

多极管中正偏 pn 结光注入载流子的作用

谭 淞 生 陈 沛 然

(中国科学院上海冶金研究所)

1979 年 12 月 10 日收到

提 要

通过扫描电子显微镜束感生电流图象的观察,提出了必须考虑多极管中正偏 pn 结光注入载流子的作用。本文给出了有关的实验结果,并基于 Ebers-Moll 模型和相应的假设,通过计算,得到一个可以同时考虑饱和电流、正偏 pn 结和反偏 pn 结处光注入载流子作用的统一公式,并与有关的实验结果进行比较,基本相符。

一、引 言

反偏 pn 结光注入载流子,在三极管传输过程中的放大作用,是广泛采用的光敏三极管的工作原理,可用光敏二极管和放大器组合的简单模型加以解释^[1]。虽然光敏三极管在光照时,正偏 pn 结同样也要产生非平衡载流子,但由于对外电流的贡献很小,因此从不加考虑,更不存在同时讨论该二类非平衡载流子作用的模型。

电子束轰击 pn 结也产生电子-空穴对,其性质同属于光注入。扫描电子显微镜束感生图象的实验,可以分别显示出三极管中正、反偏 pn 结处的光注入载流子的贡献。为此, Gonzales^[2]曾基于 Ebers-Moll 模型进行了简化计算,但不能解释实验观察到的三极管束感生图象。本文进行了严格的计算,得到了电流的精确统一表示式,并讨论多极管中正反偏压 pn 结的光注入载流子对外电流的贡献。

二、束感生电流图象的实验结果

扫描电子显微镜技术发展了一种方法,利用非常细的电子束,在半导体表面扫描,电

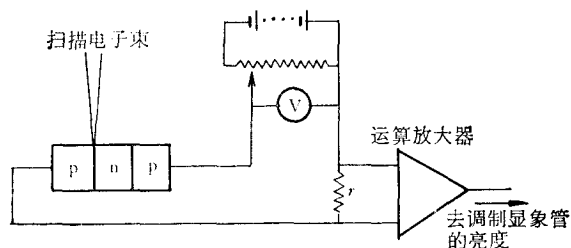


图 1 扫描电子显微镜束感生电流成象方法

子束轰击所产生的载流子在半导体内传输,而对外电流产生贡献。将此变化的信号经放大后,去调制一个与电子束同步扫描的显像管的亮度,从而在荧光屏上得到一幅束感生电流图像(EBIC 方法)。束感生电流图象的成象方法和简单的原理如图 1 所示,图 2 为一组不同偏压情况下,平面晶体管的束感生电流像。

