( $n$ ).

Table I: Resumo dos Resultados

Número de transistores em série	Taxa de variação em escala	Taxa de variação em	Tensão Térmica a $nV_T$

	log (mV/Dec)	escala ln (mv/Dec)	
N=1	136 mV/Dec	59mV/Dec	59mV
N=2	191mV/Dec	82.9mV/Dec	41.4mV
N=3	281mV/Dec	122mV/Dec	40.6mV
N=4	425mV/Dec	184,5mV/Dec	61mV

Tabela II: Faixa de Excursão de Tensão Total para operação com faixa dinâmica de 120dB (6 décadas) e LSB requerido de um ADC de 12 bits.

Número de transistores em série	Faixa de Excursão de Tensão Total em 6 décadas	LSB requerido de um ADC de 12 bits
N=1	816mV	199 $\mu$ V
N=2	1.15VV	280 $\mu$ V
N=3	1.69V	412 $\mu$ V
N=4	2.65V	647 $\mu$ V

A Tabela II também mostra o bit menos significativo (LSB) para cada pixel se for utilizado um ADC de 12 bits típico. Para  $N = 1$  a  $N = 4$  o LSB para um ADC de 12 bits varia de 199 $\mu$ V a 647 $\mu$ V aumentando em 3 vezes. Portanto, usando múltiplos transistores em série é possível usar um ADC com maior resolução em comparação com o pixel logarítmico convencional.

## 5 Conclusões

Foi apresentada a caracterização de sensores de imagem CMOS com logaritmos com múltiplos transistores em série. Como esperado, aumentando o número de transistores a faixa de variação de tensão de saída também aumenta. Para usar quatro transistores em série, a faixa de variação de tensão de saída total é de 2,65V para uma operação com 129dB de faixa dinâmica enquanto que para usar apenas um transistor a faixa de variação de tensão de saída total é de apenas 816mV. No entanto, nossa análise indicou que há um número máximo de transistores em série do que pode ser usado. Para o nosso protótipo que a fonte de alimentação é 3.3V um máximo de cinco transistores deve ser usado para alcançar simultaneamente a tensão de saída máxima gama de swing e gama dinâmica elevada (120dB). À medida que a gama total de oscilação de saída aumenta, uma resolução de ADCs de resolução mais alta pode ser implementada para uma melhor qualidade de imagem. Além disso, a SNR pode ser maior. No entanto, a investigação a seguir incidirá sobre a análise SNR e medições, a fim de verificar a sua característica.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPESP pelo financiamento deste trabalho. Além disso, gostaríamos de agradecer ao Prof. Dr. José Humberto por seu auxílio laboratorial.

## REFERÊNCIAS

- [1] Y. Ardeshirpour, M.J. Deen, and S. Shirani, "Two-dimensional CMOS-based image sensor system for fluorescent detection". Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 29, pp. 231-235, september 2004.
- [2] N. Faramarzpour, M. J. Deen, and S. Shirani, "An approach to improve the signal-to-noise ratio of active pixel sensor for low-light level applications." IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 53, pp. 2384-2391, September 2006.
- [3] N. Faramarzpour, M. J. Deen, S. Shirani, Q. Fang, L. W. C. Liu, F. S. Campos, J. W. Swart, "CMOS-Based Active Pixel for Low-Light-Level Detection: Analysis and Measurements." IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 54, pp. 3229-3237, December 2007.
- [4] E. Fossum, "CMOS Image Sensors: Electronic Camera-on-Chip. IEEE Transactions Electron Devices." vol. 44, pp. 1689-1698, October 1997.
- [5] B. J. Hosticka, W. Brockherde, A. Bussmann, T. Heimann, R. Jeremias, A. Kemma, C. Nitta, and O. Schrey, "CMOS Imaging for Automotive Applications." IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 50, pp. 173-183, January 2003.
- [6] R. Sandage, and J. Connelly, "A Fingerprint Opto-Detector Using Lateral Bipolar Phototransistor in a Standard CMOS Process." In IEDM Digest of Technical Paper, pp. 171-174, December 1995
- [7] D. Stoppa, A. Simoni, L. Gonzo, M. Gottardi, and G.-F. D. Betta, "A 138 dB Dynamic Range CMOS Imager Sensor with New Pixel Architecture." In Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference, Digest of Technical Papers, vol. 1, pp. 440-442, February 2002.
- [8] J.-L. Trepanier, M. Sawan, Y. Audet, and J. Coulombe, "A Wide Dynamic Range CMOS Digital Pixel Sensor." In Proceedings of the 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems, vol 2, pp. 437-440, August 2002.