

光电耦合器件 $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声的机理研究*

包军林 庄奕琪 杜 磊 马仲发 李伟华 李 聪

(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 对光电耦合器件 $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声(产生一复合噪声)的偏置特性及其产生机理进行了实验和理论研究. 结果表明:在低频段,光电耦合器件的 $g-r$ 噪声通常表现为叠加 $1/f$ 噪声,且两者均随输入电流的增加呈现先增大后减小的规律. 通过测量前级噪声和后级噪声,发现光电耦合器件的 $g-r$ 噪声源为后级光敏三极管. 理论分析表明:光电耦合器件的 $1/f$ 噪声主要为表面 $1/f$ 噪声, $g-r$ 噪声则源于光敏三极管发射结空间电荷区的深能级对载流子的俘获和发射.

关键词 $1/f$ 噪声; $g-r$ 噪声;光电耦合器件;深能级

中图分类号 TN36 . **文献标识码** A

0 引言

光电耦合器件以其体积小、寿命长、无触点、抗干扰性强等优点广泛的用于导航、卫星通信等的军事领域. 最近的研究结果表明,光电耦合器件的低频噪声,尤其是 $g-r$ 噪声(产生一复合噪声),已经成为影响其可靠性甚至正常工作的重要因素^[1].

光电耦合器件的低频噪声包括 $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声,在很宽的频率范围内表现为两者的叠加. 半导体器件表面和体内的一些缺陷(重金属杂质、位错)可在禁带中引入一些浅陷阱能级和深陷阱能级,通常认为前者是 $1/f$ 噪声的主要来源,后者是 $g-r$ 噪声的主要来源^[2]. 因而测量低频噪声(主要为 $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声)已经成为半导体材料和器件内部缺陷及其可靠性表征的一种重要手段^[3~5]. 尽管 $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声已经作为判据用于光电耦合器件的可靠性筛选^[1],但其产生机理尚未清楚,至今没有一个完善的理论解释现有的实验结果.

本文对光电耦合器件 $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声的偏置特性进行了实验和理论研究. 实验结果表明,两者均随输入电流的增加呈现先增大后减小的规律. 通过测量前级噪声和后级噪声,发现光电耦合器件的 $g-r$ 噪声源为后级光敏三极管. 理论分析表明,光电耦合器件的 $1/f$ 噪声主要为表面 $1/f$ 噪声; $g-r$ 噪声为光敏三极管发射结空间电荷区深能级对载流子俘获和发射,引起了结区两端电势的涨落,该涨落又以指数的形式调制了基区电流,最终表现为大幅

度的 $g-r$ 噪声;偏置电压的增大使得空间电荷区内费米能级与陷阱能级的交点向高掺杂区移动,导致了光电耦合器件 $g-r$ 噪声的特征频率持续增大, $g-r$ 噪声的幅值则呈现先增大后减小的变化规律.

1 实验

1.1 实验方法

被测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 1. 电子器件的低频

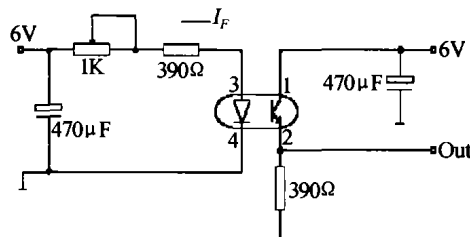


图 1 光耦低频噪声测试偏置电路

Fig. 1 Bias circuit for noise measurement of OCDs

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

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

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. 不同的噪声分量以及各个分量的不同表征参数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[6]的方法从测量结果提取上述参数,图 2 为一个 GD315A 型光耦低频噪声的测试结果(双对数坐标,纵轴为功率谱密度,横轴为频率). 从中可知,光电耦合器件的 $g-r$ 噪声通常是和 $1/f$ 噪声叠加在一起的,图中波动线为实测曲线,平滑线为拟合曲线. 由实测数

*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
Tel:029-88201983 Email:moslanding@yahoo.com.cn
收稿日期:2004-10-29