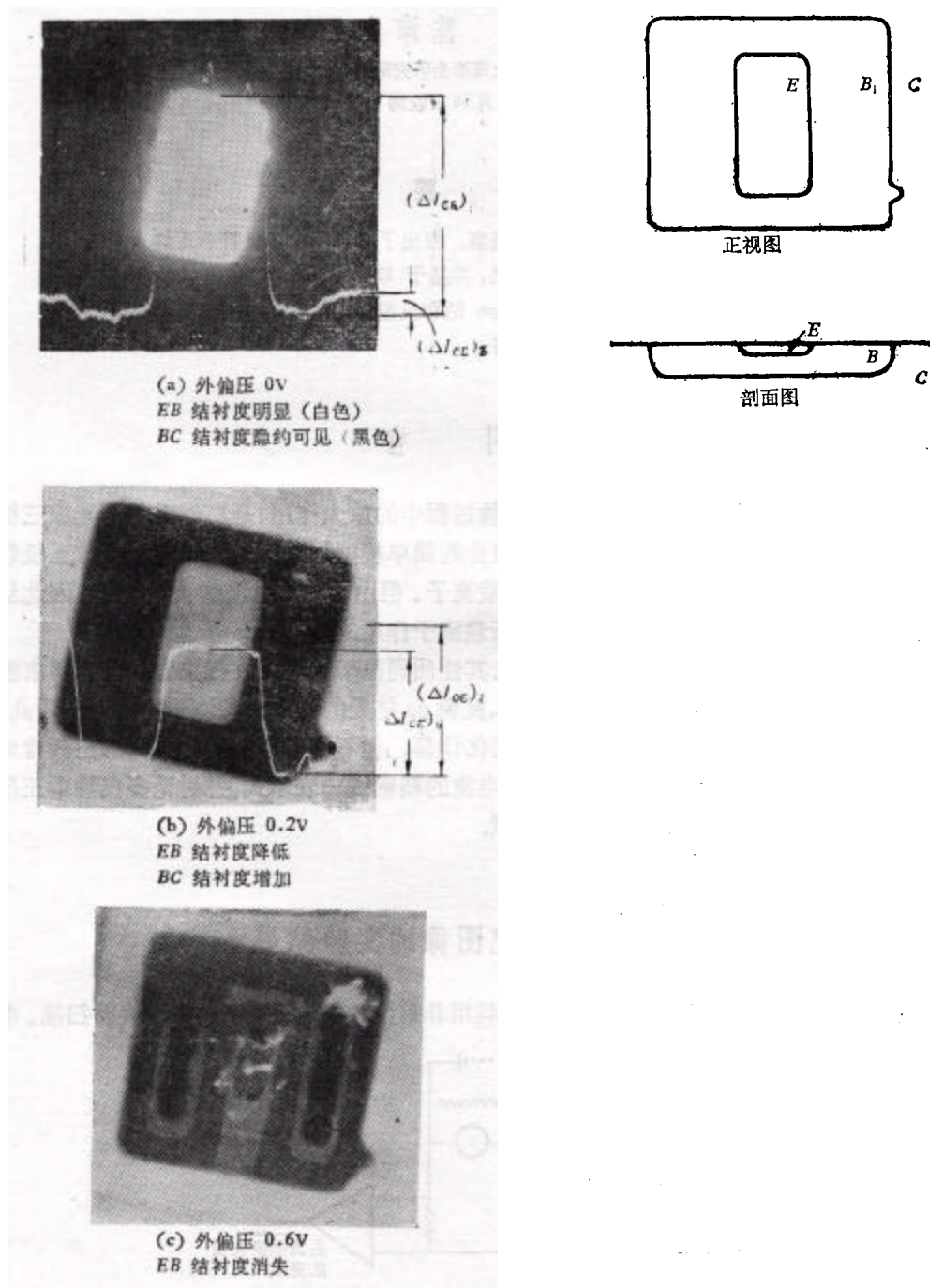


图 2 一组偏压平面三极管的束感生电流图象 EB 结正偏压; BC 结反偏压

图象上相应于 pn 结处的衬度,即反映了光注入载流子对外电流的贡献(如图 2 所示).观察表明:

1. 在三极管外加偏压较小时,正偏 pn 结的光注入载流子对外电流是有贡献的.
2. 光注入的正偏 pn 结和反偏 pn 结各具有相反的衬度.
3. 随着外加偏压增大,正偏 pn 结的衬度迅速减弱,且趋近于消失;而反偏 pn 结衬度相应增大.图像的解释,必须考虑正偏 pn 结光注入载流子的作用.

三、多极管中正偏 pn 结光注入载流子的作用

1. 三极管的情况

1) 假设和计算 偏压二极管经光照后,输出将增加一项光注入电流 I_L ,其电流公式是 $I = I_S(e^{qV/kT} - 1) - I_L$,这已为实验所证实.我们假设:三极管经光照后,描述三极管 $V-I$ 特性的 Ebers-Moll 模型未曾改变,仅是两个理想指数二极管的电流公式,将分别增加相应的光注入电流,如图 3 所示.

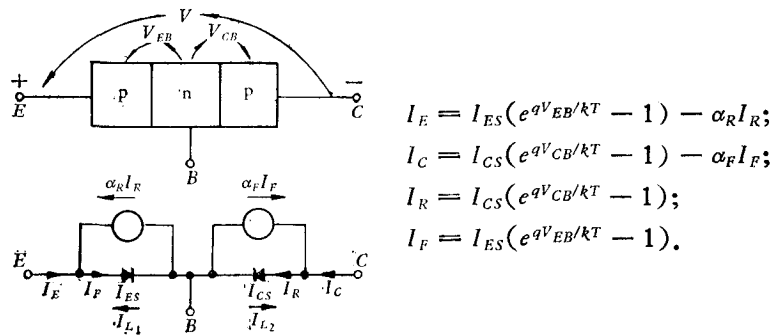


图 3 晶体管的 Ebers-Moll 模型^[3]

