

光电耦合器件闪烁噪声模型*

包军林 庄奕琪 杜磊 马仲发 胡瑾 周江

(宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室,西安电子科技大学微电子研究所,西安 710071)

摘要 对电应力前后光电耦合器件的闪烁噪声(1/f 噪声)进行了实验和理论研究. 实验发现, 应力前后 1/f 噪声幅值随偏置电流均有相同的变化规律:在低电流区,1/f 噪声幅值与偏置电流成正比,在高电流区,1/f 噪声幅值与偏置电流的平方成正比,且应力后 1/f 噪声幅值增大了约 7 倍. 理论分析表明,小电流时该器件的 1/f 噪声为扩散 1/f 噪声,大电流时为复合 1/f 噪声,应力在器件有源区诱生的陷阱是 1/f 噪声增大的根本原因. 基于载流子数涨落和迁移率涨落机制,建立了一个光电耦合器件 1/f 噪声的定量分析模型,实验结果和模型符合良好.

关键词 1/f 噪声;光电耦合器件;涨落;陷阱

中图分类号 TN386.1 **文献标识码** A

0 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. 近来的研究表明^[1],低频噪声,尤其是闪烁噪声(1/f 噪声)已经成为光电耦合器件可靠性,甚至其正常工作的严重威胁. 在几乎所有的电子元器件和电子整机中都能观测到 1/f 噪声,1/f 噪声是系统内部特性的一个反映,已经成为器件可靠性一种表征手段^[2]. 但是,现有的实验结果和理论模型均集中在 MOSFET, JFET, BJT 等微电子器件^[2] 和 LED, LD 等光电子器件^[3],光电耦合器件 1/f 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^[1],其产生机理尚未清楚,因而也限制了低频噪声在光电耦合器件可靠性表征中的应用.

本文在宽范围输入电流条件下测量了电应力前后光电耦合器件的 1/f 噪声. 实验发现,应力前后 1/f 噪声幅值均有相同的变化规律,但应力后的 1/f 噪声幅值比应力前增大了约 7 倍. 在载流子数涨落和迁移率涨落机制的基础上,建立了光电耦合器件 1/f 噪声的定量分析模型,并对该实验结果做出了合理的解释.

1 模型

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)封装在一起的器件. 根据其工作原理^[1],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. 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 1/f 噪声的表达式,最后得到完整的光电耦合器件 1/f 噪声模型. 根据 van der Ziel 和 Harder 等人的低频噪声分析方法^[2,3],光电耦合器件的噪声等效电路如图 1. 图 1 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

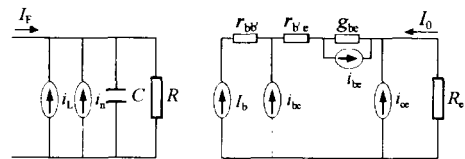


图 1 光电耦合器件噪声等效电路图
Fig. 1 Noise equivalent circuit of optoelectronic coupled devices

容和动态电阻; $r_{bb'}$ 、 r_{be} 、 g_{be} 和 R_c 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_0 分别为光耦的偏置电流和采样电阻(R_c)上的总噪声电流. 根据图 1 的噪声等效电路,基极与收集极的噪声电流为^[2]

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

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

式中 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

$$I_b = k \eta \gamma_0 (i_L + i_n) = (i_L + i_n) R_{CT} / (1 + \beta) \quad (3)$$

式中, k 、 η 、 γ_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, β 为光敏三极管的电流放大倍数. 由式(1)、(2)和(3)可知,光电耦合器件的噪声电流为

*国家自然科学基金(No. 60276028),国防预研基金(No. 51411040601DZ014)与国防科技重点实验室基金(No. 51433030103DZ01)资助的课题
Tel:029-88201983 Email:moslanding@yahoo.com.cn
收稿日期:2005-03-17

$$I_0 = i_b + i_c = (i_L + i_n) \frac{R_{CT}}{(1+\beta)} + 2i_{bc} + i_{bc} \left(1 + \frac{g_{mc}R_e}{1+g_{mc}R_e}\right) + i_{ce} \frac{1+2g_{bc}R_e}{1+g_{mc}R_e} \quad (4)$$

