

提高飞秒超强激光对比度测量动态范围的一种新方法*

李伟昌^{1,2} 王兆华^{1,†} 刘成¹ 魏志义^{1,‡}

(1 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100190)

(2 国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 普克尔盒(Pockels cell)和格兰棱镜以一定方式组合使用时能对超强激光脉冲的主脉冲进行消光而不会削弱预脉冲的强度,利用这一特性,文章作者设计搭建了一套高动态范围的激光纳秒对比度测量系统,利用该方法将对对比度在 ns 量程内的动态测量范围提高了 3 个量级,并实验测得了 2.95×10^{-8} 的纳秒对比度.

关键词 钛宝石激光器,对比度测量,飞秒超强激光,动态范围

A new method to improve the dynamic range of contrast ratio measurement on the nanosecond scale*

LI Wei-Chang^{1,2} WANG Zhao-Hua^{1,†} LIU Cheng¹ WEI Zhi-Yi^{1,‡}

(1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Beijing 100190, China)

(2 Department of Applied Physics, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract By combining a Pockels cell and a Glan prism in a special way for polarization applications, the main pulse of an ultrahigh intensity laser can be greatly suppressed but the amplified spontaneous emission will not be weakened. Based on this fact, we designed a new method to measure the contrast ratio of ultra-intense laser pulses with a high dynamic range on the order of nanoseconds. As a result, the measurable dynamic range of the contrast ratio was increased by three orders of magnitude, and a contrast ratio of 2.95×10^{-8} was obtained with this new technique.

Keywords sapphire laser, contrast ratio measurement, femtosecond ultraintense laser, dynamic range

1 引言

随着啁啾脉冲放大(CPA)技术在超强激光领域的广泛应用和深入发展,人们所能得到的超强激光峰值功率不仅越来越高,而且对光束质量、对比度等参数也提出了越来越高的要求.迄今国际上已有多个研究组实现了信噪比达 10^{10} 量级并且峰值功率接近 PW 量级的超强激光输出^[1,2],成为国际上飞秒超强激光研究的最新重要进展.在 CPA 放大技术中,脉冲放大过程中的激光脉冲前沿和后沿会留下很强的自发辐射放大(ASE)激光^[3-5],通常这种 ASE 的强度要比主激光脉冲强度小 5—6 个数量级,并会有持续几个 ns 量级的时间长度.也就是说

对于一个 1TW 量级的激光系统,聚焦后也会有 10^{10} W/cm² 量级以上强度的 ASE.这样强度的 ASE 足可以产生等离子体,从而改变了主脉冲与物质相互作用的初始条件,严重影响超强激光物理实验的结果.

因此,如何准确地测量 ASE 激光的强度及时间分布等对比度信息,是超强激光物理实验研究中需要考虑的重要内容^[6-8].目前对于 ASE 及对比度的测量主要采用的是三阶相关仪,其所能测量的时间

* 国家自然科学基金(批准号:10804128)、国家高技术研究发展计划(批准号:2009AA8044031)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB815104)资助项目

2010-07-08 收到

† 通讯联系人. Email:zhwang@iphy. ac. cn

‡ 通讯联系人. Email:zywei@iphy. ac. cn

范围为数百 ps^[9,10]. 但是 ASE 实际存在的范围要远大于这一时间, 一般为主脉冲前后约 100ns 的时间范围.

以往的测量方法基本上是直接将预脉冲以及主脉冲分两路导入光电管, 再通过示波器观测, 如图 1 所示, (1) 路为主脉冲测量光路(这一路中的预脉冲被衰减, 无法观测), (2) 路为预脉冲测量光路(这一路中的主脉冲饱和, 无法测量). 测量的方法是首先测量主脉冲脉冲经过光路 (1) 在示波器上的示数 V_1 , 然后测量经过光路 (2) 时预脉冲的示数 V_2 , 考虑分束比以及衰减倍数, 就可以得到纳秒预脉冲的对比度. 这种方法的很大一个局限就是, 当激光脉冲对比度较高时, 为了观测到预脉冲, 需要将 (2) 路中的脉冲功率密度提高, 提高到一定的程度以上时, 往往就超过了光电管的损伤阈值, 因此限制了测量的动态范围. 本文将详细介绍一种利用普克尔盒 (Pockels cell, PC) 来提高 ns 时间范围内对比度测量动态范围的新方法^[11], 有效地克服了以往方法的缺点, 并给出了实验过程及实验结果.

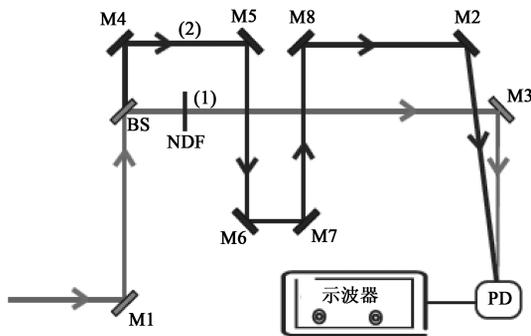


图 1 常规纳秒预脉冲测量装置示意图. 其中 BS 为分束片, M1—M8 是镀有 800nm 全反射膜的 45°反射镜, NDF 表示标定好的中性衰减片, PD 代表光电二极管. (1) 为主脉冲测量光路; (2) 为预脉冲测量光路

2 实验装置

该实验是利用一个百太瓦级的超强激光系统的前级放大部分进行的. 其中振荡器是一台自建的棱镜补偿色散克尔透镜锁模 (KLM) 飞秒钛宝石激光器, 其输出激光的重复频率为 80MHz, 光斑直径为 2mm, 单脉冲能量为 2.5nJ, 输出脉冲的信噪比约为 10^{-5} . 振荡器输出的种子光中的一部分注入一个 Martinez 展宽器, 展宽器由一块 1200 刻线常数的光栅、一块大尺寸平面反射镜及一块凹面反射镜组成, 经过两次展宽后, 种子光脉冲被展宽至 200ps, 然后种子脉冲进入两级多通放大器进行放大, 再经过压

缩器压缩. 压缩后的脉冲经过倍频以后作为系统光学参量放大器 (OPA) 的抽运光, 振荡器的另外一部分作为 OPA 的种子光. 光学参量放大器本身具有信噪比高的优势. 为了进一步提高系统的纳秒对比度, 我们在系统中加入了另外一个 PC 来抑制由于选单过程中偏振元件有限消光比所引入的预脉冲.

在测量对比度时, 一般是分别测量 ASE 和主脉冲的强度, 这是由于光电管和示波器的探测能力有限以及激光脉冲都有一定对比度的缘故^[12]. 特别是当激光脉冲的对比度较高 (10^{-6} 以上) 时, 如果用一般的方法来测量 ASE 强度, 必然要让激光脉冲全部入射到光电管中, 这时往往对光电管造成损伤^[13,14]. 因此如何提高 ns 对比度测量系统的测量动态范围是个很关键的问题.

针对这个问题, 我们设计了如图 2 所示的实验装置. 其中 M1, M2, M3 是 3 个镀有 800nm 全反射膜的 45°反射镜; P1, P2, P3 是 3 个直径 20mm 的格兰棱镜, 它们都是只允许 S 偏振的光通过; PC1, PC2 是 2 个普克尔盒, 实验中普克尔盒的工作电压是 8000V; PD 代表光电二极管, 而 Filter 是实验中加入的衰减片.

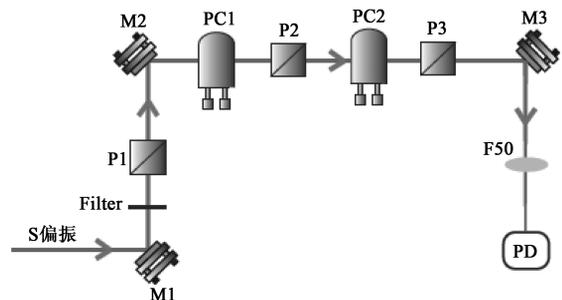


图 2 实验装置示意图. 其中 M1, M2, M3 是 3 个镀有 800nm 全反射膜的 45°反射镜; P1, P2, P3 是 3 个直径 20mm 的格兰棱镜; PC1, PC2 是 2 个普克尔盒; PD 代表光电二极管, 而 Filter 是实验中加入的衰减片 F50 为透镜

