

载波-包络相位对于基频光与其自身倍频光脉冲合成的影响*

邓玉强^{1)†} 王清月¹⁾ 吴祖斌¹⁾ 张志刚^{1)‡}

1) 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

2) 北京大学信息科学与技术学院量子电子学研究所, 北京 100871)

(2004 年 11 月 26 日收到, 2005 年 7 月 1 日收到修改稿)

将基频光与其自身的倍频光合成, 是一种得到超过一个倍频程的超宽光谱的简单方法, 而载波-包络相位 (CEP) 对合成超宽光谱产生的超短脉冲有重要的影响. 本文从光频梳的角度, 根据钛宝石激光器中产生的超短脉冲光谱, 计算载波-包络相位对该脉冲与其自身的倍频脉冲合成产生的超短脉冲的影响, 说明了调整载波-包络相位对于脉冲合成的重要性.

关键词: 超短脉冲, 载波-包络相位, 光频梳, 脉冲合成

PACC: 4280W, 4265K

1. 引言

随着超短脉冲在时域的越来越短, 人们开始越来越重视超短脉冲在包络内电场振荡的微观形式. 对于只有几个周期的超短脉冲, 脉冲包络的峰和载波的峰往往是不重合的, 载波的相位和包络的相位之差, 也称为载波-包络相位 (CEP). 相邻两发脉冲的载波-包络相位之差, 称为载波-包络相位差 (CEO). 时域的载波-包络相位差, 反映到频域上表现为光频梳的梳齿与以 n (n 是很大的整数) 倍脉冲重复频率为基准的频率标尺之间产生偏差, 称为载波-包络频率差. 超短脉冲的载波-包络相位是否为零, 即包络的峰值与电场振荡的峰值是否重合, 对于超短脉冲产生 X 射线及高次谐波有十分重要的影响^[1]. 同时, 超短脉冲的载波-包络相位差通常也是随时间变化的, 如果能将载波-包络相位差稳定, 对于以光频梳为标准的光频钟有至关重要的意义^[2-7]. 而且, 稳定载波-包络相位, 是两激光脉冲合成, 产生更短的超短脉冲的关键^[8-11].

为了产生超短脉冲, 需要足够宽的超宽光谱来支持. 人们常常使用空心光纤或非线性晶体通过光

束的自相位调制等非线性效应来展宽光谱^[12, 13], 而光束通过自身的非线性效应将光谱展宽的程度往往会受到一定的限制. 将具有不同中心频率的两个宽光谱叠放在一起, 可以容易获得超过一个倍频程的超宽带光谱^[8-11, 14], 甚至更宽.

然而, 来自于不同源的两脉冲通常具有不同的载波-包络相位. 如果将两脉冲直接合成, 由于它们的载波-包络位相差不同, 两脉冲电场相位没有锁定, 从而不能产生超短脉冲. Shelton 等将两独立的钛宝石激光器发射的中心波长分别为 760nm 和 810nm 的激光束合成, 调整两激光器的载波-包络相位, 使其一致, 得到的相关合成脉冲的自相关宽度窄了两个数量级, 并且其强度比各自的强度都明显增大^[8]. Baltusvka 等将闲频光、信号光和闲频光的倍频光联接在一起, 得到了超连续的白光光谱^[9]. Schibli 等将钛宝石激光器的倍频程的激光脉冲与铬橄榄石激光器的 30fs 的激光脉冲合成, 得到了 600—1600nm 的超倍频程的超宽光谱^[10, 11].

本文以实测的钛宝石激光器中产生的光谱为例产生基频光梳, 并模拟产生了该光频梳的二次谐波频率梳, 将基频光梳与倍频光梳合成, 得到超宽光谱. 研究调整光频梳的载波-包络相位对于合成超

* 国家自然科学基金 (批准号 60178007) 国家自然科学基金重大项目 (批准号 60490280) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yuq Deng@yahoo.com

短脉冲的影响.