所以存在光照时, Ebers-Moll 方程将变成

$$I_E = I_{ES}(e^{qV_{EB}/kT} - 1) - I_{L1} - \alpha_R I_{CS}(e^{qV_{CB}/kT} - 1) + \alpha_R I_{L2}, \quad (1)$$

$$I_C = -\alpha_F I_{ES}(e^{qV_{EB}/kT} - 1) + \alpha_F I_{L1} + I_{CS}(e^{qV_{CB}/kT} - 1) - I_{L2}. \quad (2)$$

按通常三极管偏压的方式,集电极电压比发射极电压低 V_V (在 pnp 情况),因而有

$$V_{CB} = V_{EB} - V. \quad (3)$$

今三极管作为二端器件使用,电流仅从发射极 E 和集电极 C 引出,根据电流连续性原理,应有

$$I_C = -I_E. \quad (4)$$

将(3)式代入(1)和(2)式,然后再代入(4)式,可得

$$e^{qV_{EB}/kT} = \frac{(1 - \alpha_F) \cdot (I_{ES} + I_{L1}) + (1 - \alpha_R) \cdot (I_{CS} + I_{L2})}{I_{ES}(1 - \alpha_F) + I_{CS}(1 - \alpha_R) \cdot e^{-qV/kT}}. \quad (5)$$

外电流 $I_{CE} = I_C$ (或 $I_{CE} = -I_E$), 将(5)式代入(2)式(或(1)式),并经过繁琐的代数运算后,得

$$I_{CE} = -\frac{(1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS} I_{ES} (1 - e^{-qV/kT})}{I_{ES}(1 - \alpha_F) + I_{CS}(1 - \alpha_R)e^{-qV/kT}} + \frac{(1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS} \cdot I_{L_1} e^{-qV/kT}}{I_{ES}(1 - \alpha_F) + I_{CS}(1 - \alpha_R)e^{-qV/kT}} - \frac{(1 - \alpha_F \alpha_R) I_{ES} \cdot I_{L_2}}{I_{ES}(1 - \alpha_F) + I_{CS}(1 - \alpha_R) \cdot e^{-qV/kT}}. \quad (6)$$

2) 公式的讨论 (1) 当不存在光注入时, I_{L_1} 和 I_{L_2} 都是零, 则(6)式变成

$$I_{CE} = \frac{(1 - \alpha_F \alpha_R)}{I_{ES}(1 - \alpha_F) + I_{CS}(1 - \alpha_R) \cdot e^{-qV/kT}} \cdot I_{CS} I_{ES} (e^{-qV/kT} - 1).$$

如果外加偏压 V 较大(在室温时 $V \geq 100\text{mV}$, $e^{-qV/kT} \rightarrow 0$), 则可以推导得到三极管反向饱和电流 $I_{ceo} \doteq -\frac{1 - \alpha_F \alpha_R}{1 - \alpha_F} I_{CS}$, 这就是 Ebers-Moll 公式直接推导得到的结果.

(2) 当光注入 BC 结(如图 3 所示, BC 结处于反偏压), 且考虑外加偏压较大的情况, 则得

$$I_{CE} \doteq -\frac{1 - \alpha_F \alpha_R}{1 - \alpha_F} I_{CS} - \frac{1 - \alpha_F \alpha_R}{1 - \alpha_F} I_{L_2}.$$

由于光注入电流 I_{L_2} 所引起的外电流增量

$$(\Delta I_{CE})_2 \doteq -\frac{1 - \alpha_F \alpha_R}{1 - \alpha_F} I_{L_2},$$

它与反向饱和电流 I_{ceo} 有相同的符号. 且由于 $\frac{1 - \alpha_F \alpha_R}{1 - \alpha_F} > 1$, 因此在三极管中反偏的 BC 结受光照时, 所引起外电流的增量, 要大于该结的光注入电流, 这就是通常讨论的光敏三极管对光注入电流的放大作用.

