

# 半导体光磁电效应的非线性特征

罗诗裕 刘曾荣 邵明珠

(重庆交通学院) (安徽大学) (重庆交通学院)

1985 年 3 月 17 日收到

## 提 要

本文从 Shockley-Read 统计出发, 引入载流子寿命与浓度的相关性, 将载流子的输运方程化为二阶非线性微分方程, 并用双参数摄动法找到了方程的一般解, 且在二级近似下, 计算了半导体材料的短路电流和光导电流, 揭示了大信号情况下光磁电效应的非线性特征, 进一步拟合了实验数据。

## 一、引 言

在半导体材料的载流子输运时, 光磁电效应起着十分重要的作用。在半导体技术中光磁电效应也有着广泛的应用, 比如利用这个效应可以精确测定少子寿命。如果将此效应同材料的光电导测量相结合, 还可精确测定载流子的表面复合速度等等<sup>[1]</sup>。

人们在研究光磁电效应(下面简称 PME 效应)的早期工作中, 通常都假定载流子寿命与它的浓度无关, 因而描写载流子输运的连续性方程是一个线性的二阶微分方程, 结果对于光强比较弱(即低注入或低浓度)情况符合得比较好。随着测量技术的不断提高, 人们发现, 即使在低注入情况下, PME 效应也有可观察的非线性特征。而在大注入情况下, 则只有非线性微分方程才能描写。于是有人从经验出发<sup>[2]</sup>, 假定了不同形式的寿命-浓度相关性, 从而改善了理论同实验的拟合程度。然而, 这类唯象分析缺乏必要的理论依据。好在人们早就从 Shockley-Read 统计出发导出了载流子寿命  $\tau$  与浓度  $\Delta\xi/\xi_0$  之间的依赖性。但因函数  $\tau(\Delta\xi/\xi_0)$  比较复杂, 文献[3]仅将寿命  $\tau$  按浓度展开, 保留一次项, 从而将连续性方程化为了含  $(\Delta\xi/\xi_0)^2$  项的二阶非线性微分方程, 成功地揭示了 PME 效应的非线性特征。但是, 这个工作仅在小信号情况下成立, 当然同线性近似相比, 允许的注入信号已有了明显的增加。但因它只在展开式中保留了一次项, 说明它仍然只能在比较小的信号下才成立。此外, 这一工作也没有完全考虑载流子寿命的参数相关性, 给结果带来了一定的局限。基于上述考虑, 本文直接从 Shockley-Read 统计出发<sup>[4]</sup>, 引入载流子寿命与浓度的依赖性, 把载流子的连续性方程化为二阶非线性微分方程, 并用双参数摄动法找到了方程的一般解。还在二级近似下, 具体计算了半导体材料的短路电流和光导电流。讨论了这两个量与注入强度和吸收系数之间的关系。揭示了大注入情况下光磁电效应的非线性特征。

## 二、运动方程

在稳恒状态下,半导体中载流子输运满足如下的连续性方程:

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J} - \frac{\Delta \xi}{\tau} = -g(x, y, z), \quad (1)$$

其中  $\Delta \xi$  是过剩载流子浓度(当  $\Delta \xi = \Delta n$  时,表示过剩电子浓度;当  $\Delta \xi = \Delta p$  时,表示过剩空穴浓度),  $\mathbf{J}$  是载流子密度矢量 ( $\mathbf{J} = \mathbf{J}_n$  表示电子电流密度矢量;  $\mathbf{J} = \mathbf{J}_p$  表示空穴电流密度矢量),  $\tau$  是少子寿命 ( $\tau = \tau_n$  是电子寿命;  $\tau = \tau_p$  是空穴寿命),  $q$  是载流子电荷(绝对值),  $g(x, y, z)$  是载流子的产生率.

