

文章编号:1002-2082(2008)01-0072-04

# 调Q 二极管泵浦固体激光器激光脉冲 高频噪声的检测

王 晖, 王欣媛, 蒲祥东, 王石语,  
李兵斌, 蔡德芳, 文建国, 过 振

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 为了研究调Q 二极管泵浦固体激光器(DPL)激光脉冲输出的稳定性,利用电路网孔法对传统硅光电二极管探测电路进行了分析,发现传统的探测电路无法检测到激光脉冲中多纵模所引起的高频噪声信号(在腔长小于10 cm 的短谐振腔中其频率通常为1~2 GHz)。根据分析结果,改良了硅光电二极管探测电路,利用高速采样示波器采集到了调Q DPL 激光脉冲中(1~2)GHz 的高频噪声信号。

**关键词:** 激光脉冲;硅光电二极管;信号检测;高频噪声信号

中图分类号: TN248-34

文献标志码: A

## Detection technology of high frequency noise in Q-switched diode-pumped laser

WANG Hui, WANG Xin-yuan, PU Xiang-dong, WANG Shi-yu,

LI Bing-bin, CAI De-fang, WEN Jian-guo, GUO Zhen

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to investigate the output stability of Q-switched diode-pumped laser (DPL) pulse, the tradition detection circuit of the silicon photodiode was analyzed with the circuit mesh method. It is found that the traditional detection circuit is unable to detect the high frequency noise signal generated by the multi-longitudinal modes in the laser pulse. According to the analysis result, the silicon photodiode detection circuit was improved, and (1~2)GHz high frequency noise signal of a Q-switched laser was collected by the high speed sampling oscilloscope.

**Key words:** laser pulse; silicon photodiode; signal detection; high frequency noise signal

## 引言

DPL 是指用半导体激光器(LD)作为泵浦光源的固体激光器,它具有效率高、体积小、寿命长、可靠性高、光束质量好等优点,在很多领域得到了应用,尤其是在军事上,它已成为军事应用中首选的激光光源。目前最有潜力的应用方向是激光探

测、激光制导及激光侦察,而这当中激光脉冲的稳定性问题直接关系到激光器的应用效果<sup>[1]</sup>。

激光腔内多纵模相互竞争引起的高频信号是调Q 脉冲激光器中的一项重要的高频噪声,这部分噪声信号主要集中在(1~2)GHz 的频谱上<sup>[2-3]</sup>。研究这部分信号对激光脉冲稳定性的影响时,需对这

收稿日期:2007-06-20; 修回日期:2007-07-25

基金项目:国家重点实验室基金项目(51438010205DZ0101)

作者简介:王晖(1983—),男,江西九江人,硕士研究生,主要从事DPL 输出脉冲检测技术研究。E-mail:romanhui@126.com

部分信号进行高精度检测。

## 1 实验研究及理论分析

### 1.1 实验装置

为了检测调Q 激光脉冲信号,设计了图1所示的实验装置。该实验装置分为2部分:DPL 和探测系统。

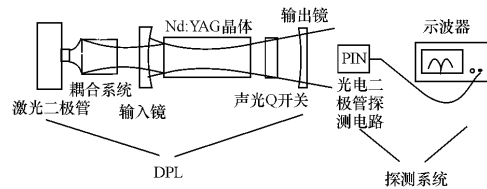


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental facility

图1中激光二极管为半导体激光器;耦合系统为光纤耦合;激光晶体为Nd:YAG;声光Q开关为SF-6玻璃晶体;激光腔为热透镜等效平凹腔。

### 1.2 传统光电探测电路

由图1可以看到,所设计的光电探测电路系统主要由2部分组成:1)以高速响应的硅光电二极管为核心器件的光电转换电路;2)以示波器作为数据采集与存储系统。

实验中光电探测电路的主要器件为PIN硅光电二极管<sup>[4]</sup>,它是以光导模式工作的结型光伏探测器。光谱响应从可见光一直延伸到1 100 nm,在微弱、快速光信号探测方面有着非常重要的应用,并且其频率特性也是目前半导体光电器件中最好的一种,特别适合于快速变化的光信号探测<sup>[6]</sup>。图2为PIN硅光电二极管的参数图。

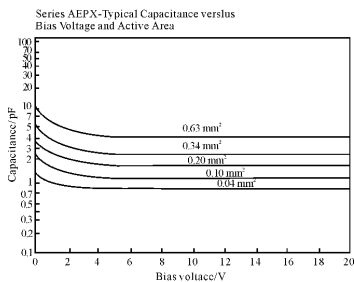


图2 PIN硅光电二极管参数图

Fig. 2 Parameter of PIN silicon photodiode

在大多数的光电检测电路中比较常见的一种为电容偏置电压式<sup>[6]</sup>(见图3所示)。其中直流偏置电压为9 V,  $R_{s1}$ 为电源内阻(约为2 Ω),  $R_{s2}$ 为限流电阻,  $R_s = R_{s1} + R_{s2}$ ,  $R_L$ 为负载电阻。考虑到光电二极管的结电容效应,它的高频等效电路如图4

所示<sup>[6]</sup>。实验中的实测数据:  $R_{s2} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{s1} = 2 \text{ }\Omega$ , 则  $R_s = R_{s1} + R_{s2} \approx R_{s2}$ , 充电电容  $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ , PIN管作用范围选  $0.34 \text{ mm}^2$ , 经查阅器件手册可知, PIN硅光电二极管的结电容  $c_j \approx 2.5 \text{ pF}$ 。为了达到与示波器很好地匹配, 选负载电阻  $R_L = 50 \text{ }\Omega$ 。

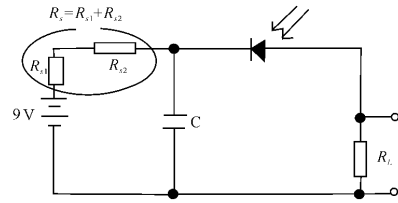


图3 电容偏置电压式光电探测电路

Fig. 3 Optoelectronic detection circuit of capacitive biasing voltage

图4中  $R_s = R_{s1} + R_{s2}$ , 利用电路理论中网孔法<sup>[7]</sup>求  $i_\varphi$  对  $R_L$  的响应函数, 可得图4电路(其中  $i_f = i$ )。

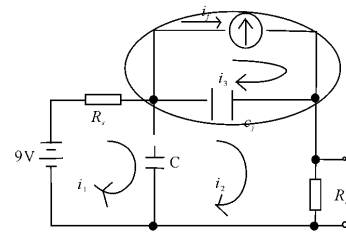


图4 用网孔法表示的电容偏置电压式光电探测电路

Fig. 4 Optoelectronic detection circuit of capacitive biasing voltage expressed by mesh method

根据电路网孔法可得到电路回路方程为

$$\begin{cases} i_1(R_s + \frac{1}{j\omega C}) - i_2 \frac{1}{j\omega C} = 9 \\ i_2(R_L + \frac{1}{j\omega C_j} + \frac{1}{j\omega C}) - i_1 \frac{1}{j\omega C} - i_3 \frac{1}{j\omega C_j} = 0 \\ i_3 = i_\varphi \end{cases} \quad (1)$$

求解上式, 可得

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{9 + \frac{i_2}{j\omega C}}{R_s + \frac{1}{j\omega C}} \\ i_2 &= \frac{\frac{i_\varphi}{j\omega C_j}}{(R_L + \frac{1}{j\omega C_j} + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{\omega^2 C^2 R_s - j\omega C})} + \frac{9}{\frac{j\omega C R_s + 1}{(R_L + \frac{1}{j\omega C_j} + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{\omega^2 C^2 R_s - j\omega C})}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

分析(2)式, 由于我们要求的是  $i_\varphi$  对  $R_L$  的响

应,而(2)式中含  $i_\varphi$  的第1项即为光电二极管对负载的影响,而第2项即为直流偏置电压对负载的影响。所以  $i_\varphi$  对  $R_L$  的响应  $H(j\omega)$  即(2)式的第1项:

$$H(j\omega) = \frac{i_2}{i_\varphi} = \frac{\frac{1}{j\omega c_j}}{(R_L + \frac{1}{j\omega c_j} + \frac{1}{j\omega c} + \frac{1}{\omega^2 c^2 R_s - j\omega c})} \quad (3)$$