(3) 光注入 EB 结(如图 3 所示, EB 结处于正偏压), 由于光注入电流 I_{L_1} 所引入的外电流增量

$$(\Delta I_{CE})_1 = \frac{(1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS}}{I_{ES}(1 - \alpha_F) + I_{CS}(1 - \alpha_R) \cdot e^{-qV/kT}} \cdot I_{L_1} e^{-qV/kT},$$

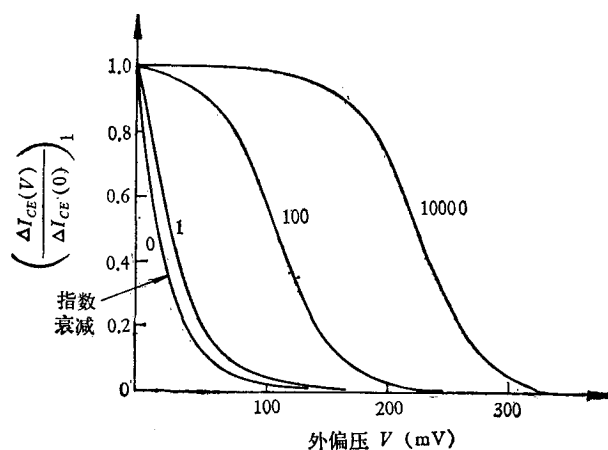


图 4 $(\Delta I_{CE})_1$ 随偏压 V 增加而衰减的速率

$$\frac{I_{CS}(1 - \alpha_R)}{I_{ES}(1 - \alpha_F)} : 0, 1, 100, 10000$$

对比 $(\Delta I_{CE})_1$ 和 $(\Delta I_{CE})_2$ 的符号可知, 正偏和反偏 pn 结的光注入电流, 对外电流的贡献具有相反的符号. 且由于 $(\Delta I_{CE})_1$ 中包含 $e^{-qV/kT}$ 一项, 使正偏结的光注入电流对外电流的贡献, 将随着外偏压的增加而减小, 最后趋于消失. 仅是由于分母中存在 $I_{CS}(1 - \alpha_R)e^{-qV/kT}$ 项之故, 使衰减速率低于指数衰减速率, 如图 4 所示.

本节讨论解释了三极管中, 正偏结的 EBIC 图象随偏压的变化规律; 也说明了通常使用光敏三极管时, 可以不考虑正向结光注入电流作用的原因.

2. pnpn 四极管的情况

考虑 pnpn 四极管各极区的少子分布及少子扩散流, 可得到四极管时, 类似于晶体管中 Ebers-Moll 模型的关系式, 如图 5 所示.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{1S}(e^{qV_1/kT} - 1) - \alpha'_1 I_{2S}(e^{qV_2/kT} - 1); \\
 I_2 &= I_{2S}(e^{qV_2/kT} - 1) - \alpha_1 I_{1S}(e^{qV_1/kT} - 1) \\
 &\quad - \alpha_3 I_{3S}(e^{qV_3/kT} - 1); \\
 I_3 &= I_{3S}(e^{qV_3/kT} - 1) - \alpha'_3 I_{2S}(e^{qV_2/kT} - 1). \quad (7)
 \end{aligned}$$

图 5 pnpn 结构的类似 Ebers-Moll 模型

在存在光注入时, 我们仍然采用三极管时的同样假设, 则方程组(7)将变成

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{1S}(e^{qV_1/kT} - 1) - I_{L1} - \alpha'_1 I_{2S}(e^{qV_2/kT} - 1) + \alpha'_1 I_{L2}, \\
 I_2 &= I_{2S}(e^{qV_2/kT} - 1) - I_{L2} - \alpha_1 I_{1S}(e^{qV_1/kT} - 1) + \alpha_1 I_{L1} \\
 &\quad - \alpha_3 I_{3S}(e^{qV_3/kT} - 1) + \alpha_3 I_{L3}, \\
 I_3 &= I_{3S}(e^{qV_3/kT} - 1) - I_{L3} - \alpha'_3 I_{2S}(e^{qV_2/kT} - 1) + \alpha'_3 I_{L2}, \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中 I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} 分别是 J_1 , J_2 , J_3 结的光注入电流.

