

真空二极管实验报告

工物 42 李中翔 2024011032

2025 年 12 月 7 日

目录

1 摘要	2
2 实验原理	2
3 实验仪器	2
4 实验步骤及数据处理	3
4.1 连接电路	3
4.2 加速电压 U_a 、磁感应强度 B 与发射电流 I_e 的关系	5
4.3 热电子发射速度分布	9
5 分析讨论	9
6 原始数据	10

1 摘要

根据电磁学所学知识我们知道真空二极管中电子会因为阳极和阴极之间的加速电压而获得速度，如果加上磁场那么电子的运动轨迹会发生弯曲。而本实验则是在此基础上探究磁场大小和加速电压的大小对真空二极管发射电流的影响。

2 实验原理

我们如下图所示，当没有电场时速度为 v 的电子垂直入射到均匀磁场 B 中会在磁场力的作用下做圆周运动，即 $evB = mv^2/R$ 。当磁场增大时则半径减小，而磁场增大到一定程度时则电子无法到达阳极，这会使得阳极电流开始急剧下降，而这临界情况对应着 $2R$ 与阳极半径 r 相等，据此可以得到临界方程为 $2mv_C = reB_C$ 。而实验中亥姆霍兹线圈产生的磁场 $B_C = kI_M$ ，因此我们可以将临界方程改写为 $v_C = \frac{rek}{2m}I_M$ 。我们再利用 $U_\alpha e = \frac{1}{2}mv_C^2$ ，联立可以得到临界磁场和加速电压的关系 $B_C^2 = \frac{8mU_\alpha}{er^2}$ 。

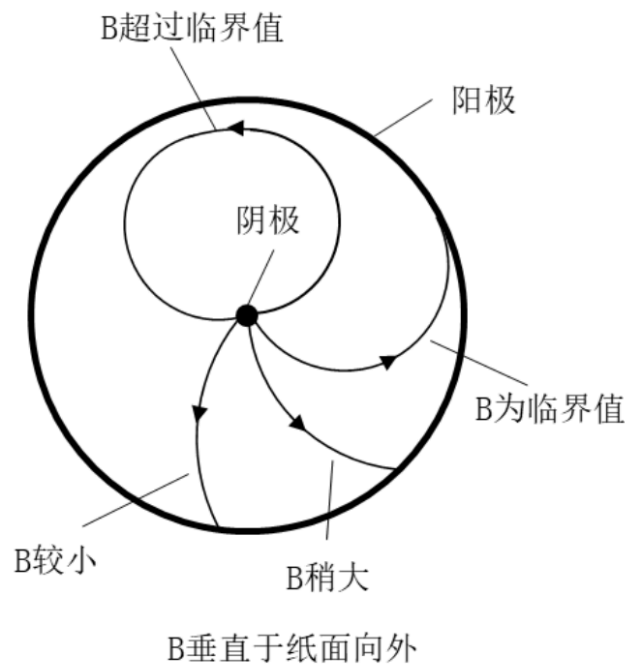


图 1: 实验原理示意图

3 实验仪器

三路输出稳压直流电源、数字万用表、固定在亥姆霍兹线圈中的真空二极管、特斯拉计、装有 10 个串联的 $1\text{ k}\Omega$ 电阻和串联的 $100\text{ }\Omega$ 电阻的电阻板和导线若干。

4 实验步骤及数据处理

4.1 连接电路

首先按照下图在电源输出开关关闭的状态下进行电路连接。电路连接完成后使电源输出开关闭合并等待几分钟使得灯丝温度稳定。

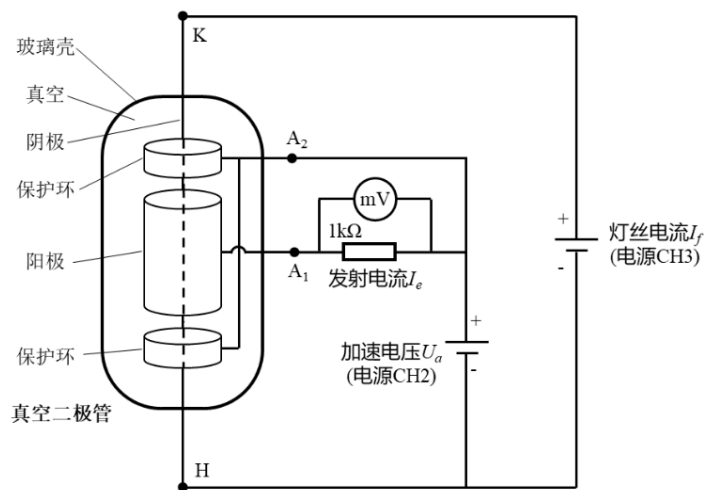


图 2: 实验电路图

将电源 CH1 的正负极分别与亥姆霍兹线圈左侧的红黑插孔连接并将电源 CH1 设置为 0.5 A。打开特斯拉计并将量程调整至 0.01 mT，用特斯拉计测量亥姆霍兹线圈透明塑料板中间位置的磁感应强度的大小为 1.15 mT，方向为从右侧线圈指向左侧线圈。

将电源 CH1 设置为 0.0 A 并将其正负极分别与亥姆霍兹线圈右侧线圈的红黑插孔相连，完成连接后将电源 CH1 设定为 0.5 A 并在特斯拉计霍尔元件的朝向与上一步朝向一致条件下测量线右侧线圈在透明塑料板中间位置的磁感应强度的大小为 1.14 mT，方向为从右侧线圈指向左侧线圈。

将电源 CH1 设置为 0.0 A，将两个线圈串联顺接并使用电源 CH1 提供励磁电流 I_M 。完成连接后将电源 CH1 设定为 0.5 A 并用特斯拉计测量亥姆霍兹线圈透明塑料板四角的四个螺孔处和中间位置的磁感应强度，测量结果整理为表 1，其中方向均为从右侧线圈指向左侧线圈。

我们再以 0.2 A 为步长调节励磁电流，测量其在 0.0 A ~ 1.4 A 范围内变化时 C 点磁感应强度 B，将数据整理为表 2。我们进一步画出其对应的变化关系图并进行直线拟合，从而可以近似得到二者关系为 $B = kI_M$ ，其中 $k = 4.2896 \text{ mT/A}$ 。

表 1: 亥姆霍兹线圈磁场数据记录表

位置	磁感应强度 $B(mT)$
左上角	2.160
右上角	2.150
左下角	2.160
右下角	2.170
中间位置	2.200
平均值	2.168

表 2: B 与 I_M 的关系表

励磁电流 $I_M(A)$	磁感应强度 $B(mT)$
1.4	5.97
1.2	5.11
1.0	4.28
0.8	3.45
0.6	2.63
0.4	1.79
0.2	0.94
0.0	0.12

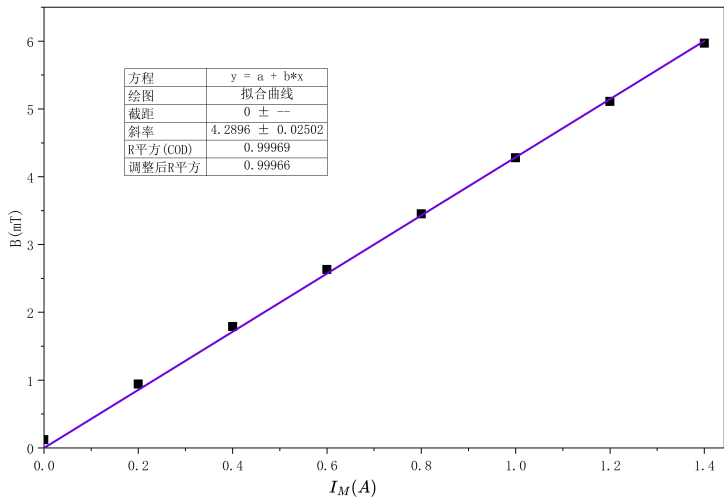


图 3: $B - I_M$ 关系图

4.2 加速电压 U_α 、磁感应强度 B 与发射电流 I_e 的关系

我们将加速电压 U_α 设置为 $4V$ ，并以 $10mA$ 为步长改变励磁电流 I_M (即改变磁感应强度 B)，记录电阻两端电压并依此就算出相应的发射电流 I_e 。然后再分别将加速电压设置为 $6V$ 、 $8V$ 和 $10V$ 重复上述操作，最终我们将四组加速电压下的发射电流与励磁电流关系绘制成下图。

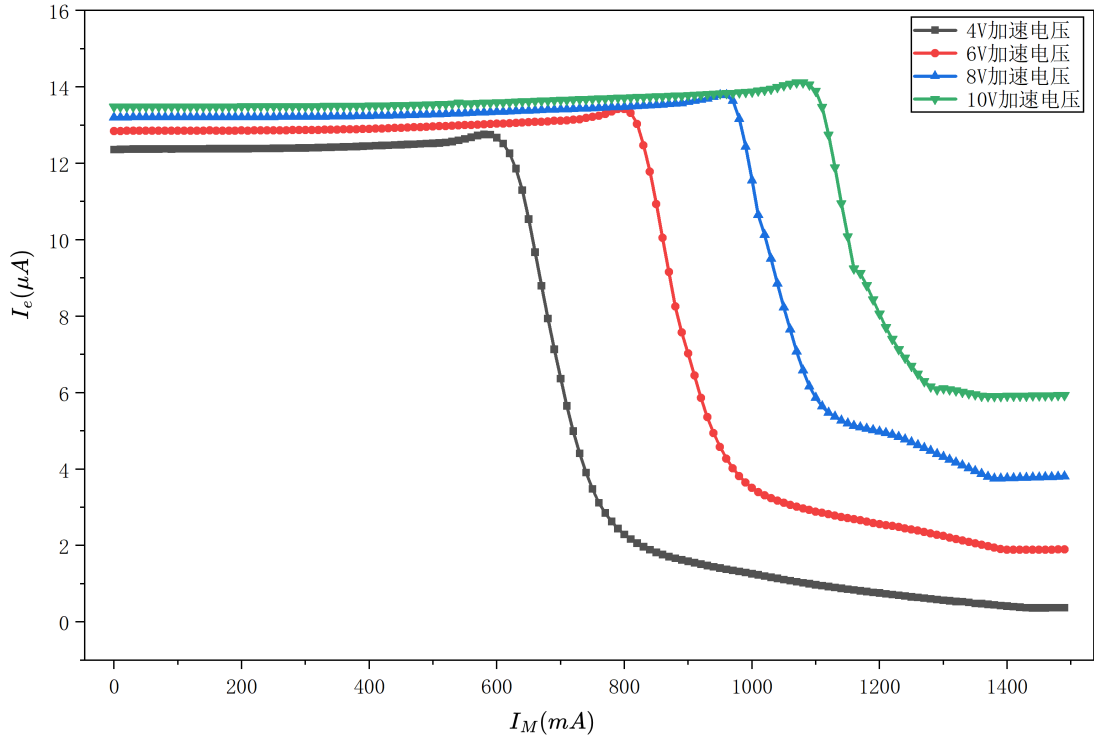


图 4: $I_e - I_M$ 关系图

我们观察图像可以知道对于特定的一个加速电压下发射电流随励磁电流的变化可以分为三段:(a) 在磁场较小, 也就是励磁电流较小时发射电流几乎无明显变化。(b) 励磁电流进一步增大使得磁场接近或刚超过临界值时发射电流将会迅速减小。(c) 磁场大于临界值后发射电流的减小开始放缓并趋于零。

我们再对比四条曲线可以发现则大加速电压会使得发射电流整体增大, 而且根据电场做功可以知道增大加速电压也会使得发射电子整体速度相应增大。

我们将 I_e 随 I_M 变化很快的一段的延长线与 I_M 很低时的 I_e 值的交点对应的 I_M 称为临界励磁电流 I_C , 我们通过画图的方法可以得到各加速电压下的 I_C (相应值已标于图中)。

