

# 表面累积层对 N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 输运特性及复合特性的影响

G. Mahr von Staszewski\*, C. Lex, G. Nimtz, 方家熊\*\*  
J. Schilz, R. Wollrab\*\*\*

(II. Physikalisches Institut der Universität zu Köln, Zulpicher Strasse  
77, 5000 Köln 41, F. R. Germany)

**摘要**——通过测量经紫外辐照的样品的磁输运特性和复合特性, 研究  $\text{N}^+$  表面累积层对钝化  $\text{N-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  的影响. 紫外辐射使  $\text{N}^+$  表面层减少, 从而使样品的电阻增大, 这一现象与钝化氧化层俘获电子有关. 观察到紫外辐照可使样品的载流子寿命减小约 90%. 假设紫外辐射降低了由  $\text{N}^+$  表面层引起的内建电势, 可解释较快的电子-空穴复合速率. 被激发成准平带或弱耗尽状态的晶体的电子-空穴复合时间常数较小.  $\text{N-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  表面层状态确定了光电导器件的最终设计.

**关键词**—— $\text{N-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , 表面累积层, 磁输运, 复合.

## 1. 引 言

众所周知,  $\text{N-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  晶体在空气中的表面不稳定性<sup>[1]</sup>引起表面形成原生氧化膜, 从而使能带强烈弯曲. 这一现象使  $\text{N-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  产生表面累积层, 使  $\text{P-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  产生反型层<sup>[2,3]</sup>.

以往报道对输运测量中反常现象的解释往往考虑到  $\text{N}^+$  表面层的作用<sup>[4-7]</sup>. Nicholas 等人<sup>[3]</sup>研究了紫外辐射使  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  晶体累积层减少的现象, 基于 Schoolar 等人<sup>[8]</sup>的早期工作, 他们认为这种现象是由于氧化膜中的深能级从累积层中俘获了电子所致. 在 77K 温度时, 表面层的粒子数减少可持续数小时, 而在 4K 温度下, 持续时间还要长得多. 本文报道了几个  $\text{N-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  样品的磁输运和时间分辨光电导的测量结果. 我们的结果证

本文 1990 年 2 月 14 日收到.

\* DLR (German Aerospace Research Establishment), Institut für Werkstoff-Forschung, Postfach 906058, Linder Höhe, 5000 Köln 90, FRG.

\*\* 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083.

\*\*\* Telefunken electronic, Theresienstr. 2, 7100 Heilbronn, FRG.

实了紫外辐射使  $N^+$  表面层对输运和复合特性起到重要影响, 并使其具有钝化作用。

## 2. 实 验

表 1  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  样品的特性参数  
Table 1 characteristics of MCT samples.

样品编号	样品来源	电子浓度 ( $cm^{-3}$ )	电子迁移率 ( $cm^2/V \cdot s$ )	样品厚度 ( $\mu m$ )	氧化类型 (厚度 nm)	晶体类型
H4A	休斯公司	$4 \times 10^{14}$	$1.6 \times 10^5$	100	原生 (2.0)	体材料
P8b-1	德律风根 电子公司	$4.7 \times 10^{14}$	$2 \times 10^5$	200	原生 (2.0)	体材料
H2	中国科学院 上海技术物理所	$2.6 \times 10^{15}$	$10^4$	17	阳极氧化 (40)	体材料
LPE 87/6a, b	德律风根 电子公司	$4.6 \times 10^{14}$	$1.5 \times 10^5$	15	阳极氧化 (90)	在 CdTe 上外延

表 1 概括地列出了我们使用的实验样品的特性参数。我们在真空蒸镀的 In 焊区上焊接 Pt 引线以形成电学接触, 用能量高于钝化氧化膜禁带宽度 ( $\approx 3.4 eV$ ) 的光子进行紫外辐照, 使用的光子通量  $\sim 3 \times 10^{13} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

### 2.1 磁输运特性

我们用样品 H4A、P8b-1 和 H2 进行了磁输运实验。将样品放在一个带有透紫外窗口的低温恒温池中, 测量温度  $T=1.4 K$  和  $T=5 K$  时的纵向磁导率(参看图 2), 测量中采用低电流 ( $10 \mu A$ ) 和锁相技术抑制热电子效应。样品 H4A 是固定在石英衬底上的, 以使它的两个表面均能接受紫外辐射。实验使用的磁场可达 7T。

