

光电耦合器总剂量辐照的噪声表征

李应辉^{1,2}, 陈春霞², 蒋 城², 刘永智¹

(1. 电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054; 2. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘 要: 本文在研究光电耦合器工作原理、辐照理论及 $1/f$ 噪声理论的基础上, 分析了光电耦合器辐照噪声产生机理及特性, 建立了光电耦合器总剂量辐照损伤噪声模型. 研究表明, 随着辐照总剂量增强, LED 及光敏管氧化层中引入的氧化层陷阱密度增多, 载流子数涨落增强, 从而使电压噪声功率谱密度增加. 实验结果验证理论分析的正确性, 电压噪声功率谱密度可作为光电耦合器辐照损伤表征参量.

关键词: 光电耦合器; 辐照; 噪声

中图分类号: O47, TN2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 08-1707-05

$1/f$ Noise Denoting for Radiation Tatal Dose of Optocoupler

LI Ying-hui^{1,2}, CHEN Chun-xia², JIANG Cheng², LIU Yong-zhi¹

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electroic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China;

2. Chongqing Optoelectronics Research In stitute, Chongqing 400060, China)

Abstract: Base on working principium of optocoupler, and the theory of radiation and $1/f$ noise, The mechanism and the charactory of radiation optocoupler are analysed, $1/f$ noise radiation model are established. flowing tatal dose, Flowing the radiation dose increasing, traps of LED and phototransistor increasing, fluctuate of carries growing, the power spectrum of voltage noise largening, the power spectrum of voltage noise may be a new denotable parameter for optocoupler reliability.

Key words: optocoupler, radiation, noise

1 引言

近年来, 由于光电耦合器具有体积小、寿命长、无触点、抗干扰性强等优点及光电混合集成电路技术的发展和生产工艺的日趋成熟, 光电耦合器在军用和民用领域都受到人们的普遍青睐. 太空中存在的天然高辐射、地球表面存在的低辐射以及核爆炸产生的强辐射^[1]给器件带来多种不同程度的损伤, 引起人们极大关注^[2]. 核爆炸环境下, 中子辐射、剂量率辐射和总剂量辐射使半导体材料的电学性能产生改变, 从而导致器件电路参数特性退化, 进而影响整机系统寿命. 因此, 核爆炸环境下对器件的可靠性要求甚高, 抗辐照性能逐渐成为器件可靠性关键指标之一. 近年来, 人们对光电耦合器的抗辐射加固技术进行了研究^[3], 发现, 随着电离总剂量或中子注量增强, 光电耦合器的重要、敏感参量电流传输比衰减较快, 造成器件功能丧失. 但这些研究大多是基于实验的辐射效应的研究, 对辐射损伤机理研究较少, 更没有建立和提出相应的理论模型和新的表征参量. 噪声检测方法以其测试条件接近电路正常工作条件、非破坏性和灵敏度高优点引起人们重视^[4,5]. 近年来的研究

结果表明^[4,5], 低频噪声通常是由器件中的杂质和缺陷所引起的, 如氧化层陷阱、晶格位错、界面态等, 尤其是 $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声与器件可靠性密切相关, 而这些缺陷正是影响光电耦合器件可靠性的重要因素, 又是辐照在光电耦合器中引入的主要缺陷, 故用低频噪声来表征光电耦合器的辐照损伤要比电参数直接、真实, 且对器件损伤较小. 本文在光电耦合器的辐射效应及损伤机理研究的基础上, 结合载流子数涨落的 $1/f$ 噪声理论, 建立了光电耦合器总剂量辐照的噪声表征模型, 为光电耦合器件的抗辐射研究、表征及辐射可靠性评估提供了理论依据.

