

# 光电耦合器件 $g-r$ 噪声模型 \*

包军林 庄奕琪 杜磊 吴勇 马仲发

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

**摘要:** 在宽范围偏置条件下, 测量了光电耦合器件的  $g-r$  (产生-复合) 噪声. 实验结果表明, 随着偏置电流的增加,  $g-r$  噪声逐渐向高频移动, 其噪声幅值呈现先增加后减小的变化规律. 通过测量前级噪声和后级噪声, 发现光电耦合器件  $g-r$  噪声来源于后级的光敏三极管. 基于载流子数涨落机制, 建立了一个光电耦合器件  $g-r$  噪声的定量分析模型. 实验结果和本文模型符合良好.

**关键词:**  $1/f$  噪声;  $g-r$  噪声; 光电耦合器件; 深能级缺陷

**PACC:** 8630J; 7270; 8820W

**中图分类号:** TN36      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2005)06-1208-06

## 1 引言

光电耦合器件以其良好的隔离特性广泛用于一些特殊领域, 尤其是军事领域. 近来的研究结果表明<sup>[1]</sup>, 低频噪声, 尤其是  $g-r$  (产生-复合) 噪声已经成为光电耦合器件可靠性, 甚至成为正常工作的严重威胁. 光电耦合器件的低频噪声通常表现为  $1/f$  噪声和  $g-r$  噪声的叠加, 随着偏置条件的变化, 可在很大的频率范围内观测到  $g-r$  噪声. 在时域内,  $g-r$  噪声表现为大幅度的“台阶”波形, 严重影响器件的工作特性. 更重要的是  $g-r$  噪声的出现反映了器件内部的潜在缺陷, 通常认为重金属杂质和位错等在半导体器件禁带中引入的深能级是  $g-r$  噪声的主要来源<sup>[2]</sup>. 通过测量  $g-r$  噪声的幅值和特征频率可以得到反映该类缺陷的两个主要参数: 陷阱能级及其复合与发射载流子的时常数, 因而测量  $g-r$  噪声已经成为表征半导体材料和器件内部缺陷及其可靠性的一种重要手段<sup>[2-6, 8-10, 12]</sup>. 但是, 现有的实验结果和理论模型均集中在通常的 MOSFET, JEFET, BJT 等微电子器件<sup>[2, 4, 5]</sup> 和 LED, LD 等光电子器

件<sup>[3, 6, 8-10]</sup> 中, 光电耦合器件  $g-r$  噪声理论模型的研究尚未见报道. 仅有的研究也只是报道实验结果<sup>[1]</sup>, 其产生机理尚未清楚, 至今没有一个完善的理论模型来解释现有的实验结果, 因而也限制了噪声在光电耦合器件可靠性表征中的应用.

本文在宽范围偏置电流条件下测量了光电耦合器件的  $g-r$  噪声. 实验结果表明, 随着输入电流的增加,  $g-r$  噪声逐渐向高频移动, 其幅值呈现先增加后减小的规律. 通过测量其前级噪声和后级噪声, 发现光电耦合器件  $g-r$  噪声来源于后级的光敏三极管. 在噪声等效电路基础上建立了一个光电耦合器件  $g-r$  噪声的定量分析模型, 并对该实验结果做出了合理的解释. 基于该模型的分析认为, 光电耦合器件的  $g-r$  噪声起源于光敏三极管发射结空间电荷区陷阱中心对载流子的俘获和发射, 其幅值和特征频率取决于陷阱能级和费米能级的相对位置, 同时也反映了该陷阱的能量空间信息 (陷阱能级) 和时域信息 (复合与发射载流子的时常数). 该结果也为低频噪声表征光电耦合器件的可靠性提供了实验基础和理论模型.

\*国家自然科学基金 (批准号: 60276028), 国防预研基金 (批准号: 51411040601DZ014) 和国防科技重点实验室基金 (批准号: 51433030103DZ01) 资助项目

包军林 男, 1973 年出生, 博士研究生, 从事低频噪声理论及其在电子器件可靠性表征中的应用研究. Email: moslanding@yahoo.com.cn

庄奕琪 男, 1957 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事蓝牙通信、集成电路设计、半导体器件可靠性、低频噪声等领域的研究.