据得到的低频噪声参量分别为： $A=7.32E-14 V^2/Hz$ ； $B=1.141E-12 V^2/Hz$ ； $\gamma=1.01$ ； $f_0=23.6Hz$ ； $C=7.31E-13 V^2/Hz$ 。

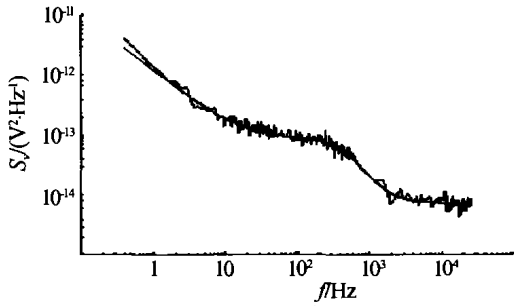


图2 叠加 $g-r$ 噪声的 $1/f$ 噪声频谱图
Fig. 2 A spectrum of $1/f$ noise including $g-r$ noise

1.2 实验结果

180 只该批器件的测试结果表明，其中 6 只在低频段出现 $1/f$ 噪声之上叠加明显的 $g-r$ 噪声，其余的在测试频率范围(1 Hz~300 kHz)均未出现明显的 $g-r$ 噪声。本文给出这 6 只器件中 22 号器件的噪声偏置特性，如图 3。从中可知， $1/f$ 噪声幅值随输入电流 I_F 的增加呈现先增大后减小的规律，在 $I_F=13\text{ mA}$ 附近出现极大值。该图也给出了 I_F 分别为 1 mA、2 mA、3 mA 和 10 mA 时的噪声电压功率谱与输入电流的关系，可见，在低频段，除了 $1/f$ 噪声外还叠加了 $g-r$ 噪声，即在双对数坐标中出现明显的“驼峰”。

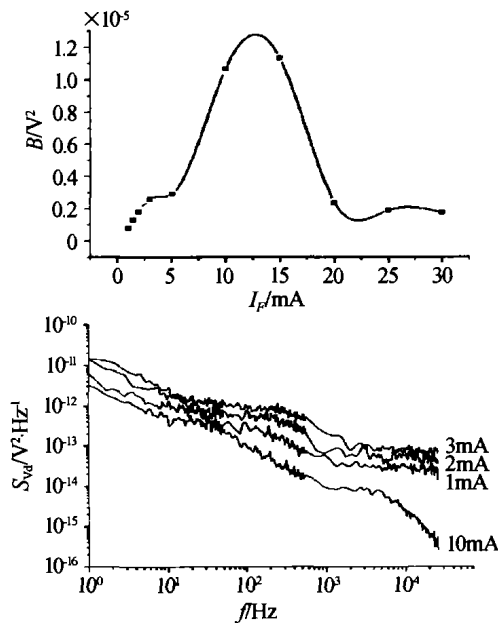


图3 $1/f$ 噪声幅值 B 和频谱与输入电流 I_F 的关系
Fig. 3 The magnitude (B) and spectra of $1/f$ noise vs input currents (I_F)

图 4 给出了 22 号器件的 $g-r$ 噪声幅值及其特征频率与输入电流关系。可以看出，随着输入电流的增加， $g-r$ 噪声向高频移动(其特征频率增大)，幅值也明显增加，并在输入电流为 5 mA 附近出现一

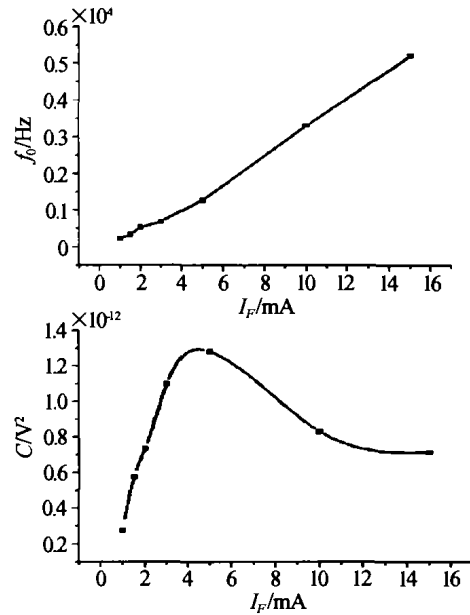


图4 $g-r$ 特征频率 f_0 及其噪声幅值 C 与输入电流 I_F 的关系
Fig. 4 Characteristic frequencies (f_0) and magnitudes B of $g-r$ noise vs input currents (I_F)

