

He-Ne 管正柱区鞘层及电子温度的计算

金 维 睦

(四川师范学院物理系)

提要: 本文计算小孔径 He-Ne 管等离子体鞘层及电子温度, 并对其电势及厚度的公式进行了讨论; 计算的正柱区伏-安特性与实验符合。

Theoretical calculation of sheath and electron temperature in He-Ne laser plasma column

Jin Weimu

(Department of Physics, Sichuan Teachers College)

Abstract: This paper deals with the properties of narrow He-Ne discharge plasma in which the wall condition is considered. Taking into consideration the wall sheath at various currents, the electron temperature, spatial density distribution and voltage-current characteristics are calculated. The calculation agrees with the experimental results.

一、问题的提出

我们曾发现一批腔长 250mm、毛细孔径为 1.03~1.06mm 的 He-Ne 激光管, 它们的输出特性强烈地依赖放电电流, 用光谱技术测量得到的电子温度^[1]也比按 T. R. Young^[2]理论的计算值偏高。反复试验和仔细分析后, 确认这是等离子体正柱区鞘层效应所致。

1979年 D. Schuöcher 等^[3]曾对波导型激光管在考虑了鞘层效应后计算了 He-Ne 管正柱区的电子温度。该文引用了 1951年 F. Wenzel 的管壁电势(V_w)和鞘层厚(d)的计算式, 表示式为:

$$V_w = \frac{kT_-}{e} \ln \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\bar{m}^+}{m_-} \right)^{1/2} \right\} \quad (1)$$

$$d \approx 11\lambda_D \quad \lambda_D = \sqrt{\frac{kT_-}{4\pi n e^2}} \quad (2)$$

式中, λ_D 为德拜长度, 其余符号与通常文献相同。

我们按[3]对样管 No. 718 进行计算, 结果示于表 1。发现三方面可疑: (1)按鞘层理论, 在大放电电流下, 鞘层变薄, 电子温度应逼近于不计鞘层的 T. R. Young 的理论值, 但他们的结果无此种逼近; (2)计算的伏-安特性与实测相差甚远; (3)电子温度的计算值与光谱技术的实测值不符。矛盾的焦点是 F. Wenzel 公式应该修改。

收稿日期: 1984年9月12日。

二、鞘层计算公式和讨论

为了使计算结果与实测相符,我们取以下的鞘层计算式:

$$V_w = \frac{kT_-}{e} \ln \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\bar{m}_+}{m_-} \right)^{1/2} \right\}^{T_-/\eta} \quad (3)$$

$$d = 3\lambda_D \quad (4)$$

式中 η 是在充气比一定下与管径成比例的常数。若 $P_{He}/P_{Ne}=7$, 管径为 1.04 mm 时, $\eta \approx 10.4$ 。

改用 (3)、(4) 后,按文献 [3] 重新对 No. 718 管进行计算,结果列于表 2。

下面,就 (3)、(4) 式与 F. Wenzel 的 (1)、(2) 式作一对比分析:

1. 如果象通常假定那样,正柱区中电

子有 Maxwell 分布,则由 (1) 式,鞘层两侧的电子浓度相差 118.4 倍 ($P_{He}/P_{Ne}=7$),且与电子温度、管径大小都无关。这是一个相当勉强的约定。若取 (3) 式,则鞘层两端的电子浓度比,将随电子温度减小以及管径增大而降低,这样就自然地顾及了管径增大而鞘层影响变弱的效应。当管径大到一定程度,可以不计鞘层,采用 R. T. Young 的理论。为了验证此推断,我们计算了 No. 494 管。此时, η 值按管径增大比例取为 $10.99 \approx 11.0$,其结果示于表 3,与实测结果符合很好。

2. 按 (3) 式,电子速度不再符合 Maxwell 分布。事实正是如此。早在 50 年代为了解释等离子探针测出的电流特性发生弯曲,Давыдов、Драйвестейн^[4] 曾对气体放电等离子体的动力学方程进行近似求解,指出

表 1 No. 718 管取 F. Wenzel 式的计算结果

kT_- (eV)	$\exp(eV_w/kT_-)$	d ($\times 10^{-4}$ m)	n_0 ($\times 10^{17}$ m $^{-3}$)	I (mA)	E (kV/m)
6.5	118.4	2.81	7.54	2.45	7.29
6.8	118.4	3.17	5.94	1.56	8.09
6.98	118.4	3.34	5.36	1.26	8.52
7.0	118.4	3.35	5.34	1.24	8.57
7.2	118.4	3.52	4.90	1.00	9.04
7.4	118.4	3.67	4.55	0.81	9.53
7.7	118.4	3.86	4.19	0.62	10.27
8.0	118.4	4.02	3.95	0.49	11.03

管子参量: $P_{总}=3.33$ Torr, $P_{He}/P_{Ne}=7$, $R=0.52$ mm, $l=185$ mm; 最佳工作电流: 5.5 mA; 光谱检测电子温度: 7.08 eV。

