光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022041801

增益开关半导体激光器的三级脉冲整形方案

杨京兴[1,2]，雷从彪[1,2]，张邦宏[1]，姜宇轩[2]，谢　亮[1,2]*

（1. 中国科学院半导体研究所，北京 100083；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 增益开关半导体激光器产生的光脉冲宽度往往较宽，且具有一定大小的脉冲基座。为了提高增益开关半导体激光器的脉冲质量，提出了一种三级脉冲整形方案。首先，利用色散补偿光纤将增益开关半导体激光器输出的光脉冲宽度从 39.381 ps 压缩到 26.681 ps，随后利用掺铒光纤放大器和色散位移光纤的高阶孤子效应进一步将光脉冲的宽度压缩到 20.916 ps，最后利用半导体光放大器的自相位调制效应区分开脉冲基座与脉冲中心的光谱，并利用光滤波器滤除脉冲基座对应的光谱部分，从而消减脉冲基座，并将脉冲宽度压缩到 18.497 ps。实验结果表明，该三级脉冲整形方案可以有效地压缩脉冲宽度以及减小脉冲基座，从而提高增益开关半导体激光器输出光脉冲的质量。

关键词： 增益开关；脉冲压缩；脉冲整形；色散

中图分类号： TN202　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0962－06

Three-Stage Pulse-Shaping Scheme for Gain-Switched Semiconductor Lasers

YANG Jingxing[1,2], LEI Congbiao[1,2], ZHANG Banghong[1], JIANG Yuxuan[2], XIE Liang[1,2]

(1. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: Gain-switched semiconductor lasers tend to produce optical pulses that are wide in width and have a pulse base of a certain size. In order to obtain pulse quality of gain-switched semiconductor lasers, a three-stage pulse shaping scheme was proposed. First, the optical pulse width at the output of the gain-switched semiconductor laser was compressed from 39.381 to 26.681 ps using a dispersion-compensated fiber. Then, the width of the optical pulse was further compressed by using an erbium-doped fiber amplifier and the high-order soliton effect of a dispersion shifted fiber to 20.916 ps. Finally, the self-phase modulation effect of the semiconductor optical amplifier was used to distinguish the spectrum of the pulse pedestal from the pulse center, and the optical filter was used to filter out the part of the spectrum corresponding to the pulse pedestal, thus eliminating the pulse pedestal and compressing the pulse width to 18.497 ps. The experimental results show that this three-stage pulse shaping scheme can effectively compress the pulse width and reduce the pulse pedestal, thus improving the quality of the output optical pulse of the gain-switched semiconductor laser.

Key words: gain-switched; pulse compression; pulse shaping; dispersion

0　引言

通常情况下，激光脉冲宽度小于 1 ns 的激光器被称作超短脉冲激光器[1-2]。常见的产生脉冲激光的方法有调 Q 技术[3-4]、锁模技术[5]和增益开关技术[6-7]等。其中，调 Q 激光器产生的光脉冲能量相对较高，但脉冲宽度相对较宽，一般只能达到纳秒量级[8]。锁模激光器产生的脉冲宽度很窄，可达到飞

收稿日期：2022－04－18.
基金项目：国家自然科学基金联合基金项目(U1930205).
*通信作者：谢　亮　E-mail：xiel@semi.ac.cn

秒量级[9-10]，但其造价昂贵，且脉冲的重复频率可调性不高。相比于前两种激光器，增益开关半导体激光器的结构相对简单，并且可通过改变电信号的参数来控制其输出光脉冲的特性[11-12]。增益开关半导体激光器的重复频率可调，高频响应能力强，且易实现可调谐输出。此外，这种激光器还具有价格低廉和性能稳定的优点，广泛应用于高速光通信、光电采样检测、精密测量，以及光电成像[13-16]等领域。

然而，增益开关半导体激光器产生的光脉冲相对较宽。在精密测量中，光脉冲的宽度与测量精度密切相关。此外，增益开关半导体激光器输出的光脉冲具有一定的脉冲基座，这影响了脉冲能量的利用率。为了压缩增益开关半导体激光器输出光脉冲的宽度，研究人员采用了很多办法。Wada 等[17]利用全光纤 Sagnac 干涉仪作为光学滤波系统，将啁啾脉冲与其在干涉仪中的复制品之间的延迟距离设置为激光器谐振腔长度的两倍，使得脉宽从 33 ps 压缩到 20 ps，并明显减小脉冲拖尾。陈言樑等[18]利用半导体光放大器的自相位调制效应引起光脉冲产生啁啾，再选择合适长度的单模光纤，利用其群速度色散对光脉冲产生一个相反的啁啾，从而达到脉冲压缩的目的，将光脉冲宽度从 50 ps 压缩到 5 ps。

