

图 4

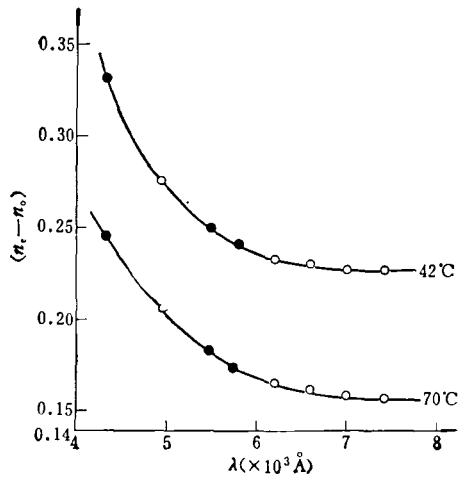


图 5

○ 为实验测出数据;
● 为文献[4]的数据

便将干涉仪分为两个室。G是空气室，L为液晶室。为使液晶取向，在干涉仪平板的反射膜上又镀了SiO₂的沟槽状薄膜。干涉仪架子是用双层铜管制成。通入恒温水对干涉仪控温，控温精度 $\Delta t \approx 0.5^\circ\text{C}$ 。我们测量了不同温度下 EBBA 液晶的 $(n_e - n_o)$ ，波段 4900—7400 Å。图 5 是在两个不同温度下测出的双折射率 $(n_e - n_o)$ 曲线。文献[4]只测了 EBBA 对 4358 Å，5461 Å 与 5780 Å 的 n_e 与 n_o ，由图 5 看出，我们所测的数据与文献[4]的数据符合较好。我们测量的 $(n_e - n_o)$ 误差为 0.003。

我们的液晶样品 EBBA 及沟槽膜都是由清华大学化学系廖松生、张百哲等同志提供的，谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] I. Haller, H. A. Huggius and M. J. Freiser, *Mole. Cryst. and Liquid Crystals*, 16(1972), 53.
- [2] Roger Chang, *Mole. Cryst. and Liquid Crystals*, 30(1975), 155.
- [3] W. Kuezyński and B. Stryła, *Mole. Cryst. and Liquid Crystals*, 31(1975), 267.
- [4] H. S. Subramhanyam and J. Shashidhara Prasad, *Mole. Cryst. and Liquid Crystals*, 37(1976), 23

深 能 级 瞬 态 谱 仪

杜永昌 晏懋洵

(北京大学物理系)

一、引 言

众所周知，如果在半导体中存在着某些杂质或缺陷，相应地在半导体的禁带中就出现一些能级。离开导带底较远或者离开价带顶较远的能级，都称为深能级。深能级的存在对于半导体的电学、光学和热学性质都有深刻的影响。对二极管和晶体管的开关特性与击穿特性，对发光二极管及半导体激光器的量子效率和使用寿命，对发光二极管的发光颜色以及电荷耦合器件的电荷转移效率等方面，深能级杂质和缺陷都有重要的甚至是决定性的影响。因此，从半导体的应用角度研究深能级杂质和缺陷十分重要，这方面的工作已经开展二十多年了，但由于长期缺乏有力的实验手段，故

在这一领域还缺少充分的实验资料和令人信服的理论解释。所以从固体物理学与半导体物理学的理论方面来看，深能级杂质和缺陷也有大量的问题尚待解决。然而近年来已发展了一些用来研究深能级的新方法和新技术，其中结电容技术就是最有效的方法之一。利用处于反向偏置下的 pn 结、肖特基势垒或 MOS 二极管的电容测量，研究其深能级杂质和缺陷的特性，统称为结电容技术。其中包括热激电容法、光电容法和瞬态电容法等^[1-3]。1974年 D. V. Lang 在研究深能级的结电容技术方面取得了重大进展，研制成深能级瞬态谱仪，又称为 DLTS^[4]。深能级瞬态谱仪具有快速、灵敏、测量能级范围较宽、同时可以测量多子陷阱和少子陷阱等优点。它不仅是研究深能级的有效工具，而且也可以用作生产过程的监测，因而几年来发展很快。最近几年

来, 国外利用深能级瞬态谱仪和其它技术对深能级杂质和缺陷进行了大量的实验研究和理论分析。

二、基本原理

深能级瞬态谱的方法实质上就是反向偏置 pn 结的高频瞬态电容热扫描法。下面以单边突变 p⁺n 二极管为例来说明它的基本原理。

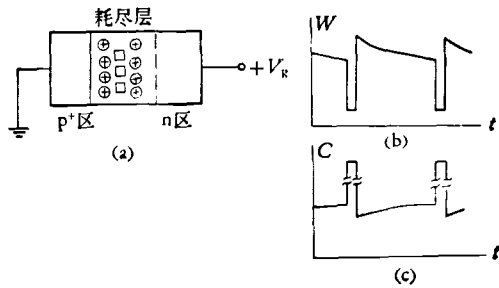


图 1 深能级电容瞬态
⊕ 束缚的正电离施主;
□ 电子陷阱

图 1 示意地说明了产生深能级电容瞬态的物理图象。p⁺n 结加上适当的反向偏置 V_R (图 1(a)), 在轻掺杂边产生了宽度为 W 的耗尽层, 则相应的结电容是

$$C = \frac{\epsilon A}{W}, \quad (1)$$

其中 A 是结面积, ϵ 为介电常数, 类似于平行板电容器, 只不过结电容不是固定不变的, 而是与耗尽层宽度 W 成反比改变。此时周期性地叠加一个正向脉冲到 p⁺n 二极管上去, 则在脉冲期间耗尽层变窄, 有一段变为中性区。如果有深能级存在并且是电子陷阱, 那么它将被电子填充。脉冲过后, 耗尽层又变宽了。但是深能级上俘获的电子不能立即释放, 它们会抵消一部分正的空间电荷。所以回到原来的反向偏置 V_R 时耗尽层比原来的变宽了 (见图 1(b)), 相应地结电容也就变小了 (图 1(c))。深中心上所俘获的电子由于热发射而逐渐释放, 使耗尽层的宽度经过一个弛豫过程逐渐恢复到稳定值, 相应地二极管结电容也将经过一个弛豫过程恢复到稳定值 (见图 1 的 (b) 和 (c))。结电容的这一时间变化就叫电容瞬态, 是一个时间常数为 τ 的指数衰减过程。用 $\Delta C(t)$ 表示在时刻 t 结电容与 $t \rightarrow \infty$ 时的稳定结电容值之差, 则有

$$\Delta C(t) = \Delta C_0 e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

其中 ΔC_0 为脉冲刚刚过后 ($t = 0$ 时刻) 的结电容与稳态结电容之差。

$$\tau^{-1} = c_n = g \sigma_n \langle v_n \rangle N_c e^{-(E_c - E_T)/KT} \quad (3)$$

c_n 为电子热发射率, g 是简并因子, σ_n 为电子俘获截

面, $\langle v_n \rangle$ 是电子平均热运动速度, E_c 与 E_T 分别是导带底和深中心的能级。对 n⁺p 二极管中 p 区的空穴陷阱有类似的关系式。

显然电容瞬态的初始值 ΔC_0 正比于深能级浓度, 并有如下关系式:

$$N_T = \frac{2\Delta C_0}{C_\infty} N_D, \quad (4)$$

其中 N_T 是深能级浓度, N_D 为电离的浅杂质浓度, C_∞ 为稳定 ($t \rightarrow \infty$) 时的结电容值。(4) 式要求 $N_T \ll N_D$ 时才足够精确。

根据 (3) 式和 (4) 式可以看到, 通过对脉冲过后的瞬态电容的测量, 就可以求出深能级浓度, 热发射率、俘获截面和能级等许多重要的物理参数。

利用深能级瞬态谱的方法研究深能级的工作原理如图 2 所示。被测样品二极管置于反向偏置并放在一个温度扫描系统中, 由瞬态电容仪测量它的弛豫电容信号, 而后加到一个称为“发射率窗”的装置中。在一次测量中, “发射率窗”调整到一固定的发射率上, 则这时仅当输入瞬态电容信号的衰减时间常数 τ 为一固定值时才能通过“发射率窗”。样品二极管作温度扫描, 从 77K 逐渐升高。深能级上电子的热发射率 $c_n(T)$ 是温度的函数, 随着温度升高发射率增大。因为电容瞬态的衰减时间常数 $\tau = c_n^{-1}(T)$, 此温度改变到使电子热发射率 $c_n(T)$ 正好等于“率窗”的固定发射率值时, “率窗”输出为极大值。用 X-Y 记录仪 X 轴表示温度 T , Y 轴表示“率窗”输出, 就得出了表示深能级的谱, 叫做深能级瞬态谱 (DLTS 谱)。通常采用双 boxcar 和锁定放大器来执行“率窗”的功能, 也有人用“相关 DLTS”作率窗以获得最佳信噪比。

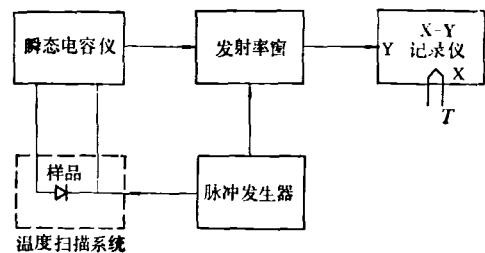


图 2 深能级瞬态谱仪工作原理

在我们的设备中, 瞬态电容仪是自制的, “率窗”装置采用了锁定放大器 and 一台自制简易双 boxcar 两种方法。

三、瞬态电容仪

深能级瞬态谱仪上所用的瞬态电容仪要求有很高的灵敏度和很快的响应时间, 还要求在被测阻抗上能

施加直流偏置和脉冲。我们仿照比例臂型射频电桥的原理，自制了一台瞬态电容仪，其结构如图 3 所示。

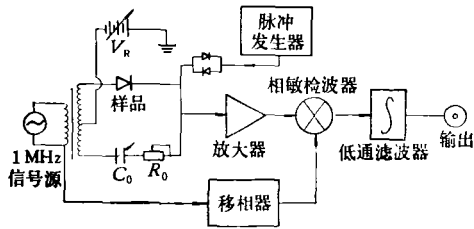


图 3 瞬态电容仪方框图

1MHz 的高频信号源输入一个不大于 60mV 的信号，加到一个紧耦合、中间抽头的变压器的初级。变压器的次级两端输出相位正好差 180°，其中一个桥臂通过同轴线连接样品二极管，另一桥臂接可调电容和可调电阻，以平衡被测阻抗。反向偏置电压加在变压器的中心抽头与地之间。脉冲发生器输出一个负脉冲，通过两支背对背的肖特基二极管把脉冲加在样品二极管的负端，两支肖特基二极管的作用是防止脉冲源的低的输出阻抗将测量信号旁路。放大器用了一个 LC 调谐放大器，放大倍数 200，中心频率 1MHz，带宽为 50kHz。放大器与射频电桥直接耦合。采用 EA4110 型相敏检波器，其工作频率为 1MHz，经改装后其滤波时间常数为 20μs。自装 1MHz 正弦波移相器，其移相范围为 0—170°。调节移相器可用于单独测量未知阻抗中的电容分量或电导分量。本工作中我们调到只测电容分量的位置。当所加脉冲幅度不高于反偏电压 V_R 时，深能级上只有多数载流子填充，电容瞬态 $\Delta C < 0$ ，而当脉冲幅度高于 V_R 时，脉冲期间二极管正向偏置，有正向电流就有少数载流子注入，这时如果存在少子陷阱就可以出现 $\Delta C > 0$ 的少子电容瞬态。因为难于得出正向脉冲注入电流与少子的关系，少子注入的情况更为复杂。在脉冲期间，瞬态电容信号过载，在“率窗”装置中特别要注意去掉这部分过载信号的影响。

四、锁定放大器作为“发射率窗”

“率窗”的作用可以看作一个线性滤波器^[5]，以给定的参考信号与被测信号相关，而噪声则完全是无规的，这就可以实现从噪声中提取信号。此线性滤波器的作用可用如下的积分变换表示：

$$S_0 = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} S_1(t) \omega(t) dt, \quad (5)$$

