



Teste em Componente Crítico de uso Espacial: Ensaio de Dose Ionizante Total, (TID - Total Ionizing Dose) em Transistores 2N2222A

JUNQUEIRA, B. C.^{1,2}, MANEA, S.¹, VAZ, R. G.³, GONÇALEZ, O. L.³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

²Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

³Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP, Brasil

bruno.junqueira@inpe.br

Resumo. *Uma dificuldade para sistemas espaciais é a radiação, provocando efeitos de curto e longo prazo em sistemas e componentes eletrônicos. O presente artigo apresenta os resultados de testes referentes a Dose Ionizante Total Acumulada em um componente crítico de uso espacial. Os resultados dos testes são analisados e comparados com os limites aceitos de acordo com datasheet do fabricante do componente, avaliando como se comportaria no ambiente espacial.*

Palavras-chave: Transistor 2N2222A; Dose Ionizante Total Acumulada; Ambiente Espacial; Componente de Satélite.

1. Introdução

No ambiente espacial os componentes estão expostos a grandes taxas de radiação, e devem suportá-las por toda sua vida operacional. Portanto tais componentes devem ser resistentes o suficiente de acordo com a missão na qual estão sendo utilizados durante o tempo esperado, para a órbita escolhida.

Para tal comprovação são feitos testes no componente, onde o teste TID (Dose Ionizante Total Acumulada) é um teste fundamental e o outro teste aplicável é o SEE (Efeitos de Evento Único) sendo seus efeitos destrutivos ao componente em algumas situações. Para mitigar estes danos são utilizadas técnicas de projeto do tipo topologias duplicadas, códigos corretores de erros e blindagens.

Cada vez mais se tem o interesse em componentes de prateleira COTS, por já estarem disponíveis para a aquisição e serem em alguns casos os mais modernos no mercado. Porém é um risco utilizá-los sem saber ao certo suas particularidades para o ambiente espacial, principalmente qual a sua resistência a radiação. Com os resultados dos testes nas amostras do lote é possível determinar a resistência média dos componentes do lote adquirido.



O trabalho apresenta os resultados de testes de radiação em um transistor de tecnologia bipolar com uma dose acumulada de 150 Krads(Si) em uma taxa de dose de 1 krad/h. O objetivo deste ensaio foi investigar sua tolerância aos efeitos da TID na qual estará submetido quando operado em ambiente espacial.

2. Discussão

O espaço é um ambiente hostil e possui algumas características próprias, as principais são radiação, degaseificação, vácuo, microgravidade, oxigênio atômico e variações drásticas de temperatura. O sistema deve ser o mais confiável possível devido a impossibilidade de se fazer algum reparo no sistema depois de lançado. Durante a fabricação devem ser eliminados ou mitigados todos os riscos possíveis.

Por esta razão todas as atividades espaciais são cercadas de muito cuidado, uma falha pode representar o fim da missão. Para todo o processo de desenvolvimento do sistema espacial, deve-se ter um controle rigoroso do atendimento dos requisitos. Cada componente deve atender as especificações para a integração no sistema.

A falha de um simples componente, como transistor abordado neste trabalho, dependendo de qual for a criticidade deste, pode resultar em grandes problemas para o sistema. Por este fato, deve-se assegurar que tal componente terá um desempenho de acordo com o projetado.

2.1. Ambiente Espacial (Radiação)

O Planeta Terra tem duas principais proteções contra a radiação do espaço, o campo magnético e a atmosfera. O ambiente de radiação espacial varia drasticamente com a altitude da órbita, latitude, longitude e ao decorrer do tempo. A característica geográfica mais proeminente para as órbitas baixas da Terra é a Anomalia do Atlântico Sul, que é uma área de excepcional densidade de prótons que cobre grande parte da América do Sul e do Oceano Atlântico Sul.

Os sistemas espaciais e seus componentes eletrônicos associados estão expostos ao fluxo de partículas energéticas por todo seu período de operação. Essas partículas incluem elétrons, fótons, prótons e íons pesados. Basicamente provenientes do Sol por vento solar, erupções solares e ejeções de massa coronal ou do espaço profundo por raios cósmicos galácticos.

