

功率连续可调的折迭式二氧化碳激光器电源

张新昌 孙孟嘉

(山西大学)

提 要

本文以二氧化碳激光器为例,考虑到激光管放电的伏安特性,讨论了电流(因而激光输出功率)大范围连续可调的偶数折迭气体激光电源的合理设计,给出了折迭式二氧化碳激光器电源的典型电路。

激光器的输出功率与激活介质长度成比例。为了获得高的功率输出又不增加器件的纵向尺寸,器件往往采用折迭式结构。与单管器件相比,折迭式多管激光器件不仅对光腔设计,而且对电源系统都提出了更为严格的要求。电源必须保证各激光管都能同时稳定放电并能一致地改变放电电流;放电电流(因而激光输出功率)应该大范围连续可调,使激光器能在不同的功率水平上工作。此外,还应要求无用功耗小、效率高、体积小。

简单地用一套直流高压电源,分别通过限流电阻使各激光管形成稳定的并联放电是困难的[图 1(b)]。这是因为激光管放电的负阻特性与电源内阻将造成各放电管之间的相互影响。即使 $R_1=R_2$, 两激光管 L_1 与 L_2 几何尺寸、充气比例和气压也完全相同,仍不可避免其放电参数有涨落。若其中一根激光管的电流有微量增加使总电流增加,通过电源内阻的作用,馈给另一根激光管的电压便减小。由于气体激光管放电具有负阻特性,电流增大的激光管直流阻抗减小,电流将愈趋增大;而电流减小的激光管其直流阻抗增

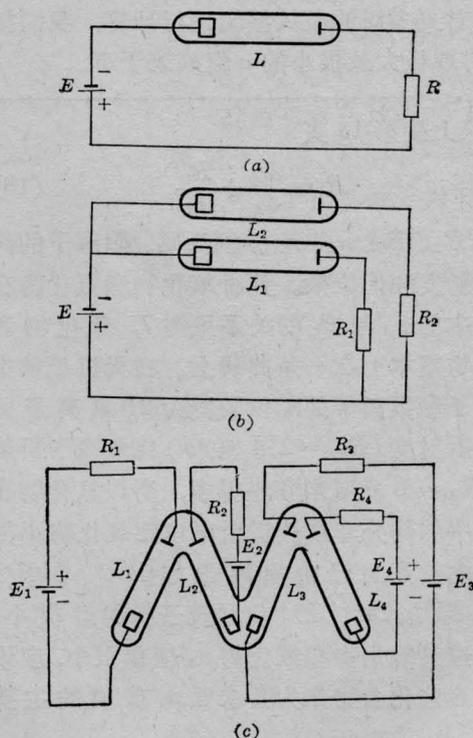


图 1

(a) 单管简单电源; (b) 不能用简单电源实现稳定的并联放电; (c) 折迭式激光管用多个独立电源分别供电

收稿日期: 1978年10月27日。

加, 电流则进一步减小。如此下去, 最终导致一管放电, 而另一管熄灭。为了避开各支路的相互影响, 折迭式二氧化碳激光器各激光管多采用由独立电源分别供电的办法。例如一个M型四折迭激光器就得四套电源(图1(c))。这不仅设备庞大, 而且各电源不能有共同的接地点, 给高压绝缘与安全操作带来困难。

为了调节激光功率, 现都采用调节供电

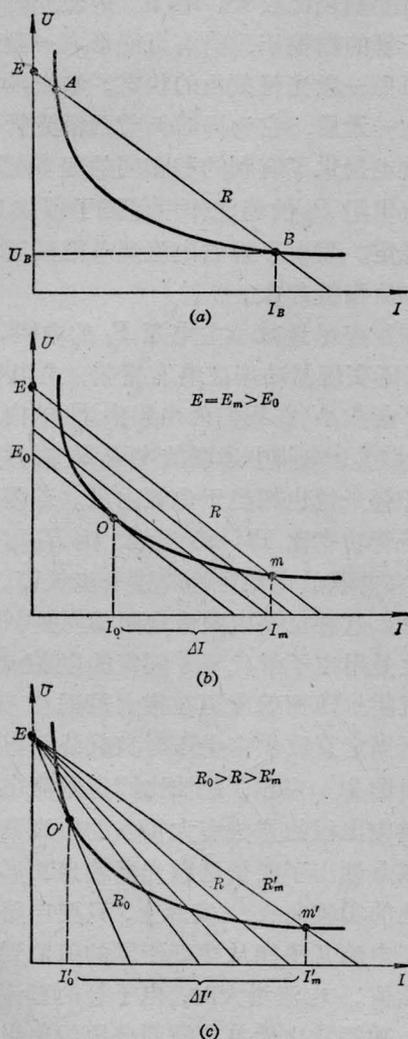


图2 伏安特性曲线及负载线相对于伏安特性曲线位置的变化

(a) 交点B是稳定工作点; (b) R固定, 改变电压相当于负载线平移; (c) E固定, 改变阻抗相当于负载线斜率变化, $\Delta I' > \Delta I$

电压的办法来改变放电电流。这需要有另外的调压器或可控硅调压器。气体电子学原理指出^[1]: 气体放电的稳定性条件是 $R_i + R > 0$ 。其中 R 是外串电阻, R_i 是激光管的动态负阻。用图形表示, 就是以 R 所做的负载线必须和激光管的伏安特性曲线相交 [图2(a)]。对于固定限流电阻情况, 改变电压使放电电流改变, 相当于负载线平移 [图2(b)]。负载线和伏安特性曲线的切点 O 所对应的电流 I_0 就是所能调到的最小放电电流。如果 R 取值较小, 则 I_0 就大; 若 R 取值较大, I_0 虽可减小, 但要增大放电电流则需要很高的电源电压, 限流电阻上无用功耗也增大, 不经济。因此这种简单电路的电流调节范围受到了较大的限制。

我们设计的电源克服了上述两大缺点。其简单原理电路示于图3。电源 E_1 提供激光管正常工作时所需要的电流, 称主电源。它是高压变压器次级交流电压经桥式整流在电容器 C_1 上获得的; E_2 是一个负高压电源, 它与主电源 E_1 迭加, 经大阻值电阻 R_2 使激光管起辉, 并产生一个稳定的小电流预放电, 称为触发电源。它是同一高压变压器次级交流电压经半波整流在电容器 C_3 上获得的(见图11)。电子管 G_1 、 G_2 分别与一个激光管串联, 构成阻抗调节器。同时调节电子管 G_1 和 G_2 的栅偏压, 就可同时调节两激光管的电流。

这种电源是怎样克服了上述缺点的呢?

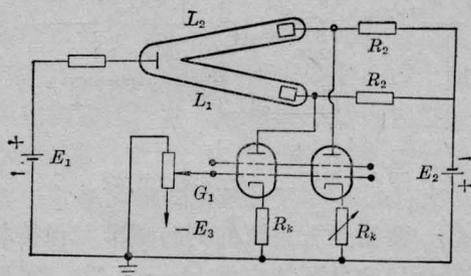


图3 功率连续可调折迭式气体激光电源的简单原理图

(1) 要使两根激光管能形成稳定的并联放电,各支路的电流必须有高度的稳定性。因此关键之一在于提高外串电路的动态阻抗。

文献[2]指出,采用电子管与晶体管组合的阻抗调节器,可给出百兆欧姆数量级的动态阻抗。图4举出了我国激光工作者设计的与此类似的电路,它具有良好的电流稳定性。为了避免多极管屏栅流对电流稳定性的不良影响,文献[2]的作者主张用三极电子管。但三极管本身的稳流作用是很差的,电流的稳定性主要由晶体管电路来保证。该文作者也未给出折迭式激光电源设计。我们用四极管作阻抗管,它有几乎与横坐标轴平行的板极特性曲线,从耐压、功率、体积等方面考虑选管型为TM-85。其动态阻抗 $R_{ie} = \Delta u_a / \Delta I_a \approx 2.5$ 兆欧。加电流负反馈后等效动态阻抗 $R_D = R_{ie}(1 + SR_k)^{[3]}$ 。TM-85管 $S = 22$ 毫安/伏,阴极电阻 R_k 取值1千欧, R_D 可达55兆欧以上。电子管在低屏栅压(250伏)下工作,屏栅流小于1毫安,对电路性能并无显著影响。屏栅极与地之间接旁路电容 C ,消除纹波电压的影响。屏栅电路交流阻抗应小于其直流阻抗, $1/\omega C < 250/1 \times 10^{-3}$, 计算出 $C > 6400$ 微微法。实验证明,省去晶体管电路,电路更简单,稳流效果仍十分良好。

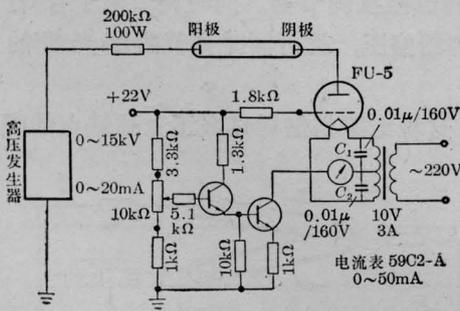


图4 单管二氧化碳激光电源

(2) 两激光管电流的同时调节与保持相等是实现稳定并联放电的另一关键。实际上,对两管放电相互影响起作用的是两管的电流波动的差值,必须保证在调节电流过程

中始终满足 $\Delta I_1 - \Delta I_2 \approx 0$ 这一条件,才能防止两管之间产生显著的有害反馈。故电路中两电子管的栅偏压由同一电位器调节,其中一个电子管阴极电阻 R_k 尚需加适当细调。

(3) 触发电源 E_2 和主电源 E_1 串联,通过大阻值电阻 R_2 使两管形成小电流的预放电很有必要。因为小电流对应于电子管伏安特性曲线的上升部分,这时动态阻抗较小,稳流作用也较差。而且,在小电流时两管电流的相对差别也比较大。因此,即使同时调节两电子管的栅偏压,仍有可能形成一激光管放电而另一激光管截止的状态。触发电源解决了这一矛盾,它为同时调节两激光管稳定并联放电提供了有利的和相同的起始条件。大阻值电阻 R_2 的稳流作用保证了预放电电流的稳定。而电子管的电流调节范围应和预放电电流衔接起来。

(4) 应尽量减小主电源 E_1 的内阻。为此,高压变压器功率应略有富裕,主电容 C_1 容量不应太小(在我们的电路中 E_1 的内阻约7.5千欧)。电路中串联的电阻 R_1 对激光管与电子管来说也相当于电源内阻。若阻抗调节电子管功率比TM-85更大,则 R_1 可进一步减小,并联放电稳定性将进一步提高。

(5) 这种电路中限流电阻 R_1 用得很小,实际上是用电子管代替了固定的限流电阻。其直流阻抗随栅偏压可在很大范围内变化,相当于固定直流供电电压时负载线斜率的变化。由图2(c)看出,此法比固定限流电阻而改变供电电压的方法有大得多的电流调节范围。图5画出了两折迭激光器输出功率随电流变化的实验曲线。实际上,只要电路设计适当,电流几乎能从接近于零的值调到器件的最佳值。电流增大时,电子管的直流阻抗减小,功耗就比简单电源固定限流电阻上的功耗小很多。

总之,经济省电、调节方便、稳定可靠、操作安全、体积较小便是这种电路特有的优点。

以下讨论电源设计和使用的几个主要问

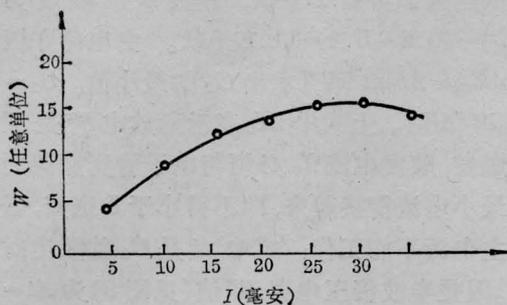


图5 激光功率随放电电流的变化大范围可调

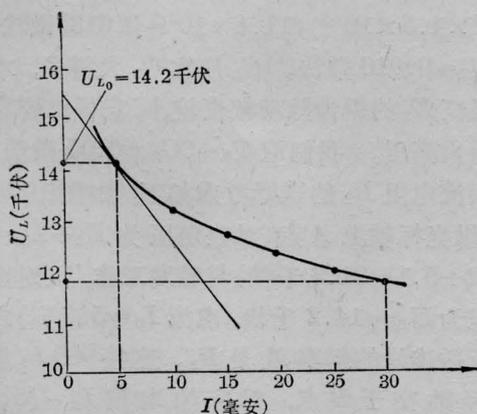


图6 实测两折迭二氧化碳激光管单管伏安特性

L —管长(2米), Ld —放电长度(1.73米); P —气压(13托); d —管径(18.5毫米)

题。

1. 主电源

(1) 主电源电压 E_1 的选择

E_1 的大小应根据激光管伏安特性曲线, 视工作需要而定。我们实验中所用两折迭激光管单管伏安特性如图6所示。首先, 根据激光器工作需要确定电子管调节电流的起始值 I_0 , 从伏安特性曲线上找出与 I_0 对应的 U_{L_0} 值。必须保证 $E_1 > U_{L_0}$ 。 I_0 并不是选得越小越好。因为在小电流状态, 电子管阻抗调节器的稳流性能较差, 两电子管参数与两激光管伏安特性的相对差异都较大, 降低了两管稳定并联放电的可靠性。我们选 $I_0 = 5$ 毫安, 由图6看出相应的 $U_{L_0} = 14.2$ 千伏。由 $E_1 = U_{R_1} + U_L + U_G \approx U_L + U_G$ (小电流时, U_{R_1}

可忽略)可知, $E_1 > 14.2$ 千伏, 高出的部分应近似等于电子管上的压降 U_G 。 U_G 的选择应考虑: (a) 在起始电流值 I_0 , TM-85 管的直流阻抗应大于激光管在此电流下负阻的绝对值, 以保证直流负载线能与激光管伏安特性曲线相交, 这正是稳定放电条件所要求的。在图6上 O 点作切线求出该点负阻值 R_{i0} (240 千欧), 因此, U_G 应大于 $I_0 R_{i0}$ (1.2 千伏)。 (b) 还必须考虑电源电压的波动。若 220 伏的供电电源变动 $\pm 5\%$, 则直流高压电源变动 ΔE_1 (约 ± 0.8 千伏)。考虑到供电电压变动 -5% 仍应能保证起始放电的稳定性, 应当令 $U_G = I_0 R_{i0} + \Delta E_1 = 1.2 + 0.8 = 2.0$ 千伏。于是, $E_1 = 14.2 + 2.0 = 16.2$ 千伏。

(2) 限流电阻 R_1 的选择

激光管上的电压降随放电电流增大而下降, 因此, 在主电源回路中串联一定数值的限流电阻仍然是必要的, 否则将 U_G 随放电电流的增加而增加, 使电子管阳极功耗超过允许值。由图6看出, 放电电流由 5 毫安增至最佳值时, U_L 从 14.2 千伏降至 11.8 千伏。因 $E_1 = U_{R_1} + U_L + U_G$, 若随电流的增加能使 $\Delta U_{R_1} > |\Delta U_L|$, U_G 方可随之减小。TM-85 的允许阳极功耗为 65 瓦。我们略留余地, 不使其超过 60 瓦, 则当电流等于最佳值 30 毫安时的最大允许电压 $U_G = 60/30 \times 10^{-3} = 2.0$ 千伏。考虑到电源电压允许波动 $\pm 5\%$ 。因此, 对正常电源电压 220 伏, 选 $U_G = 1.2$ 千伏。既能保证不超过电子管阳极功耗允许值 (对应于 $+5\%$ 的变化), 又能保证它正常工作 (对应于 -5% 的变化)。于是, $R_1 = (E_1 - U_L - U_G)/2I = (16.2 - 11.8 - 1.2) \times 10^3 / 2 \times 30 \times 10^{-3} = 54$ 千欧。式中分母为 $2I$ 是因为两激光管电流都流经 R_1 。从图7看出, 当电流继续增大时, 直线 2 趋向于和激光管伏安特性曲线 3 相交, U_G 迅速减小, 阴极电阻 R_k 上的电压降增大, 因此电子管所能调到的电流最大值总是小于直线 2 和曲线 3 交点对应的电流值。在我们的实验中所能调到的电

流最大值为 35 毫安(电压 220 伏时)。\$R_1\$ 所需的功率应为 \$[2 \times 35 \times 10^{-3}]^2 \times 54 \times 10^3 = 270\$ 瓦。我们取 300 瓦。实测 TM-85 管压降和相对应的电流, 画出阳极功耗如图 8 所示。

