

一个用于固体电子学实验研究的 计算机实时控制测量系统

白 光 李名复 吴孝慎

(中国科学技术大学研究生院)

1985年2月15日收到

介绍了一个以微机作主控制器,通过 IEEE-488 接口与系统仪器相连结构成的用于固体电子学实验研究的完全自动化的实时控制测量系统。它充分利用智能仪器自带微处理机的优点,使仪器内部微机与系统主控制机并行工作,弥补了主机与测量仪器标准通讯较慢的不足。这样的系统具有高度的先进性和灵活性以及高的功能/价格比。文中通过一个多功能 DLTS 测量实例加以说明。

一、引言

随着计算机和接口技术的发展,计算机不但在科学计算,而且在科学实验的控制和测量方面正在发挥日益重要的作用。在固体电子学领域,用计算机控制实验研究,在国际上是八十年代才开始报道的^[1-7]。在国内尚未见报道。

本文报道我们用微机作为主控制器,通过 IEEE-488 接口和系统仪器连结构成的一个完全自动化的用于固体电子学研究的数据采集和处理系统,并阐述该系统的有关设计思想和应用举例。这个系统有下列优越性:

1. 利用自带微处理器的外部测量设备,充分利用并行工作功能以克服主机与测量仪器标准通讯较慢的缺点,使系统有较强而灵活的功能以及高的功能/价格比。
2. 从实验控制测量到数据处理、作图,进行全过程程序控制,尽可能避免人为干预,因而测量数据具有很高的可靠性和可重复性。对于长时间的重复测量和大量的后继数据分析处理和作图,该系统大大节约了人力。
3. 具有很强的可扩展性。

二、系统的实现

我们设计的系统的框图如图 1。中心控制器是一台 HP-87XM 微型电子计算机。字长 8 位,内存 256K,控制语言为 Extended Basic。为了克服微机与外设数据交换慢的缺点,我们选用 HP3456A 数字电压表作为主要的测量设备,它具有很强的程序功能,自带微处理器可与主机并行运行,有可容纳 350 个读数的内存,采样速率最高为 290 次/秒(4 $\frac{1}{2}$ 位

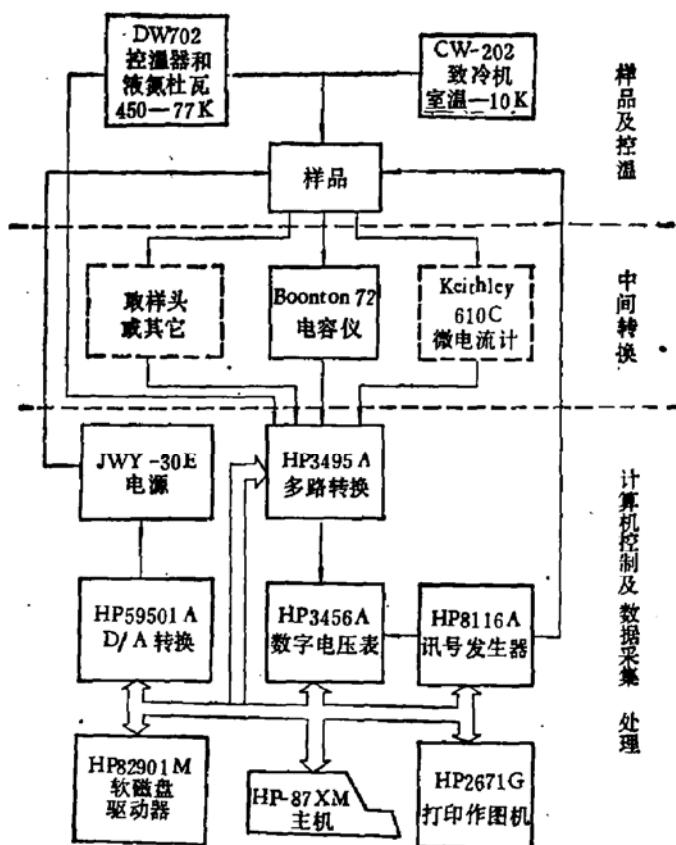


图1 一个用于固体电子学实验研究的计算机控制及数据采集、处理系统。主机与外设通过 IEEE-488 接口连接。

时），分辨率最高达 $0.1\mu V$ ，精度最高为 $6\frac{1}{2}$ 位。它的采样速率、位数、读数方式可由 HP-87XM 通过一个语句来控制。当 HP3456A 收到执行语句后开始与主机平行地独立进行一系列可以是很复杂的数据采集操作。还可以通过表内的硬件进行数据预处理。当动作完毕后，通知主机，将结果一并送回主机。HP3495A 为一低电平多路转换器，轮番采集不同点的数据。HP8116A 是功能极为多样的脉冲函数发生器，用以产生激励讯号，并提供其它仪表的同步触发讯号。它具有 Counted Burst 功能，即一次给出指定个数的周期讯号，配合 HP3456A 形成一个极为灵活的并行控制功能。HP59501A D/A 转换提供一个可编程的偏压源。

在半导体样品和测量仪器之间需要中间转换。我们用 Boonton 72B 电容仪作电容-电压转换，Keithley 610C 微电流仪作电流-电压转换，还可根据需要做其它转换的硬件。对于更快的讯号需配置取样头。

我们对上述系统做了如下发展：

1. 用经过改装的国产 JWY-30E 稳压电源与 HP59501A 接合，以扩大模拟输出的电压和电流能力。
2. 改装了 Boonton 72B 电容电桥以提高它的讯噪比和缩短它的过载恢复时间。
3. 自行配置其它中间转换装置，如较快速的电流-电压中间转换。
4. 发展了一系列应用软件，如实验数据在终端荧光屏或 HP2671G 上作图程序；C-V

测量;瞬态讯号记录分析^[8]; DLTS(深能级瞬态谱)测量等。下节将以 DLTS 测量作为典型的应用举例说明系统的设计思想。

三、DLTS 测量

半导体深能级瞬态谱 DLTS 的测量原理已众所周知^[9], 不再详述。(瞬态测量结合温度扫描的最早想法是文献[10]提出的). 我们所用的测量方案, 一方面充分发挥了计算机控制灵活的优点, 另一方面要解决微机和外设慢速通讯与瞬态讯号相对快速这样一个矛盾。HP-87XM 使用 Basic 语言与 HP 3456A 测量仪器交换一个数据所需时间长于 100ms (包括数据传送和翻译)。而 Boonton 电容仪的瞬态响应时间为 1ms。因此我们采用如下方案进行 DLTS 测量: 当启动 DLTS 测量程序并使样品升温时, 由 JYW-30E 和 HP8116A 使样品偏压变化如图 2(a)。HP 3456A 收到 HP8116A 的同步触发讯号后, 立即对 Boonton 72B 输出的指数衰减的瞬态电容讯号 (图 2(b)), 进行如图 2(c) 所示的 V_1, V_2, V_3, \dots 指定个数的序列测量。此种测量与计算机并行, 测量速度和取样宽度可编程, 最快达 290 次/秒, 测量结果在 HP 3456A 暂存。与此同时, 计算机做前次测量数据的处理, 也可做其它测量。当 HP3456A 序列测量完毕, 通知计算机并一次把全部数据送回计算机。温度由 HP3495A 转换通道后再由 HP3456A 读入。这样在一个温度点上的测量便告结束。随着温度扫描, 把各个

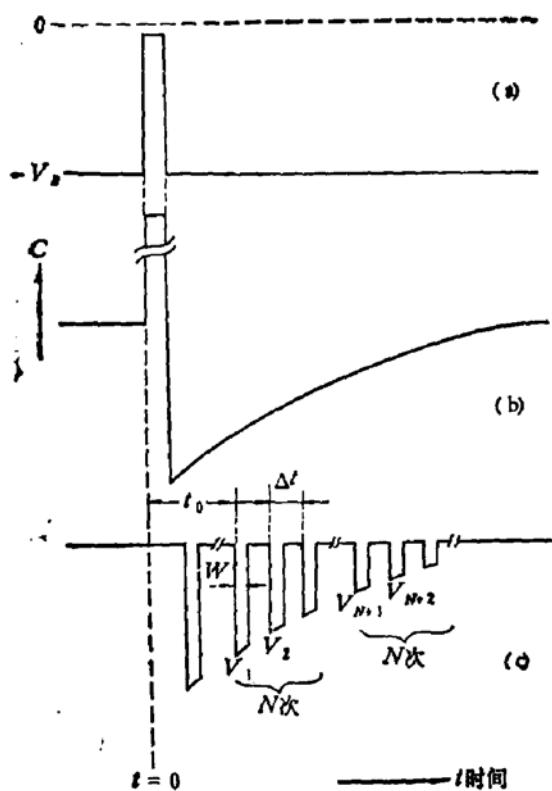


图 2 DLTS 实验中瞬态电容讯号及测量

- (a) 样品偏压
- (b) 样品电容随偏压的变化
- (c) HP3456A 数字电压表的读数方式

温度点上的原始数据都送回 HP-87XM 并存在软磁盘上。

在 HP3456A 测量的同时, HP-87XM 把前个温度 T 下测得的 $V_i(T)$ 进行若干种组合;

$$DV^k(T) = \sum_{i=N+1}^{2N} V_i(T) - \sum_{i=1}^N V_i(T). \quad (1)$$

上标 K 用以表示不同的采样次数 $2N$ 、采样宽度 W 和采样间隔 Δt 以及采样的起始时间间隔 t_0 (见图 2(c)) 的不同组合。

每一种 $DV^k(T)$ 作为 T 的函数都是在某种率窗下的 DLTS 谱。不同的 $DV^k(T)$ 对应不同的率窗。由于一个 $V_i(T)$ 可供若干个率窗使用, 我们就能用尽可能少的原始数据组成较多的率窗。可以看出, 这样一种测量方案具有最好的时间利用率和较好的讯噪

比。不过它的率窗和幅值需要如下专门的讨论。

当在一定温度 T 下 DLTS 讯号指数衰减常数为 $\tau(T)$ 时, 可证由(1)式所定义的 $DV^K(T)$ 对应的归一化幅度因子为:

$$S^K(\tau) = \frac{DV^K(T)}{NV(0)}$$

$$= \frac{\tau}{NW} (1 - e^{-W/\tau}) (1 - e^{-N\Delta t/\tau}) e^{-t_0/\tau} \frac{1 - e^{-N\Delta t/\tau}}{1 - e^{-\Delta t/\tau}}$$

其中 t_0 如图 2(c) 所示, 为瞬态起始时间到第一次测量 V_1 的延迟时间。 $V(0)$ 为瞬态起始时间的瞬态讯号幅度。

表 1 我们选用的七种 DV^K 方式下的率窗值 τ_{max} 及归一化幅度 $S(\tau_{max})$ 。

$W(s)$	$\Delta t(s)$	$t_0(10^{-3}s)$	N	$S(\tau_{max})$	$\tau_{max}(s)$
0.02	2.845×10^{-2}	3	1	0.416	0.0299
		3	2	0.415	0.0447
		31.4	2	0.258	0.0777
0.2	2.096×10^{-1}	3	1	0.409	0.1669
		3	3	0.408	0.4990
		3	1	0.411	1.615
2	2.048	3	2	0.409	3.239

在一定的 DV^K 组合下, $S^K(\tau)$ 对于某个 τ 具有极大值、记作 $S^K(\tau_{max}^K)$ 。用计算机数值解法求出 τ_{max}^K 和相应的 $S^K(\tau_{max}^K)$, τ_{max}^K 就是该组合下的率窗时间常数。实际上由于 HP3456A 具有很强的程序执行功能, 通过程序可以采用不同的 t_0 , Δt , W 和 N 等。表 1 是在我们选用的七种 DV^K 方式下, $S(\tau)$ 作为 τ 的函数由 HP-87XM 数值解出的率窗值 τ_{max}^K 以及相应的 $S^K(\tau_{max}^K)$ 。图 3 是由 HP2671G 作图得到的 $S(\tau)-\tau$ 曲线。

在进行能级计算时, HP-87XM 用测得的原始数据找出每个 $DV^K(T)$ 峰值所对应的温度 T_{max}^K , 再结合七个已知的 τ_{max}^K 值, 就可以求出能级位置。同时根据 $DV^K(T_{max}^K)$