方程(1)是一个三维问题,引入下列假设可将问题简化. 不失一般性,我们假定: 1) 局部电中性,即半导体内部处处满足条件  $\Delta n = \Delta p$ ; 2) Hall 角比较小; 3) 产生率只是一个坐标(比如  $y$ ) 的函数,适当选择坐标系,使得入射光沿着  $y$  方向,磁场沿  $z$  方向,则短路电流沿  $x$  方向. 于是,连续性方程(1)化为

$$\frac{1}{q} \frac{dJ}{dy} - \frac{\Delta \xi}{\tau} = -g(y), \quad (2)$$

其中电流密度  $J = J_x$ , 且由公式

$$J = qD \frac{d(\Delta \xi)}{dy} \quad (3)$$

给出,  $D$  是扩散系数. 由 Shockley-Read 统计,可导出少子寿命  $\tau$  与相对浓度  $\Delta \xi / \xi_0$  之间的关系为

$$\tau = \frac{\tau_0 \left(1 + \alpha \frac{\Delta \xi}{\xi_0}\right)}{1 + (\varepsilon + \alpha) \frac{\Delta \xi}{\xi_0}}, \quad (4)$$

其中

$$\varepsilon = \frac{\tau_0 - \tau_\infty}{\tau_0(1+c)}, \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\tau_\infty}{\tau_0(1+c)}. \quad (6)$$

$\tau_0$  和  $\tau_\infty$  分别表示无限小和无限大注入强度下的载流子寿命,  $c = p_0/n_0$ , 而  $n_0$  和  $p_0$  分别是样品放在暗处的电子浓度和空穴浓度.

产生率可用如下指数规律:

$$g(y) = I\kappa \cdot \exp(-\kappa y) \quad (7)$$

描写, 其中  $I$  是人射光强度,  $\kappa$  是材料的吸收系数. 将(3), (4) 和(7) 式代入方程(2), 可得

$$D \frac{d^2 \xi}{dy^2} - \frac{1}{\tau_0} \frac{1 + (\varepsilon + \alpha) \frac{\Delta \xi}{\xi_0}}{1 + \alpha \frac{\Delta \xi}{\xi_0}} \cdot \Delta \xi = -I\kappa \cdot \exp(-\kappa y), \quad (8)$$

相应的边界条件

$$D \frac{d\Delta\xi}{dy} \Big|_{y=0} = s\Delta\xi(0), \quad (9)$$

$$D \frac{d\Delta\xi}{dy} \Big|_{y=w} = 0, \quad (10)$$

其中  $s$  是表面复合速度,  $w$  是样品厚度.

引入无量纲的量

$$W = w/L, \quad Y = y/L, \quad S = sw/D, \quad u = \Delta\xi/\xi_0, \quad (11)$$

其中

$$L^2 = \tau_0 D. \quad (12)$$

由方程 (8) 和 (9) 可得无量纲的边值问题

$$\frac{d^2 u}{dY^2} - \frac{1 + (\varepsilon + d)u}{1 + \alpha u} \cdot u = N \cdot \exp(-\mu Y) \quad (13)$$

和

$$\frac{du}{dY} \Big|_{Y=0} = au(0), \quad (14)$$

$$\frac{du}{dY} \Big|_{Y=W} = 0, \quad (15)$$

其中

$$a = \frac{S}{W}, \quad N = -\frac{l\kappa L^2}{D\xi_0}, \quad \mu = \kappa L = K/W, \quad K = \kappa w. \quad (16)$$

且  $Y \in (0, W)$ .