个峰值，然后很快减小，最后消失。

2 机理分析

2.1 $1/f$ 噪声的产生机理

光电耦合器件是由发光器件和光敏器件封装在一起的一类光电器件，因而其低频噪声来此于发光二极管和光敏三极管。在正常工作时，发光二极管处于正向偏置，势垒区和扩散区注入少数载流子，这些非平衡少数载流子不断与多数载流子复合而发光(辐射复合)^[7,8]，势垒区及其表面存在的复合中心也会使得载流子发生非辐射复合，从而产生电致发光的随机涨落。光敏三极管是一种具有光电流放大作用的光电探测器，在正常工作时其基极开路，发射极和集电极之间加一直流偏压，使得集电结反向偏置。来此发光二极管的入射光照到集电结后在结内产生的光生载流子会被反向偏置电压扫出结区，对于 NPN 管而言，光生电子流向集电极，光生空穴流向基极，形成光生电流。流向基极的空穴继续堆积，使得基区电位升高，相当于发射结施加正向偏压，于是产生了发射结的少数载流子注入。来自集电结的光生空穴一部分维持基极的高电位，一部分注入到发射极并进入外电路，所以外电路中的光电流取决于发射结注入电流的大小^[7,8]。因而，和普通三极管一样^[2]，光敏三极管的低频噪声主要来自此于发射结空间电荷区及其表面附近的陷阱对载流子的复合和发射。

图 5(a)给出了光敏三极管的能带图，当外加一定的电压(V_c)时，来自集电结的光生空穴在基极的堆积使得发射结势垒将下降(V)，于是产生了发射

结的少数载流子注入. 由于空穴注入较电子注入困难而容易形成空穴在基极的堆积, 即提高了基极的电位, 进而引起发射结势垒高度有一个 ΔV 的下降, 使得发射结注入电子增加, 光电流被放大.

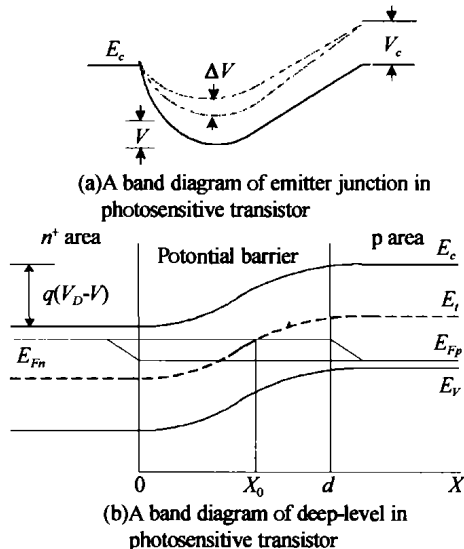


图 5 光敏三极管能带及其发射结中深能级
Fig. 5 A band diagram of emitter junction and deep-level in photosensitive transistor

由此可知光电耦合器件的低频噪声主要来自于此 pn 结(正向偏置的发光二极管和光敏三极管的发射结)空间电荷区及其表面附近的陷阱对载流子的复合和发射. 利用栅控晶体管对双极晶体管 $1/f$ 噪声的研究表明, 当表面进入耗尽状态后, 噪声随表面势的增加而迅速上升, 在即将反型时达到一个峰值, 且 $1/f$ 噪声频谱 $S_I(f)$ 与通过结的电流 I 存在如下关系^[2]

$$S_I(f) \propto I^\beta \quad (2)$$

对于体分量, $\beta \approx 1$; 对于表面分量, $\beta \approx 2$.

