

N-InSb 的杂质补偿度对其非线性电导的影响

徐建人 龚雅谦

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

郑国珍 郭少令

(红外物理国家实验室, 上海, 200083)

1990年8月30日收到, 1991年2月4日修改定稿

在深低温强磁场条件下, 对不同电学参数(掺杂量, 补偿度等)的 N-InSb 材料的过热电子输运特性进行了系统研究, 结果表明: 高补偿材料能在较高电场区呈现出很强的非线性电导, 对此, 我们采用了二带导电模型进行了分析和讨论, 提出了利用高补偿低浓度 N-InSb 材料来改善锑化铟远红外探测器性能的新方法, 从而为锑化铟过热电子远红外探测器的选材提供了可靠依据。

一、引言

众所周知, 由于锑化铟材料的禁带宽度很窄, 电子有效质量很小, 迁移率很高, 低温下电子与晶格间的能量耦合较弱, 因而在足够强的电场作用下电子易从外电场获取能量。这样, 多余的能量使电子温度可显著地高于晶格温度, 电子迁移率是外电场的函数, 从而产生过热电子效应。这一效应可用来探测远红外辐射。当自由载流子吸收了远红外辐射能量而引起其迁移率变化时, 将导致电导率的变化, 这就是以光导模式工作的锑化铟过热电子远红外探测器的原理。基于这个原理而制成的远红外探测器不仅具有宽光谱响应范围和无陡降长波限等优点, 且还具有快速响应等特点, 因而, 它是亚毫米波短毫米波段中最重要的探测器之一, 也是等离子体诊断应用中, 特别是测量电子回旋辐射中, 不可缺少的一种探测器。

但正因为 InSb 材料的电子迁移率高, 即使对现在可得到的最纯 InSb 材料而言, 在温度低至 4.2 K 时, 其电阻率仍很低, 这就使探测器的输出阻抗很低, 难于获得高电压响应率。为此, 围绕提高探测器的输出阻抗, 人们开展了许多工作^[1-3]。但这些工作均局限于改变外部条件, 未从改变材料的本身特性出发来提高其响应率。但值得一提的是 Putley 采用外加强磁场通过调制 InSb 的能带结构来提高其输出阻抗。磁场的作用有二个方面, 其一是使电子在外电场作用下不易积累能量, 产生和维持过热电子状态所需的外电场强度增强; 其二是使导带上电子发生“磁冻出”, 一部分导带电子落在迁移率很低的杂质带上, 这样, 这些电子重新被激发到导带上将导致电导率非线性增强, 这二点均有利于改善探测器性能。由此可启发我们是否可选择具有高阻特性的低浓度高补偿材料来改善探测

器性能。为此,本工作企图通过研究锑化铟过热电子输运特性,特别是锑化铟材料本身的电学参数(补偿度,掺杂量等)对其过热电子非线性电导的影响。为探测器选择适合材料提供科学依据。

二、实验过程

我们所用的锑化铟单晶材料是采用切克劳斯方法生长而成,霍尔测试样品首先从(111)单晶圆片切割下来,经研磨而成长方条形($10 \times 1 \times 0.8 \text{ mm}^3$),为了消除在深低温下样品的表面效应,采用CP4溶液腐蚀样品后再用纯铟做电极,在液氮、液氦温度下选择电学均匀性能好、具有不同迁移率和浓度的样品,然后在深低温(4.2—0.3 K)强磁场(0—3 T)条件下进行霍尔测试,求得材料补偿度。同时,测量样品的非线性输运特性。我们在深低温强磁场下对若干样品进行了测试,为比较起见,这里仅列出代表两种典型输运特性的两块样品的数据,实验所用的He-3低温系统最低温度可达0.3 K,最高磁场强度可达7 T。

三、霍尔测试材料补偿度的方法和实验结果

由于InSb材料的电子有效质量小($m^* = 0.014 m_e$),介电常数大($\kappa = 14$),电子波函数半径较大,因而,就较纯的N型材料而言,波函数仍相互交迭,形成有一定宽度的杂质带,但在温度低至4.2 K以下,它将与导带底分开^[4]。这样,处在杂质带上的电子电导在

