

InP δ 摻杂的输运特性

程文超

(中国科学院半导体研究所,北京)

A. Zrenner 叶秋怡 F. Koch

(联邦德国慕尼黑工业大学物理系 E16)

1988年12月29日收到

测量了用 MOCVD 技术制造的 InP δ 摻杂样品的磁输运特性, 量子化 Hall 效应和高电场下的热电子效应。得到了该样品的载流子分布, 子能带结构, 杂质传播宽度和电子迁移率等基本物理参数, 观察到填充因子 $\nu = 2$ 的量子 Hall 平台和负微分电阻现象, 建立和证实了 δ 摻杂样品的热电子传输模型。

主题词: δ 摻杂, 二维特性, Hall 效应, 热电子传输

一、引言

利用分子束外延 (MBE) 和金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术, 可以生长各种层状结构。在生长过程中, 能够任意选择掺杂位置, 去制造各种各样结构, 其目的是产生一个适当的导电沟道。为了提高载流子的迁移率, 杂质原子被放置在势阱以外, 这就是所谓的调制掺杂异质结。当然, 也有另外一种类型的掺杂, 杂质位于势阱中心, 被称为 δ 函数掺杂。即: 一个单原子层的 Si 杂质, 在 MBE 生长过程中被嵌进半绝缘的 GaAs 层中, 形成一个具有二维特性的 V 型势阱。在这个二维电子系统中, 当掺杂浓度较高时, 几个子能带将被占有, 它的物理特性已被广泛的研究^[1-3]。

使用低压 MOCVD 技术, 可以制造品质优良的 InP δ 摻杂样品^[4]。虽然它的生长过程与使用 MBE 技术生长的 GaAs δ 摻杂样品不同, 但是它的掺杂浓度和掺杂层的厚度均能由生长条件得到很好的控制, 人们可以获得所要求的各种样品。

我们对 InP δ 摻杂样品的输运特性进行了深入的研究。在这篇文章中, 报告了 InP δ 摻杂样品在垂直磁场中二维电子磁输运特性、量子 Hall 效应和热电子效应的实验结果。获得了载流子在子能带中的分布, 能带结构和电子迁移率等一些重要物理参数, 证实了该样品的二维特性。首先观察到 InP 量子阱的量子 Hall 平台。在热电子效应测量中, 观察到负微分电阻现象, 建立了不同于耿氏效应和异质结热电子效应^[5]的理论模型。

二、样品制备

实验用的样品是使用 MOCVD 技术制备的。在低压系统中, 首先在半绝缘 InP 村

底上，生长 $0.4\mu\text{m}$ 厚不掺杂的 InP 缓冲层，然后以 0.7\AA/s 速度生长一层浓度为 $2-8 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ，厚度是 $50-100\text{\AA}$ 的硫 (S) 掺杂层，作为导电沟道。在掺杂过程中，为了获得所要求的掺杂浓度，晶体生长不能停止，这一点是与使用 MBE 技术制造 GaAs δ 掺杂样品不同。最后生长 $1\mu\text{m}$ 不掺杂的 InP 盖层，以保证有足够的距离，防止电子从导电沟道传输到表面。详细的样品参数表示在表 1。

表 1 InP δ 掺杂样品参数

样品号	载流子浓度 $n_s (\times 10^{12}\text{cm}^{-3})$	δ 层厚度 $dz (\text{\AA})$	子能带占有数
521	3.15	50	4
427	2.50	90	4
428	1.80	50	3
546	1.00	50	2

在磁输运特性和量子 Hall 效应实验中，使用常规的光刻工艺制成 Hall 桥。在热电子效应测量中，样品导电沟道的尺寸是：长 $200\mu\text{m}$ ，宽 $100\mu\text{m}$ 。欧姆接触是蒸发 AuGe 合金，然后在 $80\% \text{N}_2 + 20\% \text{H}_2$ 气氛中，在 450°C 退火制成。

三、实验结果

A、磁输运特性

δ 掺杂样品二维电子态的最直接证明是垂直磁场中 Shubnikov-de Hass (SdH) 振荡。它的振荡周期可以给出每个子能带的占有 N_i^i 和总的载流子浓度 $N_s^{[2]}$ 。