表 2 No. 718 管的计算结果

kT_- (eV)	$\exp(eV_w/kT_-)$	d ($\times 10^{-4}$ m)	n_{R-d} ($\times 10^{17}$ m $^{-3}$)	n_0 ($\times 10^{17}$ m $^{-3}$)	I (mA)	E (kV/m)
6.5	20.2	0.13	189	1903	—	7.29
6.8	22.66	0.69	7.04	32.4	24.2	8.09
6.98	24.61	0.97	3.70	14.4	11.5	8.52
7.0	24.84	1.01	3.42	13.2	10.3	8.57
7.2	27.22	1.38	1.88	6.43	4.58	9.04
7.4	29.88	1.71	1.26	3.64	2.37	9.53
7.7	34.30	2.16	0.82	1.93	1.09	10.27
8.0	39.35	2.60	0.59	1.15	0.54	11.03

管子参量: $P_{总}=3.33$ Torr, $P_{He}/P_{Ne}=7$, $R=0.52$ mm, $l=185$ mm; 最佳工作电流: 5.5 mA; 光谱检测电子温度: 最佳工作电流下的电子温度计算值 7.1 eV。

表3 No. 494管的计算结果

kT_- (eV)	$\exp(eV_w/kT_-)$	\bar{d} ($\times 10^{-4}\text{m}$)	n_{R-d} ($\times 10^{17}\text{m}^{-3}$)	n_0 ($\times 10^{17}\text{m}^{-3}$)	I (mA)	E (kV/m)
6.5	16.8	0.30	36.0	252	—	7.29
6.8	19.12	0.85	4.69	21.9	19.5	8.09
6.98	20.67	1.11	2.82	12.5	10.2	8.52
7.0	20.87	1.14	2.68	12.4	9.8	8.57
7.2	22.75	1.50	1.59	6.4	4.74	9.04
7.4	24.83	1.81	1.12	3.89	2.52	9.53
7.7	28.27	2.24	0.76	2.15	1.29	10.27
8.0	32.19	2.47	0.65	1.75	1.02	11.03

管子参量: $P\bar{d}=3.57\text{Torr}\cdot\text{mm}$, $E=0.55\text{mm}$, $P_{\text{He}}/P_{\text{Ne}}=7$, $l=185\text{mm}$; 最佳工作电流 6mA ; 光谱检测电子温度 7.0eV , 最佳工作电流下的电子温度计算值 7.05eV ;

$$V_w = \frac{kT_-}{e} \ln \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\bar{m}_+}{\bar{m}_-} \right)^{1/2} \right\}^{kT_- - 11.0} \quad \bar{d} \sim 3\lambda_{D0}$$

了电子分布曲线的高能端比 Maxwell 分布要降落得更陡更快。而壁电势正是决定于这些高能端电子。(3)式的物理实质即用一等效的电子温度 T^2/η 去校正电子偏离 Maxwell 分布的影响。按等离子体动力学的细致分析^[5], 在放电管中当外施电场超过某一临界场强, 或计入电子使原子激发的各样非弹性碰撞(等离子对辐射透明), 都会导致电子偏离 Maxwell 分布, 其影响均使电子分布函数的高能端被压低。对气体放电等离子体进行完全的动力学理论计算是极端复杂而

困难的, 不及引入唯象性拟合参量来得有效。

3. 文献[3]用(1)、(2)式对波导 He-Ne 管的计算结果, 在与实验的符合程度上仍然存在疑点。文中用两组数据($P=10\text{Torr}$, $r=0.5\text{mm}$; $P=10\text{Torr}$, $r=0.2\text{mm}$)计算的伏-安特性, 仅在电流大于 10mA 以后与实测一致性较好, 但在电流低于 5mA 时误差就很大(文中说是 15%)。当电流大时鞘层变薄(即鞘层效应微弱), 显然不能用此区域去论证计算可靠。因此, F. Wenzel 的鞘层计算式子对 He-Ne 管的适用性还应探讨。

由此我们认为, 正柱区电子温度依赖于放电电流。这正是管子输出功率特性对电流敏感的原因。为了削弱这种影响, 管子充气条件应设计在电子温度与放电电流相依的平直段。依此关系做的一批管子, 其功率和功率稳定度令人满意。

激光物理研究室的同志, 在实验上进行了协助, 包明、吴苏川同志参与了部分计算, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 金维睦;《仪器制造》, 1982, No. 3, 21.
- [2] Young R. T.; *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**, 2324.
- [3] D. Schuocker et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, **QE-15**, No. 4, 232.

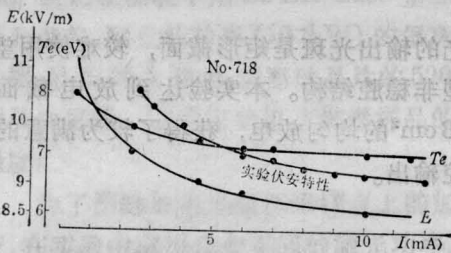


图 1

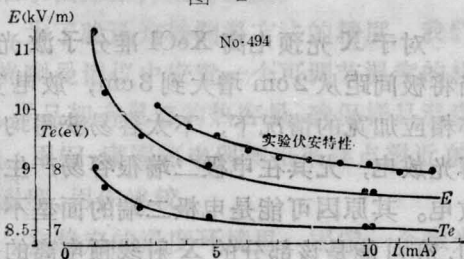


图 2