

超短脉冲和腔内色散

王之江 杨本祺

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

为要获得锁模激光器的超短脉冲,就要在一定波段内,完全校正腔内色散。适当的反射膜与折射介质相匹配,以校正腔内色散,对于获得超短脉冲是必要的。

一

锁模激光的脉冲宽度随技术进步而日益变小,用对撞脉冲锁模已得到50~60 fs的宽度,而且还可通过光纤将频谱展宽而进一步压缩脉冲宽度,得到20 fs左右的结果^[1],但是对于种种实验结果之间的差别,还未能理论上作出准确的定量解释,看来因素是多方面的^[2],其中之一是光程色散,对撞锁模的腔内元件已经非常少,除很薄的激光染料和饱和吸收染料外,就是介质反射膜。为补偿折射介质的正色散,最近 Fork 等提出在腔内引入负色散^[3],但未有效果。Dietel 等^[4]在腔内加入一定厚度的玻璃以变更脉冲宽度,并可选择厚度使脉冲宽度为极小值,但是并未获得很窄的脉冲。这种做法未能压缩脉冲宽度的原因可能有两个,其一是,仅在一个波长校正群速度色散也许是不够的;其二是介质膜的色散不一定是正值。另外,这些实验也表明,至今还没有适当的测量方法能判定色散大小。

二

文献[3]导出,如光脉冲经过光程 P 所需的时间为 T ,则 T 的色散为

$$-\frac{dT}{d\lambda} = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2P}{d\lambda^2} \quad (1)$$

亦即 $P(\lambda)$ 中的线性部分对锁模同步没有影响。故当被锁定的频谱很窄时,只要中心波长的光程对波长的二次导数为零即可,但当频谱较宽时,显然要求各波长的 $(d^2P/d\lambda^2)$ 均为零。在这种情况下,用不同的介质产生负色散也会有不同的效果。这是由于介质具有各不相同的色散函数形式,折射率色散可以表示为 Hartmann 公式

$$n(\lambda) = n_0 + [K/(\lambda - \lambda_0)], \quad (2)$$

式中 n_0 、 λ_0 、 K 是三个随介质而变的常数。厚度 l 的介质光程 $P = nl$, 故

$$\frac{d^2P}{d\lambda^2} = \frac{2Kl}{(\lambda - \lambda_0)^3} \quad (3)$$

仅当材料的 λ_0 相近时,才可能较好地正负相补偿,例如石英($\lambda_0 \sim 128 \text{ nm}$)补偿酒精($\lambda_0 \sim 360 \text{ nm}$)时效果不会很好。另外文献[3]采用的棱镜系统的负色散是 $dn/d\lambda$ 和 $d^2n/d\lambda^2$ 的函数,由于两者函数形式不同,也使匹配补偿难以做好。

三

多层膜是引起光程色散的原因,这是由于反射时的位相延迟所致,常用的光学薄膜计算方法就可以算出色散^[5]。我们计算了四种膜系的位相延迟色散(见附表 1~4);两种膜系是最简单的 $\lambda/4$ 膜系但层数不同,将两个 $\lambda/4$ 膜系相叠成的宽带反射膜,最后一种是膜厚渐变的宽带反射膜,计算结果表明,在高反射率区间的位相延迟一般都随波长的增长而单调下降,光程的一次导数恒为正,二次导数则可以变号,而且可以是较大的值(折射介质厚度为 $10 \mu\text{m}$ 时 $d^2P/d\lambda^2$ 约为 10^{-8} nm/nm^2)。尤其是两种层数较多的宽带膜,可以产生较大的正值或负值。因此介质膜的位相色散也许是影响脉冲宽度的更主要的因素,并可随膜系设计(包括反射带中心波长选择)而变化。这里只算了垂直入射情况,大角度入射时会有较大变化。

似乎还没有为形成预定的位相性质而作的膜系设计。看来设计和制造适当的反射膜并与折射介质相匹配,对于校正腔内色散,可靠地可重复地获得一定的超短脉冲,是必要的。

对于多层膜的位相色散,最近也有人做了计算^[6],我们的不同在于:计算时已计及膜材料的色散,计算了光程色散并讨论了其导数性质,计算了不同的膜系等等,最主要的是结论近乎相反。文献[6]认为膜系色散不是重要因素。其结论的依据是腔内插入玻璃厚度的实验,但实验完全未计及光程的二次导数性质,也未考虑补偿的完善性,因此结论看来还缺乏依据。