杜磊 男, 1947 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事纳米电子器件、半导体器件与材料、低频噪声等领域的研究.

2004-11-07 收到, 2005-02-26 定稿

©2005 中国电子学会

## 2 模型

电子器件的低频噪声通常包括  $1/f$  噪声、g-r 噪声和白噪声。光电耦合器件是把发光器件(发光二极管)和光敏器件(光敏三极管)封装在一起,通过光电之间的互相转换实现信号传递的器件。根据其工作原理<sup>[9]</sup>,光电耦合器件输出端的低频噪声来源于光敏三极管的低频噪声和通过发光二极管耦合的低频噪声。本文首先建立光电耦合器件的噪声等效电路,在此基础上给出其低频噪声的一般表达式,然后推导二极管和三极管的 g-r 噪声表达式,最后得到完整的光电耦合器件 g-r 噪声模型。根据 van der Ziel 和 Harder 等人<sup>[2,9]</sup>的低频噪声分析方法,二极管的噪声源包括与结并联的本征噪声源和低频噪声源,三极管的噪声源包括三个独立的噪声源:(1)发射结空间电荷区中表面和位错引起的复合噪声和从基区到发射区的少子扩散噪声;(2)从发射区到收集区的少子扩散噪声;(3)由表面和位错引起的基区复合噪声。由此可知,光电耦合器件的噪声源包括上述的 5 种噪声源,其噪声等效电路如图 1 所示。其中,  $i_L, i_n, C$  和  $R$  分别为发光二极管的低频噪声源、本征噪声源、结电容和动态电阻;  $r_{bb}, r_{be}, g_{be}$  和  $R_e$  分别为光敏三极管基极外电阻、基极内电阻、发射结电导、和发射极串联电阻;  $i_{bc}, i_{be}, i_{ce}$  和  $I_b$  分别为光敏三极管基极-集电极低频噪声源、基极-发射极低频噪声源、集电极-发射极低频噪声源和通过发光二极管耦合的低频噪声源;  $I_F$  和  $I_O$  分别为光耦的偏置电流和采样电阻 ( $R_e$ ) 上的总噪声电流。

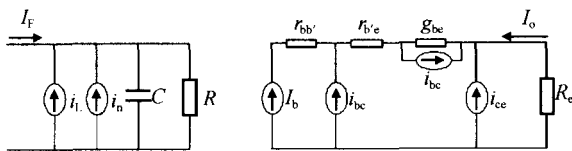


图 1 光电耦合器件噪声等效电路图

Fig.1 Noise equivalent circuit of optoelectronic coupled devices

根据图 1 的噪声等效电路,基极与收集极的噪声电流为<sup>[2]</sup>

$$i_b = I_b + i_{bc} + i_{be} + i_{ce} \frac{g_{be} R_e}{1 + g_{me} R_e} \quad (1)$$

$$i_c = i_{bc} + i_{be} \frac{g_{mc} R_e}{1 + g_{me} R_e} + i_{ce} \frac{1 + g_{be} R_e}{1 + g_{me} R_e} \quad (2)$$

其中  $g_{mc}$  和  $g_{me}$  分别为集电极跨导和发射极跨导。

根据光耦电流传输比的定义可知,通过发光二极管耦合到光敏三极管基极的噪声电流可以表示为

$$I_b = k \cdot \eta_0 (i_L + i_n) = (i_L + i_n) R_{CT} / (1 + \eta_0) \quad (3)$$

其中  $k, \eta_0$  和  $R_{CT}$  分别为光子耦合系数、LED 外量子效率、光敏三极管的量子效率和光耦的电流传输比,  $\eta_0$  为光敏三极管的电流放大倍数。