As partículas de baixa energia, normalmente provenientes do vento solar, acabam presas no campo magnético terrestre, passando a ter um movimento em espiral ao redor das linhas de campo. Estas partículas se concentram em duas regiões chamadas com cinturões de Van Allen. Os elétrons presos tem energia de até 7 MeV enquanto que os prótons até algumas centenas de MeV [GUSEV, 2003]. Os prótons por serem mais energéticos se concentram no cinturão mais próximo da Terra onde o campo magnético é forte o suficiente para capturá-los.

Os cinturões de Van Allen criam uma proteção contra a radiação abaixo deles, porém sistemas espaciais que estão próximos ou em seu interior sofrem drasticamente com suas partículas.



Dependendo da energia da partícula, do seu número de massa e número atômico, causa diferentes efeitos no material que está colidindo. São divididos em três tipos descritos a seguir.

Efeito ionizante de longo prazo

Este efeito está relacionado ao TID (Total Ionizing Dose) que representa o total de radiação ionizante absorvido pelo componente. A dose é medida ao longo do tempo que o material ficou exposto a esta radiação, o que muda suas características.

As partículas ao atingirem o componente, ionizam o material, gerando pares elétrons-lacunas. Os elétrons são rapidamente recombinados por possuírem uma mobilidade significativamente maior e atingem a região condutora devido ao campo elétrico aplicado, enquanto que as lacunas se recombinam muito lentamente nas regiões não condutoras, e ficam acumuladas nesta região. A medida que se tem mais bombardeamento de partículas, há o aumento de lacunas no componente.

A região não condutora foi dimensionada para que ocorra um salto de corrente a partir de uma determinada tensão. À medida que essas cargas vão aumentando no material, é equivalente ao isolante diminuir e portanto a tensão de disparo também, ou seja, ocorre um desvio de parâmetros do componente eletrônico, aumentando a corrente de fuga, reduzindo a imunidade ao ruído e ocorrendo falha funcional [TODD, 2015].

Em componentes com tecnologia de construção micrométrica (como é o caso de componentes antigos) este acúmulo demora muito tempo para começar a atrapalhar seu funcionamento, sendo desprezível a TID. Já para componentes muito pequenos, abaixo de algumas dezenas de nanômetros, não se tem espaço suficiente para o acúmulo dessas cargas. A tendência tecnológica é a diminuição cada vez mais dos componentes, eliminando assim os feitos da TID, porém não para a radiação de efeito único, como será visto a frente.

Efeitos não ionizantes de longo prazo

Denominado de Dose de Dano de Deslocamento DDD (Displacement Damage Dose) corresponde a uma quebra de estrutura cristalina do semicondutor, devido ao impacto de prótons, normalmente presos no cinturão de Van Allen, degradando o material a longo prazo, sem que ocorra ionização. A energia gerada pelas partículas incidentes é suficiente apenas para deslocar um átomo da estrutura cristalina [TODD, 2015].

Efeitos ionizantes de curto prazo

Chamado de efeitos de evento único SEE (Single Event Effect), ocorrem com o impacto de uma partícula, raio cósmico galáctico ou próton com alta energia, transferindo sua energia ao material, produzindo uma trilha de ionização e gerando um pulso transiente de corrente [TODD, 2015].

Testes que reproduzam o SEE tem um custo consideravelmente alto, por exigirem altos níveis de energia e equipamentos complexos e caros. Por este motivo, estes testes não são realizados com tanta frequência. Normalmente a taxa de ocorrência deste efeito é baixa, geralmente



quando não é possível realizar o teste, são inseridas mitigações que protegem o componente ao receber o transiente de corrente.

2.2. Classe de componentes quanto a radiação

Normalmente os componentes eletrônicos são suscetíveis aos danos provocados pela radiação. Componentes com maior tolerância a estes efeitos possuem algumas variações de construção e fabricação, necessitando de um cuidadoso desenvolvimento e testes em radiação para verificar seu desempenho. Isso aumenta o custo, inviabilizando acompanhar os desenvolvimentos mais recentes dos componentes comerciais.

As classificações dos componentes em relação a sua resistência a radiação estão representados na tabela 1.

Tabela 1. Classe de componente referente resistência à radiação. [Fonte: Modificado de TODD, 2015]

Classe dos componentes	Resistência à Radiação	Orbita / Tempo
Comercial	< 2 Krad	Não recomendado
Tolerante à Radiação	< 30 Krad	700 Km / ~ 4 anos
Resistente à Radiação	> 100 Krad	Missões de longa duração ou interplanetárias

A determinação da resistência à radiação, só é comprovada com testes de radiação, componentes comerciais não são submetidos a tais testes, porém alguns destes componentes podem atender aos níveis de radiação previstos em um determinado projeto e obter um bom desempenho em determinada função no tempo estipulado.