### 三、双参数摄动解

方程 (13) 是一个复杂的二阶非线性微分方程, 不存在严格的解析解, 而近似解也很难找到. 我们曾用了几种近似方法作过尝试, 发现只有摄动解的近似程度高, 收敛速度快. 下面我们用双参数摄动法进行求解. 注意到少子寿命与参数  $\varepsilon$  和  $\alpha$  有关, 我们决定把它选为方程 (13) 的独立变数. 我们的目的是试图找到具有如下形式的双参数摄动解:

$$u(Y, \alpha, \varepsilon) = \sum_{i,j=0}^{\infty} \alpha^i \varepsilon^j u_{ij}. \quad (17)$$

将上式代入方程 (13), 并注意到边界条件 (14) 和 (15) 式, 比较同次幂, 可得零级解  $u_{00}$  满足方程

$$u_{00}'' - u_{00} = N \cdot \exp(-\mu Y), \quad (18)$$

其中  $u' = du/dY$ . 一级解  $u_{01}$  和  $u_{10}$  满足方程

$$u_{01}'' - u_{01} = u_{00}^2, \quad (19)$$

$$u_{10}'' - u_{10} = u_{00}^2 + u_{00}[N \cdot \exp(-\mu Y) - u_{00}'']. \quad (20)$$

二级解  $u_{02}$ ,  $u_{20}$  和  $u_{11}$  满足方程

$$u_{02}'' - u_{02} = 2u_{01}u_{00}, \quad (21)$$

$$u_{20}'' - u_{20} = 2u_{10}u_{00} + u_{10}[N \cdot \exp(-\mu Y) - 2u_{00}''], \quad (22)$$

$$u_{11}'' - u_{11} = u_{01}[N \cdot \exp(-\mu Y) + 2u_{00}] + 2u_{00}u_{10} - u_{00}u_{01}'' - u_{01}u_{00}'', \quad (23)$$

相应的边界条件由

$$u_{ij}'|_{Y=0} = au_{ij}(0), \quad (24a)$$

$$u_{ij}'|_{Y=W} = 0 \quad (24b)$$

给出,其中  $(i, j) = 0, 1$  以及  $i = 0, j = 2; j = 0, i = 2$ . 而通解  $u_{ij}$  满足方程

$$u_{ij}'' - u_{ij} = H_{ij}(u_{nm}, u_{nm}'') \quad (i, j \geq 0, \text{ 而 } m, n \text{ 小于 } i, j). \quad (25)$$

边界条件由(24)式给出.

一般解  $u_{ij}$  可表示为

$$u_{ij} = \alpha_{ij} \cdot \exp(Y) + \beta_{ij} \cdot \exp(-Y) + I_{ij}(Y), \quad (26)$$

其中

$$\alpha_{ij} = \frac{-(1+a)G_{ij}}{(1+a) \cdot \exp(W) - (1-a) \cdot \exp(-W)}, \quad (27)$$

$$\beta_{ij} = \frac{-(1-a)G_{ij}}{(1+a) \cdot \exp(W) - (1-a) \cdot \exp(-W)}, \quad (28)$$

$$I_{ij}(Y) = \int_0^Y H_{ij}(t) \cdot \text{sh}(Y-t) dt, \quad (29)$$

$$G_{ij} = \int_0^W H_{ij}(t) \cdot \text{ch}(W-t) dt. \quad (30)$$

由(26)–(30)式可求得零级解  $u_{00}$  为

$$u_{00} = \alpha_{00} \cdot \exp(Y) + \beta_{00} \cdot \exp(-Y) + I_{00}(Y), \quad (31)$$

其中

$$\alpha_{00} = -\frac{(1+a)G_{00}}{(1+a) \cdot \exp(W) - (1-a) \cdot \exp(-W)}, \quad (32)$$

$$\beta_{00} = -\frac{(1-a)G_{00}}{(1+a) \cdot \exp(W) - (1-a) \cdot \exp(-W)}, \quad (33)$$

$$G_{00} = \frac{N\mu}{\mu^2-1} \cdot \text{ch}(W) - \frac{N}{\mu^2-1} \cdot \text{sh}(W) - \frac{N\mu}{\mu^2-1} \cdot \exp(-\mu W), \quad (34)$$

$$\begin{aligned} I_{00}(Y) &= N \int_0^Y \exp(-\mu t) \cdot \text{sh}(Y-t) dt \\ &= \frac{N\mu}{\mu^2-1} \cdot \text{sh}(Y) + \frac{N}{\mu^2-1} \cdot \exp(-\mu Y) - \frac{N}{\mu^2-1} \cdot \text{ch}(Y). \end{aligned} \quad (35)$$

