

晶体管PN结缺陷形成的G-R噪声研究

戴逸松

(吉林工业大学, 长春)

1987年8月22日收到

本文对大量晶体管g-r噪声测量结果表明,常温下g-r噪声具有很宽的时间常数分布及可能有很大的幅度. 现有的文献已无法解释这些实验结果,为此本文提出了pn结区缺陷引起的g-r噪声机理,给出了g-r噪声幅度及时间常数计算公式,可以对晶体管pn结缺陷形成的g-r噪声的形式及特点作出满意的解释.

主题词: g-r噪声,缺陷, pn结,双极型晶体管

一、引言

已经知道,半导体中的缺陷(杂质、晶格位错等)形成的禁带中能级起到间接复合中心作用,从而是半导体器件中产生-复合噪声(又称g-r噪声)的主要来源^[1,2,3]. 这种噪声对于器件低频状态工作具有极大的危害性,但另一方面通过器件g-r噪声的测量,有可能成为分析器件内在缺陷以及对器件可靠性筛选的一种无损、快速的好方法^[4]. 因此,研究半导体器件内g-r噪声机理及其特征具有很重要的价值. 虽然对于JFET沟道及空间电荷区内缺陷形成的g-r噪声机理分别由A. Van der Ziel^[5]及C. T. Sah^[6]建立,对于硅棒中重金属杂质引起的g-r噪声分析也已建立^[4,7],但是对于双极型晶体管g-r噪声形成机理至今仍在研究中.

目前,通过大量实验已经弄清楚发射结区体内及表面缺陷(位错、深能级杂质)是晶体管g-r噪声的主要来源^[2,3,8,9,11], Lauritzen于1968年首先提出了PN结内g-r噪声形成机理^[10],认为g-r噪声主要是结区内缺陷形成的复合中心交替发射及捕获载流子,导致复合电流的起伏所致. 通过计算证明g-r噪声谱强度相当复合电流散弹噪声的0.75—1倍. 由于在常温下很难与通过pn结总电流的散弹噪声区分,因此必需用栅控管^[8]或低温测量^[11]才能发现. 我们对大量晶体管3DG4C的低频噪声测量发现,有一些器件在常温下g-r噪声非常明显,用文[10]的观点很难解释这种幅度很大的g-r噪声.

其次,理论分析证明,即使缺陷引起禁带中多个能级,但仅在费米能级 E_f 附近的缺陷能级 E_i 才能形成足够强的g-r噪声^[12,13],对于Fe, Pd, Mn, Cr等杂质形成的g-r噪声主要在低温区,时间常数 τ 为 10^{-4} — 10^{-5} , (相应g-r噪声的转折频率 f_0 为几kHz~几十kHz)^[12]. 在室温下Au,晶格位错等可能形成g-r噪声,其 f_0 在50—300Hz^[14]. 我们对大量晶体管室温下g-r噪声测量表明,不仅 f_0 具有很大差别,见到从几Hz至几kHz的g-r噪声,而且还发现有双时间常数的g-r噪声,显然文[7]的观点很难解释,即使是考虑

SiO₂ 内缺陷,也仅能使 τ 变大,故 f_0 更小。

本文中,我们首先给出对晶体管 g-r 噪声的测试方法及测试结果,其次研究晶体管发射结区内 g-r 噪声形成机理,从而可以较完善的解释测试中得到的晶体管 g-r 噪声的幅度及时间常数分布的规律。

二、晶体管 g-r 噪声测试与结果

晶体管内部噪声可以用等效输入噪声电压 E_n 及等效输入噪声电流 I_n 表示,它们包含有散弹噪声, $1/f$ 噪声及 g-r 噪声,但电压噪声中还含有基区电阻 $r_{bb'}$ 的热噪声,且 E_n 数量小,测量准确度低。为此,我们测等效输入电流噪声功率谱 $S_i(f)$ 来提取 g-r 噪声分量。已知 $S_i(f)$ 为:

$$S_i(f) = 2qI_b + \frac{A}{f} + \sum_{i=1}^N \frac{B_i}{1 + \left(\frac{f}{f_{0i}}\right)^2}, \quad (1)$$