这种偏置特性与本文实验结果完全一致. 从图 3 可知, 当 I_F 大于 5 mA 时, 光电耦合器件的 $1/f$ 噪声功率谱随 I_F 急剧增加, 在 $I_F = 13$ mA 附近, $1/f$ 噪声出现最大值. 此区间 β 的拟合结果为 1.87, 所以

可以断定, 光电耦合器件的 $1/f$ 噪声为表面 $1/f$ 噪声.

2.2 $g-r$ 噪声的产生机理

为了确定光电耦合器件的 $g-r$ 噪声源, 分别从图 1 测试电路的 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, 前级(3、4 管脚的测量结果)未出现 $g-r$ 噪声, 但后级(1、2 管脚的测量结果)出现幅值很大的 $g-r$ 噪声, 如图 3. 180 只该批器件中低频段出现明显 $g-r$ 噪声(6 只)的测试结果均表现同样的规律, 所以可断定该批光电耦合器件的 $g-r$ 噪声源为后级的光敏三极管.

对比图 3 光电耦合器件 $1/f$ 噪声的偏置特性和图 4 $g-r$ 噪声的偏置特性发现, 在 $g-r$ 噪声出现最大

值时($I_F = 5$ mA 附近), $1/f$ 噪声表现为体分量(β 的拟和值为 1.05), 且幅值很小. 这表明, 对光电耦合器件而言, 只有当 $1/f$ 噪声很小(表现为体分量)时才能观测到明显叠加于 $1/f$ 噪声之上的 $g-r$ 噪声. 由前面的分析可知, 此时光电耦合器件的低频噪声是由结空间电荷区内陷阱对载流子随机复合和发射引起的, 而该批光电耦合器件的 $g-r$ 噪声源于光敏三极管, 所以该批光电耦合器件的 $g-r$ 噪声是光敏三极管发射结空间电荷区内陷阱对载流子复合和发射引起的光电流涨落的宏观表现. 图 4 中 $g-r$ 噪声幅值随输入电流的增加呈现而先增大后减小的变化规律也与 C. T. Gren 等人的实验结果完全吻合^[9].

半导体器件中存在有很多种缺陷形成的陷阱能级, 只有能量在 E_F 附近几个 kT 内的陷阱才对 $g-r$ 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低或价带顶, 离费米能级比较远, 所以只有深能级才会在表现出较大 $g-r$ 噪声. 但是对 pn 结而言, 由于内建电场的作用, 能带在空间电荷区发生弯曲, 如图 5(b). 这时, 即使在 n 区(或 p 区)内离费米能级比较远的陷阱能级也会在结区与费米能级相交, 在此交叉处陷阱对载流子具有最大的复合概率, 从而产生较大 $g-r$ 噪声. 发射结的正偏压的增加使得该交叉点将向轻掺杂一侧移动, 发射结通常为一侧为重掺杂, 所以主要考虑从重掺杂一侧注入的少数, 也就是说主要考虑的是轻掺杂一侧的陷阱能级, 根据噪声理论^[2], $g-r$ 噪声幅值也随之增大. 当该交叉点与结区边界处的陷阱能级差为 kT 时 $g-r$ 噪声幅值最大, 在随着偏压的继续增加, 该交叉点会慢慢进入中性区, 致使 $g-r$ 噪声减小.

根据噪声理论^[2], $g-r$ 噪声的特征频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{\sigma v n}{2\pi} [1 + \exp(-\frac{E_F - E_i}{kT})] \quad (3)$$

式中 E_F, v, n, σ 和 E_i 分别为陷阱的费米能级, 载流子的速度, 载流子浓度, 陷阱的俘获界面和陷阱能级.

