

# 大口径倒腔式等离子体开关

吴登生<sup>1</sup> 张雄军<sup>1\*</sup> 张君<sup>1</sup> 王仁贵<sup>2</sup> 田晓琳<sup>1</sup> 顾侃<sup>2</sup> 朱俭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900  
<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800  
<sup>3</sup>中国工程物理研究院激光等离子体研究所, 上海 201800

**摘要** 大口径倒腔式等离子体开关是神光 II 升级装置倒腔式多程放大方案的关键单元, 该方案要求等离子体开关能够在极短的时间内完成工作状态的转换。采用正负开关脉冲驱动的等离子体开关响应时间较长, 无法满足装置的使用要求。基于 Blumlein 脉冲形成线结构的高压低阻抗抗开关脉冲发生器能够实现倍压输出, 使单一脉冲驱动等离子体开关成为可能, 从而大幅减小开关响应时间。单一脉冲驱动的 350 mm×350 mm 口径倒腔式等离子体开关理论充电时间约为 54 ns, 其开关响应时间可做到小于 90 ns。实验测得的等离子体开关全口径开关效率大于 99.7%, 静态消光比大于 381, 时间窗口顶宽大于 160 ns, 底宽小于 400 ns, 上述指标均满足神光 II 升级装置的使用要求。

**关键词** 光学器件; 等离子体开关; 单一脉冲驱动; 开关特性

**中图分类号** O436.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0902004

## Large Aperture Plasma Electrode Pockels Cell for Multi-Pass Amplified Scheme

Wu Dengsheng<sup>1</sup> Zhang Xiongjun<sup>1</sup> Zhang Jun<sup>1</sup> Wang Rengui<sup>2</sup> Tian Xiaolin<sup>1</sup>  
Gu Kan<sup>2</sup> Zhu Jian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China  
<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>3</sup>Shanghai Institute of Laser and Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

**Abstract** Large aperture plasma electrode Pockels cell (PEPC) is the key unit of the multi-pass amplified scheme of SG II upgrading laser. The PEPC in this scheme should achieve the status switching between on and off in a very short time. The response time of the PEPC driven by positive-negative switching pulses is not as short as the demand of the multi-pass amplified scheme. In the single-pulse process, the low-impedance high voltage generator based on Blumlein pulse-forming line is used to drive the PEPC, and the response time can be reduced greatly. The theoretical charge time of the plasma switch with 350 mm×350 mm aperture is about 54 ns, and the response time can be less than 90 ns in single-pulse process. The experimental results of the switching efficiency of full aperture are higher than 99.7%. The extinction rate exceeds 381. The top width of the time window is larger than 160 ns, and the bottom width is less than 400 ns. All these experimental results can meet the specification of SG II upgrading laser.

**Key words** optical devices; PEPC; single-pulse process; switching characteristic

**OCIS codes** 230.2090; 140.3280; 140.3538

## 1 引言

大口径等离子体开关(PEPC)在神光 II 升级装置中的使用方式与美国的国家点火装置(NIF)中的相似, 等离子体开关在主激光第 2 次和第 3 次通过

时处于工作状态, 在主激光第 1 次和第 4 次通过时不工作<sup>[1~4]</sup>。作为神光 II 升级装置倒腔式多程放大方案的关键单元, 大口径倒腔式等离子体开关能否成功研制将决定该方案的可行性。

收稿日期: 2012-04-23; 收到修改稿日期: 2012-05-16

作者简介: 吴登生(1980—), 男, 本科, 助理研究员, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: andersen929@hotmail.com

\*通信联系人。E-mail: zhang\_xiongjun@163.com

神光 II 升级装置中,主激光四次通过等离子体开关的时间间隔分别为 270、34、270 ns,这表明等离子体开关必须在 270 ns 内实现工作状态的转换,即从非工作状态变为工作状态或从工作状态恢复到非工作状态。目前使用的开关脉冲驱动技术,采用正负开关脉冲叠加以获得晶体两侧的高电压差,这种驱动方式响应时间较长。根据前期对 400 mm 口径等离子体开关的实验数据<sup>[5]</sup>可以计算出,350 mm 等离子体开关的响应时间约为 200 ns,如果考虑到触发晃动以及脉冲底宽等的影响,采用正负开关脉冲驱动 350 mm 等离子体开关是无法满足神光 II 升级装置使用要求的。通过对正负脉冲驱动技术的原理进行分析可知<sup>[6~15]</sup>,如果将正负开关脉冲驱动改为单一脉冲驱动,其充电时间将由  $4RC$  减小为  $2RC$ ,其中  $R$  为负载电阻, $C$  为泡克耳斯盒的等效电容,可以大大减小响应时间。但采用单一脉冲驱动,需要将单台驱动源的输出电压提高 1 倍,同时还必须保证输出脉冲的低抖动,因此对驱动源的研制提出较高要求。本文采用 Blumlein 脉冲形成技术研制出高压低阻抗开关脉冲发生器,实现了单一脉冲驱动等离子体开关,获得了良好的开关特性。

## 2 低抖动高压低阻抗开关脉冲发生器

图 1 为单一脉冲驱动等离子体开关原理图,负载电阻两端分别与等离子体开关两放电腔内的电极连接,放电电极位于晶体两侧。其击穿过程包含高电压场致气体击穿和介质阻挡放电。等离子体开关放电腔内工作气体的击穿由高电压场致发射电离工作气体来实现。由气体放电理论得知,介质阻挡放电由大量呈现细丝状的细微快脉冲放电构成,在较低的激励电压条件下,微放电在一维空间内是相互独立存在的,随着激励电压的增加,原来独立的微放电之间开始出现其他的微放电,并且沉积在电介质表面的电荷在电介质表面的扩散作用也随之增强。激励电压越高,这些现象表现得越明显,直至最后在电介质表面形成一层很强很均匀的电荷层<sup>[16]</sup>。

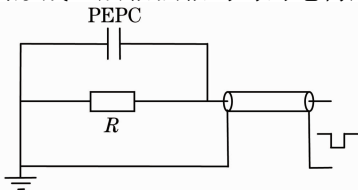


图 1 单一脉冲驱动等离子体开关原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of plasma electrode Pockels cell driven by single-pulse

单一脉冲驱动模式下,等离子体开关理论充电时间为  $\tau=2RC$ ,在负载电阻相同的情况下,其充电时间为正负脉冲驱动模式的一半。采用单一脉冲驱动方式来驱动等离子体开关,需要在负载上实现至少 20 kV 的输出。目前常用的脉冲成形的方法有单传输线成形和双传输线(Blumlein 型线)成形。采用单传输线型脉冲发生器在负载上实现 20 kV 的输出,则其充电电压至少在 40 kV 以上,对应的氢闸管的电压等级也应提高到 40 kV 以上,而氢闸管电压等级的提高会使输出脉冲的抖动增加。双传输线成形具有倍压输出的优点,不需要使用高电压等级的氢闸管,有利于触发抖动的降低,综合考虑成本以及技术难度的情况下,双传输线成形相对单传输线成形更具优势。

图 2 是 Blumlein 型脉冲发生器原理示意图,传输线  $Z_1$ 、 $Z_2$  串联连接,负载电阻  $R_L$  串联在两传输线之间,传输线中电磁波传播过程如图 3 所示。若  $Z_1 = Z_2 = Z_0 = \frac{1}{2}R_L$ ,则在  $\tau \leq t < 3\tau$  ( $\tau$  为电磁波在单根传输线上的传播时间)时间范围内负载  $R_L$  上将产生一个幅值为  $U_0$ ,持续时间为  $2\tau$  的方波电压。

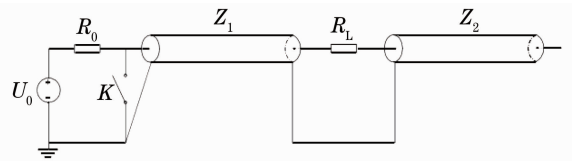


图 2 Blumlein 型脉冲发生器原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Blumlein pulse-forming line

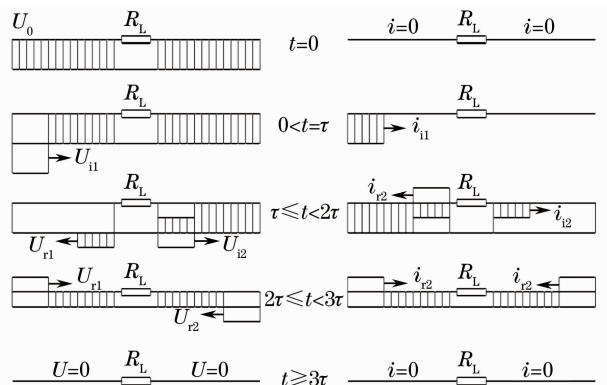


图 3 Blumlein 传输线传播过程

Fig. 3 Transmission process of Blumlein pulse-forming line

Blumlein 型脉冲发生器输出电压与充电电压相等,但是其形成线阻抗为负载阻抗的  $1/2$ ,若负载阻抗取  $12.5 \Omega$ ,则形成线阻抗为  $6.25 \Omega$ 。实验发现如果继续减小形成线阻抗,则输出脉冲波形容易受

到寄生参数的影响,使脉冲整形难度增加。由于 Blumlein 型人工形成线由集中参数的电容和电感组成,若要输出高质量方波,则各集中参数元器件参数特性应保持较高一致性。Blumlein 型脉冲发生器输出脉冲后沿是通过前后两个形成线的反射波和折射波在负载处的混合匹配实现的,由于倒腔式放大方案对等离子体开关由工作状态恢复到非工作状态有着同样严格的时间要求,为了获得尽量短的脉冲后沿,可以减少负载端裸露的电缆芯线与电缆皮的长度,各连接处采用宽导体连接,以减小波形在负载处的畸变对后沿的影响。

### 3 等离子体开关特性

#### 3.1 开关静态消光比

开关消光比测试原理如图 4 所示,测试光源为

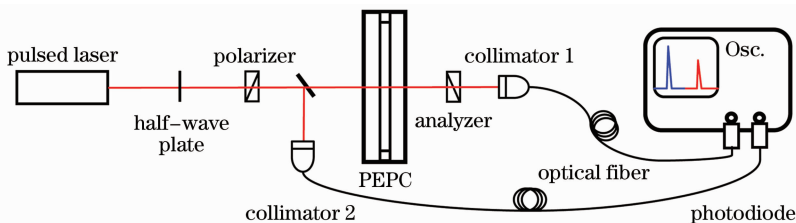


图 4 开关静态消光比及开关效率测试光路

Fig. 4 Measurement scheme of extinction rate and switching efficiency

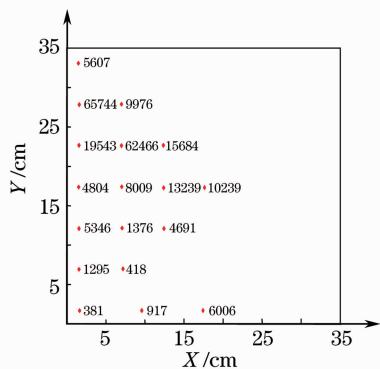


图 5 开关消光比测试结果

Fig. 5 Measurement result of extinction rate

#### 3.2 开关效率

电光开关效率测试原理如图 4 所示,检偏器与起偏器平行,则等离子体开关的开关效率  $\eta$  为

$$\eta = (1 - I_2/I_0) \times 100\%, \quad (2)$$

式中  $I_2$  为等离子体开关工作时进入准直器 1 的归一化后的光强。

实验同样以点测量方式测得通光口径四分之一区域内的 16 个点的开关效率,结果如图 6 所示,每个点的测试结果均为 10 次平均后的数值。在

YAG 脉冲激光器,起偏器与检偏器均为高消光比的格兰棱镜,两个尾纤型光电探测器分别用于监测进入等离子体开关的光强和透过等离子体开关与检偏器的光强。等离子体开关的静态消光比为

$$R_E = (I_0 + I_1)/I_1, \quad (1)$$

式中  $I_0$  为检偏器与起偏器平行时,进入准直器 1 的归一化后的光强,  $I_1$  为检偏器与起偏器垂直时,进入准直器 1 的归一化后的光强。

实验以点测量方式测得等离子体开关通光口径内消光比的分布,基于对称性,实验测量了通光口径四分之一区域内的 18 个点的消光比,测量结果如图 5 所示(彩图见网络电子版),图中红点表示测量点,红点右边数值表示该测量点静态消光比数值。以图 5 左下角处最低消光比计算,在低气压状态下,等离子体开关全口径消光比大于 381。

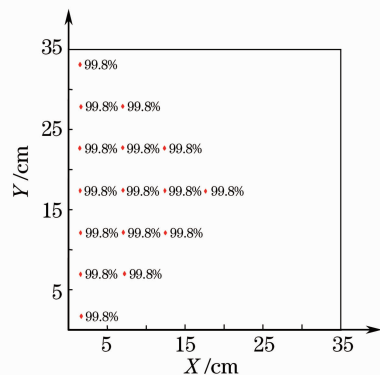


图 6 开关效率测试光路结果

Fig. 6 Measurement result of switching efficiency

20 kV 驱动电压下,等离子体开关全口径开关效率大于 99.7%。

#### 3.3 开关时间窗口

开关时间窗口定义为等离子体开关全口径达到最佳开关效率的持续时间,即等离子体开关全口径达到半波电压后的持续时间。离线测试时取等离子体开关通光口径边缘透射光脉冲上升至幅值的 98% 到通光口径中心透射光脉冲下降至幅值的 98% 的时间间隔<sup>[5]</sup>作为开关时间窗口。开关时间窗

口离线测试原理如图 7 所示,连续光通过起偏器和分光镜后分为两束线偏振光,分别通过等离子体开关通光口径的边缘和中心,经检偏器和准直器后,分别由光电二极管将探测到的波形显示在示波器上。

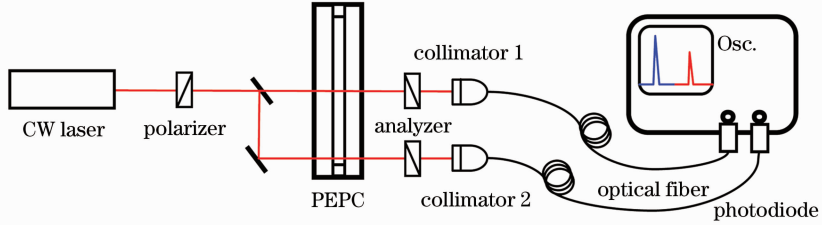


图 7 开关时间窗口测试光路

Fig. 7 Measurement scheme of Pockels cell time window

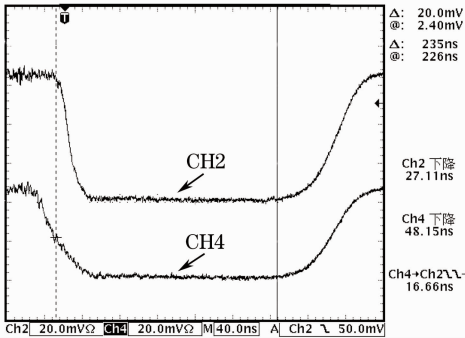


图 8 开关时间窗口测试示波器图

Fig. 8 Photograph of Pockels cell time window recorded by oscilloscope

开关时间窗口的在线测试是通过调节主激光与开关脉冲之间的相对延时,测量开关效率随时间的变化,以此间接测得开关时间窗口。开关时间窗口在线测试光路如图 9 所示,图中 CM1 为腔镜;AMP 为放大器。测试时,改变开关脉冲的延时,每隔 20 ns 测试一次开关效率,测试结果如图 10 所示,最大开关效率为 99.88%。实验共测试了 15 个时间点,每个点的数值均为多次测量的平均值,其中第 9 个时间点对应的是第二程主激光通过等离子体开关的时刻,第 14 个时间点以后,第一程主激光通过等离子体开关时,开关已经工作,主激光偏振态偏转为垂直方向,被放大器内以布儒斯特角放置的铍玻璃片偏出,到达卡计的能量极小,未能测到有效数值。

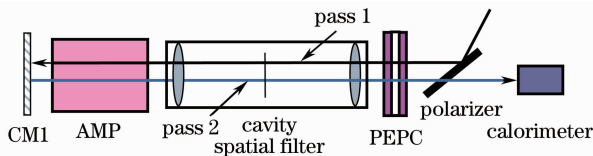


图 9 开关时间窗口在线测试光路图

Fig. 9 Online measurement scheme of Pockels cell time window

图 8 为开关时间窗口测试的示波器图,CH4 为通光口径边缘的透射光脉冲波形,CH2 为通光口径中心的透射光脉冲波形,开关时间窗口底宽小于 400 ns,平顶宽度大于 160 ns。

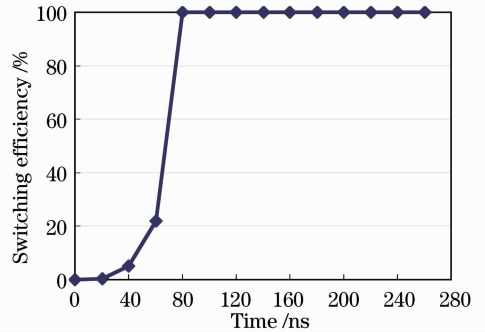


图 10 通过测试开关效率得到的时间窗口

Fig. 10 Time window obtained by measuring the switching efficiency

### 3.4 开关时间窗口晃动

开关时间窗口晃动的测试仍然利用图 7 所示光路进行,以同步机触发脉冲为基准,测试透射的连续光的削波光脉冲与基准触发脉冲之间的延时晃动,该晃动包含开关脉冲发生器输出晃动、等离子体开关内气体击穿延时晃动以及同步机两输出通道间的晃动。实验以 1/30 Hz 的频率触发开关脉冲发生器 10 发次,记录测试结果,实验结果中延时最大值为 255.9 ns,最小值为 239.6 ns,开关时间窗口晃动为 15.9 ns(峰谷值)。

## 4 结 论

原有的采用正负开关脉冲驱动的等离子体开关因响应时间较长,无法满足神光 II 升级装置对电光开关的指标要求。实验研制的基于 Blumlein 形成线结构的高压低阻抗脉冲发生器使单一脉冲驱动等离子体开关成为可能,并能够大幅减小响应时间,实验测得的各项指标均满足神光 II 升级装置的指标要求。单一脉冲驱动的大口径倒腔式等离子体开关的成功研制为下一阶段倒腔式等离子体开关的阵列化

研究奠定了基础,降低了神光Ⅱ升级装置等离子体开关研制的风险,开拓了国内大口径等离子体开关工程应用的前景。

### 参 考 文 献

- 1 J. Goldhar, M. A. Henesian. Electro-optical switches with plasma electrodes[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(3): 73~75
- 2 M. A. Rhodes, B. Woods, J. J. DeYoreo *et al.*. Performance of large-aperture optical switches for high-energy ICF lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(24): 5312~5325
- 3 C. D. Boley, M. A. Rhodes. Modeling of plasma behavior in a plasma electrode Pockels cell[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27**(3): 713~726
- 4 J. Gardelle, E. Pasini. A simple operation of a plasma-electrode Pockels cell for the laser megajoules[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(5): 2631~2636
- 5 Wu Dengsheng, Zhang Xiongjun, Zheng Jiangang *et al.*. Study on temporal behaviour of one-pulse-process plasma electrodes Pockels cell with 400 mm×400 mm aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1227~1230  
吴登生, 张雄军, 郑建刚等. 400 mm×400 mm 口径单脉冲普克尔盒时间特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1227~1230
- 6 Wu Dengsheng, Zhang Xiongjun, Zheng Kuixing *et al.*. Study of low jitter and small drift switch pulse generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1286~1288  
吴登生, 张雄军, 郑奎兴等. 低抖动小漂移开关脉冲发生器研究[J]. *强激光与离子束*, 2005, **17**(9): 1286~1288
- 7 Xiongjun Zhang, Dengsheng Wu, Jun Zhang *et al.*. One-pulse driven plasma Pockels cell with DKDP crystal for repetition-rate application[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(19): 17164~17169
- 8 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zheng Kuixing *et al.*. Electro-optical switch with 280 mm×280 mm aperture driven by one-pulse process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 254~258  
张雄军, 吴登生, 郑奎兴等. 280 mm×280 mm 口径单脉冲过程电光开关[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 254~258
- 9 Zhang Xiongjun, Feng Guoying, Zheng Kuixing *et al.*. Parallel driving to plasma electrode Pockels cells[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1173~1176  
张雄军, 冯国英, 郑奎兴等. 等离子体电极普克尔盒的并联驱动[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1173~1176
- 10 Zhang Xiongjun, Zheng Kuixing, Wu Dengsheng *et al.*. Analyses on depolarization losses of plasma-electrode Pockels cell[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(suppl.): 384~386  
张雄军, 郑奎兴, 吴登生等. 等离子体电极普克尔盒退偏损耗分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(增刊): 384~386
- 11 Guo Wenqiong, Zhou Xiaojun, Zhang Xiongjun *et al.*. Simulation electro-optic switch of plasma-electrode Pockels cells driven by one-pulse process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(7): 3519~3523  
郭文琼, 周晓军, 张雄军等. 等离子体电极普克尔盒电光开关单脉冲过程数值模拟[J]. *物理学报*, 2006, **55**(7): 3519~3523
- 12 Guo Wenqiong, Zhang Xiongjun, Zhou Xiaojun *et al.*. Numerical analysis of helium-pressure influence on characteristics of electro-optic switch driven by single-pulse process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 695~700  
郭文琼, 张雄军, 周晓军等. 氦气压强对单脉冲过程电光开关特性影响的数值分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 695~700
- 13 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Lu Jingping *et al.*. High average power electro-optical switches with thermal compensation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(10): 36~40  
张雄军, 吴登生, 鲁敬平等. 高平均功率热补偿电光开关[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(10): 36~40
- 14 Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Wei Xiaofeng *et al.*. Depolarization loss analysis of electro-optic crystal KDP heated by repetition frequency laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 229~233  
张君, 张雄军, 魏晓峰等. 重频应用下等离子体电光开关热退偏损耗分析[J]. *强激光与离子束*, 2008, **20**(2): 229~233
- 15 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zhang Jun *et al.*. Research on repetition rate plasma Pockels cell with 20 mm aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1772~1775  
张雄军, 吴登生, 张君等. 20 mm 孔径重复频率等离子体电光开关研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1772~1775
- 16 Zhao Yanhui, Zhou Jiangang, Wu Xiaodong *et al.*. Study on discharge characteristic of different configurable DBD [J]. *J. Dalian Maritime University*, 2004, **30**(3): 59~61, 87  
赵艳辉, 周建刚, 吴晓东等. 不同结构介质阻挡放电的放电特性[J]. *大连海事大学学报*, 2004, **30**(3): 59~61, 87

栏目编辑: 宋梅梅