由(1),(2),(3)式可知,光电耦合器件输出端的噪声电流为

$$I_O = i_b + i_c = (i_L + i_n) \frac{R_{CT}}{1 + \eta_0} + 2i_{bc} + i_{be} \left(1 + \frac{g_{mc} R_e}{1 + g_{me} R_e}\right) + i_{ce} \frac{1 + 2g_{be} R_e}{1 + g_{me} R_e} \quad (4)$$

根据噪声理论<sup>[2]</sup>,电流的功率谱密度可表示为

$$S_{I_O}(f) = [S_{i_L}(f) + S_{i_n}(f)] \left(\frac{R_{CT}}{1 + \eta_0}\right)^2 + 4S_{i_{bc}}(f) + S_{i_{bc}}(f) \left(1 + \frac{g_{mc} R_e}{1 + g_{me} R_e}\right)^2 + S_{i_{ce}} \left(\frac{1 + 2g_{be} R_e}{1 + g_{me} R_e}\right)^2 \quad (5)$$

其中  $S_{i_L}(f), S_{i_n}(f), S_{i_{bc}}(f), S_{i_{be}}(f), S_{i_{ce}}(f)$  分别为  $i_L, i_n, i_{bc}, i_{be}, i_{ce}$  的功率谱密度。(5)式为光电耦合器件输出电流噪声的一般表达式。下面推导发光二极管和光敏三极管的 g-r 噪声表达式。

光电耦合器件正常工作时 LED 的 pn 结处于正偏,光敏三极管的发射结处于正偏,集电结处于反偏。研究结果表明<sup>[2]</sup>,二极管的 g-r 噪声来源于 pn 结空间电荷区陷阱中心对载流子的复合和发射,三极管发射结的 g-r 噪声来源于发射结空间电荷区的陷阱中心对载流子的复合和发射。由此可见,二极管和三极管 g-r 噪声的形成机制均为结空间电荷区的陷阱中心通过对载流子的俘获和发射调制了结区两边的电势,最终导致结电流的涨落。

根据半导体理论<sup>[11]</sup>,通过 pN 结的电流及结两端的电势差分别为

$$V = \frac{e x_d^2 N_{A1} N_{D2}}{2 \epsilon_1 \epsilon_2 (N_{A1} + N_{D2})} \times (1 N_{A1} + 2 N_{D2}) \quad (6)$$

$$I = B \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (7)$$

其中  $e, x_d, \epsilon_1, \epsilon_2, N_{A1}, N_{D2}, k, T, B, V$  分别为电子电量、势垒区宽度、p 区材料的介电常数、N 区材料的介电常数、p 区受主掺杂浓度、N 区施主掺杂浓度、电流理想因子、玻尔兹曼常数、绝对温度、反向饱和电流和结区偏置电压。

为了计算结电流的涨落,分别对(6)和(7)式求

偏导得

$$\frac{\partial V}{\partial N_{A_1}} = \frac{ex_d^2(1 N_{A_1} N_{D_1} + 2 1 N_{A_1} N_{D_2} + 2 N_{D_2}^3)}{2 1 2 (N_{A_1} + N_{D_2})^2} \tag{8}$$

$$\frac{\partial I}{\partial V} = \frac{eI}{kT} \tag{9}$$

陷阱中心俘获或发射单位数量的载流子导致陷阱电荷的单位数量的变化,即,  $\partial N_{A_1} / \partial N_t = 1$  ( $N_t$  为空间电荷区中陷阱电荷的数目). 同时,陷阱中心对载流子的俘获或发射引起结区两边势垒高度的变化,由(7),(8)式和(9)式可知,该电势变化导致的结电流涨落可表示为

$$I = \frac{\partial I}{\partial V} \times \frac{\partial V}{\partial N_{A_1}} \times \frac{\partial N_{A_1}}{\partial N_t} \times N_t = \frac{e^2 I x_d^2 (1 N_{A_1} N_{D_1} + 2 1 N_{A_1} N_{D_2} + 2 N_{D_2}^3)}{2 1 2 k T (N_{A_1} + N_{D_2})^2} N_t \tag{10}$$