### 2.2 时间分辨光电导

用同一块外延晶片制成的样品 LPE87/6a 和 b 进行时间分辨光电导研究。用脉宽  $\sim 20 ns$ 、波长  $\lambda=0.9 \mu m$  的 GaAs 激光器将电子从价带激发到导带。通过高于样品电阻  $10 \sim 100$  倍的高输入电阻在整个测量过程中保持恒流条件。信号由示波器记录并数字化。为抑制样品的光伏信号, 使激光辐射聚焦在被测样品上, 并避免电接触区受到辐照。

## 3. 结果与讨论

紫外辐照实验表明  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  的表面不但对其复合特性产生重要影响, 而且也明显地影响到磁输运特性。以下用几个不同来源的样品为例加以论证。

图 1 系样品 H2 在紫外辐照前后的霍尔系数  $R_H$  与温度倒数  $1/T$  的关系。图 2 表明两个样品经紫外辐照前后、在  $1.4 K$  温度时的纵向磁电导率与磁场的关系, 其中样品 P8b-1 仅有一个表面受到紫外辐射。图 2 表明紫外辐照对样品 H4A 的影响更大, 这一方面是因为样品 H4A 是两个表面均受到紫外辐射, 但更重要的是由于它的厚度较薄所致。图 3 表明样品 H2 经不同时间紫外辐照后、在  $4 K$  温度时的纵向磁阻。

图 4 表明样品 H4A 经紫外辐照前后的电导率与电场的关系, 实验条件为温度  $1.4 K$ 、

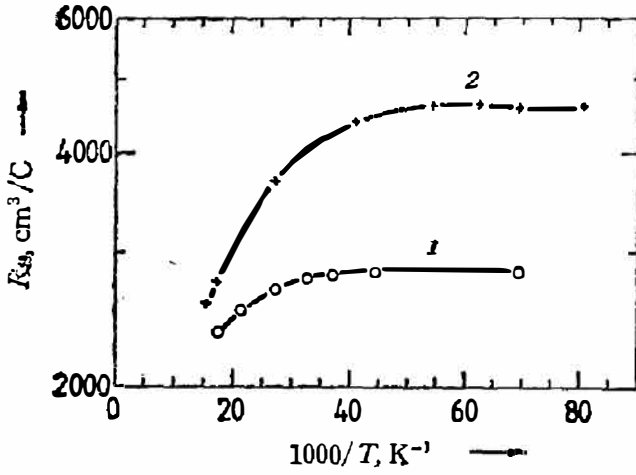


图 1 紫外辐照前(曲线 1)及辐照 30 min 后(曲线 2)样品 H2 的霍尔系数与温度倒数的关系

Fig. 1 Hall coefficient  $R_H$  of sample H2 versus reciprocal temperature before (1) and after (2) UV-illumination.

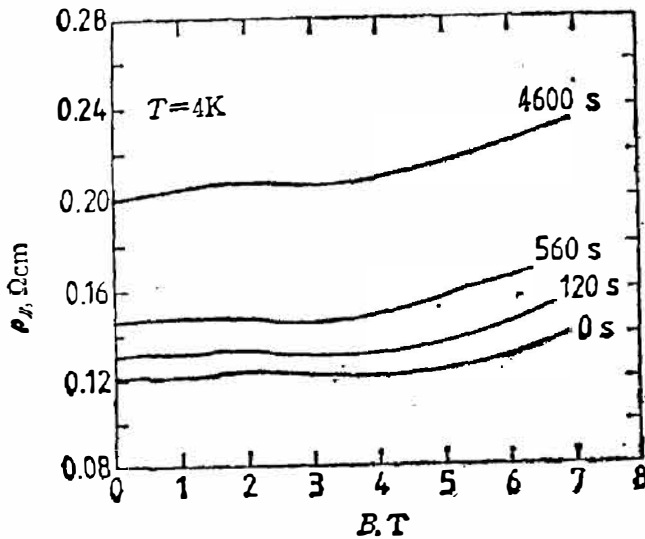


图 3 样品 H2 经不同时间紫外辐照后的纵向磁阻(辐照时间如图中所示)

Fig. 3 Longitudinal magnetoresistivity of sample H2 (UV-irradiation time is parameter).