图 1(a) 表示了样品 521 的磁阻振荡。由于每个被占有的子能带给出一个特征的周期，并将在 Fourier 谱中得到一个峰值，表示子能带的占有。从图 1(b) 可以看出，该样品有三个子能带被占有和总的载流子浓度为 $3.15 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 。

利用测量获得的载流子浓度，使用半自治子能带计算^[6]，可以得到掺杂杂质的传播距离 dz 和子能带结构。计算中包括了非抛物线色散关系，计算结果表示在图 2。比较设计与计算结果，我们发现施主离子的传播距离 dz 是一致的。所有样品的最大误差不超过 10%。这一点是非常重要的，因为 δ 掺杂特性是紧密地与掺杂层的厚度相关。

从能带图中看到，理论结果有四个子能

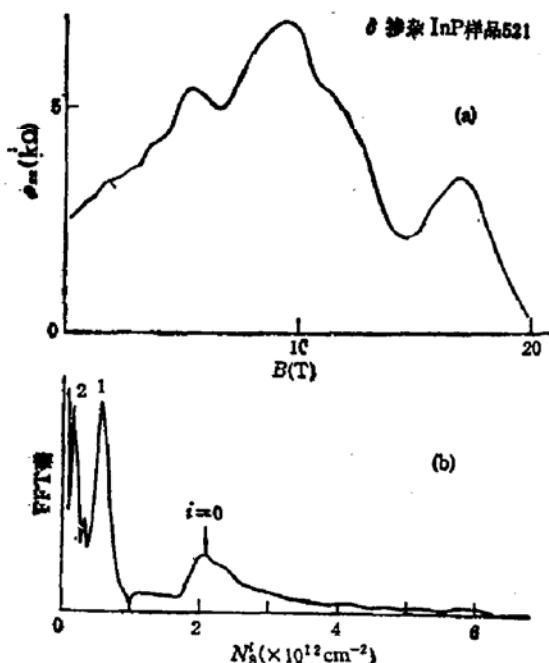


图 1 (a) SdH 振荡 (b) Fourier 谱从它可以得到每个子能带的电子浓度 N_i^i

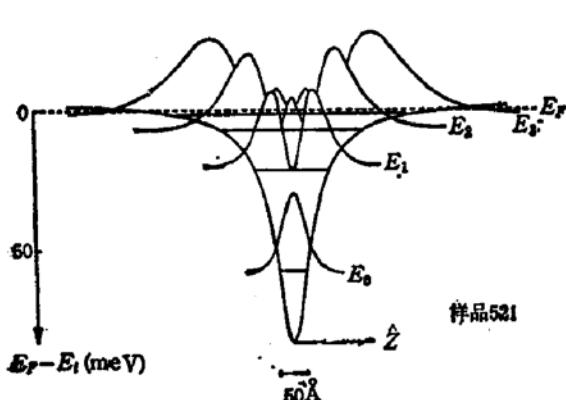
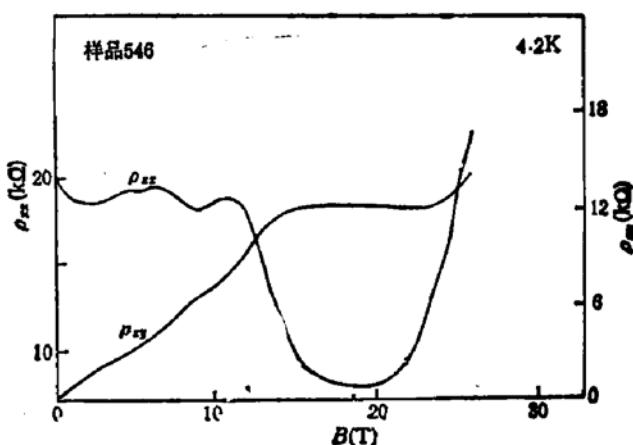