式(1)中 $2qI_b$ 为基极电流的散弹噪声,第二项为 $1/f$ 噪声,第三项为 g-r 噪声, N 表示器件具有 N 个 g-r 噪声源,相应的时间常数 $\tau_i = 1/2\pi f_{0i}$ 。

图 1 为测试系统, BG 为被测晶体管,源电阻 R_s 选 $100K\Omega$, 使 $I_s^2 R_s \gg E_n^2 + 4\pi T R_s$, 使测得的为 $S_i(f)$ 。为了比较不同晶体管的 $1/f$ 噪声与 g-r 噪声大小, BG 的基极电流 I_b 均用 $20\mu A$ 。频谱分析仪 CF-920 可以对放大器输出噪声作 $5Hz \sim 5kHz$ 的谱分析,经 IEEE-488 接口把噪声谱数据送到计算机进行 g-r 噪声分析。本系统测量放大器增益经计算机软件校正后,保证对不同晶体管在 $5Hz$ 至 $5KHz$ 范围内放大器增益不变。故被测晶体管的电流噪声功率谱可表示为 $S_i(f) = S_o(f)/K^2 R_s^2$, 中 K 为放大器增益, $S_o(f)$ 为 CF-920 得到的放大器输出电压噪声功率谱。图 1 中 E_{cc} 为电源电压。

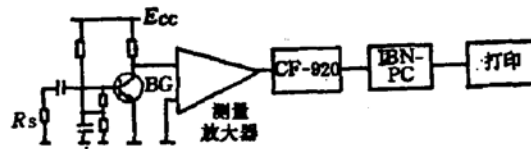


图 1 噪声测试系统

到目前为止,文献中还未见到从 $S_i(f)$ 中分离 g-r 噪声的有效方法,一般是从低频 $1/f$ 噪声谱的“凸起”来识别 g-r 噪声^[5],这不仅是不明显,而且没有定量的结果。我们采用下述方法来分离 g-r 噪声,可以得到满意的结果。对式(1)乘 f , 得到

$$fS_i(f) = 2qI_b f + A + \frac{Bf}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}, \quad (2)$$

式(2)中假定 $S_i(f)$ 只有一个 g-r 噪声,图 2 为变换后曲线,若器件无 g-r 噪声则为曲线 1 所示,与纵轴截距为 $1/f$ 噪声强度 A ,斜率反映了散弹噪声 $2qI_b$ 。若器件有 g-r 噪声,则为曲线 2,峰起反映了 g-r 噪声分量。峰点位置恰为 f_0 ,幅度为 $Bf_0/2$, f_0 越大则 g-r 噪

声的峰起范围越宽, 若器件具有几种 g-r 噪声, 则 $fS_i(f)$ 曲线将有几个峰起。由此可见, 根据 $fS_i(f)$ 数据, 通过计算机处理就可以找出相应的散弹噪声 $2qI_b$, $1/f$ 噪声幅度 A , g-r 噪声幅度 B 及频率 f_0 , 从而可以了解晶体管 g-r 噪声的特征(幅度及频率)。

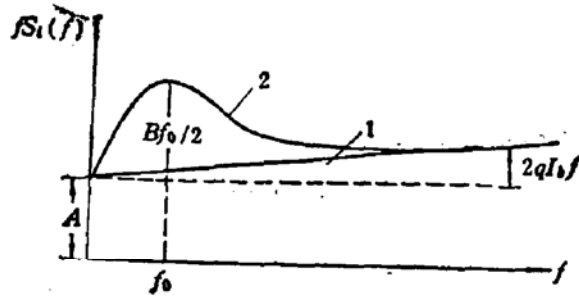


图2 $fS_i(f)$ 曲线及低频噪声成分计算

应用上述测试方法, 我们对大量晶体管 (3DG4C) 进行低频噪声分析, I_b 均为 $20\mu A$, 图 3 给出了几个典型的晶体管 $fS_i(f)$ 曲线形式, 可见除 #50 外, 均具有明显的 g-r 噪声, 应用计算机分析得到晶体管等效输入电流噪声中各噪声成分见表 1 所示。可见在低频范围内晶体管的 g-r 噪声不仅可能有较大幅度, 而且 f_0 具有几 Hz 至几 KHz 很宽的分布范围, 甚至可能出现双时间常数的 g-r 噪声。下面提出的晶体管 pn 结区 g-r 噪声形成机理可以对上述的实验结果给出满意的解释。

