

Efeitos de TID em Parâmetros de Amplificador Operacional CMOS

Peterson R. Agostinho^{1,2}, Odair L. Gonzalez¹, Dirceu A. Souza^{1,2}, Rafael G. Vaz¹, Osamu Saotome²

1 – Instituto de Pesquisas Avançadas
2 – Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Resumo — Neste trabalho são apresentados os resultados do estudo dos efeitos da radiação ionizante em um amplificador operacional desenvolvido no país em tecnologia CMOS 0.35 μ m. As medidas foram realizadas com o chip polarizado e operacional durante todo o experimento, sob o efeito da radiação gama de uma fonte de ⁶⁰Co, com taxa de dose de 0.5rad/s, por um período de 10 dias, resultando em uma dose acumulada de 500 krad no silício. Parâmetros, como consumo de corrente, resposta ao degrau, distorção harmônica e resposta em frequência, apresentaram variações pouco significativas, o que qualifica o componente como robusto à radiação ionizante para aplicações espaciais em missões de baixa órbita (LEO).

Palavras-Chave — Amplificador Operacional, TID, radiação ionizante, CMOS.

I. INTRODUÇÃO

Componentes eletrônicos, quando empregados em veículos espaciais, estão sujeitos a condições ambientais adversas, dentre elas a contínua exposição à radiação ionizante de origem cósmica. Para a garantia de sua durabilidade no tempo previsto para a missão espacial o componente a ser empregado deve ser qualificado quanto à sua resposta e tolerância à dose radiação ionizante acumulada no ambiente espacial. Esta qualificação é realizada em testes laboratoriais em solo empregando fontes de radiação ionizante. No presente trabalho é apresentada a qualificação de um amplificador operacional (amp-op) desenvolvido no país quanto à sua tolerância aos efeitos acumulados de dose de radiação ionizante, conhecido na literatura internacional por TID (*total ionizing dose*). O amp-op foi desenvolvido no país utilizando técnicas tradicionais de projeto, ou seja, não foram utilizados *layouts* especiais para aumentar a robustez do circuito à TID.

Os amplificadores operacionais estão entre os dispositivos eletrônicos mais utilizados atualmente, sendo parte de diversos sistemas utilizados em aplicações espaciais e nucleares, como por exemplo, placas de aquisição de sinais e *drivers* de potência, interfaces de comunicação.

Peterson Agostinho, peterson@miptech.com.br, Tel +55-12-3947-5393, Odair Golçalvez, odair@ieav.cta.br, Tel +55-12-3947-5501, Dirceu Souza, dirceu_adriano@hotmail.com, Tel +55-12-3947-5393, Rafael Vaz, rgalhardov@hotmail.com, Tel +55-12-3947-5393, Osamu Saotome, osaotome@ita.br, Tel +55-12-3947-5818.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPESP, através do Projeto Multi-Usuário, e pela FINEP, através do projeto PEICE.

Um estudo de desempenho de um amp-op em um ambiente radioativo assume, dessa forma, considerável importância para a sua qualificação para aplicações espaciais, dentre outros atributos de robustez requeridos para tal aplicação.

A tecnologia CMOS é muito atrativa para aplicações espaciais, em particular, devido a sua baixa dissipação de potência e ao contínuo avanço na redução de tamanho dos transistores, o que implica em baixo consumo de energia elétrica e menor peso. Dessa forma, à medida que a tecnologia CMOS avança, há um aumento crescente em explorar suas vantagens em aplicações espaciais.

Recentes resultados que caracterizam o efeito da dose total acumulada (TID) em vários processos CMOS convencionais mostram que há uma tendência de aumentar a tolerância à radiação à medida que o tamanho dos transistores diminui [1-5].

Neste trabalho são apresentados e analisados os efeitos de TID no amp-op irradiado nos seguintes parâmetros: consumo de corrente, distorção harmônica total, resposta ao degrau e resposta em frequência.

II. AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O amplificador operacional sob é do tipo *rail-to-rail* com baixa tensão de alimentação e baixo consumo de potência [6]. O esquema elétrico do amplificador operacional é apresentado na Fig. 1. O estágio de entrada utilizado é composto por dois circuitos *folded cascode* que são complementares entre si [7]. O primeiro compreende os transistores M1, M2, ME15-ME18 e o segundo os transistores M3, M4, ME11-ME14. Os transistores M5-M8 são chaves de corrente que realizam o controle da transcondutância g_m do estágio de entrada, mantendo o valor relativamente constante, com variação inferior a 10%. Os transistores ME19 e ME20 formam uma fonte de corrente flutuante para polarizar o circuito somador do estágio de entrada.

O estágio de saída do amp-op é do tipo Classe-AB com controle de corrente quiescente [8] e é formado pelos transistores MS1, MS2, MS5-MS10.

Os circuitos foram projetados em tecnologia CMOS 0.35 μ m – *foundry AMS*. As simulações foram realizadas utilizando o modelo Bsim3v3 e o software PSPICE. Para as etapas de layout, DRC e LVS foram utilizadas as facilidades da *Tanner*.

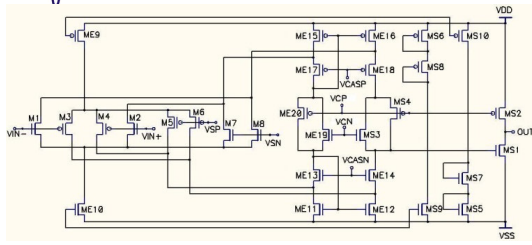


Fig. 1. Esquema elétrico do Amp-Op desenvolvido [6]

Para a caracterização do chip foi implementada uma placa de circuito impresso (PCI), conforme apresentado na Fig. 2. A PCI possui conectores BNC para conectar o amp-op com a instrumentação externa e 28 jumpers que permitem configurar uma variedade de testes, em malha aberta e fechada.



Fig. 2. Placa de Circuito Impresso de Teste

III. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ensaio de irradiação foi realizado no Laboratório de Radiação Ionizante (LRI) do IEAv utilizando uma fonte de radiação gama de ^{60}Co da *Atomic Energy of Canadian Limited*, modelo Eldorado 78.

O teste de qualificação para TID foi realizado a uma taxa de dose de 0,5rad/s, durante 10 dias, até a dose acumulada de 500krad no campo de radiação gama produzido por um irradiador de ^{60}Co no Laboratório de Radiação Ionizante (LRI) do Instituto de Estudos Avançados (CTA), em São José dos Campos, São Paulo.



Fig. 3. Fonte de radiação gama de ^{60}Co do Laboratório de Radiação Ionizante (LRI) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv)

Utilizou-se um arranjo experimental automatizado, através do software Agilent VEE, para controlar e aquisitar dados do experimento, conforme apresentado na Fig. 4.

Um gerador de tensão (Agilent 33250A) injeta sinais de entrada e os sinais de saída são coletados por um osciloscópio (Agilent DSO6054A). Um multímetro (Keithley Model 236) também é utilizado para monitorar o consumo de corrente do amp-op ao longo de todo o experimento.

O software de automação foi configurado para aquisitar dados a cada 20 minutos, durante um período contínuo de 10 dias. Para cada ciclo realizado, foram capturados dados para extrair os seguintes parâmetros: consumo de corrente, distorção harmônica total, resposta em frequência e resposta ao degrau. Os dados foram salvos em arquivos texto para posterior análise.

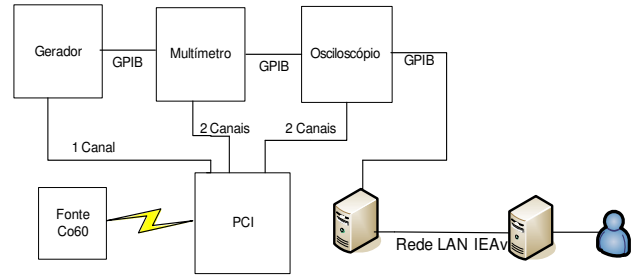


Fig. 4. Arranjo Experimental

IV. EFEITOS DE TID EM MOSFET

A tecnologia de circuitos CMOS tem dominado a indústria eletrônica por mais de 30 anos. O escalonamento que vem ocorrendo durante esse período já atingiu um valor superior a 100 e essas alterações afetam significativamente os efeitos de radiação nos dispositivos.