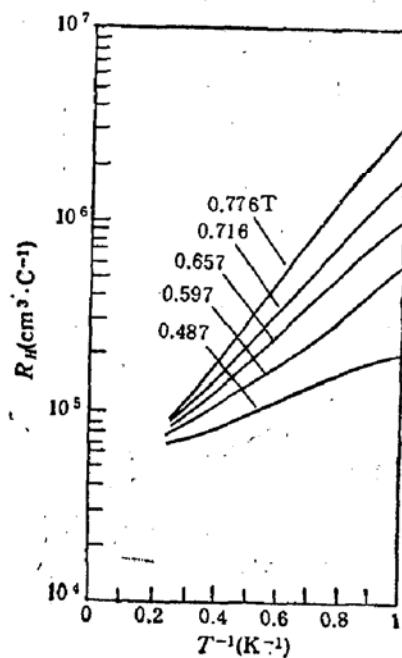


图1 在不同横向磁场条件下样品I的霍尔系数与温度的依赖关系

(样品 I: n-InSb, $n_0 = 1.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $K = 0.61$)

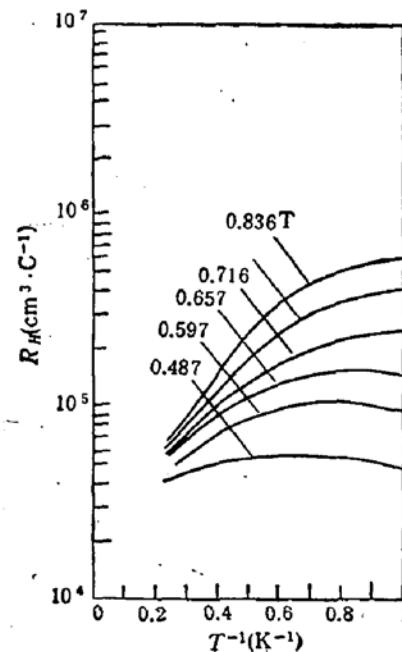


图2 在不同横向磁场条件下样品II的霍尔系数与温度的依赖关系

(样品 II: n-InSb, $n_0 = 2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $K = 0.36$)

一定温度和磁场条件下(量子极限)将不可忽略。所以,与一般半导体材料 Si, GaAs 不同,必须采用二带导电模型来计算导带电子浓度 n_c ^[1]。

$$R_H/R_\infty = (1+x)(1+xb^2)/(1+xb)^2 \quad (1)$$

这里, $x = n_c/n_i$, $b = \mu_c/\mu_i$ 分别为二带电子浓度之比和迁移率之比, $R_\infty = 1/n_0e$ 为饱和霍尔系数。

当参与电导的二带上电子对电导率贡献相等时,即 $xb = 1$ 时,则上式可简化为:

$$R_H^{\max}/R_H = (1+b)^2/4b \quad (2)$$

由此可利用(1)(2)式求得 n_c 。

但对低浓度高补偿材料而言,受主杂质的补偿作用使未电离的施主杂质浓度减少,电子波函数间的交迭程度大大减弱。因此,在量子极限条件下,电子将趋于局域态,杂质带宽变窄,电子易形成跳跃式电导。这样,杂质带电子对霍尔电导的贡献将忽略不计,

$$n_c = 1/R_H \cdot e.$$

在实验条件下,可认为大部分电子分布在第一朗道能级上,且假定 $N_A \gg n_c$,这样,由统计理论可得:

$$(n_0/n_c(T) - 1) = N_A/N_c^* \exp(E_D/K_B T) \quad (3)$$

其中 $N_c^* = (2\pi m^* K_B/h^2)^{1/2} (eB/h)$

由(3)式可计算得补偿度 $K = N_A/N_D$

图(1)和(2)分别为典型的两块样品的霍尔系数随温度变化情况,基于上述讨论,我们采用不同方法计算 $n_c(T)$,求得 K ,结果如表 1。

表 1 N-InSb 材料的电学参数

样品号	n_0 (coul·cm ⁻³)	$\mu(77K)$ (cm ² V ⁻¹ S ⁻¹)	$\rho(77K)$ (Ω·cm ⁻¹)	N_D (coul·cm ⁻³)	K (%)
样品 I	1.2×10^{14}	4.4×10^5	1.2×10^{-1}	3.1×10^{14}	0.61
样品 II	2.0×10^{14}	6.3×10^5	5.0×10^{-2}	3.1×10^{14}	0.36