如果考虑 pnpn 管处于“断开”状态, 且电流较小的情况时, 降落在 J_1 和 J_3 结的正向偏压必定很小(仅 J_2 结处于反偏压)即 $\frac{qV_1}{kT} < 1$, $\frac{qV_3}{kT} < 1$, 此时可作如下近似:

$$e^{qV_1/kT} \doteq 1 + \frac{qV_1}{kT}, \quad e^{qV_3/kT} - 1 \doteq \frac{qV_3}{kT}. \quad (9)$$

$$\text{同样有} \quad e^{qV_3/kT} - 1 \doteq \frac{qV_3}{kT}. \quad (10)$$

根据图 5, 有 $V_2 = V_1 + V_3 - V$, 所以

$$e^{qV_2/kT} = e^{-qV/kT} \cdot e^{qV_1/kT} \cdot e^{qV_3/kT} \doteq e^{-qV/kT} \left(1 + \frac{qV_1}{kT}\right) \left(1 + \frac{qV_3}{kT}\right)$$

$$= e^{-qV/kT} \left(1 + \frac{qV_1}{kT} + \frac{qV_3}{kT} + \frac{qV_1}{kT} \cdot \frac{qV_3}{kT} \right).$$

忽略二级小量,则有
$$e^{qV_2/kT} \doteq e^{-qV/kT} \left(1 + \frac{qV_1}{kT} + \frac{qV_3}{kT} \right). \quad (11)$$

将(9)–(11)式代入方程组,并经整理后,可得

$$\begin{aligned} I_1 &= (I_{1S} - \alpha'_1 I_{2S} e^{-qV/kT}) \frac{qV_1}{kT} - \alpha'_1 I_{2S} e^{-qV/kT} \cdot \frac{qV_3}{kT} \\ &\quad - \alpha'_1 I_{2S} (e^{-qV/kT} - 1) - I_{L_1} + \alpha'_1 I_{L_2}; \\ I_2 &= (I_{2S} e^{-qV/kT} - \alpha_1 I_{1S}) \frac{qV_1}{kT} + (I_{2S} e^{-qV/kT} - \alpha_3 I_{3S}) \frac{qV_3}{kT} \\ &\quad + I_{2S} (e^{-qV/kT} - 1) + \alpha_1 I_{L_1} - I_{L_2} + \alpha_3 I_{L_3}; \\ I_3 &= -\alpha'_3 I_{2S} e^{-qV/kT} \cdot \frac{qV_1}{kT} + (I_{3S} - \alpha'_3 I_{2S} e^{-qV/kT}) \frac{qV_3}{kT} \\ &\quad - \alpha'_3 I_{2S} (e^{-qV/kT} - 1) - I_{L_3} + \alpha'_3 I_{L_2}. \end{aligned} \quad (12)$$

当 pnpn 管作二端器件使用时(如图 5 所示),根据电流连续性原理,应有 $I = I_1 = -I_2 = I_3$, 将方程组(12)代入,并解线性方程组,最后可得

$$\begin{aligned} I &= [(1 - \alpha_1 \alpha'_1 - \alpha_3 \alpha'_3) I_{1S} I_{2S} I_{3S} (1 - e^{-qV/kT})] / [(1 - \alpha'_3 + \alpha_1 \alpha'_3 \\ &\quad - \alpha_1 \alpha'_1) I_{1S} I_{2S} e^{-qV/kT} + (1 - \alpha'_1 + \alpha'_1 \alpha_3 - \alpha_3 \alpha'_3) I_{2S} I_{3S} e^{-qV/kT} \\ &\quad + (1 - \alpha_1 - \alpha_3) I_{1S} I_{3S}] \\ &\quad - [(1 - \alpha_1 \alpha'_1 - \alpha_3 \alpha'_3) I_{2S} I_{3S} \cdot I_{L_1} e^{-qV/kT}] / [(1 - \alpha'_3 + \alpha_1 \alpha'_3 \\ &\quad - \alpha_1 \alpha'_1) I_{1S} I_{2S} e^{-qV/kT} + (1 - \alpha'_1 + \alpha'_1 \alpha_3 - \alpha_3 \alpha'_3) I_{2S} I_{3S} e^{-qV/kT} \\ &\quad + (1 - \alpha_1 - \alpha_3) I_{1S} I_{3S}] \\ &\quad + [(1 - \alpha_1 \alpha'_1 - \alpha_3 \alpha'_3) I_{1S} I_{3S} \cdot I_{L_2}] / [(1 - \alpha'_3 + \alpha_1 \alpha'_3 \\ &\quad - \alpha_1 \alpha'_1) I_{1S} I_{2S} e^{-qV/kT} + (1 - \alpha'_1 + \alpha'_1 \alpha_3 - \alpha_3 \alpha'_3) I_{2S} I_{3S} e^{-qV/kT} \\ &\quad + (1 - \alpha_1 - \alpha_3) I_{1S} I_{3S}] \\ &\quad - [(1 - \alpha_1 \alpha'_1 - \alpha_3 \alpha'_3) I_{1S} I_{2S} \cdot I_{L_3} e^{-qV/kT}] / [(1 - \alpha'_3 + \alpha_1 \alpha'_3 \\ &\quad - \alpha_1 \alpha'_1) I_{1S} I_{2S} e^{-qV/kT} + (1 - \alpha'_1 + \alpha'_1 \alpha_3 - \alpha_3 \alpha'_3) I_{2S} I_{3S} e^{-qV/kT} \\ &\quad + (1 - \alpha_1 - \alpha_3) I_{1S} I_{3S}]. \end{aligned} \quad (13)$$