图2 样品 521 的能带结构

图3 ρ_{xy} 和 ρ_{xx} 与磁场的关系, 在 $B = 19\text{T}$ 处,
为 $\nu = 2$ 的量子 Hall 平台

带被占有,而在 SdH 测量中只发现三个子能带被占有,原因是:在 $i = 3$ 子能带中,载流子浓度是 $2 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$,当载流子浓度小于 $8 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ 时,不能被 SdH 测量所估价^[7]。这一点在参考文献[4]中已被平行磁场中的“逆磁 SdH 效应”所证实。

从测得的 ρ_{xy} , ρ_{xx} 与磁场的关系,我们可以计算得到 σ_{xx} 与 B_\perp 的关系。

当多个子能带被占有时,电导率的表达式可写为:

$$\sigma_{xx}(B_\perp) = \sum_i \sigma_0^i / (1 + \mu_i^2 B_\perp^2),$$

其中 $\sigma_0^i = N_i^i e \mu_i$ 是 $B_\perp = 0$ 时,第 i 个子能带的电导率,用已知的 N_i^i 值,可以计算得到 μ_i 的值。样品 521 的 μ_i 值分别是: 940, 4300 和 $4600\text{cm}^2/\text{v} \cdot \text{s}$, 对应于 $i = 0, 1, 2$ 。

通过垂直磁场中输运特性的研究,我们可以获得 δ 摊杂样品的一系列基本物理参数,这是进行深入物理研究的基础。

B. 量子化 Hall 效应

许多材料的量子 Hall 效应已被观察,例如: Si-MOS 结构反型层^[8], GaAs-AlGaAs 异质结和量子阱^[9],以及 InP-GaInAs 异质结^[10]等,但是在 InP 量子阱中,量子 Hall 效应一直没有被观察,其主要原因是利用分子束外延生长的 InP-GaInAs 异质结,势阱在 GaInAs 方面形成。而在 δ 摊杂样品中,可以观察 InP 量子阱的量子 Hall 效应。这也是一个多子能带被占有和低迁移率样品量子 Hall 效应的观察。

由于样品迁移率低和多个子能带被占有,实验中要求有较高的磁场,对于 $1 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 载流子浓度的样品,大约在 40 Tesla, 才能观察到填充因子 $\nu = 1$ 的量子 Hall 平台。

我们的实验结果表示在图 3, 最高磁场达 26 T。

在低磁场区,电阻率张量的两个组成部分表示了弱的磁量子振荡。在这个区域内,有两个以上子能带的贡献。由于电子迁移率较低,振荡幅度较小,加之两个子能带中 Landau 能级的相互重迭,使得在这个区域中,观察不到量子 Hall 平台。 ρ_{xy} 曲线表现出来的极小值位置,并不是真正量子 Hall 平台的位置。

当磁场高于 14 T 时, ρ_{xy} 下降到最低值,同时在 ρ_{xx} 曲线上,观察到填充因子 $\nu =$

2 的量子 Hall 平台, 其值为 12320Ω , 这个值与 h/e^2 比较, 误差为 4%, 这是在 InP 量子阱中第一次观察到量子 Hall 效应。

C. 热电子效应

在 δ 掺杂样品中, 低温下加高电场后, 热电子将被杂质散射, 在垂直表面方向获得足够的动能越过势垒, 逃出的电子将陷在界面态或者半绝缘层中的陷阱里。这是一个电子发射过程。在这个过程中, 导电沟道中的电子减少, 导致了电导率的下降。同时, 对一个自洽势阱而言, 当载流子浓度小于掺杂浓度时, 势阱将变窄, 增强电子和杂质的库仑相互作用, 促使电子迁移率进一步下降, 由于上述两种原因, 产生了负微分电阻现象。这是一个新的传输机构。它与载流子在能量空间传输的耿氏效应不同, 也与异质结中并联电导机构不同^[11]。在上述两种机构中均是被散射的载流子迁移率下降, 而在这个机构中, 是势阱中载流子自身迁移率下降。