2. 基频光梳与倍频光梳的直接合成

将一超短激光脉冲倍频,再与该脉冲自身的光谱叠放在一起,就得到了超过一个倍频程的光谱.如果再将这个基频光和倍频光通过非线性晶体或空心光纤,经过交叉相位调制等非线性效应,不仅可以把光谱展宽得更宽,而且可以把原来两个孤立的光谱联接在一起,得到更宽的超连续光谱^[12].

本文模拟说明调整合成光谱的载波-包络相位差对于合成光脉冲的影响.为计算方便,这里没有将基频光和倍频光展宽.采用的基频光是从自制钛宝石激光器中得到的 15fs 脉冲的光谱(变换极限时域脉宽为 10fs)^[15],光谱如图1(a)所示.

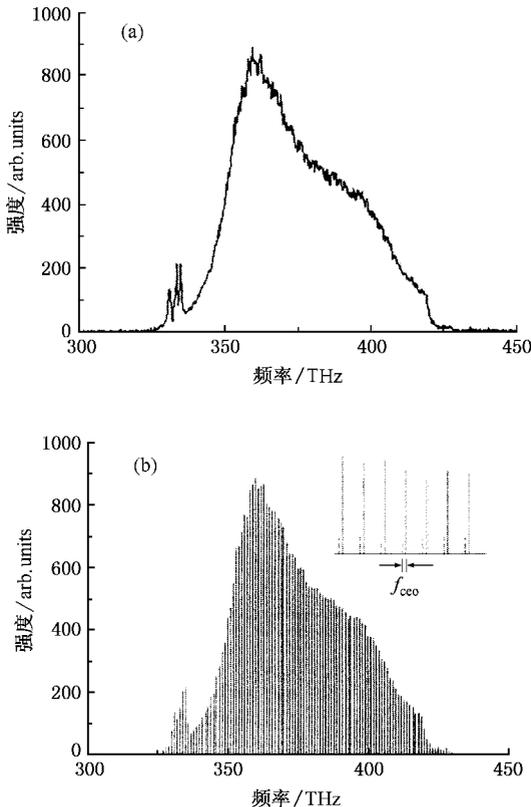


图1 (a)基频光谱 (b)基频光频梳,插图显示梳齿与 n 倍重复频率为基准的频率标尺之间的偏差,虚线代表以 n 倍重复频率为基准的频率标尺

将此光谱变为光频梳,光谱只在一系列分立的梳齿上取值,且每个梳齿与 n (n 是很大的整数)倍重复频率之间的偏差都是确定的^[3,4,16,17],称为载波-包络频率偏差,以 f_{ceo} 表示.第 n 个梳齿所在的频

率值可表示为^[3,4,16,17]

$$f_n = nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}, \quad (1)$$

其中 f_{rep} 为激光器的重复频率, f_{ceo} 为载波-包络频率差.

载波-包络频率差与载波-包络相位差 ϕ_{ceo} 的关系可以表示为^[1,16]

$$f_{\text{ceo}} = \frac{\phi_{\text{ceo}}}{2\pi} f_{\text{rep}}. \quad (2)$$

设脉冲重复频率为 10GHz ,载波-包络相位差 $\phi_{\text{ceo}} = 2\pi/5$.根据(2)式,载波-包络频率偏差 $f_{\text{ceo}} = 2\text{GHz}$,第 n 个梳齿所在的频率位置为 $f_n = (10 \times n + 2)\text{GHz}$.基频光梳如图1(b)所示,其细节如图1(b)中插图所示,图中虚线表示 n 倍重复频率所在的位置.

将此基频光频梳倍频,得到的倍频梳的梳齿与 $2n$ 倍重复频率的偏差为 $2f_{\text{ceo}}$ ^[14,18],表示为

$$f_m = 2nf_{\text{rep}} + 2f_{\text{ceo}}, \quad (3)$$

其中 f_m 为倍频梳齿所在的频率位置.

可知基频光的梳齿与 n 倍重复频率为基准的频率标尺之间偏差为 f_{ceo} ,而倍频光的梳齿与 n 倍重复频率为基准的频率标尺之间的偏差为 $2f_{\text{ceo}}$,将倍频光梳与基频光梳直接合成,合成的光频梳如图2(a)所示,其细节梳齿与以 n 倍重复频率为基准的频率标尺之间的偏差如图2(b)所示.

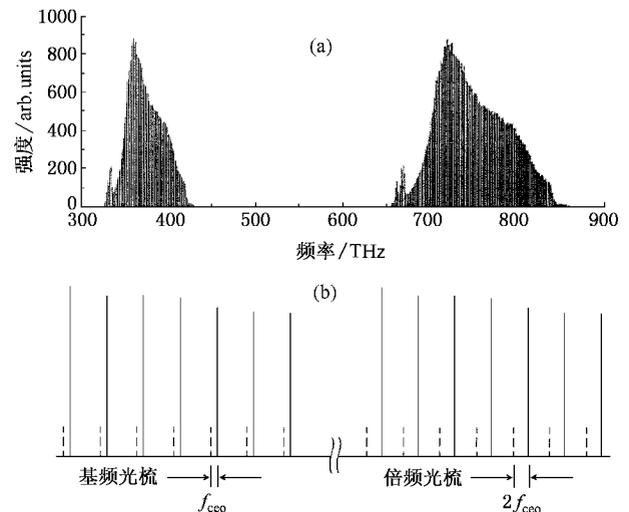


图2 基频光梳与倍频光梳直接合成的光梳图 (a)整体 (b)局部细节

假设通过空间光调制(SLM)系统可以将合成光谱的相位完全补偿^[19],根据光频梳可以得到如图3

所示的时域脉冲序列. 图 3(a)是时域的脉冲串, 图 3(b)是将脉冲序列放大的结果, 其半高宽为 6fs.

