

用交流热激电流研究窄禁带 Hg_{1-x}Cd_xTe 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 Hg_{1-x}Cd_xTe 半导体中的深能级, 讨论了 Hg_{1-x}Cd_xTe 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 Hg_{1-x}Cd_xTe 深能级的一种有效方法。

关键词——Hg_{1-x}Cd_xTe, 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 Hg_{1-x}Cd_xTe 光伏探测器性能的主要参数^[1,2], R_0A 值是由 P-N 结的电流机构决定的, 而 Hg_{1-x}Cd_xTe 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 Hg_{1-x}Cd_xTe 半导体中的深能级对于提高 Hg_{1-x}Cd_xTe 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)^[3]。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^[3]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 Hg_{1-x}Cd_xTe 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 ΔE_t 、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^[5,6]。

有深能级存在时, N型半导体电导与温度的关系为^[6]

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

式中, q 是电子电荷, σ_i 是第 i 个能级的俘获截面, ΔE_i 是第 i 个深能级的能量, N_i 是第 i 个杂质能级的密度, β 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, μ_0 为导带电子迁移率, τ 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 σ_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 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{TeP}^+-\text{N}$ 结^[9], 我们考虑慢重俘获条件, 即 $\tau N_i \sigma_i U_{th} \ll 1$ ^[6], 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 β , 热激电导的峰值所对应的温度 T_m 以及俘获截面 σ_i , 便可求得深能级杂质位置 ΔE_i 。

按照 W. Shockley 的 P-N 结理论^[7], 当满足条件 $\omega\tau_n \ll 1$ 和 $\omega\tau_p \ll 1$ 时(这里 ω 为测试频率, τ_n 和 τ_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。

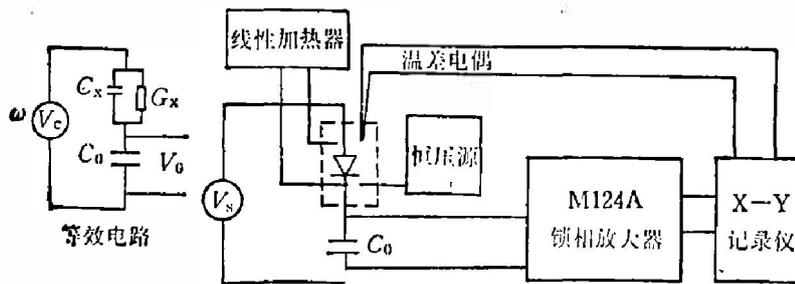


图 1 P-N 结交流热激电流测量装置方框图及等效电路图

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° ; $\omega = 2\pi f$ 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 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^[3], 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

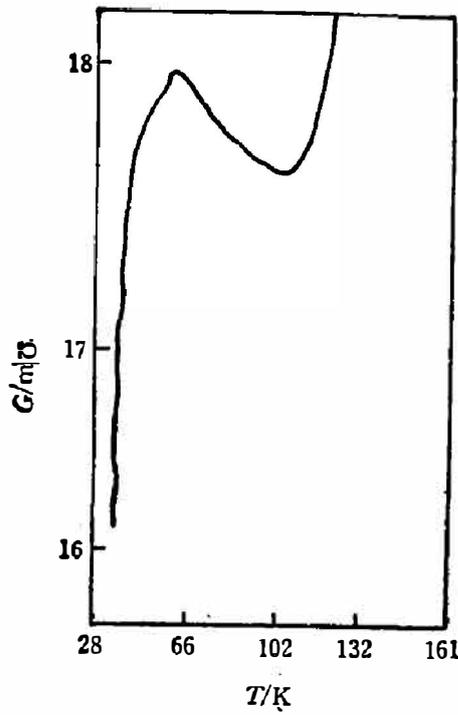


图2 零偏压下 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.275$) P-N 结 ATSC 曲线
($f=100\text{K}$, $V_r=10\text{mV}$)

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.

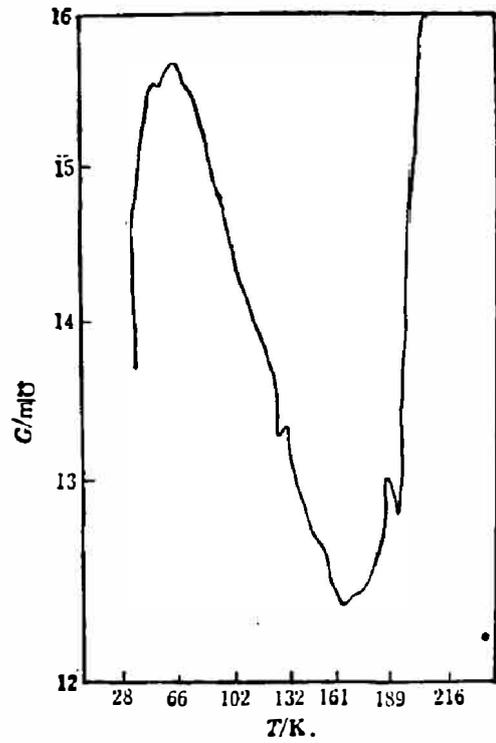


图3 反偏压下 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.275$) P-N 结 ATSC 曲线。

