

光电耦合器电离辐射损伤电流传输比 $1/f$ 噪声表征林丽艳^{1)†} 杜磊¹⁾ 包军林²⁾ 何亮¹⁾

1) (西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

(2009年11月23日收到; 2010年7月15日收到修改稿)

在研究光电耦合器电离辐射损伤机理基础上, 分别建立光电耦合器电离辐射损伤电流传输比 (CTR) 表征模型和 $1/f$ 噪声表征模型. 结果表明 CTR 退化和噪声增加都归因于辐射后光敏三极管集电结和发射结处 SiO_2/Si 界面缺陷增多. 根据 CTR 退化和噪声变化分别与辐射剂量的关系, 建立起噪声变化与 CTR 退化之间的关系, 辐照实验对表征模型正确性进行了验证. 运用噪声变化与辐射剂量的关系, 通过低剂量辐照实验可以预测高剂量辐射后光电耦合器退化程度, 故可用于评价光电耦合器抗辐射能力.

关键词: $1/f$ 噪声, 光电耦合器, 缺陷, 模型

PACS: 72.70.+m, 05.40.-a, 79.60.-i, 71.55.i

1. 引言

光电耦合器为微电子信号之间的电隔离提供有效手段, 以体积小、寿命长、无触点、抗干扰能力强等优点广泛地用于军事和航天等要求高可靠性的领域. 在各种高空辐射粒子及核爆炸射线的辐射下光电耦合器容易产生损伤, 导致可靠性降低、使用寿命缩短, 甚至使器件和系统完全失效^[1,2]. 电流传输比 CTR 出现退化是光电耦合器电离辐射后常见的和主要的失效模式^[3], 其原因可归结为发光器件和光敏器件性能退化^[4,5]. 近年来, 低频噪声在表征器件可靠性方面的优越性表现得越来越突出^[6-8], $1/f$ 噪声, $g-r$ 噪声和爆裂噪声已经成为高可靠性评估的三个独立的噪声判据^[9]. $1/f$ 噪声通常由器件中的杂质和缺陷 (如氧化层陷阱、晶格位错、界面态等) 所引起, 而这些缺陷既是辐射在光电耦合器中引入的主要缺陷^[10], 也是影响光电耦合器辐射后噪声增加的重要因素. 针对光电耦合器辐射损伤^[11,12] 和噪声表征^[13,14] 分别都有很多研究, 但是关于噪声参量来表征光电耦合器的辐射损伤模型报道还很少, 本文在研究光电耦合器电离辐射损伤电流传输比 CTR 表征模型基础上, 提出 $1/f$ 噪声表征模型, 并建立起两表征模型的关系.

2. 模型

2.1. 电离辐射损伤 CTR 表征模型

光电耦合器 CTR 的主要影响因素包括, 发光二极管的光功率 $P_L(I_{\text{LED}})$, 媒介传输系数 K , 光敏三极管的光响应度 R , 增益系数 h_{FE} . 由于光电耦合器信号在耦合介质中的传输路径都比较短, 耦合介质的电离辐射总剂量效应是可以忽略的^[15], 因此不考虑传输介质的退化影响, 认为 K 是常数. 在一定的输入电流情况下, 光电耦合器 CTR 及 CTR 相对变化率可表示为

$$\text{CTR} = \frac{I_C}{I_{\text{LED}}} = P_L(I_{\text{LED}}) K R h_{\text{FE}} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta \text{CTR}}{\text{CTR}_0} = \frac{\Delta P_L(I_{\text{LED}})}{P_L(I_{\text{LED}})_0} + \frac{\Delta R}{R_0} + \frac{\Delta h_{\text{FE}}}{h_{\text{FE}0}} \quad (2)$$

可见, CTR 相对变化率被分解为发光二极管光功率的相对变化率、光敏三极管光响应的相对变化率以及增益的相对变化率三部分. 下面分别论述电离辐射所导致这三部分变化是如何影响 CTR 变化的.

电离辐射在发光二极管中产生空间电荷和界面态^[16], 所引入的非发光缺陷能级^[17] 也就是非辐射复合中心. 非辐射复合中心的增多导致少子寿命减小^[18], 使发光二极管的量子效率降低, 表现为电

† E-mail: linliyan568@yahoo.cn

离辐射后发光二极管在给定电流偏置下的光功率减小. 但是大量研究表明, 位移效应会对发光二极管造成严重损伤, 而电离效应对发光二极管的损伤是很小的^[2, 19-21], 可以将发光二极管的电离辐射损伤忽略.

