ESTUDO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE NO CONVERSOR DE TENSÃO DC/DC LM2596

Dirceu Adriano de Souza, <u>dirceu.souza@gmail.com</u> Osamu Saotome, <u>osaotome@ita.br</u> Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, CEP 12228 – 900 São José dos campos, São Paulo, Brasil

Abstract. Este trabalho apresenta a realização de um experimento de TID (Total Ionizing Dose) que visa determinar os efeitos da radiação gama sobre as características operacionais de um regulador de tensão DC-DC da série LM2596. Neste experimento, foram medidos parâmetros de figura de mérito do componente, tais como a tensão de saída alimentando uma carga fixa, a corrente quiescente e a temperatura. As medidas foram realizadas para diferentes tensões na entrada do componente antes, durante e após a irradiação, desde a mínima tensão necessária para a regulação até a tensão de entrada máxima suportada. A realização periódica dessas medidas (on-line) durante a irradiação permitiram verificar a variação da tensão de saída em função da dose de radiação absorvida. As medidas efetuadas após a irradiação mostraram sua recuperação ao longo do tempo, possibilitando observar danos transitórios e permanentes, com e sem a aplicação de tratamento térmico (annealing).

Keywords: regulador de tensão, irradiação, recuperação, annealing

1. INTRODUÇÃO

Dispositivos eletrônicos em sistemas espaciais, de defesa, médicos e sistemas de potência podem ser expostos a vários tipos de radiação, incluindo fótons de alta energia e partículas energéticas (elétrons, prótons, nêutrons e íons). A radiação pode produzir efeitos na eletrônica variando desde perdas temporárias de dados e falhas funcionais até falhas catastróficas. Os efeitos específicos produzidos dependem fortemente da tecnologia empregada e do ambiente de radiação, conforme Schrimpf and Fleetwood (2004). Com o intuito de atender demandas de custo reduzido, melhor desempenho e prazos de entrega mais rápidos impostos pela comunidade espacial, dispositivos de tecnologia comercial e emergente "commercial off the shelf" (COTS) têm sido adotados como o caminho alternativo mais rápido e viável na solução dessas necessidades em lugar de dispositivos fabricados especialmente para resistirem aos efeitos da radiação ionizante (radiation-hardness) de acordo com Sable et al. (2007).

Observando-se o aumento repentino na utilização desses dispositivos, a Engenharia de Radiação responsável pelo desenvolvimento de testes baseados em solo para os efeitos da dose total ionizante a fim de qualificar tais dispositivos para vôo tem se tornado cada vez mais importante para assegurar a garantia da qualidade do sistema onde serão empregados. Um tipo de dispositivo de uso geral em circuitos eletrônicos são os reguladores de tensão DC-DC, sendo que falhas paramétricas ou funcionais nesses dispositivos comprometem todo o circuito onde estão inseridos. Neste trabalho, são relatados os primeiros resultados do estudo dos efeitos da radiação ionizante em uma amostra do regulador LM2596 (*National Semiconductor*) exposto à radiação- γ de 1,17 e 1,33 MeV numa fonte de ⁶⁰Co, em uma taxa de dose de 0,5 rad(SiO₂)/s. Este regulador não foi fabricado numa linha especial *radiation-hardened* ou *radiation-tolerant*, e o fabricante não faz nenhuma advertência sobre a sua resistência à radiação. Entretanto, dispositivos deste tipo são freqüentemente usados em aplicações espaciais, sendo que testes de amostras são necessários para verificar se eles atenderão aos requisitos de tolerância à radiação especificados para a missão do equipamento no qual são empregados.

Recentemente, Miyahira *et al.* (2005) observaram que os efeitos da radiação gama nos parâmetros operacionais de reguladores DC-DC desta natureza caracterizam-se pela deterioração que ocorre através de dois mecanismos diferentes: um envolvendo a degradação paramétrica na tensão de referência, resultando em pequenas oscilações nas características de saturação da tensão de saída devido à mudança na tensão de referência interna, e outro mecanismo que acarreta queda na tensão de saída a valores próximos de zero, em decorrência da degradação do ganho nos transistores laterais *pnp* na saída do dispositivo. Os transistores laterais *pnp* são altamente sensíveis aos danos de TID, e freqüentemente apresentam elevada sensitividade quando são testados em baixas taxas de dose conforme McClure *et al.* (2000). Trabalhos anteriores realizados com conversores DC-DC foram relatados por McClure *et al.* (2000), testando amostras em duas taxas de dose diferentes, 50 rad(SiO₂)/s e 0,04 rad(SiO₂)/s submetendo o dispositivo a uma condição polarizada (Tensão de entrada de 6V, com uma corrente de carga de 10 mA) em intervalos de dose total de 10 krad(SiO₂), ou seja, a cada 10 krad(SiO₂) o componente foi retirado do teste e os parâmetros medidos.

