

# 用交流热激电流研究窄禁带 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的深能级

林 和 汤定元

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海)

**摘要**——用交流热激电流(ATSC)方法研究了  $x=0.195\sim 0.275$  的窄禁带  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  半导体中的深能级, 讨论了  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  深能级的物理性质。实验表明交流热激电流方法(ATSC)是研究窄禁带  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  深能级的一种有效方法。

**关键词**—— $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , 交流热激电流, 深能级。

## 1、引 言

零偏压电阻和探测器面积之乘积  $R_0A$  是决定  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  光伏探测器性能的主要参数<sup>[1,2]</sup>,  $R_0A$  值是由 P-N 结的电流机构决定的, 而  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  半导体中的深能级就是影响其电流特性的一个重要因素。因此, 研究  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  半导体中的深能级对于提高  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  光伏探测器的性能有重要意义。

研究半导体中深能级的电学方法主要有三种, 即深能级瞬态谱(DLTS)、导纳谱(AS)和热激电流方法(TSC)<sup>[3]</sup>。DLTS 方法能区别电子陷阱和空穴陷阱, 导纳谱方法能测量发射率很高的浅陷阱。但这两种方法有一个共同缺点, 即它们对所测量的 P-N 结的结阻抗都有严格要求。对于禁带宽度  $E_g$  约 0.1eV 的窄禁带半导体中的深能级, 由于其 P-N 结阻抗低, (仅数十到数百欧姆), 用 DLTS 方法和 AS 方法难以准确测量, 而通常的直流热激电流方法<sup>[3]</sup> 灵敏度又很低。本文证明, 采用交流热激电流法可以测量窄禁带半导体材料中的深能级, 并能获得深能级位置、浓度、俘获截面等一系列有用的参量。本文从理论和实验两方面阐述如何用交流热激电流方法(ATSC)研究窄禁带  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  半导体中的深能级。

## 2、交流热激电流的基本原理

当半导体样品被置于足够低的温度下, 其陷阱能级就被电子或空穴填满, 然后将样品线性加热, 陷阱能级上的电子或空穴将被热激发到导带或价带而形成热激电流。热激电流(或热激电导)的峰值大小及其所在的温度与能级位置  $\Delta E_i$ 、载流子俘获截面、线性加热速率

等因素有关,通过改变加热速率可得到能级深度、载流子俘获截面等参量<sup>[5,6]</sup>。

有深能级存在时, N型半导体电导与温度的关系为<sup>[6]</sup>

$$\sigma(T) = \frac{q\tau\mu_0 N_c \sigma_i U_{th}}{1 + \tau N_i \sigma_i U_{th}} \hat{n}_i \exp \left[ -\frac{\Delta E_i}{KT} - \frac{1}{\beta} \int_0^T \frac{N_c \sigma_i U_{th} \exp(-\Delta E_i/KT) dT}{1 + \tau N_i \sigma_i U_{th}} \right], \quad (1)$$

式中,  $q$  是电子电荷,  $\sigma_i$  是第  $i$  个能级的俘获截面,  $\Delta E_i$  是第  $i$  个深能级的能量,  $N_i$  是第  $i$  个杂质能级的密度,  $\beta$  是加热速率,  $\hat{n}_i$  是温度  $T_0$  时第  $i$  个能级的最初占有率,  $\mu_0$  为导带电子迁移率,  $\tau$  是电子复合时间,  $u_{th}$  是电子的热运动速度,  $N_c$  是导带有效态密度。

由  $\frac{d\sigma(T)}{dT} = 0$ , 可求得  $T = T_m$  时的电导极值  $\sigma_m$ 。在电导极值条件下, 有

$$\frac{\Delta E_i}{KT_m} = \ln \left( \frac{T_m^2}{\beta} \right) + \ln \left( \frac{N_c \sigma_i U_{th} K}{\Delta E_i} \right) - \ln (1 + \tau N_i \sigma_i U_{th}) \quad (2)$$

