

变换限制脉冲的研究*

杨祥林 温扬敬 张明德 陈明华 于虹

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘 要 对增益开关分布反馈半导体激光器(GS-DFB-LD)加法布里-珀罗共振腔滤波方法产生变换限制脉冲源进行了理论分析,设计出将不同光源变为变换限制脉冲所需的滤波器带宽,并计算出相应的输出脉冲脉宽谱宽,从实验上获得了变换限制脉冲,本文还研究了测谱仪器分辨率对测量结果的影响,导出了一套测量修正理论。

关键词 变换限制脉冲, 谱测量修正。

1 引 言

产生近变换限制光脉冲源通常有两种方法。一是锁模方法,这种方法产生的脉冲接近变换限制条件,但它要求附加反射镜构成外腔来减少模间频率间隔,涉及到复杂的结构及繁杂的光学调整^[1]。另一种是用增益开关方法产生超短脉冲,再消除脉冲的频率啁啾。消除频率啁啾有正常色散补偿红移啁啾法及频域滤波法。Liu 等用前法在 $1.3 \mu\text{m}$ 处产生了 2 ps 的近变换限制脉冲^[2], Nakazawa 等则用滤波方法产生了 17 ps 的近变换限制脉冲^[3]。但用滤波法产生变换限制脉冲的理论分析不曾有人研究,而测谱仪器分辨率对测量结果的影响及修正也未见报道。

本文将对增益开关分布反馈半导体激光器加法布里-珀罗共振腔滤波器法产生变换限制脉冲源进行系统的研究。

2 变换限制脉冲产生的理论分析

利用增益开关方法,可很方便地产生高重复频率的超短光脉冲,但直接调制使激光脉冲具有很强的频率啁啾,该啁啾不仅影响脉冲在光纤中的传输,甚至可破坏光纤孤子的形成。为消除此啁啾,可使脉冲经过带通滤波器,抑制脉冲谱边带,从而达到脉冲为变换限制脉冲的目的。

对于直接调制产生的激光脉冲,当假定光脉冲强度为高斯形,且忽略非线性啁啾,则光场可表示为^[4]

$$E_{in}(t) = E_0 \exp \left[- (1/2) (1 - i\alpha) (t^2/T_0^2) - i2\pi f_0 t \right] \quad (1)$$

* 国家自然科学基金重点基金、通信 863 计划课题资助项目。

收稿日期: 1995 年 11 月 17 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 11 日

$E_{in}(t)$ 的傅里叶变换为

$$\tilde{E}_{in}(f) = E_0 T_0 \left(\frac{1}{1 - i\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[- \frac{(2\pi)^2 (f - f_0)^2 T_0^2}{2(1 - i\alpha)} \right] \quad (2)$$

式中 f_0 为脉冲中心频率, T_0 为脉冲 $1/e$ 强度点半宽, α 为啁啾因子, 通常半导体激光器产生的啁啾为红移啁啾, 即 $\alpha > 0$ 。 α 通常要由实验测定, 但在假定光场为(1)式时, 可将其与脉冲谱宽及脉宽联系起来:

$$\alpha = \left[\left(\frac{2\pi\Delta f_{in} T_{in}^2}{1.665^2} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 $T_{in} = 1.665T_0$, 为脉冲半高全宽, Δf_{in} 为谱半高全宽。

对变换限制脉冲, 要求 $\alpha = 0$, 但对半导体激光器产生的光脉冲, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近 α 远大于 1, 为消除啁啾, 让脉冲经过带通滤波器。考虑法布里-珀罗共振腔型滤波器, 当其精细度足够大时, 其场传递函数为

$$H(f - f_p) = \frac{1}{1 + 2i(f - f_p)/B} \quad (4)$$

式中 f_p 为滤波器峰频, 可调至与脉冲中心频率相等, B 为滤波器带宽。

经过滤波器后的脉冲输出谱为

$$\tilde{E}_{out}(f) = \tilde{E}_{in}(f) H(f - f_p) \quad (5)$$

其时域形式为

$$E_{out}(t) = \int \tilde{E}_{out}(f) \exp(-i2\pi f t) df \quad (6)$$

由(5)式、(6)式可求出输出脉冲的谱半高全宽 $\Delta f_{out}(T_{in}, \Delta f_{in}, B)$ 及脉宽 $\Delta T_{out}(T_{in}, \Delta f_{in}, B)$, 若假定输出脉冲波形接近高斯型, 且要求其输出满足变换限制要求, 有

$$\Delta f_{out}(\Delta f_{in}, T_{in}, B) \Delta T_{out}(\Delta f_{in}, T_{in}, B) = 0.441 \quad (7)$$

对给定的输入脉宽 ΔT_{in} 及输入谱宽 Δf_{in} , 由(7)式可找到合适的带宽 B , 从而求出 Δf_{out} , ΔT_{out} 。

图 1 和图 2 分别给出输出脉宽与输入谱宽、输入脉宽的关系, 图 3 和图 4 分别给出输出谱宽、滤波器带宽与输入谱宽、输入脉宽的关系。本文所有计算均在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处进行。

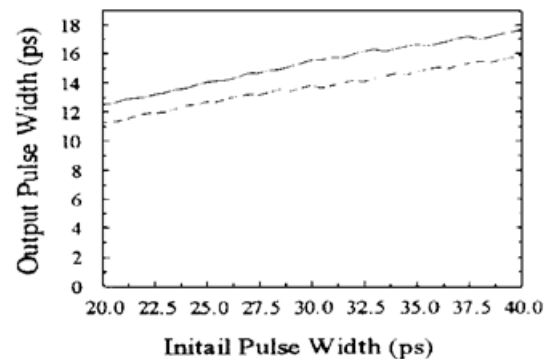
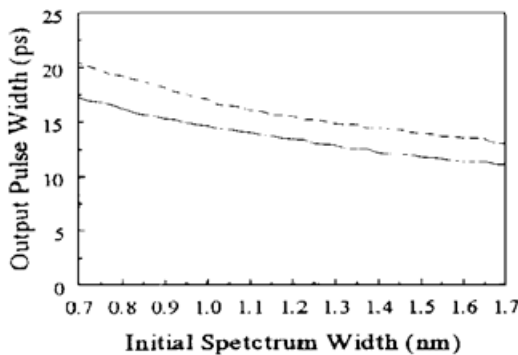


Fig. 1 Plots of output pulse vs. initial spectrum width with $T_{in} = 27$ ps (solid) and $T_{in} = 37$ ps (dashed)

Fig. 2 Plots of output pulse vs. initial pulse width with $\Delta f_{in} = 1.2$ nm (solid) and $\Delta f_{in} = 1.24$ nm (dashed)

可见, 只要测定初始脉冲谱宽及脉宽, 即可找出一个相应的滤波器带宽, 使输出脉冲接近变换限制要求, 同时可求出相应的输出脉宽及谱宽。如 $\Delta T_{in} = 27$ ps, $\Delta f_{in} = 1.24$ nm, 可求出 $B = 0.122$ nm, $\Delta T_{out} = 13.2$ ps, $\Delta f_{out} = 0.266$ nm, 而文献[3]的实验结果给出 $\Delta T_{out} =$

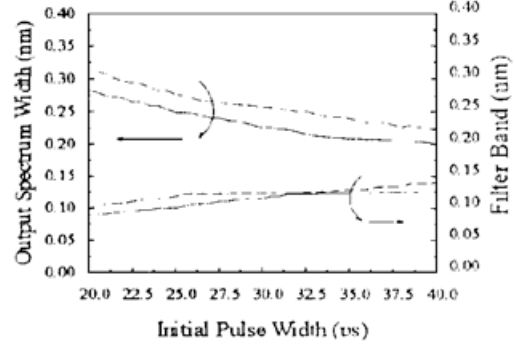
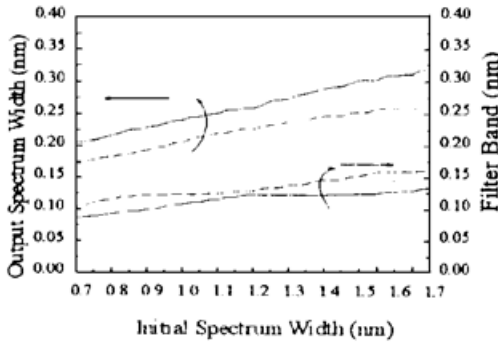


Fig. 3 Plots of output spectrum width and filter band vs. initial spectrum width with $T_{in} = 27$ ps (solid) and $T_{in} = 37$ ps (dashed)

Fig. 4 Plots of output spectrum width and filter band vs. initial pulse width with $\Delta f_{in} = 1.2$ nm (solid) and $\Delta f_{in} = 1.24$ nm (dashed)

17 ps, $\Delta f_{out} = 0.21$ nm。引起这一误差的主要原因是因为实际激光脉冲波形与(1)式有差别所引起。

3 实验装置

为产生近变换限制脉冲，设计了如图 5 所示实验装置。图中 LD 为分布反馈激光二极管，它由几千兆赫范围的微波及直流偏置驱动，分布反馈激光二极管的阈值电流为 16 mA，利用增益开关技术可很易获得高重复频率的超短光脉冲，脉冲宽度约为几十皮秒，谱宽大于 1 nm，脉冲远离变换限制要求。SMF 为单模光纤，用于与 LD 耦合，FC 为光纤连接器。滤波器 (Filter) 为法布里-珀罗共振腔滤波器，其谐振腔由两镀有高反膜的自聚焦透镜构成，自聚焦透镜通过插针与光纤连接在一起，使滤波器两端尾纤输入输出，极为方便，其中一个自聚焦透镜装在微调架上，从而可调节滤波器腔长，达到改变滤波器带宽的目的，滤波器的插入损耗约为 13 dB。掺铒光纤放大器(EDFA)为掺铒光纤放大器，它由两个 1.48 μ m 泵驱动，掺铒光纤放大器的小信号增益为 28 dB，增益带宽大于 25 nm，最大输出功率为 11 dBm，噪声系数为 5.1 dB。SHG 为自相关检测系统，其分辨率达 0.4 ps，灵敏度为 100 μ W。MCH 为 WDG30 型光栅单色仪，所用光栅为 600 l/mm，闪耀波长为 750 nm，分辨率达 0.1 nm。

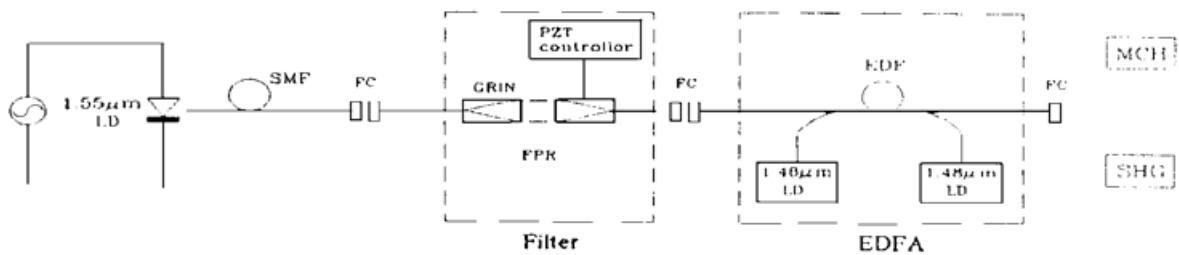


Fig. 5 Set up of generating transform-limited pulse sources with GS-DFB and FPR filter

由 LD 产生的带有啁啾的脉冲经光纤耦合后，进入滤波器，使输出脉冲为近变换限制脉冲，输出脉冲进入掺铒光纤放大器进行放大，脉冲的脉宽及谱宽由自相关检测系统及单色仪测定。

4 谱测量修正理论

本工作所采用单色仪的分辨率为 0.1 nm，而被测输出脉冲谱宽约为 0.2 nm，这时被测物理量与仪器分辨率可比拟，测量结果的可靠性较低，因而本节将分析测量仪器分辨率对谱

测量的影响并进行修正。

当被测光源经过测谱仪器的光学部件后,光电转换部分接收到的信号实际上为被测光源与光学部件相互作用后的信号,即

$$P(f_m) = \int T(f - f_m, \Delta f_1) P_0(f) df \quad (8)$$

式中 $T(f - f_m, \Delta f_1)$ 为测谱仪器光学部件的功率传递函数, $P_0(f)$ 为被测光源的实际功率谱, Δf_1 为仪器分辨率, $P(f_m)$ 为测谱仪器显示的功率谱分布。

如测谱仪器为光谱分析仪,则传递函数为

$$T(f - f_m, \Delta f_1) = \frac{1}{1 + 4(f - f_m)^2 / \Delta f_1^2} \quad (9)$$

将(9)式代入(8),且所有变量均对 Δf_2 归一化, Δf_2 为被测光源的真实谱宽,则有

$$P(f_m) = \frac{\Delta f_1}{2} \int \frac{\Delta f_1 / (2\Delta f_2)}{(\Delta f_1 / 2\Delta f_2)^2 + x^2} P_0(\Delta f_2 x + f_m) dx \quad (10)$$

式中 $x = (f - f_m) / \Delta f_2$, 在 $\Delta f_1 / \Delta f_2 \ll 1$ 时,利用,

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{\beta}{\beta^2 + x^2} = \delta(x) \quad (11)$$

可求得 $P(f_m) = \Delta f_1 / 2 P_0(f_m)$, 由于常数的大小只改变幅度而不改变半高全宽,可见 $P(f_m)$ 的半高全宽与 $P_0(f_m)$ 的半高全宽完全相等,即在被测光源谱宽远大于分辨率时,测量到的谱宽是被谱宽的真实反映。

现考虑平面光栅单色仪,在所测谱宽范围不是太大时,其传递函数为矩形函数,因其高度只改变幅度而不改变半高全宽,取其高为 $1 / \Delta f_1$, 即

$$\rho_{\Delta f_1}(f) = \begin{cases} 1 / \Delta f_1 & |f - f_m| \leq \Delta f_1 / 2 \\ 0 & |f - f_m| > \Delta f_1 / 2 \end{cases} \quad (12)$$

将此传递函数代入(8)式,并对 Δf_2 归一化,则有

$$P(f_m) = \int_{-\Delta f_1 / 2\Delta f_2}^{\Delta f_1 / 2\Delta f_2} \frac{1}{\Delta f_1 / \Delta f_2} P_0(\Delta f_2 x + f_m) dx \quad (13)$$

利用 $\lim_{l \rightarrow 0} \rho_l(x) = \delta(x)$, 可知当 $\Delta f_1 / \Delta f_2 \ll 1$ 时,有 $P(f_m) = P_0(f_m)$ 。可见对平面光栅单色仪,在被测谱宽远大于分辨率时,测量出的谱宽也精确等于被测光源的真实谱宽。

在实际情况下,不少情况是被测谱宽与分辨率处于同一数量级,这时仪器显示的谱宽并非光源的真实谱宽,因而有必要对其修正,具体做法如下:先给定分辨率 Δf_1 , 这样每设定一个 Δf_2 , 就有一个测量谱宽 Δf_3 , 改变光源真实谱宽 Δf_2 , 就可得一系列的 Δf_3 , 即给出了一条 $\Delta f_2 \sim \Delta f_3$ 关系曲线。实际问题中, Δf_3 可以通过测量仪器显示获得,也就可以由 $\Delta f_2 \sim \Delta f_3$ 关系反推得到真实谱宽。

图6和图7分别计算了对光谱仪及光栅单色仪的修正,其中已假定被测光源为高斯分布

$$P_0(f) = \exp \left[- \frac{1.665^2 (f - f_0)^2}{\Delta f_2^2} \right] \quad (14)$$

式中 f_0 为峰频。

由图可见,测量仪器显示的谱宽比被测光源真实谱宽要大,且单色仪引起的加宽比光谱仪小,当 $\Delta f_2 < \Delta f_1$ 时,测量已完全不可靠。对于单色仪,在 $\Delta f_2 / \Delta f_1 > 2$ 时,测量误差已小于 10%, $\Delta f_2 \sim \Delta f_3$ 曲线接近 $\Delta f_2 = \Delta f_3$ 直线,此时分辨率的影响基本可忽略;而对于光谱仪

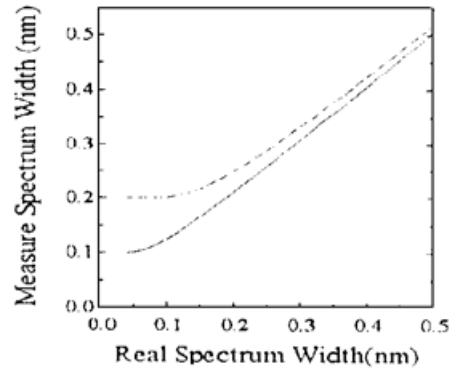
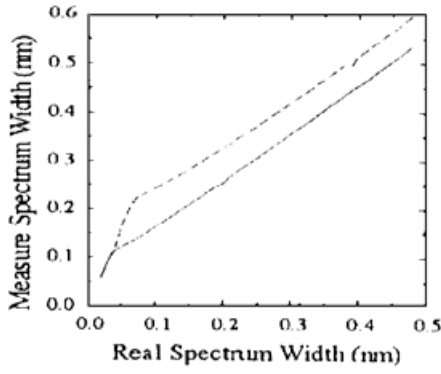


Fig. 6 Plots of measure spectrum vs. real spectrum with optical spectrum analyzer. $\Delta f_1 = 0.1 \text{ nm}$ (solid) and $\Delta f_1 = 0.2 \text{ nm}$ (dashed)

Fig. 7 Plots of measure spectrum vs. real spectrum with grating monochromator. $\Delta f_1 = 0.1 \text{ nm}$ (solid) and $\Delta f_1 = 0.2 \text{ nm}$ (dashed)