No trabalho de Sable *et al.* (2007) foram realizados testes de TID até uma dose total de 30 krad(SiO₂), incluindo efeitos *ELDRS (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity)* e a medição de parâmetros como tensão de saída (V_{OUT}), corrente de saída (I_{OUT}) e eficiência a plena carga (E_{ff}) para uma condição de tensão de entrada fixa.

Nos estudos realizados por Chávez *et al.* (2005) foram testadas seis amostras do regulador LM2941 com uma tensão fixa de entrada 6V, uma corrente de saída de 10 mA e uma tesão nominal de saída de 5V. O procedimento de teste foi realizado conforme a norma MIL-STD-883, método de teste 1019.7. O regulador LM2941 apresentou dano catastrófico

devido à degradação de ganho de corrente contínua no transistor lateral *pnp* de saída conforme estudado anteriormente por Schrimpf and Fleetwood (2004), o que se reflete diretamente no desempenho do circuito acarretando um decréscimo abrupto na tensão de saída (a qual essencialmente cai à zero). Todos os seis dispositivos apresentaram dano em aproximadamente 19 krad(SiO₂). Neste experimento, Schrimpf and Fleetwood (2004) verificaram a degradação paramétrica em função da dose total acumulada.

No presente trabalho, são apresentados novos dados para uma amostra fabricada recentemente do LM2596 (*National Semiconductor*) usando uma baixa taxa de dose 0,5 rad(SiO₂)/s de acordo com O' Bryan *et al.* (2000) que define essa faixa (0,003 - 4,52 rad(SiO₂)/s) atingindo uma dose total acumulada de 38,9 krad(SiO₂). Diferentemente dos trabalhos anteriores, essas medidas foram realizadas *on-line* através da utilização de instrumentação virtual que permite controlar o experimento remotamente. Dessa forma, o dispositivo foi polarizado durante a irradiação, que é sua condição normal de uso. A temperatura do dispositivo foi monitorada durante a irradiação, pois é plausível supor que a temperatura de irradiação tenha influência no mecanismo de formação de defeitos e aprisionamento de cargas em nível microscópico. Outra contribuição importante é a variação da tensão de entrada de uma condição mínima necessária à regulação até a condição máxima nominal do dispositivo a qual permitiu verificar a dependência da tensão de saída e da tensão de entrada em função da dose total acumulada.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O teste de radiação foi realizado no Laboratório de Radiação Ionizante (LRI) do IEAv utilizando uma fonte de radiação gama de ⁶⁰Co da *Atomic Energy of Canadian Limited*, modelo Eldorado 78, que disponibiliza um campo de até 40×40cm e taxa de dose no silício de aproximadamente 1,3 krad/h a um metro de distância, relatado em Gonçalez e Federico (2008). Para realização do experimento, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos: placa de circuito impresso (PCI) contendo o regulador LM2596 e os demais componentes necessários ao ajuste da tensão de saída em 5VDC, computador com o software VEE (Agilent) instalado contendo o programa responsável pela aquisição das medidas elétricas, osciloscópio digital Agilent DSO6054A, conversor GPIB-LAN E5810A, fonte de tensão DC regulável (0-60V/3.5A Max) HP Model 6644A, multímetro digital HP Model 3457A, termômetro de mercúrio, termistor 10K3A1B (BETHATERM). Esses instrumentos permaneceram em comunicação com o computador através de interface GPIB-LAN, conforme ilustrado na Fig. 1.



Figura 1. Arranjo experimental para teste de radiação do regulador LM2596

A fonte de tensão forneceu ao regulador uma tensão de entrada (V_{IN}) limite de 40V, variada pelo software de controle nos intervalos de 6V, 10V, 15V, 20V, 25V, 30V, 35V e 40V. O multímetro realizou a leitura da resistência do termistor empregado para determinar a temperatura do componente, e um osciloscópio através de dois canais distintos realizou a medição da tensão (V_{IN}) de entrada e da tensão de saída (V_{OUT}) do regulador LM2596.