Os efeitos de dose total em dispositivos MOS ocorrem numa fina camada de óxido (SiO_2), que varia de 2nm (*gate* de tecnologias modernas) até 1000nm (óxido de campo). A sensibilidade dos dispositivos MOS em relação a TID depende de muitos fatores, envolvendo detalhes de projeto e de fabricação, bem como, das condições de exposição à radiação, taxa de dose, tipo de radiação, temperatura, condições de pós-irradiação, entre outras.

Historicamente, o efeito dominante da radiação em dispositivos MOS tem sido a variação na tensão de limiar do transistor, devido ao efeito de cargas capturadas no óxido. As cargas capturadas no oxido normalmente são positivas, enquanto as cargas capturadas na interface do óxido dependem do potencial de superfície e da natureza física responsável pela captura de interface [11].

O efeito eletrostático da carga capturada no óxido (q_{Not}) e da carga capturada na interface do óxido (q_{Nit}) pode ser descrita pela equação de Poisson.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{d^2V}{dx^2} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

onde E é o campo elétrico, V o potencial eletrostático, ρ é a densidade de carga e ϵ é a constante dielétrica do óxido.

No Silício, os portadores gerados pela radiação são transportados por difusão e deslocamento, sendo que, parte

destes recombinam-se. A fração que não é recombinada depende da concentração de portadores e do campo elétrico.

No óxido de silício, os elétrons deixam o óxido sob influência do campo elétrico. As lacunas resultantes movem-se lentamente por um processo que envolve os defeitos no óxido. Esses defeitos capturam as lacunas por certo período de tempo, que depende do nível de energia desse tipo de armadilhamento. Conforme [9] a densidade de lacunas capturadas é maior proximamente à interface Si/SiO₂.

Adicionalmente, a radiação ionizante cria estados de interface, que podem ser doadores (positivamente carregados quando vazios ou neutros quando ocupados por um elétron) ou receptores (neutros quando vazios e negativamente carregados quando ocupados por um elétron).

As cargas induzidas no óxido pela radiação afetam a tensão de limiar de acordo com a densidade de carga e sua localização:

$$\Delta V_T = -\frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_0^{x_{ox}} x \rho_{ox}(x) dx \quad (2)$$

onde V_T é a tensão de limiar, ρ_{ox} e ϵ_{ox} são a densidade de cargas e a constante dielétrica do óxido, respectivamente, e x_{ox} é a posição no óxido.

Se toda a carga estiver localizada na interface Si/SiO₂ o efeito é maximizado e a variação na tensão de limiar se torna

$$\Delta V_T = -\frac{Q_{int}}{C_{ox}} \quad (3)$$

onde Q_{int} é a quantidade total de cargas aprisionadas na superfície do óxido e C_{ox} é a capacitância da camada de óxido.

Embora as cargas sejam distribuídas ao longo do óxido, os detalhes da distribuição espacial não são bem conhecidos. É conveniente representar a distribuição de cargas no óxido pela densidade de carga equivalente projetada na interface do óxido, o qual é definida pela densidade de cargas capturadas Q_{ot} . A contribuição dessa carga na variação da tensão de limiar é [10]:

$$\Delta V_{ot} = -\frac{Q_{ot}}{C_{ox}} \quad (4)$$

A carga capturada na interface depende do potencial de superfície. O potencial de superfície no limiar é definido como a condição em que a concentração de portadores minoritários na superfície é igual a concentração de portadores majoritários no corpo. Para essa condição específica, a variação da tensão de limiar devida à carga capturada na interface é [10]:

$$\Delta V_{it} = -\frac{Q_{it}}{C_{ox}} \quad (5)$$

A variação na tensão de limiar do transistor é dada pela soma das duas contribuições [10]:

$$\Delta V_T = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} \quad (6)$$

A quantidade de cargas geradas no óxido pela radiação é proporcional a espessura do óxido. Adicionalmente, o efeito da carga capturada no óxido na tensão de limiar é proporcional ao quadrado da distância da carga até o eletrodo de *gate* [10].

