

文章编号: 0253-2239(2006)03-0471-5

不同偏振飞秒激光经块状材料传输后的脉宽压缩*

朱 毅^{1,2} 陈晓伟^{1,2} 冷雨欣¹ 刘 军^{1,2} 林礼煌¹ 李儒新¹ 徐至展¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 实验研究了线偏振和圆偏振状态下的飞秒强激光脉冲在块状材料中的传输过程。不同偏振的激光脉冲在传输过程中得到了不同程度的光谱展宽, 经色散补偿后, 脉冲时域宽度均得到了压缩。详细分析了压缩脉冲的脉宽以及啁啾情况与入射激光脉冲能量之间的关系, 比较了飞秒激光在线偏振及圆偏振情况下的不同压缩效果。在线偏振入射光情况下得到了最短 21 fs 的压缩脉冲宽度, 在圆偏振情况下得到的最短脉冲宽度为 22 fs。实验结果表明, 这种光谱展宽与色散补偿方式对圆偏振光同样适用, 而且圆偏振的入射激光将更有利于对更高能量的脉冲进行压缩。在色散补偿量相同的情况下, 压缩效果随入射脉冲能量变化的规律符合理论估计。

关键词: 超快光学; 飞秒脉冲压缩; 圆偏振光; 块状材料

中图分类号: TN012 文献标识码: A

Pulse Compression of Differently Polarized Femtosecond Laser After Propagation in Bulk Media

Zhu Yi^{1,2} Chen Xiaowei^{1,2} Leng Yuxin¹ Liu Jun^{1,2}
Lin Lihuang¹ Li Ruxin¹ Xu Zhizhan¹

(¹ State Key Laboratory of High-Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The propagation of linearly and circularly polarized high-intensity femtosecond laser pulses in bulk media is experimentally investigated. The spectrum broadening is different after propagation in bulk media for different input pulse polarization. The pulse width is compressed after the dispersion compensation and the different compression results when using linearly and circularly polarized laser pulse are also compared. The effect of the input laser pulse energy on the compressed pulse width and its envelope is investigated. The shortest compressed pulse width is 21 fs by using linearly polarized input pulses, and it is 22 fs for circularly polarized laser pulses. The experimental result shows that the spectrum broadening and dispersion compensation method is also valid when compressing circularly polarized laser pulses, which will benefit higher-energy femtosecond laser pulse compression. When the dispersion compensation is the same, the relationship between the compression result and the input laser energy agrees with the theoretical analysis.

Key words: ultrafast optics; femtosecond laser pulse compression; circularly polarized light; bulk media

1 引 言

近几年来, 飞秒强激光技术得到了飞速的发展^[1]。超高功率和超短时间尺度的激光脉冲已经成为人类在进行强场物理以及超快过程研究中所不可

缺少的工具。科学家们一直在提高激光脉冲输出的峰值功率方面作着不懈的努力。要提高峰值功率, 一方面, 可以提高单个激光脉冲的能量; 由于激光啁啾脉冲放大技术(CPA)^[2]的出现, 人们可以通过多

* 国家自然科学基金(69925513, 19974058)资助课题。

作者简介: 朱 毅(1979~), 男, 湖北武汉人, 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室硕士研究生, 主要从事超快激光脉冲压缩方面的研究。E-mail: zhuyi@mail.siom.ac.cn

收稿日期: 2005-04-15; 收到修改稿日期: 2005-07-07

级放大装置让激光脉冲的能量得到极大的提高。目前,钛宝石激光放大器已经可以输出几十焦耳的激光能量^[3]。另一方面,压缩输出激光的脉冲宽度也可以达到提高脉冲峰值功率的目的:目前飞秒激光振荡器的输出已经达到 5 fs 脉冲宽度^[4]。这种脉冲时域宽度仅有几个光周期的超短脉冲不仅可以提高峰值功率,也是人类目前可以直接获得的最短时间间隔。这种超短激光在与物质相互作用方面揭示出了许多以前利用长脉冲所无法发现的现象,如高次谐波单个阿秒脉冲产生^[5],惰性气体非对称域上电离^[6]等。

