

PINIP 结构 a-Si:H 多色光电探测器 电路模型研究

陈维友 刘式墉

(吉林大学电子工程系 长春 130023)

摘要 本文以 PINIP 结构各区载流子速率方程为基础, 综合考虑了各区的多种物理过程, 在适当的近似条件下, 给出一个完整的 PINIP 多色光电探测器电路模型. 该模型的模型参数直接与各区的几何及电学参数相联系, 对于器件的优化设计尤其方便. 该模型可在开发 OEIC 电路模拟软件中采用, 亦可加到现有电路模拟软件中. 它可用于直流、交流、瞬态分析.

EEACC: 4140, 4130, 1130B

1 引言

对光电集成回路(OEIC)进行计算机辅助分析(CAA)是设计高性能OEIC的一个重要环节. 实现OEIC-CAA的首要任务是开发光电子器件电路模型, 电路模型的优劣直接关系到模拟软件的质量和模拟结果的精度. 微电子电路的CAA已经比较成熟, 国际上已有很多模拟软件推出, SPICE就是其中最为著名的一个. 随着电子技术的发展, 会涌现出现有模拟器所不能处理的新结构、新功能器件, 这样, 就需要不断地对现有软件进行完善和扩充. 因此, 可以说科技不停步, CAA软件开发与完善工作就不会终止. 目前微电子CAA的发展趋势是把工艺模拟、器件模拟和电路模拟有机地结合起来, 形成一个具有良好用户界面的集成设计系统. OEIC-CAA工作只是近几年的事. 目前的主要工作是开发各种光电子器件电路模型. 已开发的光电子器件电路模型有体材料半导体激光器电路模型^[1~3]、量子阱结构半导体激光器电路模型^[4]、MSM光电二极管电路模型^[5]、PN光电二极管电路模型^[6]、PN雪崩光电二极管电路模型^[7]等.

氢化非晶硅(a-Si:H)因其成本低、工艺简单而成为重要的半导体材料. 由于氢化非晶硅具有低的载流子迁移率和高光敏感性, 是制作诸如太阳能电池、光探测器、光导摄像管、光晶体管、色传感器等光敏感器件的理想材料. PINIP(NIPN)结构氢化非晶硅多色光探测器^[8~10]对于识别可见光三原色(红、绿、蓝), 实现小型化的探测器阵列集成有很大发展潜力. Cesare给出一个简单的PINIP两色光探测器SPICE电路模型^[8], 模拟结果与实验结果

陈维友 1965年出生, 博士, 副教授, 现任吉林大学电子工程系副主任, 电子科学与技术研究所副所长, 主要从事光电子器件和光波导器件CAD工作. E-mail: chw@mail.jlu.edu.cn

刘式墉 1935年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为聚合物发光器件, 光波导理论, 光电子器件CAD. 1998-02-07收到, 1998-07-07定稿.

符合较好. 这个模型是从器件的工作特性构造出来的宏观模型, 其中许多参数需经过参数提取得到. 由于该模型不是从器件的微观物理机制得来, 因此, 不能细致考虑各区的物理现象, 特别是不能用于反向结出现雪崩的情况. 本文以 P N I P 结构各区载流子速率方程为基础, 综合考虑了各区的多种物理过程, 如光吸收、载流子复合、扩散、漂移以及碰撞离化等, 给出一个完整的 P N I P 光探测器电路模型.

2 P N I P-PD 电路模型

图 1(a) 是 P N I P 一维结构示意图, 图中给出本征区电场方向的各区载流子流动情况.

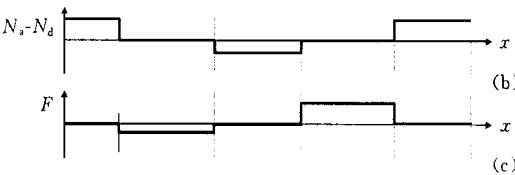
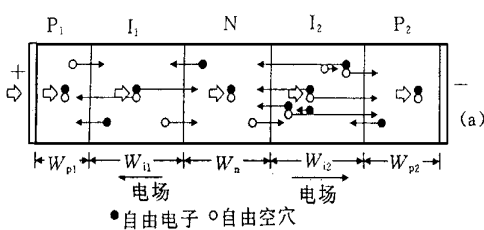