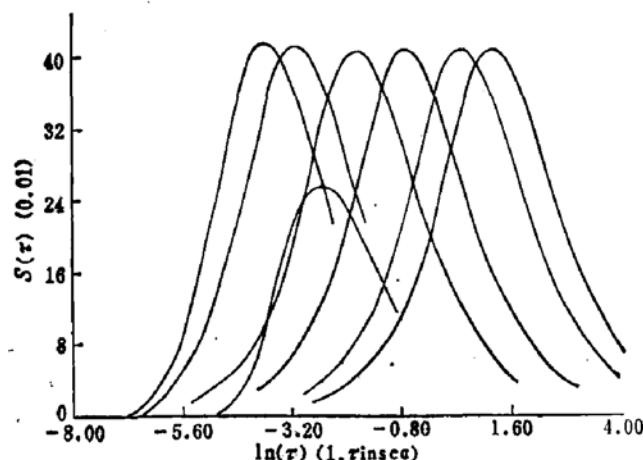


图 3 计算机数值解出的七种给定 DV^K 下的 $S(\tau)-\tau$ 曲线

的幅度以及已知的 $S^k(\tau_{\max}^k)$ 值求出深能级的浓度。图 4 是 Si 掺 AuP⁺N 结二极管经一次温度扫描后得到的七个窗口下 Au 受主能级的 DLTS 曲线。图 5 是上述样品经 HP-87XM 用最小二乘法得到的 Au 受主能级 $\ln c_n - \frac{1}{T}$ 曲线和能级。其中 $c_n = \tau^{-1}$ 为受主能级电子发射率。图中 ΔE 是求得的金受主能级到导带底的距离。 $+ \Delta E$ 曲线是由 $c_n = Ae^{-\Delta E/kT}$ 算出的能级曲线； $* \Delta E$ 曲线是由 $c_n = AT^2 e^{-\Delta E/kT}$ 算出的能级曲线。两个公式算出的结果略有差别。图 6 是掺 P 的 Si 经 240keV P 离子注入在 280°C 下退火 20 分钟样品在有少子注入情况下的 DLTS 曲线。

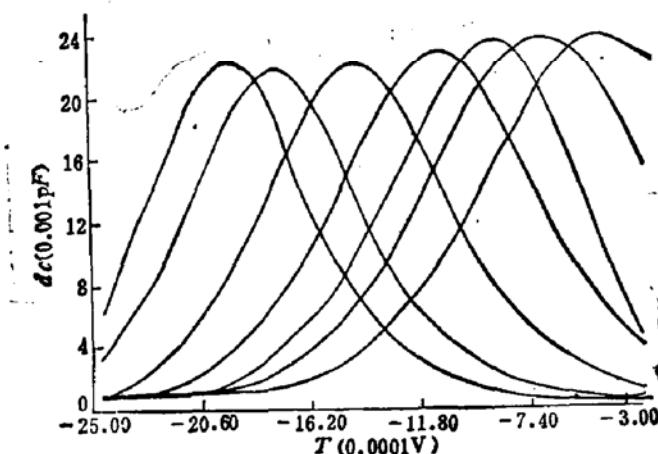


图 4 经一次温度扫描后得到的七个窗口下金受主能级的 DLTS 曲线。
横坐标为铜-康铜热偶电动势。

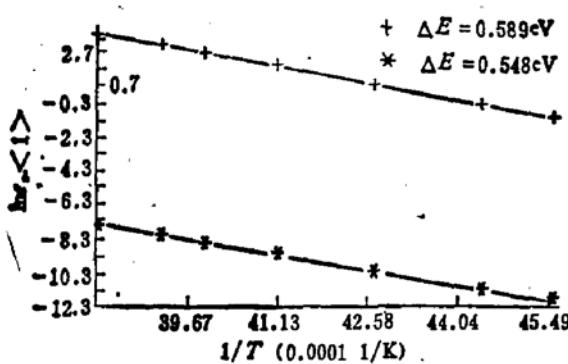


图 5 由计算机用最小二乘法得到的 Au 受主能级和 $\ln c_n - 1/T$ 曲线。其中 $+ \Delta E$ 是由公式 $c_n = Ae^{-\Delta E/kT}$ 得到的， $* \Delta E$ 是由 $c_n = AT^2 e^{-\Delta E/kT}$ 得到的。