飞秒激光脉冲的压缩技术是获得强的周期量级脉冲的必需手段。其基本思想是展宽脉冲的频谱,然后补偿各个频谱分量间的相位差,即色散补偿。早期普遍采用的频谱展宽非线性介质是普通光纤,飞秒激光脉冲在光纤中传播后再通过光栅对补偿色散从而得到压缩的出射激光。由于普通光纤的自聚焦功率阈值很低,这种方法只适用于 nJ 量级的光脉冲压缩。Nisoli 等^[7]改进了这种方法,他们采用充有惰性气体的空心光纤作为展宽介质,由于惰性气体电离阈值高,非线性效应强度可控,这种压缩方式成为人们得到 mJ 量级,10 fs 左右强激光脉冲的主要途径。

近年来,人们开始尝试采用块状材料作为频谱展宽介质。Corkum 等^[8]将激光聚焦到玻璃材料上,并用小孔进行空间滤波。当采用光栅对补偿色散后,他们将 92 fs, 0.3 mJ 的脉冲压缩到了 16 fs, 7 μ J。由于他们在块状材料出射处用小孔滤波,所以能量效率很低。2003 年,Constant 等^[9]改进了他们的方法,将滤波小孔放在聚焦激光的焦点附近,这样可以得到较大的能量效率,当采用棱镜对与啁啾镜相结合的色散补偿方法后,他们将 42 fs, 480 μ J 的脉冲压缩到了 14 fs, 220 μ J。

我们的实验报道了一种新的块状材料压缩方式,并且系统地研究了不同入射脉冲能量下的压缩效果。作为非线性介质的玻璃材料被放置在经透镜聚焦的激光脉冲的焦点后,发现采用这种方式也可以得到很好的光谱展宽,同时激光由于在玻璃材料里的自聚焦传输仍旧保持很好的光斑模式。这种方法避免了前人实验中所用的空间滤波装置,从而提高了系统在光谱展宽段的能量效率。同时研究了采用圆偏振初始激光时的压缩效应,并将结果与线偏振时的情况做了比较,发现压缩效果与入射脉冲能量的关系符合理论估计。

2 实验装置与方法

如图 1 所示,实验装置主要由飞秒激光系统,聚焦和准直光路,棱镜对色散补偿系统和测量设备组成。实验中所用的是台式全固态飞秒激光器系统,工作参量为:输出中心波长 800 nm,脉冲宽度 50 fs,单脉冲能量为 0.5 mJ,系统重复频率为 1~1 kHz 可调。激光器输出为基模高斯光束,光斑直径 7 mm。激光束 s 首先通过一个由 $\lambda/2$ 波片和偏振片组成的偏振模板,以便连续调节激光能量(图示为 Attenuator),再经一个 $f=1$ m 的透镜聚焦后入射到作为非线性介质的块状材料上。我们在光路透镜几何焦点后 170 mm 处插入一片 3 mm 厚的 BK7 玻璃作为光谱展宽介质,出射激光通过一个 $f=50$ cm 的镀银凹面镜 CM 准直,再通过镀银平面反射镜和分束镜将一部分光引入到光谱仪,另一部分光通过一个棱镜对压缩器后被送入光谱相位相干直接重建装置(SPIDER)^[10]来测量脉宽。所用棱镜对为顶角 45°的石英棱镜,在棱镜对后加镀银全反射镜,让激光两次通过以增大负色散量。当研究圆偏振光的压缩效果时,在透镜前插入 $\lambda/4$ 波片,将线偏振激光转为圆偏振后与块状材料相互作用。出射激光经准直后用与第一个波片快轴方向呈 90°角放置的另一个 $\lambda/4$ 波片将激光转回线偏振,从而可以测量其对应光谱和脉宽。

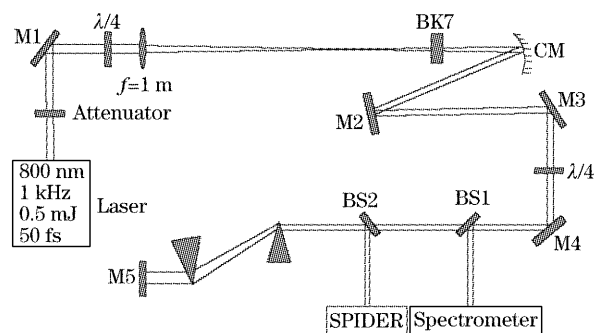


图 1 实验装置示意图。Attenuator: 能量衰减器;CM: 镀银凹面镜;BS: 分束镜;M1: 镀 800 nm 高反膜平面镜;M2~M5: 镀银平面镜

Fig.1 The experimental setup. Attenuator: energy attenuator; CM: silver-coated concave mirror; BS: beam splitter; M1: HR mirror for 800 nm; M2~M5: silver-coated mirror

3 实验结果和讨论

我们首先研究了线偏振激光情况下不同能量入射脉冲下的压缩情况。此时光路中未插入 $\lambda/4$ 波

片。从激光器输出的激光偏振为 p 偏振,经半波片与偏振片调节能量后旋转为 s 偏振。将一块 3 mm 厚的 BK7 玻璃作为非线性介质插入透镜几何焦点后,用来展宽脉冲光谱。激光在该块状介质中传输后会由于自相位调制效应发生光谱展宽现象。实验中所入射的激光典型参量为单脉冲能量 0.25 mJ,脉宽 50 fs,当脉冲经聚焦后再入射到玻璃表面的光斑大小约为 0.9 mm,这对应于玻璃介质内的光强为 $I \approx 6.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 。在如此高的入射光强下,出射激光的光谱宽度从原来的 22 nm 展宽到了 40 nm 左右。经准直后的光束在入射到棱镜对中进行色散补偿。为了使激光在棱镜对内的光程尽量

短,以减小熔融石英棱镜对的二阶和三阶材料色散对压缩效果的影响,调节棱镜对入射方式,使光束尽量靠近棱镜对顶角入射。实验中,当入射脉冲能量为 0.20 mJ 时,调节棱镜对间距到 2.12 m,得到了最佳的压缩效果。为了研究不同能量脉冲入射情况下的压缩效果,在改变入射激光能量的同时,保持了棱镜对间距不变。

为了得到压缩脉冲的光谱相位并反演出脉冲时域形状,用光谱相位相干直接重建装置对经色散补偿后的脉冲进行测量。图 2 所示为线偏振激光入射时不同脉冲能量下的压缩效果图。

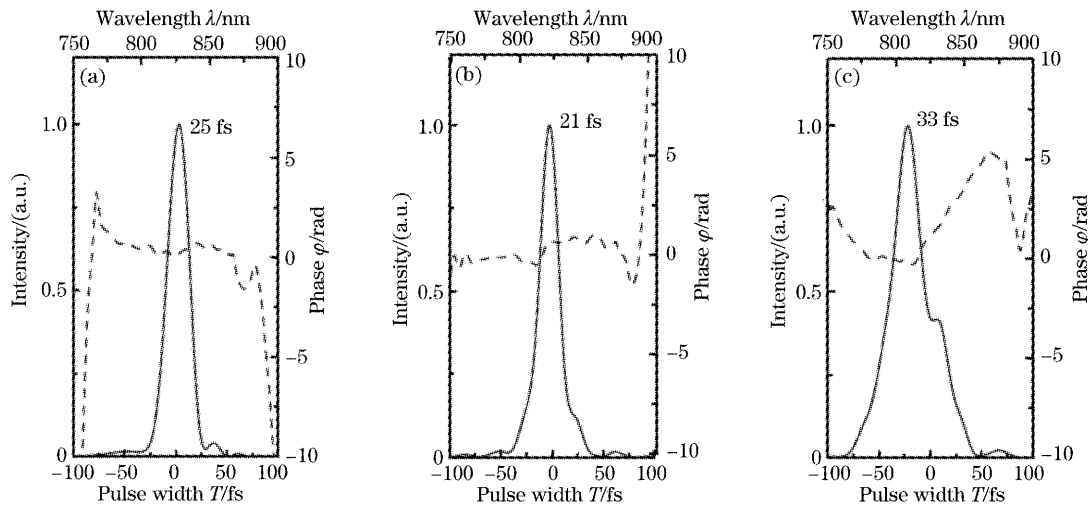


图 2 线偏振入射光情况下的脉冲压缩效果。(a),(b),(c)中对应的入射脉冲能量分别为 0.15 mJ,0.20 mJ,0.26 mJ
Fig. 2 The pulse compression effect when using linearly polarized input laser pulse of which the energy is 0.15 mJ (a), 0.20 mJ (b) and 0.26 mJ (c)

由图 2 中可以看到,不同入射能量的脉冲得到的压缩效果也不同。这可以由自相位调制效应的光强依赖关系来解释。由于我们采用的色散补偿光路相同,所以可以提供给经块状材料光谱展宽后啁啾脉冲的负色散量相同,于是补偿色散后的脉冲宽度将完全取决于其所携带的正啁啾量。三阶非线性造成的介质折射率改变可以写成 $n = n_0 + n_2 I$,其中 n_0 为介质线性折射率, n_2 为介质的非线性折射率系数, I 为入射光强。脉冲各个部分由于这种附加折射率所引起的相位变化为 $\Delta\phi = kLn_2 I$,其中 k 为波数, L 为介质长度,其二阶光谱啁啾可写为 $\frac{\partial^2 \Delta\phi}{\partial \omega^2} = kLn_2 \frac{\partial^2 I}{\partial \omega^2}$ 。对于高斯型的脉冲, $I(\omega) = I_0 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Gamma}\right]$,当激光脉冲形状不变即强度光谱形状不变时,光谱啁啾大小将与 I_0 成正比。

由于棱镜对的间距的调节针对的是 0.20 mJ 的入射能量,所以图 2(b)中所示是可以得到的无啁啾的最短压缩脉冲。由图中可以看到,光谱相位相干直接重建装置测得的脉冲宽度为 21 fs,对应的虚线为脉冲的光谱相位,较图 2(a),图 2(c)中为平滑,这表明脉冲未携带大的二阶色散。图 2(a)中所示为入射脉冲能量为 0.15 mJ 时候的压缩情况,此时入射光强较图 2(b)中要小,激光与块状介质作用所得到的二阶正啁啾量也相应较小,由于棱镜对设置未变,所以此时负的色散补偿将大于脉冲本身正啁啾,其光谱相位应显示为负啁啾。图 2(a)中相位曲线正是脉冲带有负啁啾的表现^[11],同时,脉宽也由于携带负啁啾而变宽到 25 fs。同理可知图 2(c)中脉冲能量大于 0.20 mJ,色散补偿线无法提供足够的正啁啾补偿,压缩后的脉冲仍旧携带正二阶啁啾,脉宽也未达到最短。光谱相位相干直接重建装置的

测量结果完全符合我们的理论预计。

我们还实验研究了入射激光在圆偏振状态下的脉冲压缩情况。人们一直以来都在探寻能适用于更高功率脉冲激光的腔外压缩方案。前期的光纤展宽和毛细管展宽方式,其入射脉冲能量都受限于光纤的破坏阈值和惰性气体的电离阈值。利用块状介质进行光谱展宽的方法同样存在激光功率阈值的问题。在用线偏振光进行实验中,发现当玻璃片位于焦点后 170 mm 的位置,入射脉冲能量进一步提高到 0.3 mJ 以上时,出射脉冲出现超连续谱和锥形辐射现象^[12,13],这种现象不仅会造成出射脉冲的塌陷和分裂^[14],而且会导致主激光光斑的能量耗散甚至材料的破坏^[15]。前人的研究表明^[16],这种超连续谱和锥形辐射的产生来源于高强度激光脉冲在材料中传输的自聚焦效应和电离产生的等离子体中的非线性效应。由非线性光学^[17]可知,脉冲的自聚焦阈值 $P_{cr} = \frac{\pi(0.61\lambda)^2}{8n_0 n_2}$,当入射激光脉冲功率低于 P_{cr} 时,