图 1 (a) P N I P-PD 一维结构示意图,
(b) 理想 P N I P 掺杂情况,
(c) 理想 P N I P 结构电场分布

为简单起见, 我们假定 P N I P 结构是理想的, 掺杂情况如图 1(b) 所示. 对于实际器件, 本征区不一定是本征的, 可能是 p 型或 n 型, 但只要 P、N 区的掺杂远大于 I 区, 理想 P N I P 假定是合理的. 此外我们假定在 P、N 区内的耗尽区宽度远小于本征区宽度, 可忽略. P、N 区内电场为 0, 外部偏压完全降落在本征区. 这样可得到图 1(c) 所示的电场分布. 以下处理都针对光由 P₁ 区入射, P₁ 端电压高于 P₂ 端, 并假定正向结为小注入, 正向结中电场方向与内建场方向相同. 对于 P₂ 端电压高于 P₁ 端的情况, 处理过程完全类似.

在以上假定下, 忽略正向结中载流子碰撞电离, 我们可以采用如下载流子速率方程

P₁ 区(少子电子):

$$\frac{dN_{p1}}{dt} = G_{p1} - \frac{N_{p1}}{\tau_{np1}} + \frac{L_{np1}}{q} \tag{1}$$

I₁ 区:

$$\frac{dN_{i1}}{dt} = G_{i1} - \frac{N_{i1}}{\tau_{nri1}} - \frac{N_{i1}}{\tau_{nii1}} + \frac{L_{nn1}}{q} - \frac{L_{np1}}{q} \tag{2}$$

$$\frac{dP_{i1}}{dt} = G_{i1} - \frac{P_{i1}}{\tau_{pri1}} - \frac{P_{i1}}{\tau_{pii1}} + \frac{L_{pp1}}{q} - \frac{L_{pn1}}{q} \tag{3}$$

N 区(少子空穴):

$$\frac{dP_n}{dt} = G_n - \frac{P_n}{\tau_{pm}} + \frac{L_{pn1}}{q} - \frac{L_{pn2}}{q} \tag{4}$$

I₂ 区:

$$\frac{dN_{i2}}{dt} = G_{i2} + U_{hi2}\zeta_{gi2}N_{i2} + U_{pi2}\zeta_{gi2}P_{i2} - \frac{N_{i2}}{\tau_{nri2}} - \frac{N_{i2}}{\tau_{nii2}} + \frac{L_{np2}}{q} \tag{5}$$

$$\frac{dP_{i2}}{dt} = G_{i2} + U_{hi2}\zeta_{gi2}N_{i2} + U_{pi2}\zeta_{gi2}P_{i2} - \frac{P_{i2}}{\tau_{pri2}} - \frac{P_{i2}}{\tau_{pii2}} + \frac{L_{pn2}}{q} \tag{6}$$

P₂ 区(少子电子):

$$\frac{dN_{p2}}{dt} = G_{p2} - \frac{N_{p2}}{\tau_{np2}} - \frac{I_{mp2}}{q} \quad (7)$$

其中:

$N_{p1}, N_{i1}, N_{i2}, N_{p2}$ 分别为 P₁, I₁, I₂, P₂ 区过剩电子总数; P_{i1}, P_n, P_{i2} 分别为 I₁, N, I₂ 区过剩空穴总数; $G_{p1}, G_{i1}, G_n, G_{i2}, G_{p2}$ 分别为入射光在 P₁, I₁, N, I₂, P₂ 区的电子-空穴对产生率; $\tau_{np1}, \tau_{ni1}, \tau_{nr1}, \tau_{np2}$ 分别为 P₁, I₁, I₂, P₂ 区电子复合寿命; $\tau_{ri1}, \tau_m, \tau_{ri2}$ 分别为 I₁, N, I₂ 区空穴复合寿命; $\tau_{ti1}, \tau_{ti2}, \tau_{t11}, \tau_{t12}$ 分别为电子和空穴在 I₁, I₂ 区的渡越时间; q 为电子电荷; I_{np1}/q 为 I₁ 区注入到 P₁ 区的少子(电子)扩散流, I_{pp1}/q 为 P₁ 区注入到 I₁ 区的多子(空穴)流 关于多子流的计算, 这里做一点说明: 对于小的光产生情况, P₁ 区的多子密度改变可忽略, 多子流可认为只与结偏压有关, 而与光照无关, 这样, 可在无光照和 I₁ 区无雪崩增益以及无复合的情况下得到 以下涉及的多子流的计算与此相同 I_{nn1}/q 为 N 区注入到 I₁ 区的多子(电子)流, I_{pn1}/q 为 I₁ 区注入到 N 区的少子(空穴)扩散流, I_{pn2}/q 为 N 区注入到 I₂ 区的少子(空穴)扩散流, I_{mp2}/q 为 P₂ 区注入到 I₂ 区的少子(电子)扩散流 $u_{i1}, u_{i2}, u_{i1}, u_{i2}$ 分别为电子和空穴在 I₁, I₂ 区的漂移速度, $\zeta_{i1}, \zeta_{i2}, \zeta_{i1}, \zeta_{i2}$ 分别为电子和空穴在 I₁, I₂ 区的碰撞电离率

对于雪崩区电场不均匀的情况, 方程(5)、(6)中的雪崩增益项不能写成这样简单的形式

对 I₁ 和 I₂ 区采用电中性条件, $P_{i1} = N_{i1}, P_{i2} = N_{i2}$, 方程(3)、(6)可省略, 方程(5)可进一步写为

$$\frac{dN_{i2}}{dt} = G_{i2} + (u_{i2}\zeta_{i2} + u_{h2}\zeta_{i2})N_{i2} - \frac{N_{i2}}{\tau_{nr2}} - \frac{N_{i2}}{\tau_{ti2}} + \frac{I_{mp2}}{q} \quad (8)$$

下面给出几个重要关系式:

$$G_j = \frac{P_m(1-R)\exp\left[-\sum_{k=1}^{j-1}\alpha_k(\lambda)W_k\right]}{h\nu} \{1 - \exp[-\alpha_j(\lambda)W_j]\}$$

其中 $j = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别对应 p₁, i₁, n, i₂, p₂ 当 $j = p_1$ 时, 上式中的求和项为 0

$$\tau_{nj} = \frac{W_j}{u_{hj}}, \quad \tau_{pj} = \frac{W_j}{u_{hj}}, \quad j = i_1, i_2$$

$$u_{hj} = \mu_{nj}F_j, \quad u_{hj} = \mu_{pj}F_j, \quad j = i_1, i_2$$

$$F_{i1} = \left| \frac{V_1 - V_{bi1}}{W_{i1}} \right|, \quad F_{i2} = \left| \frac{V_2 + V_{bi2}}{W_{i2}} \right|, \quad V_1 + V_2 = V$$

其中 P_m 为入射光功率; R 为 P₁ 区端面反射率; $h\nu$ 为光子能量; α_j, W_j 分别为 $j (= p_1, i_1, n, i_2, p_2)$ 区光功率吸收系数和宽度; μ_{nj}, μ_{pj} 分别为 $j (= i_1, i_2)$ 区电子和空穴迁移率; V 为外加偏压; V_1 为 I₁ 区压降; V_2 为 I₂ 区压降; V_{bi1}, V_{bi2} 分别为 P₁-I₁-N, P₂-I₂-N 结内建势

对于 a-Si H, 电子、空穴迁移率的场依赖关系是很复杂的, 可采用下面的形式^[11~14]

$$\mu_{nj}(F_j) = \mu_{0nj}\exp(F_j/F_{0j}), \quad j = i_1, i_2$$

$$\mu_{pj}(F_j) = \mu_{0pj}\theta F_j, \quad j = i_1, i_2$$

其中 $F_{0j}, \mu_{0nj}, \mu_{0pj}$ 分别为 $j (= i_1, i_2)$ 区电场参数、低场电子和空穴迁移率; θ 为经验参数

关于空穴迁移率与电场的关系报道的很少 上面给出空穴迁移率与电场的关系是我们根据文献[14]提供的数据得到的近似关系

电子、空穴电离率可采用如下经验公式^[15, 16]