对于用 Hg 扩散工艺制作的  $Hg_{1-x}Cd_xTeP^+-N$  结<sup>[9]</sup>, 我们考虑慢重俘获条件, 即  $\tau N_i \sigma_i U_{th} \ll 1$ <sup>[6]</sup>, 得到

$$\frac{\Delta E_i}{KT_m} = \ln \frac{(N_c \sigma_i U_{th} K T_m^2)}{\beta \Delta E_i}, \quad (3)$$

式中  $\Delta E_i = E_0 - E_i$ , 为某个深能级到导带底的能量差。

由式(3)可知, 只要知道加热速率  $\beta$ , 热激电导的峰值所对应的温度  $T_m$  以及俘获截面  $\sigma_i$ , 便可求得深能级杂质位置  $\Delta E_i$ 。

按照 W. Shockley 的 P-N 结理论<sup>[7]</sup>, 当满足条件  $\omega\tau_n \ll 1$  和  $\omega\tau_p \ll 1$  时(这里  $\omega$  为测试频率,  $\tau_n$  和  $\tau_p$  分别为电子和空穴的寿命), P-N 结直流电导等于交流电导, 本文基于这一理论, 建立了交流热激电流(ATSC)测试方法。当上述条件满足时, 这一直流热激电导理论也适用于交流热激电导。

### 3、实验方法与设备

本文采用交流电导法并应用锁相放大技术, 有效地去除了干扰, 提高了测试灵敏度。交流热激电导(ATSC)测量装置和测量等效电路如图 1 所示。

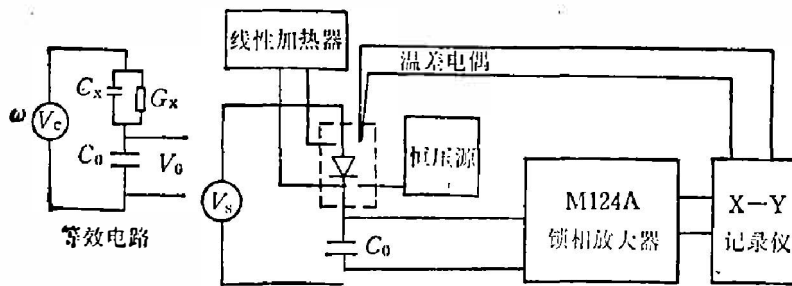


图 1 P-N 结交流热激电流测量装置方框图及等效电路图

Fig. 1 Block diagram of the set-up for measuring alternating thermal stimulated current in P-N junctions and its equivalent circuit.

当满足条件  $\omega C_0 \gg G_x$ ,  $C_0 \gg C_x$  和  $\omega^2 C_0 C_x R_x^2 \gg 1$  时(这里  $C_0$  为取样电容,  $G_x$  和  $C_x$  分别为被测 P-N 结的结电导和结电容,  $R_x$  为 P-N 结电阻,  $R_x = \frac{1}{G_x}$ ), 有

$$V_o = \frac{C_c}{C_0} V_s, \quad (4)$$

$$V_G = \frac{G_c}{\omega C_0} V_s, \quad (5)$$

式中  $V_s$  为信号电压;  $V_o$  和  $V_G$  为锁相放大器的两个输出电压, 其相位差  $90^\circ$ ;  $\omega = 2\pi f$  为测试频率。

对于窄禁带  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结, 在满足条件  $\omega\tau_n \ll 1$  和  $\omega\tau_p \ll 1$  的频率范围内, 条件  $\omega^2 C_0 C_c R_x^2 \gg 1$  一般都得不到满足, 在这种情况下, 则有

$$V_o = \left( \frac{1}{\omega^2 C_0^2 R_x^2} + \frac{C_c}{C_0} \right) \cdot V_s, \quad (6)$$

$$V_G = \frac{G_c}{\omega C_0} V_s. \quad (7)$$

由式(7)可见, 当测试频率较低, P-N 结阻抗也较低时, 锁相放大器的输出电压的电导分量  $V_G$  仍然只与 P-N 结的电导  $G_c$  有关。因此, 在一定的频率范围内 ( $\omega C_0 \gg G_c$ ,  $\omega\tau_n \ll 1$ ,  $\omega\tau_p \ll 1$ ), 交流热激电导法是研究窄带  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结中深能级的一种较好的方法。