Neste experimento, foi medida a tensão de saída do regulador com uma carga fixa de 20Ω , assegurando uma corrente de carga de 250 mA, antes, durante e após a irradiação. As medidas realizadas periodicamente durante a irradiação permitiram verificar a variação da tensão de saída em função da dose de radiação absorvida pelo componente. As medidas após a irradiação permitiram verificar a sua recuperação ao longo do tempo, com e sem

tratamento térmico (annealing). Os testes foram realizados em temperatura ambiente e em condições nominais de alimentação do regulador. Na Figura 2, é mostrado o esquema elétrico da placa de circuito impresso (PCI) que contém o regulador. Uma placa de chumbo foi colocada ao redor do dispositivo para blindá-lo dos raios- γ de baixa energia espalhados no ambiente. A instrumentação utilizada foi blindada com chumbo e interligada com um computador de controle e de aquisição de dados via interface GPIB-LAN. O dispositivo polarizado permaneceu numa condição de 6V $\leq V_{IN} \leq 40V$, $I_{LOAD} = 250$ mA e com o pino ON/OFF (5) aterrado, assegurando a regulação constante do componente, uma vez que este pino em nível alto ($V_{IH} > 2V$) coloca o regulador num estado "*shutdown*" com a tensão de saída em 0V, conforme Fig. 2.

A aquisição dos dados obtidos foi realizada a cada cinco minutos. Para cada uma das diferentes tensões aplicadas na entrada do regulador (V_{IN}): 6V, 10V, 15V, 20V, 25V, 30V, 35V e 40V, foram coletados e salvos em arquivos os seguintes dados: tensão de entrada do regulador (V_{IN}), tensão de saída do regulador (V_{OUT}), corrente de alimentação (I_{IN}) e resistência do termistor ($R_{\circ C}$) posteriormente convertida em temperatura.



Figura 2. Esquema elétrico da placa de circuito impresso (PCI) que contém o LM2596

3. RESULTADOS E ANÁLISE

Tensão de Entrada (V)	Tensão de Saída (V)	Desvio padrão (V)	Eficiência (%)	Incerteza na eficiência (%)	Variação da Tensão de Saída (V)	Ripple (%)
6,000	5,046	0,009	78,95	0,24	-0,11	1,05
10,000	5,051	0,008	79,16	0,30	-0,01	0,98
15,000	5,050	0,006	76,73	0,37	-0,03	0,76
20,000	5,052	0,006	75,56	0,30	0,02	0,65
25,000	5,053	0,007	72,90	0,15	0,04	0,88
30,000	5,051	0,008	70,31	0,26	0,00	0,90
35,000	5,053	0,010	68,29	0,65	0,03	1,19
40,000	5,055	0,006	66,83	0,66	0,07	0,71
Médias	5,051	0,007	-	-	0,000	0,89

Tabela 1. Parâmetros de regulação do LM2596 antes do teste de radiação.

Antes da irradiação, foram coletadas leituras das tensões de entrada e saída, corrente de entrada e saída e temperatura do componente. Durante o regime permanente, o componente operou numa temperatura de 42 °C. Os dados relativos às tensões de entrada e saída permitiram caracterizar o componente e levantar sua curva de regulação conforme os dados do fabricante. Na Tabela 1 e nas Figuras 3 a 5 são apresentados os valores medidos das tensões de entrada e saída e os correspondentes valores da eficiência, variação na tensão de saída e ripple.



Figura 3. Tensão de saída em função da tensão de entrada do LM2596



Figura 4. Regulação de Linha do LM2596



Figura 5. Eficiência do LM2596 em função da tensão de entrada

O desvio padrão das medidas foi calculado a partir da distribuição estatística das diversas medidas realizadas ao longo de três horas de funcionamento do regulador. Essas características reproduzem os dados apresentadas no datasheet do componente, exceto o ripple que não é especificado pelo mesmo.

Na Figura 6, é apresentado o comportamento da tensão de saída do regulador durante a irradiação para os diversos valores de tensão de entrada aplicados.



Figura 6. Tensão de saída medida durante a irradiação em função da dose acumulada para as diversas tensões aplicadas na entrada

Na Tabela 2, são apresentados os limiares de dose total absorvida pelo componente para os quais a tensão de saída caiu abaixo do valor desejado (5VDC).