2.3. Transistor 2N2222A

O Transistor é um componente fundamental na eletrônica, usando o princípio de controle de corrente, funciona como amplificador ou interruptor de sinais elétricos. Constitui uma estrutura de cristais semicondutores, sendo duas camadas de cristais do mesmo tipo de dopagem intercaladas por uma camada de cristal do tipo de dopagem oposta, correspondendo a base, as camadas externas correspondem ao emissor e coletor.

Pode-se estabelecer três estados do transistor, corte, saturação e região ativa.

Na região ativa pode-se fazer o controle da corrente coletor-emissor pela injeção de corrente na base. A junção coletor-base é polarizada reversamente e a junção base-emissor é polarizada diretamente. Proporcional a corrente de base se estabelece a corrente entre os terminais de coletor-emissor, funcionando como amplificador [BOYLESTAD, 2004].

O estado de corte corresponde a faixa onde a corrente do coletor-emissor é zero, e o estado de saturação a corrente no coletor-emissor permanece máxima mesmo com variação da corrente da base. A utilização do transistor nos seus estados de saturação e corte, de modo a conduzir corrente entre emissor e coletor, é conhecido por operação como chave. A figura 1 mostra graficamente as regiões do transistor.

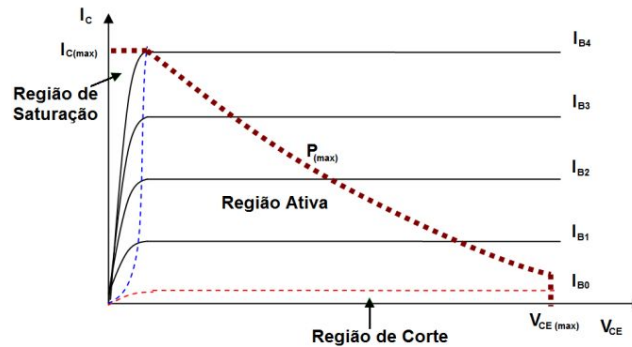


Figura 1. Regiões de operação do transistor. [Fonte: Modificado de BOYLESTAD, 2004]

O transistor analisado no presente trabalho foi o 2N2222A junção NPN, junção bipolar ou BJT(Bipolar Junction Transistor), está representado na figura 2. Este transistor é utilizado em aplicações de baixa potência, tanto como comutador como amplificador.



Figura 2. Transistor 2N2222A.

O Datasheet desse dispositivo está representado na tabela 2.

Tabela 2. Datasheet do componente. [Fontes: Vaz, 2016 e Datasheet Microsemi]

Parâmetro	Símbolo	Condição de teste	Min.	Max.
Corrente de Corte Coletor-Base	Icbo	Vcb = 75 Volts		10nA
Corrente de Corte Coletor-Emissor	Ices	Vce = 50 Volts		50nA
Corrente de Corte Emissor-Base	Iebo	Veb = 4 Volts		10nA
Ganho de Corrente DC	Hfe1	Ic = 0.1 mA, Vce = 10 Volts	50	
	Hfe2	Ic = 1.0 mA, Vce = 10 Volts	75	325
	Hfe3	Ic = 10 mA, Vce = 10 Volts	100	
	Hfe4	Ic = 150 mA, Vce = 10 Volts	100	300
	Hfe5	Ic = 500 mA, Vce = 10 Volts	30	
Tensão de Saturação Base-Emissor	Vbesat1	Ic = 150 mA, Ib = 15 mA	0,6	1,2
	Vbesat2	Ic = 500 mA, Ib = 50 mA		2
Tensão de Saturação Coletor-Emissor	Vcesat1	Ic = 150 mA, Ib = 15 mA		0,3
	Vcesat2	Ic = 500 mA, Ib = 50 mA		1



3. Método

Inicialmente, foi avaliado o comportamento dos parâmetros elétricos de 11 amostras do transistor 2N2222A. Em seguida, 5 amostras foram polarizadas na configuração ON e 5 em OFF e irradiadas, conforme a figura 3. A peça restante ficou como amostra de controle e não foi irradiada e nem alimentada, servindo como referência para as outras amostras [Vaz, 2016]. O Experimento foi realizado no LRI (Laboratório de Radiação Ionizante) do IEAv (Instituto de Estudos Avançados) à temperatura ambiente de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Os transistores foram expostos à radiação gama de uma fonte de Cobalto 60, a qual possibilita a variação da taxa de dose ajustando a distância do dispositivo da fonte [Vaz, 2016].