在进行交流热激电流测量时, 在室温下先将  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结置于正向偏置, 然后将其迅速冷却至液氮或液氦温度, 以保证陷阱中充满电子。在低温下, 再将 P-N 结置于反向偏压, 使其具有一定的耗尽区宽度, 然后将样品线性加热。在一定温度下陷阱中的电子将被热激发到导带, 并立即被外加反向电压扫出耗尽区而形成热激电流。

## 4、实验结果

我们采用氦气节流制冷低温装置测试了  $x=0.195 \sim 0.275$  的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结在  $T = 28 \sim 250 \text{ K}$  范围内的交流热激电导特性。由于氦气节流制冷装置的最低温度为  $28 \text{ K}$ , 我们对  $x=0.195$  和  $x=0.2$  的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  样品测得的热激电导谱尚不完整, 需要采用更低起始温度。对  $x=0.275$  的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结(编号 L 608)测量结果则比较完整, 有较好的代表性, 其测量曲线如图 2、3 所示。由图 3 可知, 在加了反偏压后, 由于 P-N 结阻抗增加, 在图 2 中被 P-N 结暗电流掩盖的热激电流峰都能被观察到。

为了证明交流 TSC 测量方法的正确性, 本文还用直流 TSC 方法测量了  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  L 608 样品的电流温度特性, 在零偏压下得到与图 2 相似的特性, 电流峰的位置与图 2 一致。另外, 在  $f=100 \text{ kHz}$  时, 条件  $\omega\tau_n \ll 1$  和  $\omega\tau_p \ll 1$  能被满足<sup>[3]</sup>, 在这一测试条件下直流电导等于交流电导。本文还进行了  $f=100 \sim 200 \text{ kHz}$  变频测量, 测量结果表明 P-N 结热激电导峰值位置不随频率变化, 这说明 ATSC 方法确是有别于 AS 的一种新方法。

## 5、分析与讨论

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  中的杂质和缺陷能在禁带中引入深能级, 这些深能级对载流子起陷阱或复合中心的作用。我们用交流 TSC 方法研究  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结 N 型区的深能级, 得到如下结果。

### 5.1 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 中深能级的位置

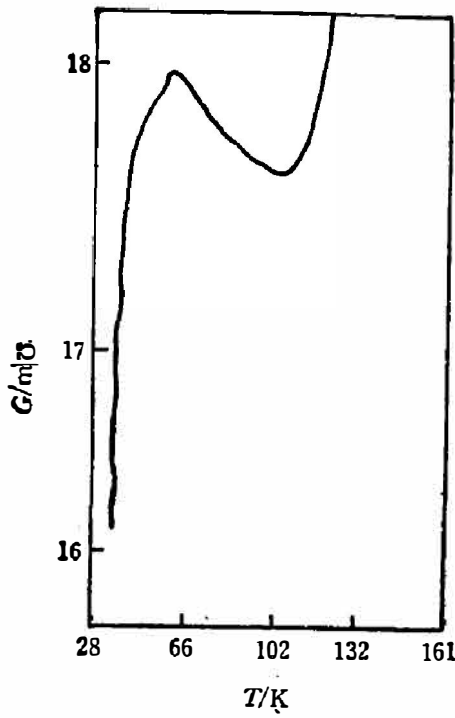


图2 零偏压下  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.275$ ) P-N 结 ATSC 曲线  
( $f=100\text{K}$ ,  $V_r=10\text{mV}$ )

Fig. 2 The ATSC curve for a  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.275$ ) P-N junction under zero bias.