发光二极管发出的光在光敏三极管集电结处产生电子-空穴对, 只有存在于空间电荷区以及空间电荷区两侧一个扩散长度之内的电子-空穴对才有可能被内建电场分离形成光电流. 因此光敏三极管光电流的组成表示为

$$I_{ph} = I_n + I_p + I_d$$

$$= 2qAP_L(I_{LED})K[\alpha_1 X + \alpha_2(L_n + L_p)], \quad (3)$$

式中, q 为电子电荷, A 为光敏面积, α_1 为集电结空间电荷区出光子产生率, α_2 为扩散长度区域内光子产生率, X 为空间电荷区宽度, L_n 为电子扩散长度, L_p 为空穴扩散长度.

光敏三极管集电结处 SiO_2 钝化层经电离辐射后, 在 SiO_2/Si 界面处产生正电荷积累和界面态陷阱电荷^[2]. 辐射后少子扩散长度减小, 这是由于辐射所产生的缺陷减小少子寿命, 从而导致光敏三极管光响应退化^[5, 19]. 光响应退化主要是由集电极轻掺杂的表面复合引起的, 所以光响应的退化主要是受到靠近集电极一侧少子扩散长度范围内界面陷阱电荷的影响. 因此光响应的表达式为

$$R = 2qA[\alpha_1 X + \alpha_2(L_n + L_p)]$$

$$= 2qA(\alpha_1 X + \alpha_2 L_p). \quad (4)$$

根据半导体物理理论可知少子扩散长度与少子寿命关系为 $L_p^2 = \tau_p D_p$, 少子寿命与缺陷密度关系为 $\tau_p = \frac{1}{\sigma_p \nu_{th} N_{t2}}$, 其中 τ_p 为空穴少子寿命, σ_p 为空穴俘获系数, ν_{th} 为载流子热运动速度, N_{t2} 为集电极区界面陷阱电荷密度. 可推出光响应与界面陷阱电荷密度的关系, 如(5)式所示, 器件经辐射后界面陷阱电荷密度增加导致光响应的退化

$$R = 2qA\left(\alpha_1 X + \alpha_2 \sqrt{\frac{D_p}{\sigma_p \nu_{th} N_{t2}}}\right), \quad (5)$$

$$\Delta R = -qA\alpha_2 L_p \cdot \frac{\Delta N_{t2}}{N_{t20}}. \quad (6)$$

根据文献[22]可知, 少子寿命倒数变化与辐射剂量的关系可表示为

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau_p}\right) = \frac{D}{K_1}, \quad (7)$$

其中, K_1 是寿命损伤系数, D 为辐照剂量. 将(7)式代

入(6)式可得光响应变化与辐射剂量的关系如下:

$$\Delta R = -qA\alpha_2 L_p \cdot \tau_{p0} \cdot \Delta\left(\frac{1}{\tau_p}\right)$$

$$= -qA\alpha_2 L_p \cdot \tau_{p0} \cdot \frac{D}{K_1}. \quad (8)$$

光响应的相对变化率与辐射剂量成反比.

辐射后光敏三极管产生光电流的减小会减少进入基极并聚集在基极的空穴数量, 使发射结势垒降低程度减少, 所以外电路中的光电流取决于集电结注入电流的大小. 又由于辐射在钝化层中引入氧化层陷阱电荷, 基区表面复合速度和表面处非平衡电子浓度增大, 使基极表面复合电流增加, 三极管增益 h_{FE} 下降^[19]. 由 $h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$ 的 h_{FE} 相对漂移量^[23]

$$\frac{\Delta h_{FE}}{h_{FE0}} = -\frac{\Delta I_B}{I_{B0}} = -\frac{1}{I_{B0}} \frac{dI_B}{du_s} \cdot \frac{du_s}{dN_s} \cdot \frac{dN_s}{dn_1}$$

$$\times \int_0^{x_0} N_{t3}(x) (1 - e^{-\frac{x}{\tau(x)}}) dx, \quad (9)$$

式中 u_s 是归一化基区表面势, N_s 是基区表面空间电荷区单位面积电荷量, n_1 是单位面积氧化层陷阱中的电荷量, $N_{t3}(x)$ 为发射结界面陷阱电荷密度.

$$\Delta\left(\frac{1}{h_{FE}}\right) = K_2 D, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta h_{FE}}{h_{FE0}} = -K_2 D h_{FE}, \quad (11)$$

式中, $\Delta\left(\frac{1}{h_{FE}}\right)$ 是共射电流增益倒数变化, K_2 为损伤系数, D 为辐照剂量.