其中 $S_1(t)$ 为输入信号，它包括与参考信号相关的有用信号和白噪声两部分之和。 S_0 为线性滤波器的输出， $\omega(t)$ 称为权函数， T_m 是参考信号的周期。当我们用锁定放大器作“率窗”时，权函数就是参考方波，前半周期为 1，后半周期为 -1。现在输入信号就是用 (2) 式所

表示的电容瞬态信号。设噪声为白噪声，则对输出没有贡献。由 (5) 式和 (2) 式得到

$$S_0(T_m, \tau) = \Delta C_0 \alpha (1 - e^{-1/2\alpha})^2. \quad (6)$$

(6) 式称为线型函数，其中

$$\alpha = \frac{\tau}{T_m} = \frac{1}{e_n(T) T_m}.$$

在实验中我们选定参考信号的周期为 T_m^c ，也就是固定了“率窗”的发射率 e^c 。样品作温度扫描时，“率窗”的输出在某温度上出现极大值(见图 4)。由 (6) 式求出使 S_0 为极大值时的 $\alpha_{max} = 0.398$ ，也就是

$$e_{max} = \frac{1}{0.398 T_m} = e^c.$$

所以深能级电子热发射率 $e_n(T)$ 随温度升高而增大，当增加到 $e_n(T) = e^c$ 时， S_0 出现极大值，而且率窗输出的峰值 $S_{0max} = 0.20 \Delta C_0$ 。

通过改变“发射率窗” e^c ，则峰值对应不同的温度 T 。作 $\ln e^c$ 对 $1000/T$ 的线得到一条直线，从该直线的斜率就可求出深中心的能级。使用带有信号门装置的锁定放大器(如 9503 SC 型)，就可以消除电容瞬态信号脉冲期间过载时造成的影响。

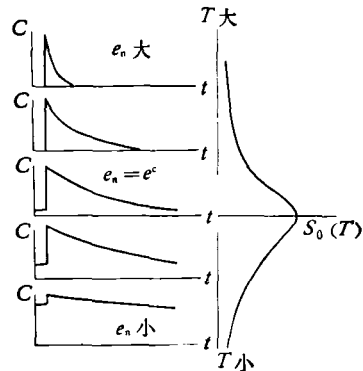


图 4 “率窗”输出随温度的变化

五、双 boxcar 作率窗

另一个解决脉冲期间信号过载影响的办法是用双 boxcar 作“率窗”。自制简易双 boxcar 的方框图如图 5

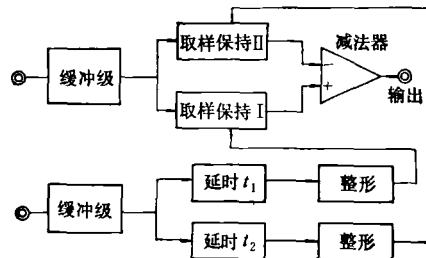


图 5 简易双 boxcar 方框图

所示。偏置脉冲同时作为同步脉冲触发两个延时电路，一个延时 t_1 ，另一个延时 t_2 。经整形后变为一定宽度的取样脉冲送到两个取样保持电路上去。电容瞬态信号经缓冲级送到两个完全一样的取样保持电路上去。取样保持电路 I 在 t_1 时刻取样，取样保持电路 II 在 t_2 时刻取样。它们的输出送到一个减法器上相减，并经平滑滤波后输出。由 (2) 式可以得到双 boxcar 的输出为

$$S(\tau) = \Delta C(t_1) - \Delta C(t_2) \\ = \Delta C_0(e^{-t_1/\tau} - e^{-t_2/\tau}). \quad (7)$$

由 (7) 式可以求出选定的“率窗” e^c 与 t_1 和 t_2 的关系为

$$e^c = \frac{\ln t_2/t_1}{t_2 - t_1}. \quad (8)$$

同时也可以由峰高 S_{max} 求出 ΔC_0 来。同样，通过改变不同的 t_1 与 t_2 ，改变不同的“发射率窗” e^c ，峰值对应不同的温度 T 。作 $\ln e^c$ 对 $1000/T$ 的直线，从直线的斜率求出能级。

因 t_1 与 t_2 可以任意选择，当选取 t_1 足够大时就避免了电容瞬态信号脉冲期间过载的影响。从相关分析

的角度可以认为双 boxcar 的权函数为 t_1 时刻等于 1， t_2 时刻等于 -1 的两个窄脉冲，就输出信噪比而言，不如锁定放大器好，但也可加宽取样脉冲宽度提高信噪比。

六、测试结果

用我们研制的深能级瞬态谱仪测量了许多含有深能级杂质与缺陷的样品。图 6—8 给出了掺金硅的 n^+p 二极管的测量结果。图 6 为锁定放大器作“率窗”的深能级瞬态谱。低温部分的峰值为 $E_v + 0.35$ eV 的施主能级，室温附近的峰值是 $E_c - 0.54$ eV 的受主能级，比施主能级峰高要低得多。图 7 为同一样品的双 boxcar 作“率窗”的测量结果。图 8 中为 $E_c - 0.54$ eV 的受主能级放大了二十倍后与施主能级放在同一张图上，可以看出率窗取得愈大，则峰值对应的温度愈高。而且受主能级因靠近禁带中央，所以在不同温度下峰高不一样。利用这一峰高变化可以同时确定此深能级的电子和空穴的热发射率，测量及结果的分析将另文发表。

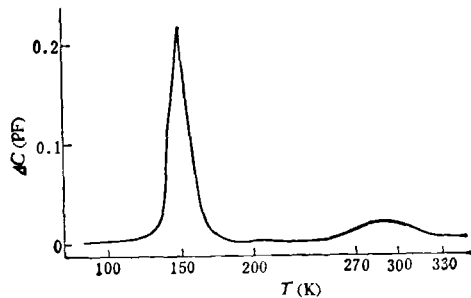


图 6 掺金的硅 n^+p 二极管 DLTS 谱 (锁定放大器作率窗)

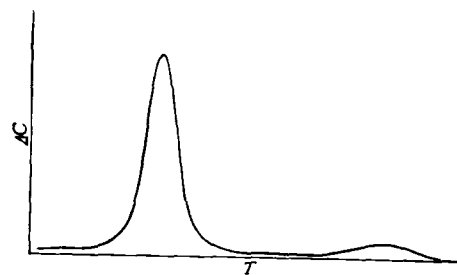


图 7 掺金的硅 n^+p 二极管 DLTS 谱 (双 boxcar 作率窗)

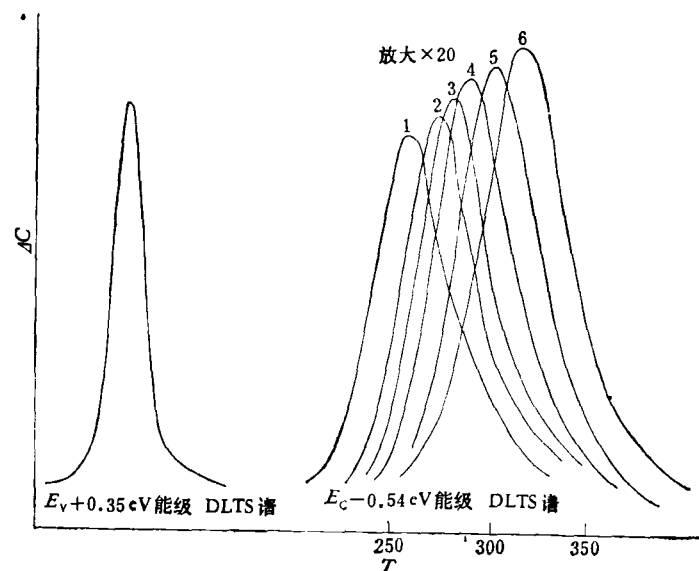


图 8 选取不同率窗的 DLTS 谱

在本设备研制过程中,陈开茅、吴书祥、毛晋昌、刘淑春、金泗轩等同志参加了部分工作,并与秦国刚同志进行了有益的讨论,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] C. T. Sah, et al, *Appl. Phys. Lett.*, **20**(1972), 193.
[2] C. T. Sah, et al., *Solid State Electron*, **13**(1970), 759.