根据噪声理论<sup>[2]</sup>,该涨落的谱密度可以表示为

$$S_i(f) = I \left[ \frac{e^2 I x_d^2 (1 N_{A_1} N_{D_1} + 2 1 N_{A_1} N_{D_2} + 2 N_{D_2}^3)}{2 1 2 k T (N_{A_1} + N_{D_2})^2} \right]^2 \times \left( \frac{4 N_t f_t (1 - f_t)}{1 + \frac{f}{f_0}} \right) \tag{11}$$

其中  $\tau$  为陷阱的时常数;  $f_t$  是平衡条件下陷阱能级被载流子占据的概率.

$$= 1 / \{ n_{th} n [1 + \exp(-\frac{E_F - E_t}{kT})] \} \tag{12}$$

其中  $\sigma_n$  为陷阱中心的复活截面;  $v_{th}$  为电子的热运动速度;  $n$  为电子浓度;  $E_F$  为费米能级;  $E_t$  为陷阱能级. 若占据陷阱能级的电子服从费米分布,则有

$$f_t (1 - f_t) = \frac{1}{(1 + \exp[(E_F - E_t)/kT]) \{1 + \exp[(E_t - E_F)/kT]\}} \tag{13}$$

(11)式表明,  $g-r$  噪声的频谱为洛伦兹谱,在双对数坐标中,在特征频率  $f_0 = 1/2$  处出现“驼峰”.

对于同质 pn 结,同样可以得到  $g-r$  噪声的功率谱密度为

$$S_i(f) = 4 N_t f_t (1 - f_t) \times \left[ \frac{e^2 I x_d^2 N_D^2}{2 k T (N_A + N_D)^2} \right]^2 \times \left( \frac{1}{1 + \frac{f}{f_0}} \right) \tag{14}$$

其中  $\epsilon$  为半导体材料的介电常数,其余的参数同上.

这样把(11)和(14)式分别带入(5)式,即可得到

异质结和同质结光电耦合器件的  $g-r$  噪声模型.

### 3 实验结果和讨论

实验样品为北京瑞普公司生产的 GD315A 型光电耦合器. 噪声测试电路如图 2 所示. 电子器件的低频噪声通常包括白噪声、 $1/f$  噪声和  $g-r$  噪声,其功率谱密度可表示为

$$S(f) = A + \frac{B}{f} + \frac{C}{1 + (f + f_0)^2} \tag{15}$$

其中  $A$  为白噪声的幅度,  $B$  和  $\alpha$  分别为  $1/f$  噪声的幅度和频率指数因子,  $C$  和  $f_0$  分别为  $g-r$  噪声的幅度和特征频率. 不同的噪声分量以及各个分量的不同表征参数往往具有不同的物理意义,反映了器件不同的内部缺陷特征. 因此,从实测噪声频谱中分离出各种噪声分量,并精确确定各个分量表征参数的值,是对器件进行噪声分析的前提. 采用文献[7]的方法分别提取  $g-r$  噪声的幅值和转折频率,对该批 180 只器件的测试结果表明,有 6 只器件的低频噪声表现为  $1/f$  噪声和  $g-r$  噪声的叠加. 图 3 为一实测的低频噪声频谱和时间序列,从中可以看出,  $g-r$  噪声的时间序列呈现明显的大幅度“台阶”波形,对应于双对数坐标中频谱在特征频率处出现的“驼峰”. 通过提取  $g-r$  噪声的幅值和转折频率,发现:随着偏置电流的增加,  $g-r$  噪声的幅值先增加后减小,转折频率则呈现持续增大的规律(见图 4).