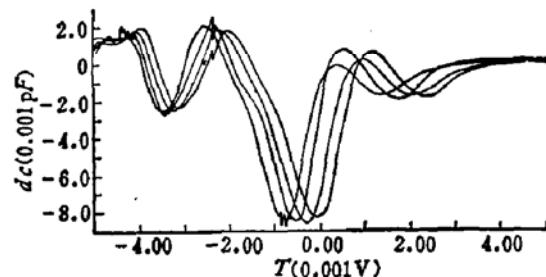


图 6 Si 掺 P 经 240keV P 离子注入，280°C 下退火 20 分钟的样品在有少子注入情况下的 DLTS 曲线。横坐标为铜-康铜热偶电动势。

此 DLTS 系统具有很大的灵活性。比如，只要由 HP-87XM 程序交替调整 HP8116A 输出脉冲的幅度，就可以交替进行正注入和非正注入。这样一次温度扫描所得的数据，经过处理后就可以得到所有多子和少子陷阱的能级、浓度等等。图 7 是 P⁺N 结 Si 掺 Au 样品交替注入一次温度扫描所得到的三个窗口下的 DLTS 曲线。该系统也可以很容易地实现双相关 DLTS^[11]。由于一次温度扫描，降低了由温度扫描不匀带来的误差。显然

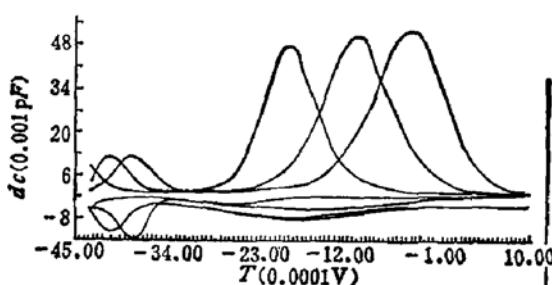


图7 Si掺AuP+N结样品交替注入，一次温度扫描得到的三个窗口下的DLTS曲线。横坐标为铜-康铜热偶电动势

由不同的计算机程序实现不同的DLTS变种，比用不同的硬件实现要省时省钱。此外，对于磁盘记录下的原始DLTS数据和经过预处理的数据，可以利用软件来进行充分的后继数学处理。如用软件实现DLTS提高讯噪比，以及把交迭在一起的能级分开^[3]，采用FFT技术以及矩分析等^[3]。

四、总结

我们在引进国外最新电子技术的基础上，通过实践，研究了一套用于固体电子学实验研究的计算机控制和数据采集系统。它以HP-87XM微处理机作控制中心，通过IEEE-488接口与测量仪器联结。最后通过一个DLTS测量实例加以说明。

作者对陈建新、韩一琴、王健强、李言谨同志在工作中给予的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] B. J. Gordon, *IEEE Trans.*, ED-27, 2268 (1980).
- [2] E. E. Wagner, D. Hill and D. E. Mars, *Rev. Sci. Instrum.*, 51, 1205 (1980).
- [3] P. D. Kirchner, W. J. Schaff, G. N. Marcas, L. F. Fastmen, T. I. Chappell and C. M. Ranson, *J. Appl. Phys.*, 52, 6462 (1981).
- [4] T. R. Jervis, W. M. Teter, T. Cole and D. Dunlavy, *Rev. Sci. Instrum.*, 53, 1160 (1982).
- [5] K. Asada and T. Sugans, *Rev. Sci. Instrum.*, 53, 1001 (1982).
- [6] M. F. Li (李名复) and C. T. Sah, *IEEE Trans.*, ED-29, 306 (1982).
- [7] M. D. Jack, R. C. Park and J. Henrikson, *IEEE Trans.*, ED-27, 2226 (1980).
- [8] 李名复、陈建新、姚玉书、白光，硅中金受主能级的流体静压移动，待发表于物理学报。
- [9] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, 45, 3023 (1974).
- [10] L. D. Yan and C. T. Sah, *Phys. Status Solidi A6*, 561 (1971).
- [11] H. Lefevre and M. Schultz, *Appl. Phys.*, 12, 45, (1977).

A Computer Real Time Controlled System for Experimental Studies in Solid State Electronics

Bai Guang, Li Mingfu and Wu Xiaoshen

(Graduate School, University of Science and Technology of China)

Abstract

A fully automatic computer controlled system for experimental studies in solid state electronics is designed and implemented. A HP87 microcomputer is used as a controller, interfacing to intelligent measuring instruments via IEEE 488 interfaces. The system is actually a highly parallel processing system consisting of multiprocessors included in central controller and intelligent instruments to overcome the low speed disadvantage of the controller. Thus, the system is very powerful and flexible for solid state electronics experiments and with reasonable cost. A high efficient DLTS measurement is described as illustration.