$$\Delta V_T = -\frac{Q_{ot}}{C_{ox}} \propto x_{ox}^2 \quad (7)$$

Dessa forma, o óxido fino das tecnologias modernas é muito menos sensível à radiação ionizante que óxidos espessos de tecnologias mais antigas.

Outro parâmetro do transistor MOS que varia significativamente com a radiação ionizante, principalmente em tecnologias recentes, é a mobilidade do transistor. A variação da mobilidade ocorre devido ao espalhamento columbiano das cargas induzidas pela radiação. A efetividade das cargas no espalhamento depende da proximidade das cargas para a interface. A dependência entre a mobilidade e a densidade das cargas de interface é dada por [10]:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha_{it} N_{it} + \alpha_{ot} N_{ot}} \quad (8)$$

Onde α_{it} e α_{ot} são parâmetros que quantificam o efeito das armadilhas de interface e a carga capturada no óxido, respectivamente, com a mobilidade.

V. RESULTADOS E ANÁLISE

Nas Figs. 5, 6 e 7 são apresentados, respectivamente, o consumo de corrente, o *Slew-rate* (SR) e a Distorção Harmônica Total (THD) em função da dose de radiação acumulada durante o processo de irradiação do amp-op.

Conforme se pode observar na Fig. 5, o consumo de corrente ficou praticamente constante em 220µA ao longo de toda a irradiação, com variação aleatória inferior a 2%, indicando a dose de 500Krad está abaixo do limiar de efeitos de TID neste parâmetro [11].

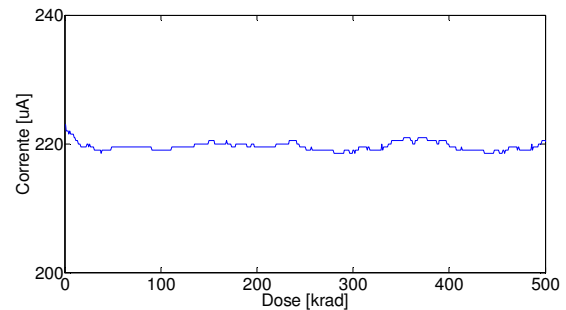


Fig. 5. Consumo de corrente em função da dose acumulada

Para o *Slew-rate*, conforme apresentado na Fig. 6, observa-se um valor aproximadamente constante de $5 \pm 10\%$ V/µs ao longo de todo o experimento, valor este não diferente do que foi medido prévia e posteriormente à irradiação.

A variação observada nesse parâmetro é aleatória, não existindo, portanto, qualquer correlação com a dose acumulada até 500Krad. Esse desvio pode ser atribuído ao método de

medida, uma vez que o valor do *slew-rate* é retirado de dois pontos arbitrariamente pré-estabelecidos na curva de resposta ao degrau do amp-op.

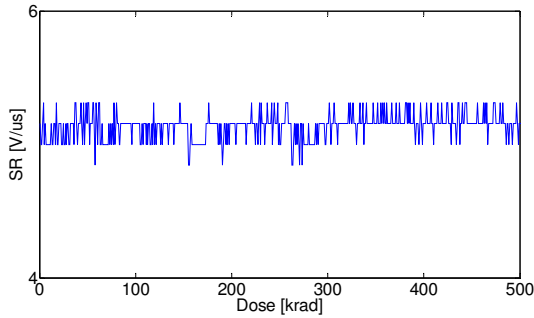


Fig. 6. Slew-rate em função da dose acumulada

A distorção harmônica total (THD) ficou em torno de 0.42%, conforme mostrado na Fig. 7, apresentando apenas uma sutil tendência de crescimento com o aumento da dose acumulada até 500Krad.