$$\zeta_j(F_j) = a_{nj} \exp[-(b_{nj}/F_j)], j = i1, i2$$

$$\zeta_j(F_j) = a_{pj} \exp[-(b_{pj}/F_j)], j = i1, i2$$

其中 $a_{nj}, b_{nj}, a_{pj}, b_{pj}$ 为经验参数, 可通过与实验数据的曲线拟合得到

为提高数值处理精度, 引入一个归一化常数 C_{no} (可看作是一个电容), 并令

$$V_{nj} = \frac{qN_j}{C_{no}}, j = p1, i1, i2, p2, V_{pn} = \frac{qP_n}{C_{no}}$$

(1)、(2)、(4)、(7)、(8)式可化为

$$\frac{P_{in}}{R_{op1}} = C_{no} \frac{dV_{np1}}{dt} + \frac{V_{np1}}{R_{np1}} - I_{np1} \quad (9)$$

$$\frac{P_{in}}{R_{oi1}} = C_{no} \frac{dV_{ni1}}{dt} + \frac{V_{ni1}}{R_{nri1}} + \frac{V_{ni1}}{R_{nti1}} - I_{nn1} + I_{np1} \quad (10)$$

$$\frac{P_{in}}{R_{on}} = C_{no} \frac{dV_{pn}}{dt} + \frac{V_{pn}}{R_{pm}} - I_{pn1} + I_{pn2} \quad (11)$$

$$\frac{P_{in}}{R_{oi2}} = C_{no} \frac{dV_{ni2}}{dt} + \frac{V_{ni2}}{R_{nri2}} + \frac{V_{ni2}}{R_{nti2}} - I_{agi2} - I_{np2} \quad (12)$$

$$\frac{P_{in}}{R_{op2}} = C_{no} \frac{dV_{np2}}{dt} + \frac{V_{np2}}{R_{np2}} + I_{np2} \quad (13)$$

其中

$$R_{oj} = \frac{h\nu \exp\left(\sum_{k=1}^{j-1} \alpha W_k\right)}{q(1-R)[1 - \exp(-\alpha W_j)]}, j = p1, i1, n, i2, p2$$

$$R_{nrj} = \tau_{nrj}/C_{no}, j = p1, i1, n, i2, p2$$

$$R_{ntj} = \tau_{ntj}/C_{no}, j = i1, i2$$

$$I_{agi2} = C_{no} V_{ni2} (U_{hi2} \zeta_{i2} + U_{pi2} \zeta_{i2})$$

$$I_{ntj} = V_{nj}/R_{ntj}, j = i1, i2$$

方程(9)~(13)中涉及到多子流和少子流, 即 I_{xxx} 项, 需要由稳态连续性方程推出, 结果如下

$$I_{pp1} = \frac{qP_{n0}L_{pn}}{W_n \tau_{pm} \text{sh}(W_n/L_{pn})} \{ \text{ch}(W_n/L_{pn}) [\exp(qV_1/kT) - 1] + 1 - \exp(-qV_2/kT) \}$$

$$I_{nn1} = \frac{qN_{p10}L_{np1} \text{ch}(W_{p1}/L_{np1})}{W_{p1} \tau_{np1} \text{sh}(W_{p1}/L_{np1})} [\exp(qV_1/kT) - 1]$$

$$I_j = \frac{V_j}{R_{dj}} + \beta_j P_{in} + I_{j0}, j = np1, np2, pn1, pn2$$

其中,

$$V_{pn1} = V_{pn2} = V_{pn}$$

$$R_{dnp1} = -\frac{I_{np1}}{C_{no}} [\text{ch}(W_{p1}/L_{np1}) - 1]$$

$$R_{dnp2} = \frac{I_{np2}}{C_{no}} [\text{ch}(W_{p2}/L_{np2}) - 1]$$

$$R_{dnp1} = -\frac{I_{pn}}{C_{no}} [\text{ch}(W_n/L_{pn}) - 1]$$

$$R_{\text{dnp2}} = \frac{\tau_{\text{pm}}}{C_{\text{no}}} [\text{ch}(W_n/L_{\text{pn}}) - 1]$$