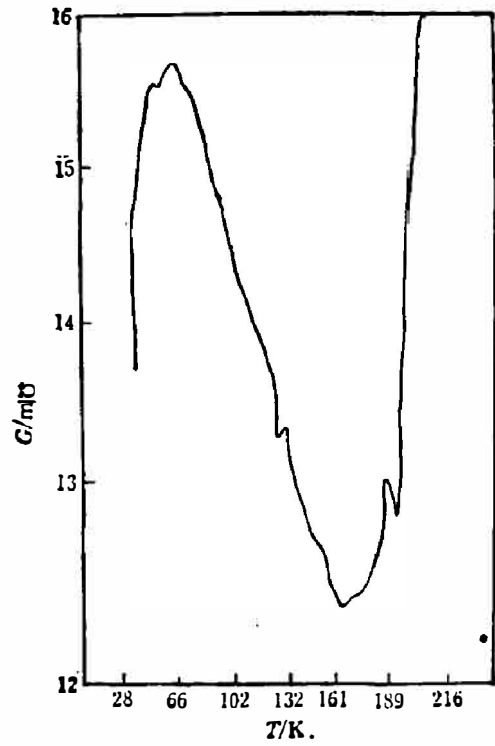


图3 反偏压下  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.275$ ) P-N 结 ATSC 曲线。

( $f=100\text{kHz}$ ,  $\beta=0.05\text{K/s}$ , 反偏压  $V_r=150\text{mV}$ )

Fig. 3 The ATSC curve for  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.275$ ) P-N junction under backward bias.

采用参考文献 [3] 中的俘获截面数据, 根据本文测量结果, 用式 (3) 算得  $x=0.195\sim 0.275$  的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  深能级位置示于表 1。

D. L. Polla<sup>[3]</sup> 用 DLTS 方法和 AS 方法<sup>[3]</sup> 研究了  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结中的深能级, 他认为在  $x=0.2\sim 0.4$  的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结中一般存在两个深能级, 一个约在  $1/2 E_g$  位置, 另一个约处于  $3/4 E_g$  位置。A. B. Войцеховский<sup>[8]</sup> 通过寿命测量, 得到在  $x=0.195$  P 型

表 1  $x=0.195\sim 0.275$  的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  深能级位置  
Table 1. Deep level energies for  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.195\sim 0.275$ ) obtained by ATSC method.

$x$	$E_g(\text{eV})$ ( $T=83\text{K}$ )	$\lambda_c(\mu\text{m})$ ( $T=83\text{K}$ )	$E_C - E_i(\text{eV})$	$E_V + E_i(\text{eV})$
0.275	0.217	6	I、 0.052	0.165
			II、 0.074	0.143
			III、 0.156	0.061
			IV、 0.190	0.027
0.23	0.138	9	0.038	0.1
0.2	0.094	13	0.052	0.042
0.195	0.086	14.5	0.049	0.037

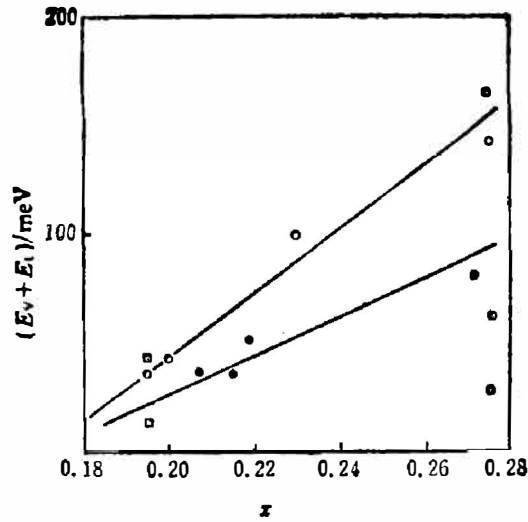


图4  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的深能级位置与组份  $x$  的关系

○: 本文的 ATSC 测量结果, ●: D. L. Polla 的 DLTS 测量结果<sup>[3]</sup>,  
□: A. B. Войцеховский 的 P 型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  寿命测量结果<sup>[8]</sup>

Fig. 4 Relations of the deep level energy in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  vs the composition  $x$ .