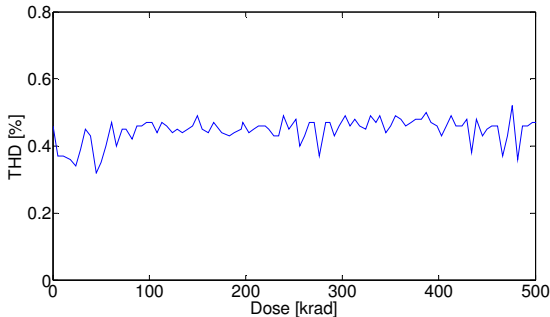


Fig. 7. Distorção Harmônica Total em função da dose acumulada

Na Fig. 8 é apresentada a resposta em frequência para o amp-op em configuração buffer para 3 valores de Dose Acumulada.

A frequência de corte encontrada foi de 1.42 MHz antes da irradiação. Para dose de 100 krad e 300 krad não houve nenhuma variação no resultado. Para dose de 500 krad uma pequena variação de 30kHz ou 2.1% foi observada na frequência de corte.

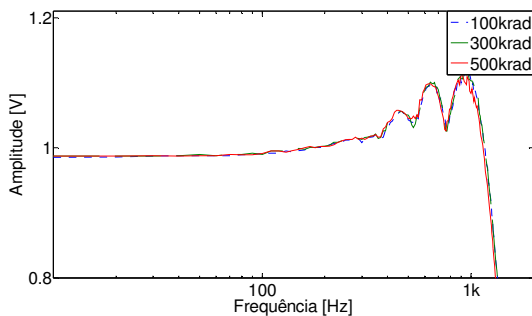


Fig. 8. Resposta em frequência do op-amp para diferentes doses

Os resultados obtidos neste teste de irradiação comprovam a robustez do amp-op em relação a TID para uma dose acumulada de até 500 krad. Conforme indicado pela equação 7, a variação da tensão de limar é proporcional ao quadrado do valor da espessura do óxido de *gate*. Assim, para a tecnologia em questão (CMOS 0.35 μm , da *foudry* AMS), cuja espessura do óxido de *gate* é de

aproximadamente 7nm, esta espessura é suficientemente bastante fina para proporcionar intrinsecamente uma elevada resistência à radiação ionizante para aplicações espaciais em baixas órbitas (LEO), cuja dose acumulada é sempre inferior a 500Krad [12].

Por outro lado, as pequenas variações de V_T dos transistores produzidas pela dose de radiação podem causar descasamentos nas estruturas internas do circuito, com conseqüente degradação nos parâmetros do amp-op. Entretanto, o aspecto que favoreceu a robustez do circuito com respeito à resistência a TID foi a técnica de projeto utilizada (*layout* com centróide comum), a qual reduz o descasamento entre transistores, tanto aquele devido às variações no gradiente de processo, quanto aquele devido à variância da dependência de V_T com a dose de radiação acumulada.

Em relação à topologia do amp-op, o estágio de saída possui um controle de corrente quiescente realimentado, ou seja, é inerentemente mais robusto a variações de processo e aquelas produzidas pela radiação nos transistores deste estágio.

VI. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados permitiram concluir que o amp-op desenvolvido é robusto à radiação ionizante. Pode-se atribuir essa robustez ao processo de fabricação e às técnicas de projeto utilizadas.

Conforme discutido na seção IV deste trabalho, o óxido fino das tecnologias modernas é muito menos sensível à radiação ionizante que óxidos espessos de tecnologias mais antigas. A tecnologia CMOS 0.35 μm da Foundry AMS mostrou-se robusta à radiação ionizante (TID) até a dose acumulada de 500Krad, conforme mostram os resultados experimentais deste trabalho.