2 理论

半导体光电耦合器是半导体发光元件和光敏元件组成的一种新型器件. 根据其工作原理, 本节首先研究光电耦合器件发光部分和光敏输出部分的辐照噪声产生机理, 在此基础上, 再通过耦合方式得到整个光电耦合器件辐照噪声机理. 噪声来源于物理量的随机起伏^[7], $1/f$ 噪声是粒子集体运动的普遍涨落现象, 同时也是系统内部缺陷反映之一, 故 $1/f$ 噪声携带了丰富的

缺陷信息,较热噪声,散离噪声和 $g-r$ 噪声能更好地反映器件的可靠性.本节主要研究光电耦合器在总剂量辐照下 $1/f$ 噪声变化.根据 Van der Ziel 和 Harder 等人的低频噪声分析, $1/f$ 噪声主要分为与单电子性质相关的扩散 $1/f$ 噪声和与界面态/表面态相关的复合 $1/f$ 噪声两类.根据总剂量辐照在半导体材料及器件中产生的辐照效应^[8,9],本文的噪声模型主要基于载流子数涨落模型.

根据光电耦合器总剂量辐照损伤的噪声检测理论^[10],受电离总剂量辐照,LED 氧化层因电离效应而产生电子-空穴对,在外加电场下电子在极短时间内被扫出氧化物,多数电子会逃脱原来位置而进行相对较慢的输运到达氧化物/半导体界面,部分空穴被界面处的氧化物空穴陷阱俘获形成稳定的辐射感生陷阱正电荷,引起氧化层陷阱中载流子数涨落,载流子数涨落通过调制作为表面 $g-r$ 中心的界面态引起表面复合速度的涨落,由于表面复合速度的涨落正比于载流子数涨落,故表面复合速度涨落的噪声功率谱密度正比于氧化层陷阱中载流子数涨落的噪声功率谱密度.又由于氧化层陷阱密度 N_t 正比于表面 $g-r$ 中心密度,从而也就正比于表面复合速度.所以总剂量辐照引起 LED 中的噪声主要来源于载流子数涨落,而载流子数涨落的功率谱密度正比于氧化层陷阱密度涨落,根据 pn 结表面 $1/f$ 噪声理论,LED 的电流噪声功率谱密度可表示为

$$S_{LED}(f) = (qp_1A_s)^2 \exp(qV_1/kT) \frac{CN_t}{f} \quad (1)$$

其中, q 为电荷电量, p_1 是 $V=0$ 时界面态陷阱密度, A_s 为有效复合面积, V_1 是表面复合处的电位势, N_t 是 LED 氧化层陷阱密度.

电离总剂量辐照主要在晶体管钝化层中引入氧化层陷阱电荷,氧化层陷阱电荷的涨落调节表面势,引起基区表面和发射结空间电荷区表面复合电流涨落,从而导致基极电流 I_b 的涨落,产生表面 $1/f$ 噪声.因此晶体管的辐照噪声主要来源于基极电流的涨落.根据复合理论、基极电流功率谱密度和表面载流子数涨落模型可得晶体管基极电流功率谱密度为

$$S_{I_b}(f) = D \times \frac{N_t(E_F)}{kT \ln(\tau_2/\tau_1)} \times \frac{1}{f} \quad (2)$$

$$D = \{ q^3 L_E W_{BS} s_0 n_i [\exp(u_{BE}) - 1] [\exp(u_s + u_{BE} - u_F) - \exp(u_F - u_s)] / [2 + \exp(u_s + u_{BE} - u_F) - \exp(u_F - u_s)] (\epsilon_s/L_D \sqrt{u_s} + C_{\alpha}) \} 2 \quad (3)$$

其中, L_E 为三级管发射区周长, W_{BS} 为基区表面宽度, $u_s = q\phi_s/kT$, $u_{BE} = qV_{BE}/kT$, $u_F = q\phi_F/kT$ 分别是基区表面势 ϕ_s 、发射结偏压 V_{BE} 和基区表面费米势 ϕ_F 的归一化表示, n_i 是本征载流子浓度, $s_0 = \sigma_s v_{th} kT D_u (E_i)$ 为基本表面复合速度,其中 σ_s 和 D_u 分别是界面 $g-r$ 中心的有

效俘获界面和密度, v_{th} 为载流子热运动速度, τ_1 、 τ_2 是氧化层陷阱宽范围分布的时间常数, $N_t(E_F)$ 为光敏管氧化层陷阱密度.