根据噪声理论^[2], 电流 I_0 的功率谱密度可表示为

$$S_{I_0}(f) = [S_{i_L}(f) + S_{i_n}(f)] \left[\frac{R_{CT}}{(1+\beta)}\right]^2 + 4S_{i_{bc}}(f) + S_{i_{bc}}(f) \left(1 + \frac{g_{mc}R_e}{1+g_{mc}R_e}\right)^2 + S_{i_{ce}}(f) \left(\frac{1+2g_{bc}R_e}{1+g_{mc}R_e}\right)^2 \quad (5)$$

式中 $S_{i_L}(f), S_{i_n}(f), S_{i_{bc}}(f), S_{i_{bc}}(f), S_{i_{ce}}(f)$ 分别为 $i_L, i_n, i_{bc}, i_{bc}, i_{ce}$ 的功率谱密度. 式(5)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级管的 $1/f$ 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. 该类型器件中载流子输运主要有四种机制: 扩散、界面复合、隧道复合和表面复合, 因而, 通过结区的总电流 I_F 包含扩散电流、界面复合电流、隧穿复合电流和表面复合电流. 这四种电流均与结两端的电压成指数关系^[4], 因而总电流可以表示为

$$I_F = I_0 \exp(qV/\beta kT) \quad (6)$$

式中 I_0 为反向饱和电流, V 为结电压, k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, β 为电流理想因子.

载流子的不同输运方式对应了 $1/f$ 噪声不同产生机制: 与体陷阱相关的扩散 $1/f$ 噪声和与界面态/表面态相关的复合 $1/f$ 噪声. 根据迁移率涨落机制^[2], 扩散 $1/f$ 噪声的功率谱密度与输入电流有如下的关系

$$S_D(f) = \alpha q I_F / f \tau \quad (7)$$

式中, $S_D(f)$ 为扩散 $1/f$ 噪声功率谱, α 为 Hooge 常数, q 为电子电量, I_F 为偏置电流, τ 为少子寿命, f 为频率. 根据半导体理论^[4] 和载流子数涨落理论^[2], 复合电流 I_R 及其复合速率 G_R 涨落的功率谱 $S_{G_R}(f)$ 可分别表示为

$$I_R = I_{R0} \exp(qV_a/kT) G_R \quad (8)$$

$$S_{G_R}(f) = C G_R / f \quad (9)$$

式中 V_a 为空间电荷区两种载流子浓度相等处的电压, G_R 为复合速率, C 为常数. 由式(8)和式(9)可得到复合 $1/f$ 噪声的功率谱密度与输入电流有如下的关系

$$S_{I_R}(f) = (I_{R0})^2 \frac{C G_R}{f} \left(\frac{I_F}{I_0}\right)^{\frac{2qV_a}{V}} \quad (10)$$

把式(7)和式(10)分别带入式(5), 即可得到光耦的扩散 $1/f$ 噪声模型和复合 $1/f$ 噪声模型.

2 实验结果和讨论

实验样品为北京瑞普公司生产的 GD315A 型

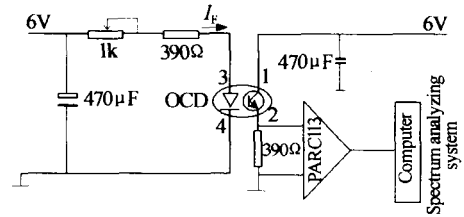


图2 噪声测量偏置电路

Fig. 2 Bias circuit of noise measurements for OCDs

光电耦合器, 测试电路如图2. 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

$$S(f) = A + \frac{B}{f^\gamma} + \frac{C}{1+(f/f_0)^2} \quad (11)$$

式中 A 为白噪声的幅度, B 和 γ 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, 对该批器件 180 只的测试结果表明, 随着输入电流的增加, $1/f$ 噪声增大, 且输入电流在不同的范围内 $1/f$ 噪声幅值表现出不同的变化规律: 在 3 mA 以下, $1/f$ 噪声幅值与输入电流成正比; 随着输入电流的继续增大, $1/f$ 噪声幅值暂时趋于饱和; 当输入电流大于 5 mA 时, $1/f$ 噪声幅值又开始增加, 且与输入电流的平方成正比, 如图 3, 4. 为了进一步探究光电耦合器这种特性, 对该器件进行了大电流 ($I_F=10$ mA), 长时间 ($t=168$ h) 应力后测

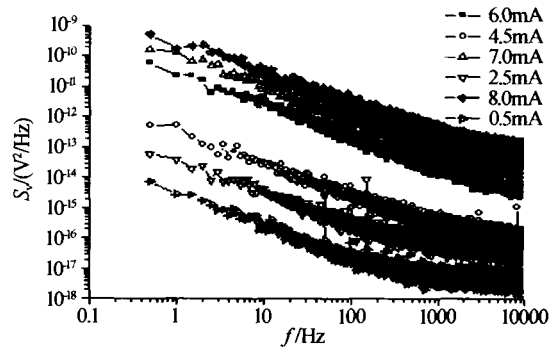


图3 不同偏置电流下的低频噪声频谱图

Fig. 3 Noise spectra vs frequency at various bias currents

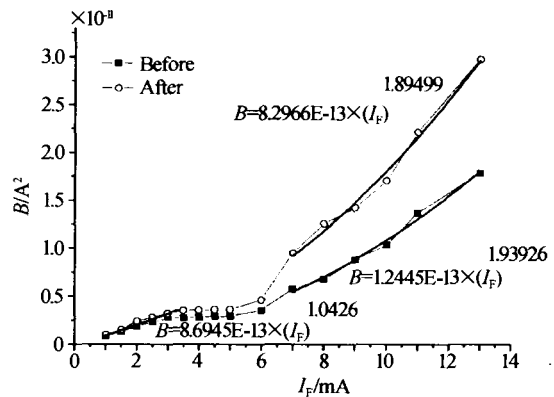


图4 噪声幅值 B 与输入电流 I_F 的关系

Fig. 4 The magnitude (B) vs input currents (I_F)

试了其低频噪声. 发现应力前后 $1/f$ 噪声幅值与输入电流具有相同的变化规律, 但应力后的 $1/f$ 噪声幅值在输入电流大于 5 mA 的区域比应力前增加约 7 倍(图 4).

光电耦合器件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. 随着输入电流增大, 发光二极管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^[4], 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势垒宽度平方的线性减小. 在外加电压较小、界面态和表面态较少时, 载流子分别在结界面两侧积累, 并以扩散为主的方式输运. 对于发光二极管而言, pN 结界面处能带断续使得结区两边的势垒高度不同, 宽带一侧的载流子扩散起主导作用, 总电流也与宽带一侧的电压成指数关系^[5]. 此时的 $1/f$ 噪声主要是扩散 $1/f$ 噪声, 电流理想因子 $\beta=1$, 由式(7)可知, $1/f$ 噪声幅值与电流成正比, 图 4 给出应力前实验数据的拟合和结果为 $\gamma=1.0426$, 应力后也没有明显得改变. 随着外加电压的增加, 载流子可以通过界面态复合形成界面复合电流, 或者通过界面态隧穿的方式形成隧道复合电流. 文献[4]中用 DLTS 测出的界面态数据计算结果表明, 虽然界面复合电流理想因子 $\beta=2$, 但是比实际测量的总电流小两个数量级. 文献[4]的进一步研究显示, 与结平面垂直的解离面上含有大量的表面复合中心, 通过这些表面陷阱的复合电流是构成总电流的一个主要成份. 和界面复合电流一样, 表面复合电流的理想因子也为 2. 由式(10)可知, 对于对称结和表面分量(对称结 $V_a=0.5V$, 极不对称结 $V_a=0.75V$), 其 $1/f$ 噪声幅值和输入电流的平方成正比, 这与图 4 的实验结果完全一致(老化前 $\gamma=1.93926$, 老化后 $\gamma=1.89499$).