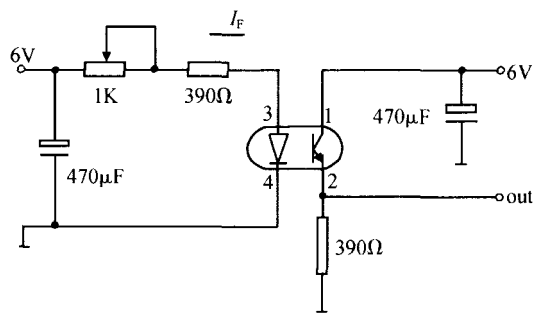


图 2 光耦低频噪声测试的偏置电路

Fig. 2 Bias circuit of noise measurement for OCDs

为了确定被测器件的  $g-r$  噪声源,分别从偏置电路(见图 2)的 3,4 管脚和 1,2 管脚测量其前级噪声和后级噪声. 实验发现,这 6 只光电耦合器件的前级(3,4 管脚的测量结果)均未出现  $g-r$  噪声,后级(1,2 管脚的测量结果)均出现幅值很大的  $g-r$  噪声. 所以,可断定该类光电耦合器件的  $g-r$  噪声源为光

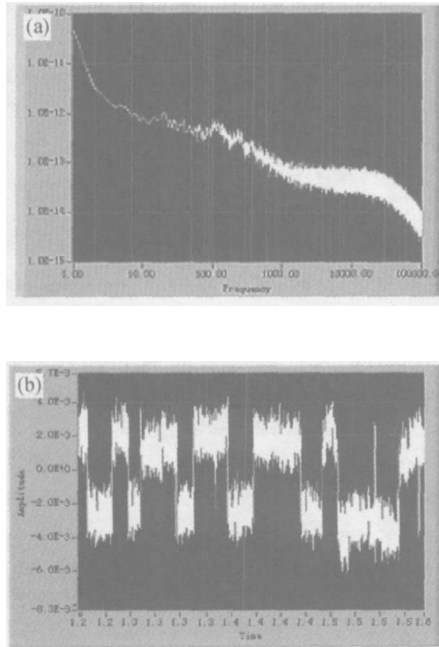


图 3 光耦  $g-r$  噪声的噪声频谱图(a)和时间序列图(b)  
 Fig. 3 A frequency spectrum (a) and time sequence (b) of  $g-r$  noise in OCDs

敏三极管.

发光二极管偏置电流的增大使得耦合到光敏三极管的光子数增加,增加的光子会在光敏三极管的光敏区(集电结)附近产生更多的载流子,这些光生载流子在偏置电压的作用下被分别扫到势垒两边.载流子在发射结一侧的堆积等效于增加发射结两侧的电压,根据半导体理论<sup>[11]</sup>,通过发射结的电流和发射结的偏置电压成指数关系,发射结势垒宽度的平方和发射结的偏置电压成反比关系.因而,发光二极管偏置电流增加等效于光敏三极管发射极电流的指数增加及其垒宽度平方的线性减小.由(11)式可知,光敏三极管的  $g-r$  噪声幅值与通过发射结的电流成正比,和发射结势垒宽度的平方成正比.两者共同作用的结果使得当偏置电流增加时光电耦合器件的  $g-r$  噪声幅值增大,如图 4 所示.当偏置电流超过一定范围之后持续增加时, $g-r$  噪声的幅值出现减小的现象,其原因为:根据(13)式,只有能量在  $E_F$  附近几个  $kT$  内的陷阱中心才对  $g-r$  噪声有贡献,因为当陷阱能级低于费米能级若干个  $kT$  时,该能级总是满的;当陷阱能级高于费米能级若干个  $kT$  时,该能级总是空的.浅施主或浅受主能级分别靠近导带底或价带顶,离费米能级比较远,只有深能级才会表现出较大幅值的  $g-r$  噪声,所以在体材料中很少能

在很宽的频率范围内观测到  $g-r$  噪声.对于  $pn$  结而言,由于内建电场的作用,能带在结区发生弯曲,这时即使在  $n$  区(或  $p$  区)离费米能级较远的陷阱在结区也会与费米能级交叉,从而可以在很宽的频率范围内观测到  $pn$  结的  $g-r$  噪声.根据(13)式,在费米能级和陷阱能级的交叉点,陷阱对载流子的俘获和发射概率最大,从而可以产生大幅值的  $g-r$  噪声.当发射结的正偏压从小到大的增加时,费米能级和陷阱能级的交叉点将向轻掺杂一侧移动,当交叉点在相对轻掺杂一侧的准费米能级的范围内移动时, $g-r$  噪声的幅值会持续增大.随着发射结的正偏压的继续增加,交叉点会渐渐移出势垒区而进入中性区,这时陷阱复合载流子的概率急剧下降,表现为  $g-r$  噪声的幅值也急剧下降.这和图 4 中的实验结果完全吻合.