○: The measured ATSC results by this paper; ●: The measured DLTS results by D. L. Polla<sup>[3]</sup>; □: The measured lifetime results for P type  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  by t. B. Войцеховский<sup>[8]</sup>.

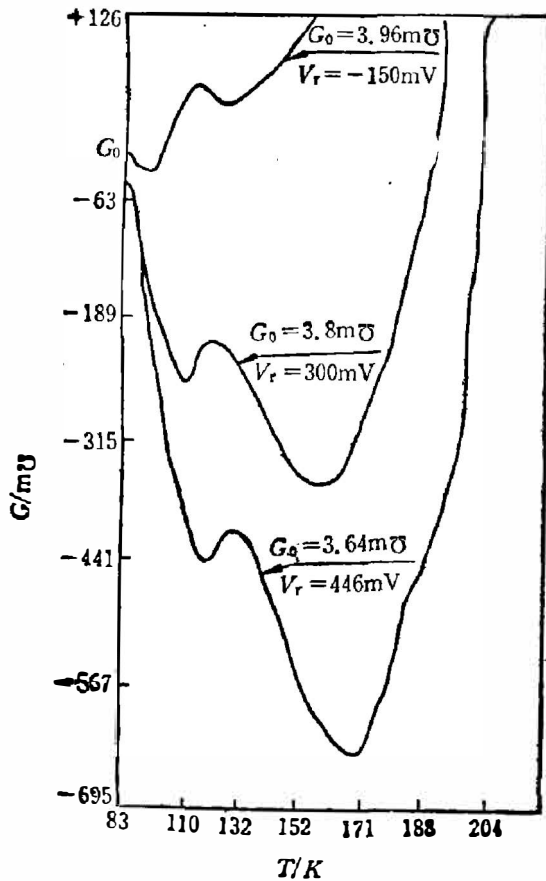


图5  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}(x=0.275)$  P-N 结在不同反偏压下的 ATSC 曲线

( $f=100\text{ kHz}$ ,  $V_s=10\text{ mV}$ ,  $\beta=0.41\text{ K/s}$ )

Fig. 5 ATSC curves for  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}(x=0.275)$  P-N junctions under different backward bias.

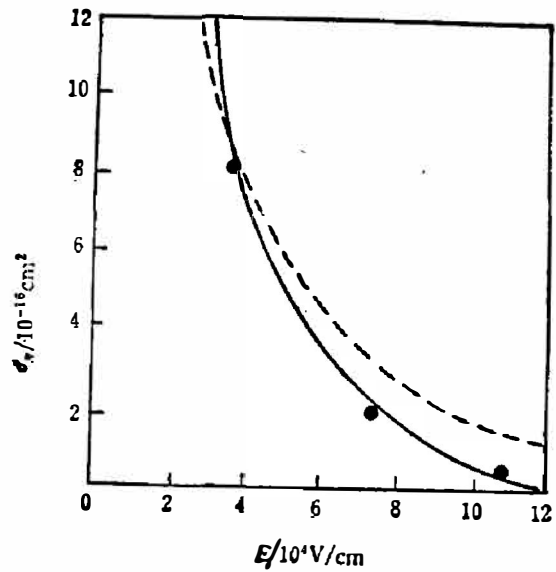


图6  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}(x=0.275)$  深能级电子俘获截面  $\sigma_n$  与电场  $E$  的关系

--- 为  $E^{-3/2}$  理论曲线, ● 为实验结果

Fig. 6 Relation of the electron capture cross section  $\sigma_n$  of the deep level vs the electrical field  $E$  of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}(x=0.275)$ .

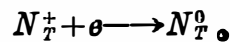
---: the theoretical curve of  $E^{-3/2}$ ;  
●: the experimental result.