常见的利用色散补偿光纤（DCF）、色散位移光纤（DSF）、Sagnac 干涉仪或半导体光放大器（SOA）等器件的脉冲整形方案忽略了脉冲基座的消除，并且这些方案产生的光脉冲波形往往有很大的畸变。本文提出了一种由 DCF，DSF 和 SOA 组成的三级脉冲整形方案，并通过实验进行了验证。该方案可显著降低脉冲宽度和脉冲基座。除此之外，本文提出的方案使用的组件更少，并且不需要长光纤，使系统易于实现小型化与模块化。

1　脉冲整形方案相关理论

1.1　光脉冲在 DCF 中的传输

增益开关半导体激光器输出的光脉冲可以近似用具有负啁啾的高斯脉冲来描述：

$$U=A\exp\left[\left(-\frac{1}{\tau^2}+\mathrm{i}C\right)t^2+\mathrm{i}\varphi\right] \tag{1}$$

式中，A 为脉冲的振幅，τ 为脉冲宽度，C 为脉冲的啁啾系数，φ 为脉冲的相位。

光脉冲在 DCF 中的传输过程可用非线性薛定谔方程[19]描述：

$$\mathrm{i}\frac{\partial U}{\partial z}-\frac{1}{2}\frac{\beta L_{\mathrm{D}}}{T_0^2}\frac{\partial^2 U}{\partial T^2}=-\mathrm{i}\frac{\alpha}{2}L_{\mathrm{D}}U-\gamma\mid U\mid^2U \tag{2}$$

式中，L_{D} 为光纤的色散长度，$T=t-z/v_{\mathrm{g}}$ 为群速度移动坐标系下的时间参量，T_0 为进入色散补偿光纤前的光脉冲宽度，α 为光纤的损耗系数，γ 为光纤的非线性系数。

通常，用于压缩光脉冲的 DCF 长度较短，且增益开关半导体激光器产生的光脉冲功率较低，因此可忽略光脉冲的损耗和 DCF 的非线性效应，即可忽略式（2）右边两项。将式（1）代入式（2），可得：

$$\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}z}=2C\frac{\beta L_{\mathrm{D}}}{T_0^2}\tau \tag{3}$$

式中，z 为光脉冲在光纤中的传输距离。由式（3）可得，经过色散补偿光纤后的光脉冲宽度与初始啁啾和光纤的色散值有关。因此，在色散系数为定值的情况下，需要选择合适长度的色散补偿光纤，使初始啁啾的作用减小，从而达到压缩光脉冲宽度的目的。

1.2　光脉冲在 DSF 中的传输

由于光脉冲的啁啾是有限的，因此 DCF 压缩脉冲的能力有限。利用 DSF 可以对光脉冲进行高阶孤子压缩，从而进一步减小脉冲宽度。由于高阶孤子压缩需要入射光有比较高的峰值功率，因此，需要在 DSF 前利用掺铒光纤放大器（EDFA）对光脉冲的功率进行放大。

光脉冲在色散位移光纤中的传输同样可以用非线性薛定谔方程来描述，然而，由于高阶色散和高阶非线性效应的影响，式（2）改为[20]

$$\mathrm{i}\frac{\partial U}{\partial z}=-\gamma\left(N^2\mid U\mid^2U-T_{\mathrm{R}}U\frac{\partial\mid U\mid^2}{\partial T}-\frac{1}{2}\beta\frac{\partial^2U}{\partial T^2}+\frac{1}{6}\mathrm{i}\beta_3\frac{\partial^3U}{\partial T^3}-\frac{1}{2}\partial U\right) \tag{4}$$