综上, 光电耦合器 CTR 相对变化率 $\frac{\Delta \text{CTR}}{\text{CTR}_0}$ 与缺陷的关系具体可表示为

$$\frac{\Delta \text{CTR}}{\text{CTR}_0} \approx -\frac{1}{R_0} qA\alpha_2 L_{p0} \cdot \frac{\Delta N_{t2}}{N_{t20}}$$

$$- \frac{1}{I_{B0}} \frac{dI_B}{du_s} \cdot \frac{du_s}{dN_s} \cdot \frac{dN_s}{dn_1}$$

$$\times \int_0^{x_0} N_{t3}(x) (1 - e^{-\frac{x}{\tau(x)}}) dx, \quad (12)$$

而 $\frac{\Delta \text{CTR}}{\text{CTR}_0}$ 与辐射量的变化可表示为

$$\frac{\Delta \text{CTR}}{\text{CTR}_0} = -\frac{1}{R_0} qA\alpha_2 L_p \cdot \frac{D}{K_1 \sigma_p \nu_{th} N_{t20}} - K_2 D h_{FE}$$

$$= -\left(\frac{qA\alpha_2 L_p}{R_0 K_1 \sigma_p \nu_{th} N_{t20}} + K_2 h_{FE}\right) \cdot D. \quad (13)$$

可见 CTR 的相对变化率主要受到发光二极管、

光敏三极管集电结、发射结中界面陷阱电荷密度的影响. 电离辐射使这些缺陷增加, 最终导致 $\frac{\Delta\text{CTR}}{\text{CTR}_0}$ 随辐射剂量的增加而减小. 由于光敏三极管增益 h_{FE} 随辐射剂量增加必然降低, 故 $\frac{\Delta\text{CTR}}{\text{CTR}_0}$ 减小的斜率是逐渐减小的.

2.2. 电离辐射损伤 $1/f$ 噪声表征模型

光电耦合器件的低频噪声主要来自于发光二极管、光敏三极管的集电结和发射结空间电荷区表面附近的陷阱电荷对载流子的俘获和发射. 文献 [24] 已给出的发光二极管 $1/f$ 噪声模型可以用于描述发光二极管电离辐射损伤, 如下式:

$$S_{I_{\text{LED}}}(f) = \frac{\alpha q}{f\tau} \cdot \eta_0 \cdot I_{\text{LED}} + \left(\frac{qn_1 A}{I_0}\right)^2 \times B \cdot \frac{kTN_{t1}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \times \frac{1}{f} \cdot [(1 - \eta_0) \cdot I_{\text{LED}}]^2, \quad (14)$$

发光二极管噪声由表面 $1/f$ 噪声和体 $1/f$ 噪声组成. 光敏三极管集电结处 SiO_2 钝化层经电离辐射后, 类似得在 SiO_2/Si 界面处产生正电荷积累和界面态陷阱电荷^[3], 故此处噪声主要为表面 $1/f$ 噪声, 光电流噪声与界面陷阱电荷密度的关系为

$$S_{I_{\text{PH}}}(f) = \left(\frac{qn_1 A}{I_0}\right)^2 \cdot B \times \frac{kTN_{t2}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f} \cdot I_{\text{PH}}^2. \quad (15)$$

(14), (15) 式中相关参量 $\eta_0 = 2Bm_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right) / CN_{t1} + 2Bm_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)$, $S_{I_{\text{LED}}}(f)$ 为二极管电流噪声, α 为胡格常数, I_{LED} 为发光二极管偏置电流, τ 为少子寿命, η_0 为相关参量, q 为电子电量, f 为频率, A, B 为常数, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, N_{t1} 为发光二极管界面陷阱电荷密度, $S_{I_{\text{PH}}}(f)$ 为光敏三极管集电结处电流噪声, I_{PH} 为光电流, N_{t2} 为光敏三极管集电结界面陷阱电荷密度.

