

# 硅雪崩光电二极管的计算机自动测试

陈启琦、陈瑞璋、陈莲勇、王德宁、何梁昌<sup>1)</sup>

(中国科学院上海冶金研究所)

## 摘 要

本文根据硅雪崩光电二极管 (Si-APD) 的测试原理,设计了一套计算机测试系统,包括光源部分、直流偏置扫描电源、二进制权电阻器、XF-01 选频放大器、A/D, D/A 接口转换器和 JS-10 小型计算机。文中对设计的合理性、使用的可靠性及测试误差进行了分析和讨论。实践证明,该测试系统能满足计算机自动测试 Si-APD 直流或低频参数的要求。

## 一、引 言

硅雪崩光电二极管 (Si-APD) 由于具有较高的内增益及较快的响应速度,在国外已广泛地应用于光纤通信和其他方面<sup>[1,2]</sup>。一些参数的测试由于反向偏压-暗电流,反向偏压-光电流,反向偏压-倍增因子等关系呈指数型递增,加之动态范围较大,信号微弱,所以目前国内一般采用手动逐点测试,并通过计算,再绘制成图,使测试工作量十分繁重,而且精度不高。用国产 JS-10 小型计算机来进行上述参数的自动测试、自动绘图、自动计算并制表打印,以提高测试精度。这对 Si-APD 的研制和使用是有意义的。

本文着重介绍实现 Si-APD 自动测试的硬件部分。

## 二、原理与方法

根据通常进行的 Si-APD 直流或低频参数测试<sup>[3,4]</sup>,要求计算机能完成下列各项参数的测试:

- 1) 在无光照情况下,测量反向偏压 ( $V_R$ )-暗电流 ( $I_D$ ) 关系,并绘制成单对数曲线。求出  $I_D = 1\mu A$  时击穿电压 ( $V_{BR}$ ),  $0.8 V_{BR}$  时及  $V_R = 10V$  时的  $I_D$ ,并打印输出。
- 2) 当注入一定光功率时,测量反向偏压 ( $V_R$ )-光电流 ( $I_{ph}$ ) 关系,并绘制成单对数曲线。
- 3) 由第 2) 项结果计算出反向偏压 ( $V_R$ )-倍增因子 ( $M$ ) 关系并绘制成单对数曲线。

$$M = I_{ph}/I_{ph0}. \quad (1)$$

式中  $I_{ph0}$  为 10V 反向偏压产生的光电流。

本文于 1981 年 10 月 5 日收到。

1) 早期参加本工作的还有邵永富和陈自姚同志。

4) 根据第2), 3) 项结果, 计算出  $M = 1$  时的响应度 ( $S$ ) 并打印输出.

$$S = I_{ph0}(\mu A) / P(\mu W). \quad (2)$$

式中  $P$  为注入 APD 的光功率.

5) 由下式计算量子效率  $\eta$  并打印输出.

$$\eta = \frac{I_{ph0}/e}{P/h\nu}. \quad (3)$$

其中  $e$  是电子电荷,  $h$  为普郎克常数,  $\nu$  为注入光频率.

根据上述测试要求设计了测试系统, 如图 1 所示, 编制了相应程序, 如图 2 所示(关于计算机程序将另文详述), 并按所编程序进行测试.

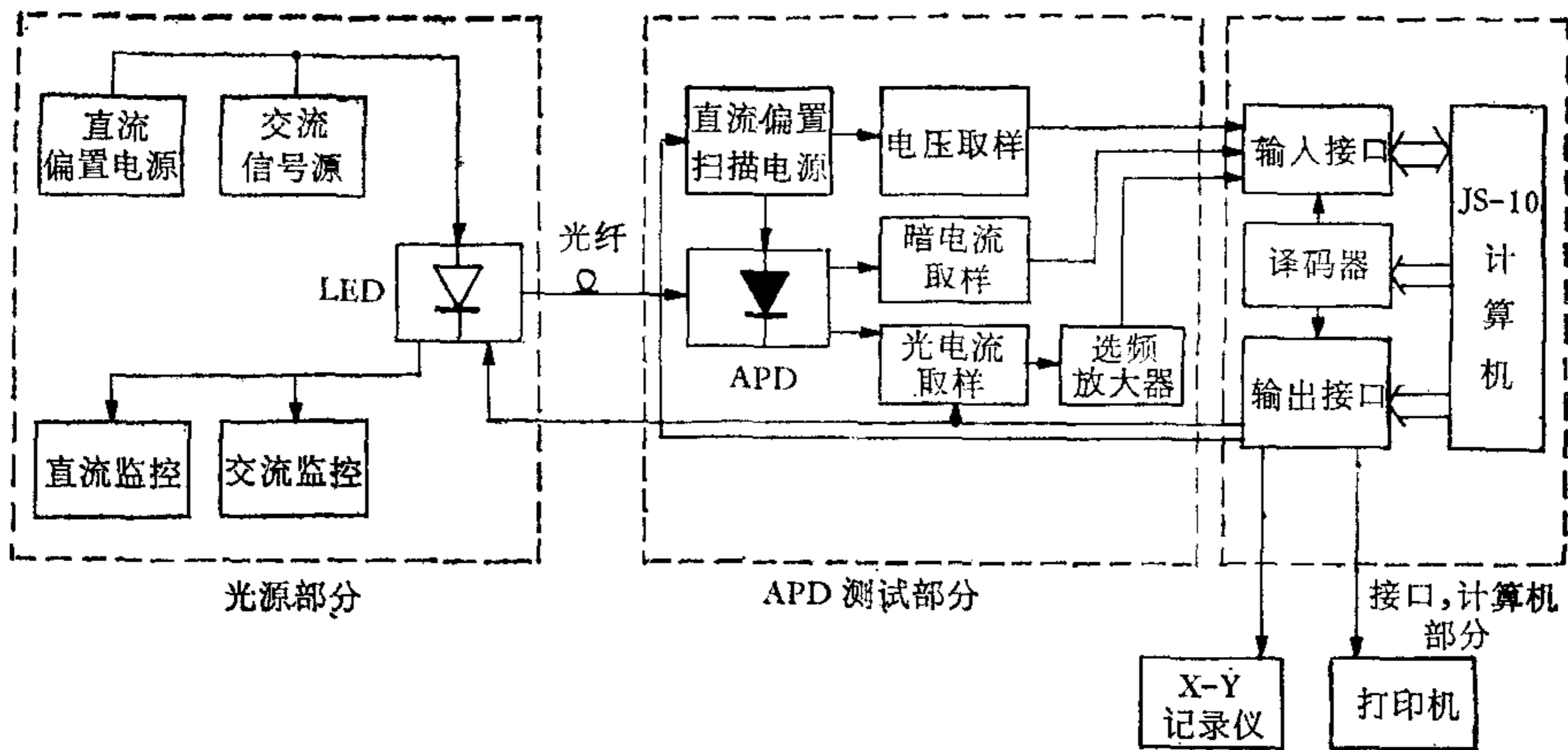


图 1 APD 测试系统总框图

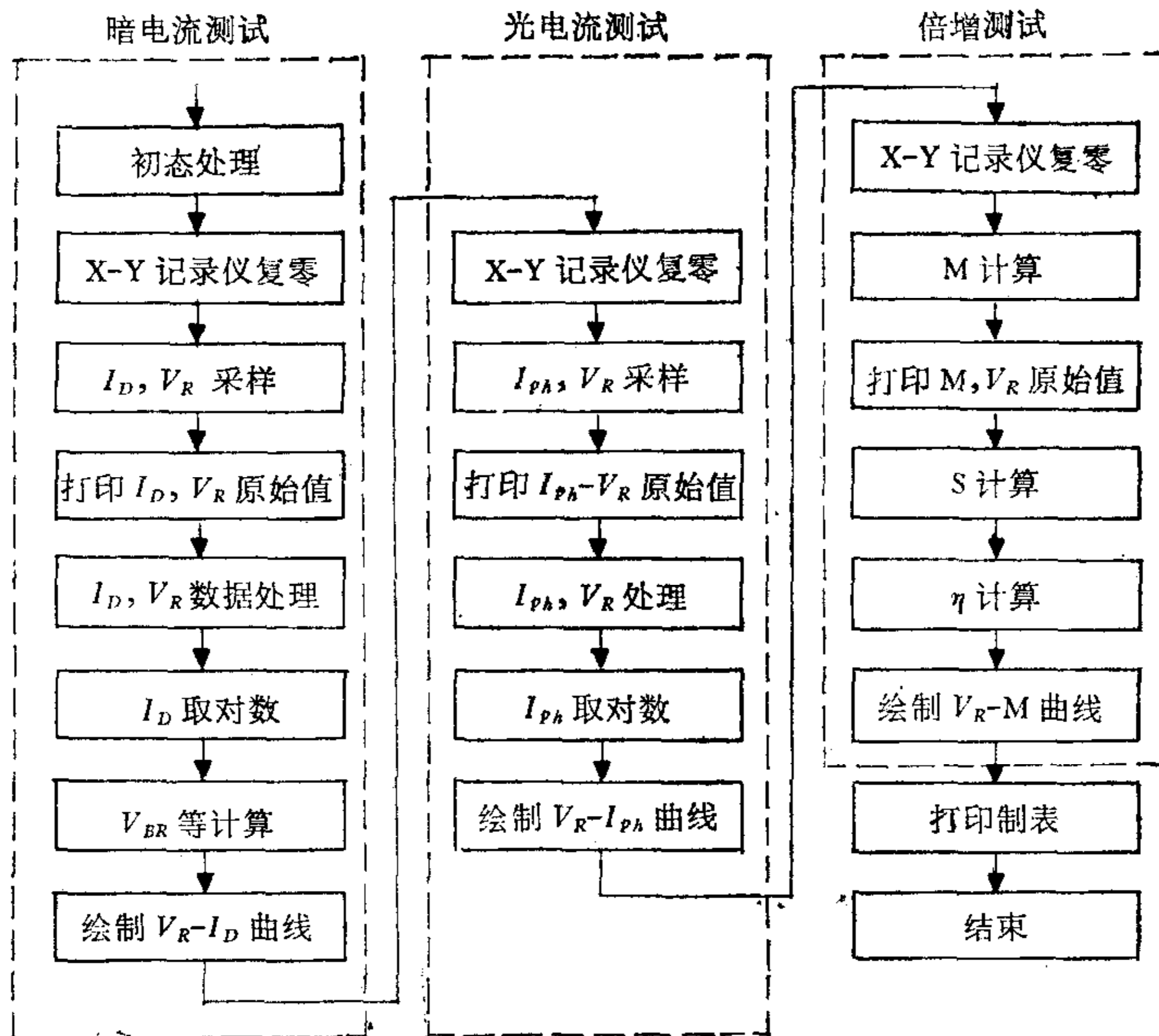


图 2 程序框图

(1)  $V_R-I_D$  测试: 将 APD 装于样品架上, 罩上遮光罩, 由计算机发一指令, 通过输

出接口启动直流扫描电源,随着 APD 上所加反向偏压的增加,暗电流渐渐上升,与此同时计算机每隔 0.5 秒分别取入  $I_D$  和  $V_R$  值,至  $I_D = 1\mu\text{A}$  时计算机命令切断直流扫描电源,并记下该点电压作为反向击穿电压  $V_{BR}$  和光电流测试时的终止电压。将取得的一系列  $I_D$  值取对数,再绘制成  $V_R-I_D$  曲线。同时,由计算机从上述一系列数据中求出  $0.8 V_{BR}$  时的  $I_D$  及  $V_R = 10\text{V}$  时的  $I_D$  并打印输出。至此,暗电流测试完毕。