不会发生自聚焦现象。显然,在其他条件不变的情况下, n_2 越小,介质所能承受的入射激光脉冲功率越大。对于各向同性的玻璃介质,圆偏振光的 $\chi^{(3)}$ 要比线偏振光的小^[17],由 n_2 与 $\chi^{(3)}$ 的关系可知,圆偏振光对应的 n_2 也相应比线偏振光要小。所以,对于更高功率的入射脉冲,我们设想可以采用圆偏振光入射的方式进行光谱展宽。

实验中,在光路中插入 $\lambda/4$ 波片,调节快轴方向与激光偏振方向呈 45° ,将入射光变为圆偏振光。为了保证光谱相位相干直接重建装置测量的准确性,在准直后的光路中也加入 $\lambda/4$ 波片,并保证两个波片的快轴垂直。由于严格的圆偏振光在三阶非线性介质中的传输不改变偏振态,所以经第二个 $\lambda/4$ 波片的出射光将回到 s 偏振方向。图 3 所示为测量压缩脉冲的实验结果,为了对比不同偏振态下的压缩效果,也没有改变棱镜对的设置。

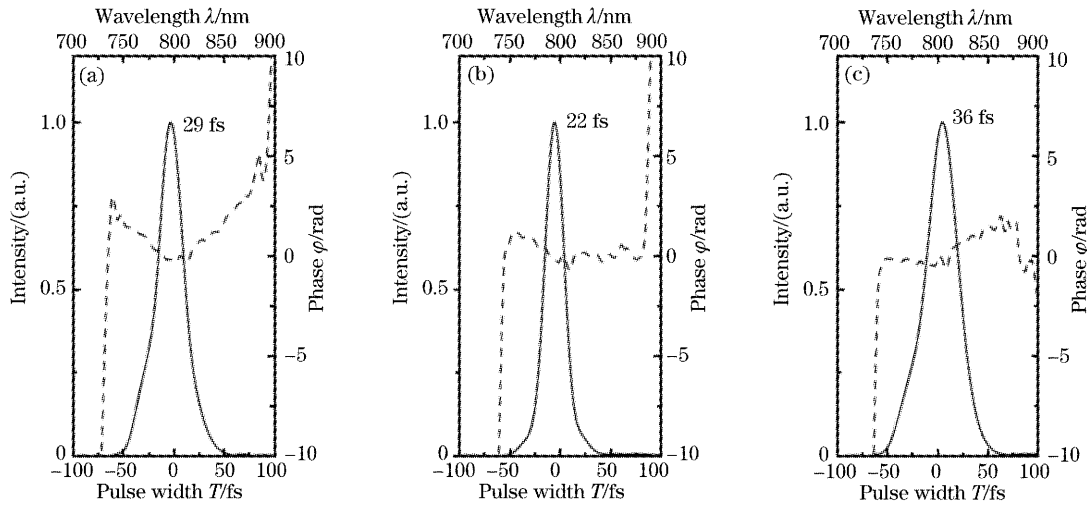


图 3 圆偏振入射光情况下的脉冲压缩效果。(a),(b),(c)中对应的入射脉冲能量分别为 0.20 mJ,0.26 mJ,0.27 mJ

Fig. 2 The pulse compression effect when using circularly polarized input laser pulse of which energy is 0.20 mJ (a), 0.26 mJ (b) and 0.27 mJ (c)

如图 3(b)所示,当调节入射激光能量到 0.26 mJ 时,得到最短压缩脉冲为 22 fs。图 3(a),图 3(c)中所示为入射脉冲能量为 0.20 mJ 和 0.27 mJ 时的压缩脉冲宽度和光谱相位。可以看出,圆偏振光入射时压缩脉冲的脉宽和相位变化规律与线偏振光入射时的一致。不同之处仅在于,对应相近的压缩效果,圆偏振入射光的能量要更高。这种现象证明了我们对于圆偏振光谱展宽过程的分析,对应于较小的 n_2 ,圆偏振光需要更高的入射功率才能达到一定的啁啾

量。这也说明,圆偏振光可以对更高功率的激光脉冲进行光谱展宽。在同样的色散补偿下,圆偏振光的最短压缩脉宽较线偏振光要宽,这主要是由于光路中插入了两个波片所致。由于波片带来的高阶材料色散无法被棱镜对所补偿,所以造成压缩后的脉冲宽度比线偏振光的时候要宽。实验结果表明,这种利用块状介质展宽光谱再补偿色散的方法完全适用于圆偏振激光,并且可以达到对更高功率入射激光压缩的目的。

4 结 论

实验研究了飞秒强激光脉冲在块状介质中的展宽和后继色散补偿压缩现象。分析了入射脉冲能量对压缩后脉冲的宽度以及携带的光谱啁啾的影响。分析了圆偏振的入射激光在非线性介质中的传输情况,并在实验上成功得到了类似线偏振光入射下的压缩效果。在线偏振情况下,得到了最短 21 fs 的压缩激光脉冲输出,在圆偏振情况下,最短的压缩脉冲宽度为 22 fs。实验结果表明,这种圆偏振光入射的方式是针对更高能量激光脉冲进行压缩的一种有效的方法。

参 考 文 献

- 1 Sterling Backus, Charles G. Durfee III, Margaret M. Murnane *et al.*. High power ultrafast lasers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(3): 1207~1223
- 2 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 3 M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane *et al.*. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1594~1596
- 4 U. Morgner, F. X. Kartner, S. H. Cho *et al.*. Sub-two-cycle pulse from a Kerr-lens mode locked Ti sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(6): 411~413
- 5 M. Hentschel, R. Klenberger, Ch. Spielmann *et al.*. Attosecond metrology[J]. *Nature*, 2001, **414**(6863): 509~513
- 6 G. G. Paulaus, F. Grasbon, H. Walther *et al.*. Absolute-phase phenomena in photoionization with few-cycle laser pulses[J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 182~184
- 7 M. Nisoli, S. Stagira, S. De Silvestri *et al.*. A nonel-high energy pulse compression system: generation of multigigawatt sub-5-fs pulses[J]. *Appl. Phys. (B)*, 1997, **65**(2): 189~196
- 8 C. Rolland, P. B. Corkum. Compression of high-power optical pulses[J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1988, **5**(3): 641~647
- 9 E. Mevel, O. Tcherbakoff, F. Salin *et al.*. Extracavity compression technique for high-energy femtosecond pulses[J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2003, **20**(1): 105~108
- 10 C. Iaconis, I. A. Walmsley. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(10): 792~794
- 11 Rick Trebino. *Frequency-Resolved Optical Gating (The Measurement of Ultrashort Laser Pulses)* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. 19~27
- 12 A. Brodeur, S. L. Chin. Band-gap dependence of the ultrafast white-light continuum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(20): 4406~4408
- 13 Zhang Jun, Wei Zhiyi, Wang Zhaohua *et al.*. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by femtosecond pulses laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 511~512 (in Chinese)
张 军,魏志义,王兆华等. 利用光子晶体光纤产生超连续飞秒激光光谱[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 511~512
- 14 A. L. Gaeta. Catastrophic collapse of ultrashort pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(16): 3582~3585
- 15 Ming Li, Saipriya Menon, John P. Nibarger *et al.*. Ultrafast electron dynamics in femtosecond optical breakdown of dielectrics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(11): 2394~2397
- 16 Arvinder S. Sandhu, Sudeep, Debabrata Goswami *et al.*. Suppression of supercontinuum generation with circularly polarized light[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **181**(1): 101~107
- 17 Robert W. Boyd. *Nonlinear Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 1992. 164~171