Para o layout de todos os transistores do circuito utilizou-se técnicas do tipo centróide comum, os quais atenuam significativamente os efeitos de variação do gradiente de processo e aquelas devidas a TID. Tendo em vista que os efeitos da radiação não são exatamente iguais em todos os transistores do circuito, a utilização de técnicas de layout reduzem significativamente possíveis descasamentos que seriam resultantes da deposição de carga não uniforme nos diversos transistores do ao longo amp-op.

A dose acumulada no experimento foi de 500Krad, o que é suficiente para atender requisitos de missões de baixa órbita (LEO).

Uma vez que se utilizou no projeto do amplificador um processo de fabricação comercial padrão, de livre acesso, pode-se considerar a utilização desse processo no desenvolvimento de outros circuitos de interesse do setor aeroespacial brasileiro.

Entretanto, para uma completa validação do circuito em relação à resistência a radiação, ainda é necessário realizar testes de eventos únicos com íons pesados, referenciados na literatura internacional do SEE (*Single Event Effects*) o que é objeto de trabalhos futuros. Os SEE são usualmente realizados em aceleradores de alta energia, mas podem ser demonstrados com fonte de íons provenientes do 252Cf ou pulsos estreitos (faixa de pico-segundos) de lasers.

VII. AGRADECIMENTOS

Ao projeto PEICE, financiado pela FINEP, pelos recursos financeiros. A FAPESP, pelo financiamento da fabricação do chip, através do projeto Multiusuário. Aos técnicos, físicos e engenheiros que participaram da execução dos testes ao longo dos 10 dias de experimento.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Lacoce, "Improving Integrated Circuit Performance Through the Application of Hardness-by-Design Methodology," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 55, no. 4, pp. 1903–1925, Ago. 2008.
- [2] M. Manghisoni et al., "Comparison of Ionizing Radiation Effects in 0.18 and 0.25 μm CMOS Technologies for Analog Applications", , " IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 50, no. 6, pp. 1827–1833, Dec. 2003
- [3] M. Manghisoni, L. Ratti, V. Re, and V. Speziali, "Radiation hardness perspectives for the design of analog detector readout circuits in the 0.18 μm CMOS generation," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, pp. 2902–2909, Dec. 2002..
- [4] R. C. Lacoce, J. V. Osborn, D. C. Mayer, S. Brown, D. R. Hunt, "Total-dose radiation tolerance of a commercial 0.35 μm CMOS process", IEEE Radiation Effects Data Workshop, 1998. , pp. 104-110, Jul.1998
- [5] D. J. Frank, "CMOS design near the limit of scaling," IBM J. Res. Develop., vol. 46, pp. 213–222, 2002.
- [6] P. R. Agostinho, "Projeto de Amplificadores Operacionais CMOS Classe-AB Operando em Baixa Tensão de Alimentação", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2006.
- [7] K. Langen, J. H. Huijsing, "Compact Low-voltage and high speed CMOS, BiCMOS and Bipolar operational amplifiers", Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [8] K. Langen, J. H. Huijsing, "Compact Low-Voltage Power-Efficient Operational Amplifier Cells for VLSI", IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 33, NO. 10, OCTOBER 1998.
- [9] G. F. Derbenwick, B. L. Gregory, "Process Optimization of Radiation Hardened CMOS Circuits," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 22, pp. 2151-2158, 1975.
- [10] D. Zupac, K. F. Galloway, P. Khosropour, S. R. Anderson, R. D. Schrimpf, and P. Calvel, "Separation of Effects of Oxide-Trapped Charge and Interface-Trapped Charge on Mobility in Irradiated Power MOSFETs," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 40, pp. 1307-1315, 1993.
- [11] A. H. Siedle, L. Adams, "*Handbook of Radiation Effects*". 2nd ed. Oxford: Oxford Univ Press, 2006.
- [12] R. Velazco, P. Fouillat, R. Reis, "*Radiation Effects on Embedded Systems*". Springer, 2007.