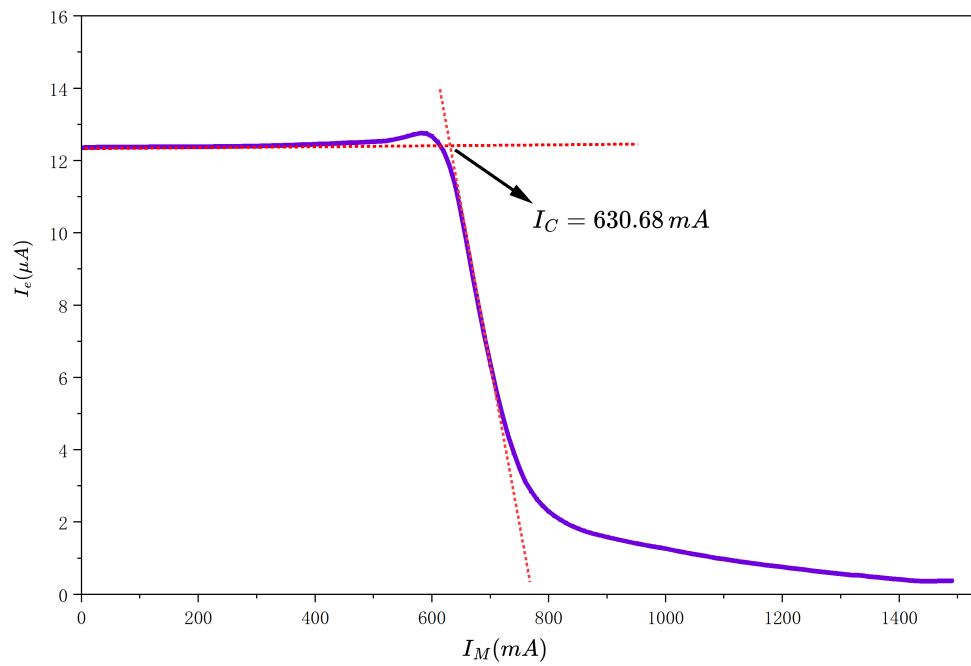


图 5: $4V$ 下的临界励磁电流

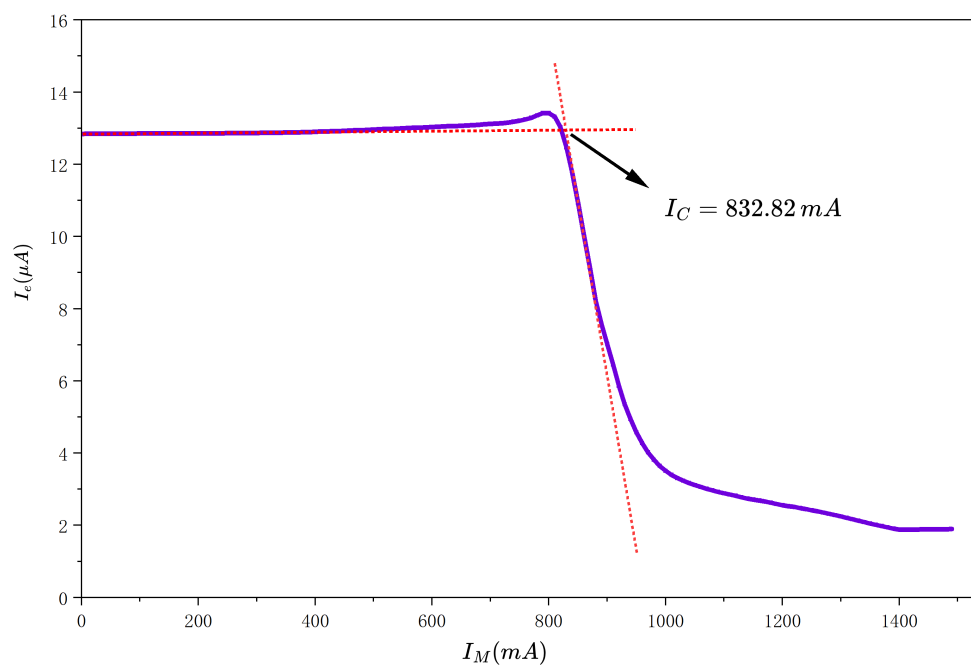


图 6: $6V$ 下的临界励磁电流

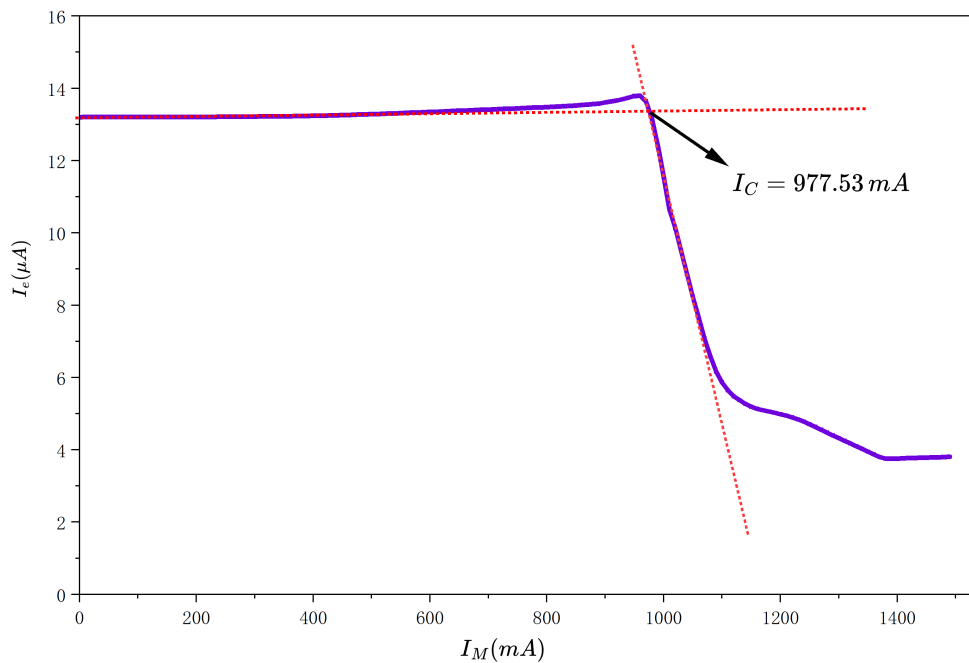


图 7: 8 V 下的临界励磁电流

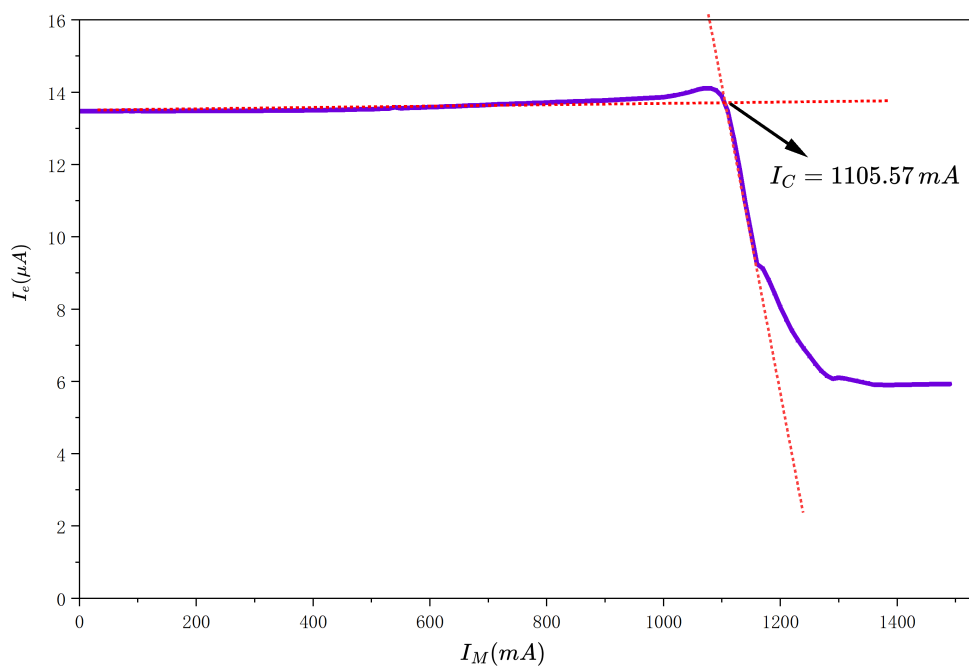


图 8: 10 V 下的临界励磁电流

实验中我们还测量了灯丝电流 $I_f = 0.6 \text{ A}$ 和相应的电压 $U_f = 3.398 \text{ V}$, 从而可以计算出灯丝电阻 $R_f = 5.663 \Omega$ 。当我们把灯丝电阻考虑上时灯丝不同位置上的电势不同, 我们考虑

加速电压的平均值 $U'_\alpha = U_\alpha - \frac{1}{2}U_f$, 然后我们再利用 $B_C = \sqrt{\frac{8mU'_\alpha}{eb^2}}$ 得出电子的荷质比, 其中阳极半径 $b = 4.55 \times 10^{-3} m$ 。我们考虑使用直线拟合的方式计算荷质比, 因此我们将上式变形为 $\frac{e}{m} \frac{1}{U'_\alpha} = \frac{8}{b^2 B_C^2}$, 然后我们将四组加速电压对应的数据整理为下表。

表 3: B 与 I_M 的关系表

加速电压平均值倒数 $\frac{1}{U'_\alpha} (V^{-1})$	临界磁感应强度 $B_C (mT)$	$\frac{8}{b^2 B_C^2} (GC \cdot kg^{-1} \cdot V^{-1})$
0.435	2.705	52.812
0.233	3.572	30.286
0.159	4.193	21.979
0.120	4.742	17.185

我们根据上标数据可以画出下图并作出直线拟合, 我们可以计算出荷质比近似为 $1.258 \times 10^{11} C/kg$, 这和真实值为 $1.759 \times 10^{11} C/kg$ 接近, 考虑到实验中涉及拟合的结果以及相应的实验误差, 因此 28 % 左右的相对误差可以接受。

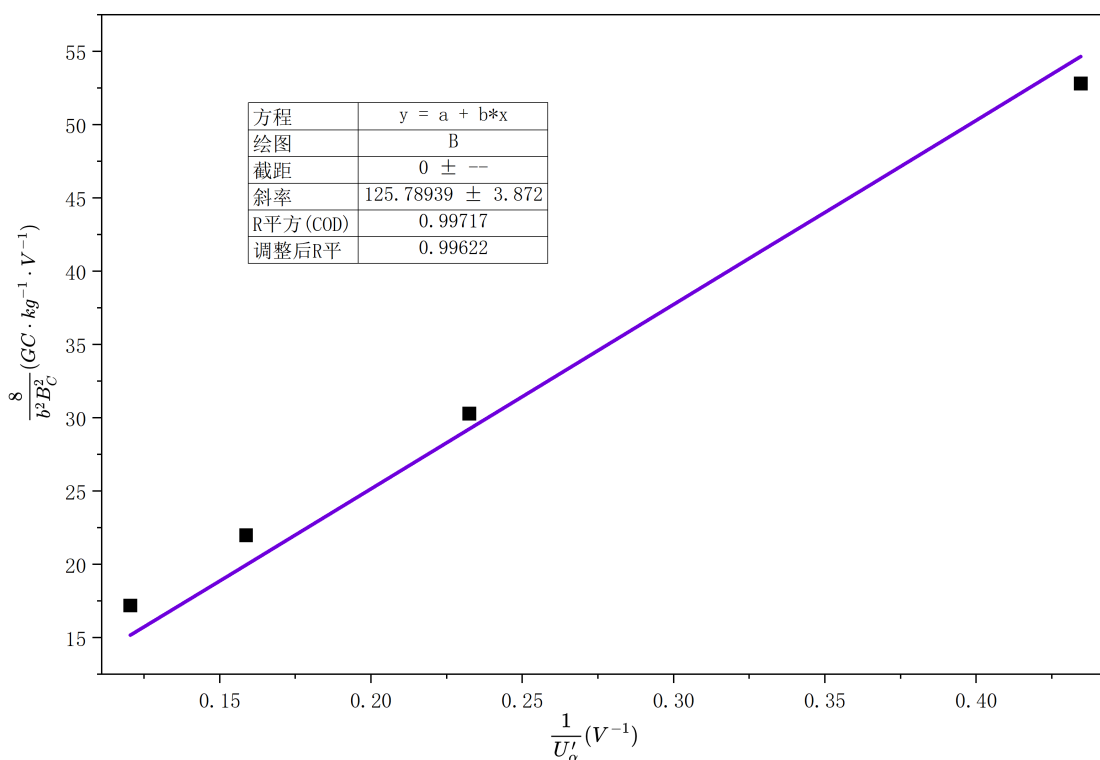


图 9: 直线拟合求解荷质比

4.3 热电子发射速度分布

我们考虑电子随速度变换的数密度函数为 $\rho(v)$, 那么到达阳极的电子产生电流 $I_e = \int_{v_C}^{\infty} \rho(v) dv$, 这样的话我们就可以求导得到 $\rho(v) = -\frac{dI_e}{dv_C}$, 而我们在实验原理部分得到 $v_C = \frac{rek}{2m} I_M$, 于是我们可以进一步得到 $\rho(v) = -\frac{2m}{rek} \frac{dI_e}{dI_M}$ 。我们把分布考虑为关于 I_M 的函数, 由于全域的积分结果为 $I_{e\max}$, 即可以考虑为没有磁场时的发射电流, 所以我们依此归一化后可以得到新的因变量 $f(I_M) = -\frac{1}{I_{e\max}} \frac{dI_e}{dI_M}$, 由于数据是不均匀变化的, 我们实际计算时取 $f(I_M) = -\frac{1}{I_{e\max}} \frac{\Delta I_e}{\Delta I_M}$ 。我们根据这一公式计算 4V 和 10V 的情况并可以绘制出如下图像。

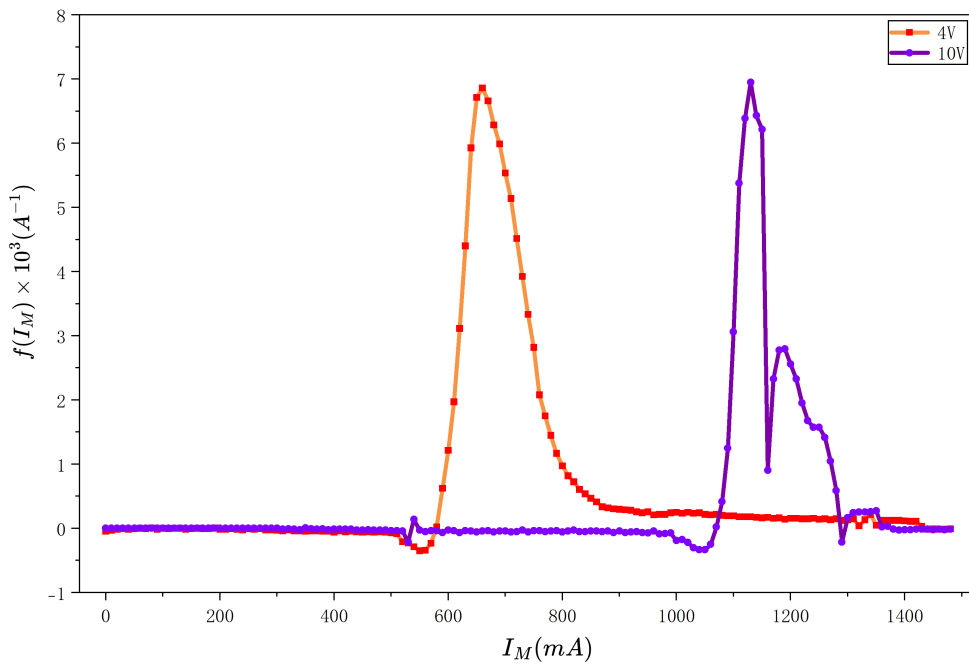


图 10: 电子分布因变量与 I_M 关系图

我们观察分布曲线可以发现其为单峰分布 (在 10V 的情况下由于数据采样有限, 从而产生了近似“双峰”的误差, 我们观察曲线也可以发现这主要是由一到两个点导致的), 此外当我们增大加速电压时电子的分布也会整体向右平移。

5 分析讨论

(a) 实验中我们发现随着励磁电流的增大发射电流最初会有略微的增大, 尤其是在下降前的小范围内较为明显, 这一现象可能有两个原因: 一个原因是当大量电子从阴极发射出来时会有部分电子产生一个与加速电场相反的电场, 从而影响了最终形成的发射电流, 而我们

施加磁场后我们可以让这部分电子螺旋运动至阳极,从而减小反向电场,使得合场强增大,于是更多的电子可以顺利到达阳极,最终表现为发射电流的略微增大。第二个可能原因是电子的速度和方向都是随机分布的,而我们施加电流后相当于起到一个磁聚焦的作用,电子在磁场作用下沿着中心线做螺旋运动,更大概率有效地打到阳极,而不是到达无效区域,从而使得发射电流增大。

(b) 查询资料我们可以知道在统计意义下热电子的速度分布不是麦克斯韦分布,而是遵循 $f(v)dv = \frac{m^2}{2k^2T^2}v^3e^{-\frac{mv^2}{2kT}}dv$, 而这一曲线的形状和我们在数据分析的最后部分是一致的。不过我们可以发现我们采样密度较小时容易产生误差 (10 V 产生了双峰), 因此后续实验可以考虑增大采样密度, 减小电流之间的间隔, 从而避免显著的误差。

6 原始数据

1.15mTN					
1.14mTN					
2.16mTN		2.15mTN			
	2.20mTN				
2.16mTN		2.17mTN			
2.168					
1.4	5.97				
1.2	5.11		4.17202381	0.11583333	
1	4.28		0.00816873	0.00683445	
0.8	3.45		0.999977	0.01058788	
0.6	2.63		260846.448	6	
0.4	1.79		29.2417149	0.00067262	
0.2	0.94				
0	0.12				

图 11: 磁场原始数据

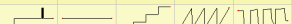
	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)	G(Y)	H(Y)	I(Y)	J(Y)	K(Y)	L(Y)	M(Y)	N(Y)	O(Y)	P(Y)	Q(Y)
长名称	Ur(V)	If(mA)	Ua(V)	Im(mA)	Ue(V)												
单位																	
注释																	
F(x)=																	
是陈图																	
1	3.398	600	4	0	0.01236	0.01284	0.0132	0.01348	12.361	12.841	13.202	13.479	10	-6E-6	-0.04673	-3E-9	-2.2255E-5
2	3.398	600	4	10	0.01237	0.01285	0.01321	0.01348	12.367	12.847	13.205	13.482	10	-4E-6	-0.03115	0	0
3	3.398	600	4	20	0.01237	0.01285	0.01321	0.01348	12.371	12.85	13.205	13.482	10	-2E-6	-0.01558	0	0
4	3.398	600	4	30	0.01237	0.01285	0.01321	0.01348	12.373	12.851	13.207	13.482	10	-1E-6	-0.00779	0	0
5	3.398	600	4	40	0.01237	0.01285	0.01321	0.01348	12.374	12.85	13.207	13.482	10	-2E-6	-0.01558	0	0
6	3.398	600	4	50	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.376	12.851	13.208	13.482	10	-1E-6	-0.00779	0	0
7	3.398	600	4	60	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.377	12.852	13.207	13.482	10	0	0	-1E-9	-7.4184E-6
8	3.398	600	4	70	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.377	12.852	13.208	13.483	10	-1E-6	-0.00779	-1E-9	-7.4184E-6
9	3.398	600	4	80	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.378	12.851	13.207	13.484	10	1E-6	0.00779	1E-9	7.4184E-6
10	3.398	600	4	90	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.377	12.852	13.207	13.483	10	-2E-6	-0.01558	-1E-9	-7.4184E-6
11	3.398	600	4	100	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.379	12.853	13.207	13.484	10	0	0	1E-9	7.4184E-6
12	3.398	600	4	110	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.379	12.853	13.207	13.483	10	-1E-6	-0.00779	1E-9	7.4184E-6
13	3.398	600	4	120	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.38	12.854	13.208	13.482	10	0	0	0	0
14	3.398	600	4	130	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.38	12.853	13.208	13.482	10	0	0	0	0
15	3.398	600	4	140	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.38	12.853	13.208	13.482	10	-2E-6	-0.01558	-1E-9	-7.4184E-6
16	3.398	600	4	150	0.01238	0.01286	0.01321	0.01348	12.382	12.857	13.208	13.483	10	-1E-6	-0.00779	0	0
17	3.398	600	4	160	0.01238	0.01285	0.01321	0.01348	12.383	12.854	13.209	13.483	10	0	0	-1E-9	-7.4184E-6
18	3.398	600	4	170	0.01238	0.01286	0.01321	0.01348	12.383	12.856	13.209	13.484	10	-1E-6	-0.00779	0	0
19	3.398	600	4	180	0.01238	0.01286	0.01321	0.01348	12.384	12.853	13.21	13.484	10	-1E-6	-0.00779	0	0