对于三极管中的 $1/f$ 噪声已有比较成功的模型表示式^[17]

$$S_{I_c}(f) = [S_{I_{\text{BE}}}(f) + S_{I_{\text{BC}}}(f)] h_{\text{FE}}^2 + S_{I_{\text{CE}}}(f) = S_{I_{\text{B}}}(f) h_{\text{FE}}^2 + S_{I_{\text{CE}}}(f), \quad (16)$$

式中 $S_{I_c}(f)$ 为集电结电流噪声, $S_{I_{\text{BE}}}(f)$ 为发射结电

流噪声, $S_{I_{\text{BC}}}(f)$ 为集电结电流噪声, $S_{I_{\text{CE}}}(f)$ 为集电极与发射极之间的电流噪声, $S_{I_{\text{B}}}(f)$ 为基极电流噪声, h_{FE} 为电流放大倍数.

氧化层陷阱电荷的涨落通过调制表面势, 引起基区表面和发射结空间电荷区表面复合电流的涨落, 从而导致基极电流 I_{B} 的涨落, 产生噪声. 这种噪声因出现在管子的输入端, 故对其噪声性能影响较大. 因为基区电流主要表现为基区表面和发射结空间电荷区的复合电流, 所以基区表面和发射结空间电荷区中表面和位错引起的复合噪声可以表示为^[17]

$$S_{I_{\text{B}}}(f) = \left\{ \frac{q^2 [e^{u_s + u_{\text{BE}} - u_{\text{F}}} - e^{u_{\text{F}} - u_s}]}{\frac{\epsilon_s}{L_{\text{D}}} \sqrt{u_s} + C_{\text{ox}}} \right\}^2 \times \frac{kTN_{t3}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f} \cdot I_{\text{B}}^2, \quad (17)$$

式中, 式中 u_s 为归一化基区表面势, u_{BE} 为归一化发射结电势, u_{F} 为归一化基区表面费米势, C_{ox} 为基区表面氧化层的单位面积电容, L_{D} 为德拜长度, ϵ_s 为硅介电常数, N_{t3} 为光敏三极管发射结界面陷阱电荷密度.

$S_{I_{\text{CE}}}(f)$ 主要是电子从发射区注入基区并被收集区收集引起的扩散 $1/f$ 噪声, 研究表明收集极 $1/f$ 噪声属于正常散射量子 $1/f$ 噪声. 故收集极 $1/f$ 噪声可以表示如下^[17]:

$$S_{I_{\text{CE}}}(f) = \frac{qI_{\text{C}}D_n}{W_{\text{B}}^2 f} \frac{\alpha_{\text{H}}}{f} \ln\left(1 + \frac{\nu_n W_{\text{B}}}{D_n}\right), \quad (18)$$

式中 D_n 为电子扩散系数, W_{B} 为基区宽度, α_{H} 为胡格系数, ν_n 是 $x = W_{\text{B}}$ 处的载流子速度.

对光敏三极管来说, $S_{I_{\text{BC}}}(f)$ 还包括光电流的扩散 $1/f$ 噪声. 对于光电耦合器来说, 还要考虑发光二极管对光电耦合器输出噪声的耦合贡献. 发光二极管的噪声远比光电耦合器输出噪声小, 如果考虑发光二极管和光敏三极管之间的电耦合, 传递到光敏三极管的发光二极管噪声要比发光二极管本身产生的噪声还要小^[13], 所以在噪声分析过程中将发光二极管噪声忽略. 综合考虑各部分噪声后, 光电耦合器输出端噪声可用下式表示:

$$S_{I_c}(f) = S_{I_{\text{LED}}}(f) \cdot (\text{CTR})^2 + S_{I_{\text{PH}}}(f) \cdot h_{\text{FE}}^2 + S_{I_{\text{B}}}(f) h_{\text{FE}}^2 + S_{I_{\text{CE}}}(f) = [S_{I_{\text{PH}}}(f) + S_{I_{\text{B}}}(f)] \cdot h_{\text{FE}}^2 + S_{I_{\text{CE}}}(f) = \frac{kT(C_1^2 \cdot N_{t3} + C_2^2 \cdot N_{t2})}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f} \cdot I_{\text{B}}^2 \cdot h_{\text{FE}}^2$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{qI_c D_n}{W_B^2} \frac{\alpha_H}{f} \ln\left(1 + \frac{\nu_n W_B}{D_n}\right) \\
 & = \frac{kT(C_1^2 \cdot N_{i3} + C_2^2 \cdot N_{i2})}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f} \cdot I_c^2 \\
 & + \frac{qD_n}{W_B^2} \frac{\alpha_H}{f} \ln\left(1 + \frac{\nu_n W_B}{D_n}\right) \cdot I_c, \quad (19)
 \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned}
 C_1^2 & = \left(\frac{qn_1 A}{I_0}\right)^2 \cdot B, \\
 C_2^2 & = \left\{ \frac{q^2 [e^{u_s + u_{BE} - u_F} - e^{u_F - u_s}]}{\frac{\mathcal{E}_s}{L_D} \sqrt{u_s} + C_{ox}} \right\}^2.
 \end{aligned}$$