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了新的表面态. 应力后界面态和表面态的增

加使得载流子通过这两种陷阱的复合增加, 根据式(10), 表面 $1/f$ 噪声的幅值也相应增加(如图 4). 由此可知, 对光电耦合器件而言, 低电流时, $1/f$ 噪声特性反映了体区陷阱特征, 高电流时, $1/f$ 噪声反映了激活区陷阱特征, 且应力前后 $1/f$ 噪声幅值有 7 倍的变化, 因而可以敏感地反映应力对该器件不同区域的损伤.

3 结论

本文在宽范围输入电流条件下测量了电应力前后光电耦合器件的 $1/f$ 噪声. 实验发现, 应力前后 $1/f$ 噪声幅值随偏置电流均有相同的变化规律: 当电流小于 3 mA 时, $1/f$ 噪声幅值与偏置电流成正比; 在 3 mA~5 mA 的范围时, 随着电流的增加 $1/f$ 噪声幅值趋于饱和; 当电流大于 5 mA 时, $1/f$ 噪声幅值又开始急剧增加, 且与偏置电流的平方成正比. 同时也发现, 电流大于 5 mA 时, 应力后的 $1/f$ 噪声幅值比应力前增大了约 7 倍. 在载流子数涨落和迁移率涨落机制的基础上, 建立了一个光电耦合器件 $1/f$ 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, 在小电流时该器件的 $1/f$ 噪声为扩散 $1/f$ 噪声, 大电流时为复合 $1/f$ 噪声, 应力后 $1/f$ 噪声的增大归因于应力在器件有源区诱生的陷阱.

参考文献

- 1 Dai Y S, Xu J Sh. The noise analysis and noise reliability indicators of optoelectronic coupled devices. *Solid-State Electronics*, 2000, **44**(5): 1495~1500
- 2 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. 172~221
Zhuang Y Q, Sun Q. Noise and its Minimizing Technology in Semiconductor Devices. Beijing: National Defence Industry Press, 1993. 172~221
- 3 Harder C, Katz, Margalit S, et al. A noise equivalent circuit of a semiconductor laser diode. *IEEE J Quant Electron*, 1982, **18**(3): 333~341
- 4 虞丽生. 半导体异质结物理. 北京: 科学技术出版社, 1990. 100~142
Yu L S. Semiconductor Hetero junction Physics. Beijing: Scientific & Technical Press, 1990. 100~142
- 5 张振杰. 光电导器件的探测理论分析. 光子学报, 1997, **26**(3): 285~288
Zhang Z J. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(3): 285~288

A Model for $1/f$ Noise in Optoelectronic Coupled Devices

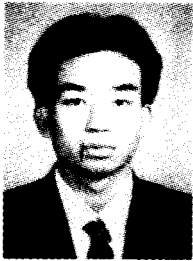
Bao Junlin, Zhuang Yiqi, Du Lei, Ma Zhongfa, Hu Jin, Zhou Jiang

*Key Lab of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices,
Microelectronic Institute, Xidian University, Xi'an 710071*

Received date: 2005-03-17

Abstract Flicker noise ($1/f$ noise) in Optoelectronic Coupled Devices (OCDs) is studied over a wide range of bias currents with special emphasis on the influence of electrical stress. Experimental results demonstrate that there is a similar rule for OCDs before and after stressed, and the magnitude of $1/f$ noise is proportional to the bias current in the range of low currents and proportional to the power of the bias current in the range of high currents. Comparing to virgin device, the magnitude of $1/f$ noise in the stressed device increases about 7 times. It is discussed that $1/f$ noise belongs to diffusion $1/f$ noise in the range of low currents, while, at high currents, it belongs to recombination $1/f$ noise, and the increasing magnitude of $1/f$ noise is due to new traps induced by electrical stress. Based on the mechanisms of carrier numbers fluctuations and carrier velocity fluctuations, a $1/f$ noise model in OCDs is developed. Experimental results agree well with the developed model.

Keywords $1/f$ noise; OCD; Fluctuations; Traps



Bao Junlin received the Master's degree from Lanzhou University, in 2000. He is working for Doctor's degree in Microelectronics Institute of Xidian University. His main interests are in $1/f$ noise model of the electronic devices, low-frequency technology for integrated circuits and reliability prediction.