

《线性电路实验》实验报告

实验名称: 二极管 指导教师: 王东雷 df4dac@sina.com
姓名: 丁毅 学号: 2023K8009908031 班级/专业: 2308/电子信息 分组序号: 2-06
实验日期: 2025.03.28 实验地点: 教学楼 607 是否调课/补课: 否 成绩: _____

目录

1 实验目的	1
2 实验仪器	1
3 实验内容及实验结果	2
3.1 二极管导通压降	2
3.2 二极管伏安特性曲线	2
3.3 半波整流电路 (不接输出储能电容)	5
3.4 半波整流电路 (连接输出储能电容)	7
3.5 全波整流电路 (选做)	8
3.6 桥式整流电路 (选做)	10
3.7 二极管反向恢复特性 (选做)	12
4 思考题	13
5 异常现象分析	14
附录 A 预习报告	16
附录 B 原始数据记录表	17

1 实验目的

- (1) 理解数字万用表原理, 精度指标, 不同功能的阻抗以及对电路的影响;
- (2) 理解基础测量仪器, 了解示波器、万用表、电源和信号源的使用;
- (3) 理解二极管的种类以及主要参数, 用万用表简单测量二极管;
- (4) 加深理解理论课程, 熟悉二极管整流滤波电路的波形以及参数;
- (5) 简单焊接练习;
- (6) 实测电容滤波电流波形, 理解电容滤波对电网的影响, 初步建立功率因数的概念。

2 实验仪器

- (1) 数字万用表: Unit UT61E (C190241394)
- (2) 数字示波器: RIGOL 200MSO2202A (DS2F192200361)
- (3) 信号发生器: Goodwill AFG-22225 (GER910370)
- (4) 数字直流电源: GWINSTEK GPD-3303S (GES813705)
- (5) 普通硅整流管 1N4007、硅开关管 1N4148、锗二极管 1N60、肖特基二极管 1N5819、稳压二极管 C6V2、温度补偿稳压二极管 2DW234、各颜色发光二极管; 以及电阻、电容、变压器、导线等若干。

3 实验内容及实验结果

3.1 二极管导通压降

一种方法是直接万用表的“二极管”档进行测量。此时，万用表可以看作一个电流比较小的恒流源（约 1 mA），正确连接二极管时，会使二极管导通（产生压降），并显示二极管的压降数值。需要注意的是，多数万用表只能显示 2 V 以内的压降值，如果二极管的压降超过 2 V，则会显示 OL (Over Load) 或其它表示超出量程的符号。

因此，为了能够测量高压降的二极管（例如蓝色 LED 灯），我们使用 DC Power Supply + 1 k Ω 电阻进行测量。电阻用于限流，二极管的压降由万用表电压档测量，电流由 DC Power Supply 直接读出。

实验中测得的数据如下表所示，其中 V_D 指二极管的正向压降， I_D 指正向电流。

表 1: 二极管导通压降实验数据

Diode	V_D (V)	I_D (mA)
LED (Red)	1.9772	11
LED (Blue)	3.074	12
LED (Green)	1.9842	7
LED (Yellow)	1.9794	9
LED (White)	2.776	10
1N5819 (Schottky)	0.2697	17
1N4007 (General)	0.6855	6
2DW234 (Zener)	-6.318	-8
ST60P (Ge)	0.5604	19
BZX55C6V2 (Zener)	-6.246	-15
BZX55C6V2 (Zener)	0.8156	21

注：由于我们使用的是 DC Power Supply + 限流电阻进行测试，不存在类似于万用表“导通压降测量范围在 0 ~ 2 V”的问题。

3.2 二极管伏安特性曲线

利用信号发生器作为激励，经过合适的测量电路，利用示波器的 X-Y 模式绘制二极管的伏安特性曲线。其中，信号源作为激励，变压器提供隔离作用，二极管电流通过 1 Ω 电阻检测。测量电路如下图所示：

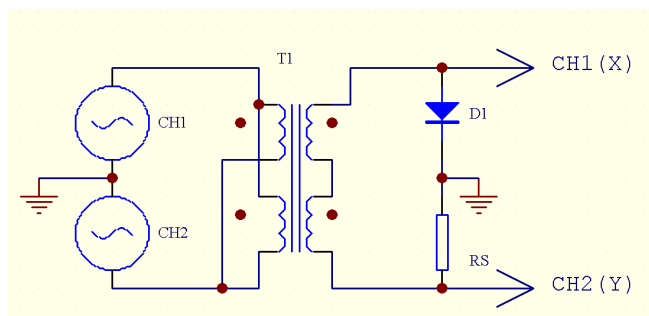
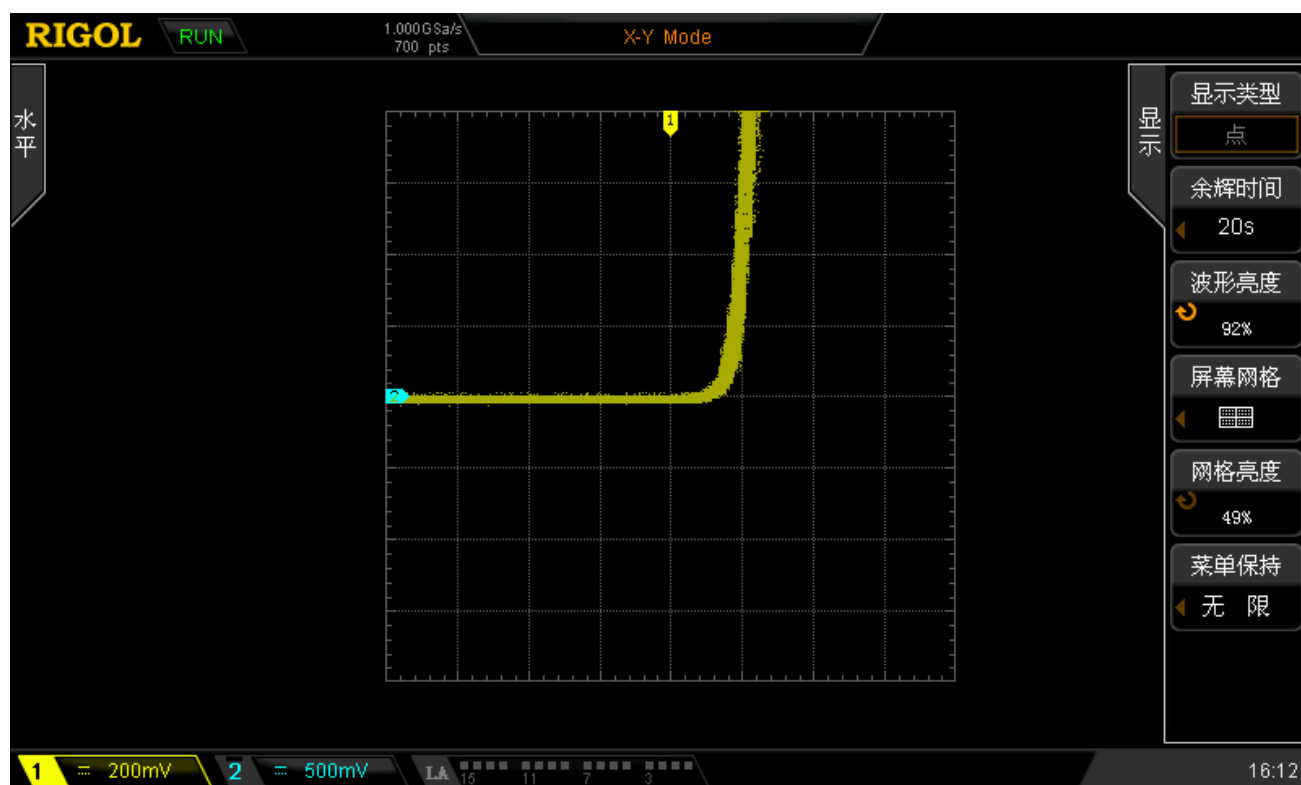
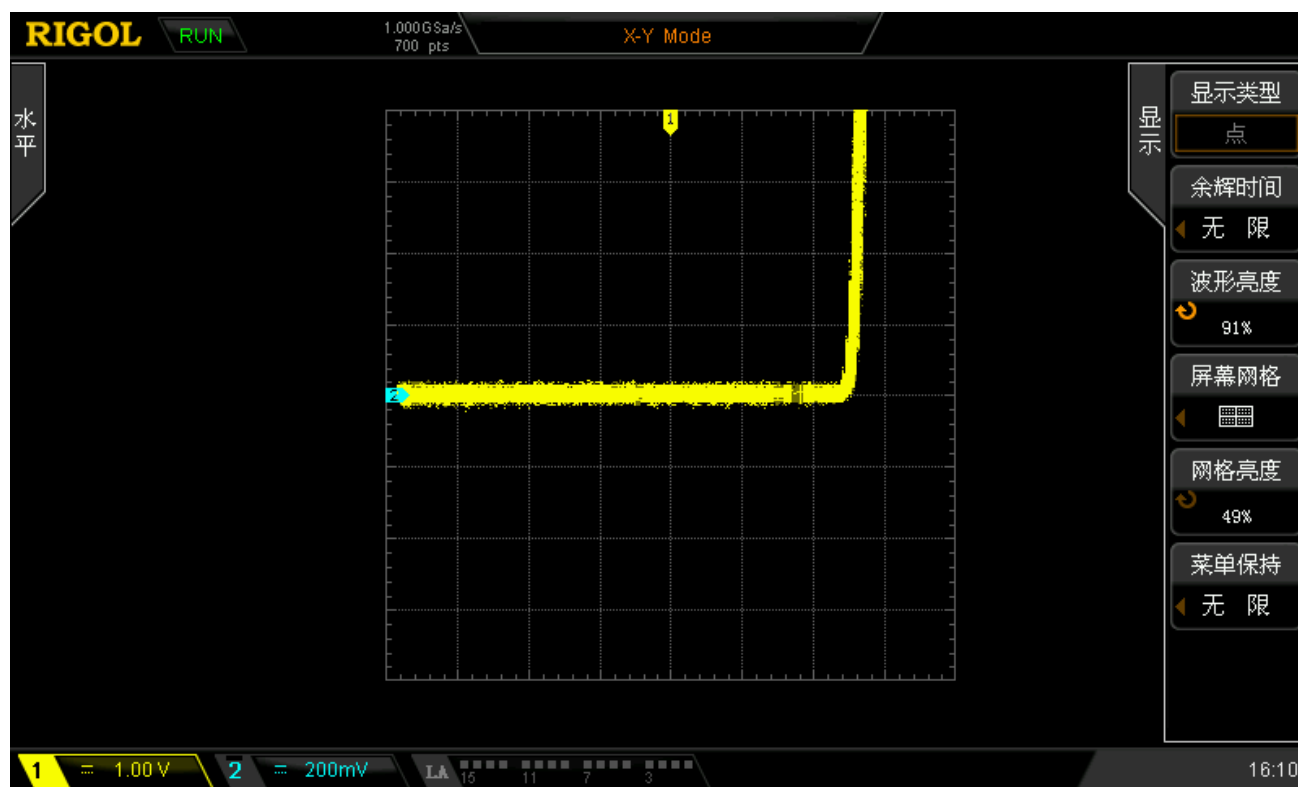
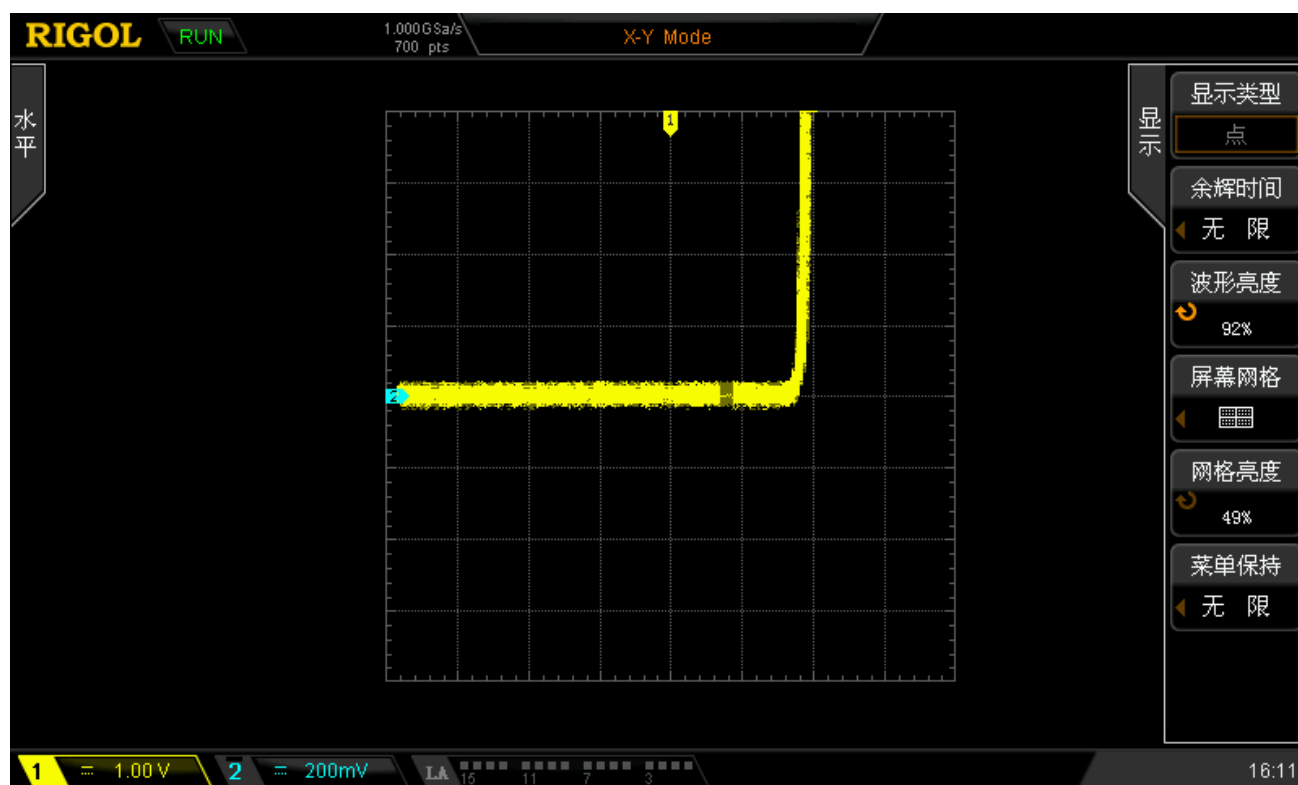


图 1: 二极管伏安特性曲线测量电路

我们分别测量了 1N5819 (Schottky)、LED (Blue) 和 LED (Green) 的特性曲线，所用电流感应电阻 $R_{sense} = 1$ k Ω ，测量结果如下图所示。

图 2: 1N5819 (Schottky) 伏安特性曲线 (Y-T mode), $R_{sense} = 1\text{ k}\Omega$ 图 3: 1N5819 (Schottky) 伏安特性曲线, $R_{sense} = 1\text{ k}\Omega$

图 4: LED (Blue) 伏安特性曲线, $R_{sense} = 1\text{ k}\Omega$ 图 5: LED (Green) 伏安特性曲线, $R_{sense} = 1\text{ k}\Omega$

从图中可以看出, 1N55819 (Schottky), LED (Blue) 和 LED (Green) 的导通压降分别约为 200 mV, 2.8 V, 和 1.9 V。这个数据与前面表 1 数据有一些出入, 是因为我们在伏安特性曲线的测量中, 二极管的正向电流没有超过 2 mA。1N55819 (Schottky) 为 0 ~ 2 mA, LED (Blue) 和 LED (Green) 为 0 ~ 0.8 mA。

3.3 半波整流电路 (不接输出储能电容)

半波整流电路如图 6 所示, 信号源通过变压器隔离后从电路的 1、2 两个输入口输入。

由于二极管的单向导电性, 只有二极管处在正偏压时会产生输出电压, 即输入 1 电位高于输入 2 的半周会有输出电压, 其余时间输出电压为零。并且, 二极管存在正向压降, 因此实际输出电压比输入电压低一个导通压降。

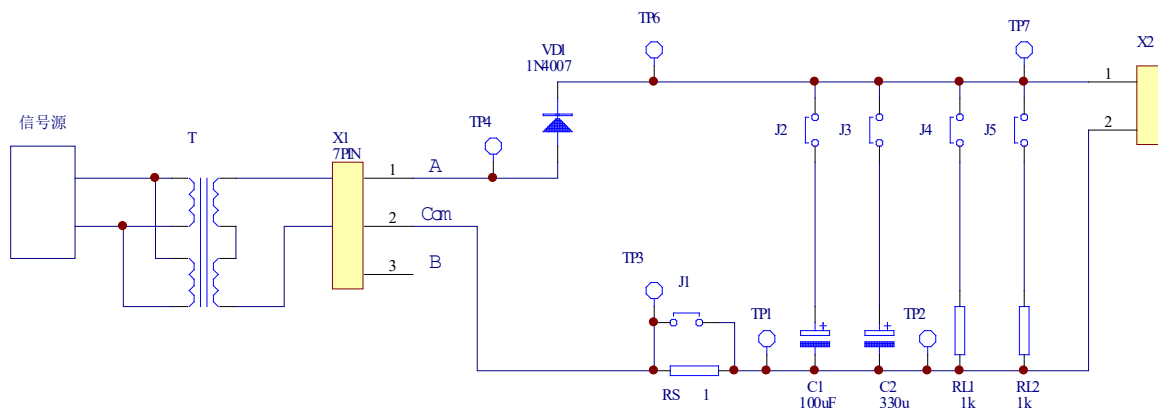


图 6: 半波整流电路

未连接输出储能电容时, 二极管电压和输出电压波形、输出电流波形如下图所示 (负载正常连接):

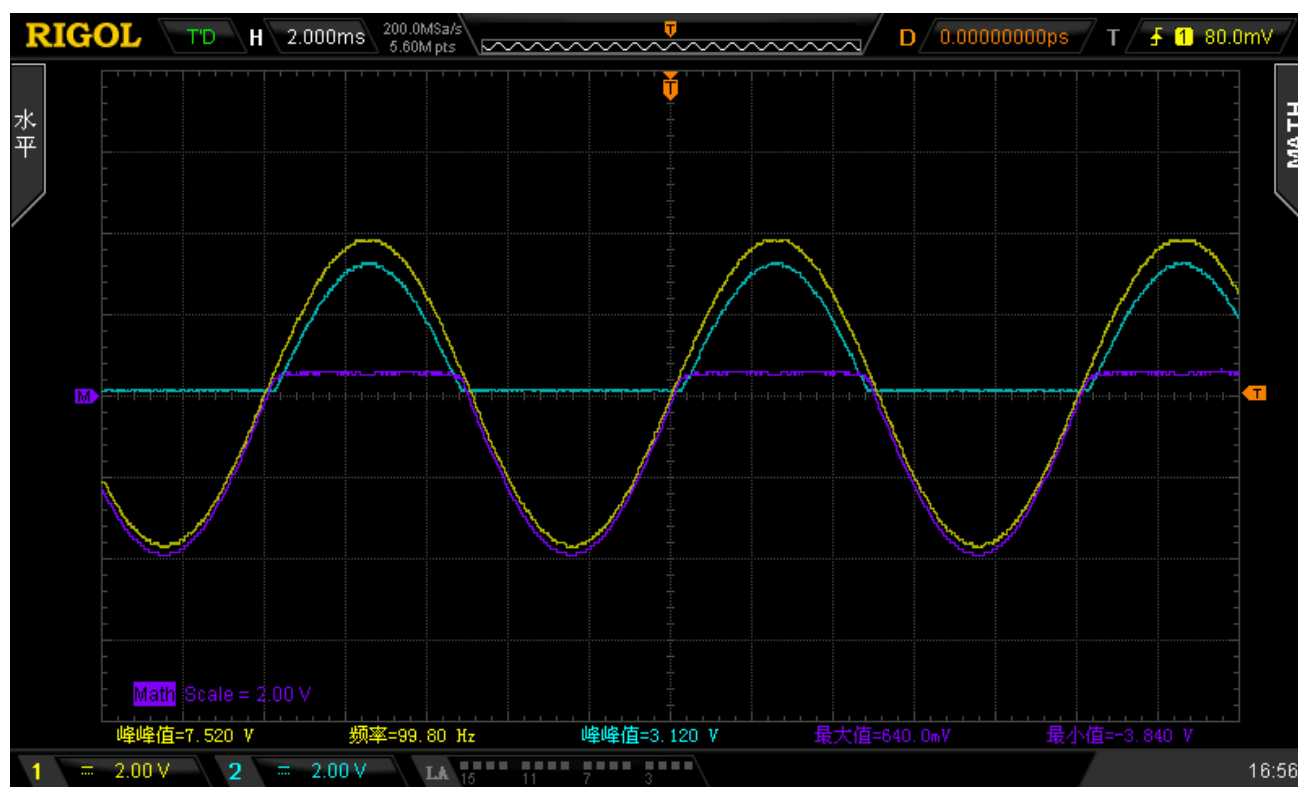


图 7: 半波整流 (无电容): 输入电压 (CH1, yellow)、输出电压 (CH2, blue) 和二极管正向电压 (Math, Purple)

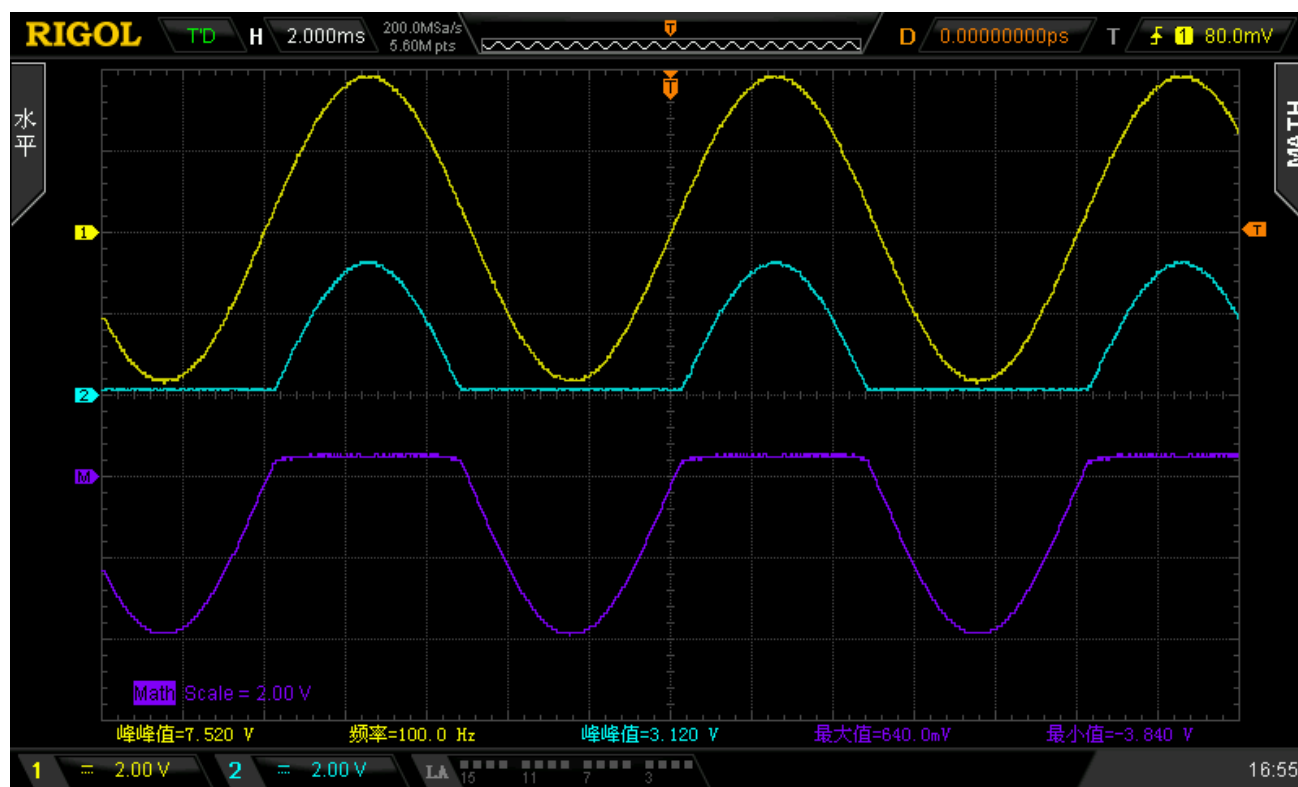


图 8: 半波整流 (无电容): 输入电压 (CH1, yellow)、输出电压 (CH2, blue) 和二极管正向电压 (Math, Purple), 错位显示

从图中可以看到, 二极管仅在正半周期导通, 且输出电压比输入电压低一个 V_D 。



图 9: 半波整流 (无电容): 输入电压 (CH1, yellow)、输出电流 (CH2, blue, $R_{sense} = 1 \Omega$)

3.4 半波整流电路 (连接输出储能电容)

连接输出储能电容后, 输出电压的波形不再是单纯的半波整流波形, 而是在半波整流波形的基础上, 增加了电容充放电的过程。

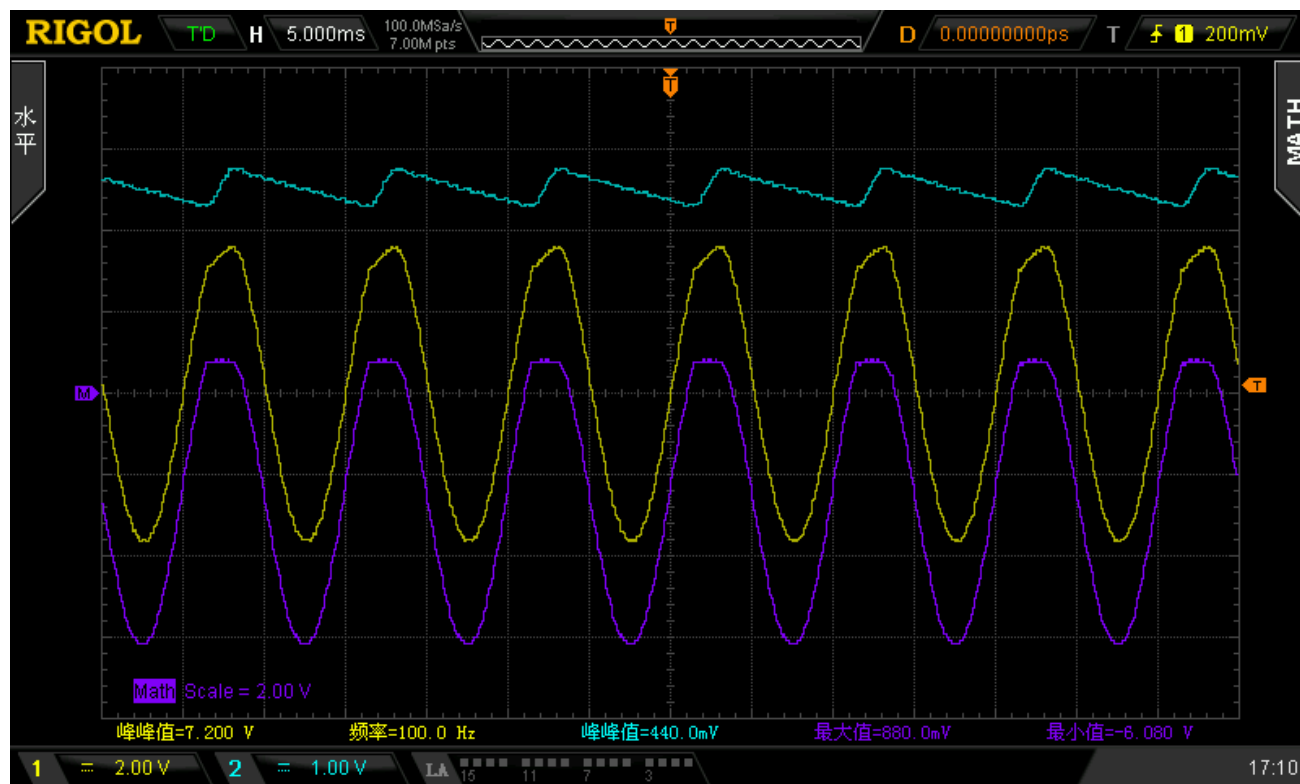


图 10: 半波整流 (有电容): 输入电压 (CH1, yellow)、输出电压 (CH2, blue) 和二极管正向电压 (Math, Purple), 错位显示

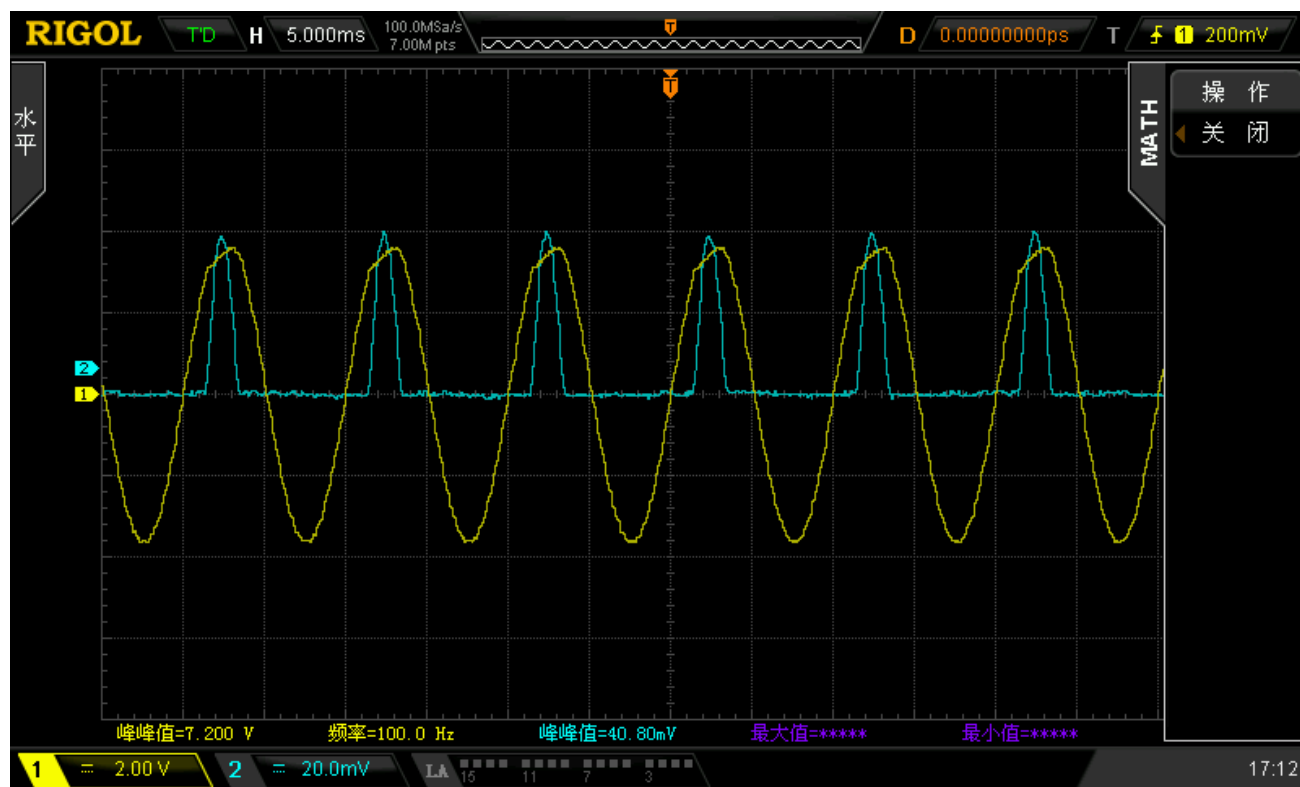


图 11: 半波整流 (有电容): 输入电压 (CH1, yellow)、输出电流 (CH2, blue, $R_{sense} = 1 \Omega$)

信号源给电容充电时, 电容两端电压跟随输入电压上升 (输出电压上升); 电容放电时, 电容两端电压下降, 信号源输出电流为零。

3.5 全波整流电路 (选做)

全波整流的实现需要使用到“中间抽头变压器”, 我们的变压器可以满足这个条件, 按下图正确连接变压器输出后, 对整流情况进行观察。

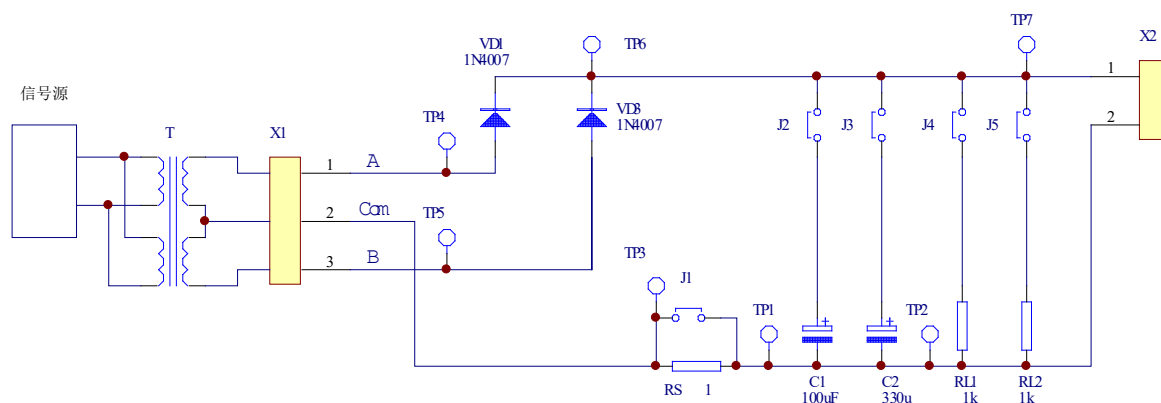


图 12: 全波整流电路

未接入储能电容时, 全波整流电路的波形如下:

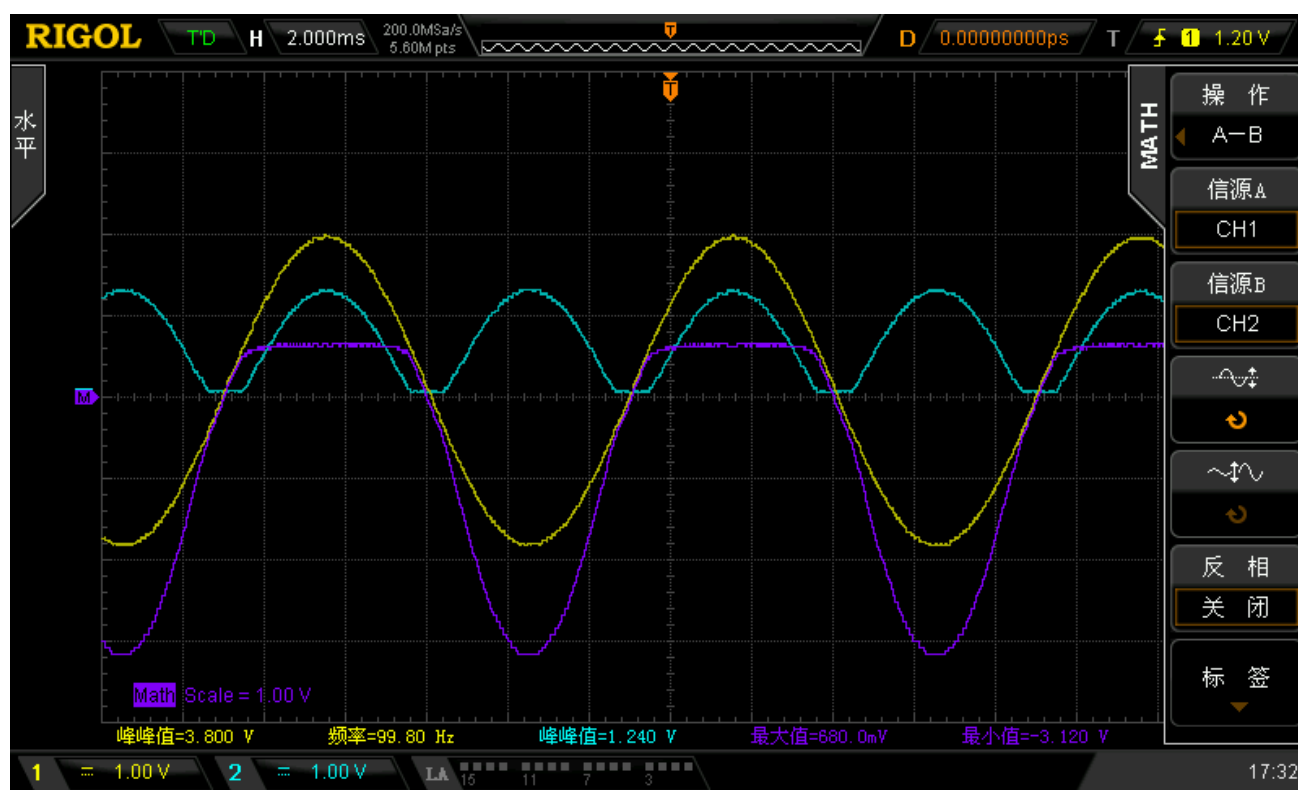


图 13: 全波整流 (无电容): 输入电压 (CH1, yellow)、输出电压 (CH2, blue) 和二极管正向电压 (Math, Purple)

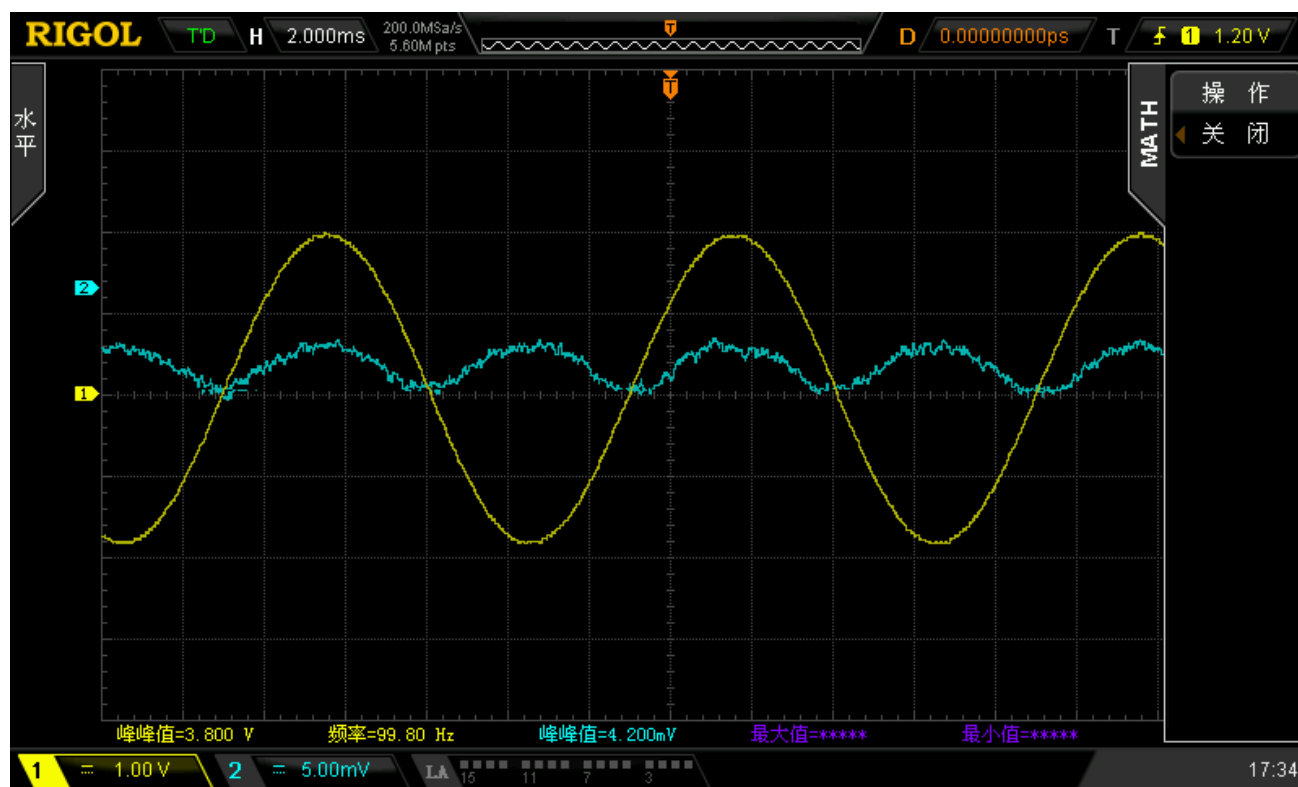


图 14: 全波整流 (无电容): 输出电压 (CH1, yellow)、输出电流 (CH2, blue, $R_{sense} = 1 \Omega$)

由图可以看出, 二极管在正负两个半周期都能够导通, 输出电压波形为全波整流波形。但是由于二极管存在导通压降, 输出波形仍存在“死区”电压, 此时两个二极管都未导通, 输出电压为零。

将储能电容重新接入, 输出波形如下:



图 15: 全波整流 (有电容): 输入电压 (CH1, yellow)、输出电压 (CH2, blue) 和二极管正向电压 (Math, Purple)

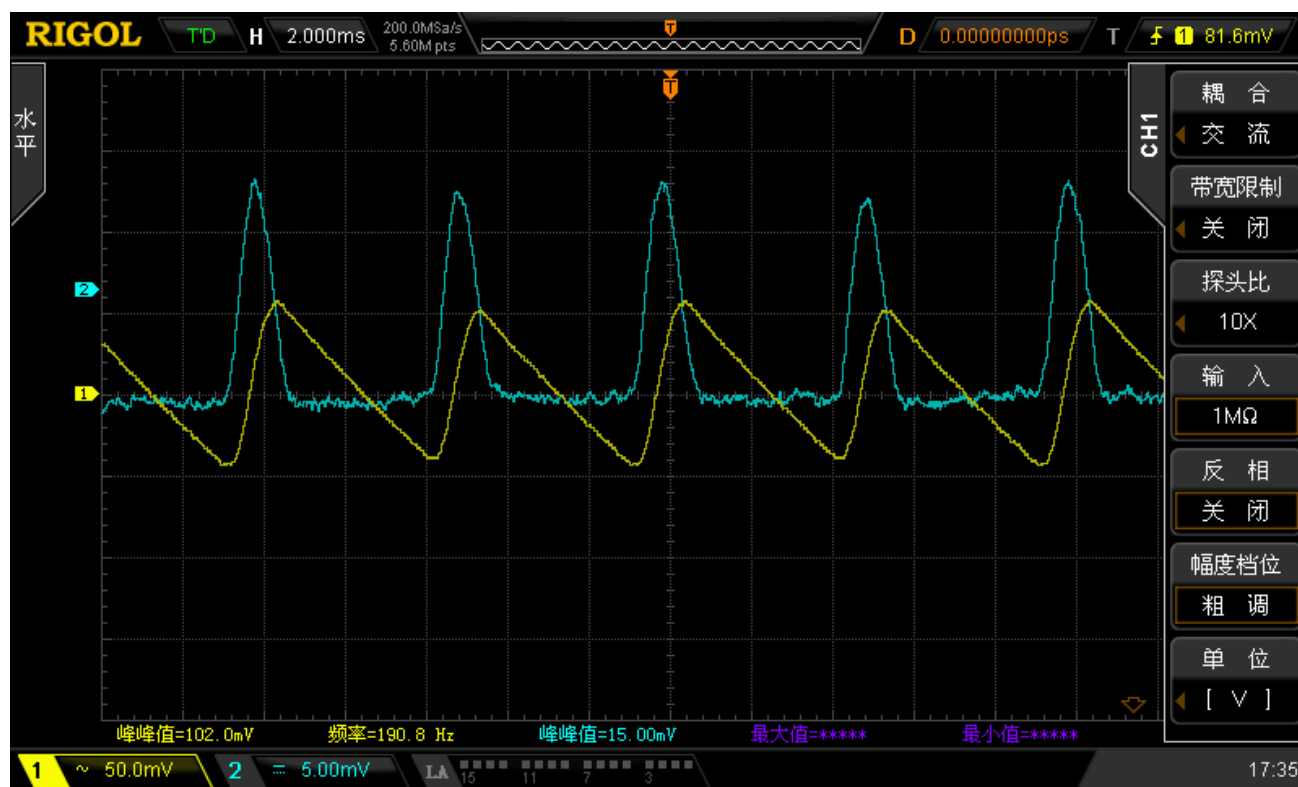


图 16: 全波整流 (有电容): 输出电压 (CH1, yellow, ac coupling)、输出电流 (CH2, blue, $R_{sense} = 1 \Omega$)

与半波整流相比, 输出纹波的频率变为了输入频率的两倍, 且纹波幅度明显减小, 这是因为全波整流电路在每个半周期都能够给储能电容充电。

3.6 桥式整流电路 (选做)

实际中最常用的整流电路是桥式整流, 实验电路图如下:

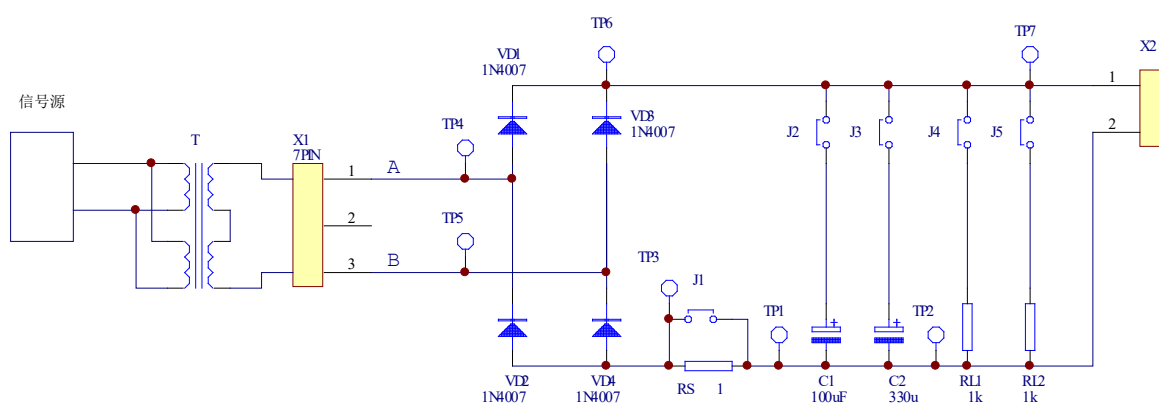
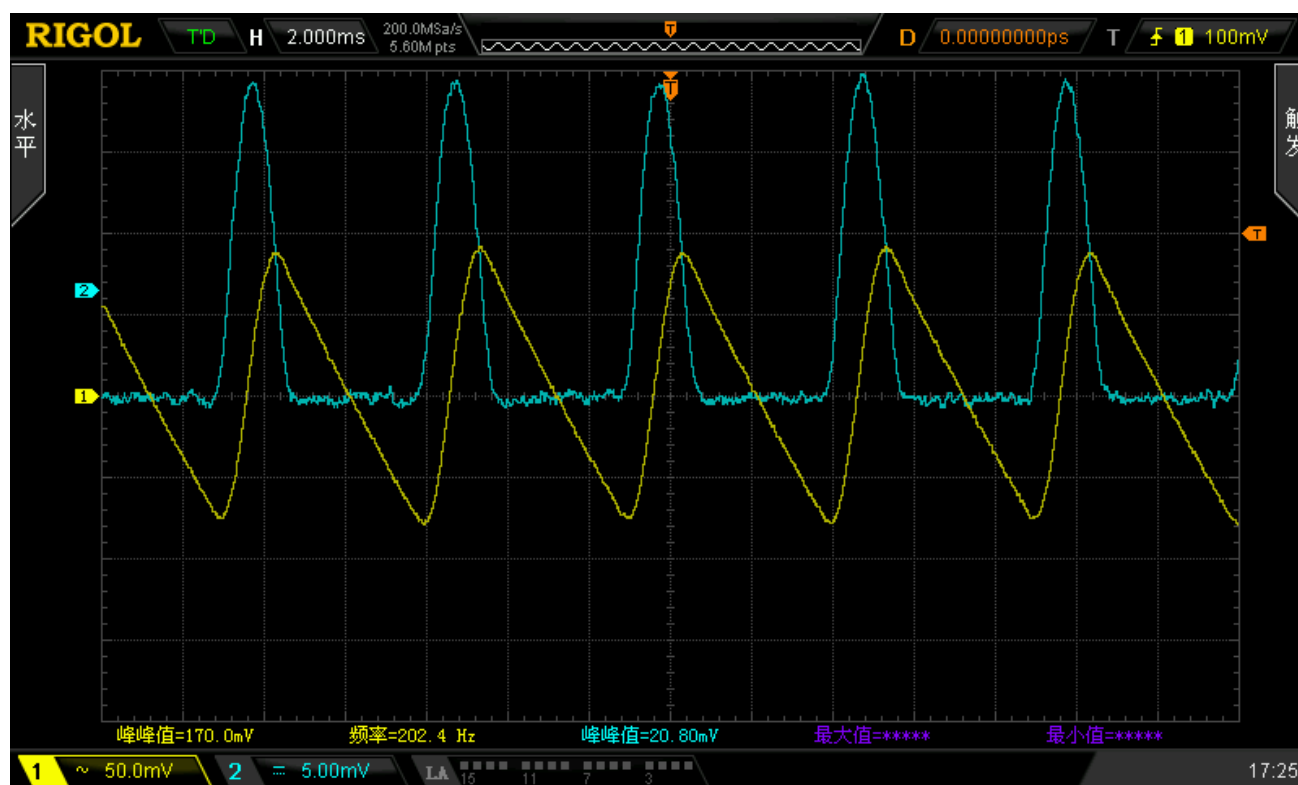
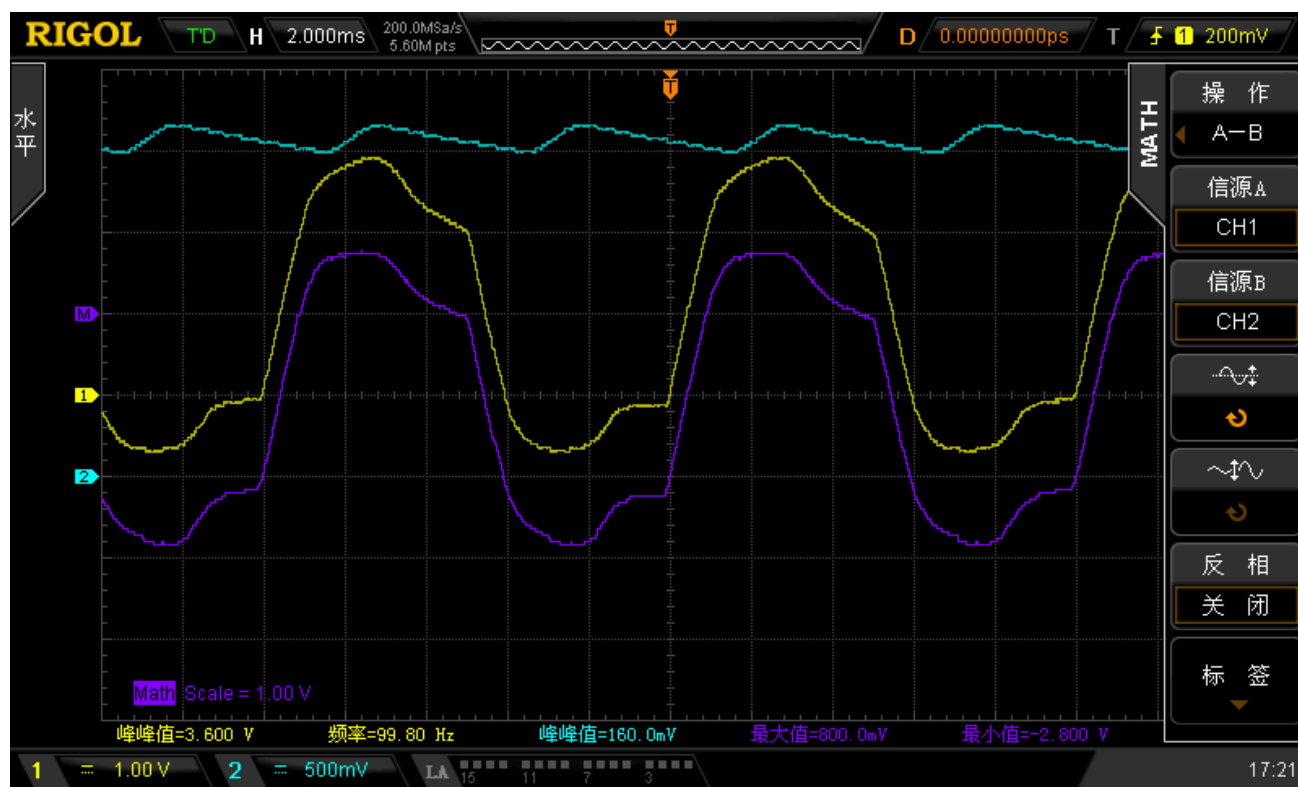


图 17: 桥式整流电路

接入小储能电容时 ($100 \mu\text{F}$), 桥式整流电路的波形如下:



同时接入小电容和大电容时 ($100 \mu\text{F} + 330 \mu\text{F}$), 桥式整流电路的输出电压电流波形如下图所示。纹波幅度明显降低, 输出电压更加平稳。

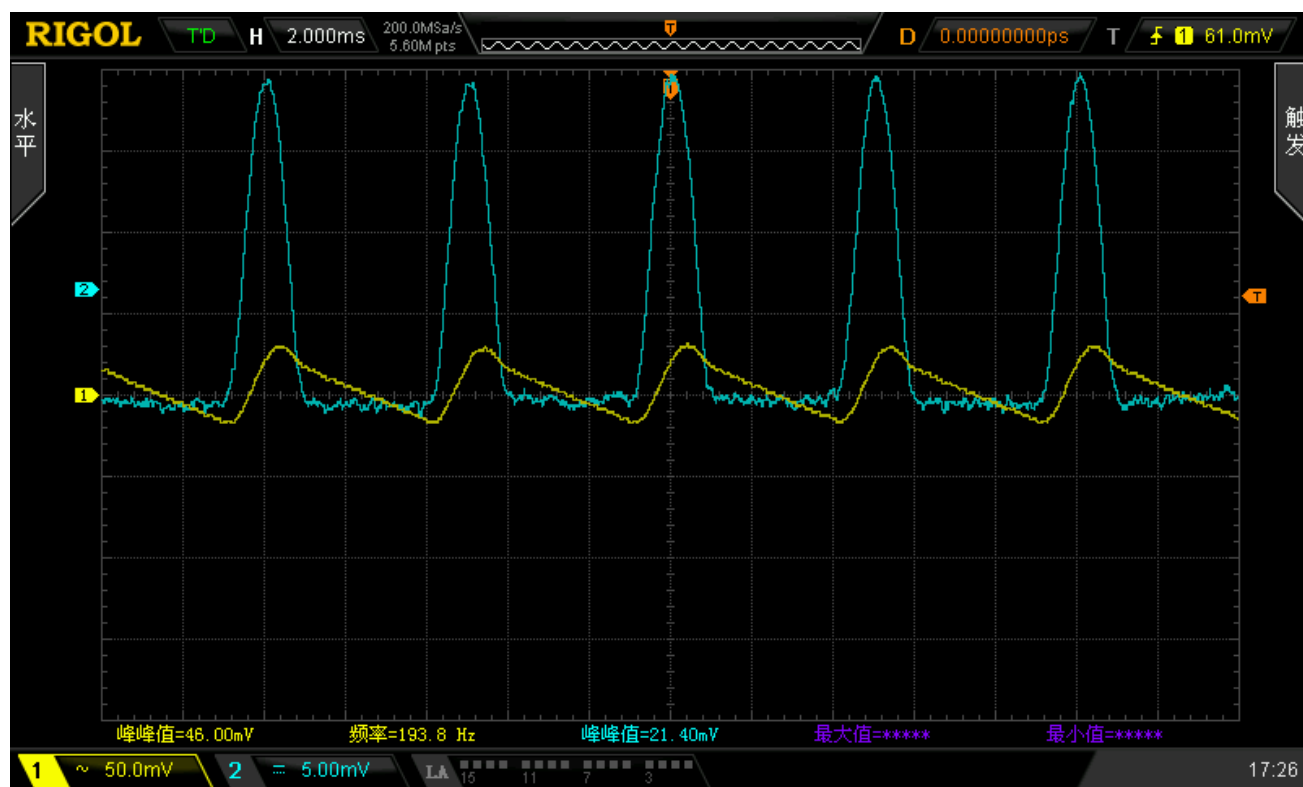


图 20: 桥式整流 (小电容 + 大电容): 输出电压 (CH1, yellow)、输出电流 (CH2, blue, $R_{sense} = 1\Omega$)

3.7 二极管反向恢复特性 (选做)

二极管在快速关闭时, 存在“反向恢复时间”的概念。在这段极短的时间内, 二极管的压降比 0 V 稍低, 但是反向电流却很大 (类似一个阻值很低的电阻), 这个现象在需要频繁开关的场合可能会产生较大损耗。

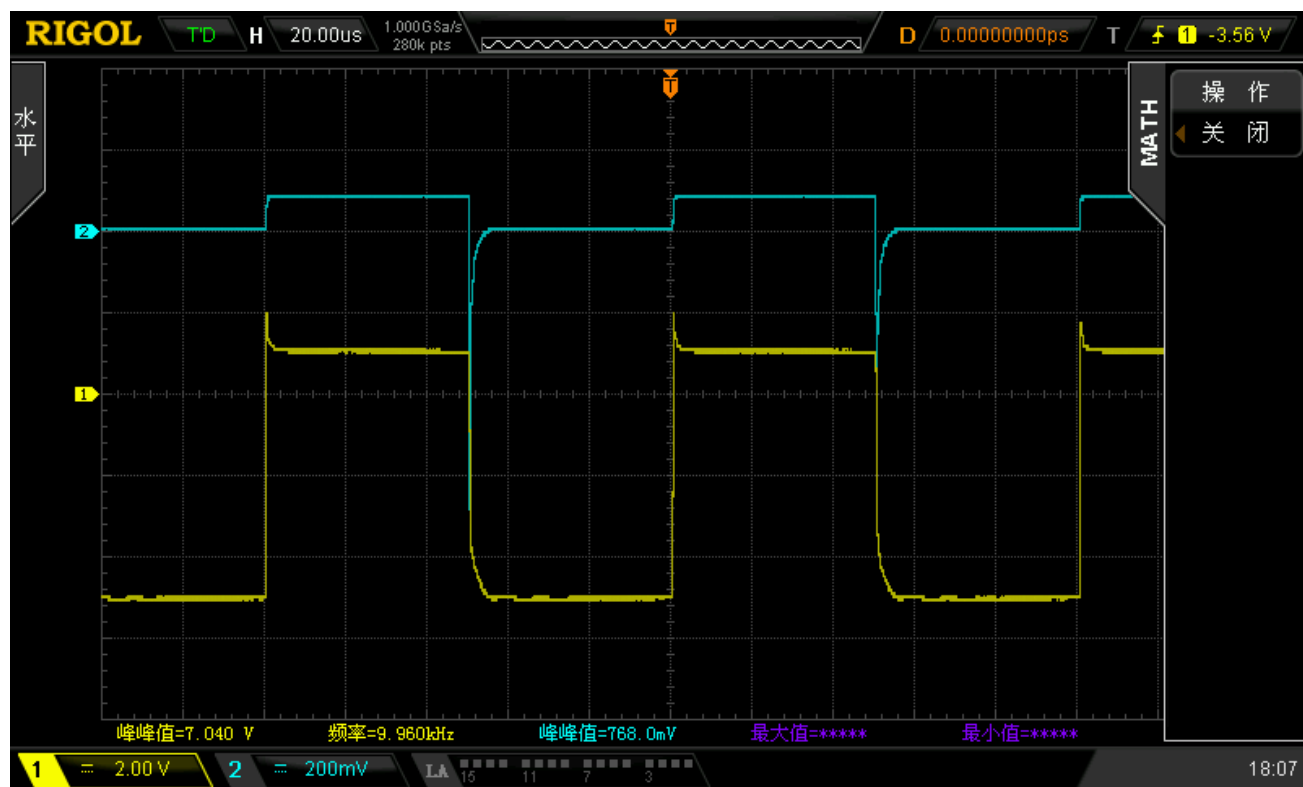


图 21: 二极管反向恢复特性: 二极管正向压降 (CH1, yellow)、二极管正向电流 (CH2, blue, $R_{sense} = 1\Omega$)

由于信号源输出电流有限,无法观察到反相恢复特性,我们利用 TC4424 功率驱动芯片,对信号源输出的方波进行功率放大。设置 TC4424 输出 10 kHz 的方波,对二极管 1N4007 进行测试,结果见图 21 和图 22。



图 22: 二极管反向恢复特性: 二极管正向压降 (CH1, yellow)、二极管正向电流 (CH2, blue, $R_{sense} = 1\Omega$), 细节放大

由图中可以看到,在二极管电压下降,二极管从开启到关闭的过程中,二极管的电流并不是瞬间变为零,而是在 200 ns ~ 400 ns 的反向放电之后,才逐渐减小至零。这个反向恢复时间是比较正常的,因为 1N4007 只是一种通用整流二极管。

4 思考题

4.1 对本实验的建议

此次实验有较多的选做部分,同学们可以根据自己的安排、兴趣任意选择。但是选做实验的实验原理、实验步骤,课件和相关实验资料中并没有详细说明,希望能补上这一部分内容,以便想完成选做实验的同学参考。

4.2 二极管接入滤波电容后,输入输出有哪些主要变化? 有无负面影响?

整流电路中的滤波电容(即储能电容)能够对整流后的脉动电压进行平滑处理,使输出电压波形更加平滑,脉动成分减小。滤波电容的存在使得输出电压的平均值有所提高,并且二极管的导通时间变短,只有在输入电压大于电容两端电压时,才有电流对电容充电和对负载供电。

最大的负面影响是,加入电容后,电容储能(产生电压),二极管的正极被拉高到输出电压,导致整流过程中二极管承受的最大反向电压变为原来的两倍,这对二极管的耐压有了更高的要求。另一个可能的负面影响是,由于电容滤波的作用,二极管在充电瞬间需要提供较大的电流,导致电流峰值增大,这可能会对二极管的耐流能力提出更高要求。

4.3 逐点法测量伏安特性，主要误差有哪些？

主要的误差有以下几点：

- (1) 系统误差：采用电流表外接法时，电压表测量的是二极管与电流表两端的电压之和，导致测得的电压偏大；而电流表内接时，电流表测量的是通过二极管和电压表的总电流，导致测得的电流偏大；
- (2) 环境因素：二极管的特性参数（如正向导通电压、反向漏电流等）会随温度变化而改变，测量过程中的温度变化会对测量结果产生影响；
- (3) 读数误差：人为读取电压表和电流表数值时，可能会因仪器精度、示数波动等因素导致读数不准确；

下面进行一些定量的计算。考虑我们所使用的测量方法 (DC Power Supply + 1 k Ω 电阻)，查阅资料^①知电源电压的“读值精确度”为 $\pm(0.03\% \text{ 的读数} + 10 \text{ 位})$ ，万用表电压读数精度为 $\pm(0.05\% + 5 \text{ 位})$ 测量得到万用表电压档的内阻约为 11 M Ω ，电阻精度为 $\pm 1\%$ 。

假设现在电源输出的电压读数为 10 V，万用表电压读数为 2 V，忽略误差下的测量结果为：

$$(V_D, I_D) = (2\text{V}, 8\text{mA}) \quad (1)$$

考虑仪器带来的误差，实际测量点可能为：

$$2\text{V} \times 0.05\% = 1.0\text{mV}, \quad 10\text{V} \times 0.03\% = 3.0\text{mV} \quad (2)$$

$$\frac{(10\text{V} \pm 3.0\text{mV}) - (2\text{V} \pm 1.0\text{mV})}{1\text{k}\Omega \pm 10\Omega} \in [8\text{mA} - 0.0832\text{mA}, 8\text{mA} + 0.0848\text{mA}] \quad (3)$$

$$\Rightarrow (V_D, I_D) = (2\text{V} \pm 0.6\text{mV}, 8\text{mA} \pm 0.09\text{mA}) \quad (4)$$

显然，电流上的误差相对较大，最大可能达到 1.125% 左右。

4.4 计算变压器次级等效源阻抗

设变压器原副边变比为 n ，原边电源的输出阻抗为 Z_s ，则对副边而言，原边带来的等效源阻抗为：

$$Z_{eq} = \frac{Z_s}{n^2} \quad (5)$$

能否用实验室信号源、变压器、二极管产生 700V 直流电压？

实验室的变压器最大匝数比可以为 $\frac{220}{20.3} \approx 11$ ，两个信号源的输出幅度最大为 40 V_{pp}，因此最大只能升到约 440 V_{pp}。要想产生 700 V 的直流电压，需要更大的变压器匝数比，或者再加入一个电压倍增器。

5 异常现象分析

实验中，绝大多数现象都是符合预期的，但是我使用的示波器似乎有一些问题。具体现象是，在默认参数下，将 CH2 探头正极与负极直接连接，此时示波器 CH2 的值会有约 -5 mV 至 -10 mV 的“偏移”，如下图所示：

^①电源技术指标在 <http://www.gwinstek.com.cn/product/detail/195>，万用表技术指标在 https://meters.uni-trend.com.cn/list_40/123.html

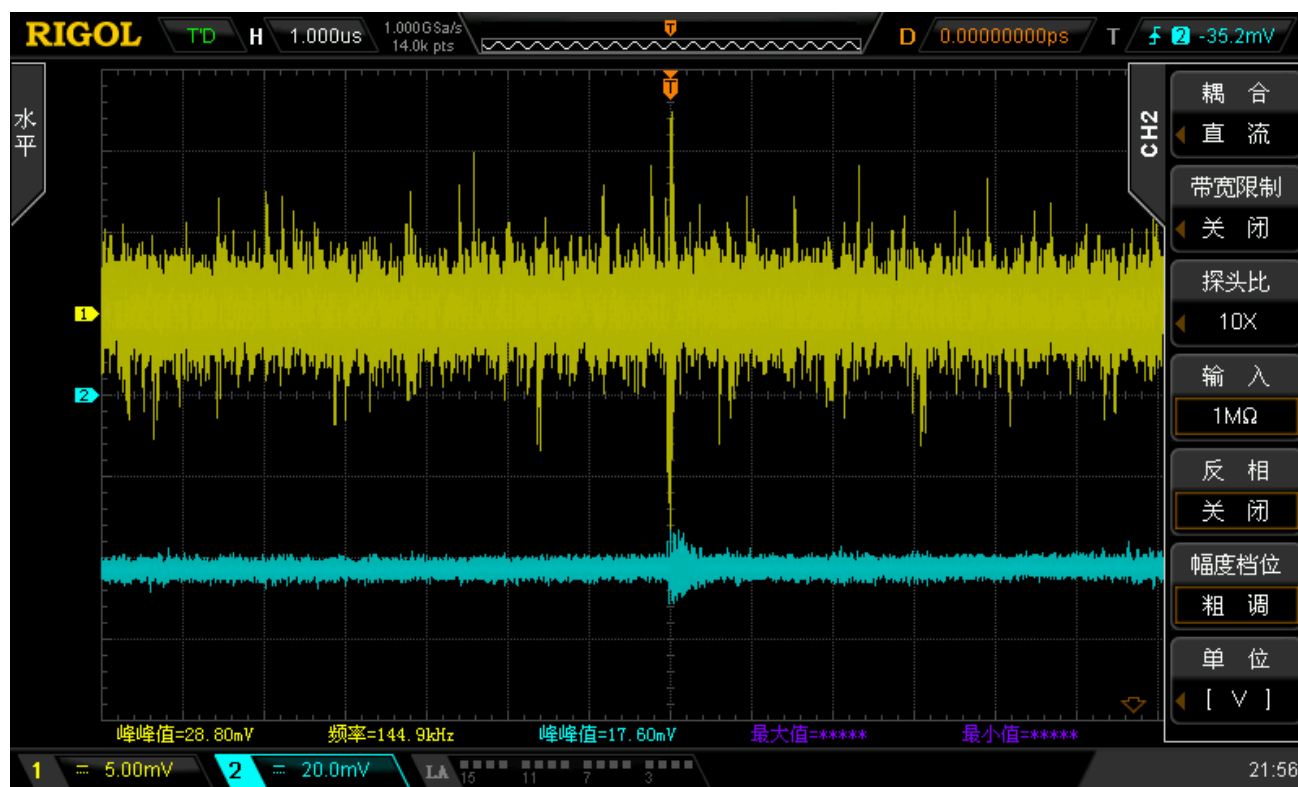


图 23: 示波器 CH2 的“偏移”现象

作为对比，我们在上图中将 CH1 的探头也短接到了地。显然，CH1 的测量结果没有发生偏移。我们尝试过交换示波器的探头、将示波器模式调整为“高分辨率”、将示波器触发源改为 CH1，异常现象都没有明显变化。除此之外，我对邻桌的示波器进行了测试，也出现了相同的现象，只不过偏移幅度略有不同。

上面问题的一个伴生现象是，将示波器的触发源调整为 CH2，然后向下移动触发电平，会发现 CH2 的值也向下移动（始终比触发电平低 10 mV 左右）。因此，我猜测，这是 RIGOL MSO2202A CH2 通道采样上的设计问题，是普遍存在的系统问题。

附录 A 预习报告

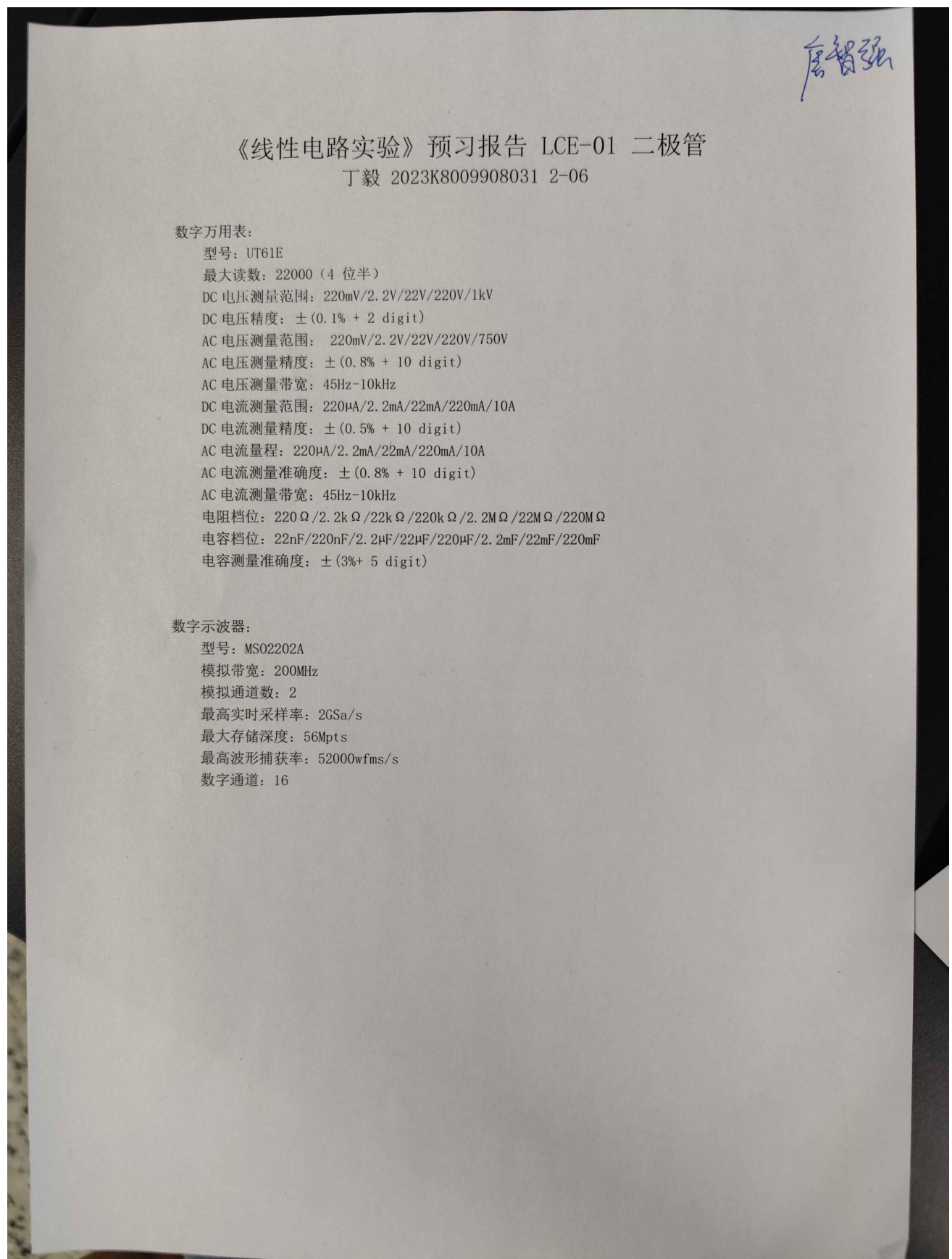


图 24: 预习报告

附录 B 原始数据记录表

Diode	V_D (V)	I_D (A)
LED Red	1.9772	0.011
LED Blue	3.074	0.012
LED Green	1.9842	0.007
LED Yellow	1.9794	0.009
LED White	2.776	0.010
1N5819	0.2697	0.017
1N4007	0.6855	0.006
(Zener) 2DW234	6.318	0.008
(Zener) 5T60P	OL	OL
5T60P	0.5604	0.019
(Zener) C6V2	6.246	0.015
C6V2	0.8156	0.021

反向
(温升明显, V_D 不断上升)

王东雷

图 25: 原始数据记录表