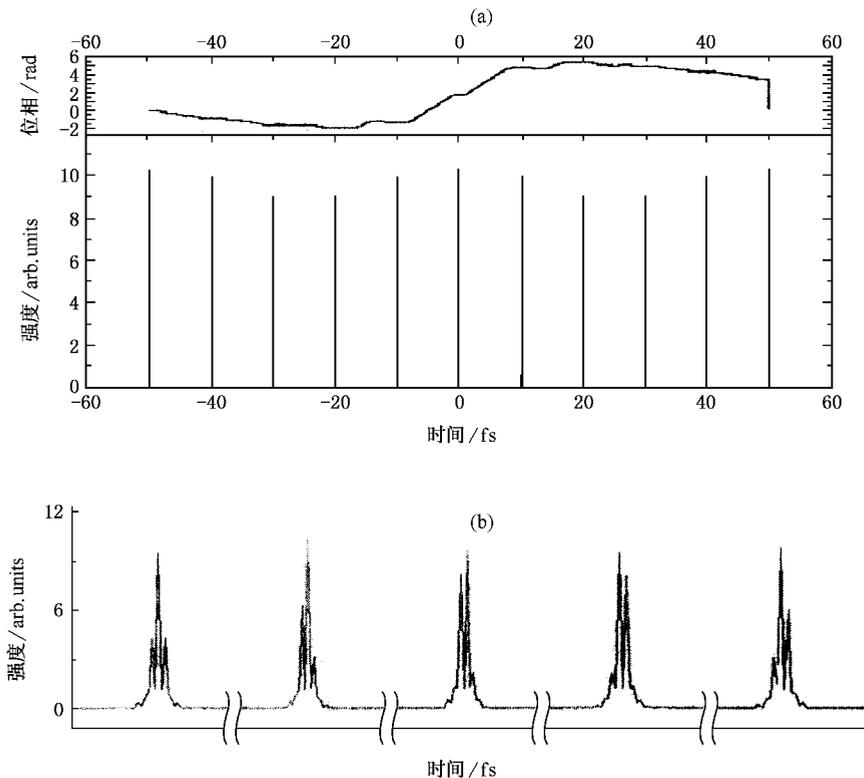


图 3 直接合成光频梳得到的脉冲序列 (a)整体 (b)局部放大的脉冲序列

从图 3 中可以看出, 脉冲序列的强度存在波动, 每 5 个脉冲重复一次. 即在 5 发脉冲序列中, 只有一发脉冲强度可以达到最大值. 这是因为我们所假设的载波-包络相位为 $\phi = 2\pi/5$. 如果假设的载波-包络相位为 $2\pi/10$, 则脉冲序列每 10 发重复一次. 而实际中的载波-包络相位通常是任意的, 这样就往往导致脉冲序列, 要经过很多次才会重复一次, 甚至是千变万化、永不重复的. 如果高次谐波或 X 射线的产生阈值是在脉冲的极值点, 那么这样的脉冲产生高次谐波或 X 射线的产生率是很低的, 大部分能量因为没有达到阈值而不能发挥作用, 而且激发的高次谐波或 X 射线也是不稳定的.

下面, 我们研究一下调整载波-包络相位差对于合成脉冲的影响. 分调整倍频光梳的载波-包络相位差和调整基频光梳的载波-包络相位差两种情况来讨论.

3. 调整倍频光的载波-包络相位差与基频光的合成

根据(2)式, 载波-包络相位差与载波-包络频率

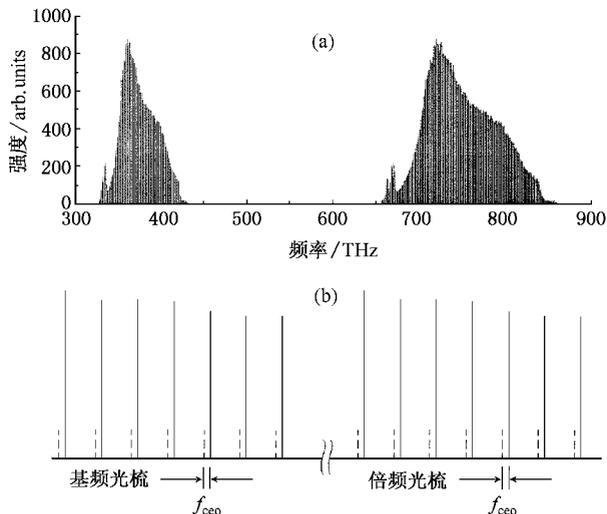


图 4 调整倍频光梳 f_{ceo} 与与基频光梳合成的光梳图 (a)整体, (b)局部细节

差之间有确定的关系. 调整载波-包络相位差反映到频域上就是调整载波-包络频率差, 同样, 调整载波-包络频率差在时域上的反映就是调整载波-包络相位差.

调整倍频光频梳的载波-包络频率差,使倍频光的每一个光梳梳齿补偿一个 f_{ceo} ,则得到的倍频光梳

与基频光梳的梳齿都与以 n 倍重复频率为基准的频率标尺之间偏差 f_{ceo} ,如图 4 所示.

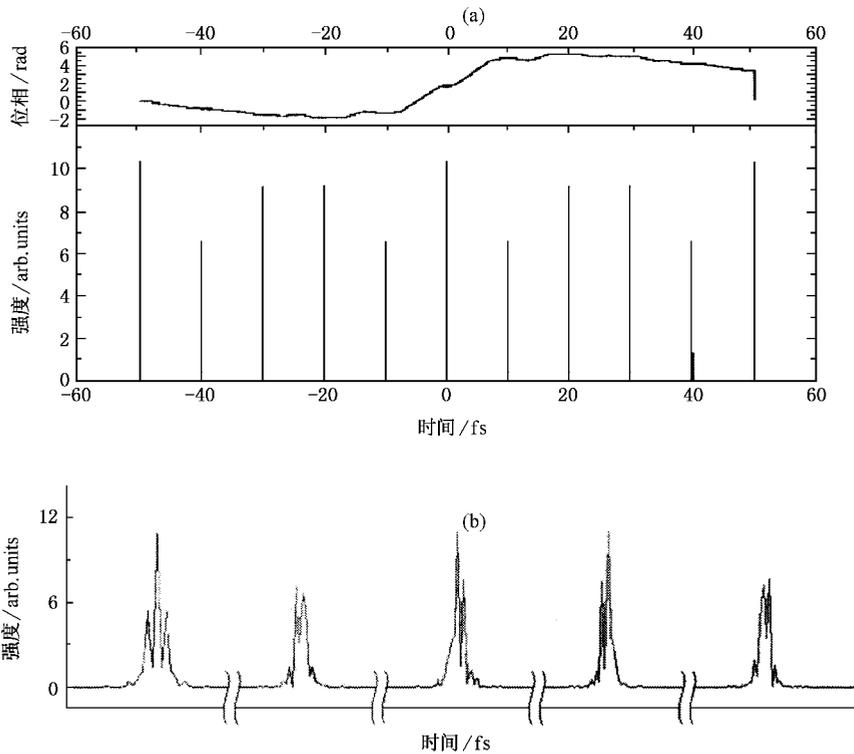


图 5 调整倍频光梳合成光频梳得到的脉冲序列 (a)整体 (b)局部放大的脉冲序列

仍假设合成的光谱相位可以通过空间光调制器完全补偿,则得到的时域脉冲序列如图 5 所示.

图 5 显示,脉冲的时域半高宽仍为 6 fs,且仍然是每 5 发重复一次.但是,脉冲序列的强度波动更为明显.这是因为基频脉冲与倍频脉冲有相同的载波-包络相位,电场振荡同时达到波峰或波谷,但相速度和群速度失配,电场振荡的峰值与脉冲包络的峰值不重合,因而波动更强烈.

4. 调整基频光的载波-包络相位差与倍频光的合成

下面,我们研究调整基频光的载波-包络相位,对于合成脉冲的影响.

根据(3)式可知,如果将基频光的载波-包络相位补偿为零,那么倍频光的载波包络-相位也为零.即基频光和倍频光的光梳梳齿都能与以整数倍重复频率为刻度的标尺重合.这样的合成频梳如图 6 所示.

完全补偿光谱相位后,得到的时域脉冲序列如

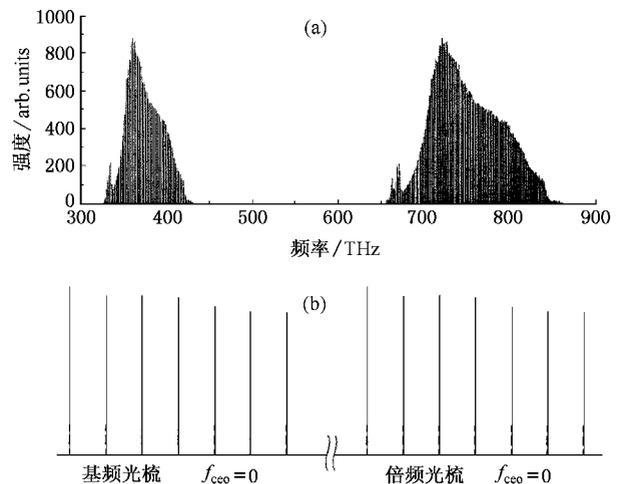


图 6 调整基频光梳 f_{ceo} 与倍频光梳合成的光梳图 (a)整体, (b)局部细节

图 7 所示.