(2)  $V_R-I_{ph}$  测试:取下 APD 上遮光罩,LED 光源通过光纤将一定功率的光(如  $5 \times 10^{-9}\text{W}$ )注入 APD (同时将这一数值送入计算机以备计算响应度  $s$  及量子效率  $\eta$  等用),由计算机再次启动直流扫描电源,此时光电流随着反向偏压增加而按指数上升。与暗电流测试一样,每隔 0.5 秒计算机分别对  $I_{ph}$ ,  $V_R$  取样一次。但由于注入光功率极为微弱,因而在倍增前所产生的光电流也极为微弱(一般 APD 的响应度为  $0.5\mu\text{A}/\mu\text{W}$ ),因此信号必须放大。但由于光电流的动态范围较大,一般可达 3—4 个数量级,而通常放大器的线性范围较小,因此必须采取措施以适应计算机自动测试的要求。根据计算机采用的二进

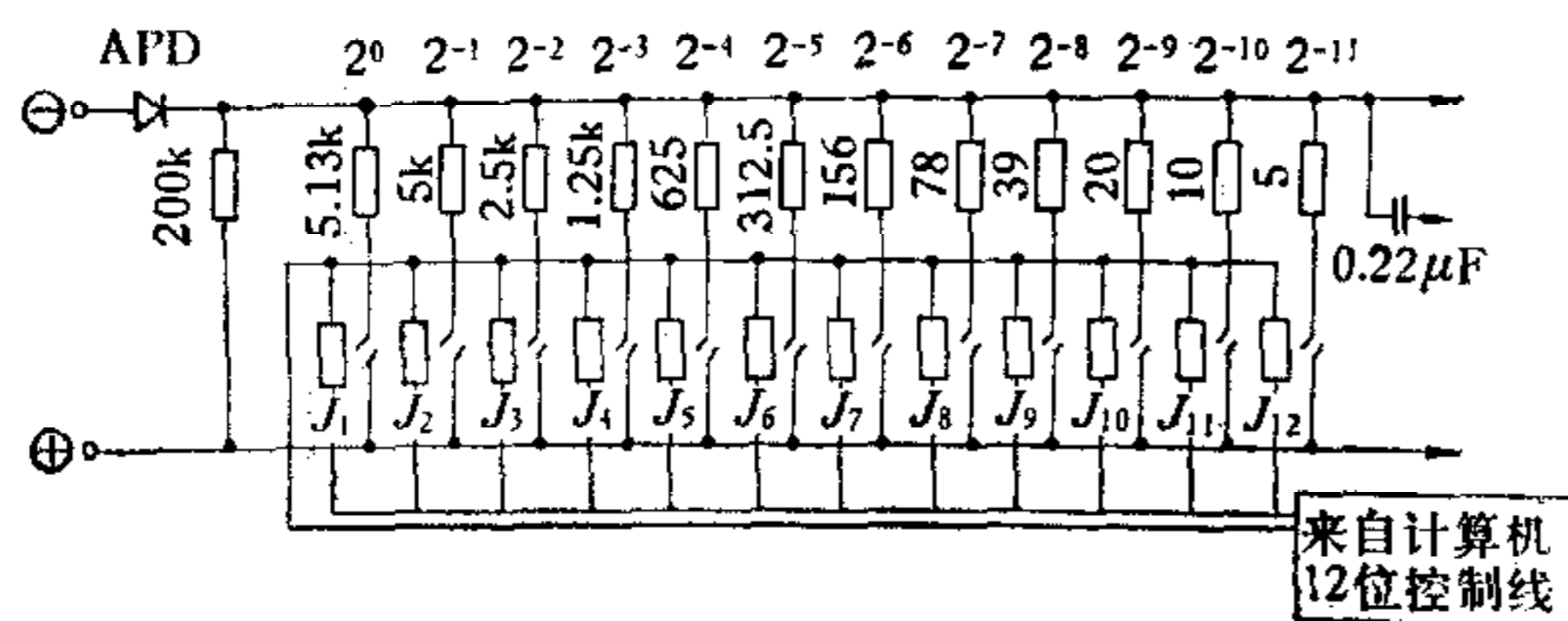


图 3

制设计了一个二进制权电阻器,如图 3 所示。图中  $200\text{k}\Omega$  电阻为暗电流取样电阻,后面为 12 位光电流取样电阻,其第一位为  $5\text{k}\Omega$ ,以后每位依次递减  $1/2$  (均指并联后),除  $200\text{k}\Omega$  电阻外,12 位权电阻均分别接有一干簧继电器,每个干簧继电器均由计算机控制。当测暗电流时,12 位干簧

继电器均开路,这时  $200\text{k}\Omega$  电阻即为暗电流取样电阻。当测光电流时,来自计算机的控制信号首先使  $2^0$  位(接  $5\text{k}\Omega$  电阻的)干簧继电器吸合,待光电流增加至刚大于 XF-01 放大器表值 100 格(满刻度)时,计算机命令  $2^{-1}$  位干簧继电器吸合,使权电阻器输出信号减少一半, XF-01 放大器表上指针回到中间(50 格)。与此同时,计算机自动将取得的数值乘 2,待光电流再次刚超过 XF-01 放大器表值 100 格时,又合上下一个干簧继电器,取样值再乘 2,如此逐步递增,直测至击穿电压(由测量暗电流时取得)为止。由计算机将取得的一系列  $I_{ph}$ ,  $V_R$  值绘制成  $V_R-I_{ph}$  曲线。12 位二进制电阻至少可测 2048 倍,这对一般 APD 测试是足够了。另外在整个光电流测试过程中,始终使 XF-01 放大器处在最佳线性范围内(50—100 格),这既满足了自动测试的要求,又保证了测试精度。

(3) 根据 (1), (2), (3) 式算出  $M$ ,  $S$ ,  $\eta$  等值。

(4) 由计算机绘制  $V_R-M$  曲线并打印上述计算结果。

### 三、测试系统

测试系统如图 1 所示,分三大部分:光源部分、APD 测试部分、计算机及接口部分。

#### 1. 光源部分

所用光源系我所研制的 DH GaAlAs/GaAs 发光管,峰值波长为  $8500\text{\AA}$ ,带有尾纤,尾纤输出光功率用美国 Phoctodyne 公司 22-XL 型光功率计标定,标定功率范围为  $1 \times 10^{-7}$ — $1 \times 10^{-9}\text{W}$ 。注入 APD 的是直流偏置下  $1000\text{Hz}$  交流调制光信号。交流光功率根

据直流偏置点上交流调制度进行计算,并用已知响应度的 PIN 光电二极管来校核,结果是一致的。光源部分线路如图 4 所示, DH LED 的尾纤蕊径  $\phi = 60\mu\text{m}$ ,  $N \cdot A \sim 0.17$ , 尾纤输出端固定在一个五维调整架上,以调节注入到 APD 光敏面最佳位置。

### 2. APD 测试部分

它是由直流扫描源、APD 测试盒和选频放大器组成,如图 5 所示。

1) 直流偏置扫描电源。APD 的直流偏置电压一般约需 200V 左右。若制作的材料纯度较高,则其击穿电压可高达 300—400 V。为达到自动测试取样的目的,直流偏置电压应是自动扫描。由于各种 APD

的击穿电压不一,性能各异,因此电源的最高输出电压应是可变的,扫描的速度也应不同。扫描电源输出电压共分 400, 300, 200, 150, 100V 五挡,扫描时间为 1 分, 2.5 分两挡(指输出至最高电压),扫描电源的原理图如图 6 所示。

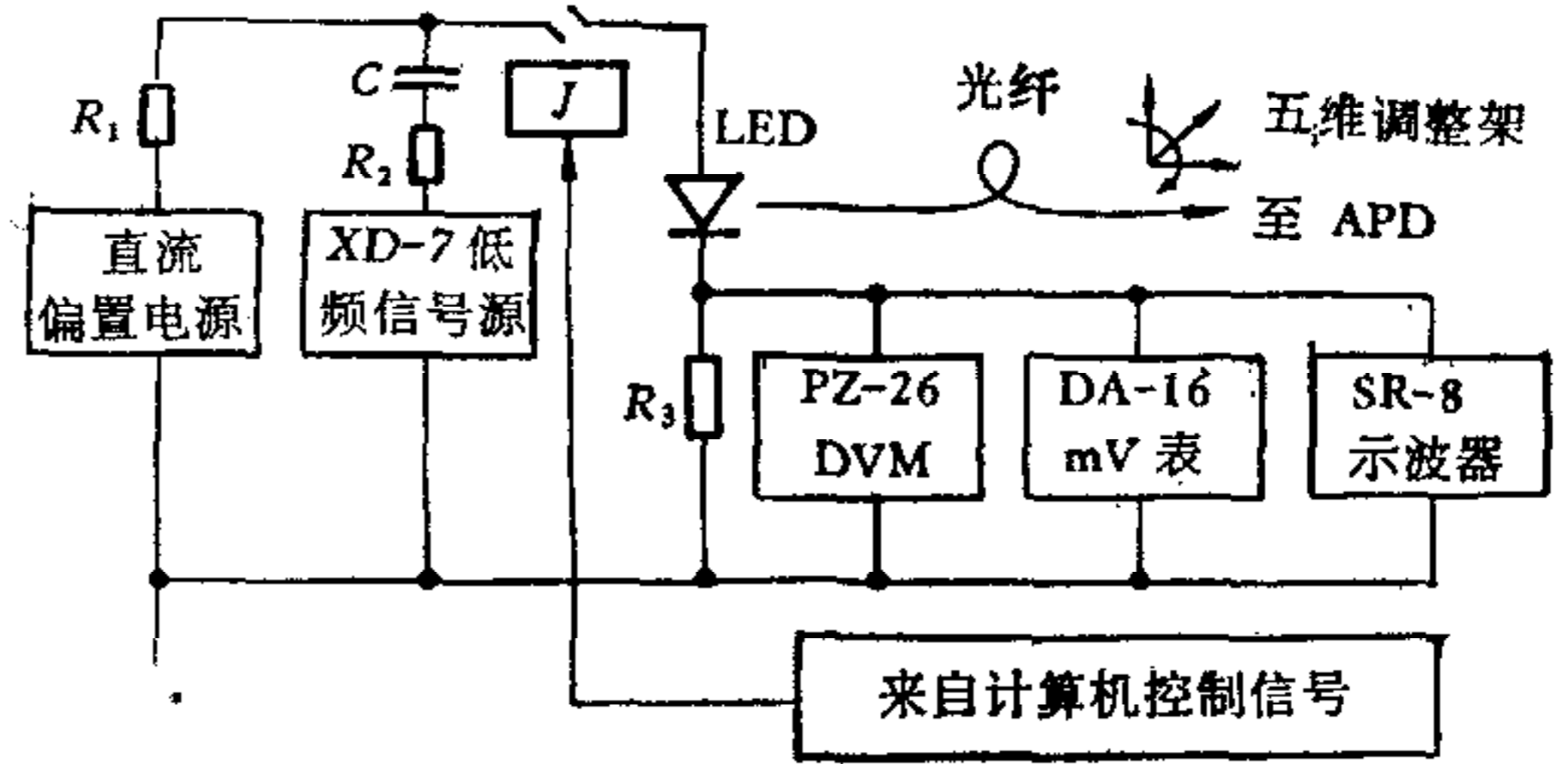


图 4 光源部分线路图

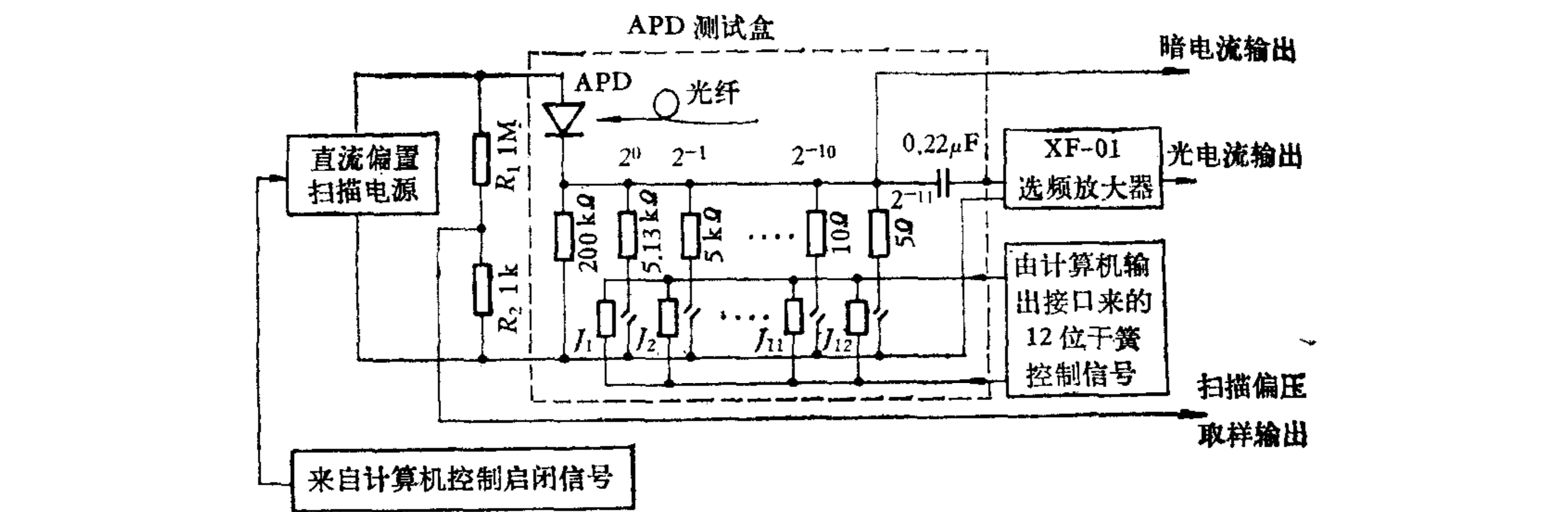


图 5 APD 测试部分图

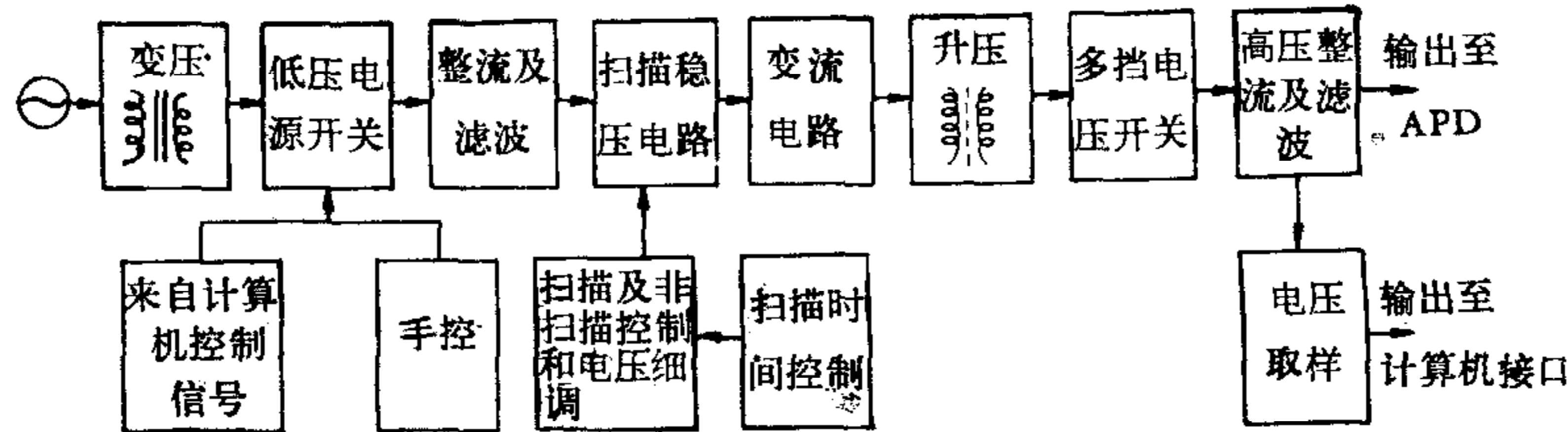


图 6 直流偏置扫描电源原理图

2) APD 测试盒。APD 测试盒内部结构如图 3 所示。它由 13 位线绕精密电阻和 12 位干簧继电器等组成,交流信号从  $0.22\mu\text{F}$  电容端输出。所用电阻、电容和干簧继电器均封装在一个金属屏蔽盒内,偏压源及信号输出端均用 BN 接头及屏蔽电缆连接,以防外界电磁干扰。

由于权电阻的精度直接影响测试精度,因此对 12 位权电阻进行了实测,结果如表 1 所示。由表 1 可见,除最后二位外,其他各位误差均小于 0.25%,已能很好满足测试要求。

最后二位,因误差固定,用计算机加以校正。

另外,由于选频放大器的放大倍率、线性度及稳定度等与光电流、倍增、响应度、量子效率等值的计算直接有关,因此必须对选频放大器进行仔细校核,并将校核结果存入计算机,作计算校正用。

表1 权电阻实测结果

权电阻 开通位数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
设计值 $Q$	200K	5K	2.5K	1.25K	625	312.5	156.25	78.125	39.063	19.531	9.766	4.883	2.442
实测值 $Q$	199.7K	5K	2.496K	1.251K	626	313	156.1	78	39.1	19.5	9.79	5.29	2.69
误差 $\Delta\%$	-0.15	0	-0.16	0.08	0.16	0.16	-0.096	-0.16	0.095	-0.16	0.25	8.33	10.18

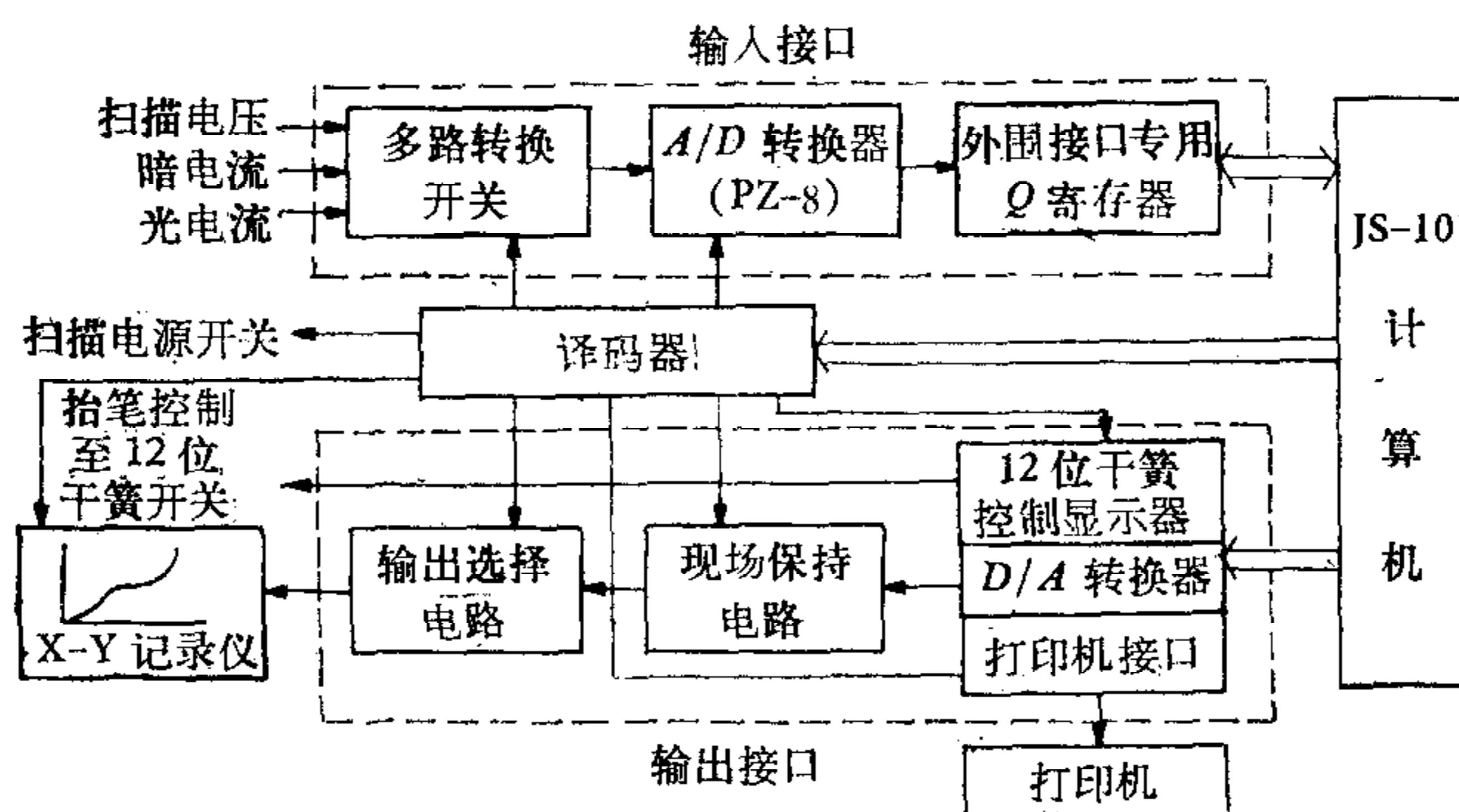


图7 JS-10 计算机及外围接口框图

### 3. 外围接口和计算机部分

本系统所用计算机为JS-10小型计算机,字长16位,定点、串行、单地址,内存4K,速度为每秒8千次,具有4个中断入口和64个外围设备号。

计算机接口为我所自制<sup>[5]</sup>,主要由译码器、输入接口、输出接口和外围专用Q寄存器等组成,如图7所示。

1) 译码器。计算机外部设备寄存器H是个6位并行输出寄存器,经过译码最多可组成 $2^6=64$ 个设备号。测试时,按照JS-10机的H寄存器内容发出输入输出信息,通过译码,接通相应的输入输出通道。

2) 输入接口。输入接口将一次或二次仪表取来的模拟信号转换成二进制数和十-二进制数,并送入主机。它主要包括模拟量输入、模数转换器和外围专用Q寄存器。本系统采用PZ-8五位数字电压表作为A/D转换器,它将模拟量转换成十-二进制数输入主机。Q寄存器为16位,通过主机A总线完成 $A \rightleftharpoons Q$ 交换。它在计算机控制下并行接受PZ-8数字信息,同时串行送入JS-10计算机。Q寄存器也可接受A寄存器数据,以供它用。

3) 输出接口。输出接口的作用是按照计算机计算结果将输出数字量转换成相应的模拟量。本系统采用T型解码网络完成上述功能;控制二进制权电阻器的对应干簧继电器和命令X-Y记录仪按输出信息画图。另有打印接口实现打印制表。

为了消除干扰,整个计算机及外围接口都独立接地,计算机由隔离变压器供电,隔离变压器的静隔也必须妥善接地。这样,测试时来自直流扫描电源的取样电压、暗电流取样电压、光电流取样电压分别送入多路转换开关,按计算机预定程序,不断取样送入 A/D 转换器,经 Q 寄存器送入计算机进行演算,运算结果经 D/A 转换器转换成相应的模拟量,经现场保持器输出至 X-Y 记录仪绘制成图,或将运算结果通过打印接口打印出相应的数据,整个测试亦就完成。

#### 四、结果与讨论

(1) 应用上述系统和方法,按所编制的程序(详见另文),完全可以实现反向偏压-暗电流、反向偏压-光电流、反向偏压-倍增曲线及其他一些参数的自动测试。以荷兰飞利浦拉通型 Si-APD 为例(测试结果见图 8 和表 2),测试重复性很好,说明上述设计和系统能符合测试要求。

(2) 从测试结果可见,二进制电阻器既能满足计算机自动测试要求,又使光电流变化始终在放大器较好的线性区内,所得测试精度高于手测系统。采样时又采用了 PZ-8 五位数字电压表,这比一般 12 位二进制 A/D 转换器的精度大为提高;对暗电流可测至  $1 \times 10^{-10} \text{A}$ 。

(3) 从所绘制的曲线看来,应用我们自制 D/A 转换器,配以合适的程序,可用普通 X-Y 记录仪代替一套价格十分昂贵的数字式 X-Y 记录仪,虽然速度较慢,但对绘制要求不太高的曲线已能满足。

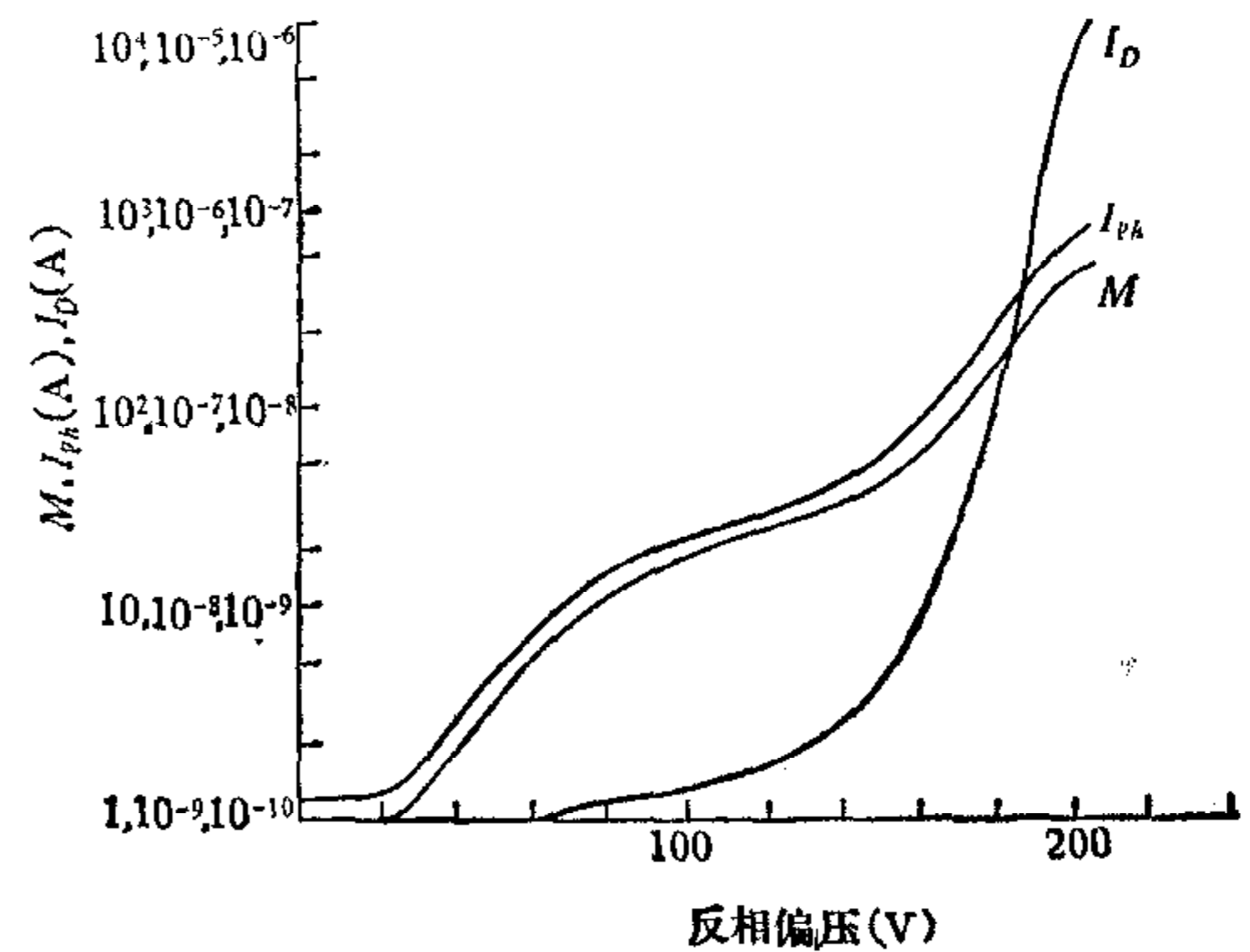


图 8 APD 总测试结果

表 2 APD 总测数据表

测 试 结 果				原附数据
$V_{BR}(V)$	206	$I_D(A)$	$1.0 \times 10^{-6}$	205.9V( $1 \times 10^{-6} \text{A}$ )
$\sim 0.8V_{BR}(V)$	165	$I_D(A)$	$8.9 \times 10^{-10}$	
$V_R(V)$	10.4	$I_D(A)$	$1.0 \times 10^{-10}$	
$S(\mu A/\mu W)$	0.6			$0.6 \mu A/\mu W$
$\eta(\%)$	87.5			

(4) 测试系统误差分析: 1) 反向偏压取样值误差。所加反偏取样值主要取决于取样电阻分压比精度(见图 5)。设定的取样电压比为 1/1000,实测为 1.005/1000,即电压测量误差为 0.5%。而 PZ-8 数字电压表精度为  $\pm 0.03\% \pm 2$  字,优于上述精度,可予忽略。2) 暗电流误差。测试暗电流时用  $200 \text{k}\Omega$  电阻取样(见图 3),由 PZ-8 数字电压表直接读出(使用 0.2V 挡量程)。取样电阻的精度为 0.15%,在小电流测量时,它的精度就直

接决定于 PZ-8 的精度。例如当测量  $0 \cdot X$  nA 电流时,相当于数字电压表的第五位读数, PZ-8 在该位误差为  $\pm 2$  字,因此有  $\pm 0.1$  nA 误差。当测量至  $10^{-7}$ A 以上时, PZ-8 的误差就可忽略,而主要取决于取样电阻的误差。3) 光电流和倍增的误差。光电流与倍增因子的测量误差主要取决于取样电阻和选频放大器的精度,由表 1 可知前十位电阻的精度均  $\leq 0.25\%$ ,后二位经计算机的校正,误差也可  $< 0.25\%$ 。放大器在使用范围内的线性误差  $< 1.3\%$ ,在三小时内放大器的稳定性误差  $< 1\%$ ,取其均方根值,总误差约  $1.7\%$ 。

从上述误差分析来看,整个测试系统的误差可满足 APD 的测试要求。

### 参 考 文 献

- [1] Takao Kaneda, Hideo Matsumoto and Toyoshi Yamaoka, A Model for Reach-Through Avalanche Photodiodes (RAPD's), *J. Appl. Phys.*, 47 (1976), 3135—3139.
- [2] Hiroshi Kambe, Tatsuya Kimura, Yoshihiko Mizushima and Kenji Kajiyama, Silicon Avalanche Photodiodes with Low Multiplication Noise and High-Speed Response, *IEEE Trans. on Electron Devices* ED-23 (1976), 1337—1343.
- [3] Nathauson, H. C. and Jordan, A. G. On Multiplication and Avalanche Breakdown in Exponentially Retrograded Silicon, *IEEE Trans. on Electron Devices* ED-10, (1963), 44—51.
- [4] Heniz W. Ruegg, An Optimized Avalanche Photodiode, *IEEE Trans. on Electron Devices* ED-14 (1967), No. 5, 239—251.
- [5] 上海市电子计算机应用技术资料汇编第一辑,上海科学技术文献出版社(1981年),117.

## AUTOMATIC TESTING FOR SI-APD WITH A COMPUTER

CHEN QIYU CHEN RUIZHANG CHEN LIANYONG WANG DENING HE LIANGCHANG

(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences)

### ABSTRACT

In this paper, based on the principles of the measurement of parameters of silicon avalanche photo diodes, the design of a practical testing system is presented. The system includes light source, d-c scanning bias power supply, the binary-weighted resistors, XF-01 frequencyselective amplifier, A/D and D/A converters, and a minicomputer. Rationality of the design, reliability of the system in operation, and the accuracy of measurement are discussed. It has been proved that the requirements of the automatic measurement of Si-APD d-c parameters with a computer are well satisfied.