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的价带上方  $30\sim 45\text{meV}$  和  $10\sim 15\text{meV}$  处各有一个杂质能级。图 4 给出了本文测量结果和 D. L. Polla 等人测量结果的比较。

## 5.2 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 深能级的物理性质

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结中深能级的物理性质及如何俘获载流子是人们所关心的问题。我们知道, 如将  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  中的缺陷或杂质考虑为带电荷的实体, 其行为可归为三类<sup>[3]</sup>: 库仑吸引力、库仑排斥心和库仑中性心。各类陷阱的俘获截面是由其附近势能的变化决定的, 因此, 它们都与电场有明显的依赖关系。图 5 画出了  $x=0.275$  的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结在不同电场条件下的热激电导曲线, 由于是使用液氮杜瓦瓶测量, 故只测出了  $E_{t3}$ ,  $E_{t4}$  两个能级。图 5 表明, P-N 结中  $E_{t3}$  深能级所对应的热激电流峰的位置随反偏压增加向高温方向移动, 这一移动是由电子俘获截面的电场关系决定的<sup>[6]</sup>, 由这一关系可以推断深能级的物理性质。

Dussel 等人认为<sup>[6]</sup>, 一个库仑吸引陷阱的俘获截面与电场成  $E^{-3/2}$  关系。本文利用图 5 所示的实验结果计算了  $x=0.275$   $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  P-N 结中  $E_{t3}$  能级的电子俘获截面  $\sigma_n$  与电场的关系。计算采用式(3), 式中  $U_{t3}$  改为电子漂移速度,  $\sigma_n$  采用了 D. L. Polla<sup>[3]</sup> 的数据。计算结果如图 6 所示, 图中虚线是根据 Dussel 的理论预测的库仑吸引陷阱电子俘获截面与电场的关系。由图 6 可见, 实验结果与理论符合得较好, 接近  $E^{-3/2}$  关系。因此, 可以认为产生  $E_{t3}$  能级 ( $\Delta E_t = E_0 - E_t = 0.156\text{eV}$ ) 的深能级杂质是一个库仑吸引力。这种库仑吸引力的电子俘获过程可表示为<sup>[3]</sup>:



## 6、结 论

我们的实验结果表明, ATSO 方法是研究窄带  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  半导体中深能级的一种有效方法。由一般的交流 TSC 测量, 可得到深能级位置、深能级密度和深能级俘获截面等参量。而通过变偏压测量, 则可得到俘获截面与电场的关系, 从而可进一步探讨深能级复合中心的物理性质。

致谢——作者感谢方家熊、杨秀珍等同志的支持和帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 汤定元, 红外物理与技术, (1974), 6: 345.
- [2] 汤定元, 红外物理与技术, (1976), 4~5: 53.
- [3] Polla D. L. and Jones C. E., *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 518.
- [4] Simmons J. G. and Taylor G. W., *Phys. Rev.*, **B4**(1971), 502.
- [5] Braunlich P., *Thermally Relaxation in Solids, Topics in Applied Physics*, Vol. 37, 1979.
- [6] A. G. 米尔恩斯, 半导体中的深能级杂质, 北京: 科学出版社, 1973.
- [7] Shockley W., *Bell System Technical Journal*, **28**(1949), 435.
- [8] Войцеховский А. В., *Ф. Т. П.*, **15**(1981). 1457.
- [9] 杨秀珍、王戎兴, 红外物理与技术, **2**(1981), 1.
- [10] Dornhaus R., Nimtz G. and Schlicht B., *Narrow Gap Semiconductors*, Springer-Verlag, 1983.
- [11] 黄昆、谢希德, 半导体物理学, 北京: 高等教育出版社, 1958.

# STUDY OF DEEP LEVELS IN NARROW-GAP SEMICONDUCTORS $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ BY ATSC METHOD

LIN HE TANG DINGYUAN

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

## ABSTRACT

The deep levels in narrow-gap semiconductors  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.195\sim 0.275$ ) are investigated using the alternating thermal stimulated current (ATSC) method. The physical properties of the deep levels in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  are discussed. The experimental results show that the ATSC method is an effective way to investigate the deep levels in narrow gap semiconductors  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ .