

半导体激光测云高仪的研究

侯方源

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 主要对 YGY-1 型半导体激光云高仪的半导体激光大电流、脉冲驱动、致冷、回波的信号提取、处理电路、脉冲指令形成等一系列电路作了分析, 实现测云高度达 1500 m。

关键词: 半导体激光云高仪; LD 大电流脉冲驱动; 弱信号提取

1 前 言

YGY-1 型半导体激光云高仪是机场综合遥测仪的配套仪器, 按照国际民航组织的要求, 国际机场对航空气象的安全保障要求很高。因此, 云高仪在航空气象中占有重要地位。YGY-1 型云高仪是由光、机、电综合组成的精密仪器, 它对机场上空的云底高度垂直进行连续, 自动地测量, 为机场飞机的起飞, 降落提供了必要的安全保障。

该仪器采用下述先进技术来提高整机的性能。

1) 提高激光发射脉冲频率(4 kHz), 提高信噪比。

2) 将高度分解为 15 m, 30 m 的基本高度, 对每一部分信号进行取样, 然后总合 N 次, 得到 S/N 增量比。

3) 激光二极管以窄波带传输能量, 接收使用干涉滤光片。

4) 使用高灵敏度低噪声雪崩光电二极管, 从而可以使用低峰值功率的半导体激光器和减小接收器光学系统的有效表面积。

5) 发、收光学系统采用非球面光学系统。

总体技术指标:

测量范围: 15 m~1530 m, 云底高度

精度: 15 m~510 m 时, 精度为 -15 m, +0 m,

510 m~1530 m 时, 精度为 -30 m, +0 m,

参考高度: 1590 m, 可视作无云或云高超过 1530 m

测量周期: 1~32s

2 测云仪的发射系统

2.1 砷化镓激光二极管

我们研究的测云仪所采用的激光器为单异质结型半导体砷化镓二极管。型号为 LD-224-8S, 其管芯结构如图 1 所示。

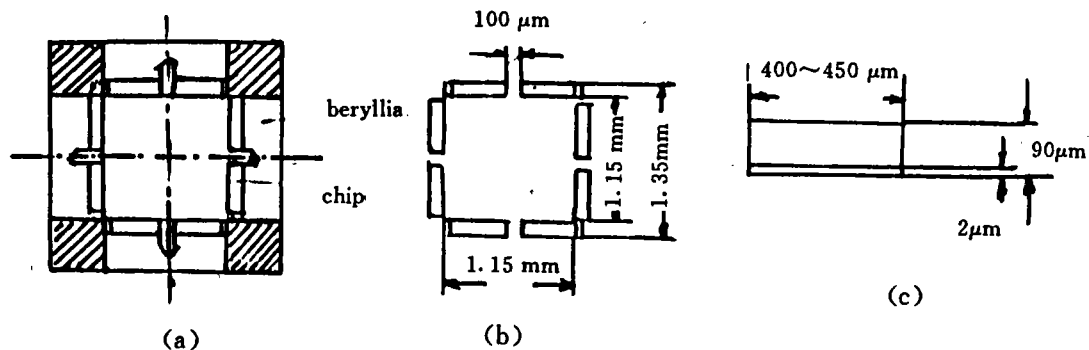


图 1 LD-224-8S 管芯结构

Fig. 1 LD-224-8S chip structure

8 个发光面管芯的排列如图 1 中的 (b) 组成阵列型激光器。单个发光面的长度为 $400 \mu\text{m} \sim 450 \mu\text{m}$, 宽度为 $2 \mu\text{m}$ 左右。各个管芯由电极串并连接, 并封装在一个有窗口的外壳内。由 $1 \text{ W} / (25 \times 2) \mu\text{m}^2$ 这样的光功率密度计算^[1]:

LD-224-8S 发出的脉冲光功率大约为 $400 \times 3 \times 2 / 25 \times 2 = 128 \text{ W}$ 的量级。

LD 可以直接用脉冲调制, 其调制频率由其允许的占空比决定。我们使用的脉冲调制频率为 4 kHz , 占空系数为 0.4×10^{-3} 。

LD 将电能直接转换成光能, 转换效率较高, 一般为百分之几。LD-224-8S 激光器的阈值电流为 30 A , 注入的工作电流为阈值电流的 2 倍时, 其典型脉冲输出光功率为 150 W 。LD-224-8S 激光器的发散角 $\theta_{\perp} = 35^{\circ}$, $\theta_{\parallel} = 15^{\circ}$

另外, LD 的输出功率和波长随环境温度变化而变化。在一般情况下, 温度每升高 1°C , 其发射功率下降 10% 左右, 波长向长波方向移动近 2.5 \AA 。为克服温度的影响, 要在 LD 上安装致冷系统。

2.2 激光器调制电路

发射系统激光器调制电路如图 2 所示。

由逻辑电路产生的激光发射指令, 其脉冲宽度为 50 ns , 周期为 $250 \mu\text{s}$, 经 3 个快速与非门组成的单稳态电路 IC_1 将脉冲压缩到 20 ns 。晶体管 Q_1 、 Q_2 将电压脉冲转为电流脉冲。环形变压器 T_1 将电流脉冲微分, 其正脉冲 ($\geq 1.2 \text{ V}_{\text{PP}}$) 触发高速可控硅 GA201 导通, Q_3 、 Q_4 给 $3 \times \text{C}_3$ 电容充的电源电压通过二极管 D_5 ($1.5 \text{ KE } 6.8 \text{ A}$) 向 LD 放电。在三个电容放电期间, 二极管 D_5 将 Q_3 、 Q_4 关闭。可控硅的关闭, 由电感 L_1 来完成, CR_1 关闭后 120 V 电源开始给 $3 \times \text{C}_3$ 充电, 等下一个触发脉冲的到来。

2.3 激光器致冷系统的考虑

为保持 LD 的最小脉冲辐射功率为 125 W , 允许利用系数为 0.4×10^{-3} 。激光发射波长不

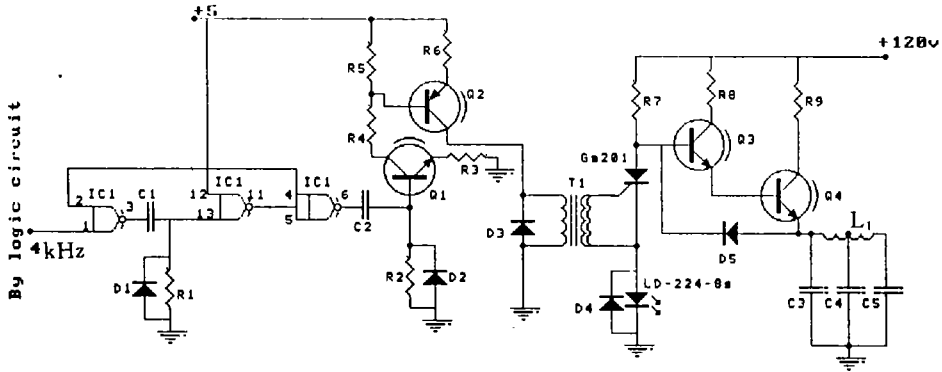


图 2 LD 发射控制电路图

Fig. 2 Laser diode transmission control circuit diagram

能偏出接收用干涉滤光片的通带范围。故此, LD 的温度必须保持在 +25 °C 以下。我们采用半导体致冷系统保证了 LD 的温度不超过 +25 °C (环境温度为 +50 °C 时)。致冷器控制电路如图 3 所示。

LD, 图 2 中的可控硅, 二极管 D₁, D₅ 和温度传感器 AD590 都装在一块铝板上, 铝板的一面紧挨致冷器的冷面。热面产生的热量由散热器带走。

系统致冷的原理是这样的: 恒温槽中的温度上升 1 °C, 传感器 AD590 的输出电压增加 10 mV。跟随器 IC₁ 的输出电压保持在与 W₁ 控制的传感器相对应的 +20 °C 温度处。超过 +20 °C, 传感器输出温度偏差电压, 经增益为 40 倍的比较器 IC₂ 放大, 这个电压给二级达林顿晶体管, 使供给致冷器的电流增加, 冷面温度下降, 保持 LD 在 +20 °C 至 +25 °C 之间。

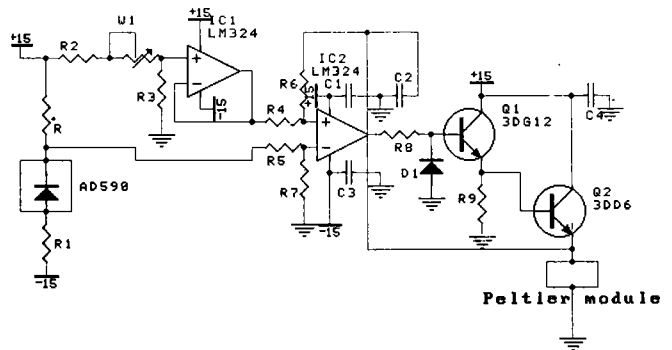


图 3 制冷系统电路

Fig. 3 Cooling system circuit

3 测云仪的接收系统

3.1 激光雷达方程

当发射激光到达某一待测空间位置时, 就与该处的气溶胶粒子相互作用产生后向散射, 由接收系统接收。距离为 R 处的被测气溶胶粒子群的尺度大于激光束在该处的发散尺度时, 则有激光雷达方程⁽²⁾:

$$P_r = \frac{P_t \tau A r C \eta(R) \beta(R)}{2R^2} e^{-2 \int_0^R \delta(r) dr} \quad (1)$$

式中: P_r 为激光回波功率;

P_t 为经收发光学系统后可用来测云的激光功率;

τ 为激光脉冲宽度;

A_r 为接收光学系统有效面积;

c 为光速;

$\eta(R)$ 为 R 处激光束的填充系数;

R 为被测云高距离;

$\beta(R)$ 为被测气溶胶粒子的体元后向散射系数;

$\exp[-2\int_0^R \delta(r)dr]$ 激光传输途中大气分子和气溶胶粒子的衰减率,将(1)式中的衰减率换成激光在大气中的透过率则(1)式写成:

$$P_r = \frac{P_t \tau A_r C \eta(R) \beta(R)}{2R^2} T_a^2 \quad (2)$$

由于发射天线透镜孔径比的限制,激光器能量只利用 70%;干涉滤光片透过率为 65%左右;一个透镜界面的透过率为 98%收发系统共有两个界面。

$$\text{则 } P_r = P_t \times 0.70 \times 0.65 \times 0.98^2 = 0.44P_t = 0.44 \times 150 = 66 \text{ W}$$

$$T_a = 80\%, \beta(1500\text{m}) = 0.042^{(3)} \quad (3)$$

$\eta(1500 \text{ m}) = 1$, 代入(2)式

$$P_r = \frac{66 \times 100 \times 10^{-9} \times 3.14 \times 0.06^2 \times 3 \times 10^3 \times 1 \times 42 \times 10^{-3} \times 0.8^2}{2 \times 1500^2} = 13.33 \times 10^{-8} \text{ W}$$

式中 $\beta(R)$ 取得是红宝石激光($\lambda = 6943 \text{ \AA}$), N_a (雨层云)的体元后向散射系数,对于砷化镓激光($\lambda = 9000 \text{ \AA}$), N_a 来说, $\beta(R)$ 要比红宝石激光的 $\beta(R)'$ 大⁽⁴⁾。 T_a 也取得保守一些,因为在 1.5 km 以内,大气的衰减是比较小的。

3.2 雪崩光电二极管的特性

由雷达方程计算的回波功率得知,探测如此小的功率,必须选用高灵敏的光电接收器件。雪崩型硅光电二极管比较适合,它具有体积小,可靠性高,灵敏度高,响应速度快等特点。我们选用雪崩光电二极管型号为 C30817。

3.3 雪崩光电二极管偏压电路

雪崩光电二极管的倍增过程要产生附加噪声,就是说雪崩管是一个有过剩噪声系数的放大元件,此过剩噪声是倍增因子的函数。雪崩管工作电压的过高或过低,或者倍增因子的过高或过低,都会降低接收系统的信噪比。这就说要选择雪崩管最佳工作点。雪崩光电二极管偏压的确定方法⁽⁵⁾是:设放大器输出的总噪声电压为 U_n (均方根值),放大器本身贡献的输出噪声电压为 V_{nx} (均方根值),对于硅管 $U_{nx} = 0.41U_n$,锗管 $U_{nx} = 0.58U_n$ 。随着偏压的增大,雪崩管输出噪声电流便增大,当满足

$$i_{nx} = \frac{d-2}{2} i_{nd} \text{ 时} \quad (4)$$

(d 为常数,硅管 d 取 2.3~2.5,锗管; d 取 3)放大器输出的噪声电压便由 U_{nx} 增大到 U_n 。(i_{nx} 包括负载电阻热噪声在内的放大器的等效输入噪声电流谱密度, i_{nd} 为雪崩管的倍增噪声电流谱密度),这时可知雪崩管已处于最佳工作状态了。结果雪崩管倍增过程使放大器输出端的噪声电压增加一倍左右,而信号却增大了近百倍,信噪比获得了数十倍的提高。

使用窄带干涉滤光片来尽量抑制背景辐射的干扰,以便使雪崩管在较高的偏压下工作。从

而产生较高的倍增作用。

雪崩光电二极管的倍增因子随温度变化而发生变化, 因而要求偏压电源有自动调节与补偿装置。

3.4 低噪声前置放大器的考虑

激光自动测云仪接收系统的噪声来源为: 天空背景和电子学线路引起的机内噪声。前者可采用窄带干涉滤光片和光阑来降低, 后者主要从选择电路元件及运行状态来考虑。我们选用了峰值波长为 904 nm, 中心带宽为 5 nm 的干涉滤光片。晶体管的内部噪声主要有基极体电阻 r'_{bb} 造成的热噪声(约占总噪声的一半以上); 由射极正向电流 I_E 和集电极反向电流 I_{Co} 造成的散弹噪声(与工作状态有关); 由射极电流分成集电极电流和基极电流而引起的分配噪声等。根据上述原则前放的晶体管要选择体电阻 r'_{bb} 小的, 最好 $r'_{bb} \leq 10 \Omega$, β 要高, 低噪声系数, 低势垒电容, 高特征频率的晶体管。选择小的供电电源, $E_c = 5 \text{ V}$, 发射极电流 $I_e = 1 \text{ mA}$, 也可降低某些噪声。

接收机的回波为周期 4 kHz, 脉宽 100 ns 的钟形波。由脉冲理论分析可知, 一个钟形脉冲是由低频到高频的各次谐波迭加而成。如低频谐波成分少, 则脉冲前后沿时间增大。所以前放通频带低端不够, 将减小输出脉冲的幅度, 这意味着减小了测距的测程, 通频带高端不足。则增大了回波输出脉冲的前后沿时间, 影响测距精度。前放的带宽为 10 MHz 左右。具体电路如图 4。

此电路为并联电流负反馈电路。电流放大倍数为 44 倍, 输入阻抗 300 Ω 。

4 信号处理系统

激光自动测云高仪电子线路主要任务是完成对时间的测量。由于砷化镓激光器脉冲功率比较小, 远距离目标回波能量极微弱, 回波信号被湮没。信号处理系统的作用就是测定回波的存在, 同时稳定可靠地确定云底的高度。

4.1 回波检测电子学原理框图与检测原理

从前置放大器输出的回波信号再放大 2000 倍, 由采样保持电路进行 100 ns 的采样, 采样频率是 4 kHz, 在 0~510 m 的范围内分析器程序信号用 15 m 作为一段进行扫描, 510 m~1530 m 范围用 30 m 进行扫描。在每一单元内进行 n 次采样, 确定出分析时间(上述两项在存储内容中事先编好程序); 代表 n 次采样的次序信号被积分器积分。当采样遇到噪声时, 信号的幅度电平是随机的, 有时正, 有时负, 经积分器平均后, 输出为零。然而, 当采样指令采着始终是正的回波信号时, 结果得到包含 DC 成分的信号, 经积分成为斜坡电压。用此技术得到 \sqrt{n} 倍增益比 S/N 。为了补偿随着高度增加回波幅度的衰减, 采样数 n 是随着被扫描高度而增加。从