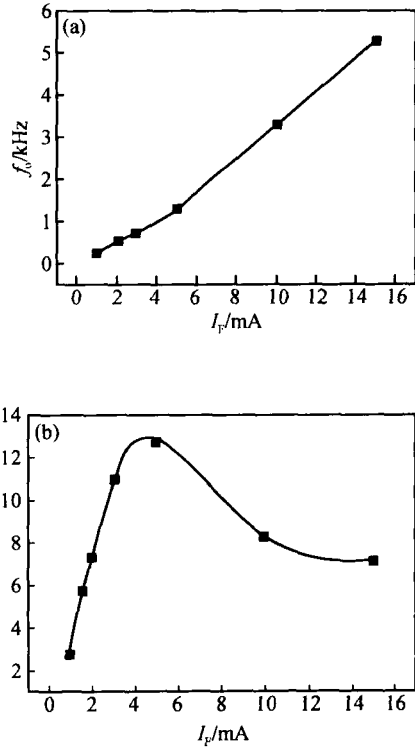


图 4 光耦  $g-r$  噪声特征频率  $f_0$ (a)和幅值  $C$ (b)随偏置电流的变化关系  
 Fig. 4 Characteristic frequency  $f_0$ (a) and magnitude  $C$ (b) of  $g-r$  noise in OCDs

通常发射区的掺杂浓度比基区大,发射结势垒区本征费米能级的弯曲也大,因而  $g-r$  噪声的特征频率可在很宽的频率范围内出现.由(12)式可知, $g-r$  噪声的特征频率和载流子浓度成正比,在偏置电压较小时,陷阱能级和费米能级的交叉点靠近重掺

杂一边,此时从发射区过来的载流子较少, $g-r$  噪声的特征频率也较小;随着偏压增加时,陷阱能级和费米能级的交叉点向轻掺杂一侧移动,此时的费米能级也离导带或价带越近,载流子浓度也越大, $g-r$  噪声的特征频率也越大.即随着偏置电流的增加, $g-r$  噪声的特征频率也越大.这和图 4 的实验结果完全吻合.

电子器件的低频噪声与其内部的缺陷是密切相关的,是可靠性表征的一个敏感参量<sup>[2~6,8,12]</sup>.本文的结果为低频噪声表征光电耦合器件的可靠性提供了实验基础和理论模型.

## 4 结论

本文对光电耦合器件的  $g-r$  噪声进行了实验和理论研究.实验结果表明,可在很宽的频率范围内观测到大幅值的光电耦合器件  $g-r$  噪声,且随着偏置电流的增加, $g-r$  噪声逐渐向高频移动,其幅值呈现先增加后减小的变化规律.通过测量前级噪声和后级噪声,发现光电耦合器件  $g-r$  噪声来自于后级的光敏三极管.基于载流子数涨落机制,建立了一个光电耦合器件  $g-r$  噪声的定量分析模型.并对该实验结果做出了合理的解释.