- [3] R. Williams, *J. Appl. Phys.* **37**(1966), 3411.
[4] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, **45**(1974), 3014,3023.
[5] G. L. Miller, *J. Appl. Phys.*, **46**(1975), 2638.
[6] L. C. Kimerling, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-23-6** (1976).
[7] J. Galdberg, *J. Phys. E, Scientific Instruments*, **10**(1977), 1016.
[8] G. L. Miller et al., *Annual Review of Materials Science*, **7**(1977), 377.

RCA 7265 光电倍增管 100ns 门的研制

胡 淑 琴

(中国科学院物理研究所)

在受控聚变和等离子体物理研究中,激光散射是最常用的诊断方法之一。为了采集和处理托卡马克的激光散射信号,在光电倍增管上加门是非常必要的。此外在原子核物理、固体物理和分子物理中,在光电倍增管上加门的实验方法也被广泛采用。本文要介绍的 RCA 7265 光电倍增管 100 ns 门,是为 6 号托卡马克等离子的激光散射信号的数据采集和处理工作而研制的。

一、线路和工作原理

RCA 7265 光电倍增管 100 ns 门的线路如图 1 所示。将一个幅度为 +48V、脉宽为 100 ns 的方波——门脉冲加在 3, 5, 7, 9 四个打拿极上,以控制各电极的电压分布,进而控制管内电场分布。这样,在脉冲持续时间内,电场分布允许电子从阴极到达阳极;在脉冲持续时间外,阻止电子从阴极到达阳极。结果,在脉冲持续时间内,光电倍增管的增益很高,在脉冲持续时间外,增益很低,与不加门脉冲时的增益相等。其增益随时间的变化如图 2,这就是光电倍增管的门。其开门时间 t_1-t_2 为 100 ns。(注意,光电倍增管的门不是加在 3, 5, 7, 9 打拿极上的门脉冲。)

只有与开门时间同步的光输入光电倍增管,才有相应的光电信号输出,否则输出信号很小。

门脉冲发生器线路如图 3 所示。它是一个三管串联雪崩脉冲发生器^[1]。脉冲用 50 Ω 电缆成形,调节成形电缆长度,可得几十 ns 到 300 ns 的非常满意的方波。输出阻抗为小于 50 Ω 纯电阻,输出幅度可达 100V。脉冲瞬时功率可达 200W。实际上我们只需要 50V 左右的门脉冲,所以只用二管串联,并改用 75 Ω 电缆成形,得 60 V, 100 ns 的方波。

二、性能测量的结果

光电倍增管门的性能的主要指标有:(1)开关比(见图 2)。开关比= G_2/G_1 。(见图 2)。(2)增益上升和下降时间。增益从 G_1 上升到 G_2 所需要的时间和增益从 G_2 下降到 G_1 所需要的时间分别为增益的上升和下降时间。(3)电子学噪声。在没有光信号输入只有门脉冲输入时,在光电倍增管输出处测得的电信号就是电子学噪声。在托卡马克等离子体激光散射信号的测量中,电子学噪声是一个很重要的指标。

开关比越高,增益上升和下降时间越快,电子学噪声越低,门的性能越好。但是,不同的应用,对上述指标的要求很不一样。

我们用发光二极管作光源,使用 Tektronix 551 型示波器,对 RCA 7265 光电倍增管 100 ns 门的性能进行了测量。全部测量都在阴极高压为 -2450 V 下进行。加到打拿极 3, 5, 7, 9 上的门脉冲如图 4 所示,其幅度为 50 V 左右。用发光二极管产生的直流光作光源,得光电倍增管的输出光电信号如图 5 所示。此图显示了增益随时间的变化,从它的下降边和上升边可分别测得增益的上升和下降时间为 20 ns。用发光二极管产生的脉冲光作光源,当光信号与开门时间同步时,得光电倍增管的输出如图 6 所示。当没有门脉冲输入时,得光电倍增管的输出如图 7 所示。图 6 和图 7 的幅度比等于开关比,由此得开关比大于 10^4 。电子学噪声小于 4 ns,如图 8 所示。

此外,在测量过程中发现,光电倍增管的 100 ns 门对暗电流有很好的抑制作用,示波器放大为 5 mV/cm 时,看不到暗电流。

以上结果表明,这个 RCA 7265 光电倍增管 100 ns