一级解  $u_{01}$  为

$$u_{01} = \alpha_{01} \cdot \exp(Y) + \beta_{01} \exp(-Y) + I_{01}(Y), \quad (36)$$

其中各系数由附录给出. 另一个一级解  $u_{10}$  为

$$u_{10} = 0. \quad (37)$$

由于一级解还不能反映参数  $\alpha$  的影响, 必须进一步找出系统的二级解, 它的一般表达式为

$$u_{02} = \alpha_{02} \cdot \exp(Y) + \beta_{02} \cdot \exp(-Y) + 2 \int_0^Y u_{01}(t)u_{00}(t) \cdot \text{sh}(Y-t) dt,$$

$$u_{20} = 0, \tag{38}$$

$$u_{11} = \alpha_{11} \cdot \exp(Y) + \beta_{11} \cdot \exp(-Y) + \int_0^Y [-u_0^{(1)}(t)] \operatorname{sh}(Y-t) dt. \tag{39}$$

令 (27) 和 (28) 式中的  $i = 0, j = 2$ , 即可得到 (38) 式中的  $\alpha_{02}$  和  $\beta_{02}$ . 令 (27) 和 (28) 式中的  $i = j = 1$ , 即可得到 (39) 式中的  $\alpha_{11}$  和  $\beta_{11}$ . 由 (31), (36)–(39) 式, 可将二阶的双参数摄动解表示为

$$u = u_{00} + \varepsilon u_{01} + \varepsilon^2 u_{02} + \alpha \varepsilon u_{11}. \tag{40}$$

可以证明, 当  $0 \leq Y \leq W$  时, 级数 (17) 式绝对一致收敛, 只要条件

$$|\varepsilon|, |\alpha| < \frac{1}{4u_0^{\max}(Y)} \tag{41}$$

满足. 下面我们将在二级近似下讨论 PME 效应的短路电流和光导电流.

### 四、结果和讨论

在上一节中, 我们导出了过剩载流子沿  $Y$  方向的分布函数  $u(Y)$ , 由此可将 PME 短路电流  $I_{sc}$  表示为

$$I_{sc} = -qD(\mu_n + \mu_p)B[\Delta\xi(w) - \Delta\xi(0)], \tag{42}$$

其中  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别为电子和空穴迁移率, 注意到  $u = \Delta\xi/\xi_0$ , 上式可化为

$$I_R = \frac{I_{sc}}{qD(\mu_n + \mu_p)B} = \xi_0[u(0) - u(W)]. \tag{43}$$

对于电子,  $u = \Delta n/n_0, \xi_0 = n_0$ . 而  $u(Y)$  由 (17) 式给出, 在二级近似下由 (40) 式给出. 图 1 和图 2 分别给出了  $I_R$  与无量纲的吸收系数  $K$  及入射光强度  $N_0$  之间的关系. 为了比较, 我们选择了与文献 [3] 相同的一组参数. 对于图 1, 入射光强度为  $N_0 = 10^{-2}, 10^{-4}$ ; 三组参数分别为  $\varepsilon = \alpha = 0; \varepsilon = -10, \alpha = 0$  和  $\varepsilon = -12, \alpha = 5$ . 从图 1 可以看出, 当