化简后光电耦合器输出端噪声由两部分组成,第一部分与 I_c 平方的乘积,第二部分与 I_c 成正比.从式子可看出光电耦合器输出端噪声与缺陷和 I_c 成正比.在 I_c 不变的条件下测试光电耦合器输出噪声,由于辐照导致缺陷增多,故光电耦合器输出噪声必然增大.电离辐射主要使光电耦合器中 SiO_2/Si 界面处陷阱电荷增多,由于界面陷阱电荷密度 $\Delta N_{i2}, \Delta N_{i3}$ 都与辐射剂量 D 是成正比关系^[25],从模型可推导出在固定 I_c 条件下光电耦合器输出噪声变化也与辐射剂量 D 成正比例关系,表示如下:

$$\begin{aligned}
 & C_1^2 \cdot \Delta N_{i3} + C_2^2 \cdot \Delta N_{i2} \\
 & = (C_1^2 + C_2^2) \cdot \frac{1}{2} N_{\text{SiH}} \sigma_{\text{DH}} \sigma_{\text{it}} N_{\text{DH}} \kappa_g f_y t_{\text{ox}}^2 D, \quad (20) \\
 \Delta S_{I_c}(f) & \\
 & = (C_1^2 + C_2^2) \cdot \frac{kTN_{\text{SiH}} \sigma_{\text{DH}} \sigma_{\text{it}} N_{\text{DH}} \kappa_g f_y t_{\text{ox}}^2 D}{2\ln(\tau_2/\tau_1)} \\
 & \times \frac{1}{f} \cdot I_c^2. \quad (21)
 \end{aligned}$$

综合两式可以得出

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{I_c}(f) & = - (C_1^2 + C_2^2) \\
 & \times \frac{kTN_{\text{SiH}} \sigma_{\text{DH}} \sigma_{\text{it}} N_{\text{DH}} \kappa_g f_y t_{\text{ox}}^2}{2\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f} \cdot I_c^2 \\
 & \times \frac{\Delta \text{CTR}}{\left(\frac{qA\alpha_2 L_p}{R_0 K_1 \sigma_p \nu_{\text{th}} N_{i20}} + K_2 h_{\text{FE}}\right) \text{CTR}_0}. \quad (22)
 \end{aligned}$$

(22)式建立起电流传输比变化 ΔCTR 与光电耦合器输出噪声变化 $\Delta S_{I_c}(f)$ 的关系. ΔCTR 是常规光电耦合器辐照损伤表征参量,模型推得光电耦合器输出噪声也是光电耦合器辐照损伤很好的表征参量,两者通过辐射产生缺陷相联系.

3. 实验结果及讨论

实验样品为光电耦合器 4N25,此样品由 GaAs 红外发光二极管和硅光敏三极管组成.辐照实验在西北核技术研究所 Co^{60} γ 射线源上进行,辐射剂量率采用热释光方法标定.辐射剂量率为 $0.5\text{Gy}(\text{Si})/\text{s}$,累计总剂量分别为 $30\text{Gy}(\text{Si}), 600\text{Gy}(\text{Si}), 1000\text{Gy}(\text{Si})$.分别测试不同剂量辐照后光电耦合器 CTR 和光电耦合器光敏三极管 CE 两端的电压噪声功率密度.电压噪声功率密度通过换算可得到相应的电流噪声功率密度, $S_I = \frac{S_V}{R_p^2}, R_p = \frac{R_D R_L}{R_D + R_L}$, R_D 是测试端等效电阻, R_L 是负载电阻.电流噪声功率谱密度与电流的关系可以表示为 $S_I(f) \propto I^\beta$,若 $\beta \approx 1$,主要为体 $1/f$ 噪声;若 $\beta \approx 2$,主要为表面 $1/f$ 噪声.

如图 1 所示,光电耦合器 CTR 相对变化率 $\Delta \text{CTR}/\text{CTR}_0$ 随辐照剂量的增加迅速减小. γ 辐照分别在发光二极管,光敏三极管集电结和发射结界面处产生大量界面陷阱电荷,界面陷阱电荷密度的增多导致发光二极管发光功率、光敏三极管光响应以及电流增益的退化.由 CTR 电离辐射损伤模型可知,光电耦合器的电离辐射损伤主要表现为光敏三极管光电流退化以及增益退化.在光电耦合器输入电流不变时,光敏三极管的光响应电流减小,加之光敏三极管的电流增益的降低,集电极电流会越来越小,因此导致一定电流偏置下光电耦合器 CTR 的下降.但是 $\Delta \text{CTR}/\text{CTR}_0$ 并不是随辐照剂量呈线性减小的,通过实验数据拟合可看到其减小的斜率是越来越小的.这个现象与电离辐射损伤 CTR 模型相符合,原因是 $\Delta \text{CTR}/\text{CTR}_0$ 随辐射剂量的增加而减小的比例系数与光敏三极管电流增益 h_{FE} 有关,而光敏三极管电流增益 h_{FE} 是随辐照剂量增加而逐渐降低的.若以 CTR 退化 50% 认为光电耦合器失效,则此器件在 1000Gy 辐照后失效.

光电耦合器输出电流噪声功率谱密度随辐照剂量的增加而增加(如图 2 所示).与辐照前相比,经 1000Gy 剂量辐照后噪声增加了将近一个数量级.实验结果表明光电耦合器的输出噪声随辐照剂量增加而增加,这是由于辐照后缺陷增多而导致的,实验结果验证了理论模型的正确性.光电耦合器器件的低频噪声主要来自于 pn 结空间电荷区及其表面附近的陷阱对载流子的俘获和发射.电离辐射

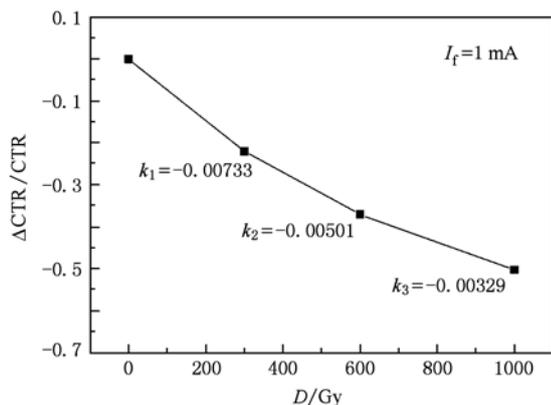


图1 CTR 相对变化率随辐照剂量的变化

主要在光电耦合器中光敏三极管集电结和发射结 SiO₂/Si 界面处产生界面陷阱电荷,而该处界面陷阱电荷密度随辐射剂量呈线性增加,因此噪声变化量与辐射剂量同样为线性关系. 噪声幅值 B 是噪声功率谱的重要表征参量,可通过噪声分析软件从噪声功率谱拟合得到. 图 3 给出电流噪声幅值相对变化率随辐照剂量的变化,经拟合后基本成线性关系,这与噪声模型结论相一致.