Tabela 2. Limiares de dose acumulada para os quais a tensão de saída cai abaixo do valor especificado de 5V para os diversos valores de tensão aplicados na entrada do LM2596

Tensão de Entrada	Limiar de dose acumulada			
(V)	[krad(Si)]			
6	19,1			
10	21,9			
15	23,7			
20	25,1			
25	26,5			
30	27,9			
35	29,4			
40	31,3			

Os efeitos da dose total ionizante em tecnologias bipolares são primariamente caracterizados pela formação de dois tipos de defeitos dentro das camadas de óxido de um circuito integrado (cargas aprisionadas na camada de óxido SiO₂) ou na interface óxido - semicondutor (aprisionamento de interface) como é mostrado por Ma and Dressendorfer (1989). O principal resultado desses defeitos é uma redução do ganho de corrente de emissor comum (β) dos BJTs integrados nos circuitos bipolares lineares. O ganho do emissor comum, a principal figura de mérito para dispositivos bipolares, é definido como sendo a razão entre a corrente de coletor (I_C) e a corrente de base (I_B) conforme a Eq. 1.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

(1)

2009 Brazilian Symposium on Aerospace Eng. & Applications Copyright $\textcircled{\mbox{\scriptsize O}}$ 2009 by AAB

A causa primária do ganho de corrente reduzido em BJTs irradiados é um aumento na corrente de base (I_B) devido à recombinação acelerada através dos defeitos no óxido induzidos pela radiação de acordo com Barnaby *et al.* (1999). Em transistores *npn* a dose total TID tem um impacto desprezível sobre a corrente de coletor. Este experimento de irradiação com o regulador LM2596 indicou uma flutuação significativa na tensão de saída (V_{OUT}) em resposta a fonte de ⁶⁰Co numa baixa taxa de dose 0.5 rad(SiO₂)/s.

Num estudo realizado por Pease (1990) através do uso de simulação SPICE permitiu-se identificar três mecanismos TID concorrentes em nível de circuito para a resposta de radiação do regulador LM117 com arquitetura similar ao LM2596. Todos os três mecanismos foram associados com degradação nos quatro transistores da referência do circuito. A Figura 7 mostra a topologia ideal da referência de tensão para os reguladores LM2596 e LM117, a qual é uma versão da célula *Brokaw* utilizada no estudo de Pease (1990). Esta topologia é composta de dois BJTs laterais *pnp* (Q₃ e Q₄) os quais formam um espelho de corrente para manter a mesma corrente através dos transistores *npn* (Q₁ e Q₂), I_O (\approx 50 µA) é dada pela Eq.2.

$$I_O = \frac{\Delta V_{be}}{R_1} \tag{2}$$

Onde ΔV_{be} é a tensão diferencial base-emissor entre Q_1 e Q_2 desprezível sobre a corrente de coletor. A tensão de referência constante ($V_{REF} \approx 1.23V$) é a soma das quedas de tensão através da junção base-emissor de Q_1 ($V_{be1} \approx 0.63V$) e do resistor R_2 ($2I_0R_2 \approx 0.6V$). A relação entre a tensão de saída e V_{REF} é expressa pela Eq. 3.

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \tag{3}$$

Os mecanismos de degradação para V_{REF} (e V_{OUT}) foram identificados como:

1) queda da corrente coletor-emissor nos dois dispositivos npn;

2) degradação do ganho nos dois dispositivos npn;

3) degradação do ganho nos dois transistores pnp.



Figura 7. a) Topologia ideal da célula de *Brokaw* para a tensão de referência do regulador LM2596 e b) os efeitos da degradação de ganho induzida pela radiação na referência do regulador, caminho da perda de corrente coletoremissor e mudanças em $V_{be1} e \Delta I_0$.

No primeiro mecanismo, queda da corrente coletor-emissor, o aumento de V_{REF} ($e V_{OUT}$) é causado por um canal de radiação induzida que se forma na base tipo-p de Q₂. O canal estabelece um caminho resistivo (R_{leak}) entre o coletor e o emissor como mostrado na Fig. 7b. O caminho de dispersão aumenta ΔV_{be} entre Q₁ e Q₂, e dessa forma aumentando I_O , V_{REF} e V_{OUT} conforme estudos realizados por Barnaby *et al.* (1996). No segundo mecanismo, *degradação do ganho nos transistores pnp*, a radiação induzida aumenta a corrente de base (I_B) nos transistores Q₃ e Q₄, que, por sua vez, reduz as correntes de coletor de Q₄ e Q₁ ($I_O - \Delta I_O$). Isto reduz ambos V_{be1} e a queda de tensão através de R₂, provocando a queda de V_{REF} e V_{OUT} , de acordo com Barnaby *et al.* (1996). No terceiro mecanismo, *degradação do ganho nos transistores*