图 4 表示了载流子传输引起势阱变化的半自治计算结果。

热电子效应的实验草图表示在图 5 中, 为了避免晶格加热, 电子加热脉冲宽度选为

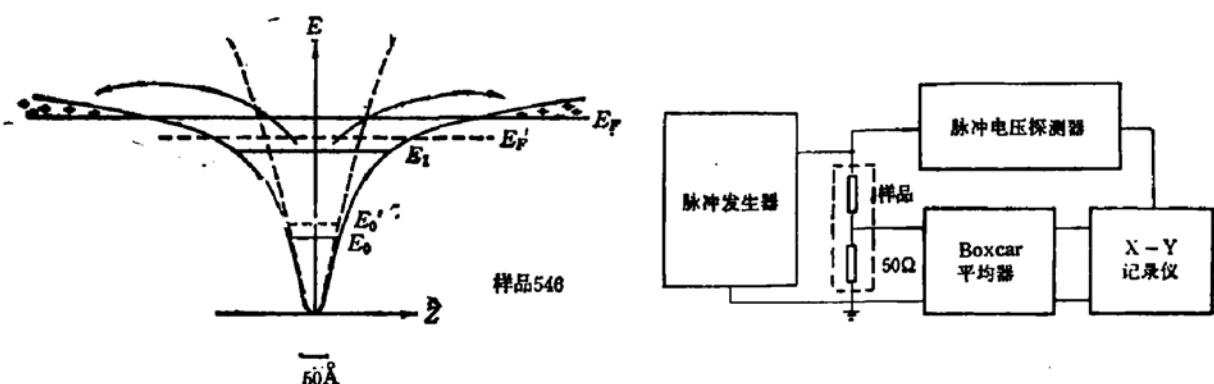


图 4 对于 $N_d = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ InP δ 掺杂样品的势阱, 虚线表示当 40% 的载流子发射出势阱后, 势阱的形状

图 5 $I-F$ 特性测量电路框图

500ns, 它的周期是 500ms 以上, 脉冲幅度从 0—500V 连续可调, 信号是由 Boxcar 平均器收集。

图 6 表示了不同温度下样品 546 的测量结果, 观察到负微分电阻。在 4.2K, 77K 和室温, 负微分电阻的开始位置分别是 6.4, 6.5 和 8.5kV/cm。正向电场和反向电场扫描时, 曲线表现了一个迟滞行为, 这是因为在强电场作用下, 电导率下降引起的。当电场高于 10kV/cm 时, 电流再次增加, 这是当势垒变得很高, 电子不能被发射出势阱或者陷阱被电子填满造成的。在室温, 正反向扫描时, 电导改变较小, 这是由于热激发载流子返回到势阱中。

图 7 表示了不同掺杂浓度的 InP δ 掺杂样品的 $I-F$ 特性。掺杂浓度较低的样品 546, 表现了明显的负微分电阻现象, 随着载流子浓度的增加, 负微分电阻的开始位置也增加, 样品 428 的开始位置是 9kV/cm, 而样品 427 没有观察到。当相同数量的载流子被发射时, 低载流子浓度的样品较高载流子浓度的样品势阱变化较快, 迁移率下降的速度也快。因此, 低载流子浓度的样品, 更易于观察负微分电阻现象。

导电沟道中载流子发射的多少, 将由电子温度和散射机构所决定。在确定的样品温

度,电场强度将起主要作用,图8表示了77K下,不同电场的I-F特性。它表明电场越高,电导率变得越低。而电导率的减少,是紧密地与电子浓度和迁移率降低有关,这一点将被下面的实验所证实。

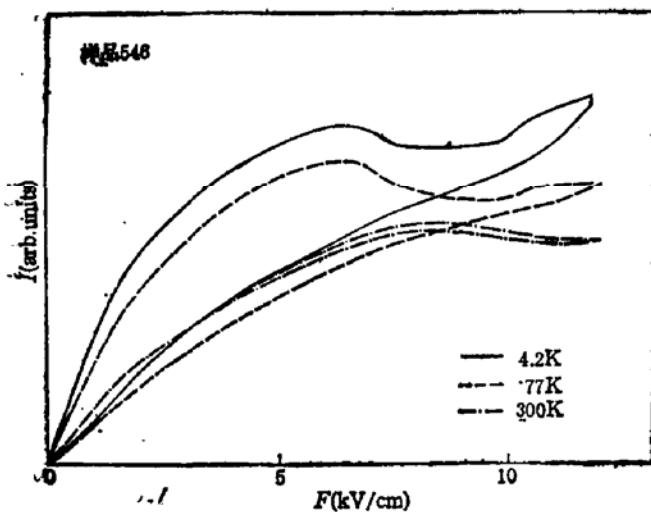


图6 不同温度下,电流电场特性

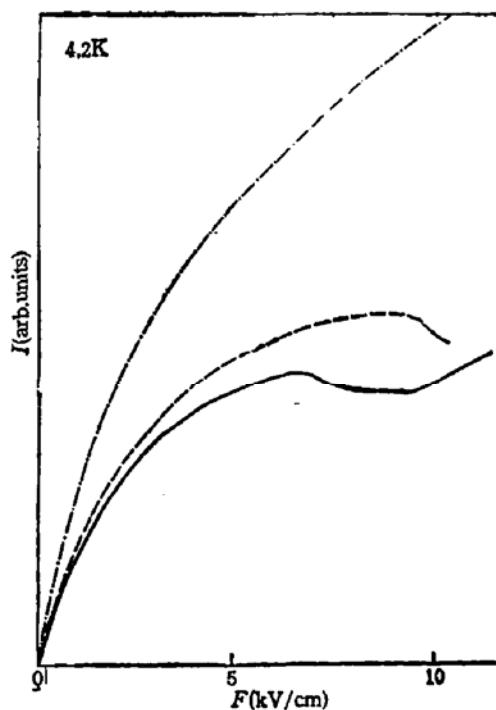


图7 三种载流子浓度样品的I-F特性

— 样品 546 $N_c = 1.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$
--- 样品 428 $N_c = 1.8 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$
- - - - 样品 427 $N_c = 2.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$

为了了解势阱中载流子浓度和迁移率的变化,我们测量了施加不同高电场前后的SdH振荡,实验结果的Fourier谱表示在图9中,Fourier谱中 E_1 子能带载流子峰值位置的漂移,表明了载流子浓度的减少。而 E_0 子能带位置峰值幅度随电场增加而减少,表明了电子迁移率的下降。因为迁移率的降低使得SdH振荡幅度减弱,导致了Fourier谱幅度的下降,这是势阱变窄引起的,这个实验结果证实了我们的理论模型。