四

要使锁模产生窄脉冲,似应要求:被锁定的各纵模频率差为常数,就如同光栅理论要求光栅刻痕间距为常数一样,否则,从一般所知级数和并不能给出窄的时空分布。即当 a 为常数时,函数 $f(n, x)$ 有

$$f(n, x) = \left| \sum_{n=0}^n \exp(ianx) \right|^2 = \left(\frac{\sin(nax/2)}{\sin(ax/2)} \right)^2. \quad (4)$$

对光栅而言, $a = (2\pi d/\lambda)$, d 是光栅间距, $x = \sin \theta$, θ 是衍射角,对锁模而言, $a = \Delta\omega$ 为相邻纵模频差, $x = t$ 是时间。仅当腔长 l 没有色散,纵模频率差 $\Delta\omega = (2\pi c/l)$ 才是常数,上式才成立,锁模才能获得窄脉冲。

锁模脉冲之间距是 $\tau = (l/c)$,当 l 不是常数时,脉冲将因色散而展宽,脉冲宽度将是逐步加宽。由此可见,当腔内色散未校正时,锁模脉冲宽度主要由饱和吸收染料截去脉冲前沿的能力和“快”的波长的能力而定。这样一来脉冲的波长成分会随时间变化。实验测量光谱成分随时间的发展应是可能的。若能测出这种发展变化,那么腔内色散的正负也就决定。这也许是一种测量腔内光程色散的可能做法。由于染料荧光光谱本身也可能是时间的函数,这类因素应在测量中计及。

表 1 13 层 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜, AH(LH)⁶GTable 1 High-reflection film with 13 layers of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, AH(LH)⁶G

波长, λ (nm)	反射率, R	位相延迟角, θ	光程延迟, -P (nm)	$-\frac{dP}{d\lambda}$ (nm/nm)	$-\frac{d^2P}{d\lambda^2}$ (nm/nm ²)
420	.961305	342.993	400.159	-4.22662	.33631
430	.986487	327.677	391.392	-.860424	3.45516E-03
440	.987579	313.34	382.971	-.819745	4.38881E-03
450	.994561	299.968	374.96	-.790349	1.21593E-03
460	.996638	287.274	367.072	-.793012	-1.5707E-03
470	.996427	275.012	359.043	-.811171	-2.02465E-03
480	.998286	263.1	350.8	-.843969	-4.50039E-03
490	.99877	251.355	342.122	-.87192	-2.79903E-03
500	.998441	239.744	332.978	-1.0338	-.0294075
510	.998388	226.656	321.096	-1.28367	-.0221024
520	.998901	212.294	306.647	-1.67346	-.0631242
530	.998773	193.935	285.515	-2.62656	-.141773
540	.997392	166.099	249.149	5.10667	-.36484
550	.991538	115.394	176.296	-10.4369	-.639353
560	.985437	29.3758	45.6957	-14.2469	-.0542489
570	.992872	-56.638	-89.6768	-10.9849	.636801
580	.997167	-104.901	-169.007	-6.27695	.240212
590	.998098	-136.151	-223.134	-4.68983	.0871
600	.998318	-161.248	-268.747	-4.70817	-.0986209
610	.997664	-191.693	-324.813	-6.87325	-.352974
620	.995011	-242.385	-417.441	-13.4221	-.873873
630	.990567	-335.943	-587.9	-18.536	-.0488672
640	.99275	-429.073	-762.796	-14.0375	.848337
650	.994675	-478.154	-863.334	-8.07074	.257414
660	.994262	-510.771	-936.414	-6.81344	.0113258
670	.991073	-541.799	-1008.35	-7.75615	-.224953
680	.979725	-585.158	-1105.3	-13.6912	-.900772

表 2 21 层 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜, AH(LH)¹⁰GTable 2 High-reflection film with 21 layers of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, AH(LH)¹⁰G