发光二极管和光敏三极管的噪声种类与载流子的输运方式相关^[11],在大注入条件下,结附近两种材料晶格常数的失配使得在界面处存在大量的悬挂键和弱键.在一定的应力作用下,这些悬挂键可以失去一个未成对电子或获得一个配位电子而形成界面态,弱键也会断裂形成新的界面态,结区表面原有的一些悬挂键和弱键也会以相同的方式形成新的表面态.尽管在某种情况下界面态本身并不参与载流子输运,但是当有外加电压时,结平面垂直的解离面上含有大量的表面复合中心,通过界面态复合参与载流子输运,使有效陷阱数增加.在大注入条件下复合电流的比例大幅增加,构成了总电流的主要成分.所以在电流大时,光敏三极管的低频噪声和耦合的发光二极管低频噪声都主要为复合 $1/f$ 噪声,而小注入工作区低频噪声都主要为扩散 $1/f$ 噪声.所以公式(1)、(2)所采用的表面噪声是在大注入条件下的表面复合噪声,即光电耦合器的偏置条件 $I_F \geq 5\text{mA}$.

由式(1)、(2)可得光电耦合器的电流功率谱密度为

$$S_I(f) = A^2 S_{LED}(f) + S_{I_b}(f) \quad (4)$$

其中 A^2 为发光二极管噪声耦合到光敏三极管处的耦合系数,则光电耦合器电压功率谱密度为

$$S_V(f) = S_I(f) R^2 \quad (5)$$

即

$$S_V(f) = [(Aqp_1A_s)^2 \exp(qV_1/kT) \frac{CN_t}{f} + D \times \frac{N_t(E_F)}{kT \ln(\tau_2/\tau_1)} \times \frac{1}{f}] \times R^2 \quad (6)$$

其中 R 为负载电阻值,由式(6)可知,电压功率谱密度随 LED 及光敏管的氧化层陷阱密度的增大而增大,有以上分析可知,而氧化层陷阱密度与辐射总剂量有关:随总剂量的增大而增大,故电压功率谱密度 $S_V(f)$ 随辐射总剂量增大而增大,两者正关联.

3 实验与讨论

为了得到总剂量辐照引起的光电耦合器各芯片内部缺陷变化和随之带来的 CTR 变化和噪声变化,验证上述理论分析的正确性.本文设计了以下实验,使用⁶⁰Co γ 源作为辐照源进行辐照,测量不同剂量下的电流传输比和电压噪声功率谱密度,以便进行分析.

为了保证实验的正确性和可对比性,本文采用了中国电子科技集团公司第四十四研究所研制生产的两种光电耦合器实验器件,即 A 种器件和 B 种器件各两只.实验条件及器件参数如表 1.

表 1 实验条件和器件参数表

实验样品	电流传输比 CTR(%)	辐照源	实验及测试温度(℃)	总剂量 rad(Si)				
A 种器件	A ₁ 48.70	60 Coγ 源	25	1×10 ⁴	5×10 ⁴	1×10 ⁵	5×10 ⁵	1×10 ⁶
	A ₂ 52.18							
B 种器件	B ₁ 193.3	60 Coγ 源	25	1×10 ⁴	5×10 ⁴	1×10 ⁵	5×10 ⁵	1×10 ⁶
	B ₂ 183.4							

噪声测试采用西安电子科技大学噪声及无损检测实验室的噪声测试系统分别测试器件辐照前及不同辐照总剂量下的电压噪声功率谱密度.

器件的电流传输比 CTR 随辐照总剂量的变化趋势如图 1 所示,其中图 1(a)为 A 种器件的变化趋势图,图 1(b)为 B 种器件的变化趋势图.由图 1 可知,器件 A₁ 和 A₂ 在辐照总剂量 1×10⁶rad(Si)时分别由辐照剂量为 0 时 48.704% 和 52.180% 衰减为 11.45% 和 10.91%,器件 B₁ 和 B₂ 在辐照总剂量 1×10⁶ rad(Si)时分别由辐照剂量为 0 时的 193.349% 和 183.386% 衰减为 161.06% 和 148.55%,随着辐照总剂量增强,器件的电流传输比均减少,两者负关联,与 K.A. LaBel、A.H. Johnston、和 B.G. Rax 等人^[12~14]的理论分析和实验结果相吻合.该试验结果在辐照条件下光电耦合器的电流传输比模型^[15]中亦有论述,但其主要用来验证辐照条件下光电耦合器电流传输比模型的正确性,在此可作为本文试验方案的可行性与实验数据正确的佐证