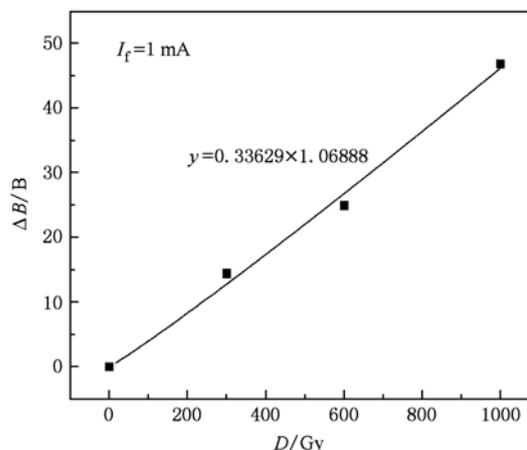


图3 电流噪声幅值相对变化率随辐照剂量的变化

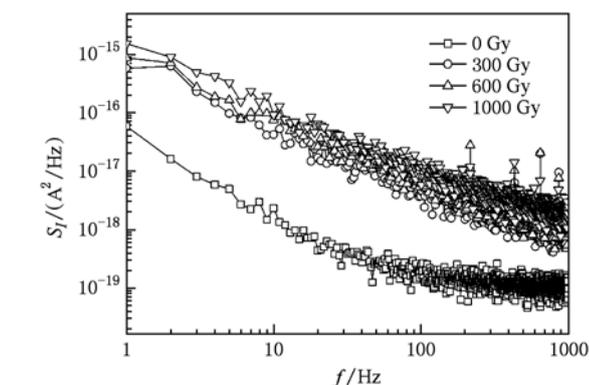


图2 光电耦合器输出电流噪声功率谱

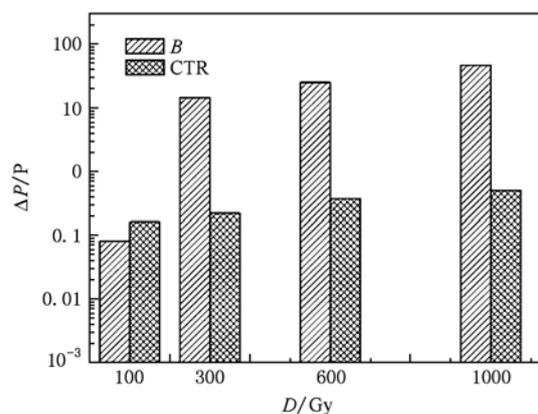


图4 $|\Delta CTR/CTR|, \Delta B/B$ 随辐照剂量变化对比

图 4 为光电耦合器电流传输比相对变化率的绝对值 $|\Delta CTR/CTR|$ 、噪声幅值相对变化率 $\Delta B/B$ 随辐照剂量变化的半对数坐标对比图. 可见 $|\Delta CTR/CTR|, \Delta B/B$ 的变化趋势是一致的. 在 1000Gy 剂量辐照后, $|\Delta CTR/CTR|$ 变化了 50%, 而 $\Delta B/B$ 值增加了 4680%, $\Delta B/B$ 可以有效地反映辐照对光电耦合器所造成的损伤. CTR 退化是光电耦合器失效的主要模式,经分析主要表现为光敏三极管集电结处 N_2 增加和发射结处 N_3 增加,在研究缺陷与辐射剂量的关系后,可将 CTR 退化与辐射剂量关系表示为 (13) 式. 噪声的增加同样归因于 N_2 和 N_3 的作用,

借鉴 SiO₂/Si 界面处陷阱电荷密度与辐射剂量的关系,如(21)式所示. 相比较,尽管 $|\Delta CTR/CTR|$ 随辐射剂量增加而减小,但光敏三极管增益随辐射剂量的变化很难确定,导致其在光电耦合器抗辐射能力预测方面有所限制,而噪声变化随辐射剂量线性增加的关系,使其能够更简便可行得通过小剂量辐照来预测高剂量辐射使光电耦合器性能的退化. 另外,(22)式给出 CTR 变化与噪声变化之间的关系,所以通过测试噪声参量可以推断出 CTR 的变化量. CTR 参量是光电耦合器传统的辐射损伤表征参量,因此通过测试噪声参量可以达到表征光电耦合器辐射损伤的目的.

从图 4 中还观察到 100Gy 剂量辐照后 $\Delta B/B$ 略小于 $|\Delta CTR/CTR|$,但 1000Gy 剂量辐照后噪声参量变化远远大于 CTR 参量. 这是因为噪声参量变化量源于辐照产生的缺陷多少,较小剂量辐照所产生的缺陷还不足以掩盖材料本身存在着工艺缺陷,也

就是较小剂量辐照后噪声参量不会发生很大的变化,甚至略小于 CTR 参量的变化,但这并不影响噪声参量很好的预测能力. 随辐照剂量增加,大量的缺陷产生,噪声参量迅速增加. 这都证实了相对 CTR 参量噪声参量与辐照在光电耦合器中产生的缺陷联系更紧密. 由于噪声参量与辐射剂量的定量关系,使其在表征光电耦合器电离辐射损伤程度方面具有突出的优势.

4. 结 论

本文通过分析电离辐射在光电耦合器中产生

的损伤,发现 CTR 退化和噪声增加都可以归结为光敏三极管发射结和集电结 SiO_2/Si 处缺陷的作用. 以辐射产生缺陷为基础,分别建立光电耦合器电离辐射损伤 CTR 模型和 $1/f$ 噪声模型. 再研究缺陷与辐照剂量关系后,建立 CTR 和噪声与辐照剂量的关系,将两者结合得到噪声变化与 CTR 变化的关系. 实验结果对模型进行了很好地验证. 通过 CTR 与噪声幅值的对比,可看出噪声参量能更好地表征光电耦合器的电离辐射损伤. 运用噪声变化与辐射剂量的关系,可以通过低剂量辐射实验来预测高剂量辐射后器件的退化,在光电耦合器抗辐射能力评价方面具有重要意义.