## 参考文献

- [ 1 ] Dai Yisong, Xu Jiangsheng. The noise analysis and noise reliability indicators of optoelectronic coupled devices. *Solid-State Electron*, 2000, 44(17) :1495
- [ 2 ] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Noise and technology of denoising in semiconductor devices. Beijing: National Defence Industry Press, 1993:172 (in Chinese) [庄奕琪,孙青. 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术. 北京:国防工业出版社, 1993:172]
- [ 3 ] Fukuda M, Hirono T, Kano F. Correlation between  $1/f$  noise and semiconductor laser degradation. *Qual Reliab Engng Inter*, 1994, 35(10) :351
- [ 4 ] Vandamme L. K. J. Noise as a diagnostic tool for quality and reliability of electronic devices. *IEEE Trans Electron Devices*, 1994, 41(11) :2176
- [ 5 ] Jevtic M. M. Noise as a diagnostic and prediction tool in reliability physics. *Microelectron Reliab*, 1995, 35(3) :1925
- [ 6 ] Shi Jiawei, Jin Ensun, Ma Jing. An improved approach and experimental results of a low frequency noise measurement technique used for reliability estimation of diode lasers. *Microelectron Reliab*, 1994, 34(7) :1261
- [ 7 ] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Optimized analysis on all components of low-frequency noise spectrum for electron devices. *Metrologica Sinca*, 1996, 17(2) :136 (in Chinese) [庄奕琪,孙青. 电子器件低频噪声谱的全参数优化分析. 计量学报, 1996, 17(2) :136]
- [ 8 ] Ursutiu D, Jones B. K. Low-frequency noise used as a lifetime test of LEDs. *Semicond Sci Technol*, 1996, 42(11) :1133
- [ 9 ] Harder C, Katz J, Margalit S, et al. A Noise equivalent circuit of a semiconductor laser diode. *IEEE J Quantum Electron*, 1982:18(3) :333
- [ 10 ] Chen X Y, Pedersen A, Helleso O G, et al. Electrical noise of laser diodes measured over a wide range of bias currents. *Microelectron Reliab*, 2000, 40(11) :1925
- [ 11 ] Yu Lisheng. *Semiconductor heterojunction physics*. Beijing: Scientific & Technical Press, 1990:100 (in Chinese) [虞丽生. 半导体异质结物理. 北京:科学技术出版社, 1990:100]
- [ 12 ] Ma Zhongfa, Zhuang Yiqi, Du Lei, et al. A sensitive technique to ESD latent damages in MOSFET. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(11) :1211 (in Chinese) [马仲发, 庄奕琪, 杜磊, 等. 一种敏感的 MOSFET ESD 潜在损伤检测方法. 半导体学报, 2002, 23(11) :1211]

## A Model for a $g-r$ Noise in Optoelectronic Coupled Devices \*

Bao Junlin, Zhuang Yiqi, Du Lei, Wu Yong, and Ma Zhongfa

(*Microelectronic Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

**Abstract:**  $g-r$  noise (generation-recombination noise) in optoelectronic coupled devices (OCDs) is studied in a wide bias range. Experimental results demonstrate that the magnitude of  $g-r$  noise becomes large and then shrinks as the input current increases, while its intrinsic frequency gets large. By measuring the front and back noise of OCDs, it is also discussed that the source of  $g-r$  noise in OCDs is a photosensitive transistor. Based on the mechanism of carrier number fluctuations, a  $g-r$  noise model in OCDs is developed. The experimental results agree well with the developed model.

**Key words:**  $1/f$  noise;  $g-r$  noise; OCD; deep-level defects

**PACC:** 8630J; 7270; 8820W

**Article ID:** 0253-4177(2005)06-1208-06

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60276028), the National Defence Pre-Research Foundation of China (No. 51411040601DZ014), and the Key Laboratory Foundation of National Defence Science & Technology (No. 51433030103DZ01)

Bao Junlin male, was born in 1973, PhD candidate. His main interests are in  $1/f$  noise model of the electronic devices, low-frequency technology for integrated circuits and reliability prediction. Email: moslanding@yahoo.com.cn

Zhuang Yiqi male, was born in 1957, professor, advisor of PhD candidate. He is engaged in research on low-frequency noise in semiconductor devices, and reliability prediction, IC design and wireless communication.

Du Lei male, was born in 1947, professor, advisor of PhD candidate. His main interests are in  $1/f$  noise model of the devices, low-frequency technology for integrated circuits and reliability prediction, nano-electronics and materials.

Received 7 November 2004, revised manuscript received 26 February 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics