

# 结空间电荷区和偏压对红外 光伏探测器 $D_{\lambda}^*$ 的影响

张文彬                      姜嘉定  
 (苏州大学物理系)      (山东大学光学系)

**摘要**——本文考虑了结空间电荷区的影响,在耗尽近似下,导出了PN结红外光伏探测器  $I-V$  特性和探测率  $D_{\lambda}^*$  的解析式,并用所得结果分析了偏压、光吸收系数、少子体寿命和表面复合速度对厚基区 InSb 光伏探测器  $D_{\lambda}^*$  的影响。

## 一、引 言

严格分析半导体 PN 结器件的一维光伏效应,需要求解一组方程(包括电子和空穴的输运方程和连续性方程以及泊松方程)还需选取适当的掺杂分布和边界条件。实际上难以得到  $I-V$  特性的严格解析解,从而也得不到红外光伏探测器探测率  $D_{\lambda}^*$  的严格解析解。为此有些人发展了计算机模拟技术<sup>[1,2]</sup>,以期获得精确的结果。有些人则在各种近似条件下导出了  $I-V$  特性和  $D_{\lambda}^*$  的解析表示式,但他们没有考虑<sup>[3~5]</sup>或者未详细讨论<sup>[6,7]</sup>结空间电荷区的影响。

我们分析了结空间电荷区的影响,在耗尽近似下导出了 PN 结光伏器件  $I-V$  特性和  $D_{\lambda}^*$  的解析表示式,并用所得的结果分析了偏压  $V$ 、光吸收系数  $\alpha$ 、少子体寿命  $\tau_e$  和  $\tau_h$ 、以及表面复合速度  $S_p$  和  $S_n$  等参量对器件量子效率  $\phi$  和  $D_{\lambda}^*$  的影响。我们还以 InSb(77K) 光伏器件为例作了数值计算。

## 二、理 论

我们考虑的器件的几何构形如图 1 所示。器件可分为准电中性的 P 型区、N 型区和结空间电荷区(耗尽层)三个区域,宽度分别为  $L_p = x_j - \delta_p$ 、 $L_n = L - (x_j + \delta_n)$  和  $\delta = \delta_p + \delta_n$ , 这里  $L$  为器件厚度,  $x_j$  为结深。

### 1. 产生率

当波长小于吸收边的单色光正入射探测器的前表面时,若忽略背表面反射,则体内  $x$  处单位体积电子-空穴对的产生率为

本文 1986 年 1 月 29 日收到。修改稿 1986 年 8 月 4 日收到。

$$G(x) = -\frac{\eta}{h\nu} \frac{dI(x)}{dx} = \frac{\eta(1-r_1)I_0}{h\nu} ae^{-ax} = \frac{Q_0}{l_{ph}} e^{-x/l_{ph}}, \quad (1)$$

式中  $Q_0 \equiv \eta_0(1-r_1)I_0/h\nu$ ,  $I_0/h\nu$  为入射光子流密度,  $r_1$  为前表面光反射率,  $\eta$  为量子产额,  $l_{ph} = 1/a$  为吸收深度。

## 2. I-V 特性和量子效率

结电流由两个准电中性区贡献的少子扩散电流  $J_P$ 、 $J_N$  和耗尽层的贡献  $J_D$  组成。在定态下, 通过解下述方程:

$$D_e d^2(\Delta n)/dx^2 - \Delta n/\tau_e + G(x) = 0,$$

$$D_h d^2(\Delta p)/dx^2 - \Delta p/\tau_h + G(x) = 0,$$

$$D_e d(\Delta n)/dx = S_P \Delta n \quad x=0,$$

$$\Delta n = n_p^0 [\exp(qV/kT) - 1] \quad x=L_P,$$

$$D_h d(\Delta p)/dx = -S_N \Delta p \quad x=L,$$

$$\Delta p = p_N^0 [\exp(qV/kT) - 1] \quad x=L-L_N,$$

$$J_P = qD_e d(\Delta n)/dx \quad x=L_P,$$

$$J_N = -qD_h d(\Delta p)/dx \quad x=L-L_N,$$

$$J_D = -q \int_{L_P}^{L-L_N} G(x) dx$$

可以得到器件的 I-V 特性。总电流密度为

$$J_t = J_P + J_N + J_D = J_0 [\exp(qV/kT) - 1] - J_{ph}, \quad (2)$$

式中  $J_0$  为暗反向饱和电流密度,  $J_{ph}$  为光致电流密度, 它们的表达式分别为

$$J_0 = q[n_p^0(D_e/L_e)(\alpha/\beta) + p_N^0(D_h/L_h)(\gamma/\xi)],$$

$$J_{ph} = q\phi Q_0 = q(\phi_P + \phi_N + \phi_D)Q_0,$$

$$\alpha = sh(L_P/L_e) + k_P ch(L_P/L_e),$$

$$\beta = ch(L_P/L_e) + k_P sh(L_P/L_e),$$

$$\gamma = sh(L_N/L_h) + k_N ch(L_N/L_h),$$

$$\xi = ch(L_N/L_h) + k_N sh(L_N/L_h),$$

$$\phi_P = k_e \left[ \left(1 + S_P \frac{l_{ph}}{D_e}\right) \frac{1}{\beta} - \left(1 + \frac{l_{ph}}{L_e} \frac{\alpha}{\beta}\right) \exp(-L_P/l_{ph}) \right],$$

$$\phi_N = k_h \left[ \left(-1 + S_N \frac{l_{ph}}{D_h}\right) \frac{1}{\xi} + \left(1 - \frac{l_{ph}}{L_h} \frac{\gamma}{\xi}\right) \exp(L_N/l_{ph}) \right] \exp(-L/l_{ph}),$$

$$\phi_D = \exp(-L_P/l_{ph}) - \exp[-(L-L_N)/l_{ph}].$$

以上各式中,  $k_P \equiv S_P/(L_e/\tau_e)$  和  $k_N \equiv S_N/(L_h/\tau_h)$  分别为 P 型和 N 型区的少子表面复合速度与扩散速度之比;  $k_e \equiv [1 - (l_{ph}/L_e)^2]^{-1}$ ,  $k_h \equiv [1 - (l_{ph}/L_h)^2]^{-1}$ ;  $L_e = (D_e\tau_e)^{1/2}$ ,  $L_h = (D_h\tau_h)^{1/2}$ ,  $D_e$  和  $D_h$  分别为电子和空穴的扩散系数;  $n_p^0$  和  $p_N^0$  分别为 P 型和 N 型区中的平衡少子浓度;  $q$  为电子电荷;  $T$  为绝对温度;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $\phi$  是器件的量子效率(内响应), 体现了光生电子-空穴对转化为光致电流的效率, 是 PN 结光伏器件最重要的品质因数;  $\phi_P$ 、 $\phi_N$  和  $\phi_D$  分别为 P 型、N 型和耗尽层对量子效率的贡献。应当指出,  $J_{ph}$  通过耗尽层宽度依赖于偏压, 只有忽略空间电荷区时它才是所谓的“短路”光致电流。

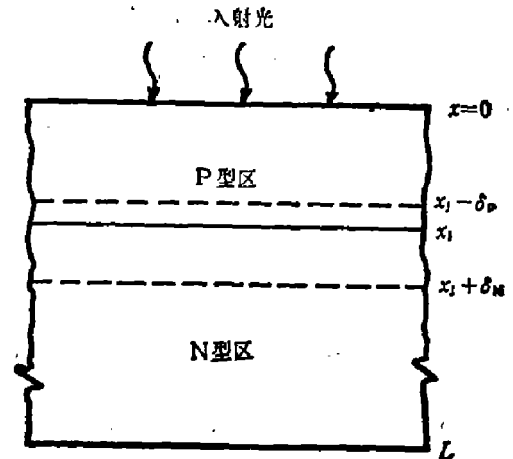


图1 PN 结光伏器件的几何构形  
Fig. 1 Geometry of the photodiode

### 3. 探测率 $D_\lambda^*$

PN 结光伏器件的探测率为

$$D_\lambda^* = \eta_s(1-r_{1s})\phi_s / \{h\nu[2\eta_b(1-r_{1b})\phi_b Q_b + 4J_0/q]^{1/2}\}, \quad (3)$$

式中脚标  $s$  和  $b$  分别表示与信号和背景有关的参量,  $Q_b$  为背景光子流密度, 在背景光子流噪声起主要作用, 且  $\eta_s = \eta_b = \eta$ ,  $r_{1s} = r_{1b} = r_1$  和  $(l_{ph})_s = (l_{ph})_b = l_{ph}$  时, 式(3)可简化为

$$D_\lambda^* = (1/h\nu)[(1-r_1)\phi/2Q_b]^{1/2}.$$

## 三、计算实例和结论

为突出考察结空间电荷区和偏压对量子效率和  $D_\lambda^*$  的影响, 本文只计算厚基区这一简单情况。关于器件厚度、背表面复合速度以及光在前后表面间多次反射的影响, 我们将另文讨论。

对于 InSb(77K)PN 结光伏器件, 我们取下列参量进行计算<sup>[5,6]</sup>:  $N_a = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_d = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_i = 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_e = 1 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_h = 6 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\tau_e = 4.5 \times 10^{-10} \text{ s}$ ,  $\tau_h = 8 \times 10^{-7} \text{ s}$ ,  $S_p = 1 \times 10^8 \text{ cm/s}$ ,  $a = 1/l_{ph} = 3 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\eta_s = \eta_b = \eta = 1$ ,  $r_{1s} = r_{1b} = r = 0.36$ ,  $Q_b = 2 \times 10^{16} \text{ 光子}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ , 静态介电常数  $\epsilon = 17.64$ 。数值计算结果示于图 2~6。此外, 还计算了  $S_p$  对  $D_\lambda^*$  和  $\phi$  的影响。对于  $x_j = 1.2 \mu\text{m}$  和  $V = 0$  的 PN 结, 当  $S_p$  由  $10 \times 10^8 \text{ cm/s}$  变成  $5 \times 10^8 \text{ cm/s}$  时,  $D_\lambda^*$  和  $\phi$  的相对变化均小于 1%。

对 NP 结 InSb 光伏器件作了类似的计算, 主要结果类似于 PN 结。除取  $\tau_e = 1.5 \times 10^{-9} \text{ s}$ <sup>[8]</sup>,  $S_N = 60 \text{ cm/s}$ ,  $N_a = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  和  $N_d = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  外, 其余参数均与 PN 结相

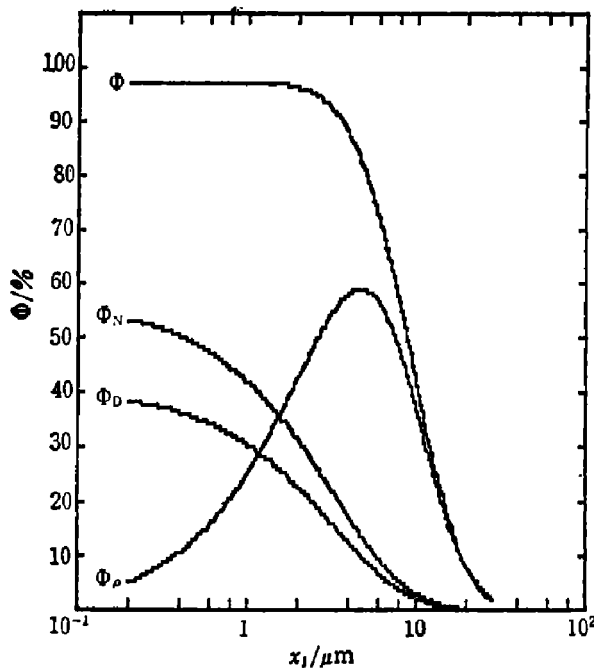


图 2 PN 结在零偏压下量子效率与结深的关系  
Fig. 2 Quantum efficiencies versus junction depth of InSb PN junction for  $V=0$

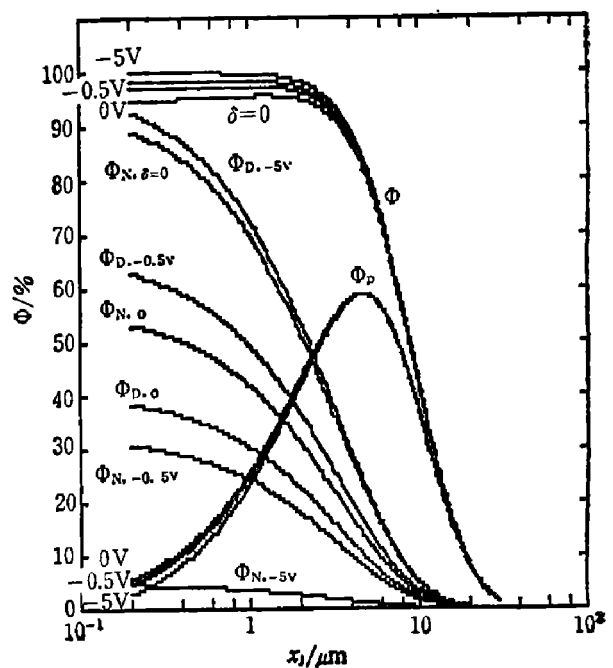


图 3 偏压对量子效率与结深关系的影响,  $\delta=0$  的曲线是不考虑空间电荷区的结果  
Fig. 3 Quantum efficiencies versus junction depth of InSb PN junction for various bias voltages. The curve for  $\delta=0$  is the result without considering space-charge layer

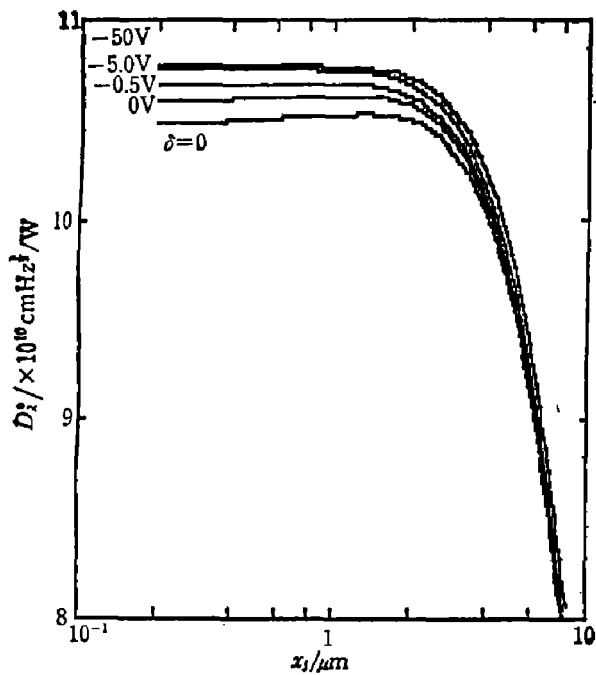


图4 偏压对PN结光伏器件  $D_i^*-x_j$  关系的影响,  $\delta=0$  的曲线是不考虑空间电荷区的结果  
 Fig. 4  $D_i^*$  versus  $x_j$  of InSb PN junction for various bias voltages. The curve for  $\delta=0$  is the result without considering space-charge layer

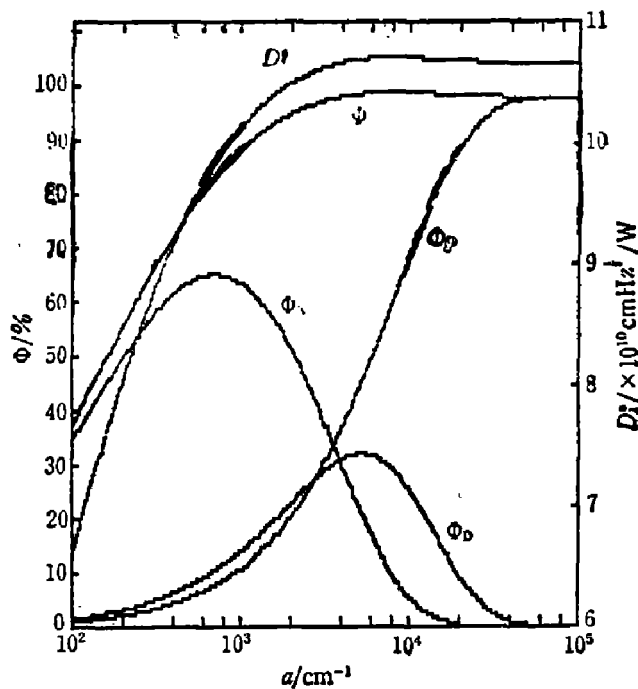


图5 PN结光伏器件的量子效率和探测率对光吸收系数的依赖关系 ( $V=0, x_j=1.2\mu\text{m}$ )  
 Fig. 5 Quantum efficiencies and detectivity versus optical absorption coefficient of InSb PN junction for  $V=0$  and  $x_j=1.2\mu\text{m}$

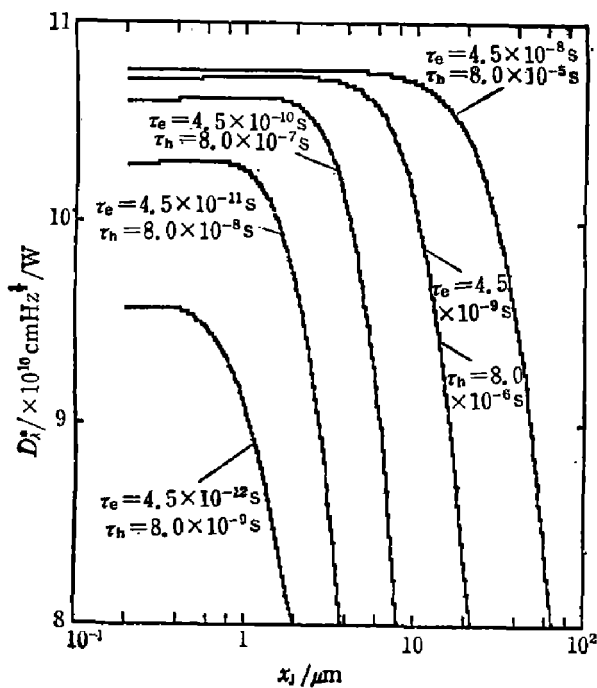


图6 PN结光伏器件的少数寿命对其  $D_i^*-x_j$  关系的影响 ( $V=0$ )  
 Fig. 6  $D_i^*$  versus  $x_j$  of InSb PN junction for various values of the bulk lifetime of minority carriers ( $V=0$ )

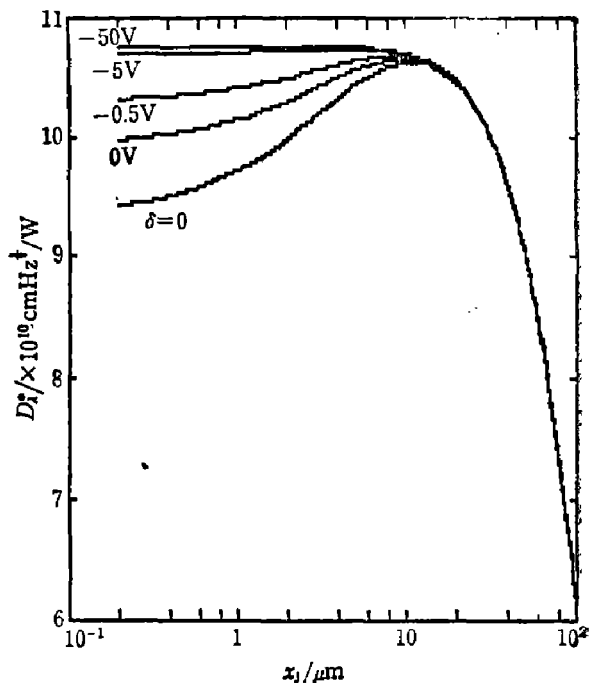


图7 偏压对NP结光伏器件  $D_i^*-x_j$  关系的影响,  $\delta=0$  曲线是不考虑空间电荷区的结果  
 Fig. 7  $D_i^*$  versus  $x_j$  of InSb NP junction for various bias voltages. the curve for  $\delta=0$  is the result without considering space-charge layer.

同。这里只给出偏压对  $D_{\lambda}^* - x_j$  关系的影响(参见图7)。

以上结果表明,就PN结光伏红外探测器的  $D_{\lambda}^*$  而言:探测器在适当反向偏压下工作是有利的;制作器件时,只需将  $x_j$  控制在一适当范围内即可,精确控制的效益甚微;提高少子寿命是有益的,低寿命材料只宜于制作浅结器件;表面复合速度对  $D_{\lambda}^*$  的影响不大。

致谢——陈继述教授审阅了全文,在此谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] Gummel H. K., *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-11 (1964), 455.
- [2] 陈继述等, *山东大学学报(自然科学版)*, (1981), 1:80.
- [3] Kruse P. W. et al., *Elements of Infrared Technology*, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, 1962.
- [4] Prince M. B., in *"Semiconductors and Semimetals"*, Vol. 5, Academic Press, New York, 1970, p85.
- [5] 胡燮荣, *山东大学学报(自然科学版)*, (1980), 4:64.
- [6] Hovel H. G., in *"Semiconductors and Semimetals"*, Vol. 11, Academic Press, New York, 1975.
- [7] Reine M. B. et al., in *"Semiconductors and Semimetals"*, Vol. 18, Academic Press, New York, 1981.
- [8] Liff R. A. and Fan H. Y., *Phys. Rev.*, 121 (1961), 53.

## EFFECTS OF THE SPACE CHARGE LAYER AND THE BIAS VOLTAGE ON $D_{\lambda}^*$ OF INFRARED PHOTOVOLTAIC DETECTORS

ZHANG WENBIN

(Department of Physics, Suzhou University)

JIANG JIADING

(Department of Optics, Shandong University)

### ABSTRACT

Considering the effect of the space charge layer and using the depletion region approximation, the analytical expressions of  $I-V$  characteristic and detectivity ( $D_{\lambda}^*$ ) for the PN junction PV detectors are derived. In terms of these expressions, the effects of bias voltage, optical absorption coefficient, bulk lifetime of minority carriers and recombination velocity at the illuminated surface on  $D_{\lambda}^*$  of InSb PV detector with thick base region are numerically analysed.