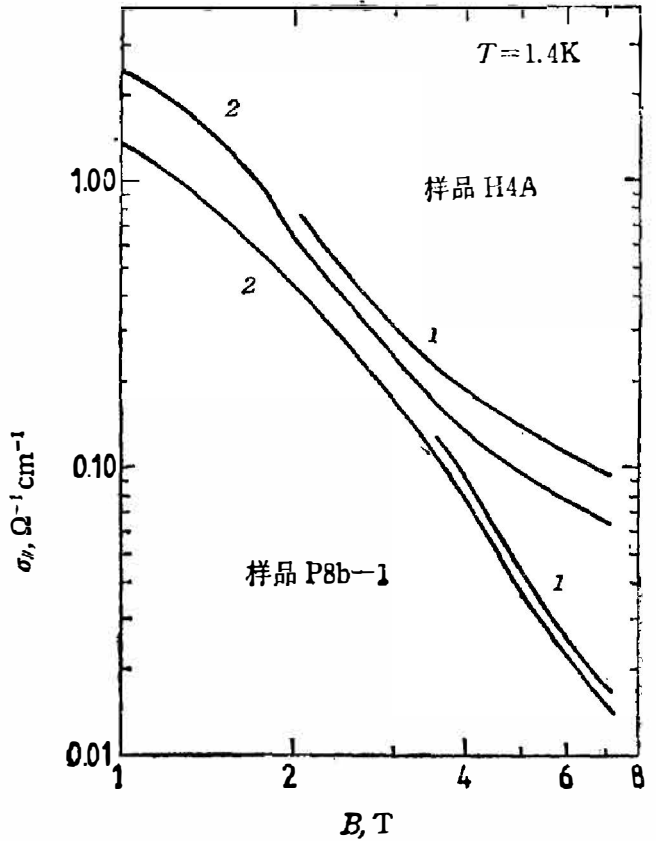


图 2 紫外辐照前(曲线 1)和辐照 30 min 后(曲线 2)样品的纵向磁电导率与磁场的关系

Fig. 2 Longitudinal magnetoconductivity as a function of magnetic field before (1) and after (2) UV-irradiation.

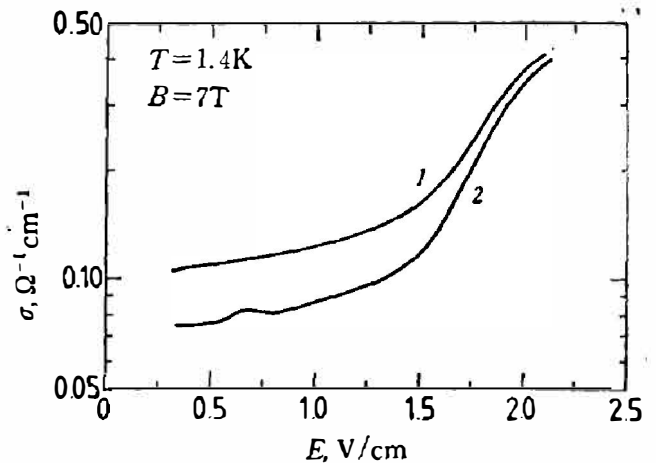


图 4 样品 H4A 在紫外辐照前(曲线 1)和辐照 30 min 后(曲线 2)的电导率与电场的关系

Fig. 4 Conductivity of sample H4A as a function of electric field before (1) and after (2) UV-irradiation.

磁场 7T. 由图可见, 紫外辐射使热载流子效应更明显, 也就是说, 电导率与电场的依赖关系更强了. Stadler 等人<sup>[7]</sup>研究了  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的表面层现象, 他们报道的高磁场 B 条件下的有效电导率可写为

$$\sigma_{\text{eff}} = b_1 \cdot \sigma_0 \cdot \exp\left[\frac{-a(B)}{T}\right] + b_2 \cdot \sigma_s, \quad (1)$$

式中  $\sigma_0 \cdot \exp[-a(B)/T]$  表示体电导率,  $a(B)$  是与磁场有关的激活能,  $T$  是绝对温度,  $\sigma_0$  是外推到  $T \rightarrow \infty$  时的电导率,  $b_1$  和  $b_2$  是取决于样品几何尺寸的系数,  $\sigma_s$  是表面电导率.