, 需 $\Delta f_2 / \Delta f_1 > 5$, 分辨率的影响才可忽略。

5 实验结果

采用第三节所述的实验装置, 并用第四节所述进行谱测量修正, 得到了重复频率为 2.5 GHz 的变换限制脉冲源。图 8 为初始光源的光谱及自相关曲线, 谱宽为 1.2 nm, 脉宽为 27 ps, 按第二节理论分析设计, 可知所需滤波器带宽约为 0.13 nm, 使滤波后的脉宽谱宽积约为 0.44。

图 9 为经滤波器后的输出脉冲光谱及自相关迹线, 脉宽约为 19.6 ps, 单色仪显示谱宽 Δf_3 为 0.195 nm, 由图 7 可查得相应的真实谱宽 Δf_2 为 0.18 nm, 此时脉宽谱宽积为 0.44。对所得自相关曲线进行拟合, 知波形接近高斯型, 可见所得脉冲为近变换限制脉冲。

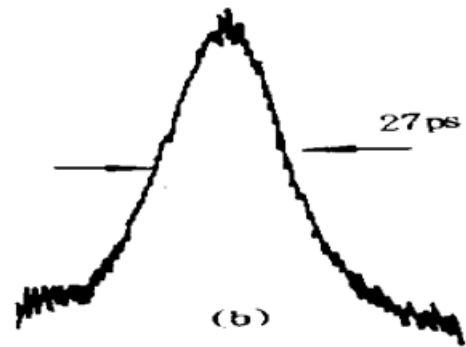
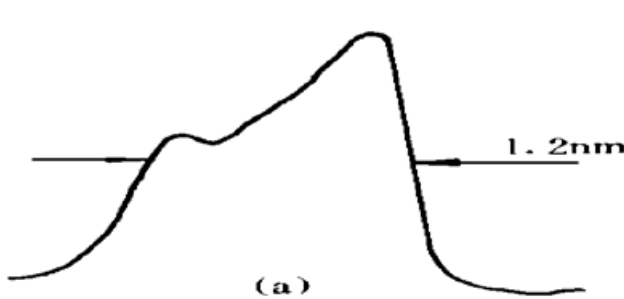


Fig. 8 (a) Spectrum of initial pulse, (b) Autocorrelation trace of initial pulse

Fig. 9 (a) Spectrum of output pulse, (b) Autocorrelation trace of output pulse

结 论 本文对用增益开关分布反馈半导体激光器加法布里-珀罗共振腔滤波方法产生变换限制脉冲进行了理论分析, 设计出将不同光源变为变换限制脉冲所需的滤波器带宽, 并计算出相应的输出脉宽谱宽; 研制了一套产生变换限制脉冲的实验装置, 并从实验上获得了变换限制脉冲源, 该装置不同于文献[3], 激光二极管与滤波器相互独立, 且滤波器带宽可调, 这样对不同光源, 均可获得相应的变换限制脉冲; 本文还导出了一套谱测量的修正理论, 这在仪器分辨率与被测谱宽可比拟时进行准确测量是很重要的。

参 考 文 献

- [1] J. E. Bowers, P. A. Morton, A. Mar *et al.*, Actively mode-locked semiconductor laser. *IEEE. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**(6): 1426~ 1439
- [2] H. F. Liu, Y. Ogawa, S. Oshiba, Generation of an extremely short single mode pulse (~ 2 ps) by fiber compression of a gain-switched pulse from a $1.3 \mu\text{m}$ distributed-feedback laser diode. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(11): 1284~ 1286
- [3] M. Nakazawa, K. Suzuki, Y. Kimura, Transform-limited pulse generation in the gigahertz region from a gain-switched distributed-feedback laser diode using spectral windowing. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(12): 715~ 717
- [4] F. Koyama, Y. Suematsu, Analysis of dynamic spectral width of dynamic-single-mode (DSM) lasers and related transmission bandwidth of single-mode fibers. *IEEE. J. of Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(4): 292~ 297

Study of Transform-Limited Pulses

ang Xianglin Wen Yangjing Zhang Mingde Chen MingHua Yu Hong
(*Department of Electronics, Southeast University, Nanjing 210096*)
(Received 17 November 1995; revised 11 March 1996)

Abstract In this paper, the method of gain-switched distributed-feedback semiconductor laser with Fabry-Perot Resonator (FPR) filter to generate transform-limited pulses is analyzed theoretically. The filter bands needed to make pulse satisfy transform-limited condition for different sources are obtained and the corresponding output pulse width and spectrum width are calculated. The transform-limited pulse is generated experimentally. The influence of resolution of spectrum measuring instrument on measured result is analyzed, and the correction theory is derived.

Key words transform-limited pulse, spectrum measure correction.