

异质结内建电压的研究

杨文库

(长春光学精密机械学院电子工程系, 吉林, 长春)

邓文荣

(中科院长春光学精密机械研究所, 吉林, 长春)

摘要——本文提出了准确测量内建电压的 $W(\text{结宽})-N_{\text{eff}}^{-1/2}$ (有效空间电荷密度) 方法; 并发现偏压强烈地影响内建电压; 照明不改变异质结的内建电压, 而使结宽变窄. 偏压为零时, 测得 CdS/CuInSe₂ 异质结的内建电压为: 1.14 V (样品 CIS76.1-2), 0.437 V (样品 CIS 76.1-3), 0.293 V (样品 CIS76.1-4).

关键词——内建电压, 异质结电容, 异质结机制.

1. 引 言

我们在不同的照度和不同的偏压下研究了 CdS/CuInSe₂ 异质结的内建电压. 利用测量异质结电容 C 的方法, 测得了在不同的照度和无照明的情况下的 $C-V$, $1/C^2-V$ 和 $W-V$ 以及 N_{eff} (有效载流子浓度)- V 的关系曲线. 利用这些关系曲线, 即可计算在不同偏压下的 $W-1/N_{\text{eff}}^{1/2}$ 的关系. 再利用本文中的式(17)就可以准确地计算出零偏压下的异质结的内建电压 V_D .

2. 理 论

我们多次测量了在实验中所用的 CdS/CuInSe₂ 异质结光电池样品, 结果证明界面态和界面偶极层对该异质结的电性能影响很小^[1,4], 因此可以忽略. 这样就可以用 Anderson 理论模型^[2,3]来讨论 CdS/CuInSe₂ 突变异质结. 其能带图如图 1 所示. 图中 E_g 为带隙; E_c 为导带底; E_v 为价带顶; E_f 为费密能级; ϕ 为功函数; χ 为电子亲合力; V_D 为内建电压; x_0 为分界面处坐标, 异质结中耗尽层在界面两边形成, 其宽度 $W = |x_2 - x_1|$, ϵ 为介电常数. 由于忽略了界面态的影响, 耗尽层两边的电荷符号相反, 而绝对值相等. 同时由于也忽略了偶极层的

存在,所以任意两点的电位差可由这两点相对真空能级的垂直位移来计算出($V_D = \phi_1 - \phi_2$)
 由于两种材料的介电常数不同,在界面处静电场是不连续的.其中,脚标1和2分别代表
 P—CuInSe₂和N—CdS中的参量.

泊松方程为

$$\frac{d^2\phi(x')}{dx'^2} = \begin{cases} \frac{|e|N_{a1}}{\epsilon_1}, & x_1 \leq x < 0 (P \text{ 区}); \\ -\frac{|e|N_{d2}}{\epsilon_2}, & 0 < x \leq x_2 (N \text{ 区}), \end{cases} \quad (1)$$

式中,|e|为电子电荷;N_{a1}为P—CuInSe₂中的受主浓度;N_{d2}为N—CdS中的施主浓度.当
 无照明时,解方程(1),在零偏压下得到:

$$V'_D = [\epsilon_2 |e| N_{a1} (x_0 - x'_1)^2 + \epsilon_1 |e| N_{d2} (x'_2 - x_0)^2] / 2\epsilon_1 \epsilon_2 \quad (2)$$

$$(x_0 - x'_1) N_{a1} = N_{d2} (x'_2 - x_0); \quad (3)$$

$$W' = (2\epsilon' V'_D / |e| N'_{eff})^{1/2}; \quad (4)$$

$$C' = (|e| \epsilon' \cdot N'_{eff} / 2V'_D)^{1/2}; \quad (5)$$

$$N'_{eff} = \frac{N_{a1} \cdot N_{d2}}{(N_{a1} + N_{d2})}; \quad (6)$$

$$\epsilon' = \epsilon_1 \epsilon_2 / [\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) / (1 + N_{a1} / N_{d2})]; \quad (7)$$

$$W' = \epsilon' / C'; \quad (8)$$

上述方程中各量均代表无照明条件下的数值.我们称 ϵ' 为平均介电常数; V'_D 为内建电压;
 ($x_0 - x'_1$)和($x'_2 - x_0$)分别为P区和N区的结宽; W' 是总的结宽; N'_{eff} 为有效空间电荷密度;
 C' 为异质结电容.

当被照明时,光激发产生的电子-空穴对被结区的强电场所分离,因此可以认为它们的
 分布与坐标无关.由于光生空穴和光生电子的数目是相等的,所以泊松方程为

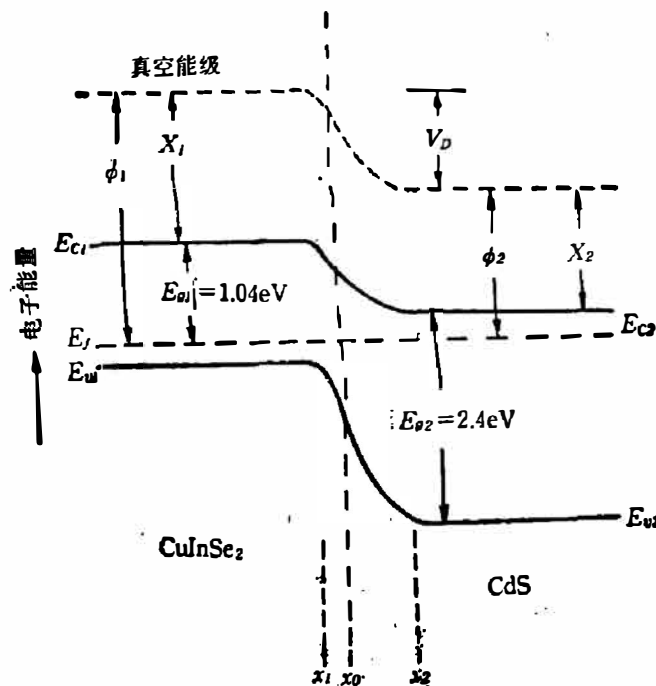


图1 CdS/CuInSe₂ 突变异质结能带图

Fig. 1 CdS/CuInSe₂ abrupt heterojunction energy band.

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \begin{cases} |e|(N_{a1}+n)/\epsilon_1 & (P \text{ 区}); \\ -|e|(N_{d2}+n)/\epsilon_2 & (N \text{ 区}); \end{cases} \quad (9)$$

式中, n 为光生电子或光生空穴的数目. 在零偏压下解方程(9)得到:

$$V_D = [\epsilon_2 |e| (N_{a1}+n) (x_0-x_1)^2 + \epsilon_1 |e| (N_{d2}+n) (x_2-x_0)^2] / 2\epsilon_1\epsilon_2; \quad (10)$$

$$(x_0-x_1)(N_{a1}+n) = (N_{d2}+n)(x_2-x_0); \quad (11)$$

$$W = (2\epsilon V_D / |e| N_{eff})^{1/2}; \quad (12)$$

$$C = (|e| \epsilon \cdot N_{eff} / 2V_D)^{1/2}; \quad (13)$$

$$N_{eff} = (N_{a1}+n)(N_{d2}+n) / [(N_{a1}+n) + (N_{d2}+n)]; \quad (14)$$

$$W = \epsilon / C; \quad (15)$$

$$\epsilon \doteq \epsilon'; \quad (16)$$

上述各量均代表照明条件下的异质结的物理量数值. V_D 为内建电压; W 为总结宽; N_{eff} 为有效空间电荷密度; C 为结电容; ϵ 为平均介电常数.

如果在零偏压下, 用不同的照度来改变有效空间电荷密度 N_{eff} , 并利用测量异质结电容 C 的办法来求得结宽 W , 就可以得到结宽 W 和有效空间电荷密度 N_{eff} 之间的关系. 这样就可以利用式(12)来计算内建电压 V_D ,

$$V_D = (\tan\theta)^2 \cdot |e| / 2\epsilon; \quad (17)$$

式中, $\tan\theta$ 是曲线 $W - 1/N_{eff}^{1/2}$ 的斜率, 由式(17)可知

$$\tan\theta = (2\epsilon V_D / |e|)^{1/2}. \quad (18)$$

在无照明条件下, 由式(4)得到

$$V'_D = (\tan\theta')^2 \cdot |e| / 2\epsilon; \quad (19)$$

式中

$$\tan\theta' = (2\epsilon V'_D / |e|)^{1/2}. \quad (20)$$

将式(18)和式(20)加以比较就可以知道, 如果 $\tan\theta = \tan\theta'$, 则 $V_D = V'_D$. 这意味着, 在无照明条件下的 W' 值和 $1/(N'_{eff})^{1/2}$ 值所确定的点将落在照明条件下的 $W - 1/N_{eff}^{1/2}$ 曲线上. 据此, 可确定照明条件下的内建电压是否等于无照明条件下的内建电压, 即是否 $V_D = V'_D$.

在加偏压($\pm V$)时, 由式(4)和式(19)得到, 无照明条件下

$$V'_D = [(\tan\theta')^2 \cdot |e| / 2\epsilon] \mp V. \quad (21)$$

由式(12)和式(17)得到, 照明条件下

$$V_D = [(\tan\theta)^2 \cdot |e| / 2\epsilon] \mp V. \quad (22)$$

因此, 我们可以用同样的实验方法来确定, 加偏压时, 照明条件下的内建电压是否也等于无照明条件下的内建电压, 由此可以发现偏压对内建电压的影响.

3. 实验的描述及实验结果

我们测量的 CdS/CuInSe₂ 异质结光电池样品是 CIS76.1-2, CIS76.1-3 和 CIS76.1-4. 利用微机控制的 Hewlett-Packard 阻抗测试仪来测量不同照度下的结电容. 整个实验装置如图 2 所示.

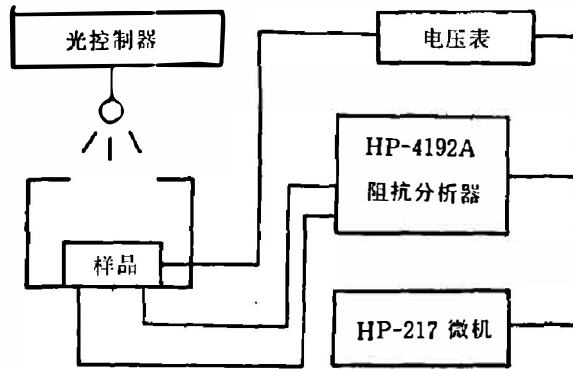


图 2 异质结电容测量装置方框图

Fig. 2 Schematic diagram of apparatus for heterojunction capacitance measurement.

测量电容过程中, 偏压变化范围为 $-2.0 \sim 0.5$ V; 最佳测试频率为 1000 KHz 经测量知道, 频率对电容的影响是很小的, 可以忽略不计.

在室温下(294 K), 我们测量了照度变化范围为 $19 \sim 60$ mW/cm² 的异质结电容.

在零偏压下, 利用不同的照度来改变异质结结区的有效空间电荷密度. 由不同照度下的 $O-V$, $1/O^2-V$, $W-V$ 以及 $N_{eff}-V$ 曲线我们就可以得到 $W-1/N_{eff}^{1/2}$ 曲线. 测量样品为 CIS76.1-2, CIS76.1-3 和 CIS76.1-4 所得到的 $W-1/N_{eff}^{1/2}$ 曲线分别示于图 3(1)、(2)、(3).

由图 3 可见, 对三个样品, 在零偏压时 W 均随 $N_{eff}^{-1/2}$ 呈线性变化, 无照明时 W' 和

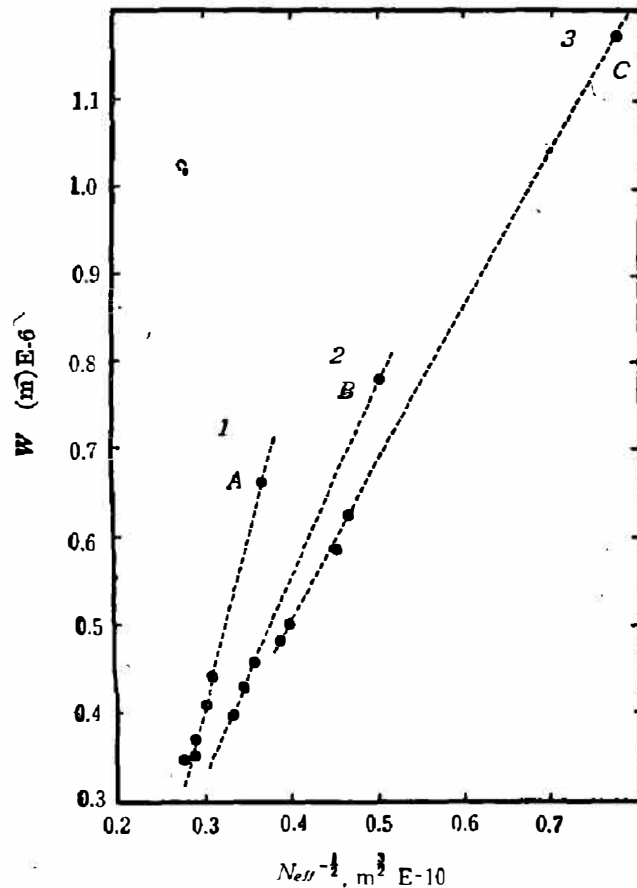


图 3 零偏压下 $W-V_{eff}^{1/2}$ 的关系曲线

Fig. 3 $W-N_{eff}^{-1/2}$ relation at zero bias.

$(N'_{eff})^{-1/2}$ 值所确定的点(见图 3 中的点 A、B 和 C) 落在照明条件下所测得的 $W - N'_{eff}^{-1/2}$ 直线上, 所以 $V_D = V'_D$. 这就证明了照明并不改变内建电压 V_D . 因此, 我们可以用式(17)来计算内建电压 V_D . 当取 $\epsilon = 0.885 \times 10^{-10}$ AS/Vm 时, 计算出样品 CIS76.1-2 的内建电压为 $V_D = 1.14V$; CIS76.1-3 为 $V_D = 0.437V$; CIS76.1-4 为 $V_D = 0.293V$.

4. 讨 论

我们还测得偏压为零时, 照度与结宽的关系(见图 4). 由图 4 可知, 随照度的增加, 结宽变窄, 有效载流子浓度增加. 而内建电压在光照时为常数. 因此, 结宽变窄是与我们的理论结果是一致的[见式(12)].

在不同偏压下及在不同照度下测得了样品 CIS76.1-3 的 $W - N'_{eff}^{-1/2}$ 曲线, 示于图 5. 图中 D_1 、 D_2 和 D_3 各点分别为不同偏压下, 无照明时的 $W' - 1/N'_{eff}^{-1/2}$ 值所确定的点. 偏压为 $0.117V$ 时, 照明条件下, W 值仍随 $N'_{eff}^{-1/2}$ 呈线性变化, 并且 D_3 点仍落在该直线上. 由式(22)仍可算出偏压为 $0.117V$ 时的内建电压 $V_D = 0.192V$. 此值远小于零偏压下该样品的内建电压值($0.437V$). 图 5 中曲线 1 为 $-0.11V$ 偏压, 曲线 2 为 $0V$ 偏压, 曲线 3 为 $0.117V$ 偏压.

从图 5 中还可以看出, 当偏压小于 $-0.1V$ 时, W 已不再随 $N'_{eff}^{-1/2}$ 呈线性变化. 此时就不能利用式(22)来计算内建电压了.

众所周知, 内建电压是异质结固有特性参量, 它是由异质结的能带结构所决定的. 上述

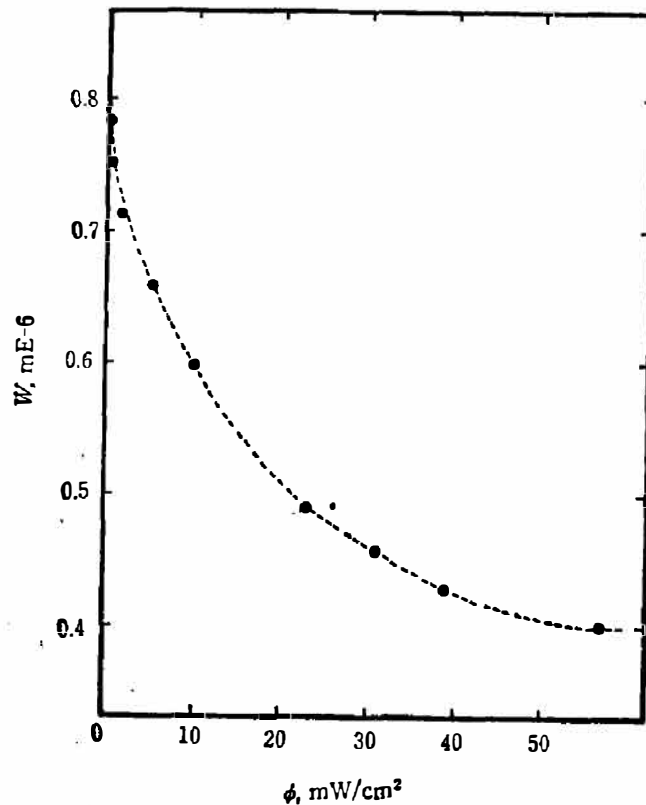
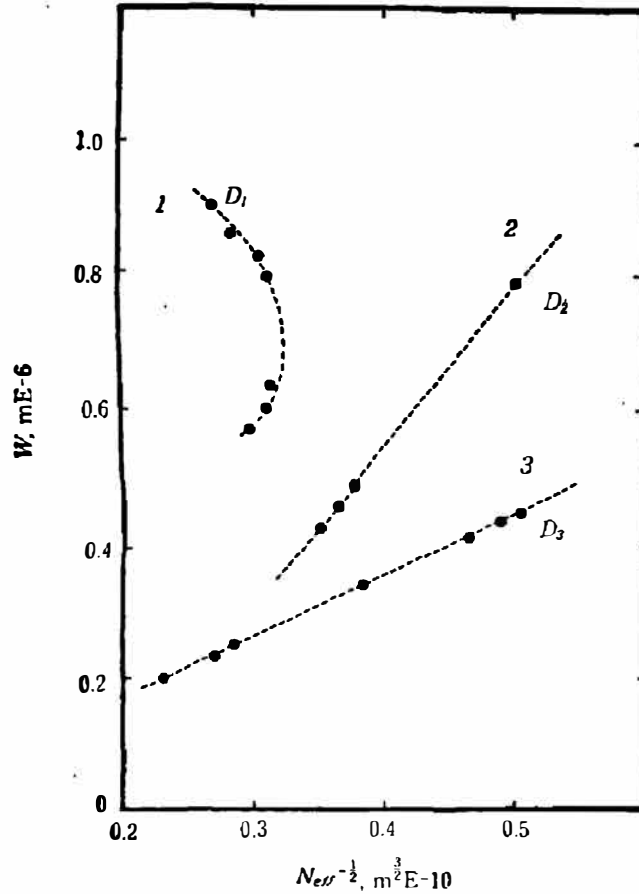


图 4 偏压为零时 $W - \phi$ (照度) 关系

Fig. 4 $W - \phi$ (illumination) relation at zero bias.

图 5 $W-N_{eff}^{-1/2}$ 关系曲线Fig. 5 $W-N_{eff}^{-1/2}$ curve (sample CIS 76.1-3).

加偏压条件下的实验结果表明, 偏压对异质结的内建电压影响很大, 因此可以说对异质结的能带结构影响很大, 特别是在加负偏压的情况下。

5. 结 论

利用本文提出的 $W-N_{eff}^{-1/2}$ 方法可以准确测量和计算零偏压时的异质结内建电压, 我们的研究表明, 光照不改变异质结的内建电压, 而使结宽变窄。并发现偏压对异质结内建电压影响很大。

致谢——感谢 W. H. Bloss 教授, H. Schook 博士, B. Dimler 先生和 R. Menner 先生 (西德, 斯图加特大学物理电子学所) 为我们提供了实验条件和一些样品。

参 考 文 献

- [1] Fahrenbruch A. L. and Bube R. H., *Fundamentals of solar cells*, 1983, p143~147.
- [2] Sharma B. L. and purohit R. K., *Semiconductor heterojunctions*, 1974 p1~4.
- [3] Fahrenbruch A. L. and Bube R. H., *Fundamentals of solar cells*, 1983, p130~138.
- [4] Tavakolian H. and sites J. R., *Capacitance determination of interfacial states in CuInSe₂ solar cells*, 0160-8371/85/0000-1065, IEEE, 1985, p1065~1068.

STUDY OF THE BUILT-IN POTENTIAL OF HETEROJUNCTION

YANG WENKU

*(Department of Electronic Engineering, Changchun College of Optics and
Fine Mechanics, Changchun, Jilin, China)*

DENG WENRONG

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia sinica, Changchun, Jilin, China)

ABSTRACT

In this paper the method of W (junction width) $-N_{eff}^{-1/2}$ (effective space-charge concentration) is offered for exactly measuring the built-in potential V_D . It is found that the bias affects V_D strongly, and the illumination does not change the V_D instead, it narrows the heterojunction width. At zero bias, V_D of $CdS/CuInSe_2$ heterojunction that we have measured is 1.14V for OIS76.1-2 sample, 0.437V for OIS 76.1-3 sample, and 0.293V for OIS76.1-4 sample.