npn, simulações indicaram que I_0 permaneceu constante com a degradação do ganho devido à radiação induzida nos transistores $Q_1 \in Q_2$. Entretanto, a degradação de ganho causou uma redução em V_{bel} . Além disso, devido a diferenças nas geometrias do emissor, a corrente de emissor de Q_1 diminuiu em relação a Q_2 . A combinação da queda em V_{bel} e da tensão através de R_1 (diminuição da corrente de emissor de Q_1) causou a diminuição de V_{REF} e V_{OUT} conforme Barnaby *et al.* (1996).

O primeiro mecanismo resultará num aumento da tensão de saída do regulador e os outros dois na queda da tensão de saída. Esses efeitos poderão ocorrer em diferentes doses, o que determinará o comportamento da tensão de saída em função da dose acumulada. Neste experimento verificou-se que, a partir de determinados limiares dependentes da tensão de entrada, conforme Tab. 2, ocorre um decréscimo acentuado da tensão de saída até valores próximos de zero, conforme ilustrado na Fig. 6. Pode-se inferir a partir dos resultados obtidos que o mecanismo predominante é a degradação do ganho nos transistores *pnp* e *npn*, o que acarreta em ambos os casos, a queda na tensão de referência (V_{REF}) e, consequentemente, na tensão de saída (V_{OUT}). Na Figura 8 é apresentada a curva de recuperação do LM2596 na temperatura ambiente, conforme previsto na norma MIL-STD-883G, método 1019.7 (*Extended room temperature anneal test procedure*), realizado durante 226 horas, onde a temperatura do componente em regime permanente variou entre 36 e 37°C. Esses resultados indicam que ocorre uma recuperação lenta e gradual ao longo do tempo devido ao desarmadilhamento térmico das cargas aprisionadas próximas a junção.



Figura 8. Recuperação da tensão de saída após a irradiação do LM2596 com 38,9 krad(SiO₂)

Tabela 3. Parâmetros de regulação calculados a partir da distribuição estatística da tensão de saída após a aplicação do annealing assegurando a recuperação do componente.

Tensão de Entrada (V)	Tensão de Saída (V)	Desvio padrão (V)	Eficiência (%)	Incerteza na eficiência (%)	Variação da Tensão de Saída (V)	Ripple (%)
6,000	5,004	0,016	78,01	0,39	-0,13	1,91
10,000	5,008	0,016	78,05	0,38	-0,05	1,90
15,000	5,011	0,016	76,02	0,36	0,00	1,91
20,000	5,011	0,016	74,40	0,37	0,01	1,90
25,000	5,012	0,016	71,72	0,32	0,03	1,89
30,000	5,012	0,016	69,98	0,59	0,04	1,91
35,000	5,013	0,016	68,04	0,53	0,05	1,91
40,000	5,013	0,016	66,59	0,30	0,05	1,88
Médias	5,011	0,016				1,90

Na Tabela 3 e nas Figuras 9 a 11 são apresentados os valores medidos das tensões de entrada e saída e os correspondentes valores da eficiência, variação na tensão de saída e ripple após o tratamento térmico (annealing) na temperatura de 100°C durante 72 horas. O desvio padrão das medidas foi calculado a partir da distribuição estatística das diversas medidas realizadas ao longo de 93 horas de funcionamento do dispositivo LM2596. Essas características reproduzem os valores medidos antes da irradiação, exceto o ripple médio que passou de 0,89% para 1,9%.



Figura 9. Tensão de saída em função da tensão de entrada do LM2596 após annealing