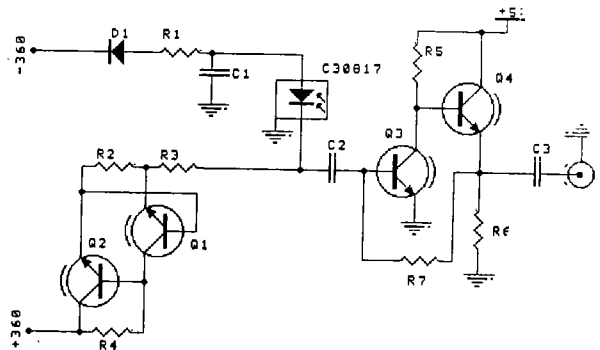


图 4 前置放大器电路

Fig. 4 Preamplifier circuit

积分器输出的信号同门限值比较,门限值是按照分解的(高度)单元而变化。当积分信号超过检测门限时,输出一脉冲关闭快速计数器,云底高度被检测并以二进制码送到电流放大器。

4.2 模拟线路方框图

由 2000 倍放大器,快、慢采样保持器积分器,可变门限电路组成的模拟线路方框图。

可变门限电压由公式算出:

$$V_s = -V_{ref} \left[\frac{R_{12}}{R_2} S_1 + \frac{R_{12}}{R_2} S_2 + \dots + \frac{R_{12}}{R_{11}} S_{10} \right] \quad (5)$$

S_1 到 $S_{10} = 0$ 或 1。

4.3 各种指令形成

激光发射指令,快、慢速采样指令,检测门限控制指令,积分与积分重置指令,显示记录指令的形成。

(1) 激光器发射指令

15 m 的基本示度(时标),用 10 MHz 晶体振荡器产生。激光器发射指令频率为 4 kHz,脉宽 100 ns,由 10 MHz 经 2500 分频得到。

(2) 快、慢速采样指令信号

快速采样指令频率为 4 kHz,脉宽为 100 ns。慢速采样指令频率为 4 kHz,脉宽为 10 μ s。

(3) 检测门限指令 $A_0 A_1 A_2 A_3 A_4 A_5$

$A_0 A_1 A_2 A_3 A_4 A_5$ 由存储器给出,控制状态开关 $S_0 \sim S_{10}$ 。

(4) 积分指令信号

积分指令信号脉宽为 1 ms,周期随高度而变,2 ms ~ 1024 ms。

(5) 积分器重置指令

积分器重置指令信号为积分指令信号的倒相。

5 输出与显示

所测云高在送数指令的控制下,以二进制码经光电隔离输入电流放大器。经 D/A 转换成模拟电流,电流大小与云高成正比。其对应关系为:在 0~510 m 内每 15 m 对应电流 45 μ A,510~1530 m 每 30 m 对应电流 90 μ A。0~1530 m 对应电流 0~4.59 mA 超过 1530 m 参考高度为 1590 m,对应电流 4.77 mA。

参考文献

- [1] 虞雅贤等,激光气象雷达.北京,气象出版社,1987
- [2] 同上
- [3] 同上
- [4] 同上
- [5] 霍正联,雪崩光电二极管最佳工作点的确定.兵器激光,1979,(4),21

Study of LD Cloud Telemeter

Hou Fangyuan

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

The paper describes LD high current pulse drive, cooling system, principle of echo signal detection and processing circuit, pulse command signal generation and circuit analysis For YGY-1 model LD cloud telemeter. Measuring altitude for cloud come upto 1530 m high.

Key words: LD cloud telemter, LD high current pulse drive, Weak signal lift-out.

侯方源 男, 1940年12月出生, 1966年毕业于太原工学院无线电技术专业。副研究员。主要从事激光应用技术的开发研究。参与了“七·五”“八·五”国家重大科技攻关项目及中科院重大项目, 如“合成孔径雷达光学处理器”, “A3激光印字机的开发研究”等, 在国内刊物及学术会议上发表宣读学术论文10余篇。