O teste foi realizado com uma dose total acumulada de 150 krad, sendo esta aplicada em 9 etapas de irradiação. Após o término da irradiação ficaram 24h à temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) nas mesmas condições de polarização. Depois os transistores tiveram todos os seus terminais aterrados e expostos à 100°C durante 1 semana (168 horas) [Vaz, 2016].

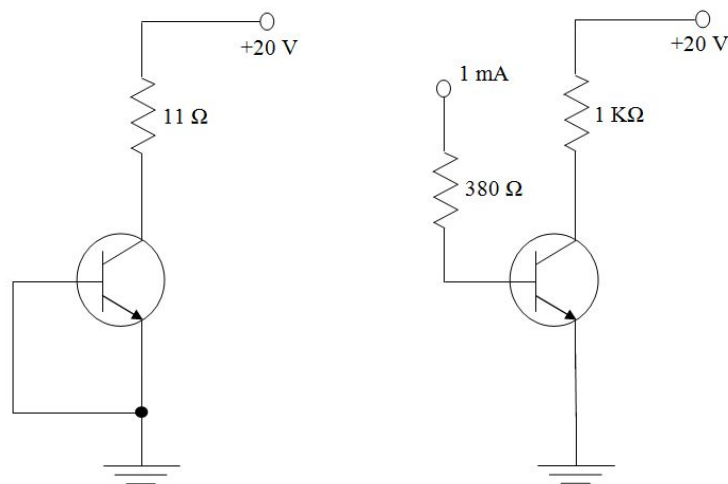


Figura 3. Polarização nas condições respectivamente OFF e ON para o ensaio TID. [Fonte: Vaz, 2016]

4. Resultados

Os resultados obtidos ao longo das doses de radiação e do recozimento estão representados nos gráficos a seguir, com as médias das polarizações ON e da polarização OFF, o transistor de referência e os limites dos parâmetros.

Na figura 4 está representado o parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base, conforme observado, as médias dos transistores nas duas polarizações não ultrapassam o limite estipulado para o componente, também não ocorrem modificações visíveis neste parâmetro.

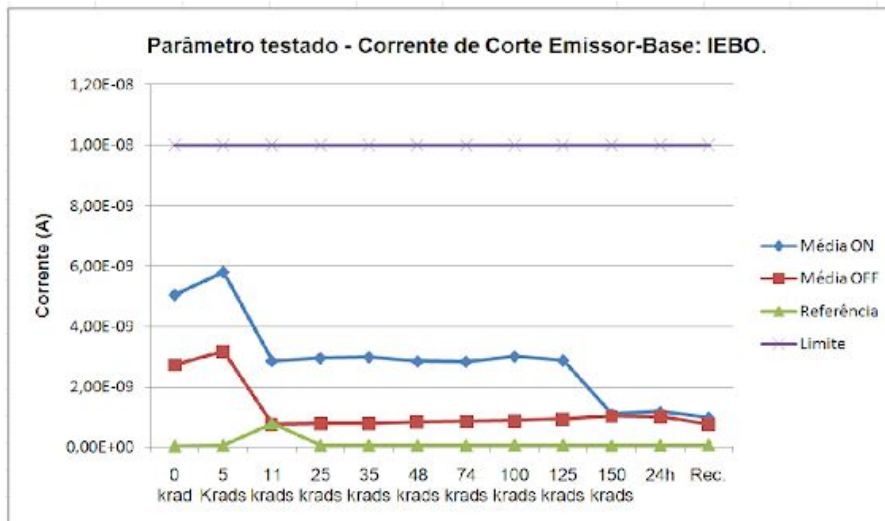


Figura 4. Gráfico do parâmetro Corrente de Corte Emissor-Base.

Nas situações de corrente de corte, ocorrem gráficos similares, não ultrapassando o valor limite.