$$I_{\text{np10}} = \frac{qN_{\text{p10}}L_{\text{np1}}[\text{ch}(W_{\text{p1}}/L_{\text{np1}}) + 1]}{W_{\text{p1}}\tau_{\text{np1}}\text{sh}(W_{\text{p1}}/L_{\text{np1}})} [\exp(qV_1/kT) - 1]$$

$$I_{\text{np20}} = \frac{qN_{\text{p20}}L_{\text{np2}}[\text{ch}(W_{\text{p2}}/L_{\text{np2}}) + 1]}{W_{\text{p2}}\tau_{\text{np2}}\text{sh}(W_{\text{p2}}/L_{\text{np2}})} [\exp(-qV_2/kT) - 1]$$

$$I_{\text{pn10}} = \frac{qP_{\text{n0}}L_{\text{pn}}[\text{ch}(W_n/L_{\text{pn}}) + 1]}{W_n\tau_{\text{pn}}\text{sh}(W_n/L_{\text{pn}})} [\exp(qV_1/kT) - 1]$$

$$I_{\text{pn20}} = -\frac{qP_{\text{n0}}L_{\text{pn}}[\text{ch}(W_n/L_{\text{pn}}) + 1]}{W_n\tau_{\text{pn}}\text{sh}(W_n/L_{\text{pn}})} [\exp(-qV_2/kT) - 1]$$

$$\beta_{\text{np1}} = -\frac{q(1-R)}{h\nu} \frac{\alpha_{\text{p1}}L_{\text{np1}}^2}{1-\alpha_{\text{p1}}^2L_{\text{np1}}^2} \left\{ \frac{[\text{ch}(W_{\text{p1}}/L_{\text{np1}}) + 1]\exp(-\alpha_{\text{p1}}W_{\text{p1}})}{L_{\text{np1}}\text{sh}(W_{\text{p1}}/L_{\text{np1}})} + \frac{\exp(-\alpha_{\text{p1}}W_{\text{p1}}) - 1}{\alpha_{\text{p1}}L_{\text{np1}}^2[\text{ch}(W_{\text{p1}}/L_{\text{np1}}) - 1]} + \alpha_{\text{p1}}\exp(-\alpha_{\text{p1}}W_{\text{p1}}) \right\}$$

$$\beta_{\text{np2}} = \frac{q(1-R)\exp\left(-\sum_{j=1}^4 \alpha_j W_j\right)}{h\nu} \frac{\alpha_{\text{p2}}L_{\text{np2}}^2}{1-\alpha_{\text{p2}}^2L_{\text{np2}}^2} \left\{ \frac{\text{ch}(W_{\text{p2}}/L_{\text{np2}}) + 1}{L_{\text{np2}}\text{sh}(W_{\text{p2}}/L_{\text{np2}})} + \frac{\exp(-\alpha_{\text{p2}}W_{\text{p2}}) - 1}{\alpha_{\text{p2}}L_{\text{np2}}^2[\text{ch}(W_{\text{p2}}/L_{\text{np2}}) - 1]} - \alpha_{\text{p2}} \right\}$$

$$\beta_{\text{pn1}} = -\frac{q(1-R)\exp\left(-\sum_{j=1}^2 \alpha_j W_j\right)}{h\nu} \frac{\alpha_{\text{n1}}L_{\text{pn}}^2}{1-\alpha_{\text{n1}}^2L_{\text{pn}}^2} \left\{ \frac{\text{ch}(W_n/L_{\text{pn}}) + 1}{L_{\text{pn}}\text{sh}(W_n/L_{\text{pn}})} + \frac{\exp(-\alpha_{\text{n1}}W_n) - 1}{\alpha_{\text{n1}}L_{\text{pn}}^2[\text{ch}(W_n/L_{\text{pn}}) - 1]} - \alpha_{\text{n1}} \right\}$$

$$\beta_{\text{pn2}} = \frac{q(1-R)\exp\left(-\sum_{j=1}^2 \alpha_j W_j\right)}{h\nu} \frac{\alpha_{\text{n2}}L_{\text{pn}}^2}{1-\alpha_{\text{n2}}^2L_{\text{pn}}^2} \left\{ \frac{[\text{ch}(W_n/L_{\text{pn}}) + 1]\exp(-\alpha_{\text{n2}}W_n)}{L_{\text{pn}}\text{sh}(W_n/L_{\text{pn}})} + \frac{\exp(-\alpha_{\text{n2}}W_n) - 1}{\alpha_{\text{n2}}L_{\text{pn}}^2[\text{ch}(W_n/L_{\text{pn}}) - 1]} + \alpha_{\text{n2}}\exp(-\alpha_{\text{n2}}W_n) \right\}$$

其中 $P_{\text{n0}}, N_{\text{p10}}, N_{\text{p20}}$ 为平衡态 N, P1, P2 区少子个数; $L_{\text{nj}}, L_{\text{pj}}, D_{\text{nj}}, D_{\text{pj}}$ 分别为 $j (= \text{p1, i1, n, i2, p2})$ 区电子、空穴扩散长度和扩散系数, 且有关系 $L_{\text{nj}}^2 = D_{\text{nj}}\tau_{\text{nj}}, L_{\text{pj}}^2 = D_{\text{pj}}\tau_{\text{pj}}, k$ 为 Boltzmann 常数; T 为绝对温度

考虑器件各界面电流相等, 对于 $I_{\text{n1}}, I_{\text{n2}}$ 两界面, P N IP-PD 的端电流可写为

$$I_{\text{J}} = I_{\text{nn1}} + I_{\text{pn1}} - I_{\text{nti1}} + C_{\text{j1}} \frac{dV_1}{dt} = I_{\text{pn2}} + I_{\text{nti2}} + C_{\text{j2}} \frac{dV_2}{dt} + I_{\text{d}} \quad (14)$$

其中,

$$C_{\text{j1}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{A}}}{W_{\text{i1}}}, C_{\text{j2}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{A}}}{W_{\text{i2}}}$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_{A} 为材料相对介电常数; A 为器件面积; I_{d} 为反向结隧穿漏电流, 可写为^[7]

$$I_{\text{d}} = \frac{\epsilon_0 A V_2 (V_2 + V_{\text{Bp2}})}{W_{\text{i2}}} \exp\left(-\frac{\epsilon_0 W_{\text{i2}}}{V_2 + V_{\text{Bp2}}}\right)$$

其中 Θ_1, Θ_2 为两个经验参数

考虑 PN IP-PD 的寄生串联电阻 R_s , 寄生漏电阻 R_d , 寄生电容 C_s , 由(9)~(14)式可得到如图 2 所示的 PN IP-PD 电路模型