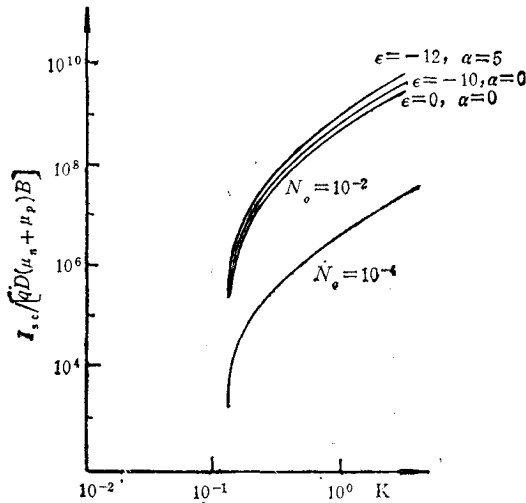


图 1 “短路电流”  $I_R$  与吸收系数  $K$  之间的关系

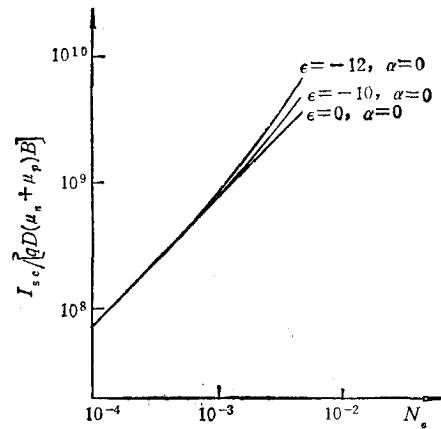


图 2 “短路电流”  $I_R$  与入射光强度  $N_0$  之间的关系

$N_0 = 10^{-4}$  (对应于光强比较弱), 线性近似还是比较好的. 但是, 随着光强的增加, 比如  $N_0 = 10^{-2}$  时, 短路电流  $I_R$  表现出了明显的非线性特征, 特别是当材料的吸收比较强时, 非线性更加明显. 由此可以看出, 对于强吸收样品, 载流子寿命与入射光强度的相关性变得十分重要.

图 2 给出了短路电流  $I_R$  与入射光强度  $N_0$  之间的关系, 选择的参数  $K = 10$ , 其他参数与图 1 相同.

在利用 PME 效应测定载流子寿命和表面复合速度时, 常常还需要测定材料的光电流  $I_{pc}$ . 相应的光电导由公式

$$\Delta G = q(\mu_n + \mu_p) \int_0^W \Delta \xi(y) dy \quad (44)$$

给出, 注意到  $u = \Delta \xi / \xi_0$ , 上式可改写为

$$\Delta G_R = \frac{\Delta G}{q(\mu_n + \mu_p)\xi_0 L} = \int_0^W u(Y) dY, \quad (45)$$

其中  $u(Y)$  由 (17) 式给出, 在二级近似下由 (40) 式给出. 将 (40) 式代入 (45) 式, 完成积分可得材料的“光电导”  $\Delta G_R$ . 结果表明, 在强注入情况下, “光电导”  $\Delta G_R$  同样表现出了与  $I_R$  类似的非线性特征. 图 3 给出了“光电导”  $\Delta G_R$  与入射光强度  $N_0$  之间的关系, 相应的参数与图 2 相同.

作者对安徽大学许政范教授的关心和支持表示感谢.