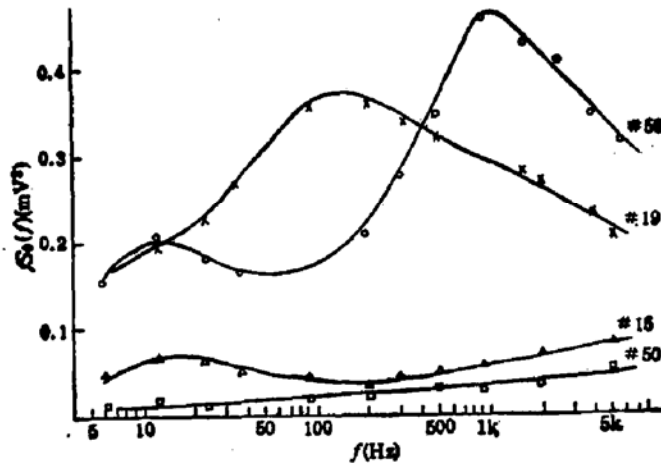


图3 晶体管 3DG4C 的低频噪声测试结果
测试条件: $I_b = 20\mu A$, $E_{cc} = 9V$

三、晶体管 PN 结区 g-r 噪声的时间常数分析

半导体器件内 g-r 噪声来自自由晶格位错或重金属杂质形成的禁带中深能级 E , 与导带或价带之间载流子随机产生及俘获。对 n 型掺杂半导体主要表现为导带的自由电子随机起伏, 对 p 型掺杂半导体为价带的空穴随机起伏。现以 n 型半导体为例, 导带电子起伏 ΔN 的谱密度^[12]

表 1 晶体管 3DG4C 低频噪声成分分析

噪声分析 器件号	$fS_n(f)(\text{mV}^2)$	$S_i(f)$ 中散弹 噪声 ($10^{-18}\text{A}^2/\text{Hz}$)	$S_i(f)$ 中 $\frac{1}{f}$ 噪声 ($10^{-18}\text{A}^2/\text{Hz}$)	$S_i(f)$ 中 g-r 噪声 ($10^{-18}\text{A}^2/\text{Hz}$)
#50	$0.015 + 0.01 \cdot 10^{-3}f$	$0.01 \cdot 10^{-3}$	$\frac{0.015}{f}$	0
#15	$0.0235 + 0.01 \cdot 10^{-3}f + \frac{0.0068f}{1 + (\frac{f}{12.5})^2}$	$0.01 \cdot 10^{-3}$	$\frac{0.0235}{f}$	$\frac{0.0068}{1 + (\frac{f}{12.5})^2}$
#19	$0.194 + 0.01 \cdot 10^{-3}f + \frac{0.00244f}{1 + (\frac{f}{169})^2}$	$0.01 \cdot 10^{-3}$	$\frac{0.194}{f}$	$\frac{0.0024}{1 + (\frac{f}{169})^2}$
#59	$0.105 + 0.01 \cdot 10^{-3}f + \frac{0.0148f}{1 + (\frac{f}{12.5})^2} + \frac{0.00085f}{1 + (\frac{f}{931})^2}$	$0.01 \cdot 10^{-3}$	$\frac{0.105}{f}$	$\frac{0.0148}{1 + (\frac{f}{12.5})^2} + \frac{0.00085}{1 + (\frac{f}{931})^2}$

$$S_N(f) = 4\Delta N^2 \frac{\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3)$$

式(3)中, $\overline{\Delta N^2} = N_t \lambda (1 - \lambda)$, $\lambda = \frac{s_-}{s_- + r_n n_0}$, $\tau = 1/(s_- + r_n n_0)$. 其中 N_t 为缺陷能级密度, s_- 为电子产生率, r_n 为电子俘获率. 根据热平衡时, 一切微观过程保持细致平衡^[6], 有 $s_- = r_n n_1$, 其中 $n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$, $n_1 = BN_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{kT}\right)$, N_c 为导带的有效状态密度, B 为杂质能级的分布函数中简并因子, n_0 为导带电子浓度. 于是 $\overline{\Delta N^2}$ 及 g-r 噪声频率 f_0 为:

$$\overline{\Delta N^2} = \frac{BN_t \exp\left(-\frac{E_t - E_F}{kT}\right)}{\left[1 + B \exp\left(-\frac{E_t - E_F}{kT}\right)\right]^2} \quad (4)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{r_n \cdot n_0}{2\pi} \left[1 + B \exp\left(-\frac{E_t - E_F}{kT}\right)\right] \quad (5)$$

为简化起见, 令 $B = 1$. 由式(4)可见, 只有当缺陷能级 E_t 等于费米能级 E_F 时, $\overline{\Delta N^2}$ 最大, 即器件的 g-r 噪声幅度最大, 这时 $\overline{\Delta N^2} = \frac{N_t}{4}$, $f_0 = \frac{r_n \cdot n_0}{\pi}$. 当 $E_t - E_F = \pm 3kT$ 时, $\overline{\Delta N^2} \approx 0.05N_t$, 即下降为最大值的 20%, 即 g-r 噪声迅速减少. 上述分析说明, 对于晶体管的 n 区(或 p 区)内的缺陷, 只有在某一温度下, 使 $E_t \approx E_F$, 才有明显的 g-r 噪声, 而且由于该温度下 n_0 一定, 故 g-r 噪声的 f_0 是一定的, 上述结论已为文[4, 7, 14]所证实.

但是, 对于晶体管的 pn 结区情况就不同, 由于 pn 结阻挡层的内建电位差 V_D 的作用, 使半导体能带在 pn 区发生弯曲, 如图 4(a) 所示。这时, 即使在 n 区(或 p 区)内缺陷的能级 $E_i \approx E_F$, 但在 pn 结的阻挡层中仍会产生 E_i 与 E_F 交叉, 从而在交叉点 A 附近形成 ΔN 起伏及 g-r 噪声。由此可见, 在 E_F 以下的深能级杂质能级在 pn 结区内均会产生 g-r 噪声。应该指出, 对于半导体掺杂的浅能级 E_D 在常温下不会在 pn 结形成 g-r 噪声, 只有在低温下, E_F 接近 E_c (或 E_v) 才可能形成较大的 g-r 噪声, 这可以解释文 [14] 的实验结果, 即低温下有较大的 g-r 噪声原因。

根据上述观点, 现在我们可以说明 g-r 噪声的时间常数 τ 或转折频率 f_0 在宽范围内变化的原因:

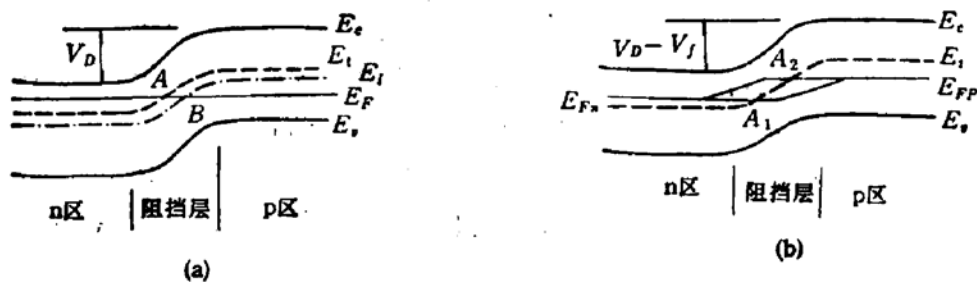


图 4 晶体管 pn 结阻挡层中能带

(1) 由于晶体管发射结二边掺杂的浓度有很大差别, 通常发射区掺杂浓度比基区大 100 倍, 因此根据式(5), 当 E_i 与 E_F 的交叉点发生在发射区时, 则 f_0 较大, 反之在基区时 f_0 较小, 二者可能相差一百倍以上。

(2) 晶体管 pn 结在外加偏置电压下, 能带会发生变化, 如图 4(b) 所示, 从而使 E_i 与 E_F 交叉点的位置变化, 故 g-r 噪声频率 f_0 也会改变, 甚至可能有二个交叉点, 即形成二个 g-r 噪声, f_0 分别相当几十 Hz 及几 KHz 的晶体管 #59 即可能是这种原因。

(3) 图 4(a) 所示, E_F 与导带底 E_c (或价带顶 E_v) 的距离越到发射结边缘则越近, 根据费米能级理论, 故 n_0 (或 p_0) 越大。因此, E_i 与 E_F 交点 A 越近发射结边缘, 则 f_0 越大。反之越近中间, 由于 $E_i \approx E_i$, 即相当本征状态 $n_0 \approx p_0 \approx n_i$, 故 f_0 越小。

图 5 的实验结果进一步说明本文的论点。增加被测晶体管的电源电压 E_{cc} , 由于 bc

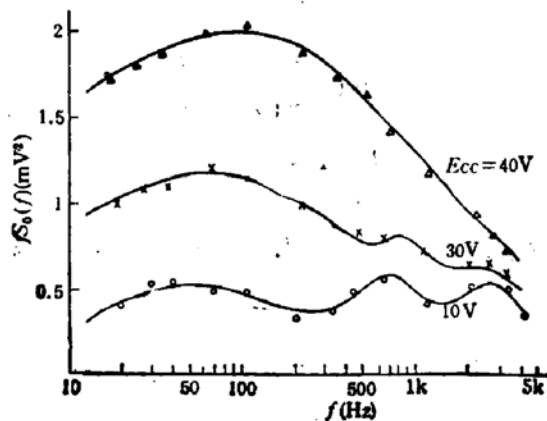


图 5 晶体管 g-r 噪声与 E_{cc} 关系

测试条件: $I_b = 30 \mu A$ 晶体管型号: 3DG4C #79

结反偏结基流增加,故相应增加 be 结基流,以维持总基流不变。可以看到 $E_{be} = 10V$ 时有三个 g-r 噪声源, f_0 分别为 40Hz, 800Hz, 3KHz, 这是禁带中三个缺陷能级造成,与 40Hz 对应的杂质能级 E_{i1} 接近 E_i , 故与 E_F 交点接近 pn 结中间, f_0 最低,而与 3KHz 对应的 E_{i2} 离 E_i 最远, 故交点接近 pn 结边缘, f_0 最高。随着 E_{be} 增加, pn 结温度上升, E_F 逐渐接近 $E_i^{(0)}$, 除了 E_{i1} 仍位于 E_F 以下, 从而在 pn 结区产生 g-r 噪声外, 其他二个杂质能级已高于 E_F , 故 g-r 噪声逐渐消失。其次根据式(5), 因 n_0 加大故 f_{01} 已由 40Hz 增加到 100Hz, 同时由于 be 结基流加大, 故 g-r 噪声幅度有明显的增加(式(9)证明与 I_b 成正比)。

四、晶体管 pn 结区 g-r 噪声的幅度分析

文献[10]认为 pn 结区的 g-r 噪声是由于结区内复合中心交替俘获与发射电子(或空穴)引起的复合电流噪声, 已经证明这种噪声数量较少。我们认为, 实验中发现的 g-r 噪声幅度可能很大的主要原因是: 复合中心俘获与发射过程, 会造成结区的载流子浓度变化, 从而引起 pn 结阻挡层的内建电位差 V_D 的波动, 最终即会使晶体管电流噪声中 g-r 噪声增加。

根据文[16], 在非简并情况下阻挡层的内建电位差为

$$V_D = \frac{\kappa T}{q} \left[\ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right], \quad (6)$$

式(6)中 N_D 及 N_A 为 pn 结两边的掺杂浓度, 故由于缺陷能级引起载流子的扰动就相当 N_D (或 N_A) 变化, 从而使 V_D 发生改变。设 E_i 与 E_F 交叉点发生在发射区, 对 npn 管, 发射区为 n 型半导体, 用 N_A 表示, 则

$$dV_D = \frac{\kappa T}{q} \frac{dN_A}{N_A} \quad (7)$$

根据肖克莱方程^[16], 基极电流

$$I_b = I_{b0} \left[\exp \left(\frac{qV_f}{m\kappa T} \right) - 1 \right]$$

V_f 为外加偏压, 这里 V_D 变化即相当一种外加偏压作用的波动, 从而 $\Delta V_D = \Delta V_f$, 上式取微分得

$$\begin{aligned} \Delta I_b &= I_{b0} \cdot \exp \left(\frac{qV_f}{m\kappa T} \right) \cdot \frac{q}{m\kappa T} \cdot \Delta V_f \\ &\approx I_b \cdot \frac{q}{m\kappa T} \Delta V_D \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中 m 为与表面复合有关的系数, 为 1~2。由式(7)可以得到 pn 结的 g-r 噪声功率谱为

$$\begin{aligned} S_i(f) &= \frac{I_b^2}{m^2 N_A^2} S_N(f) \\ &= \frac{4 I_b^2 \overline{\Delta N^2} \tau}{m^2 N_A^2} \left(\frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \end{aligned}$$

在 pn 结区的缺陷, 使 $E_i \approx E_F$ 时, 则 g-r 噪声幅度

$$B = \frac{I_b^2 N_i \tau}{m^2 N_A^2} \quad (9)$$

若 g-r 噪声发生在 pn 结的基区, 则式(9)中 N_A 用 N_D 代替(设为 npn 管)。一般晶体管基区掺杂浓度 N_D 远小于发射区掺杂浓度 N_A , 故基区内 pn 结的缺陷将会引起更大的 g-r 噪声。

式(9)说明结区内缺陷引起的 g-r 噪声幅度是没有限制的, 特别是与缺陷能级密度 N_i 及基极电流 I_b 的平方成正比。

图 6(a)为 *72 晶体管噪声功率谱 $f \cdot S_n(f)$ 曲线, 由此画出 g-r 噪声的幅度 B 及频率 f_0 与 I_b , 见图 6(b)。可见 I_b 增加时 B 迅速加大, 基本符合 $B \sim I_b^2$ 。其次 f_0 随 I_b 增加, 这是因为 I_b 越大、pn 结的注入非平衡载流子增加, 从而使载流子密度加大, 根据式(5)的 n_0 (或 P_0) 增加, 即 f_0 是逐渐加大。

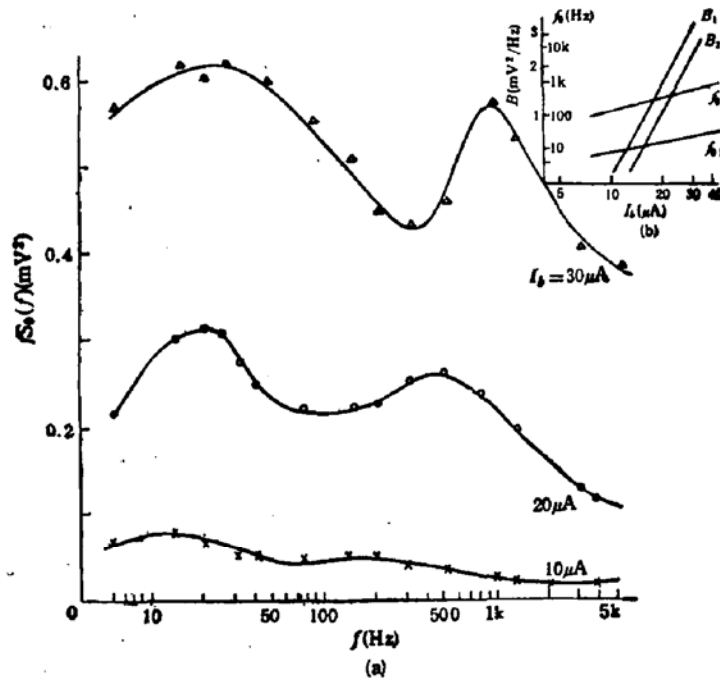


图 6 晶体管 g-r 噪声与 I_b 关系
晶体管型号: 3DG4C*72 测试条件: $E_{cc} = 9\text{V}$

五、结 论

(1) 晶体管 pn 结内 g-r 噪声产生的主要原因是由于缺陷复合中心俘获及产生引起的载流子扰动, 导致 pn 结内建电位差的起伏及晶体管的 g-r 噪声电流。

(2) 由于在结区内能带弯曲, 故所有深能级的杂质能级 E_i 均可能与 E_F 相交。因此晶体管 pn 结中的缺陷, 在常温下也能产生具有不同时间常数的 g-r 噪声(其 f_0 大致为几 Hz 至几 KHz), 个别的还可能有双时间常数的 g-r 噪声。但对于半导体掺杂形成的浅能级, 只有在低温下才有明显的 g-r 噪声。

(3) 本文推导了由 pn 结阻挡层的内建电位差起伏引起的 g-r 噪声公式, 证明其幅度与基极电流平方及结区缺陷能级密度成正比。它可能有很大的幅度, 因此有可能成为晶体管低频噪声中的主要成份。特别是基区缺陷引起 g-r 噪声更大。

(4) 晶体管 g-r 噪声的产生机理研究、幅度和频率测定, 对于了解晶体管 pn 结附近的缺陷大小, 位置及性质, 预测晶体管可靠性及筛选不可靠器件将可能起到重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Mihai Mihaila, Kostas Amberiadis, *Solid-State Electronics*, 26, 109, (1983).
- [2] M. Mihaila, K. Amberiadis, A. Van der Ziel, *Solid-State Electronics*, 27, 675(1984).
- [3] Masanori, Nishida, *IEEE Tran. on Electron Devices*, ED-20, 221(1973).
- [4] John, A. Copeland, *IEEE Tran. on Electron Devices*, ED-18, 50(1971).
- [5] A. Van der Ziel, *Proc. IEEE*, 51, 1670(1963).
- [6] C. T. Sah, *Proc. IEEE*, 52, 795(1964).
- [7] G. Bosman, R. J. J. Zijlstra, *Solid-State Electronics*, 25, 273(1982).
- [8] G. Blasquez, *Solid-State Electronics*, 21, 1425(1978).
- [9] Xichen, C. Zhu, X. U. Zhang, A. Van der Ziel, Carl. O. Bozler, *IEEE Tran. on Electron Devices*, ED-31, 1408(1984).
- [10] Peter, O. Laurizen, *IEEE Tran. on Electron Devices*, ED-15, 770(1968).
- [11] C. F. Hiatt, A. Van der Ziel and K. M. Van Vliet, *IEEE Tran. on Electron Devices*, ED-22, 614(1975).
- [12] A. Van der Ziel, "Noise: Sources, Characterization, Measurement", pp108—109, Prentice-hall, Inc., Englewood cliffs, N. J., (1970).
- [13] Kwyro Lee, Kostas Amberiadis, A. Van der Zier, *Solid-State Electronics*, 25, 999(1982).
- [14] James, W. Haslett, E. J. M. Kendall, *IEEE Tran. on Electron Devices*, ED-19, 943(1972).
- [15] Zhihao Fang, *IEEE Tran. on Electron Devices*, ED-33, 516(1986).
- [16] 王长安主编, 半导体物理基础, pp105—106, 上海科学技术出版社, (1985).

Investigation of G-R Noise Induced by Defects in P-N Junction of Bipolar Transistor

Dai Yisong

(Jilin University of Technology, Changchun)

Abstract

The measurements of bipolar transistors demonstrate that at room temperature, the g-r noise has a wide region of time constant and a large amplitude. The author gives the theory of the g-r noise induced by the defects in the p-n junction of bipolar transistor, and calculates the time constant and amplitude of the g-r noise, giving a satisfactory elucidation for the property of the g-r noise.

KEY WORDS: Generation-Recombination noise, Defect, P-N Junction, Bipolar Transistor