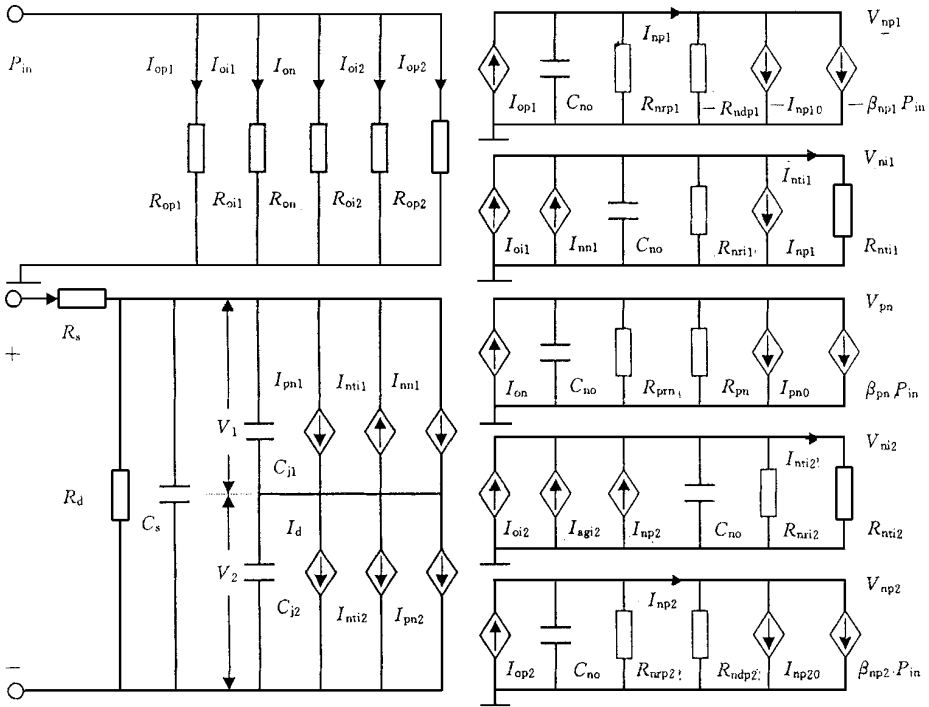


图 2 PN IP-PD 电路模型

这里应说明的是,在用此模型进行直流求解时,必须满足条件 $u_h \zeta_h + u_p \zeta_p < 1/\tau_{nr} + 1/\tau_{nt}$, 否则得到的结果没有意义 $u_h \zeta_h + u_p \zeta_p$ 为雪崩增益, $1/\tau_{nr} + 1/\tau_{nt}$ 为复合损耗和传输损耗, 当雪崩增益等于总损耗时就出现雪崩击穿, 因此, 只能 $u_h \zeta_h + u_p \zeta_p$ 无限接近 $1/\tau_{nr} + 1/\tau_{nt}$, 但不能相等. 此外, 由这个条件可得到雪崩击穿电压

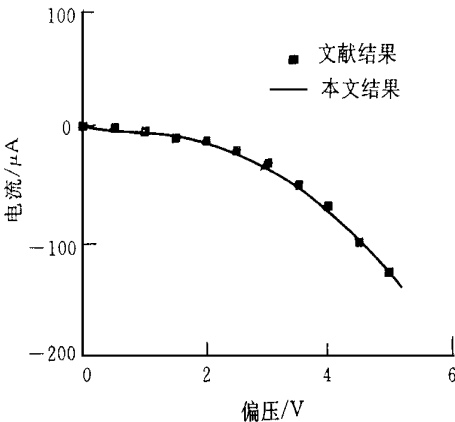


图 3 暗电流特性

3 模型验证

为验证本模型的正确性, 我们与文献[8]给出的结果进行了比较. 器件结构及相关参数参见文献[8]. 本文采用的模型参数见表 1. 表中给出的参数主要取自文献[8], 对于一些无法从文献[8]中得到的参数, 如载流子寿命, 扩散长度等, 有的来自其它文献, 有的取典型值

比较结果见图 3~ 5. 分别给出正偏压下暗电流曲线, 蓝光照射下的光电流曲线和红光照射下的光电流曲线. 比较证明, 本文给出的模型构造方

法是可行的, 给出的电路模型是正确的

表 1 模型参数

参数/单位	值	参数/单位	值
W_{p1}/nm	5	C_{no}	1×10^{-12}
W_{i1}/nm	70	R_s/Ω	10
W_n/nm	200	R_d/Ω	1×10^6
W_{i2}/nm	350	C_s/pF	1
W_{p2}/nm	40	$\mu_{0n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.2
τ_{nr}/ns	100	$\mu_{0p}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	4×10^{-3}
τ_{pr}/ns	6500	$F_0/(\text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$	1×10^6
$\phi_{p1}, \phi_n, \phi_{p2}/\text{cm}^{-1}$	0	$\theta/(\text{cm} \cdot \text{V}^{-1})$	1×10^{-6}
$\alpha_{i1}/\text{cm}^{-1}$	3×10^5 (蓝), 4×10^5 (红)	$a_n, a_p/\text{cm}^{-1}$	1×10^4
$\alpha_{i2}/\text{cm}^{-1}$	70 (蓝), 1.5×10^4 (红)	$b_n, b_p/(\text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$	2×10^5
R	0	L_n/nm	10
$\lambda/\mu\text{m}$	0.63 (蓝), 0.43 (红)	L_p/nm	5
V_{BI}/V	1.2	ϵ_s	11.9
V_{BE}/V	1.0	A/mm^2	120
Θ	3.7×10^{-8}	Θ_2	2×10^7