($f=100\text{kHz}$, $\beta=0.05\text{K/s}$, 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^[3] 用 DLTS 方法和 AS 方法^[3] 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^[8] 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 (eV) ($T=83\text{K}$)	λ_c (μm) ($T=83\text{K}$)	$E_C - E_i$ (eV)	$E_V + E_i$ (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

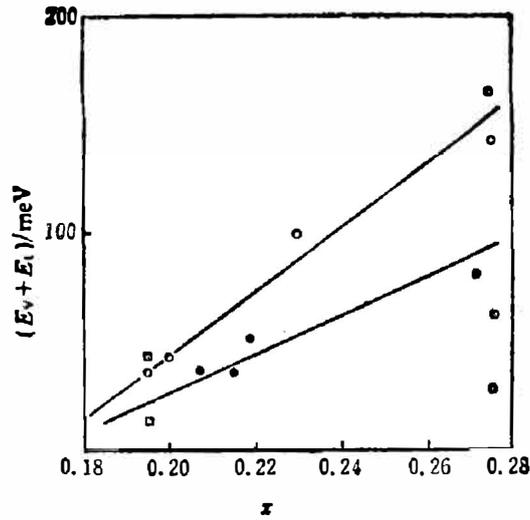


图4 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的深能级位置与组份 x 的关系

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

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^[3]; □: The measured lifetime results for P type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ by t. B. Войцеховский^[8].

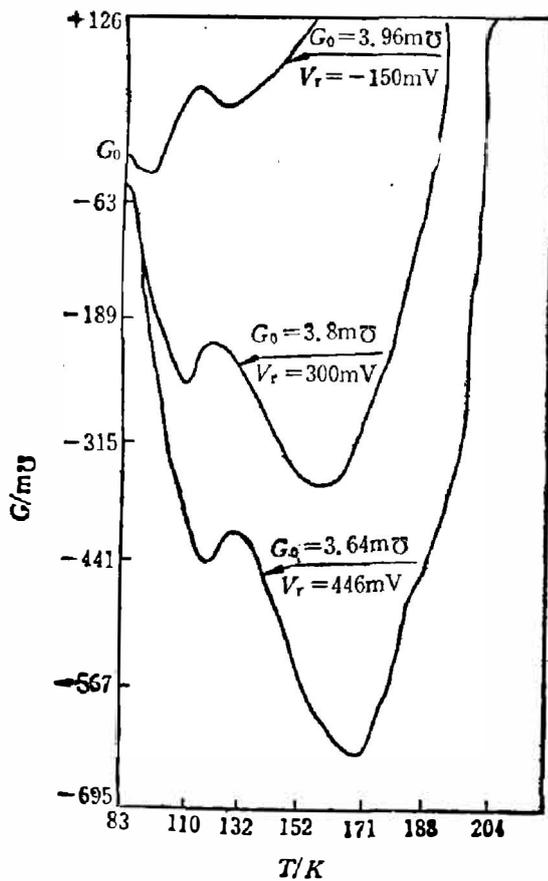


图5 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}(x=0.275)$ P-N 结在不同反偏压下的 ATSC 曲线

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

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

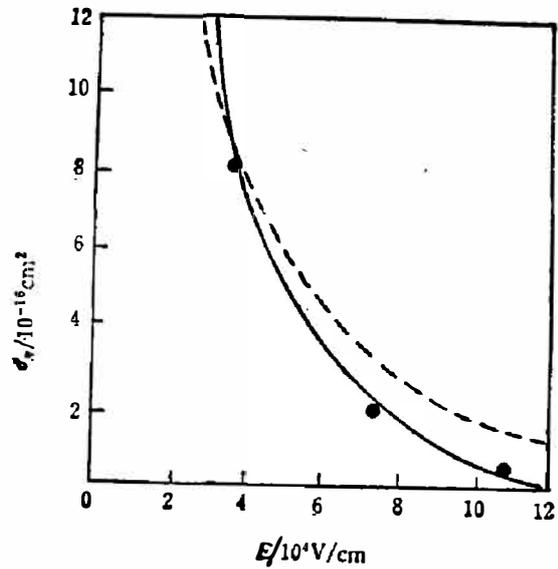


图6 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}(x=0.275)$ 深能级电子俘获截面 σ_n 与电场 E 的关系

--- 为 $E^{-3/2}$ 理论曲线, ● 为实验结果

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

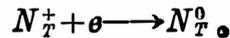
---: the theoretical curve of $E^{-3/2}$;
●: the experimental result.

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 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^[3]: 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^[6], 由这一关系可以推断深能级的物理性质。

Dussel 等人认为^[6], 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 σ_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, σ_n 采用了 D. L. Polla^[3] 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^[3]:



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 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.