观察样品 II 在六千高斯条件下霍尔系数随温度的变化情况,在 $T = 1.3$ K 左右, R_H 达极大,电子电导呈二带模型。为此,首先观察在 $T > 1.3$ K 低温区电子电导行为,这时,大部分电子分布在导带上,因而,随温度降低,“磁冻出”效应变强,导带上电子对电导的贡献也相应减少,而杂质带上电子数目越来越多。其电导率逐渐增加,当导带电子电导率接近杂质带电子电导率时, R_H 达极大。在 $T < 1.3$ K 深低温区,杂质带电子电导起主要作用,因而,随温度下降,“磁冻出”效应增强使 R_H 也随之下降。但对样品 I, R_H 不出现极大值,这是因为受主杂质浓度增高,施主杂质带宽变窄,而磁场对电子波函数的作用使施主杂质带宽变得更窄,当温度低至 1 K 左右时,杂质带电子电导仍处于次要地位。如果我们仔细观察样品 II 的霍尔系数极大值随磁场增强向低温方向移动,及在八千高斯条件下 R_H 随温度降低而不出现极值,就不难理解增加受主杂质浓度即补偿度和磁场强度一样均抑制了杂质带电子电导,从而使样品 I(高补偿材料)在深低温区 R_H^{\max} 仍不出现。

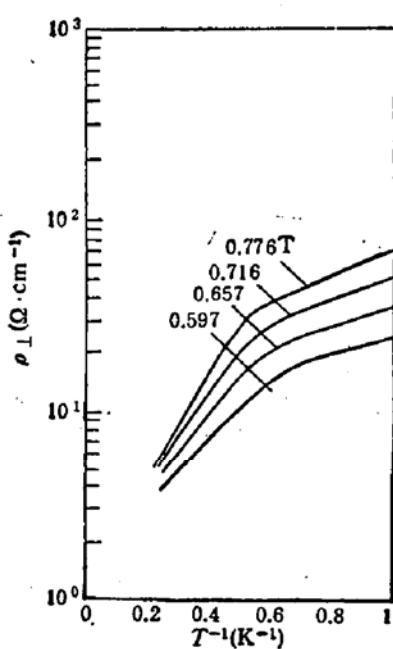


图3 在不同横向磁场条件下样品I的横向磁阻与温度的依赖关系

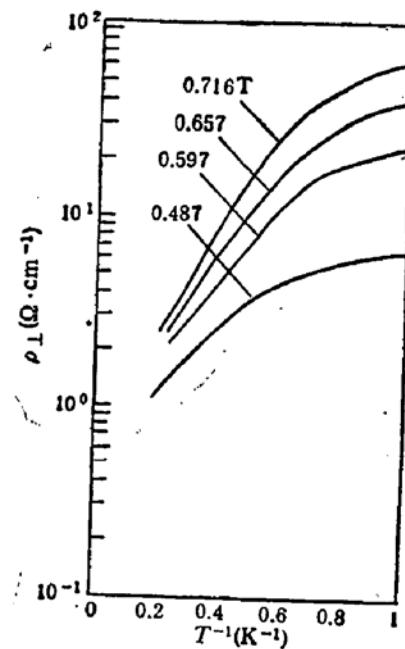


图4 在不同横向磁场条件下样品II的横向磁阻与温度的依赖关系

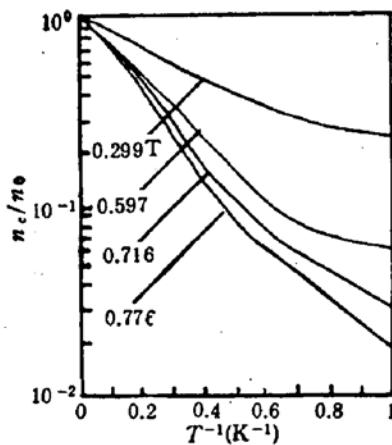


图5 在不同横向磁场条件下样品I的导带电子浓度与温度的依赖关系

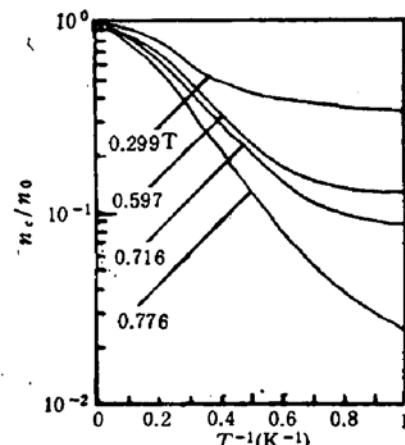


图6 在不同横向磁场条件下样品II的导带电子浓度与温度的依赖关系

比较图(3)和(4), 样品I的横向磁阻在 $T < 1.5 \text{ K}$ 深低温区随温度下降而以较小斜率指数上升, 杂质带电导呈现出跳跃式电导特征^[6]。同时, 比较图(5)和(6), 样品I的导带电子浓度随温度下降而减少得较快, 显示出较强的“磁冻出”能力。

可见, 样品I的这些输运现象正是体现了高补偿材料的一些输运特性, 从而说明了我们利用二带导电模型来描述锑化铟材料的能带结构是较合理的, 因而, 计算所得的结果与实验结果是相吻合的。

四、锑化铟材料补偿度对其非线性电导的影响

如图(7)和(8)分别为样品I和II在各种磁场温度条件下的电阻率依赖于电场强

度的变化。首先观察在 $B = 0$, $T = 4.0\text{ K}$ 条件下样品 II 的非线性电导行为, 在弱电场区 ($E < 0.03\text{ Vcm}^{-1}$), 电阻率不随电场强度而变化, 在较高电场区 ($0.03\text{ Vcm}^{-1} < E < 0.07\text{ Vcm}^{-1}$), 随外电场强度增强, 电阻率逐渐下降, 呈现出随 E^2 变化规律的非线性电导 ($\sigma = \sigma_0(1 + \beta E^2)$), 显然, 这是过热电子引起迁移率增大所致, 但随外电场强度的进一步变强 ($E > 0.07\text{ Vcm}^{-1}$), 电阻率急剧下降, Yamada 通过观察霍尔系数随外电场的变化, 证实了这是导带上过热电子与杂质带上迁移率很低的束缚电子发生碰撞, 束缚电子被激发到导带上使电阻率急剧下降所致^[7]。在电场强度 $E > 0.1\text{ Vcm}^{-1}$ 区, 不同温度条件下的电阻率随外电场强度变化是合并在一起的, 即杂质带上束缚电子全部激发到导带上, 说明了 Yamada 的解释是合理的。

比较样品 I 和 II 的非线性电导行为, 就不难看出增加补偿度, 使非线性区向强电场方向移动, 同时使非线性电导变化更剧烈。引起这种变化趋势的原因有二个, 其一是受主杂质浓度增加, 电离杂质散射势增强, 导带电子迁移率下降, 电子不易从外电场获取能量, 因而需要较高的电场强度来维持过热电子状态; 其二是受主杂质浓度增加使更多的载流子“冻出”在施主或受主杂质中心, 而这些载流子重新被电场激发到导带将引起电导率非线性大大增强。

如果我们注意同一样品随磁场强度或温度而引起电导率非线性的变化趋势, 就很容易得出增加材料补偿度与增加磁场强度及温度下降所引起的非线性电导变化趋势是一致的。如表 2, 3 为过热电子的一些输运参数。注意到 β 因子随这些外界条件、材料参数而变化的趋势, 这些结果与 Putley 所得的实验结果很相似^[8]。

可见, 具有高阻特性的高补偿材料能在较高电场强度区呈现出较强烈的非线性电导,

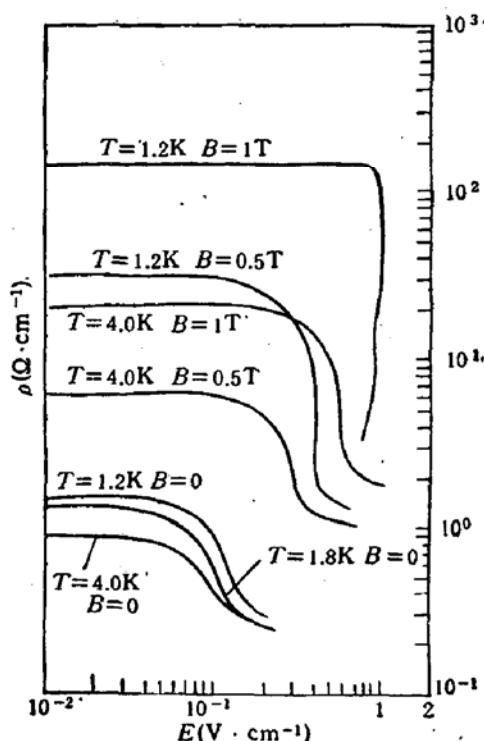


图 7 在不同横向磁场条件下样品 I 的电阻率与电场强度的依赖关系

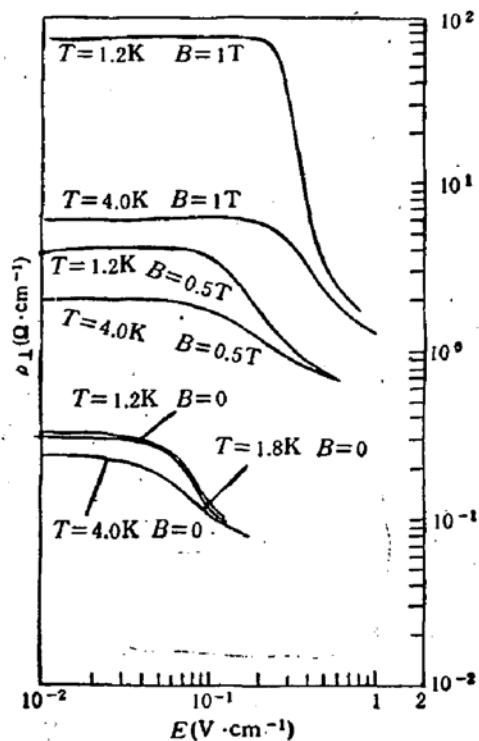


图 8 在不同横向磁场条件下样品 II 的电阻率与电场强度的依赖关系

表 2 样品 I 的过热电子输运参数

T (K)	σ_0 ($\Omega^{-1}\text{cm}$)	β (V^{-1}cm^2)	E_b ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$)	σ_0 ($\Omega^{-1}\text{cm}$)	β (V^{-1}cm^2)	E_b ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$)
4.0	1.10×10^0	76	$\sim 7 \times 10^{-2}$	1.58×10^{-1}	10	$\sim 2 \times 10^{-1}$
1.2	6.28×10^{-1}	48		3.19×10^{-1}	8.8	

表 3 样品 II 的过热电子输运参数

T (K)	σ_0 ($\Omega^{-1}\text{cm}$)	β (V^{-1}cm^2)	E_b ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$)	σ_0 ($\Omega^{-1}\text{cm}$)	β (V^{-1}cm^2)	E_b ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$)
4.0	4.17×10^0	112	$\sim 4 \times 10^{-2}$	5.00×10^{-1}	28	$\sim 1 \times 10^{-1}$
1.2	2.96×10^0	100		2.50×10^{-1}	26	

这些特性将有利于改善锑化铟远红外探测器的性能。在上述物理工作的基础上，我们选择了不同电学参数的材料制作了远红外探测器，且在 4.2 K 下利用 500°C 黑体辐射标准源测量了这些探测器的性能。如表 4 列出了典型的二个探测器的光学性能及其材料的电学参数^[9]。所以，适当选择高补偿材料制作探测器有利于提高探测器的性能。

如表 4，我们还列出了英国 QMC 同类产品的性能指标，(我们的测试条件与 QMC 的测试条件基本上是一致的)他们采用了 10^{13} cm^{-3} 高纯 N 型材料，如果还考虑到补偿作用，可望得到更低 NEP 的探测器。

最后，值得一提的是样品 I 在 $B = 1 \text{ T}$, $T = 1.2 \text{ K}$ 条件下出现的负微分电导如图(7)，进一步说明了高补偿材料在低温强磁场条件下能呈现出独特的输运性质。对此，我们可利用二带导电模型给予很好地解释。

五、结 论

本工作以研制锑化铟过热电子远红外探测器为背景，利用低温强磁场条件观察了材料的电学参数(补偿度，掺杂量等)及外界条件 (E , B , T) 对其过热电子非线性电导的影响，概括起来有以下几点：

第一、在深低温 $T = 4.2-0.3 \text{ K}$, 强磁场 $B = 0-3 \text{ T}$ 条件下进行了霍尔测试，且利用二带导电模型计算了补偿度。同时，观察了高补偿材料的一些输运特性，这些结果是相互吻合的，均可用二带导电模型给予很好解释。

第二、在深低温 $T = 4.0-1.2 \text{ K}$, 强磁场 $B = 0-1 \text{ T}$ 条件下观察不同电学参数 InSb 材料的过热电子非线性电导行为，结果表明：高补偿材料的过热电子所引起的电导率非线性变化较剧烈，且电导率非线性发生在较强的电场区，基于高补偿材料的这些输运特性，我们提出了采用高补偿 N 型材料来改善锑化铟过热电子远红外探测器性能的一种新方法，且得到实验证实。

第三、基于上述实验结果，我们看到作为典型的窄禁带半导体材料锑化铟，其 m^* 较

表 4 探测器的光学性能 ($T = 4.2\text{K}$, $f = 240\text{Hz}$)

探测器号	$NEP(\text{W Hz}^{-1/2})$	$n_0(\text{coul} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\mu(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$	$K(\%)$
探测器 I	6.0×10^{-12}	1.2×10^{14}	4.4×10^5	61
探测器 II	4.3×10^{-11}	2.0×10^{14}	6.3×10^5	36
QMC	$2 \times 10^{-12} - 3 \times 10^{-12}$	$2.6 \times 10^{13} - 4.3 \times 10^{13}$	$5.7 \times 10^5 - 6.8 \times 10^5$	—

小, 电子与晶格的耦合较弱, 在外电场作用下, 电子易积累能量从而有效地提高其电子温度。但过高的迁移率无法获得高输出电压, 难以提高探测器性能。然而, 作为三元化合物窄禁带半导体 HgCdTe , 其 m^* 比 InSb 小, μ 比 InSb 低, 因而, 其能量耦合更弱, 同时, 可获得高输出电压, 是制作这种远红外探测器较理想的材料。但正因为 HgCdTe 材料的质量问题, 这方面的工作仍处于初级阶段。

本工作是在红外开放物理国家实验室和低温组帮助和支持下完成的, 作者在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] E. H. Putley, *Proc. IEEE*, 51, 1412(1963). E. H. Putley, "Physics of Semiconductors" (Proc. 7th Inter. Conf.) 443. Dunod Paris and Academic Press. N. Y. (1964).
- [2] M. A. Kinch, B. V. Rollin, *Brit. J. Appl. Phys.*, 14, 672(1963).
- [3] QMC Instruments Ltd Private Communications (1980).
- [4] H. Miyazawa, *Solid State Commun.*, 5, 229(1967).
- [5] R. J. Sladek, *J. Phys. Chem. Solids.*, 5, 157(1958). P. E. Hanley, E. H. Rhoderick, *J. Phys. C. Solid St. Phys.*, 2, 812(1969).
- [6] R. Mansfield, *J. Phys. C. Solid. St. Phys.*, 11, 4152(1978).
- [7] K. Yamada, *J. Phys. Soc. Japan*, 37, 95(1974).
- [8] E. H. Putley, "Semiconductor and Semimetals", Vol. 1, Chapt. 9, Academic Press, New York and London. (1966).
- [9] 徐建人, 龚雅谦等, 红外研究, 9, 287(1990).

Effect of Impurity Compensation on Nonlinear Conductivity in N-type InSb Material

Xu Jianren, Gong Yaqian

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai 200083)

Zheng Guozhen and Guo Shaoling

(National Laboratory of Infrared Physics Shanghai, 200083)

Abstract

Systimatic investigations have been made on the hot electron transport property of n-type InSb material with different doping concentrations and compensation degrees under high magnetic field and at very low temperature. The experiment results show that there is a strong nonlinear conductivity under higher electric field for the InSb material with higher compensation degree. The analysis and discussion are given based on the two-band model. It indicates that the performance of InSb far-infrared detectors can be improved by choosing n-type InSb crystal with higher compensation degree. This has been proved by our measurement data of detector performance.