- [1] LaBel K A, Kniffin S D, Reed R A 2000 *IEEE Rad. Eff.* 123
- [2] Chen P X 2005 *Radiation Effects on Semiconductor Devices and Integrated Circuits* (National Defense Industry Press) (in Chinese) [陈盘训 2005 半导体器件和集成电路的辐射效应(国防工业出版社)]
- [3] Johnston A H, Tetsuo F 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2649
- [4] Hu J, Du L, Zhuang Y Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1384 (in Chinese) [胡 瑾、杜 磊、庄奕琪等 2006 物理学报 **55** 1384]
- [5] Mangeret R, Bonora L, Bouchet T 2001 *Radiation and Its Effects on Components and Systems* **6** 166
- [6] Liu Y A, Du L, Bao J L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2468 (in Chinese) [刘宇安、杜 磊、包军林等 2008 物理学报 **57** 2468]
- [7] Peng S Q, Du L, Zhuang Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5201 (in Chinese) [彭绍泉、杜 磊、庄奕琪等 2008 物理学报 **57** 5201]
- [8] Yang L X, Du L, Bao J L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5869 (in Chinese) [杨丽侠、杜 磊、包军林等 2008 物理学报 **57** 5869]
- [9] Dai Y S, Xu J S 2000 *Solid-State Electronics* **44** 1495
- [10] Johnston A H, Rax B G 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 675
- [11] Miyahira T F, Johnston A H 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2868
- [12] Jerry L, Gorelick, Raymond L 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3730
- [13] Konczakowska, Cichosz J, Szewczyk A 2007 *Opto-Electron. Re* **15** 149
- [14] Milan M Jevtic 2004 *Miroelectron. Reliab* **44** 1123
- [15] Reed R A, Christian P, Paul W M 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 2202
- [16] Bao J L, Zhuang Y Q, Du L 2005 *Acta Photonica Sinica* **34** 1359 (in Chinese) [包军林、庄奕琪、杜 磊 2005 光子学报 **34** 1359]
- [17] Zhuang Y Q, Sun Q 1993 *Noise and its Minimizing Technology in Semiconductor Devices* (National Defense Industry Press) (in Chinese) [庄奕琪、孙 青 1993 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术(国防工业出版社)]
- [18] Bajenescio M Sc 1994 *Proceedings of Electrotechnical Conference* **2** 571
- [19] Rax B G, Lee C I, Johnston A H 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 3167
- [20] Johnston A H, Rax B G, Selva L E 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1781
- [21] Lischka H 1994 *RADECS93 Proceeding* 226
- [22] Reed R A, Marshall P W, Johnston A H 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2833
- [23] Zhuang Y Q, Sun Q, Yang Y T 1989 *Research & Progress of Solid State Electronics* **9** 202 (in Chinese) [庄奕琪、孙 青、杨银堂 1989 固体电子学研究进展 **9** 202]
- [24] Hu J, Du L, Zhuang Y Q 2007 *Chinese Journal of Semiconductors* **28** 597 (in Chinese) [胡 瑾、杜 磊、庄奕琪 2007 半导体学报 **28** 597]
- [25] Chen W H, Du L, Zhuang Y Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4090 (in Chinese) [陈伟华、杜 磊、庄奕琪等 2009 物理学报 **58** 4090]

Noise as a characteristic for current transmitting rate of optoelectronic coupled devices for ionization radiation damage

Lin Li-Yan^{1)†} Du Lei¹⁾ Bao Jun-Lin²⁾ He Liang¹⁾

1) (School of Technology Physics, Xi dian University, Xi'an 710071, China)

2) (Microelectronic Institute, Xi dian University, Xi'an 710071, China)

(Received 23 November 2009; revised manuscript received 15 July 2010)

Abstract

Based on the mechanism of ionization radiation damage in optoelectronic coupled devices (OCDs), the characteristic models of current transmitting rate (CTR) and $1/f$ noise are established. The results show that CTR degradation and noise increase are due to the increase of SiO_2/Si interface defects at the collector junction and emit junction in phototransistor. The relationship between CTR degradation and noise change is established by the radiation dose. The correctnesses of characteristic models are validated in experiment. By the relationship between noise change and radiation dose, the high-dose radiation degradation can be predicted through the low-dose irradiation experiment. So noise can be used to evaluate the radiation tolerance of OCDs.

Keywords: $1/f$ noise, OCDs, defect, model

PACS: 72.70.+m, 05.40.-a, 79.60.-i, 71.55.i

† E-mail: linliyan@568@yahoo.cn