Na figura 5, está representado o parâmetro de ganho de corrente DC, onde fica claro que a medida que o componente foi recebendo dose de radiação seu ganho foi reduzindo drasticamente, no caso da média de polarização OFF depois de 11 Krads ficaram abaixo do limite, e no caso da média de polarização ON depois de 48 Krads ficaram abaixo do limite.

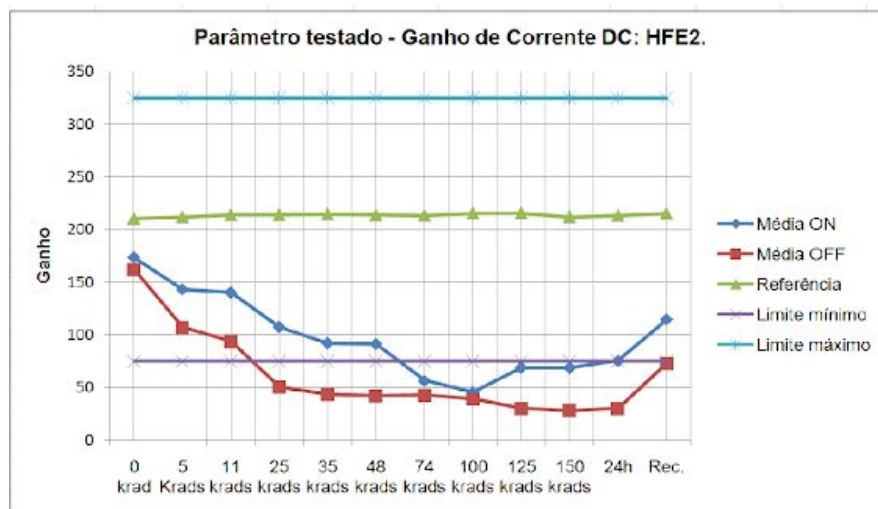


Figura 5. Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC.

Da mesma forma ocorreu nos demais parâmetros de Ganhos de Corrente DC, caindo abaixo do limite mínimo.

O recozimento com o transistor aterrado faz com que gradualmente o componente recupere as características paramétricas. No caso do ganho de corrente, em polarização ON houve uma recuperação parcial e em polarização OFF não houve recuperação.



Os Efeitos TID em transistores de tecnologia BJT são relacionados, principalmente, ao aumento da corrente de base. O que pode ser justificado devido ao aumento da relação geração/recombinação de cargas na base e/ou devido ao aumento da corrente de fuga para a base, especialmente quando há um óxido na superfície entre as regiões coletor-base-emissor, gerando um acúmulo de cargas nessas interfaces. Este aumento na corrente de base resulta em uma diminuição do ganho [Vaz, 2016].

5. Conclusão

O presente trabalho constituiu nos testes TID realizados no transistor 2N2222A verificando como foi o comportamento dos transistores irradiados tanto ON quanto OFF, relacionados ao componente de referência e verificando os limites do datasheet.

Conforme observado, os transistores para a função de amplificadores não permaneceram de acordo com as especificações, o que demonstra que os mesmos não são tolerantes aos níveis de radiação aplicados. Porém para uso como chaves a variação dos parâmetros não interferiu significativamente na operação, demonstrando que o componente atende ao uso como chave no sistema eletrônico do satélite.

Os resultados obtidos indicam a necessidade de testes para componentes COTS e significa que estes testes de forma geral são um importante recurso para o desenvolvimento de sistemas e componentes, principalmente para a área espacial, onde a obtenção de componentes resistentes à radiação não é possível para o país.

Agradecimentos: CAPES pelo apoio financeiro, IEAv, onde foram realizados os testes e ao INPE.

Referências

BOYLESTAD, Robert L; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

Datasheet Microsemi 2N2222A. Disponível em:

<https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/8898-lds-0060-datasheet> Acesso: 20 de julho de 2018.

GUSEV, A. A. et al. **Modeling of Low-altitude Quasi-trapped Proton Fluxes at the Equatorial Inner Magnetosphere**. Brazilian Journal of Physics, v. 33, n. 4, p. 7, 2003.

TODD, B.; UZNANSKI, S. **Radiation Risks and Mitigation in Electronic Systems**. CERN, 2015.

VAZ, Rafael G.; MANEA, Silvio; GONÇALEZ, Odair L. **Relatório de Ensaio - Dose Total Acumulada (TID): Levantamento de Componentes Críticos para Uso Espacial**. IEAv/INPE. São José dos Campos - SP, 2016