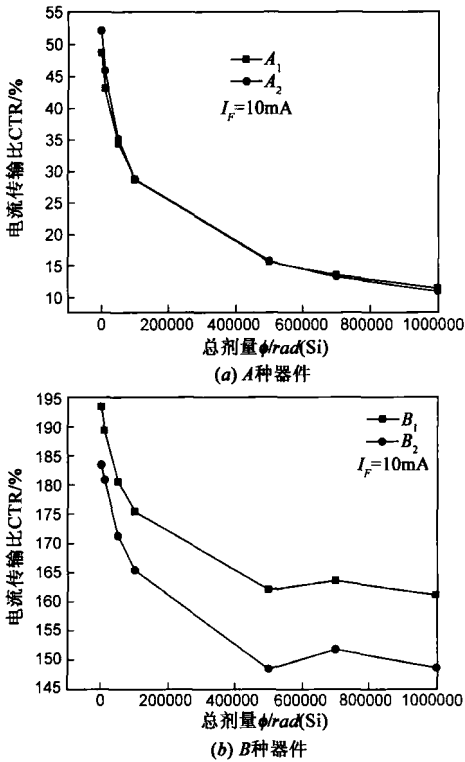


图1 器件的电流传输比随总剂量的变化趋势图

之一.

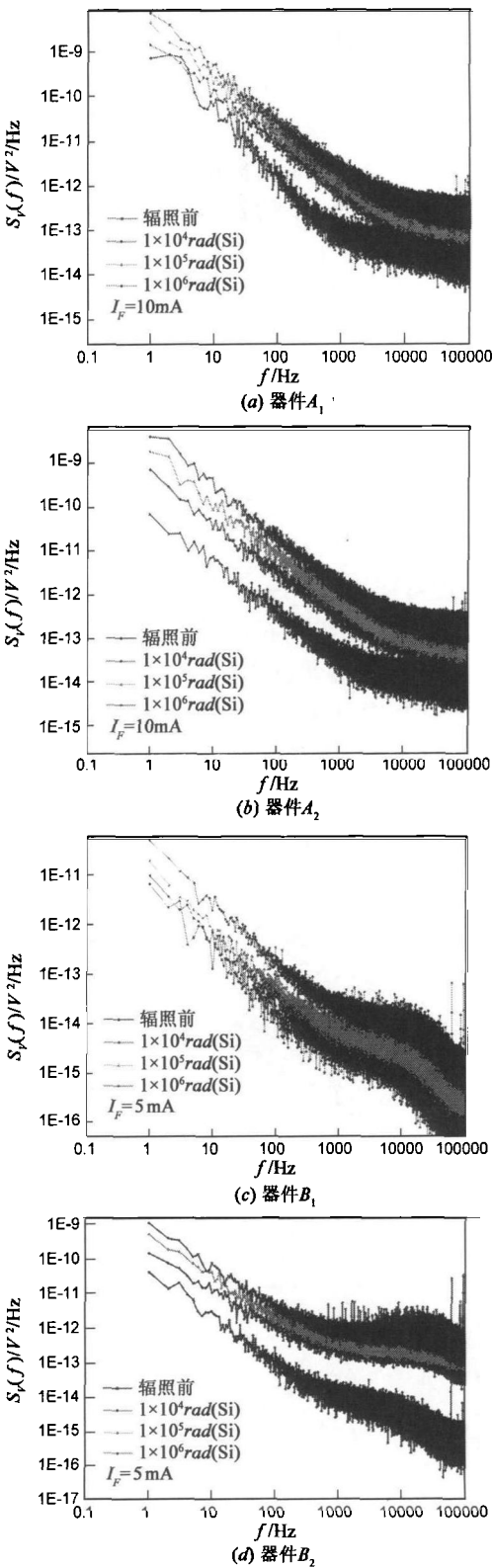


图2 辐照的电压噪声功率谱密度图

噪声功率谱密度 $S_v(f)$ 是 $1/f$ 噪声通常所采用的分析参量之一,是器件内部缺陷的集中反映,是其可靠性灵敏表征参量之一.内部缺陷增多导致 $S_v(f)$ 增大,器件的可靠性降低.图 2 给出了器件在辐照过程中的电