在不存在光注入,且外加偏压 V 较大时,并考虑到 $\alpha_1 \alpha'_1 + \alpha_3 \alpha'_3 \ll 1$ 的情况,则由(13)式可推导得 $I = \frac{I_{2S}}{1 - \alpha_2 - \alpha_3}$, 这就是熟知的可控硅在“断开”状态时的电流公式.

对(13)式中各光注入 pn 结电流项的讨论,可得到三极管时完全相同的结论.

四、讨 论

我们根据 Gonzales 的假设,并仿照其所采用的符号和计算方法,得到

$$I_{CE} = \frac{I_{BE} - I_{BC} [(I_F - \alpha_R I_R) / (I_R - \alpha_F I_F)]}{1 + [(I_F - \alpha_R I_R) / (I_R - \alpha_F I_F)]}. \quad (14)$$

上式中 I_{BE} 和 I_{BC} 分别相应于上文中所采用的 I_{L_1} 和 I_{L_2} . 他进一步认为,在零偏压和偏压很小时,可以得到如下的近似公式(这是 Gonzales 在文章中直接给出的公式):

$$I_{CE} = \frac{I_{BE} - I_{BC}[(I_{ES} - \alpha_R I_{CS})/(I_{CS} - \alpha_F I_{ES})]}{1 + [(I_{ES} - \alpha_R I_{CS})/(I_{CS} - \alpha_F I_{ES})]}. \quad (15)$$

即在此近似情况下,作了如下两个变换: $I_F \rightarrow I_{ES}$; $I_R \rightarrow I_{CS}$. 基于 $I_F = I_{ES}(e^{qV_{EB}/kT} - 1)$, $I_R = I_{CS}(e^{qV_{CB}/kT} - 1)$ 的事实,我们认为上述近似变换是不恰当的.

考虑(14)式中 I_R 和 I_F , 在三极管如图 3 的偏压时的情况. 由于 EB 结是正偏, 因此 EB 结被正向导通 $I_F > 0$; 而 BC 结是反偏, 因此流过 BC 结的是反向漏电流 $I_R < 0$. 则(14)式可变成

$$I_{CE} = \frac{1}{1 - [(I_F + \alpha_R |I_R|)/(|I_R| + \alpha_F I_F)]} I_{BE} - \frac{(I_F + \alpha_R |I_R|)/(|I_R| + \alpha_F I_F)}{1 - [(I_F + \alpha_R |I_R|)/(|I_R| + \alpha_F I_F)]} I_{BC}. \quad (16)$$

(16)式表明光注入电流 I_{BE} 和 I_{BC} 对外电流 I_{CE} 的贡献,应该有相同的符号,但这是与三极管的 EBIC 图像上两个结具有相反衬度的现象矛盾的. 而且(14)式明显无法阐明正向结的衬度随偏压变化的规律. 上述矛盾表明了, Gonzales 将光注入项看成独立电流源,而不考虑相邻结的交互作用是不适当的.