在强磁场和低温条件下, 表面电导率在有效电导率中占优势. 紫外辐射使表面发生很大变化, 由图 2 可以看出, 样品经紫外辐照前后的磁电导率的差异随磁场加强而增大, 在最高磁场处出现最大差异.

Nicholas 等人<sup>[8]</sup>报道过紫外辐射对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  样品磁输运特性的影响, 并提出一种机理解释这一现象, 该机理解认为电子被紫外辐射从氧化层价带中激发出来, 随即又被氧化层禁带中的深能级所俘获, 从累积层激发出的电子与氧化价带中留下的空穴重新复合, 这就意味着从  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  累积层到氧化层深能级之间发生了净电子输运. 由于紫外辐射使表面电子减少, 可以预料会出现一个弱的能带弯曲, 即形成一种弱耗尽状态.

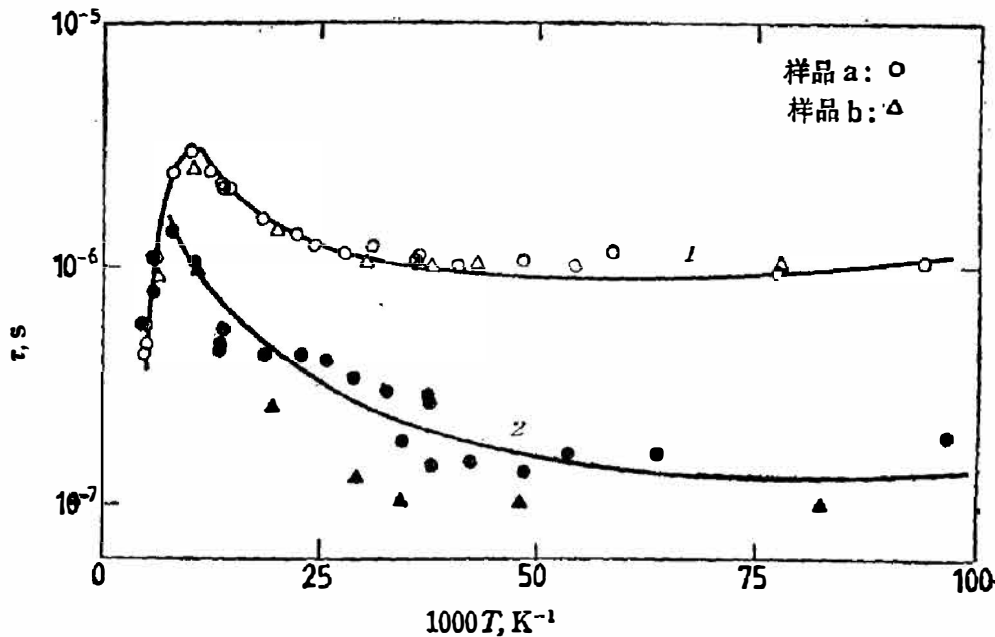


图 5 两种样品未经紫外辐照(曲线 1)和经紫外辐照 30 min 后(曲线 2)测得的载流子寿命  $\tau$  与温度倒数  $1/T$  的关系

Fig. 5 Lifetimes measured at sample LPE 87/6a and b versus reciprocal temperature before (1) and after (2) UV-illumination.

图 5 为实验测得的样品 LPE87/6a 和 b 在紫外辐射前后的载流子寿命与温度倒数的关系. 紫外辐照后的样品的载流子寿命  $\tau$  约减少到辐照前的十分之一, 这样严重的后果可解释为紫外辐射引起能带弯曲变化所致.

Kinch<sup>[9,10]</sup> 和 Shaoham-Diamond 等人<sup>[11]</sup>研究过可变横向电场对 MIS 结构的  $\text{HgCdTe}$  晶体能带弯曲的作用, 样品从累积经过平带、耗尽态, 一直到强反型状态.

在累积状态下, 由外部激发产生的电子-空穴对被分离, 而它们的再复合又受到  $N^+/N$  表面层正好在表面下产生的内建电势的抑制. 在受到紫外辐照时, 内建电势将明显降低, 使样品进入“准”平带甚至弱耗尽态. 根据这一模式, 我们仿效 Kinch 的耗尽条件的模式, 将复合时间常数写为

$$\tau_D = R_D \cdot C_D, \quad (2)$$

式中  $R_D$  为耗尽层电阻,  $C_D$  为耗尽层电容.  $R_D$  与少数载流子暗电流  $J_D$  的关系为

$$R_D \cdot A_D = \left( \frac{kT}{qJ_D} \right), \quad (3)$$

式中

$$J_D = q \cdot n_i \left[ \left( \frac{n_i L_p}{n_0 \tau_p} \right) + \frac{W}{2\tau_0} + \frac{s}{2} \right] + q\eta\Phi_B + J_{tunnel}, \quad (4a)$$

式(4a)可简写成

$$J_D = J_{diff} + J_{depl} + J_{surf} + J_{backg} + J_{tunnel}. \quad (4b)$$

以上各式中  $A_D$  为样品面积,  $q$  为电子电荷,  $n_i$  为本征电子浓度,  $n_0$  为热平衡电子浓度,  $L_p$  为少数载流子扩散长度,  $\tau_p$  为少数载流子体寿命,  $\gamma_p$  为肖克莱-里德(S-R)中心的空穴俘获系数,  $\tau_0 = 1/(\gamma_p N_R)$ ,  $N_R$  为 S-R 中心密度,  $\eta$  为量子效率,  $\Phi_B$  为背景光子通量,  $s$  为最大表面复合速度. 式(4)中等号右边第一项表示在中性体区域中产生并扩散到耗尽层的少数载流子引起的电流( $J_{diff}$ ); 第二项表示在宽度为  $W$  的耗尽区中产生的少数载流子引起的电流( $J_{depl}$ ); 第三项表示用表面复合速度  $s$  表征的表面态引起的产生电流( $J_{surf}$ ); 第四项是入射背景辐射引起的电流( $J_{backg}$ ); 第五项是载流子越过禁带的隧穿作用引起的电流( $J_{tunnel}$ ). 按照 Kinch<sup>[8]</sup> 的报道, 对  $J_D$  贡献最大的是式(4)中的第一项( $J_{diff}$ )和最后一项( $J_{tunnel}$ ).

将实验测得的紫外辐照前的寿命数据以俄歇复合和 S-R 复合机制拟合, 结果与 Pratt 等人<sup>[2,21]</sup>用类似样品的实验结果一致. 在高温下俄歇复合占优势, 而在低温下则是 S-R 复合过程占优势. 我们用 S-R 方程

$$\tau = \frac{\tau_0 N_s / n_0 \{1 + N_c / n_0 \exp[E_{SR} / (k_B T)]\}}{(N_R N_c / n_0^2) \exp[E_{SR} / (k_B T)] + \{1 + N_c / n_0 \exp[E_{SR} / (k_B T)]\}^2} \quad (5)$$

表示寿命, S-R 能级  $E_{SR}$  和最短的电子(空穴)俘获时间常数  $\tau$  为拟合参数,  $N_c$  是导带中的有效态密度,  $n_0$  是由霍尔测量得到的流载子密度, 我们的结果为:  $E_{SR} = -19 \text{ meV}$  (计算中取导带边为参照能级),  $\tau_0 = 1.4 \times 10^{-6} \text{ s}$ , S-R 能级密度  $N_R$  为  $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .

我们的观察表明紫外辐射有可能改变  $\text{HgCdTe}$  的能带弯曲, 使样品表面从累积状态转变为弱耗尽状态. 只要累积层的粒子数减少使内建电压消失, 就会使半导体的表面变成耗尽状态, 这对剩余载流子的复合机制有很强的作用. 实际上, 我们在拟合实验数据时采用了 Kinch<sup>[9]</sup> 报道的耗尽载流子复合时间常数  $\tau_D$ , 得到的暗电流值  $J_D$  与 Kinch 对施加偏压使其成为耗尽状态的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  样品的计算值是一致的.