式中，T_{R} 为光纤的非线性延迟响应参数，β_3 为三阶群速度色散系数，N 为孤子阶数，可表示为

$$N^2=\frac{\gamma P_0\tau^2}{\mid\beta\mid} \tag{5}$$

式中，P_0 为光脉冲的峰值功率，β 为光纤的群速度色散系数。由式（5）可知，若想获得更高阶的孤子，需要入射光有更大的峰值功率，或者需要光纤有更小的群速度色散系数。色散位移光纤在 1 550 nm 通信窗口的色散系数很小，因此相比于其他种类的光纤，利用色散位移光纤可以更容易获得高阶光孤子，从而达到压缩脉冲的目的。

1.3 光脉冲在 SOA 中的传输

增益开关半导体激光器产生的光脉冲往往具有一定的脉冲基座，且采用高阶孤子压缩会增大脉冲基座。因此，可利用 SOA 改善这一问题。

光脉冲在 SOA 中传输时，SOA 的动态增益可由下式描述：

$$\frac{\partial g}{\partial T}=-\frac{g-g_0}{\tau_e}-\frac{gP}{E_s} \tag{6}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z}=(g-\alpha_{in})P \tag{7}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z}=-\frac{1}{2}\alpha g \tag{8}$$

式中，g 为 SOA 的增益系数函数，P 为光脉冲的功率，τ_e 为载流子寿命，α_{in} 为半导体光放大器内部的损耗系数，Φ 为光脉冲的相位，$E_s=h\nu_0 A/(\Gamma a)$ 为 SOA 的饱和能量，A 为 SOA 有源区的横截面积，Γ 为模式限制因子，通常在 0.3～0.5 范围内取值，a 为微分增益系数，h 为普朗克常数，ν_0 为光脉冲的中心频率，α 为线宽增强因子，描述载流子浓度变化引起的折射率变化，通常在 3～8 之间取值，g_0 为小信号增益。

$$g_0=\Gamma a\left(\frac{I\tau_e}{eV}-N_t\right) \tag{9}$$

式中，a 为微分增益系数，N_t 为载流子阈值浓度。

$h(T)$为光脉冲包络上每一点在 SOA 中的积分增益[21]，其表达式为

$$h(T)=\int_0^L g(z,T)\mathrm{d}z \tag{10}$$

式中，L 为 SOA 有源区的长度。通常，SOA 内部的损耗远小于增益，结合式(7)和(8)，可得经过 SOA 后的光脉冲为

$$P_{out}(T)=P_{in}(T)\exp[h(T)] \tag{11}$$

$$\Phi_{out}(T)=\Phi_{in}(T)-\frac{1}{2}\alpha h(T) \tag{12}$$

式中，$P_{out}(T)$和 $\Phi_{out}(T)$分别为 SOA 输出光脉冲的功率和相位，$P_{in}(T)$和 $\Phi_{in}(T)$分别为 SOA 输入光脉冲的功率和相位。

将式(6)代入式(10)，可得：

$$\frac{\mathrm{d}h(T)}{\mathrm{d}T}=\frac{g_0L-h(T)}{\tau_c}-\frac{P_{in}(T)}{E_s}[\exp(h(T))-1] \tag{13}$$

结合式(6)～(13)，可得输出光脉冲的频谱表达式[22]为

$$S(\omega)=\left\{\int_{-\infty}^{\infty}[P_{in}(T)\exp(h(T))]^{\frac{1}{2}}\cdot\exp[\mathrm{i}\Phi(T)+\mathrm{i}(\nu-\nu_0)T]\mathrm{d}T\right\}^2 \tag{14}$$