波长, λ (nm)	反射率, R	位相延迟角, θ	光程延迟, -P (nm)	$-\frac{dP}{d\lambda}$ (nm/nm)	$-\frac{d^2P}{d\lambda^2}$ (nm/nm ²)
420	.572231	206.859	241.336	-.665509	1.26784
430	.897756	240.309	287.036	1.78108	-.894657
440	.994761	215.988	263.985	-2.07437	.248477
450	.998958	206.047	257.559	-.35058	.0235801
460	.999633	199.13	254.444	-.216227	.0136375
470	.999804	193.614	252.774	-.129656	4.99105E-03
480	.999867	188.74	251.653	-.0950312	2.51961E-03
490	.99989	184.256	250.793	-.079946	6.27041E-04
500	.999898	180	250	-.0804573	-6.7234E-04
510	.99988	175.864	249.141	-.0928107	-1.8487E-03
520	.999848	171.755	248.091	-.119777	-3.7303E-03
530	.999773	167.539	246.655	-.175034	-7.39288E-03
540	.999593	162.99	244.485	-.266557	-.0105033
550	.99915	157.942	241.3	-.340431	-6.32477E-03
560	.998142	152.513	237.242	-.544837	-.0365748
570	.993979	144.989	229.566	-.849297	-.0414596
580	.973792	134.063	215.99	-4.29305	-.478488
590	.731009	105.681	173.199	5.53263	2.17032
600	.113775	180.886	301.477	5.07843	-2.26146
610	.565488	147.27	249.541	-5.68091	.38299
620	.559803	126.18	217.31	-3.41637	-.0755329
630	.336324	103.757	181.575	-3.95735	.113278
640	.0332418	94.3383	167.713	9.03738	2.16453
650	.105416	181.464	327.643	8.13357	-2.31695
660	.290973	164.385	301.373	-4.20494	.150717
670	.363567	147.668	274.827	-2.58562	.0172958
680	.334309	132.232	249.772	-2.5306	-2.36893E-03

表 3 31 层 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜, $\text{A}0.95[\text{H}(\text{LH})^7]\text{L}1.24[\text{H}(\text{LH})^7]\text{G}$ Table 3 High-reflection film with 31 layers of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, $\text{A}0.95[\text{H}(\text{LH})^7]\text{L}1.24[\text{H}(\text{LH})^7]\text{G}$

波长, λ (nm)	反射率, R	位相延迟角, θ	光程延迟, $-P$ (nm)	$-\frac{dP}{d\lambda}$ (nm/nm)	$-\frac{d^2P}{d\lambda^2}$ (nm/nm ²)
420	.979796	212.043	247.384	-.448395	.0246345
430	.996092	203.315	242.849	-.301629	.0204129
440	.997597	196.818	240.555	-.161107	.0101447
450	.997355	191.457	239.321	-.0954036	3.77798E-03
460	.999013	186.651	238.499	-.0701644	1.63507E-03
470	.999279	182.177	237.842	-.0654709	-5.49793E-04
480	.99858	177.957	237.143	-.0734856	-1.02854E-03
490	.998438	173.631	236.331	-.0911963	-2.76136E-03
500	.999331	169.364	235.228	-.14071	-6.93703E-03
510	.999129	164.8	233.467	-.203267	-5.57184E-03
520	.995418	160.001	231.113	-.267805	-8.63171E-03
530	.998786	154.733	227.801	-.429296	-.0245433
540	.999582	148.028	222.042	-.732613	-.0373535
550	.999631	139.037	212.418	-1.00861	-.0437551
560	.999474	125.972	195.956	-1.54962	-.241253
570	.997509	88.5162	140.151	-19.9863	-3.07156
580	.990729	-105.604	-170.14	-25.8777	2.02218
590	.998033	-194.03	-317.994	-8.36164	1.05149
600	.998745	-218.323	-363.872	-3.41432	-.0296631
610	.99852	-239.788	-406.307	-4.63033	-.165673
620	.997099	-271.122	-466.932	-8.43751	-.602404
630	.99208	-335.337	-586.84	-17.5606	-1.05073
640	.989127	-447.541	-795.628	-19.3221	.909237
650	.993303	-514.304	-928.605	-9.85425	.612488
660	.994461	-546.766	-1002.4	-6.0138	.155773
670	.993543	-568.766	-1058.54	-5.32598	7.54166E-03
680	.989751	-589.463	-1113.43	-5.68965	.0845661