在高温区 ( $T > 100\text{K}$ ), 由紫外辐射引起的表面累积层的减少不明显, 因此测得的载流子寿命也没有因紫外辐照而发生较大的变化, 当温度降低到  $T < 100\text{K}$  时, 时间常数可写为

$$\tau_D = R_D \cdot C_D = (kT / qJ_D) \cdot C_D, \quad (6)$$

式中耗尽层电容为

$$C_D = (\epsilon_0 \epsilon q n_0 / 2\phi_s)^{1/2}. \quad (7)$$

式中  $\epsilon$  为  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的静介电常数,  $\epsilon_0$  是真空电容率,  $\phi_s$  是表面势. 假定耗尽状态下有

$$\phi_s \approx \phi_F, \quad (8)$$

式中  $\phi_F$  为体内费密电位. 我们可由费密能级  $E_F$  计算  $\phi_F$ . 将图 5 中表示的经紫外辐照的样品的实验数据用式(6)拟合, 拟合中用  $J_D$  为拟合参数, 计算得到的  $J_D$  值为  $2.53 \sim 4.42 \text{ A/m}^2$ , 与 Kinch<sup>[9]</sup> 算得的隧穿电流的数量级相同. 表 2 和表 3 列示了全部拟合参数.

表 2 用于计算的参数值

Table 2 Parameter values used for calculations.

T[K]	$n_0[\text{m}^{-3}]$	$\mu_{FF}[\text{m}^2/\text{Vs}]$	$n_i[\text{m}^{-3}]$	$E_g[\text{eV}]$	$N_c[\text{m}^{-3}]$	$\phi_F = E_F/q[\text{V}]$
158	2E21	7.7E-3	9.05E20	0.152	8.2E15	0.057
100	8.2E20	2.8E-2	4.1E19	0.136	4.12E15	0.054
77	4.6E20	5.7E-2	3.96E18	0.130	2.8E15	0.053
50	3.9E20	5.7E-2	2.5E16	0.122	1.5E15	0.056
20	3.8E20	5.7E-2	3.66E7	0.114	3.7E14	0.056

表 3 拟合参数

Table 3 Fit parameters.

T[K]	$C_a[\text{F/m}^2]$	$J_{diff}[\text{A/m}^2]$	$J_{depl}[\text{A/m}^2]1$	$J_{tunnel}[\text{A/m}^2]$	$J_D^{fit}[\text{A/m}^2]$
158	1.47E-4	15.34	12.5	1.5	9.12
100	1.51E-4	2.5E-2	0.853	2.28	2.53
77	1.53E-4	1.5E-4	0.11	3.02	4.42
50	1.48E-4	8.4E-10	7.5E-4	3.37	4.39
20	1.48E-4	2E-31	1.1E-12	3.42	3.39

温度高于 100K 时, 式(4)中第二项 ( $J_{depl}$ ) 的贡献可与计算得的  $J_D$  值相比拟. 温度低于 100K 时, 隧穿电流的贡献则占了优势, 而计算得到的扩散电流在这一温度范围内迅速下降, 其数量级可比相同温度下的隧穿暗电流小两个量级以上. 能带弯曲引起价带和导带间的隧穿作用, 从而在体内或表面态内可能发生直接的带-带间的或经过 S-R 中心的跃迁.

图 5 中的曲线 1 为拟合函数, 即紫外辐照前载流子复合的俄歇机制和 S-R 机制; 曲线 2 表示紫外辐照后由式(6)得到的耗尽复合时间常数. 由于紫外辐射激发在表面下形成的电子-空穴对通过上述表面隧穿过程之一而重新复合, 其复合速度高于测得的辐照前的体复合速度.

## 4. 结 论

我们目前的工作证实了钝化 N- $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的表面累积层对其输运特性和复合特性都有十分重要的作用. 为了改善表面电子密度, 我们进行了紫外辐照的磁电导实验, 结果表明薄  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  样品的表面层对其有效电导率起着至关重要的作用.

1. 对于很薄的样品, 表面层起决定性作用, 例如霍尔系数就取决于表面层. 当样品厚度达到  $10 \mu\text{m}$ 、温度低于 100K 时, 表面甚至能决定其电阻率.