压噪声功率谱密度的变化趋势,由图 2 可知,随着辐照总剂量增强, $S_V(f)$ 上升,说明总剂量辐照引起光电耦合器缺陷增多,根据总剂量辐照理论可知,此时增多的缺陷主要是氧化层正空间电荷和界面态陷阱缺陷,进而导致 LED 及光敏管氧化层陷阱密度增大引起 $S_V(f)$ 上升,与第 2 部分的理论分析相一致,噪声电压功率谱密度 $S_V(f)$ 可作为光电耦合器辐照损伤表征参量之一.

不同 γ 总剂量辐照下 A_1 种器件和 B_1 种器件的 CTR 随输入电流 I_F 的变化趋势如图 3 所示, A_2 器件与 A_1 器件的该图一致, B_2 器件与 B_1 器件的该图一致,故 A_2, B_2 的该图不在此列出. 该试验结果在辐照条件下光电耦合器的电流传输比模型中亦有阐述. 由图 3 可知,随着输入电流 I_F 的增大,两型号器件的 CTR 均先增大后减少,辐照后,两器件 CTR 均衰减. 光敏管的输出取决于接受的光功率,这也正是 LED 正向电流增加,而 CTR 值也随着增加的原因. 在受到总剂量辐射后,LED 氧化层中陷阱密度增多,在禁带中引入能级,产生非辐射复合,使 LED 的输出光功率减小,光敏管光电流降低,辐射在光敏管的氧化层中引入氧化层陷阱电荷,导致基区表面复合电流增大,晶体管增益下降,因此,依赖于晶体管增益的电流也影响了 CTR 的衰减;由于工作电流会随着 LED 输出的衰减而减少,所以峰值电流

区域以下的工作电流区域电流的减小会导致 CTR 的进一步衰减. 另外,在低输入电流情况下,发光二极管中以扩散电流为主,辐射复合所占总复合的比例较大,随着输入电流增大,辐射复合的比例随之增大,输出光功率增加,CTR 变大;当输入电流足够大时,发光二极管中以复合电流为主,非辐射复合所占总复合的比例增大,随着输入电流增大,非辐射复合的比例随之增大,输出光功率下降,CTR 变小. 该实验结果间接验证了理论分析的正确性.

4 结论

为了研究光电耦合器辐照效应及损伤机理并寻找其辐照损伤表征参量,本文在研究光电耦合器工作原理、辐照理论及 $1/f$ 噪声理论的基础上,分析了光电耦合器辐照噪声产生机理及特性,建立了光电耦合器总剂量辐照损伤噪声模型. 研究结果表明,随着辐照总剂量增强,LED 及光敏管氧化层中引入的氧化层陷阱密度增多,载流子数涨落增强,从而使电压噪声功率谱密度增加. 实验结果验证理论分析的正确性,电压噪声功率谱密度可作为光电耦合器辐照损伤表征参量.

参考文献:

- [1] 宋钦歧,李德孚. 电子学抗核加固基础[M]. 北京:原子能出版社. 1986.
- [2] K A LaBel, S. D. Kniffin, R A Reed, et al. A compendium of recent optocoupler radiation test data[Z]. IEEE Rad. Eff. Data workshop. 2000. 123 - 124.
- [3] Radiation Immunity of Agilent Technologies Optocouplers[Z]. Copyright 1999 Agilent Technologies, Inc. 5954 - 1003 (11/99).
- [4] Dai Yisong, Xu Jian-sheng. The noise analysis and noiser eliability in dicators of optoelectron coupled devices[J]. Solid-State Electron, 2 000, 44(12): 1495.
- [5] Jevtic M M. Noise as a diagnostic and predication tool in reliability physics[J]. Microelectron Reliab, 1995, 35(3): 1925.
- [6] Ursutiu D, Jones B K. Low-frequency noise used as a lifetime test of LEDs[J]. Semicond Sci Technol, 1996, 24(11): 1133.
- [7] 庄奕琪,孙青. 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1993.
- [8] 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京:国防工业出版社. 2005.
- [9] 曹建中. 半导体材料中的辐射效应[M]. 北京:科学出版社. 1993.
- [10] 李应辉,陈春霞,蒋城,等. 光电耦合器辐照损伤的噪声检测[J]. 半导体光电, 2008. 29(3). 332 - 334.

LI Ying-hui, Chen Chun-xia, Jiang Cheng, et al. Noise diagnosis for radiation damage Of optocoupler[J]. Semiconductor

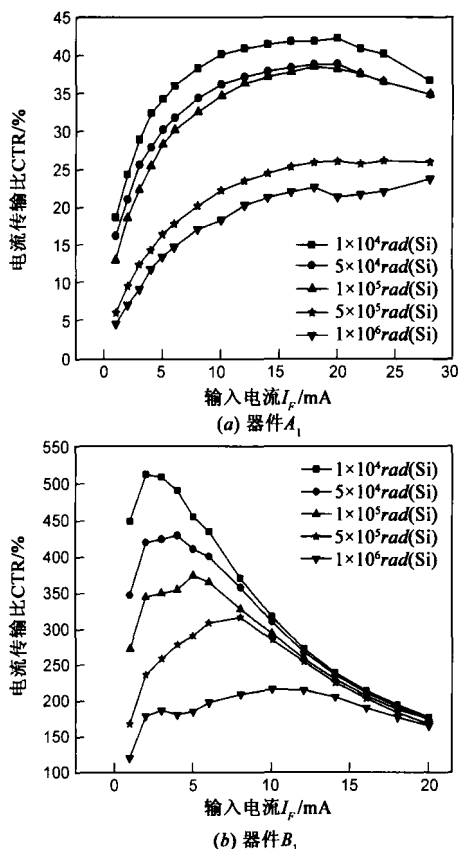


图3 电流传输比CTR在不同总剂量下随输入电流 I_F 的变化趋势图

Optoelectronics 2008, 29(3):332-334. (in Chinese)

- [11] 包军林, 庄奕琪, 杜磊. 光电耦合器件闪烁噪声模型[J]. 光子学报. 2005, 34(9):1359-1362.

Bao Junlin, Zhuang Yiqi, Du Lei, et al. A model for i/f noise in optoelectronic coupled devices[J]. Acta Photonica Sinica. 2005, 34(9):1359-1362. (in Chinese)

- [12] T F Miyahira, A H Johnston. Trends in optocoupler radiation degradation[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 2002, 49(6):2868-2873.

- [13] B G Rax, C I Lee. Total dose and proton damage in optocoupler[J]. IEEE Trans Nucl Sci 1996, 43(6):3167.

- [14] Robert A. Reed, Christian Poivey, Paul W. Marshall, et al. Assessing the impact of the space radiation environment on parametric degradation and single-event transients in optocouplers[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 2001, 48(6):2202-2209.

- [15] 李应辉, 陈春霞, 蒋城, 等. 辐照条件下光电耦合器的电流传输比模型[J]. 半导体光电, 2008, 29(2):158-161.

Li Ying-hui, Chen Chun-xia, Jiang Cheng, et al. Current transfer ratio model of optocoupler in radiations[J]. Semiconductor

Optoelectronics. 2008, 29(2):158-161. (in Chinese)

作者简介:



李应辉 男, 1967 年出生, 博士生, 研究员, 主要研究方向: 光电耦合器、光电编码器、光信号处理技术及其可靠性. 中国电子科技集团公司第 44 研究所, E-mail: lyh127@sina.com



陈春霞 女, 研究生, 1982 年出生, 工程师, 主要研究方向为光电子器件研究. 中国电子科技集团公司第 44 研究所.