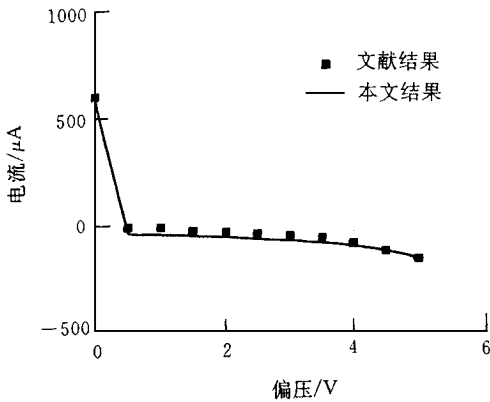


图 4 蓝光照射下的光电流特性

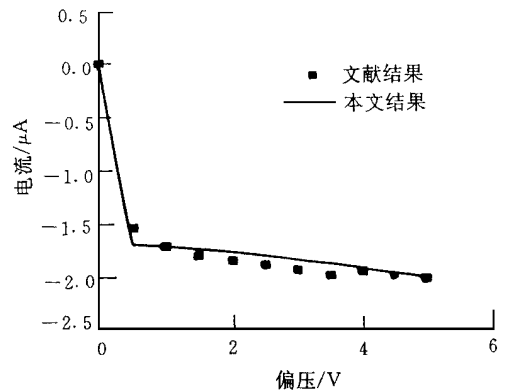


图 5 红光照射下的光电流特性

4 结论

以载流子速率方程为基础, 在适当的假定条件下, 经过大量的推导工作, 我们给出了一个比较完整的 P N I P-PD 电路模型. 在这个模型中, 有些表达式比较复杂, 可以通过引入一些经验参数, 使之简化, 这些经验参数可以通过参数提取得到.

参 考 文 献

- [1] Tucker R. S., IEEE Trans Microw. Theory Tech., 1983, 31(3): 289~ 294
- [2] 陈维友, 刘式壙, 半导体学报, 1991, 12(7): 416~ 422
- [3] Chen Weiyu, Liu Shiyong, IEEE J. Quantum Electron., 1996, 32(12): 2128~ 2132

- [4] Gao D. S , Kang S M. *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1990, **26**(7): 1206~ 1216
- [5] Chen Weiyou, Liu Shiyong, Journal of Electronics (Chinese), 1994, **11**(4): 377~ 382
- [6] 陈维友, 刘宝林, 刘式壖, 电子学报, 1994, **22**(11): 95~ 97.
- [7] Chen Weiyou, Liu Shiyong, IEEE J. Quantum Electron , 1996, **32**(12): 2105~ 2111.
- [8] Cesare G , Irrera F , Lemmi F , Palma F , IEEE Trans Electron Devices, 1995, **42**(5): 835~ 839.
- [9] Tsai H. K , Lee S. C , Appl Phys Lett , 1988, **52**(4): 275~ 277.
- [10] Eberhardt K , Neidinger T , Schubert M. B. , IEEE Trans Electron Devices, 1995, **42**(10): 1763~ 1768
- [11] Antoniadis I , Devlen R. I , Espov S *et al* , J. Non-Cryst Solids, 1991, **137&138**: 407~ 410
- [12] Juska G , J. Non-Cryst Solids, 1991, **137&138**: 401~ 406
- [13] Inao S , Nakajima S , Nakata J. *et al* , Jpn. J. Appl Phys , 1991, **30**(7B): L 1227~ L 1230
- [14] Marshall J. M. , Street R. A. , Thompson M. J. *et al* , J. Non-Cryst Solids, 1987, **97&98**: 563~ 566
- [15] Chang C. Y. , Hong J. W. , Fang Y. K , IEE Proc , Part J , 1991, **138**(3): 226~ 234
- [16] Jwo S. C. , Wu M. T. , Fang Y. K. *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1988, **35**(8): 1279~ 1283

Circuit Model of PNIP a-Si H Photodiodes

Chen Weiyou, Liu Shiyong

(Department of Electronics Engineering Jilin University, Changchun 130023)

Received 7 February 1998, revised manuscript received 7 July 1998

Abstract Based on the carriers rate-equations, we have presented a complete circuit model of PNIP structure a-Si H photodiodes for the circuit-level simulation. This model can be used as a SPICE model, also can be used in the simulator developing for OEIC.

EEACC: 4140, 4130, 1130B