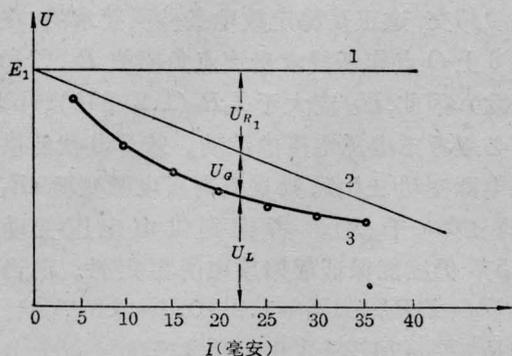


图 7 为保证电子管阳极功耗不超过允许值, 适当的限流电阻仍然是必要的

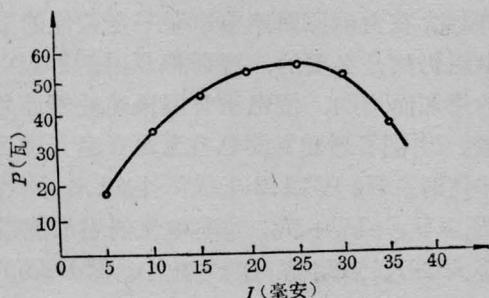


图 8 实测 TM-85 电子管阳极的功耗曲线

2. 触发电源电路设计

按经验数据, 二氧化碳激光管起辉电压与工作电压的比值大致为 3:2。按 \$I_0=5\$ 毫安时 \$U_{L_0}=14.2\$ 千伏考虑, 触发电压 \$E_1+E_2\$ 至少需要 \$14.2 \times 3/2 = 21.3\$ 千伏, 亦即需要 \$E_2=21.3-16.2=5.1\$ 千伏。这是靠选择 \$C_2, C_3\$ 保证的。由图 11 可知, 高压变压器次级电压在半周内直接给 \$C_2\$ 充电, 而在另半周内通过 \$C_2\$ 放电使 \$C_3\$ 充电。空载时 \$C_2, C_3\$ 都充到 \$\sqrt{2} u_2\$ 的负高压(\$u_2\$ 为变压器次级电压有效值), 而在有触发电流时, \$C_3\$ 上的锯齿电压(即 \$E_2\$)最大值不会超过 \$C_2\$ 上锯齿电压的最低值, 否则 \$D_6\$ 不导通。\$C_2\$ 上电压最高点为 \$\sqrt{2} u_2\$ (即一倍直流高压 16.2 千伏),

最低点为 \$E_2=5.1\$ 千伏, 锯齿纹波幅度为 \$\Delta E_{C_2}=16.2-5.1=11.1\$ 千伏。由电荷守恒 \$C_2 \Delta E_{C_2}=2I_0 \Delta t\$ 即可求出 \$C_2\$ 的最小值: \$C_2=2I_0 \Delta t / \Delta E_{C_2}\$。上式中 \$2I_0\$ 表示两放电管是同时触发; 触发电流 \$I_0\$ 必须与电子管所能调到的最小电流衔接起来, 即不得小于 5 毫安, 否则主电源不能工作; 式中 \$\Delta t\$ 是 \$C_2\$ 的放电时间。因是半波倍压电路, 粗估(见图 9)为 \$\Delta t = \frac{3}{4} \times \frac{1}{50} = 1.5 \times 10^{-2}\$ 秒。于是 \$C_2=(2 \times 5 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^{-2}) / 11.1 \times 10^3 = 0.0135\$ 微法。取 \$C_2=0.016\$ 微法。\$C_3\$ 应比 \$C_2\$ 大得多, 才能保证 \$E_2\$ 的锯齿脉动幅度较小, 获得比较稳定的负高压。我们取 \$C_3=3C_2 \approx 0.05\$ 微法。大限流电阻 \$R_2\$ 的选择考虑如下: 由图 10 可知, 纵坐标轴上 A 点(对应电压为 \$E_1+E_2=16.2+5.1=21.3\$ 千伏)与触发工作点(对应电压为 \$U_{L_0}=14.2\$ 千伏, 电流 \$I_0=5\$ 毫安)之间所做连线的斜率就是 \$R_2\$。连接 AO 与横坐标轴交于 B 点, 对应的电流 \$I_B=(5 \times 21.3) / (21.3-14.2)=15\$ 毫安。于是求得 \$R_2=21.3 / 1.5 \times 10^{-2} \approx 1.4\$ 兆欧。我们取标值 \$R_2=1.5\$ 兆欧。

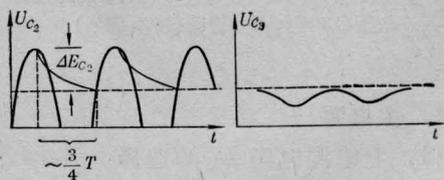


图 9 触发电路滤波电容 \$C_2, C_3\$ 上的电压波形

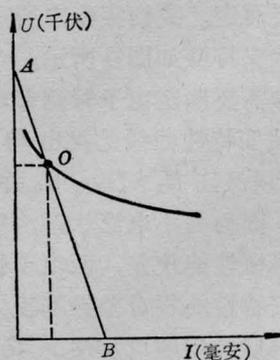


图 10 由激光管伏安特性曲线图中确定触发电路限流电阻的作图法

3. 电源的使用

本电源接地点必须连同机壳可靠地接大地，否则接地点的浮动高压可能使电子管 TM-85 的灯丝变压器与栅偏压供电变压器击穿；本电源要求 220 伏交流电压变化小于 $\pm 5\%$ 的情况下使用，否则要另加交流稳压器。

图 11 是总电路图。

参 考 文 献

- [1] В. И. Гапонов; Электроника, Часть II, p. 453.
- [2] M. J. Posakony; Rev. Sci. Instr., 1972, 43, No. 2, 270~273.
- [3] А. М. 邦奇布鲁耶维奇著, 廖增祺等译, “电子管在实验物理中的应用”, 上册, p. 161, 1961.

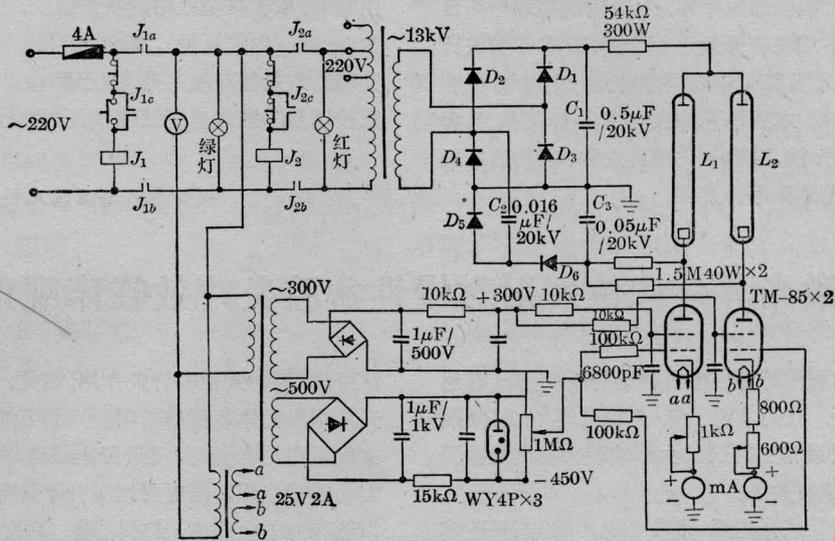


图 11 两折迭二氧化碳激光器电气原理图

(上接第 46 页)

的影响，图 5 给出了可微调镜片角度的试验管的实验结果。曲线的横轴是螺丝位置，每一格相当于螺丝前进 1.4 微米，纵轴分别是示波器峰值读数 V (与透射率 T 成正比) 和试验管输出功率 P 。由图 5 可明显看出，示波器峰值读数和输出功率同时达到最大。

我们已用此法制成多支石英玻璃或低膨石英玻璃管体的单模内腔激光管。实践证明，如果排充气时镜片不受沾污，制成的激光管输出功率可以由粘片时测得的透射率进行相当准确的预计。

参 考 文 献

- [1] K. G. Hernqvist, A. H. Firester; Rev. Sci. Instrum., 1975, 46, No. 8, 1040.
- [2] H. Kogelnik, T. Li; Appl. Opt., 1966, 5, No. 10, 1550~1587.
- [3] A. Maitland, M. H. Dunn; Laser Physics, North-Holland, Amsterdam, p. 172 (1969).
- [4] F. Petru, Z. Vesela; Opto-Electronics, 1972, 4, No. 1, 1~20.
- [5] P. W. Smith; IEEE J. Quant. Electr., 1966, QE-2, No. 4, 77~79.