

基于半导体激光器的脉冲整形技术

林 平^{1,2}, 刘百玉¹, 缙永胜¹, 白永林¹, 王 博¹, 白晓红¹, 秦君军¹, 朱炳利¹, 杨文正¹,
朱少岚¹, 高存孝¹, 欧阳嫻¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 论述一种新的激光脉冲整形方法—利用任意形状的整形电脉冲直接驱动半导体激光器, 产生与电脉冲形状一致的激光脉冲, 作为高功率激光装置的种子光源。使用 GaAs 场效应管作为开关器件, 使用超宽带脉冲触发场效应管产生整形电脉冲, 引入阻抗渐变微带技术克服了触发脉冲损耗对级联场效应管数量限制, 将整形电脉冲脉冲宽度扩展到 10 ns。以整形电脉冲直接驱动半导体激光器, 可产生脉宽为 10 ns, 时域调节精度为 330 ps 的任意整形激光脉冲。

关键词: 激光脉冲整形; GaAs 场效应管; 开关特性; 半导体激光器; 阻抗渐变微带技术

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0103-05

Laser pulse shaping technology based on semiconductor laser

Lin Ping^{1,2}, Liu Baiyu¹, Gou Yongsheng¹, Bai Yonglin¹, Wang Bo¹, Bai Xiaohong¹, Qin Junjun¹,
Zhu Bingli¹, Yang Wenzheng¹, Zhu Shaolan¹, Gao Cunxiao¹, OuYang Xian¹

- (1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Pulse shaping technique is of great significance for high power laser facility. In this paper, a new method used in laser pulse shaping system was proposed. An arbitrary waveform generator was fabricated to generate shaping electrical pulse. GaAs Field Effect Transistor (FET) has good ability of generating voltage-controlled current and on-off characteristic, while the semiconductor laser contains direct modulate characteristic. The unit-pulse was generated based on the on-off characteristic of GaAs FET, and then the arbitrary waveform electrical pulse was generated by stacking a set of unit-pulses. Impedance tapered micro-strip line was designed to maintain the consistency of each unit-pulse. The arbitrary waveform electrical pulse was used as shaping electrical pulse to modulate the semiconductor laser directly to realize the laser pulse shaping. With this method, a laser pulse waveform was generated with duration less than 10 ns, 330 ps time-domain adjustment. The experiment results show that the shaped laser pulse is determined only by shaping electrical pulse.

Key words: laser pulse shaping; GaAs FET; on-off characteristic; semiconductor laser;
impedance tapered micro-strip

收稿日期: 2013-05-12; 修订日期: 2013-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(11205238)

作者简介: 林平(1987-), 男, 硕士生, 主要从事激光脉冲整形方面的研究。Email: linping@opt.ac.cn

导师简介: 刘百玉(1964-), 男, 研究员, 主要从事超快电子学方面的研究。Email: liu-baiyu@163.com

0 引言

采用集成光学技术,利用电光波导调制器进行激光脉冲整形是目前高功率激光前端装置采用的主要技术途径之一,其基本思路是利用电脉冲整形系统产生理想的整形电脉冲,再驱动电光波导调制器进行激光脉冲整形,从而产生理想的整形激光脉冲^[1]。

利用电光波导调制器进行激光脉冲整形克服了闪光灯泵浦的稳定性差和块状高压 Pockels 盒的电晕效应、电干扰大的缺点,具有一定的性能优势,但系统性能仍受到波导器件内电荷迁移、波导材料光折变等因素的影响^[2]。

该研究在原有的高功率激光脉冲整形技术基础之上,提出了一种新方法,用于产生具有时间整形能力的种子光源系统。使用超宽带脉冲^[3]触发 GaAs 场效应管(FET),利用其电压控制电流及开关特性产生的基元脉冲在时域上叠加形成整形电脉冲;引入阻抗渐变微带技术突破电路中可级联 FET 数量的限制;使用半导体激光器取代电光波导调制器,基于其直接线性调制特性,产生与整形电脉冲形状相同的整形激光脉冲。

1 整形电脉冲产生原理

1.1 基元脉冲产生原理

基元脉冲产生原理如图 1 所示,GaAs FET 栅极与源极之间电压 V_{gs} 小于夹断电压 V_{TO} 时,GaAs FET 截止; $V_{gs} > V_{TO}$ 时,场效应管导通,其导通电流 I_{ds} 遵从公式:

$$I_{ds} \propto (V_{gs} - V_{TO}) \quad (1)$$

在基元电路中 V_{gs} 等于栅极直流偏置电压 V_{bi} 与触发脉冲幅度之和,GaAs FET 的夹断电压 V_{TO} 约为 -2.2 V ;触发脉冲未到达栅极时, $V_{gs} = V_{bi}$ 且 $V_{gs} < V_{TO}$,GaAs FET 处于截至状态,如图 1(a)所示;触发脉冲到达栅极后, V_{gs} 的值在触发脉冲与直流偏置电压共同作用下大于夹断电压,GaAs FET 导通,此时在脉冲传输线上形成如图 1(b)所示的电脉冲,其形状与触发脉冲形状相似但极性相反,此电脉冲在传输线上向左右两个相反方向传播,为了防止左行脉冲发生反射影响右行的脉冲叠加,在脉冲传输线左端设置 $50\ \Omega$ 终端负载,左行脉冲最终被此脉冲传输线终

端负载吸收,右行脉冲则形成整形脉冲的一个基元脉冲,如图 1(c)所示。据上式,在触发脉冲幅值确定时,改变 GaAs FET 的栅极直流偏压可得到不同幅度的基元脉冲。

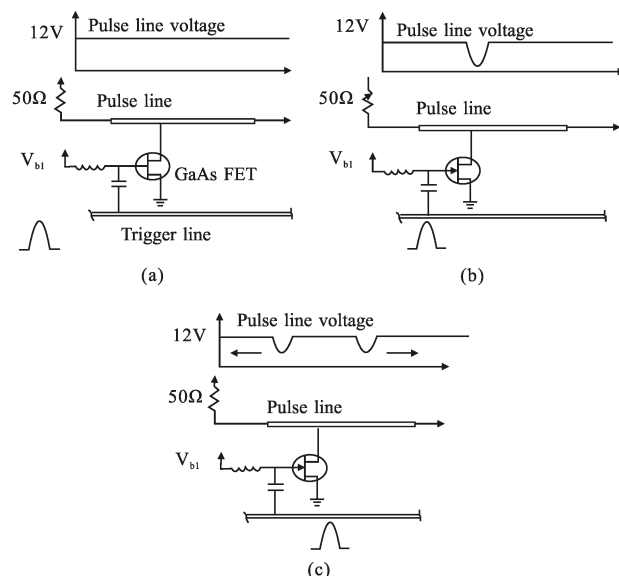
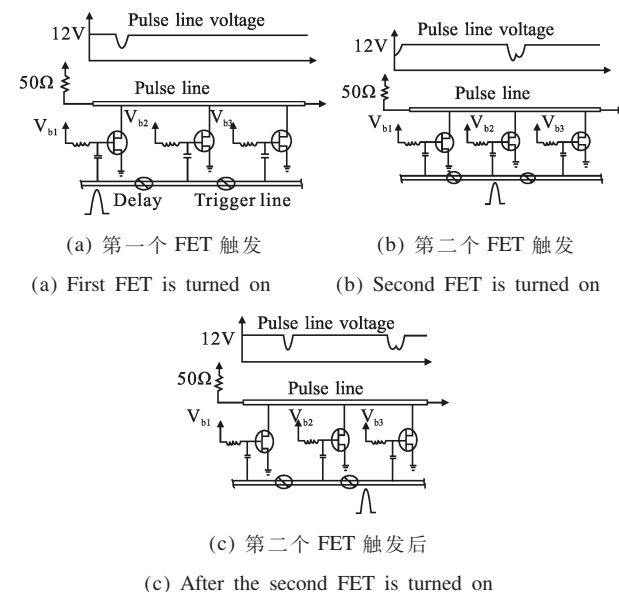


图 1 基元脉冲产生原理

Fig.1 Principle of generating-unit pulse

1.2 基元脉冲叠加原理

基元脉冲叠加原理^[4]如图 2 所示,触发脉冲经过一定时间的延迟到达第二个 GaAs FET,在第一个 GaAs FET 的输出脉冲之后形成第二个脉冲,第二个输出脉冲同样向左右两个方向传播,左行脉冲被传



(c) 第二个 FET 触发后

(c) After the second FET is turned on

图 2 基元脉冲叠加原理

Fig.2 Theory of pulses accumulation

输线终端负载吸收,右行脉冲则叠加在第一个基元脉冲之后;触发脉冲经过一定数量的 GaAs FET 后,最终在脉冲传输线上产生所需的整形电脉冲。

2 传输线设计

当 FET 用在高频或脉冲电路时,极间电容的影响不能忽略,其高频等效模型如图 3(a)所示,图 3(b)为其简化模型。

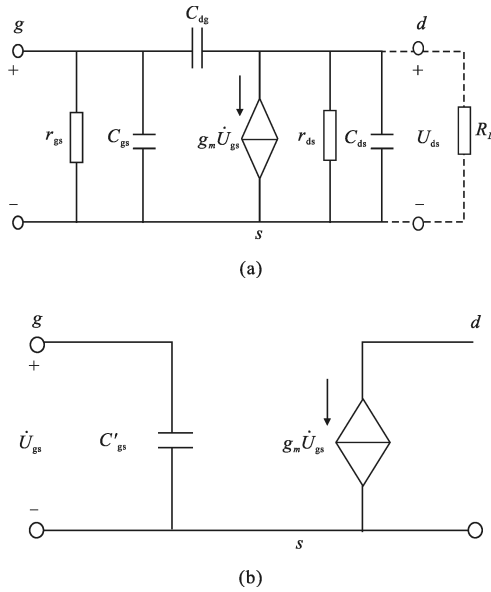


图 3 GaAs FET 高频等效模型和简化模型

Fig.3 High-frequency equivalent model of GaAs FET and the simplified model

在高频段,由于密勒效应的存在,使输入电容大大增加,严重制约了 FET 的高频特性。考虑 \$C'_{gs}\$ 的影响,它所在回路的时间常数 \$\tau=R_g C'_{gs}\$, 其上限频率为 \$f_H=1/2\pi\tau\$, 其中 \$R_g\$ 是场效应管的栅极电阻, \$C'_{gs}=C_{gs}+(1+k)C_{gd}\$, \$k\approx g_m R'_L\$。当触发脉冲触发 FET 时,频率高于 \$f_H\$ 的分量会受到较大影响,造成触发信号带宽损失,影响产生的整形电脉冲的快沿特性;电路其它高频分布参数也会造成触发脉冲脉宽展宽、幅度减弱,也是影响整形电脉冲波形质量的重要因素;在确保用于产生快沿脉冲的元器件分布参数减至最小的情况下,通过优化设计传输线降低电路分布参数,提高快沿脉冲波形的质量是电路设计的一个难点。

微带线是目前比较流行的平面传输线,容易与其它无源和有源微波器件集成。在超快脉冲电路中微带技术用来减小高频分布参数对电路的影响,以

此改善电脉冲前后沿特性^[5-7]。其结构如图 4 所示。

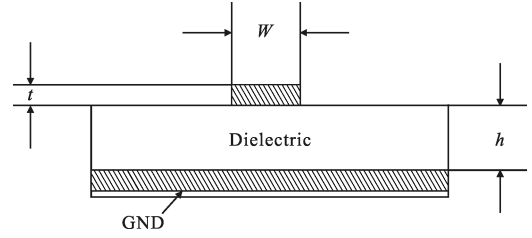


图 4 微带线结构

Fig.4 Micro-strip line structure

微带线的阻抗由铜皮厚度、线宽、PCB 材料决定,在实际应用中线路导体厚度 \$t\$ 与基片厚度 \$h\$ 相比可以忽略 (\$t/h<0.05\$),其阻抗可由公式(2)^[8]计算:

$$\begin{cases} Z_0 = \frac{Z_f}{2\pi\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right) & \left(\frac{w}{h} < 1\right) \\ Z_0 = \frac{Z_f}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \left(1.393 + \frac{w}{h} + \frac{2}{3} \ln\left(\frac{w}{h} + 1.444\right)\right) & \left(\frac{w}{h} > 1\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$Z_f=376.8\Omega\$ 是在自由空间的波阻抗; \$h\$ 为 PCB 介质层的厚度; \$w\$ 和 \$t\$ 分别为微带线宽度与厚度, \$\epsilon_{\text{eff}}\$ 是由下式给出的有效介电常数:

$$\begin{cases} \epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2 \right] & \left(\frac{w}{h} < 1\right) \\ \epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} & \left(\frac{w}{h} > 1\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: \$\epsilon_r\$ 为 PCB 介质层材料的相对介电常数。触发信号在传输线上的延时则由公式(4)^[9]给出:

$$t_{\text{pd}} = 0.0333 \sqrt{0.475\epsilon_r + 0.67} \text{ ns/cm} \quad (4)$$

电路设计时域调节精度 330 ps,即在相邻 FET 之间,信号在触发传输线上传输比在脉冲传输线上的传输时间长 330 ps。根据公式(4),对于 FR-4 材料 (\$\epsilon_r=4.6\$),算得相邻 FET 之间触发传输线与脉冲传输线所需长度差为 58.65 mm。

对于如图 5(a)所示的均匀阻抗微带线,从中顺序取两个测试点 A 和 B,有 \$I_B < I_A\$;根据公式 \$V=RI\$, A、B 两点电压 \$V_A > V_B\$。实际脉冲信号传输时同样遵循上述规律,测量发现电路中触发脉冲顺序触发每一个 GaAs FET 时,脉冲幅度逐渐衰减,到达最后一个 GaAs FET 时幅度衰减为最小,同时脉宽变宽。这样就使得触发不同 GaAs FET 的触发脉冲波形不一致,产生的基元脉冲波形也存在不一致的现象,电路中可级联 FET 数量即整形电脉冲宽度的增加受到极大

限制。为此,笔者设计了阻抗渐变传输线,其结构如图 5(b)所示。

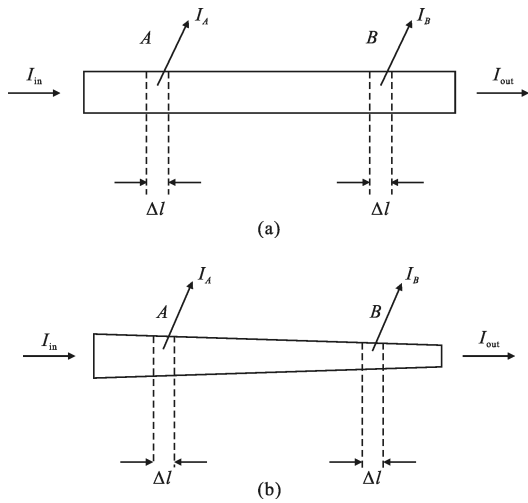


图 5 均匀阻抗微带线和阻抗渐变微带线

Fig.5 Signal propagates in uniform transmission line and signal propagates in tapered line

在该结构中, $R_A < R_B$, 选取适当的数值, 使微带线阻抗均匀变化, 使其满足 $I_A R_A = I_B R_B$ 即 $V_A = V_B$, 这样就可以补偿触发信号在传输线上传输时幅度上的衰减, 使得到达 GaAs FET 的触发脉冲幅度相同, 从而 GaAs 场效应管产生的基元脉冲波形基本一致。在首个与最后一个栅极直流偏置值相同时, 整形电路中末路与首路基元脉冲的幅度基本一致, 图 6 所示的实验结果说明阻抗渐变微带技术有效补偿了触发脉冲的损耗, 达到了预期效果。

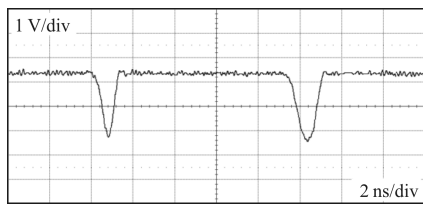


图 6 首路与末路基元脉冲

Fig.6 First and the last unit pulse

3 半导体激光器的调制特性

半导体激光器的基本特征是如图 7(a)所示的驱动电流 I 和输出光功率 P 的关系。当驱动电流增加到阈值电流 I_{th} 时, 激光器开始振荡。当 $I > I_{th}$ 时, 输出光功率 P 几乎与 $I - I_{th}$ 成正比。

半导体激光器最重要特点之一在于能被交变信

号直接调制^[10], 如图 7(b)所示, 抽运的驱动电流(矩形脉冲)可以直接调制光强。用调制驱动电流的方法, 使注入到有源区内的载流子密度得到相应的调制, 并发出强度被调制的激光脉冲。

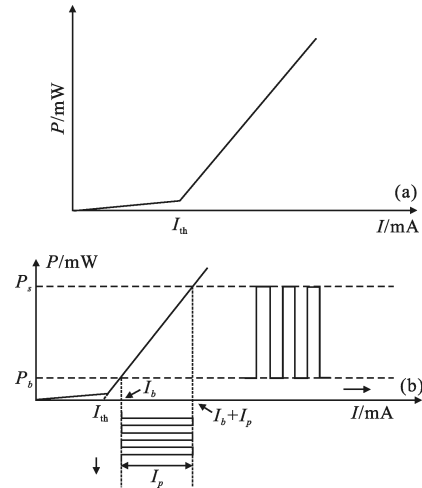


图 7 半导体激光器 $P-I$ 曲线和调制特性

Fig.7 $P-I$ characteristic curve of LD and modulation characteristic of LD

在实际应用中采用半导体激光器的大信号脉冲直接调制, 此时, 谐振阈值设定在直流偏置电流或者比它稍微或高或低的水平上。用比该直流偏置电流充分大的脉冲电流作为调制信号, 叠加在谐振阈值上, 以驱动半导体激光器^[11]。

4 实验与分析

电脉冲整形系统采用具有压控电流和开关特性的 GaAs FET 作为开关器件, 33 路 GaAs FET 级联构成整形电脉冲产生电路。对于窄脉冲调制的半导体激光器, 其输出激光的特性和脉冲质量直接取决于驱动激光器的电流脉冲^[12], 因此整形电脉冲的稳定性具有重要的意义, 图 8 显示了整形电脉冲的抖动测试结果。为了获得尽可能高的激光能量输出, 采用半导体激光器的大信号调制特性获得相应的整形激光脉冲。图 9(a)是当所有 GaAs FET 直流偏置电压相同时获得的整形电脉冲方波波形, 使用此脉冲调制半导体激光器获得的整形激光脉冲如图 9(b)所示。由整形电脉冲和激光脉冲的波形对比可以看出半导体激光器的输出整形激光脉冲形状与整形电脉冲一致, 与预期结果吻合; 半导体激光器本身的等效电路是一个 L-R-C 电路, 其调制带宽主要受到自身

寄生电容,引线电感及串联电阻的限制;由于整形电脉冲的纹波主要是信号中的高频成分,该激光器不能响应整形电脉冲的高频成分,纹波受到抑制,半导体激光器起到了低通滤波器的作用,因此输出整形激光脉冲与整形电脉冲相比变得较为平滑。此外由雪崩晶体管产生的触发脉冲存在时间和幅度的晃动,使得各基元脉冲相互堆积形成整形脉冲时,每个节点都有起伏,导致整形出的脉冲底部不平坦;目前触发脉冲抖动 30 ps,需要进一步提高触发脉冲的稳定性,使其抖动减至 20 ps,以获取更高质量的整形激光脉冲。

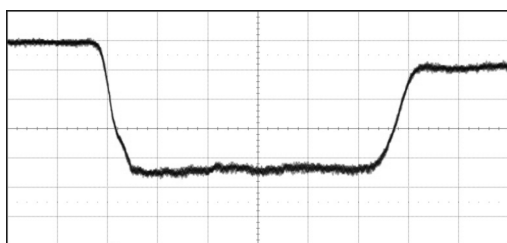
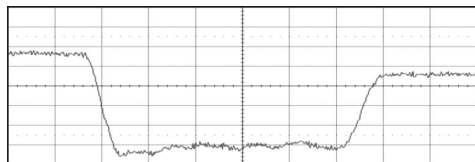


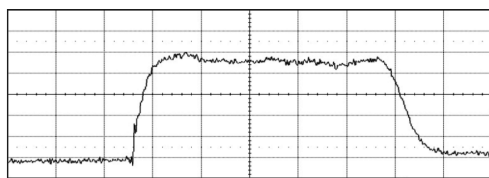
图8 整形电脉冲抖动测试

Fig.8 Stability of the shaping electrical pulse



(a) 整形电脉冲

(a) Shaping electrical pulse



(b) 整形激光脉冲

(b) Shaping laser pulse

图9 方波波形

Fig.9 Square waveform

5 结论

文中研究提出了一种新的可用于高功率激光装置前端的激光脉冲整形方法。以具有直接线性调制特性的半导体激光器取代电光波导调制器,克服了电光波导调制技术中波导器件内电荷迁移、波导材料光折变等因素对系统的影响;引入阻抗渐变微带

技术,解决了基元脉冲一致性问题,克服电路中可级联 FET 数量的限制,将整形电脉冲宽度扩展到 10 ns,使用整形电脉冲直接驱动半导体激光器,产生脉宽 10 ns、时域调节精度 330 ps 任意形状整形激光脉冲。

参考文献:

- [1] Li Dong, Liu Baiyu, Liu Jinyuan, et al. Electrical pulse shaping system on the high power laser system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9):1304. (in Chinese)
- [2] Xia Yuxing, Cao Xia, Xie Xinlong, et al. ICF pulse forming system based on integrated optics [J]. *Progress in Physics*, 1999, 19(1): 105–106. (in Chinese)
- [3] Gou Yongsheng, Liu Baiyu, Zhang Wei, et al. Electrical pulse generation technology for laser pulse shaping [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 2191–2194. (in Chinese)
- [4] Burkhart, S C, Voltage-controlled MESFET pulse shape generator[J]. *ICF Quarterly Report*, 1994, 4(10): 116054.
- [5] Oraizi H, Afsahi M, Transmission line modeling and numerical simulation for the analysis and optimum design of metamaterial multilayer structures [J]. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2009, 14: 263–283.
- [6] Lin Z, Chu Q -X. A novel approach to the design of dualband power divider with variable power dividing ratio based on coupled-lines [J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2010, 103: 271–284.
- [7] El Mashade, Abdel Aleem. Analysis of ultrashort pulse propagation in nonlinear optical fiber [J]. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2009, 12: 219–241.
- [8] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko. RF Circuit Design: Theory and Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 5.
- [9] Douglas Brooks. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 3.
- [10] Li Shimin, Huang Weiling. Principle and Design of Laser Device [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [11] Kumar M, Basu A, Koul S K. Circuit and active antennas for ultra-wide band pulse generation and transmission [J]. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2010, 23: 251–272.
- [12] Liu Hui. Electrical pulse shaping system design in high power laser experiment [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)