### 附录 一级解 $u_{01}$ 的系数

一级解  $u_{01}$  由 (36) 式给出, 其中系数

$$\alpha_{01} = \frac{(1+a)G_{01}}{(1+a)\exp(W) - (1-a)\exp(-W)}, \quad (A.1)$$

$$\beta_{01} = \frac{(1-a)G_{01}}{(1+a)\exp(W) - (1-a)\exp(-W)}, \quad (A.2)$$

而

$$\begin{aligned} G_{01} = & \alpha_{00}^2 A_{01}^{(1)} + \beta_{00}^2 A_{01}^{(2)} + \left(\frac{N\mu}{\mu^2-1}\right)^2 A_{01}^{(3)} + \left(\frac{N}{\mu^2-1}\right)^2 A_{01}^{(4)} + \frac{N^2}{(\mu^2-1)^2} A_{01}^{(5)} \\ & + 2\alpha_{00}\beta_{00} A_{01}^{(6)} + 2\alpha_{00} \frac{N\mu}{\mu^2-1} A_{01}^{(7)} + 2\alpha_{00} \frac{N}{\mu^2-1} A_{01}^{(8)} - 2\alpha_{00} \frac{N}{\mu^2-1} A_{01}^{(9)} \\ & + 2\beta_{00} \frac{N\mu}{\mu^2-1} A_{01}^{(10)} + 2\beta_{00} \frac{N}{\mu^2-1} A_{01}^{(11)} - 2\beta_{00} \frac{N}{\mu^2-1} A_{01}^{(12)} + 2 \frac{N^2\mu}{(\mu^2-1)^2} A_{01}^{(13)} \\ & - 2 \left(\frac{N}{\mu^2-1}\right)^2 \mu A_{01}^{(14)} - 2 \left(\frac{N}{\mu^2-1}\right)^2 \mu A_{01}^{(15)}. \end{aligned} \quad (A.3)$$

$$\begin{aligned} I_{01}(Y) = & \alpha_{00}^2 B_{01}^{(1)}(Y) + \beta_{00}^2 B_{01}^{(2)}(Y) + \left(\frac{N\mu}{\mu^2-1}\right)^2 B_{01}^{(3)}(Y) + \left(\frac{N}{\mu^2-1}\right)^2 B_{01}^{(4)}(Y) \\ & + \left(\frac{N}{\mu^2-1}\right)^2 B_{01}^{(5)}(Y) + 2\alpha_{00}\beta_{00} B_{01}^{(6)}(Y) + 2\alpha_{00} \frac{N\mu}{\mu^2-1} B_{01}^{(7)}(Y) \\ & + 2\alpha_{00} \frac{N}{\mu^2-1} B_{01}^{(8)}(Y) + 2\alpha_{00} \frac{N}{\mu^2-1} B_{01}^{(9)}(Y) + 2\beta_{00} \frac{N\mu}{\mu^2-1} B_{01}^{(10)}(Y) \\ & - 2\beta_{00} \frac{N}{\mu^2-1} B_{01}^{(11)}(Y) - 2\beta_{00} \frac{N}{\mu^2-1} B_{01}^{(12)}(Y) + 2 \frac{N^2\mu}{(\mu^2-1)^2} B_{01}^{(13)}(Y) \\ & - 2 \left(\frac{N}{\mu^2-1}\right)^2 \mu B_{01}^{(14)}(Y) - 2 \left(\frac{N}{\mu^2-1}\right)^2 \mu B_{01}^{(15)}(Y). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2\beta_{00} \frac{N}{\mu^2 - 1} B_{01}^{(11)}(Y) - 2\beta_{00} \frac{N}{\mu^2 - 1} B_{01}^{(22)}(Y) + 2 \left( \frac{N}{\mu^2 - 1} \right)^2 \mu B_{01}^{(13)}(Y) \\
& - 2 \left( \frac{N}{\mu^2 - 1} \right)^2 \mu B_{01}^{(44)}(Y) - 2 \left( \frac{N}{\mu^2 - 1} \right)^2 \mu B_{01}^{(55)}(Y), \quad (\text{A.4})
\end{aligned}$$