光注入 pn 结处产生的电子-空穴对,在 pn 结空间电荷区电场的作用下,将被分离而产生光电流. 如图 6 所示,从光注入的电子-空穴对被分离后的运动方向可知,不论是光照正偏 pn 结,还是光照反偏 pn 结,在离开空间电荷区后都是“多子流”. 因而,光注入电流对外电流的贡献将取决于此多子流,通过相邻 pn 结的情况. 根据 Shockly 的模型,正偏 pn 结处,由于结附近电子和空穴浓度很大,多子可以通过正偏 pn 结的空间电荷区向邻区注入;至于反偏的 pn 结处,流向 pn 结的多子将被阻挡. 考虑图 6(b) 的情况,左侧反偏的 pn 结所产生的光注入电子流,将通过邻近的正偏 np 结,且由于此正偏 np 结反向空穴的注入,而使光电流得到放大. 对图 6(a) 的情况作相似的考虑可知,左侧正偏的 pn 结所产生的光电流,对外电流无贡献. 除非右侧反偏 pn 结的反向漏电流尚未达到“饱和”,或仅达到浅“饱和”状态,此时反偏结的 n 区一侧,由于光注入电子流受阻而积累,能够显著地降低此反偏 np 结的反向漏电流,从而在外电路上得到显示.

如果进一步想象图 6(a) [或图 6(b)] 的右端,继续串连了一系列的 pn 结,它们是正

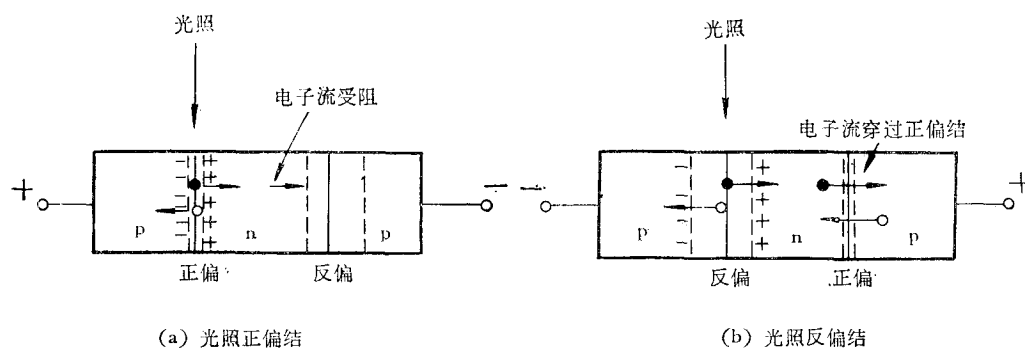


图 6 光照三极管的一个结时电子-空穴对的运动

偏、反偏相间(或反偏、正偏相间),同样采用上面讨论的原理,继续考虑光注入电子流向右方向的运动。则结论是多极管中,各 pn 结光注入载流子的作用,将类似于三极管和四极管的情况,其反偏 pn 结的光注入载流子,在其传输过程中,将交替发生由于复合而减小,以及在正偏 pn 结处的反向注入而放大的过程,其总和的结果将决定对外电流的贡献;而正偏的 pn 结的光注入载流子,仅在外加偏压较小的情况,对外电流产生贡献,且随着外加偏压的增大,此贡献将减少并趋于消失。

作者对王渭源、王其闵、季良超和陆德仁等同志在成稿过程中给予的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 瀨川 进·石井 清·黑井 豊·山本 宏,电子展望, **11** (1974), 51.
- [2] A. J. Gonzales, Proc. 7th Annu. SEM Symposium, IITRI, Chicago, (1974), 942.
- [3] P. E. Gray, D. Dewitt, A. R. Boothroyd, J. F. Gibbons, Physical Electronics and Circuit Model of Transistors, New York, Wiley, (1964), Chap. 9.

THE EFFECT OF PHOTO-INJECTED CARRIERS IN FORWARD BIASED JUNCTIONS OF A MULTIJUNCTION DEVICE

TAN SONG-SHENG CHEN PEI-RAN

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

ABSTRACT

In order to interpret the EBIC (electron beam induced current) photographs of scanning electron microscope, it is found necessary to take the effect of photo injected carriers from forward biased pn junction into consideration. In this paper, results of contrast observation on a series of EBIC photographs of a transistor at different levels of applied voltage are discussed. Based on the Ebers-Moll model for transistors together with some additional assumptions, we have been able to derive equations capable of describing the saturation current, effects of photo injected carriers from forward biased and reverse biased pn junctions. The theoretical analyses are qualitatively in agreement with the experimental results.