

双向多泵浦光纤拉曼放大器偏振相关增益研究

王丹燕, 姜海明, 谢 康

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 基于光纤拉曼放大器(FRA)的非线性耦合方程,采用数值计算的方法首次系统分析了双向多泵浦 FRA 系统中的偏振相关增益(PDG)特性。根据 4 个泵浦光源配置的不同,FRA 有 14 种结构。首先整体分析了这 14 种不同 FRA 结构中 PDG 的特点;然后对其中一种结构 FRA 系统中 PDG 的特性进行了更具体的分析,包括泵浦-信号、泵浦-泵浦以及信号-信号拉曼相互作用所产生的 PDG。研究结果表明,当泵浦总数目一定时,反向泵浦数目越多,其 PDG 均值越小;当泵浦总数目和反向泵浦数目都一定时,PDG 的大小与反向泵浦光波长关系不大;双向多泵浦 FRA 系统中的 PDG 主要由泵浦-信号拉曼相互作用所产生的 PDG 决定。以上结果对有效降低双向多泵浦 FRA 系统中的 PDG 有重要的参考价值。

关键词: 偏振相关增益; 光纤拉曼放大器; 双向泵浦; 偏振模色散; 受激拉曼散射

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:**10.3788/IRLA201645.0222003

Study on polarization dependent gain of fiber Raman amplifiers with bidirectional pumps

Wang Danyan, Jiang Haiming, Xie Kang

(School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The polarization dependent gain(PDG) of fiber Raman amplifiers(FRAs) with bidirectional pumps was investigated systematically for the first time, by numerical method based on the nonlinear coupled equations describing the properties of fiber Raman amplifiers. The FRA with four pumps has 14 structures. First of all, the general PDG characteristics of the 14 different FRAs were investigated, and then the PDG characteristics of a specific structure were analyzed in detail, including the PDG induced by pump-signal Raman interaction, by pump-pump Raman interaction and by signal-signal Raman interaction. The results show that (1) the more backward pumps generates the smaller mean PDG values under constant number of pumps, (2) when the total number of pumps and the number of backward pumps are both constant, the backward pump wavelength has little effect on the PDG, and (3) the PDG of a bidirectionally pumped FRA is mainly determined by pump-signal Raman interaction. These results are useful and important for reducing the PDG of an FRA.

Key words: polarization dependent gain; fiber Raman amplifier; bidirectional pump;
polarization mode dispersion; stimulated Raman scattering

收稿日期:2015-06-12; 修订日期:2015-07-16

基金项目:国家自然科学基金(60588502;60607005;60877033)

作者简介:王丹燕(1989-),女,硕士生,主要从事光纤拉曼放大器偏振相关增益方面的研究。Email:wangdanyan1016@163.com

导师简介:姜海明(1976-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光纤通信、光电器件等方面的研究。Email:hmjiang@hfut.edu.cn

0 引言

光纤拉曼放大器(FRA)由于具有响应时间快、饱和输出功率大、易于耦合等优点,因此是光纤通信系统中非常重要的器件之一。近年来,高功率半导体激光器^[1]等泵浦光源的出现以及光纤制造技术的进展都给 FRA 的发展创造了有利条件和广阔空间。在初期的拉曼传输系统中,由反向泵浦的 FRA 和掺铒光纤放大器(EDFA)^[2]组成的混合式放大结构得到了广泛应用。实验研究表明,在波分复用的光纤传输系统中,双向泵浦的 FRA 不但相对于混合式结构具有明显的优点,而且借助双向泵浦技术,可以克服在反向泵浦方式下瑞利散射对放大器增益的限制,从而可以实现全拉曼放大的传输系统^[3-4]。

尽管关于双向多泵浦 FRA 系统中增益特性的研究已有一些报道^[3-5],但是到目前为止有关双向多泵浦 FRA 系统中偏振相关增益(PDG)特性的研究尚未见报道。文中基于 FRA 的非线性耦合方程,采用数值计算的方法首次系统分析了双向多泵浦 FRA 系统中的 PDG 的特性,研究结果对有效降低 FRA 系统中的 PDG 有重要的参考价值。