表 4 34 层 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 高反射膜, $\text{A}0.8(\text{LH})0.83(\text{LH})0.86(\text{LH})\dots 1.454(\text{LH})\text{G}$ Table 4 High-reflection film with 34 layers of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$,
 $\text{A}0.8(\text{LH})0.83(\text{LH})0.86(\text{LH})\dots 1.454(\text{LH})\text{G}$

波长, λ (nm)	反射率, R	位相延迟角, θ	光程延迟, $-P$	$-\frac{dP}{d\lambda}$ (nm/nm)	$-\frac{d^2P}{d\lambda^2}$ (nm/nm ²)
420	.433467	263.917	307.903	4.22971	-1.70228
430	.898676	229.163	273.722	-3.46036	.371996
440	.968933	214.558	262.238	-.664291	.0525756
450	.985824	205.64	257.05	-.357873	.0214319
460	.991747	198.969	254.238	-.203221	.0121412
470	.994063	193.536	252.672	-.123543	4.52662E-03
480	.995152	188.7	251.6	-.0914977	2.35796E-03
490	.995612	184.239	250.77	-.0774518	5.57899E-04
500	.995796	180	250	-.0781422	-6.45161E-04
510	.995368	175.882	249.166	-.090109	-1.79195E-03
520	.994698	171.795	248.148	-.115708	-3.49236E-03
530	.993389	167.617	246.77	-.167432	-6.87981E-03
540	.990879	163.141	244.712	-.250608	-9.2845E-03
550	.986438	158.245	241.763	-.312269	-4.55189E-03
560	.979808	153.11	238.171	-.474739	-.0282154
570	.963943	146.475	231.919	-.724595	-.0237808
580	.931197	138.367	222.925	-1.22171	-.0755796
590	.841102	126.148	206.743	-1.92951	-.0671096
600	.646038	110.02	183.367	-4.13581	-.254458
610	.252343	86.7522	146.997	2.97839	1.55405
620	.010259	140.084	241.256	10.1187	-1.302213
630	.15587	178.542	312.449	2.35842	-1.04365
640	.314551	164.666	292.74	-2.60302	.10713
650	.386443	152.782	275.856	-1.57512	.0193305
660	.395173	142.299	260.882	-1.44584	6.60133E-03
670	.360194	132.501	246.599	-1.43623	-2.84863E-03
680	.291441	122.92	232.182	-1.43587	6.43253E-03

按照上述观点, 文献[3]导出的校正 $d^2P/d\lambda^2$ 的看法似乎只对放大器校正色散适用; 对振荡器而言, 必须在一定波段内完全校正腔内色散。

对于与刘玉璞、林礼煌、方洪烈等的有益讨论表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. G. Fujimoto *et al.*; «XIII IQEC, June 18~21, 1984 Anaheim, California, Digest of Technical Papers», 21-MDD1.
- [2] R. L. Fork *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 4 (Apr), 500.
- [3] J. P. Gordon *et al.*; *Opt. Lett.*, 1984, **9**, No. 5 (May), 150, 153.
- [4] W. Dietel *et al.*; *Opt. Lett.*, 1983, **8**, No. 1 (Jan), 4.
- [5] H. A. Macleod; «*Thin Film Optical Filters*», (Adam Hilger, London, 1969).
- [6] W. Dietel *et al.*; *Opt. Commun.*, 1984, **50**, No. 3 (1 Jun), 179.

Ultrashort pulses and intracavity dispersion

WANG ZHIJIANG AND YANG BENQI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 7 August 1984; revised 5 October 1984)

Abstract

It is necessary to compensate the dispersion completely within the demanded wavelength range in a mode-locked laser cavity for obtaining ultra-short pulses. Operation with no dispersion can be achieved by appropriated design of films coated on mirrors to match the medium inside the cavity. In this way, ultra-pulses can be obtained.