为了更直观地了解 SOA 对入射光的影响，利用 Matlab 分别对光脉冲时域和频域进行数值求解，并绘制出光脉冲及其频谱图，如图 1 和图 2 所示。

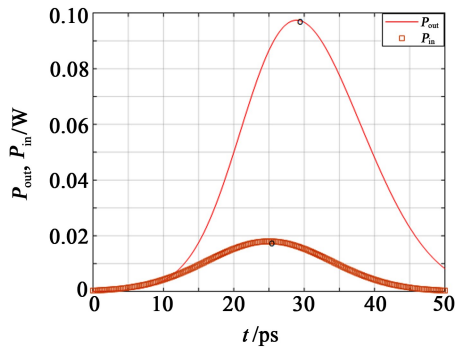


图 1 SOA 输出的光脉冲 P_{out} 与入射光 P_{in} 对比

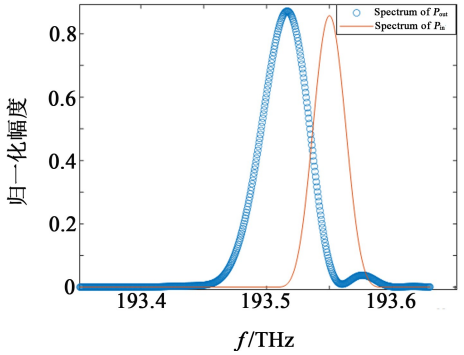


图 2 经过 SOA 前后光脉冲的频谱对比

由图 1 可知，经过 SOA 作用后，光脉冲的峰值功率增大，脉冲中心略微偏移。

由图 2 可以看出，光脉冲经过 SOA 后，频谱被展宽，频谱中心红移，并且不再对称，说明 SOA 使得光脉冲产生了频率啁啾。由于脉冲中心峰值功率远远高于脉冲基座的功率，SOA 的自相位调制效应会使脉冲中心部分对应的光谱展宽较大，而脉冲基座对应的光谱展宽很小，从而使两者的光谱区分开，再通过合适的光滤波器滤除脉冲基座对应的光谱，即可消减脉冲基座。

2 实验验证

为了验证该三级脉冲整形方案，搭建了增益开关半导体激光器系统并进行了实验验证。如图 3 所示，该系统由温控驱动电路、半导体激光器、脉冲压缩和脉冲基座消减四部分组成。实验结果表明，该方案可以有效地压缩光脉冲并减小脉冲基座。

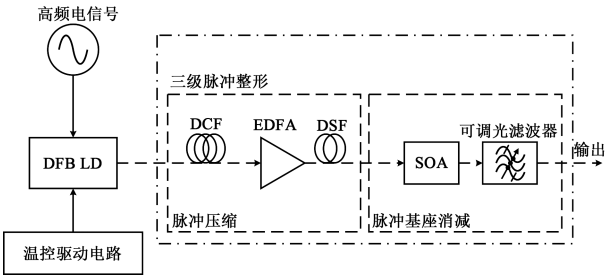


图 3　增益开关半导体激光系统

2.1　利用 DCF 压缩光脉冲

设置调制信号的频率和功率分别为 6 GHz 和 5 dBm，偏置电流为 28 mA。激光器输出的光脉冲如图 4 所示。

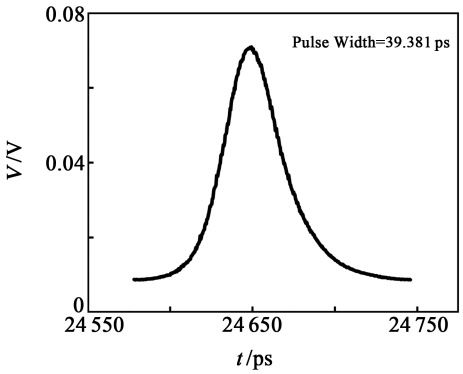


图 4　未经过脉冲整形的初始光脉冲

由 1.1 节可知，需要用合适长度的 DCF 来压缩光脉冲宽度。由于非线性薛定谔方程很难得到解析解，因此研究人员往往通过数值仿真的方法来得知色散补偿光纤的长度。但这种方法所获得的光纤长度往往会与实际所需的光纤长度有一定的偏移，因此本文中采用 Waveshaper 4000 A(如图 5 所示)设置负色散值来模拟色散补偿光纤对光脉冲进行压缩，从而得到色散补偿光纤的所需长度。

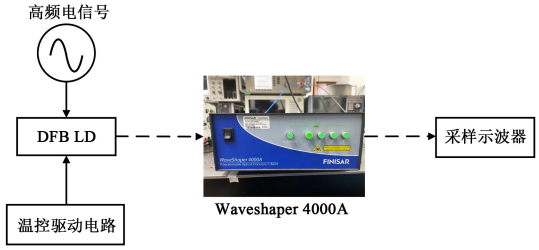


图 5　利用 Waveshaper 进行色散补偿

如图 5 所示搭建系统，并利用 Waveshaper 对光脉冲提供负色散以模拟 DCF 压缩光脉冲。通过逐步增大负色散的绝对值 D，得到不同色散补偿下的光脉冲宽度 τ，如图 6 所示。