(A.3) 和 (A.4) 式中的  $A_{01}^{(i)}$  和  $B_{01}^{(i)}$  分别为下列标准积分:

$$\begin{aligned}
A_{01}^{(1)} &= \int_0^W \exp(2t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(2)} &= \int_0^W \exp(-2t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(3)} &= \int_0^W \operatorname{sh}^2(t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(4)} &= \int_0^W \exp(-2\mu t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(5)} &= \int_0^W \operatorname{ch}^2(t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(6)} &= \int_0^W \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(7)} &= \int_0^W \exp(t) \operatorname{sh}(t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(8)} &= \int_0^W \exp(1-\mu)t \cdot \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(9)} &= \int_0^W \exp(t) \operatorname{ch}(t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(10)} &= \int_0^W \exp(-t) \operatorname{sh}(t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(11)} &= \int_0^W \exp[-(H\mu)t] \cdot \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(12)} &= \int_0^W \exp(-t) \operatorname{ch}(t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(13)} &= \int_0^W \exp(-\mu t) \operatorname{sh}(t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(14)} &= \int_0^W \operatorname{sh}(t) \operatorname{ch}(t) \operatorname{ch}(W-t) dt, \\
A_{01}^{(15)} &= \int_0^W \exp(-\mu t) \operatorname{ch}(t) \operatorname{ch}(W-t) dt
\end{aligned}$$

和

$$\begin{aligned}
B_{01}^{(1)}(Y) &= \int_0^Y \exp(2t) \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(2)}(Y) &= \int_0^Y \exp(-2t) \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(3)}(Y) &= \int_0^Y \operatorname{sh}^2(t) \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(4)}(Y) &= \int_0^Y \exp(-2\mu t) \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(5)}(Y) &= \int_0^Y \operatorname{ch}^2(t) \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(6)}(Y) &= \int_0^Y \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(7)}(Y) &= \int_0^Y \exp(t) \cdot \operatorname{sh}(t) \cdot \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(8)}(Y) &= \int_0^Y \exp(1-\mu)t \cdot \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(9)}(Y) &= \int_0^Y \exp(t) \operatorname{ch}(t) \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(10)}(Y) &= \int_0^Y \exp(-t) \operatorname{sh}(t) \operatorname{sh}(Y-t) dt, \\
B_{01}^{(11)}(Y) &= \int_0^Y \exp[-(1+\mu)t] \operatorname{sh}(Y-t) dt,
\end{aligned}$$

$$B_{01}^{(2)}(Y) = \int_0^Y \exp(-t) \operatorname{ch}(t) \operatorname{sh}(Y-t) dt,$$

$$B_{01}^{(3)}(Y) = \int_0^Y \exp(-\mu t) \operatorname{sh}(t) \operatorname{sh}(Y-t) dt,$$

$$B_{01}^{(4)}(Y) = \int_0^Y \operatorname{sh}(t) \operatorname{ch}(t) \operatorname{sh}(Y-t) dt,$$

$$B_{01}^{(5)}(Y) = \int_0^Y \exp(-\mu t) \operatorname{ch}(t) \operatorname{sh}(Y-t) dt.$$

且  $A_{01}^{(i)}$  和  $B_{01}^{(i)}$  均是可积的.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] D. C. Look, *Phys. Rev.*, **B16**(1977), 5460.
- [ 2 ] S. S. Li and C. I. Huang, *J. Appl. Phys.*, **43**(1972), 1757.
- [ 3 ] V. Augelli *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **51**(1980), 2784.
- [ 4 ] W. Shockley and W. T. Read, *Physica*, **87**(1952), 835.

## ON THE NONLINEAR PROPERTIES OF THE PHOTO-MAGNETOELECTRIC EFFECT IN SEMICONDUCTORS

LUO SHI-YU

(Chongqing Institute of Communication)

LIU ZHENG-RONG

(Anhui University)

SHAO MING-ZHU

(Chongqing Institute of Communication)

### ABSTRACT

The equation of continuity of the charge carriers through a semiconductor was reduced to a second order non-linear differential equation, by using the injection-level-dependent lifetime which was derived from Shockley-Read statistics. The general solution was found using two-parameters perturbation method. The PME short-circuit current  $I_{sc}$  and the photoconductance  $\Delta G$  in a semiconductor are calculated in the second order approximation. The nonlinear properties of the photomagnetolectric effect in the case of large signal are disclosed, experimental results are better fitted by the theory.