2. 表面累积层引起的对体区的分路可导致低响应率。

3. 时间分辨光电导测量有助于我们进一步了解累积层对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  复合特性的影响。紫外辐射使得内建电场随着能带弯曲的变化而迅速下降, 而能带弯曲的变化则是由于表面电子密度急速减小而导致的, 这就使样品从累积状态变成为“准”弱耗尽状态, 由隧道作用引起的较快的表面复合则成为载流子复合的主要因素。

综上所述, 表面累积层对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  器件具有两种相反的至关重要的影响: 其一是它能降低样品的有效阻抗, 从而使器件的响应率减小; 其二是它能延长电子寿命而提高了器件的探测率。这样, 使 N- $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  探测器的光敏元厚度小于  $20\mu\text{m}$  或减小  $\text{N}^+$  表面累积层都会引起探测率的迅速降低。我们通过输运特性和寿命参数实验进一步揭示了  $\text{N}^+$  表面层对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  特性的影响。

致谢——本文作者之一 (G. Mahr von Staszewski) 对他在科隆大学工作期间得到的阿根廷全国科学技术研究委员会的资助深表谢意。本工作得到波恩德国研究联合会资金的资助。本文作者感谢 H. Metternich 为本文绘制的附图。

#### 参 考 文 献

- [1] Nimtz G. Schlicht B., Doruhaus R., *Appl. Phys. Lett.*, **34** (1979), 490.
- [2] Antcliffe G. A., Bate R. T., Reynolds, R. A., *J. Phys. Chem. Solids*, **32** (1971), 499.
- [3] Nicholas R., Nasir F., Singleton J., *J. Cryst. Growth*, **86** (1988), 656.
- [4] Ivanov-Omskii V. I., Berchenko N. N., Elizarov A. I., *Phys. Status Solidi (a)*, **103** (1987), 11.
- [5] Lou L. F., Frye W. H., *J. Appl. Phys.*, **56** (1984), 2253.
- [6] Mullin J. B., Royle A., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **17** (1984), L69.
- [7] Stadler J. P. et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **18** (1985), 2277.
- [8] Schoolar R. B. et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **21** (1982), 1: 164.
- [9] Kinch M. A., *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 18, R. K. Willardson and A. C. Beer, Eds., Academic Press, 1981.
- [10] Kinch M. A., *J. Vac. Sci. Technol.*, **21** (1982), 1: 315.
- [11] Shacham-Diamand Y. J., Kidron I., *Infrared Physics*, **21** (1981), 105.
- [12] Pratt B. G. et al., *J. Appl. Phys.*, **60** (1986), 2377.

## THE INFLUENCE OF SURFACE ACCUMULATION LAYER ON TRANSPORT AND RECOMBINATION PROPERTIES IN N-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te

G. MAHR VON STASZEWSKI\*, O. LEX, G. NIMTZ, J. X. FANG\*\*,  
J. SCHILZ, R. WOLLRAB\*\*\*

(II. Physikalisches Institut der Universität zu Köln, Zùlpicher Strasse 77, 5000 Köln 41, F. R. Germany)

### ABSTRACT

Magnetotransport and recombination have been measured under UV-irradiation in order to find out the role of the N<sup>+</sup>-surface accumulation layer in passivate N-Hg<sub>0.75</sub>Cd<sub>0.25</sub>Te. The reduction of the N<sup>+</sup>-surface layer upon UV-irradiation induced an increase in the sample resistance. This is related to trapping of electron in the passivation oxide film. In addition, a tenfold decrease of carrier lifetime is observed after UV-irradiation. This faster electron-hole recombination rate is explained by assuming that the N<sup>+</sup>/N built-in potential (due to the N<sup>+</sup> surface layer) is reduced by UV-irradiation. The crystal is driven into "quasi" flat-band or weak depletion conditions, with a smaller time constant for electron-hole recombination.

The appearance of this surface layer determines the ultimate design of semiconductor devices of N-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te.

---

\* Present address: DLR (German Aerospace Research Establishment), Institut für Werkstoff-Forschung, Postfach 906058, Linder Höhe, 5000 Köln 90, FRG.

\*\* Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai, 200083, China.

\*\*\* Telefunken electronic, Theresienstr. 2, 7100 Heilbronn, FRG.