Figura 10. Regulação de Linha do LM2596 após annealing



Figura 11. Eficiência do LM2596 em função da tensão de entrada após annealing

4. CONCLUSÃO

Os resultados do presente experimento indicam que o regulador LM2596 não deve ser aplicado sem a devida proteção de blindagem contra a radiação, mesmo em missões de baixa órbita onde a tolerância mínima exigida é da ordem de 20 krad(SiO₂). O comportamento da regulação de tensão no componente não difere daquele observado em trabalhos anteriores relatados na literatura para dispositivos de outros fabricantes, porém de mesma arquitetura. Os efeitos da dose total de radiação gama ocorreram em nível de componente, em particular os transistores *pnp*, que são mais sensíveis a TID, Pease *et al.* (1990). Testes posteriores serão realizados para várias correntes de carga com o intuito de verificar a dependência da regulação com a dose acumulada e possíveis efeitos no estágio de potência do dispositivo. As medidas *on-line* permitiram verificar o comportamento da tensão de saída como função da dose total acumulada e das diferentes tensões de entrada mostrando que o limiar de alteração paramétrica por TID aumenta conforme o aumento da tensão de entrada. Neste caso, em aplicações de baixa órbita, onde a dose típica acumulada é da ordem de 20 krad(SiO₂), recomenda-se a utilização dos mais altos valores de tensão de entrada aceitos pelo dispositivo, conforme é mostrado na Tab. 2, onde podemos verificar que para tensões maiores que 10V o limiar de degradação paramétrica inicia-se em 21,9 krad(SiO₂). Testes com taxas de dose menores do que a utilizada [0,5 rad(SiO₂)/s] devem ser realizados a fim de determinar os fatores de extrapolação dos dados obtidos em ensaio para prever o comportamento do dispositivo em baixas taxas de dose encontradas nas órbitas de baixa altitude.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos: à FINEP, convênio nº 01.07.0628.00 - FINEP/PEICE pelo financiamento total do projeto.

6. REFERÊNCIAS

- Barnaby, H.J., Cirba, R., Schrimpf, R.D., Kosier, S.L., Fouillat, P. and Montagner, X., 1999, "Minimizing gain degradation in lateral pnp bipolar junction transistors using gate control", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 46, pp. 1652-1659.
- Barnaby, H.J., Tausch, H.J., Turfler, R., Cole, P., Baker, P. and Pease, R.L., 1996, "Analysis of Bipolar Linear Circuit Response Mechanisms for High and Low Dose Rate Total Dose Irradiations,", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 43, pp. 3040-3048.
- Chavez, R.M., Rax, B.G., Scheick, L.Z. and Johnston, A.H., 2005, "Total Ionizing Dose Effects in Bipolar and BiCMOS Devices", IEEE Radiation Effects Data Workshop, No. 24, pp. 144-148.
- DOD. Department of Defense, 2003, "MIL-STD-883 Test Methods Microcircuits Standard", Test Methods 1019.6 and 1019.7, USA, <u>http://www.dscc.dla.mil/Downloads/MilSpec/Docs/MIL-STD-883/std883not5.pdf</u>
- Gonçalez, O.L. e Federico C.A., 2008, "Estimativa de Doses no Irradiador de ⁶⁰Co do Laboratório de Radiação Ionizante do IEAv", Relatório Técnico RT/PEICE-01/2008, IEAv/CTA, São José dos Campos, Brasil.
- Ma, T.P. and Dressendorfer P.V., 1989, "Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits", New York: Wiley.
- McClure, S.S., Gorelick, J.L., Pease, R. and Johnston, A.H., 2000, "Dose Rate and Bias Dependency of Total Dose Sensitivity of Low Dropout Voltage Regulators", IEEE Radiation Effects Data Workshop, No. 19, pp. 100-105.
- Miyahira, T.F., Rax, B.G. and Johnston, A.H., 2005, "Total Dose Degradation of Low Dropout Voltage Regulators", IEEE Radiation Effects Data Workshop, No. 21, pp. 127-133.
- O' Bryan, M.V., LaBel, K.A., Reed, R.A., Howard Jr., J.W., *et al.*, 2000, "Radiation Damage and Single Event Effect Results for Candidate Spacecraft Electronics", IEEE Radiation Effects Data Workshop, No. 20, pp. 106-122.
- Pease, R.A., 1990, "The Design of a Band Gap Reference Circuit: Trials and Tribulations", IEEE BCTM Meeting.
- Pease, R.L., *et al.*, 1998, "Enhanced Low Dose Rate Sensitivity of a Low Dropout Voltage Regulator", IEEE Trans. Nucl. Sci., No. 45(6), pp. 2571-2576.
- Sable, D., Skutt, G., Leslie, L.G. and Rainwater, S.L., 2007, "Cost Effective Hybrid DC DC Converter Radiation Performance", IEEE Radiation Effects Data Workshop, No. 16, pp. 96-100.
- Schrimpf, R.D. and Fleetwood, D.M., 2004, "Radiation Effects and Soft Errors in Integrated Circuits and Electronic Devices", Ed. World Scientific Publishing Co. Pte., London, United Kingdom, 339p.
- Siedle, A.H. and Adams, L., 2006, "Handbook of Radiation Effects", Oxford University Press, Oxford, Great Britain.