3 纳秒 (ns) 大量程内对比度实验测量及数据分析

实验中, 中心波长 800nm、脉宽 200ps、重复频率 10Hz 的激光脉冲以 S 偏振入射到反射镜 M1 上, P1 起检偏振的作用, PC1 和 P2 组合使用. 具体使用方法是: 首先在 PC1 不通电的情况下, 调节普克尔盒的两个姿态旋钮, 使得通过 P2 之后的光强最强, 然后给 PC1 通电 (电压加至 8000V), 调节延时旋钮, 使得此时通过 P2 之后的光强最弱. 当 PC1

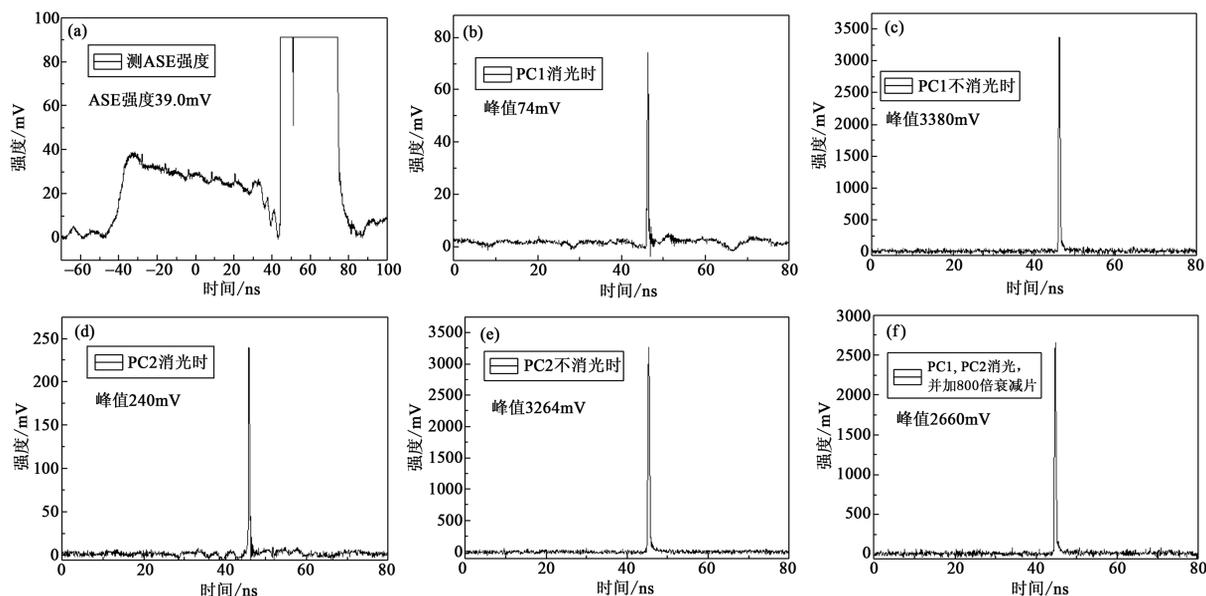


图3 纳秒(ns)量程内测量得到的激光对比度数据图

通电时(电压加至 8000V),它们会对主脉冲起消光作用,而对 ASE 没有影响,当 PC1 不通电时,它们允许主脉冲和 ASE 全部通过;同理,PC2 和 P3 的组合起相同作用.这样,在测量 ASE 强度时,给 PC1 和 PC2 通电对主脉冲消光,避免了激光脉冲因功率密度过高而损坏光电管.显然,这种方法所提高的测量动态范围取决于两组普克尔盒的最大消光比.另外,当 ASE 强度很低时,还可以在光电二极管(PD)前加短焦透镜进行聚焦.

为测得 ASE 强度,先给 PC1 和 PC2 通电,对主脉冲消光,结果如图 3(a)所示.在主脉冲前,ASE 强度为 39mV,记为 $V_{ase} = 39\text{mV}$.然后,测 PC1 和 P2 组合的消光比,记为 K_1 .保持 PC2 始终处于不通电状态,给 PC1 通电(电压加至 8000V),对主脉冲消光,测得结果如图 3(b)所示,然后让 PC1 不通电,不对主脉冲消光,测得结果如图 3(c)所示,则可得到:

$$K_1 = 74\text{mV}/3380\text{mV} = 2.19 \times 10^{-2} \quad (1)$$

测 PC2 和 P3 组合的消光比,记为 K_2 .保持 PC1 始终处于不通电状态,给 PC2 通电(电压加至 8000V),对主脉冲消光,测得结果如图 3(d)所示,然后让 PC2 不通电,不对主脉冲消光,测得结果如图 3(e)所示,则可得到:

$$K_2 = 240\text{mV}/3264\text{mV} = 7.35 \times 10^{-2} \quad (2)$$

最后,测主脉冲强度,记为 $V_{\text{main-pulse}}$.先将 PC1、PC2 通电(电压加至 8000V),对主脉冲消光,示波器显示主脉冲仍然饱和,于是在 P1 前加衰减片,使得主脉冲衰减至不饱和,示波器显示衰减后的主脉冲

强度为 2660mV,结果如图 3(f)所示.实验中所加衰减片衰减系数为 800 倍.那么,主脉冲实际强度为

$$\begin{aligned} V_{\text{main-pulse}} &= 800 \times 2660\text{mV} / (K_1 \times K_2) \\ &= 1.32 \times 10^9 \text{mV} \end{aligned} \quad (3)$$

综合以上数据,激光脉冲对比度为

$$\begin{aligned} V_{ase} / V_{\text{main-pulse}} &= 39\text{mV} / 1.32 \times 10^9 \text{mV} \\ &= 2.95 \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (4)$$

两个普克尔盒总的消光比为

$$\begin{aligned} K_1 \times K_2 &= 2.19 \times 10^{-2} \times 7.35 \times 10^{-2} \\ &= 1.61 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (5)$$

也就是说,该测量方法使 ns 对比度测量的动态范围提高了 3 个量级.

4 结论

普克尔盒与格兰棱镜配合使用,可以使主脉冲强度在普克尔盒通电时被大大削弱,而不会对 ASE 的通过造成影响,从而提高了 ns 对比度测量的动态范围,因此普克尔盒的消光比直接决定了 ns 对比度测量动态范围的提高程度.本实验中采用两组普克尔盒和格兰棱镜来进行实验,使得 ns 对比度测量的动态范围提高了 3 个量级,并在主脉冲前 80ns 处测到了 2.95×10^{-8} 的激光脉冲对比度.

致谢 感谢与滕浩博士、马燕云副教授及张杰院士的有益讨论.

参考文献

- [1] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y *et al.*, *Opt. Lett.*, 2003,28:1594
- [2] Wei Z Y, Wang Z H, Wang P *et al.* *Journal of Physics: Conference Series*,2008,112:032003
- [3] Okuda I, Shaw M J. *Appl. Phys. B*,1992,54:506
- [4] 楚晓亮,张彬,袁晓东等. 强激光与粒子光束,2003,15:559 [Chu X L,Zhang B,Yuan X D *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*,2003,15:559 (in Chinese)]
- [5] Malka G. *Phys. Rev. E*, 2002,66:1
- [6] 王兆华,王鹏,魏志义等. 强激光与粒子光束,2004,16:434 [Wang Z H,Wang P,Wei Z Y *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*,2004,16:434 (in Chinese)]
- [7] Hosokai T. *Physical Review E*, 2003,67:1
- [8] Aoyama M. *Appl. Phys. B*, 2000, 70:149
- [9] 王兆华,王鹏,魏志义等. 量子电子学报,2005,22:173 [Wang Z H, Wang P, Wei Z Y *et al.* *Chinese Journal of Quantum Electronics*,2005,22:173(in Chinese)]
- [10] 张福领,欧阳小平,谢兴龙等. 中国激光,2009,36:1171 [Zhang F L,Ouyang X P,Xie X L *et al.* *Chinese Journal of Laser.* ,2009,36:1171(in Chinese)]
- [11] Igor J, Barty C P J, Constantin H *et al.* *Opt. Lett.* ,2006,31:787
- [12] 罗福,江继军,孙承纬,强激光与粒子光束,2004,16:685[Luo F, Jiang J J, Sun C W. *High Power Laser and Particle Beams*,2004,16:685 (in Chinese)]
- [13] Marco J, Lars J, Andrius M *et al.* *Opt. Express*,2009,17:12269
- [14] Bartoli F, Esterowitz L, Kruer M *et al.* *Appl. Opt.* ,1977, 16:2934