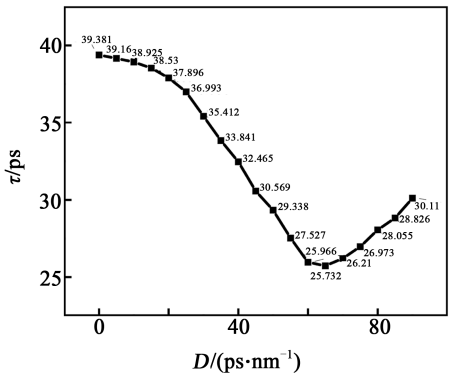


图 6　脉冲宽度随色散补偿值的变化

由图 6 可知，当负色散的绝对值小于 65 ps/nm 时，光脉冲宽度随色散绝对值的增大而减小，并在负色散值为 65 ps/nm 时压缩到最小值 25.732 ps，说明在此色散值时，光脉冲的啁啾得到最佳补偿。随后，随着色散补偿值的继续增大，光脉冲逐渐展宽。这是因为超过最佳补偿点后又引入了过多的色散，从而导致光脉冲展宽。

实验中最佳色散补偿值为 −65 ps/nm，选用的 DCF 的色散系数为 −165 ps/(nm · km)，因此，DCF 的所需长度为 393.9 m。

将图 5 所示系统中的 Waveshaper 更换为适当长度的 DCF，即可得到经过 DCF 压缩后的光脉冲。将其与未经过脉冲整形的初始脉冲进行对比，结果如图 7 所示。图 7 更直观地表现出 DCF 压缩脉冲宽度的效果。经过 DCF 的压缩后，光脉冲波形变得更加尖锐，脉冲宽度由 39.381 ps 减小到 26.681 ps。

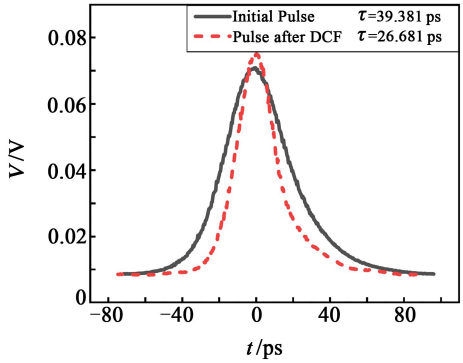


图 7　DCF 压缩脉冲前后对比

2.2　利用 DSF 进一步压缩光脉冲

由于 DCF 压缩光脉冲的程度有限，可利用 EDFA 和 DSF 对光脉冲进行高阶孤子压缩，从而进一步减小光脉冲宽度。

经过 DCF 压缩后，光脉冲由 EDFA 放大，其峰值功率为 163.57 mW，随后光脉冲入射到 DSF 中。本

实验中使用的DSF长度为50 m,模场直径为8.4 μm,色散系数为3.5 ps/(nm·km)。由于光纤长度很短,因此可不考虑光脉冲在光纤中的损耗。

经过高阶孤子压缩后的光脉冲及其光谱如图8和9所示。

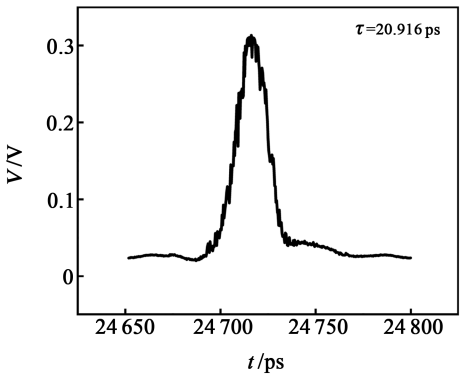


图8 经DSF进一步压缩后的光脉冲

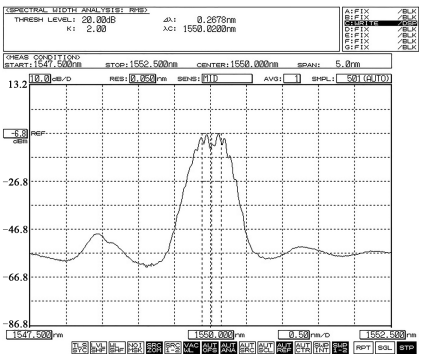


图9 经DSF进一步压缩后的光脉冲的光谱

经过高阶孤子压缩后,光脉冲的线宽为0.267 8 nm,中心波长为1 550.02 nm,光脉冲宽度进一步压缩到20.916 ps。除此之外,我们可以发现光脉冲具有一定大小的脉冲基座。接下来,可以通过减小脉冲基座来进一步改善脉冲质量。