由式(3)可知, $g-r$ 噪声的特征频率与陷阱能级和费米能级的相对位置有关. 当陷阱能级和费米能级的交叉点位于发射区时 $g-r$ 噪声的特征频率较大, 反之, 在基区时较小. 通常发射区的掺杂浓度比基区的浓度大一个数量级以上, 所以可在较宽的频率范围内观测到 $g-r$ 噪声. 另外, 当发射结的偏压增加时, 该交叉点会向轻掺杂一侧移动, 如图 5(b), 此时的费米能级也离导带或价带越近, 载流子浓度越大, $g-r$ 噪声的特征频率也越大. 所以, 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.

3 结论

本文对光电耦合器件 $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声的偏置特性进行了实验和理论研究. 实验发现, 两者均呈现随前级输入电流的增加呈现先增大后减小的规律, $g-r$ 噪声的峰值出现在低电流区, 此时 $1/f$ 噪声幅值很小且为体分量, $1/f$ 噪声的峰值出现的高电流区, 且主要为表面分量, 此时 $g-r$ 噪声已消失. 通过测量光电耦合器件的前级噪声和后级噪声, 发现光电耦合器件的 $g-r$ 噪声源为后级的光敏三极管. 理论分析表明, 该电耦合器件 $g-r$ 噪声的产生机理为光敏三极管发射结空间电荷区陷阱(深能级)对载流子俘获和发射, 引起了结区两端电势的涨落, 该涨落又以指数的形式调制了基区电流, 最终表现为大幅度的 $g-r$ 噪声. 空间电荷区费米能级与陷阱能级的相交点随偏置电压的增大向高掺杂区移动, 导致了光电耦合器件 $g-r$ 噪声随偏置电流的增加向高频移动, 且其幅值呈现先增大后减小的变化规律.

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 庄奕琪, 孙青. 电子器件可靠性的噪声表征方法. *电子学报*, 1996, **24**(2): 82~87
- Zhuang Y Q, Sun Q. *Acta Electronica Sinica*, 1996, **24**(2): 82~87
- 4 Shi J W, Jin E S, Ma J. An improved approach and experimental results of a low-frequency noise measurement technique used for reliability estimation of diode lasers. *Microelectronics Reliability*, 1994, **34**(7): 1261~1264
- 5 Doru Ursutiu, Jones. Low-frequency noise used as a lifetime test of LEDs. *Semicond Sci Technol*, 1996, **42**(11): 1133~1136
- 6 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): 136~141
- Zhuang Y Q, Sun Q. *Metrologica Sinica*, 1996, **17**(2): 136~141
- 7 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
- 8 张培宁, 郭维廉, 张以谟, 等. 集成型硅光电负阻器件及应用研究. *光子学报*, 1999, **28**(5): 424~426
- Zhang P N, Guo W L, Zhang Y M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 424~426
- 9 Gren C T, Brian K Jones. $1/f$ noise in bipolar transistor. *J Phys D: Appl Phys*, 1985, **18**(1): 77~91

Investigation of Mechanisms on $1/f$ Noise and G-R Noise in Optoelectronic Coupled Devices

Bao Junlin, Zhuang Yiqi, Du Lei, Ma Zhongfa, Li Weihua, Li Cong

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

Received date: 2004-10-29

Abstract Experimental dependences on bias current and physical mechanisms of $1/f$ noise and $g-r$ noise (generation-recombination noise) in Optoelectronic Coupled Devices (OCDs) are studied. Experimental results demonstrate that $g-r$ noise of OCDs emerges with $1/f$ noise in the range of low frequencies and both of them have a similar rule, that is to say, in the beginning, magnitudes of $g-r$ noise and $1/f$ noise increase and then decrease with the bias current keep increasing. From measuring noise of the front part and back part in OCDs, it is found that $g-r$ noise source in OCDs lies in the photosensitive transistor. Based on mechanisms of carrier fluctuation, it is discussed that $1/f$ noise in OCDs belongs to surface $1/f$ noise and $g-r$ noise is due to trapping and detrapping processes between carriers and deep-level in the emitter space-charge region of photosensitive transistor.

Keywords $1/f$ noise; $g-r$ noise; OCD; Deep-level



Bao Junlin received master degree from Lanzhou University, China, in 2000, he is working for doctor 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.