1 理论模型

一般来说,在非线性光学介质中传输的高能量的激光将发生散射,将一小部分入射功率转移到另一频率的光功率,频率改变量由介质的性质决定,此过程称为自发拉曼散射。如果一弱信号光与一更高频率的强泵浦光波同时非线性光学介质中传输,并且信号光的频率在介质的拉曼增益带宽之内,则由于拉曼效应,弱信号光即可从强泵浦光中获取能量得到放大,此过程就是受激拉曼散射(SRS)。如果把光纤作为非线性介质,利用 SRS 的原理就可以制成 FRA。根据信号光和泵浦光在增益介质中传播方向的关系,FRA 一般有正向泵浦、反向泵浦和双向泵浦三种结构。

目前已被广泛使用的 FRA 的数学模型是建立在下述非线性耦合方程上^[6-7]的:

$$\pm \frac{dP_k}{dz} = -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{\nu_j}(\nu_j - \nu_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{\nu_k}{\nu_j} \frac{g_{\nu_k}(\nu_k - \nu_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k \quad (1)$$

式中: P_i , ν_i 和 α_i 分别代表第 i 路波的功率,频率和损

耗系数;正负号分别代表正向泵浦和反向泵浦;泵浦光频率为 ν_i 的增益系数为 $g_{\nu_i}(\Delta\nu) = g_R(\Delta\nu) \nu_i / \nu_0$,而 $g_R(\Delta\nu)$ 即为频率为 ν_0 的泵浦光得到的拉曼增益谱; m 为泵浦光数目; n 为信号光数目; A_{eff} 为光纤有效截面积; K_{eff} 为偏振系数。在一段长光纤中,拉曼增益将呈现出某种平均,在数值上近似等于最大偏振增益的一半,故一般情况下令 K_{eff} 为 2。若要研究 FRA 中增益的偏振相关特性,则偏振系数的具体表达式^[8]为:

$$K_{\text{eff}} = 2 / \left\{ 1 \pm \frac{\sin[2\pi(L_k/(L/(\langle \Delta\tau \rangle \delta\nu)))]}{2\pi(L_k/(L/(\langle \Delta\tau \rangle \delta\nu)))} \right\}$$

$$k=1, 2, 3, \dots, N$$

$$L_k = (k-1)\delta L \quad (2)$$

式中: δL 为数值计算方法的迭代步长; N 为迭代次数; L_k 为迭代步长的累加; L 为光纤总长度; $\Delta\tau$ 为光纤 PMD 值; $\delta\nu$ 为两光波频率差。公式(2)取‘+’代表一种泵浦偏振态,将其带入非线性耦合方程(1)所得到的拉曼增益为增益最大值 G_{max} ,公式(2)取‘-’代表另一种泵浦偏振态,将其带入非线性耦合方程(1)所得到的拉曼增益为增益最小值 G_{min} 。根据 PDG 的定义可知数值计算中用于描述 PDG 的大小的关系式为: $\text{PDG} = G_{\text{max}} - G_{\text{min}}$ 。

2 仿真参数

数值仿真过程中采用的光纤为色散补偿光纤(DCF),其喇曼增益效率系数(g_R/A_{eff})如图 1 所示。

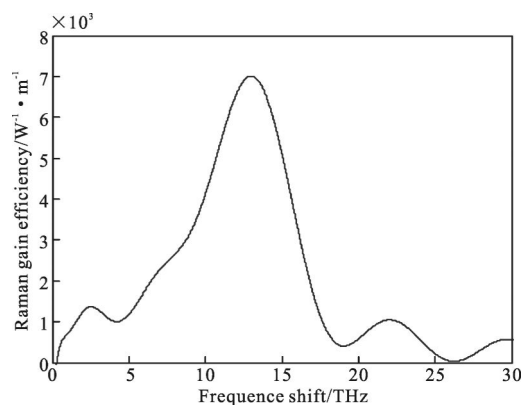


图 1 Raman 增益效率系数谱

Fig.1 Spectrum of Raman gain efficiency

其他的仿真参数如表 1 所示。

在 4 路双向泵浦 FRA 系统中,所有信号光和正向泵浦光从光纤的始端注入,而所有的反向泵浦光从光纤的末端注入。根据泵浦配置的不同,FRA 有

14 种结构并分成如下 3 个大类:(1) 1 路正向泵浦和 3 路反向泵浦;(2) 2 路正向和 2 路反向泵浦;(3) 3 路正向泵浦和 1 路反向泵浦。每一个大类又可以根据泵浦之间波长的相对大小关系分成几种,如表 2~4 所示,其中 F 代表正向泵浦,B 代表反向泵浦。

表 1 4 路泵浦 FRA 中数值仿真参数

Tab.1 Parameters used in simulations of four-pump FRAs

| Parameter | Unit | Values |
|---------------------------------|-----------------|--------|
| Fiber length | km | 10 |
| Fiber loss coefficient | dB/km | 1.5 |
| Fiber PMD | ps | 0.22 |
| Effective core area of fiber | μm^2 | 80 |
| Number of signals | - | 11 |
| Power of each signal channel | dBm | 0 |
| Starting wavelength for signals | nm | 1 530 |
| Ending wavelength for signals | nm | 1 580 |
| Power of each pump channel | W | 0.1 |
| Number of pumps | - | 4 |
| Wavelength of pump1 | nm | 1 432 |
| Wavelength of pump2 | nm | 1 452 |
| Wavelength of pump3 | nm | 1 472 |
| Wavelength of pump4 | nm | 1 492 |

表 2 FRA 中 1 路正向泵浦 3 路反向泵浦情况

Tab.2 Parameters in FRAs with one forward pump and three backward pumps

| | Pump1 | Pump2 | Pump3 | Pump4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Case1 | F | B | B | B |
| Case2 | B | F | B | B |
| Case3 | B | B | F | B |
| Case4 | B | B | B | F |

表 3 FRA 中 2 路正向泵浦 2 路反向泵浦情况

Tab.3 Parameters in FRAs with two forward pumps and two backward pumps

| | Pump1 | Pump2 | Pump3 | Pump4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Case1 | F | F | B | B |
| Case2 | F | B | F | B |
| Case3 | F | B | B | F |
| Case4 | B | F | F | B |
| Case5 | B | F | B | F |
| Case6 | B | B | F | F |

表 4 FRA 中 3 路正向泵浦 1 路反向泵浦情况

Tab.4 Parameters in FRAs with three forward pumps and one backward pump

| | Pump1 | Pump2 | Pump3 | Pump4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Case1 | F | F | F | B |
| Case2 | F | F | B | F |
| Case3 | F | B | F | F |
| Case4 | B | F | F | F |

3 结果与讨论

对于求解双向多泵浦 FRA 的非线性耦合方程的问题,可以采用参考文献[9]提出一种名为 S-打靶法的双向泵浦 FRA 的求解方法;也可以将正向泵浦光和信号光作为正向传输信号,将反向泵浦光作为反向传输信号,因此求解双向多泵浦 FRA 的非线性方程问题可以采用参考文献[10]提出的用于快速求解反向泵浦 Raman 耦合方程的打靶法。文中的数值求解采用第二种方法。对于不同泵浦配置的 14 种双向多泵浦 FRA 的耦合方程,改变偏振系数的取值可以得到两种泵浦偏振态的增益从而得出 PDG 的大小,数值仿真结果如图 2~图 4 所示。其中图 2 为 1 路正向泵浦光,3 路反向泵浦光(即表 2 所对应的 4 种 FRA 结构)所分别数值计算得出的 PDG 曲线;图 3 为 2 路正向泵浦光,2 路反向泵浦光(即表 3 所对应的 6 种 FRA 结构)所分别数值计算得出的 PDG 曲线;图 4 为 3 路正向泵浦光,1 路反向泵浦光(即表 4 所对应的 4 种 FRA 结构)所分别数值计算得出的 PDG 曲线。

观察图 2~图 4 可以发现:对于不同的 FRA 结构,当泵浦光数目一定时,反向泵浦光数目越多 PDG 均值越小,且 PDG 曲线的平坦度受反向泵浦数目的影响很小;当反向泵浦光数目相同时,PDG 均值没有体现出一定的规律性。造成这种现象的原因可以解释为以下几种因素共同作用的结果:(1) 由于反向泵浦方式 FRA 系统中所产生的 PDG 是正向泵浦方式 FRA 系统中所产生的 PDG 的 1/3^[11],因此双向多泵浦 FRA 系统中所产生的 PDG 主要由正向泵浦方式所产生的 PDG 决定;(2) 当多路泵浦光和信号光同时在光纤内传输时,除光纤损耗外,由于受激拉曼散射效应,所有高频光向低频光传输能量,所以长波长的泵浦光将从短波长泵浦光吸收能量;(3) 根据拉曼

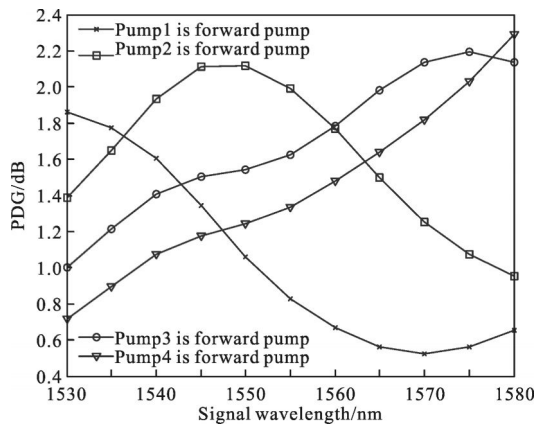


图 2 1 路正向泵浦 3 路反向泵浦 FRA 中的 PDG

Fig.2 PDG in FRAs with one forward pump and three backward pumps

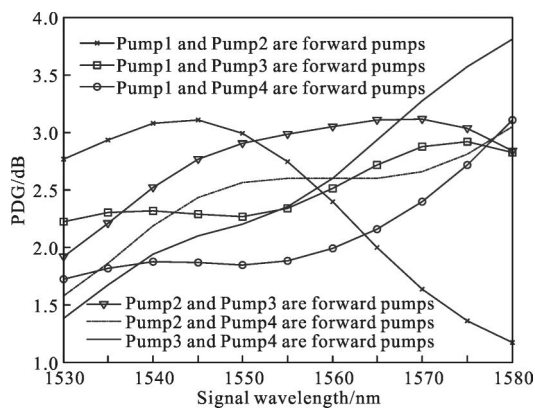


图 3 2 路正向泵浦 2 路反向泵浦 FRA 中 PDG

Fig.3 PDG in FRAs with two forward pumps and two backward pumps

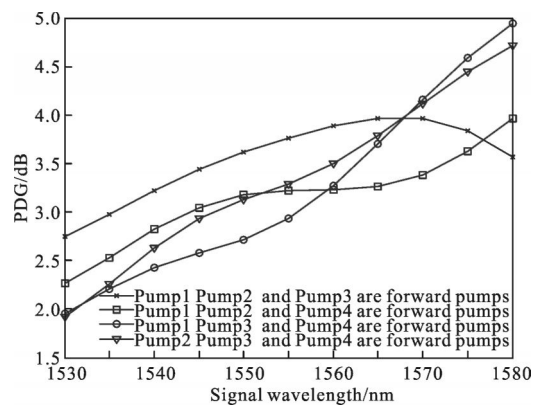


图 4 3 路正向泵浦 1 路反向泵浦 FRA 中 PDG

Fig.4 PDG in FRAs with three forward pumps and one backward pumps

增益系数谱可以看出, 对于不同的光波频差对应着不同的拉曼增益值。

双向多泵浦 FRA 中各光波拉曼相互作用所产生的 PDG 是由泵浦-信号、泵浦-泵浦、信号-信号拉曼相互作用所分别产生的 PDG 的累加。下面以表 3

中的 Case1 为例研究双向多泵浦 FRA 中分别由泵浦-信号、泵浦-泵浦、信号-信号喇曼相互作用所产生的 PDG 的特点。

若只考虑双向多泵浦 FRA 系统中由泵浦-信号拉曼相互作用所产生的 PDG, 只需将泵浦-信号喇曼相互作用时的偏振系数取为表达式(2), 不考虑多泵浦 FRA 系统中其他喇曼相互作用所产生的 PDG 的影响, 取其拉曼相互作用时的偏振系数 $K_{\text{eff}}=2$ 。其数值仿真结果如图 5 所示。其中一条曲线为偏振系数表达式(2)取‘+’时所得的结果, 即 G_{max} ; 另一条曲线为当偏振系数表达式(2)中取‘-’时所得结果, 即 G_{min} 。

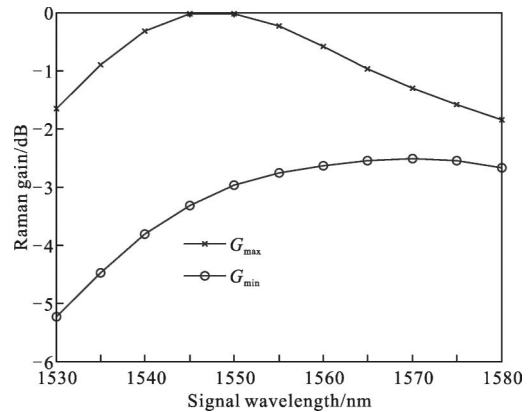


图 5 仅考虑泵浦-信号拉曼相互作用下的增益谱

Fig.5 Spectrum of Raman gain with pump-signal Raman interaction

若只考虑双向多泵浦 FRA 系统中由泵浦-泵浦拉曼相互作用所产生的 PDG, 只需将泵浦-泵浦拉曼相互作用时偏振系数取为表达式(2), 不考虑多泵浦 FRA 系统中其他拉曼相互作用所产生的 PDG 的影响, 取其拉曼相互作用时的偏振系数 $K_{\text{eff}}=2$ 。其结果如图 6 所示。

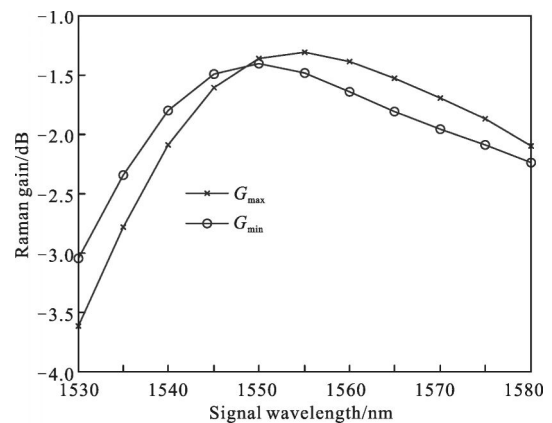


图 6 仅考虑泵浦-泵浦拉曼相互作用下的增益谱

Fig.6 Spectrum of Raman gain with pump-pump Raman interaction

若只考虑双向多泵浦 FRA 系统中由信号-信号拉曼相互作用所产生的 PDG, 只需将信号-信号拉曼相互作用时偏振系数取为表达式(2), 不考虑多泵浦 FRA 系统中其他拉曼相互作用所产生的 PDG 的影响, 取其拉曼相互作用时的偏振系数 $K_{\text{eff}}=2$ 。其结果如图 7 所示。

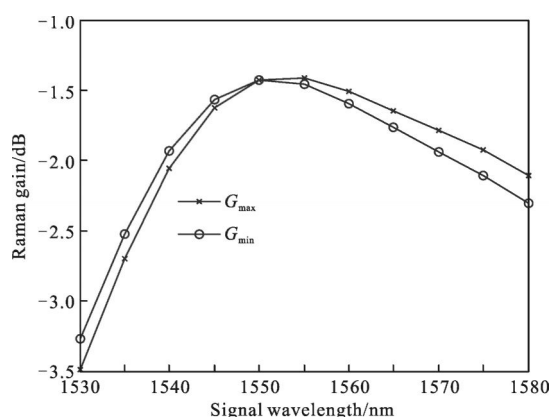


图 7 仅考虑信号-信号拉曼相互作用下的增益谱

Fig.7 Spectrum of Raman gain with signal-signal Raman interaction

比较该泵浦配置的双向多泵浦 FRA 系统中分别由泵浦-信号、泵浦-泵浦、信号-信号喇曼相互作用所产生的 PDG 可以发现, 双向多泵浦 FRA 系统中喇曼相互作用所产生的 PDG 主要由泵浦-信号之间喇曼相互作用所产生的 PDG 决定, 其次是由泵浦-泵浦喇曼相互作用所产生的 PDG 决定, 而由信号-信号喇曼相互作用所产生的 PDG 对双向多泵浦 FRA 中的 PDG 的贡献最小; 观察图 6 和图 7 还可以发现一个有趣的现象, 即由泵浦-泵浦和由信号-信号喇曼相互作用所产生的 PDG 在信号光波长 1550 nm 处变为 0。以此信号光波长为中心点, 并参考喇曼增益系数谱的形状, 可以作为选择泵浦波长的参考点, 从而对优化 PDG 谱形提供定性的参考信息。

4 结论

文中系统地分析了 14 种不同泵浦配置的双向多泵浦 FRA 中 PDG 的特性。结果表明, 对于不同的 FRA 结构, 当泵浦光数目一定时, 反向泵浦光数目越多 PDG 均值越小, 且 PDG 曲线的平坦度受反向泵浦数目的影响很小; 当反向泵浦光数目相同时, PDG 均值没有体现出一定的规律性; 还具体分析了一种泵浦配置 FRA 中分别由泵浦-信号、泵浦-泵浦、信

号-信号喇曼相互作用所得到的喇曼增益谱, 结果表明, 双向多泵浦 FRA 系统中的 PDG 主要由泵浦-信号喇曼相互作用所产生的 PDG 决定。因此, 对于不同泵浦结构的双向多泵浦 FRA 系统, 增加反向泵浦的数目可以有效地降低系统的 PDG 均值, 这对有效降低双向多泵浦 FRA 系统中由非线性效应所造成的 PDG 有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Lu Kai, Liu Baiyu, Bai Yonglin, et al. High power laser diode drive power supply[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2680-2684. (in Chinese)
- [2] Zhou Yaxun, Xu Xingchen. Design of C+L-band broad gain-flattened bismuth-based erbium-doped fiber amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2119-2124. (in Chinese)
- [3] Kado S, Emori Y, Namiki S, et al. Broadband flat-noise Raman amplifier using low-noise bidirectional pumping sources[C]//ECOC 2001, 6: 38-39.
- [4] Jiang Haiming, Wang Yafei. Impact of Bi-directional pump power scheme on gain of Raman fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(10): 1235-1238. (in Chinese)
- [5] Liaw S K, Wang Y C, Yu Y L. Bidirectional hybrid fiber amplifiers in a recycling-pump mechanism [C]//Proceedings of the 2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2012, 9: 1-5.
- [6] Victor E P, Herbert G W. Optimal design of flat-gain wide band fiber Raman amplifiers [J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(2): 250-254.
- [7] Aoki Y. Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems [J]. *J Lightwave Technol*, 1988, 6(7): 1225-1239.
- [8] Zhang Minming, Liu Deming, Wang Ying, et al. Efficient numerical method for predicting the polarization-dependent Raman gain in fiber Raman amplifiers[J]. *J Opt Soc Am A*, 2004, 21(2): 263-266.
- [9] Jiang Haiming, Xie Kang. Efficient and robust shooting algorithm for numerical design of bidirectionally pumped Raman fiber amplifiers [J]. *J Opt Soc Am B*, 2012, 29(1): 8-14.
- [10] Jiang Haiming, Wang Yafei, Xie Kang. Stable and efficient shooting algorithm for a backward multi-pumped Raman fiber amplifier [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, 16(5): 558-561. (in Chinese)
- [11] Son E S, Lee J H, Chung Y C. Statistics of polarization-dependent gain in fiber Raman amplifiers [J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(3): 1219-1226.