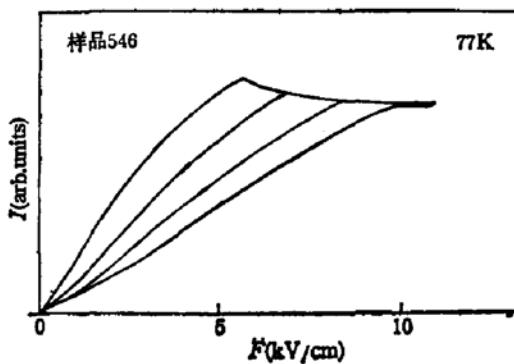


图8 施加不同电场的I-F特性

使用逆磁SdH测量,同样可以证明载流子浓度的减少,实验中我们发现加高场后, E_1 子能带在电导振荡曲线上的峰值消失,证明了 E_1 子能带中的电子已被发射。

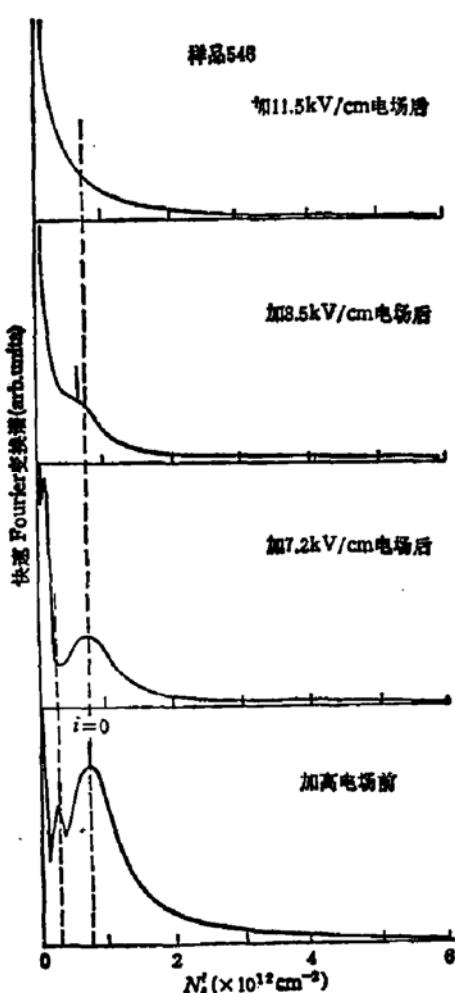


图9 施加不同高电场前后的 Fourier 谱

四、结 论

通过磁输运特性的测量，得到了 InP δ 掺杂样品的基本物理参数。证实了使用 MOCVD 技术制造的 InP δ 掺杂样品具有良好的二维特性。

对于低迁移率，多子能带被占有的 δ 掺杂样品，只有在高磁场下，当高阶子能带的 Landau 能级被扫出费米面时，才能观察到低填充因子的量子 Hall 平台。

在不同温度下，我们测量了不同载流子浓度的 InP δ 掺杂样品的热电子效应。观察到负微分电阻现象。使用一个新的传输模型较好地解释了我们的实验结果。同时，这个模型又被磁输运特性实验所证实。这个工作的目的是为了寻找制造负阻器件的新途径。

以上工作仅仅是对 InP δ 掺杂样品物理特性的初步探讨，更多的物理问题有待于进一步的研究。

作者感谢 D. Grützmacher 和 P. Balk 为本实验提供了样品。

参 考 文 献

- [1] A. Zrenner, H. Reisinger, F. Koch, and K. Ploog. Proc. of 17th Int. Conf. on the Phys. of Semicond.

- San Francisco, 1984, ed. by J. P. Chadi and W. A. Harrison (Springer Verlag, New York, 1984) p. 325.
- [2] A. Zrenner and F. Koch, Proc. of the 18th Int. Conf. on the Phys. of Semicond., Stockholm, 1986, ed. by O. Engström (World Scientific, Singapore, 1987) p. 1523.
- [3] A. Zrenner and F. Koch, Proc. of the EP2DS VH (Santa Fe, 1987) p. 341.
- [4] Wenchao Cheng, A. Zrenner, Qiu-Yi Ye, F. Koth, D. Grützmacher and P. Balk. *Semicond. Sci. and Technol.*, 4, 16(1989).
- [5] M. Keever, H. Shichijo, K. Hess, S. Banerjee, I. Witkowski, H. Morkoc and B. G. Streetman, *Appl. Phys. Lett.*, 38, 36(1981).
- [6] F. Malcher, G. Lommer and V. Rossler, *Superlattices and Microstruct.*, 2, 267(1986).
- [7] G. Gillmann, P. Bois, E. Barbier, B. Vinter, D. Lavielle, M. Stohr, S. Najda, A. Briggs and J. C. Portal. *Semicond. Sci. and Technol.*, 3, 620(1988).
- [8] K. von Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, *Phys. Rev. Lett.*, 45, 494(1980).
- [9] D. C. Tsui and A. C. Gossard, *Appl. Phys.*, 38, 550(1981).
- [10] H. P. Wei and D. C. Tsui, *Appl. Phys. Lett.*, 48, 666(1984).
- [11] K. Hess, H. Morkoc, H. Snichijo and B. G. Streetman, *Appl. Phys. Lett.*, 35, 469(1979).

Transport Properties in δ -Doping of InP

Cheng Wenchao

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

A. Zrenner, Ye Qiuyi and F. Koch

(Physik-Department E 16, Technische Universität München, D-8046 Garching, FRG)

Abstract

The magnetotransport properties, quantum Hall effect and hot electron effect in δ -doping InP samples prepared by MOCVD technique are studied. The basic physical parameters: carrier distribution, structure of subband, donor ion spreading and electron mobility have been estimated. The quantum Hall plateau at $v=2$ and negative differential resistance have been observed. A new hot electron transport model of δ -doping samples has been presented, which is identified by magnetotransport experiments.

KEY WORDS δ -doping, Two-Dimensional characteristics, Hall effect, Hot electron transport