化简(3)式,得

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{i_2}{i_\varphi} = \frac{1}{j\omega c_j R_L + 1 + \frac{c_j}{c} + \frac{j\omega c_j}{\omega^2 c^2 R_s - j\omega c}} = \\ &= \frac{1}{j\omega c_j R_L + 1 + \frac{c_j}{c} - \frac{c_j}{c + j\omega c^2 R_s}} = \\ &= \frac{1}{j\omega c_j R_L + 1 + \frac{c_j}{c} - \frac{c_j(c - j\omega c^2 R_s)}{c^2 + \omega^2 c^4 R_s^2}} = \\ &= \frac{1}{j\omega c_j R_L + 1 + \frac{j\omega c_j c^2 R_s}{c^2 + \omega^2 c^4 R_s^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

分析(4)式,根据已知数据,因为  $c$  的量级为  $10^{-9}$ ,  $\omega$  为  $10^9$  量级,则  $\omega^2 c^4 R_s^2 \approx 0$ , 而  $c^2 + \omega^2 c^4 R_s^2 = c^2$ 。因此,上式可以写成:

$$H(j\omega) = \frac{i_2}{i_\varphi} = \frac{1}{1 + j\omega c_j (R_L + R_s)}$$

与此对应的电路响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{i_2}{i_\varphi} = \frac{1}{1 + j\omega c_j (R_L + R_s)} \quad (5)$$

式中  $i_2 = \frac{i_\varphi}{1 + j\omega c_j (R_L + R_s)} = \frac{i_\varphi}{1 + j\omega c_j (R_L + R_{s1} + R_{s2})}$ 。由于  $R_s = R_{s1} + R_{s2} \approx R_{s2}$ , 则

$$i_2 = \frac{i_\varphi}{1 + j\omega c_j (R_L + R_{s2})}$$

其幅频响应和相频响应分别为

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{1 + [\omega c_j (R_L + R_{s2})]^2}} \\ \theta(\omega) &= -\arctan(\omega(R_{s2} + R_L)c_j) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

当  $|H(j\omega)|$  下降到其最大值的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  时,可以得到其高频截止频率为

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_L + R_{s2})c_j} \approx 60 \text{ MHz} \quad (7)$$

由上述分析可以看出,电容偏置电压式光电探测电路相当于一个低通滤波器,利用它对激光脉冲信号进行探测必然会对信号中的高频成分有很大的抑制作用,从而导致测量结果不准确,所以有必要对该电路进行改进。

### 2.3 改进的光电探测电路

首先,对光电测量电路中的充电电容  $C$  (作用为稳定偏置电压) 进行分析,减小邻近电路的高频噪声干扰。但应用于测量的只是小型的探测电路,不存在大的高频干扰源,所以可以去掉充电电容  $C$ 。这样既能简化探测电路又能提高电路的时间常数和响应频率。

其次,通过对电阻  $R_{s2}$  进行分析可知,  $R_{s2}$  仅起到限流和保护 PIN 管的作用,但从 PIN 管的手册可知, PIN 管的最高偏置电压为 30 V, 所以选择的偏置电压只需小于 30 V 就可保证 PIN 管正常工作。另外,通过(7)式发现  $R_{s2}$  对探测电路中负载  $R_L$  的截止频率具有一定的影响。通过去掉限流电阻  $R_{s2}$  提高负载  $R_L$  的截止频率,使电路探测的频率范围达到 GHz 量级。在保证 PIN 管正常工作的条件下,选择适当的偏置电压可以提高硅光电二极管的响应时间。在偏置电压为 20 V 左右时, PIN 管作用范围选 0.34 mm<sup>2</sup>, PIN 硅光电二极管的结电容  $c_j \approx 2.5 \text{ pF}$ , 响应时间可以达到最高值 1 ns。根据以上分析,最终确定实验中的偏置电压为 18 V, 内阻  $R_{s1}$  约为 5  $\Omega$ , 负载电阻需要考虑与外部电路(如示波器)进行阻抗匹配,选取 50  $\Omega$  比较合适,经改进的电路如图 5 所示。

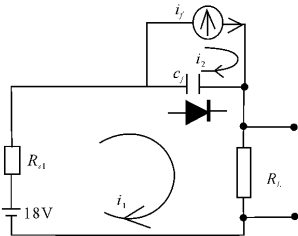


图5 改进后的光电探测电路

同理,根据电路网孔法可得到回路方程:

$$\begin{cases} i_1(R_L + R_{s1} + \frac{1}{j\omega c_j}) = 18 \\ i_2 = i_\varphi \end{cases} \quad (8)$$

同样从上式可得到:

$$i_1 = \frac{i_\varphi}{1 + j\omega c_j (R_L + R_{s1})} + \frac{18}{R_L + R_{s1} + \frac{1}{j\omega c_j}} \quad (9)$$

(9)式中第1项为光电二极管对负载的影响,其大小为

$$i = \frac{i_\varphi}{1 + j\omega c_j (R_L + R_{s1})} \quad (10)$$

与此对应的电路响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{i}{i_{\varphi}} = \frac{1}{1 + j\omega c_j(R_L + R_{s1})} \quad (11)$$

其幅频响应和相频响应分别为

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{1 + \omega c_j(R_L + R_{s1})^2}} \\ \theta(\omega) &= -\arctan(\omega(R_L + R_{s1})c_j) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当  $|H(j\omega)|$  下降到最大值的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  时,可以得出其高频截止频率为

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_L + R_{s1})c_j} \approx 1.22 \text{ GHz}$$

该值达到实验要求,满足实验中高频噪声信号的探测。

## 2.4 实测结果

通常的实验方法往往难以检测到激光脉冲中的高频噪声信号,采用上述改良的光电二极管探测电路,在示波器上观测到了以往文献未见报道的激光脉冲中的高频噪声信号。这部分噪声信号频谱范围主要体现在  $(1 \sim 2) \text{ GHz}$ ,它主要由激光腔内多纵模引起。图6为观测到的激光脉冲信号波形图,实验用 Tektronix 公司 TDS5054B 的数字荧光采样示波器。

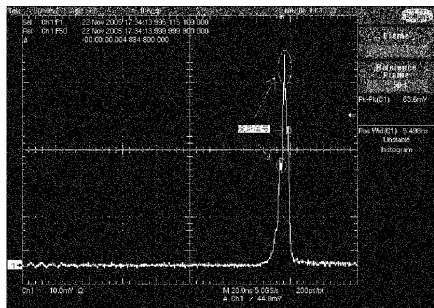


图6 声光调Q DPL 脉冲信号示波器图形

Fig. 6 Oscilloscope image of acousto-optic Q-switched DPL pulse signal

## 3 结论

通过对传统光电二极管探测电路进行理论分析,改良了光电二极管探测电路,利用它和高速采样示波器观察到激光脉冲中的高频噪声信号,对后续声光调Q DPL 输出脉冲的稳定性研究工作有帮

助作用。

参考文献:

- [1] 过振,王石语,文建国,等.高重复频率二极管泵浦激光器窄脉宽调Q技术[J].红外与激光工程,2001,30(4):208-211.  
GUO Zhen, WANG Shi-yu, WEN Jian-guo, et al. Study on the Q-switching of DPL for high repetition rate and short pulse duration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(4): 208-211. (in Chinese)
- [2] 王石语,王欣媛,过振,等.抽运光对激光束空间分布影响程度的估算方法研究[J].应用光学,2007,28(1):63-67.  
WANG Shi-yu, WANG Xin-yuan, GUO Zhen, et al. Estimation method to eliminate effects of pumping light on space distribution of laser beam [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 63-67. (in Chinese)
- [3] 陈梁.连续激光二极管端面泵浦Nd:YAG激光器噪声研究[D].西安:西安电子科技大学,1999.  
CHEN Liang. Study of noise in CWLD end-pumped Nd:YAG laser [D]. Xi'an: Xidian University, 1999. (in Chinese)
- [4] 李晓坤.精密光电检测电路设计方案[J].电子产品世界,2003(12):37-40.  
LI Xiao-kun. Design a precision photo detection circuit [J]. Electronic Engineering & Product World, 2003(12): 37-40. (in Chinese)
- [5] 安毓英,曾晓东.光电探测原理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004:90-101.  
AN Yu-ying, ZENG Xiao-dong. The principle of photoelectric detection [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 90-101. (in Chinese)
- [6] 王呈阳,陈志斌,卓家靖,等.几种常见波段脉冲激光峰值功率综合测试技术研究[J].应用光学,2007,28(1):72-76.  
WANG Cheng-yang, CHEN Zhi-bin, Zhuo Jia-jing, et al. Comprehensive test technology of pulsed laser peak power in common wavebands [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 72-76. (in Chinese)
- [7] 吴大正,王松林,王玉华.电路基础[M].西安:西安电子科技大学出版社,2001:29-33.  
WU Da-zheng, WANG Song-lin, WANG Yu-hua. The basics of circuit [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001: 29-33. (in Chinese)