2.3 利用SOA消减脉冲基座

将经过高阶孤子压缩后的光脉冲注入到SOA中。由1.3节可知,SOA会导致光谱展宽。SOA输出光的光谱如图10所示。

光脉冲通过SOA后,其光谱的线宽为0.618 8 nm,中心波长为1 550.162 7 nm。与图9对比发现,SOA导致光脉冲的光谱展宽并且红移,与1.3节中所述的理论一致。随后,利用光滤波器将脉冲基座对应的光谱滤除,即可减小脉冲基座。

用采样示波器记录光滤波器输出的光脉冲,并与经过高阶孤子压缩后的光脉冲进行对比,如图11所示。

经过SOA和光滤波器作用后的光脉冲宽度进一步减小到18.497 ps,这是因为SOA的非线性效应使光脉冲产生了一定的频率啁啾,该啁啾与注入SOA之前的光脉冲所携带的啁啾相反,从而抵消掉一部分频率啁啾对光脉冲带来的影响,导致脉冲宽度变小。除此之外,光脉冲基座明显减小,光脉冲中心略微偏移,波形更加尖锐,峰值功率进一步增大。

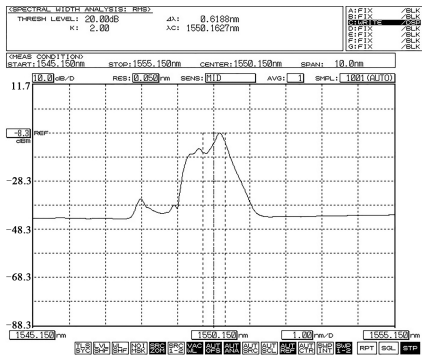


图10 SOA输出光的光谱

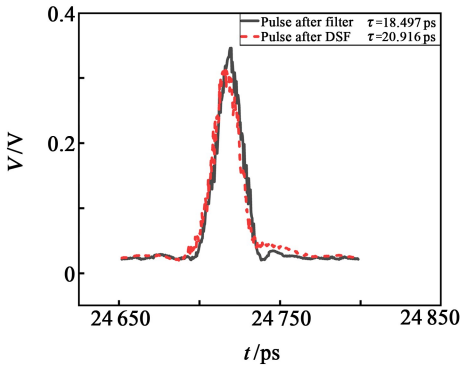


图11 SOA输出光的光谱

3 结论

为了提高增益开关半导体激光器输出光脉冲的质量,本文提出了一种DCF-DSF-SOA三级脉冲整形方案,构建了基于增益开关效应的皮秒脉冲激光系统,并进行了实验验证。在该系统中,利用DCF将脉冲宽度从39.381 ps压缩到26.681 ps。由于DCF对光脉冲的压缩程度有限,利用EDFA和DSF使光脉冲形成高阶孤子,并进一步将脉冲宽度压缩到20.916 ps。利用SOA展宽光脉冲的光谱,并利用光滤波器滤除脉冲基座对应的光谱,从而减小脉冲基座。最终,光脉冲宽度被压缩到18.497 ps。三级脉冲整形有效地减小了光脉冲宽度和脉冲基座,提高了脉冲峰值功率和脉冲能量的利用率。

参考文献:

[1] 王玉英. 超短脉冲激光器及其应用[J]. 光机电信息, 2006, 23(3): 21-28.

Wang Yuying. Ultrashort pulse laser and its application[J]. Ome Information, 2006, 23(3): 21-28.

[2] 朱晓农，包文霞. 超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识[J]. 中国激光，2019，46(12)：9-25.
Zhu Xiaonong, Bao Wenxia. Some basic knowledge of ultrashort pulse laser and its related applications[J]. Chinese J. of Lasers, 2019, 46(12): 9-25.

[3] 王彬宇，刘　斌，王永志，等. 空间应用高光束质量小型化被动调 Q 激光器[J]. 上海航天(中英文)，2021，38(6)：71-77.
Wang Binyu, Liu Bin, Wang Yongzhi, et al. Miniaturized passive Q-switched laser with high beam quality for space applications[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(6): 71-77.

[4] Chen S, Diao S, Li P, et al. Broadband tunable integrated CMOS pulser with 80-ps minimum pulse width for gain-switched semiconductor lasers[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 68-78.

[5] Terra O, Hussein H M, Kotb H. Soliton mode-locked fiber laser for distance measurements[J]. Appl. Opt., 2021, 60(12): 3452-3457.

[6] Ito T, Nakamae H, Hazama Y, et al. Femtosecond pulse generation beyond photon lifetime limit in gain-switched semiconductor lasers[J]. Communications Physics, 2018, 1: 42.

[7] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fiber laser technology[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 191-206.

[8] Lei X, Wieschendorf C, Hao L, et al. Compact actively Q-switched laser for sensing applications[J]. Measurement, 2020, 173: 108631.

[9] Wen Z, Lu B, Wang K, et al. Generating narrow-bandwidth pulses in a hybrid mode-locked fiber laser[J]. Opt. Lett., 2021, 46(5): 1097-1100.

[10] Zhao Z, Minty M. Ultranarrow bandwidth pulses from a regeneratively mode-locked fiber laser[J]. Opt. Express, 2021, 29(16): 25358-25364.

[11] Kenji W, Naoaki K, Tetsuya M. The degree of temporal synchronization of the pulse oscillations from a gain-switched multimode semiconductor laser[J]. Materials, 2017, 10(8): 950.

[12] Chen S, Ito T, Asahara A, et al. Transient gain analysis of gain-switched semiconductor lasers during pulse lasing[J]. Appl. Optics, 2015, 54(35): 10438.

[13] Rosado A, Pérez-Serrano A, Tijero J, et al. Enhanced optical frequency comb generation by pulsed gain-switching of optically injected semiconductor lasers[J]. Opt. Express, 2019, 27(6): 9155-9163.

[14] Chen S, Nakamura T, Ito T, et al. Picosecond tunable gain-switched blue pulses from GaN laser diodes with nanosecond current injections[J]. Opt. Express, 2017, 25(12): 13046-13054.

[15] Avrutin E A, Ryvkin B S, Kostamovaara J T, et al. Strongly asymmetric waveguide laser diodes for high brightness picosecond optical pulses generation by gain switching at GHz repetition rates[J]. Semiconductor Science and Technology, 2015, 30(5): 055006.1-7.

[16] Zhu H, Wang R, Pu T, et al. A novel approach for generating flat optical frequency comb based on externally injected gain-switching distributed feedback semiconductor laser[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(2): 026201.

[17] Wada K, Takamatsu S, Watanebe H, et al. Pulse-shaping of gain-switched pulse from multimode laser diode using fiber Sagnac interferometer[J]. Opt. Express, 2008, 16(24): 19872-19881.

[18] 陈言樑，张新亮，黄德修. 基于半导体光放大器的光脉冲压缩方案的研究[J]. 光学与光电技术，2007(1)：20-23.
Chen Yanliang, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Research on optical pulse compression scheme based on semiconductor optical amplifiers[J]. Optics and Optoelectronics Technol., 2007(1): 20-23.

[19] 杨晓萍，王云才，周希坚. 色散补偿和色散位移光纤实现光脉冲压缩[J]. 应用光学，2006，27(3)：0232.
Yang Xiaoping, Wang Yuncai, Zhou Xijian. Light pulse compression implemented by dispersion-compensation fiber and dispersion-shifted fiber[J]. J. of Appl. Opt., 2006, 27(3): 0232.

[20] 齐凤华，刘新乐. 高速光纤通信系统中高阶效应对孤子压缩的影响[J]. 北京电子科技学院学报，2008，16(2)：32-34.
Qi Fenghua, Liu Xinle. The effect of the high-order effect on the soliton-effect compression in high-speed fiber communication systems[J]. J. of Beijing Electronic Science and Technol. Institute, 2008, 16(2): 32-34.

[21] Dutta N K, Wang Q. Semiconductor Optical Amplifiers[M]. Optical Society of America, 2014.

[22] 董　毅，赵尚弘，李勇军，等. 半导体光放大器中 SPM 效应对光脉冲传输性能的影响[J]. 红外与激光工程，2014，43(5)：1411-1415.
Dong Yi, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Transmission properties of optical pulse influenced by SPM in semiconductor optical amplifier[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1411-1415.

作者简介：

杨京兴(1997—)，男，硕士生，主要研究方向为光通信与光传感；

谢　亮(1969—)，男，博士，研究员，主要研究方向包括高速光电子器件及光模块、光通信及光传感技术。