20	3.398	600	4	190	0.01239	0.01286	0.01321	0.01348	12.385	12.856	13.21	13.484	10	1E-6	0.00779	-1E-9	-7.4184E-6
21	3.398	600	4	200	0.01238	0.01286	0.01321	0.01349	12.384	12.858	13.21	13.485	10	-2E-6	-0.01558	0	0
22	3.398	600	4	210	0.01239	0.01286	0.01321	0.01349	12.386	12.856	13.211	13.485	10	-2E-6	-0.01558	0	0
23	3.398	600	4	220	0.01239	0.01286	0.01321	0.01349	12.388	12.858	13.211	13.485	10	-1E-6	-0.00779	-1E-9	-7.4184E-6
24	3.398	600	4	230	0.01239	0.01286	0.01321	0.01349	12.389	12.86	13.211	13.486	10	-2E-6	-0.01558	-1E-9	-7.4184E-6
25	3.398	600	4	240	0.01239	0.01286	0.01321	0.01349	12.391	12.86	13.213	13.487	10	-3E-6	-0.02336	0	0
26	3.398	600	4	250	0.01239	0.01286	0.01321	0.01349	12.394	12.862	13.213	13.487	10	-1E-6	-0.00779	-2E-9	-1.4837E-5
27	3.398	600	4	260	0.0124	0.01286	0.01322	0.01349	12.395	12.863	13.215	13.489	10	-2E-6	-0.01558	-1E-9	-7.4184E-6
28	3.398	600	4	270	0.0124	0.01286	0.01322	0.01349	12.397	12.864	13.216	13.49	10	-1E-6	-0.00779	0	0
29	3.398	600	4	280	0.0124	0.01287	0.01322	0.01349	12.398	12.866	13.216	13.49	10	-3E-6	-0.02336	0	0
30	3.398	600	4	290	0.0124	0.01287	0.01322	0.01349	12.401	12.867	13.218	13.49	10	-3E-6	-0.02336	-1E-9	-7.4184E-6
31	3.398	600	4	300	0.0124	0.01287	0.01322	0.01349	12.404	12.87	13.22	13.491	10	-4E-6	-0.03115	0	0
32	3.398	600	4	310	0.01241	0.01287	0.01322	0.01349	12.408	12.871	13.221	13.491	10	-5E-6	-0.03894	-2E-6	-0.01484
33	3.398	600	4	320	0.01241	0.01287	0.01322	0.01349	12.413	12.873	13.222	13.493	10	-3E-6	-0.02336	-1E-6	-0.00742
34	3.398	600	4	330	0.01242	0.01288	0.01322	0.01349	12.416	12.876	13.224	13.494	10	-5E-6	-0.03894	-2E-6	-0.01484
35	3.398	600	4	340	0.01242	0.01288	0.01323	0.0135	12.421	12.879	13.225	13.496	10	-5E-6	-0.03894	-3E-6	-0.02226
36	3.398	600	4	350	0.01243	0.01288	0.01323	0.0135	12.426	12.881	13.228	13.499	10	-6E-6	-0.04673	1E-6	0.00742
37	3.398	600	4	360	0.01243	0.01289	0.01323	0.0135	12.432	12.885	13.229	13.498	10	-5E-6	-0.03894	-1E-6	-0.00742
38	3.398	600	4	370	0.01244	0.01289	0.01323	0.0135	12.437	12.888	13.233	13.499	10	-5E-6	-0.03894	-2E-6	-0.01484
39	3.398	600	4	380	0.01244	0.01289	0.01324	0.0135	12.442	12.891	13.235	13.501	10	-6E-6	-0.04673	-1E-6	-0.00742
40	3.398	600	4	390	0.01245	0.0129	0.01324	0.0135	12.448	12.895	13.237	13.502	10	-6E-6	-0.04673	-3E-6	-0.02226
41	3.398	600	4	400	0.01245	0.0129	0.01324	0.01351	12.454	12.902	13.241	13.505	10	-8E-6	-0.06231	-2E-6	-0.01484
42	3.398	600	4	410	0.01246	0.01291	0.01324	0.01351	12.462	12.906	13.244	13.507	10	-5E-6	-0.03894	-2E-6	-0.01484
43	3.398	600	4	420	0.01247	0.01291	0.01325	0.01351	12.467	12.912	13.247	13.509	10	-7E-6	-0.05452	-2E-6	-0.01484
44	3.398	600	4	430	0.01247	0.01292	0.01325	0.01351	12.474	12.916	13.25	13.511	10	-8E-6	-0.06231	-2E-6	-0.01484
45	3.398	600	4	440	0.01248	0.01292	0.01325	0.01351	12.48	12.923	13.254	13.513	10	-7E-6	-0.05452	-4E-6	-0.02967
46	3.398	600	4	450	0.01249	0.01293	0.01326	0.01352	12.487	12.93	13.259	13.517	10	-5E-6	-0.06231	-4E-6	-0.02967
47	3.398	600	4	460	0.0125	0.01294	0.01326	0.01352	12.495	12.936	13.264	13.521	10	-7E-6	-0.05452	-3E-6	-0.02226
48	3.398	600	4	470	0.0125	0.01294	0.01327	0.01352	12.502	12.942	13.269	13.524	10	-8E-6	-0.06231	-4E-6	-0.02967
49	3.398	600	4	480	0.01251	0.01295	0.01327	0.01353	12.51	12.949	13.274	13.528	10	-7E-6	-0.05452	-4E-6	-0.02967

图 12: 发射电流原始数据 1

3.398	600	4	490	0.01252	0.01296	0.01328	0.01353	12.517	12.955	13.278	13.532	10	-8E-6	-0.06231	-4E-6	-0.02967
3.398	600	4	500	0.01253	0.01296	0.01328	0.01354	12.525	12.964	13.283	13.536	10	-9E-6	-0.07009	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	510	0.01253	0.01297	0.01329	0.01354	12.534	12.971	13.289	13.541	10	-1.1E-5	-0.08567	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	520	0.01255	0.01298	0.01329	0.01355	12.545	12.977	13.294	13.546	10	-2.7E-5	-0.21028	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	530	0.01257	0.01298	0.0133	0.01355	12.572	12.983	13.301	13.552	10	-2.9E-5	-0.22586	-9E-5	-0.21513
3.398	600	4	540	0.0126	0.01299	0.01331	0.01358	12.601	12.991	13.307	13.581	10	-3.7E-5	-0.28816	1.9E-5	0.14095
3.398	600	4	550	0.01264	0.013	0.01331	0.01366	12.638	12.997	13.314	13.562	10	-4.5E-5	-0.35047	-4E-6	-0.02967
3.398	600	4	560	0.01268	0.013	0.01332	0.01357	12.683	13.003	13.319	13.566	10	-4.4E-5	-0.34268	-7E-6	-0.05193
3.398	600	4	570	0.01273	0.01301	0.01333	0.01357	12.727	13.011	13.327	13.573	10	-3E-5	-0.23364	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	580	0.01276	0.01302	0.01333	0.01358	12.757	13.017	13.334	13.578	10	3E-6	0.02336	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	590	0.01275	0.01303	0.01334	0.01358	12.754	13.026	13.34	13.583	10	8E-5	0.62305	-9E-6	-0.06677
3.398	600	4	600	0.01267	0.01303	0.01335	0.01359	12.674	13.034	13.347	13.592	10	1.56E-4	1.21495	-4E-6	-0.02967
3.398	600	4	610	0.01252	0.01304	0.01335	0.0136	12.518	13.041	13.35	13.596	10	2.53E-4	1.9704	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	620	0.01227	0.01305	0.01336	0.0136	12.265	13.048	13.359	13.601	10	4E-4	3.11556	-9E-6	-0.06677
3.398	600	4	630	0.01187	0.01306	0.01337	0.01361	11.865	13.053	13.367	13.61	10	5.65E-4	4.40031	-3E-6	-0.03709
3.398	600	4	640	0.0113	0.01306	0.01337	0.01362	11.3	13.063	13.373	13.615	10	7.61E-4	5.92679	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	650	0.01054	0.01307	0.01338	0.01362	10.539	13.071	13.381	13.621	10	8.62E-4	6.7134	-8E-6	-0.05935
3.398	600	4	660	0.00968	0.01308	0.01339	0.01363	9.677	13.08	13.385	13.629	10	8.81E-4	6.86137	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	670	0.0088	0.01309	0.01339	0.01364	8.796	13.089	13.393	13.635	10	8.85E-4	6.68888	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	680	0.00794	0.0131	0.0134	0.01364	7.941	13.098	13.401	13.64	10	8.87E-4	6.28505	-8E-6	-0.05935
3.398	600	4	690	0.00708	0.01311	0.01345	0.01365	7.134	13.107	13.405	13.645	10	8.89E-4	5.8891	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	700	0.00637	0.01312	0.01341	0.01365	6.365	13.117	13.411	13.654	10	7.11E-4	5.57338	-4E-6	-0.04451
3.398	600	4	710	0.00565	0.01313	0.01342	0.01366	5.654	13.125	13.417	13.66	10	6.6E-4	5.14019	-8E-6	-0.05935
3.398	600	4	720	0.00499	0.01314	0.01343	0.01367	4.994	13.139	13.426	13.668	10	5.8E-4	4.57173	-7E-6	-0.05193
3.398	600	4	730	0.00441	0.01315	0.01343	0.01368	4.414	13.153	13.433	13.675	10	5.04E-4	3.92523	-4E-6	-0.02967
3.398	600	4	740	0.00391	0.01319	0.01344	0.01368	3.91	13.185	13.438	13.679	10	4.28E-4	3.33333	-8E-6	-0.05935
3.398	600	4	750	0.00348	0.01321	0.01344	0.01369	3.482	13.211	13.444	13.687	10	3.62E-4	2.81931	-9E-6	-0.03709
3.398	600	4	760	0.00312	0.01324	0.01345	0.01369	3.12	13.244	13.451	13.692	10	2.67E-4	2.07944	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	770	0.00285	0.01325	0.01345	0.0137	2.823	13.269	13.458	13.691	10	2.62E-4	1.82279	-4E-6	-0.02967
3.398	600	4	780	0.00263	0.01335	0.01347	0.0137	2.628	13.334	13.468	13.704	10	1.86E-4	1.4466	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	790	0.00244	0.01342	0.01347	0.01371	2.442	13.42	13.474	13.71	10	1.5E-4	1.16822	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	800	0.00229	0.01342	0.01348	0.01372	2.292	13.422	13.482	13.715	10	1.25E-4	0.97352	-8E-6	-0.05935
3.398	600	4	810	0.00217	0.01332	0.01349	0.01372	2.167	13.319	13.488	13.723	10	1.05E-4	0.81776	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	820	0.00206	0.01303	0.0135	0.01373	2.062	13.03	13.498	13.729	10	9.3E-5	0.7243	-4E-6	-0.02967
3.398	600	4	830	0.00197	0.01247	0.01351	0.01373	1.999	12.468	13.508	13.733	10	7.8E-5	0.60748	-7E-6	-0.05193
3.398	600	4	840	0.00189	0.01173	0.01374	0.01374	1.891	11.78	13.517	13.74	10	6.5E-5	0.53735	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	850	0.00182	0.01093	0.01352	0.01375	1.822	10.933	13.524	13.741	10	6E-5	0.46752	-5E-6	-0.03709
3.398	600	4	860	0.00176	0.01005	0.01354	0.01375	1.762	10.053	13.539	13.753	10	5.3E-5	0.41277	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	870	0.00171	0.00916	0.01355	0.01376	1.709	9.156	13.551	13.759	10	4.3E-5	0.33489	-7E-6	-0.05193
3.398	600	4	880	0.00167	0.00825	0.01356	0.01377	1.666	8.253	13.564	13.766	10	4.1E-5	0.31931	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	890	0.00163	0.00758	0.01358	0.01377	1.625	7.579	13.577	13.772	10	3.9E-5	0.30374	-9E-6	-0.06677
3.398	600	4	900	0.00159	0.00702	0.01361	0.01378	1.586	7.023	13.61	13.781	10	3.8E-5	0.29595	-6E-6	-0.04451
3.398	600	4	910	0.00155	0.00645	0.01363	0.01379	1.548	6.408	13.634	13.787	10	3.7E-5	0.28816	-6E-6	-0.06677
3.398	600	4	920	0.00151	0.00588	0.01365	0.0138	1.511	5.803	13.663	13.793	10	3.6E-5	0.28031	-5E-6	-0.05193
3.398	600	4	930	0.00148	0.00536	0.0137	0.0138	1.475	5.357	13.696	13.804	10	3.3E-5	0.25701	-7E-6	-0.05193
3.398	600	4	940	0.00144	0.00494	0.01374	0.01381	1.442	4.94	13.74	13.814	10	3.1E-5	0.24403	-6E-6	-0.06677
3.398	600	4	950	0.00141	0.00458	0.01379	0.01382	1.411	4.578	13.786	13.82	10	3.3E-5	0.25701	-1E-5	-0.07418
3.398	600	4	960	0.00138	0.00427	0.01379	0.01383	1.378	4.274	13.791	13.83	10	2.7E-5	0.21028	-6E-6	-0.04451

98	3.398	600	4	970	0.00135	0.00402	0.01364	0.01384	1.351	4.02	13.639	13.836	10	2.8E-5	0.21807	-1.2E-5	-0.08902
99	3.398	600	4	980	0.00132	0.00382	0.01316	0.01385	1.323	3.815	13.162	13.848	10	2.8E-5	0.21807	-1.1E-5	-0.0816
100	3.398	600	4	990	0.0013	0.00364	0.01244	0.01386	1.295	3.644	12.438	13.859	10	3.1E-5	0.24143	-1E-5	-0.07418
101	3.398	600	4	1000	0.00126	0.00351	0.01155	0.01387	1.264	3.508	11.553	13.869	10	3.2E-5	0.24922	-2.6E-5	-0.19288
102	3.398	600	4	1010	0.00123	0.0034	0.01065	0.0139	1.232	3.397	10.648	13.895	10	3E-5	0.23364	-2.4E-5	-0.17894
103	3.398	600	4	1020	0.0012	0.00331	0.01013	0.01392	1.202	3.308	10.127	13.919	10	3.2E-5	0.24922	-3E-5	-0.22255
104	3.398	600	4	1030	0.00117	0.00324	0.00951	0.01395	1.17	3.235	9.506	13.949	10	3E-5	0.23364	-4.1E-5	-0.30415
105	3.398	600	4	1040	0.00114	0.00317	0.00886	0.01399	1.14	3.172	8.857	13.99	10	3.1E-5	0.24143	-4.5E-5	-0.33383
106	3.398	600	4	1050	0.00111	0.00312	0.00823	0.01404	1.109	3.115	8.233	14.035	10	2.8E-5	0.21807	-4.5E-5	-0.33383
107	3.398	600	4	1060	0.00108	0.00306	0.00765	0.01408	1.081	3.063	7.65	14.08	10	2.7E-5	0.21028	-3.4E-5	-0.25223
108	3.398	600	4	1070	0.00105	0.00302	0.00708	0.01411	1.054	3.015	7.078	14.114	10	2.8E-5	0.21807	3E-6	0.02226
109	3.398	600	4	1080	0.00103	0.00297	0.00658	0.01411	1.026	2.969	6.579	14.111	10	2.6E-5	0.20249	5.6E-5	0.41543
110	3.398	600	4	1090	0.001	0.00293	0.00616	0.01406	1	2.927	6.164	14.055	10	2.5E-5	0.1947	1.68E-4	1.24629
111	3.398	600	4	1100	9.75E-4	0.00289	0.00587	0.01389	0.975	2.888	5.871	13.887	10	2.5E-5	0.1947	4.13E-4	3.0638
112	3.398	600	4	1110	9.5E-4	0.00285	0.00565	0.01347	0.95	2.853	5.647	13.474	10	2.3E-5	0.17913	7.25E-4	5.37834
113	3.398	600	4	1120	9.27E-4	0.00282	0.00548	0.01275	0.927	2.819	5.48	12.749	10	2.3E-5	0.17913	8.61E-4	6.38724
114	3.398	600	4	1130	9.04E-4	0.00278	0.00538	0.01189	0.904	2.779	5.376	11.888	10	2.3E-5	0.17913	9.37E-4	6.95104
115	3.398	600	4	1140	8.81E-4	0.00274	0.00527	0.01095	0.891	2.744	5.267	10.951	10	2.2E-5	0.17134	8.67E-4	6.43175
116	3.398	600	4	1150	8.59E-4	0.00272	0.00519	0.01008	0.859	2.715	5.192	10.084	10	2.1E-5	0.16355	8.38E-4	6.21662
117	3.398	600	4	1160	8.38E-4	0.00269	0.00514	0.00925	0.838	2.688	5.135	9.246	10	2.2E-5	0.17134	1.22E-4	0.90504
118	3.398	600	4	1170	8.16E-4	0.00266	0.00509	0.00912	0.816	2.66	5.093	9.124	10	2E-5	0.15576	3.14E-4	2.32938
119	3.398	600	4	1180	7.96E-4	0.00263	0.00506	0.00881	0.796	2.627	5.059	8.81	10	2.1E-5	0.16355	3.74E-4	2.77448
120	3.398	600	4	1190	7.75E-4	0.00259	0.00502	0.00844	0.775	2.59	5.023	8.436	10	1.8E-5	0.14019	3.77E-4	2.79674
121	3.398	600	4	1200	7.57E-4	0.00256	0.00499	0.00806	0.757	2.56	4.986	8.059	10	2E-5	0.15576	3.45E-4	2.55935
122	3.398	600	4	1210	7.37E-4	0.00253	0.00494	0.00771	0.737	2.533	4.944	7.714	10	2E-5	0.15576	3.14E-4	2.32938
123	3.398	600	4	1220	7.17E-4	0.00251	0.0049	0.0074	0.717	2.508	4.896	7.4	10	1.9E-5	0.14798	2.63E-4	1.95104
124	3.399	600	4	1230	6.98E-4	0.00248	0.00484	0.00714	0.698	2.479	4.84	7.137	10	1.9E-5	0.14798	2.26E-4	1.67656
125	3.399	600	4	1240	6.79E-4	0.00245	0.00478	0.00691	0.679	2.449	4.777	6.911	10	2E-5	0.15576	2.12E-4	1.5727
126	3.399	600	4	1250	6.59E-4	0.00242	0.00471	0.0067	0.659	2.418	4.706	6.699	10	1.8E-5	0.14019	2.12E-4	1.5727
127	3.399	600	4	1260	6.41E-4	0.00239	0.00463	0.00649	0.641	2.387	4.632	6.487	10	1.9E-5	0.14798	1.91E-4	1.41691
128	3.399	600	4	1270	6.22E-4	0.00235	0.00456	0.0063	0.622	2.354	4.555	6.296	10	1.7E-5	0.1324	1.41E-4	1.04599
129	3.399	600	4	1280	6.03E-4	0.00232	0.00448	0.00616	0.605	2.319	4.476	6.155	10	1.9E-5	0.14798	7.9E-5	0.58605
130	3.399	600	4	1290	5.86E-4	0.00228	0.0044	0.00608	0.586	2.283	4.398	6.076	10	1.6E-5	0.12461	-2.9E-5	-0.21513
131	3.399	600	4	1300	5.7E-4	0.00225	0.00432	0.00611	0.57	2.246	4.322	6.105	10	1.7E-5	0.1324	2.2E-5	0.1632
132	3.399	600	4	1310	5.53E-4	0.00221	0.00425	0.00608	0.553	2.208	4.247	6.083	10	1.9E-5	0.14798	3.3E-5	0.24481
133	3.399	600	4	1320	5.34E-4	0.00217	0.00417	0.00605	0.534	2.169	4.174	6.05	10	5E-6	0.03894	3.4E-5	0.25223
134	3.399	600	4	1330	5.29E-4	0.00213	0.0041	0.00602	0.529	2.129	4.099	6.016	10	1.7E-5	0.1324	3.4E-5	0.25223
135	3.399	600	4	1340	5.12E-4	0.00209	0.00402	0.00598	0.512	2.09	4.023	5.982	10	2.8E-5	0.21807	3.5E-5	0.25964
136	3.399	600	4	1350	4.84E-4	0.00205	0.00395	0.00595	0.484	2.051	3.947	5.947	10	6E-6	0.04673	3.7E-5	0.27448
137	3.399	600	4	1360	4.78E-4	0.00202	0.00387	0.00591	0.478	2.015	3.871	5.91	10	1.6E-5	0.12461	3E-6	0.02226
138	3.399	600	4	1370	4.62E-4	0.00198	0.0038	0.00591	0.462	1.979	3.797	5.907	10	1.6E-5	0.12461	4E-6	0.02967
139	3.399	600	4	1380	4.46E-4	0.00194	0.00375	0.0059	0.446	1.943	3.732	5.903	10	1.6E-5	0.12461	-2E-6	-0.01484
140	3.399	600	4	1390	4.3E-4	0.00191	0.00375	0.00591	0.43	1.909	3.734	5.905	10	1.6E-5	0.12461	-4E-6	-0.02967
141	3.399	600	4	1400	4.14E-4	0.00189	0.00376	0.00591	0.414	1.885	3.759	5.909	10	1.5E-5	0.11682	-3E-6	-0.02226
142	3.399	600	4	1410	3.99E-4	0.00188	0.00377	0.00591	0.399	1.884	3.765	5.912	10	1.4E-5	0.10903	-3E-6	-0.02226
143	3.399	600	4	1420	3.85E-4	0.00188	0.00377	0.00592	0.385	1.884	3.769	5.915	10	1.4E-5	0.10903	-2E-6	-0.01484
144	3.399	600	4	1430	3.71E-4	0.00189	0.00377	0.00592	0.371	1.885	3.774	5.917	10	4E-6	0.03115	-2E-6	-0.01484
145	3.399	600	4	1440	3.67E-4	0.00189	0.00378	0.00592	0.367	1.886	3.78	5.919	10	-2E-6	-0.01558	-2E-6	-0.01484

图 14: 发射电流原始数据 3