由图 7 可见,调整基频光的载波-包络相位差,可以得到稳定的时域脉冲序列,脉冲序列中的每个脉冲都可以达到包络的极大值.这样的稳定脉冲对

于实际的应用有重大的意义:在高次谐波和 X 射线的产生中有最大的效率,有利于单周期超短脉冲的

产生,有利于更为精密的时间频率计量标准——光频钟的应用。

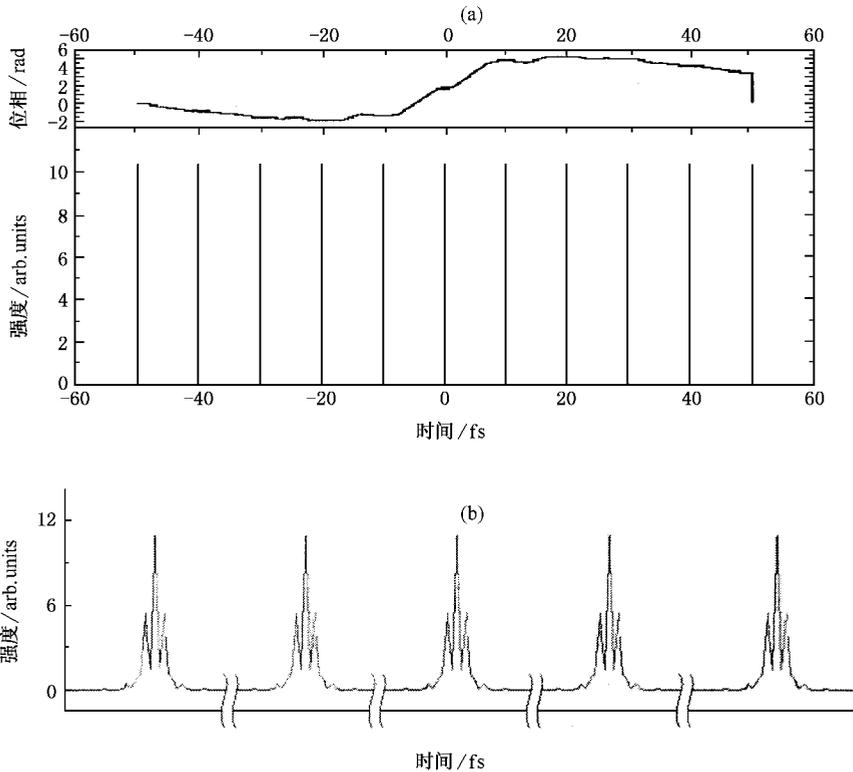


图7 调整基频光梳合成光频梳得到的脉冲序列 (a)整体 (b)局部放大的脉冲序列

5. 结论与讨论

在两束激光的合成问题中,控制两束激光的载波-包络相位对于合成的脉冲有重要的影响.本文从频率梳的角度计算表明,调整倍频光的载波-包络相位差会使合成脉冲的强度有更大的起伏.但此时的基频与倍频脉冲是相位锁定的,这种强度起伏可以补偿,而得到稳定的脉冲.调整基频光的载波-包络相位,直接可以得到稳定的时域脉冲序列,脉冲序列中的每个脉冲都可以达到电场振荡的极大值,这对于脉冲的合成得到稳定的超短脉冲,以及高次谐波、X射线的产生,和新一代的时间频率标准-光频钟的应用有重要的意义.

本文的计算显示,在基频脉冲与其自身的倍频脉冲合成的问题中,不调整倍频光的载波-包络相

位,也可以得到超短的时域脉冲.这是因为,基频光脉冲与其倍频光脉冲都是来自于同一脉冲光源,本身是相位相关的.两个不相关的脉冲的合成问题,则必需调整载波-包络相位,才会得到超短脉冲.

本文只是模拟说明两光脉冲合成问题中调整载波-包络相位对于合成脉冲的影响.实际中两光脉冲的合成,还需要经过交叉相位调制等非线性效应,将两光谱各自展宽,得到连续的超宽光谱,才会得到光滑的脉冲.另外,实际的两光脉冲合成过程中,群速度失配和相位失配是不可避免的,还会产生时间走离和空间走离等效应,而相位也很难完全得到补偿,因而还有很多问题需要考虑和解决.本文的计算,为实际中的脉冲合成问题提供了一定理论上的指导,对于两脉冲合成,尤其是基频光与其自身的倍频光的合成,产生超宽带光谱,继而产生时域的超短脉冲具有一定意义.

- [1] Baltusa A , Uiberacker M , Goulielmakis E *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 972
- [2] Ye J , Schnatz H , Hollberg L W 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1041
- [3] Ivanov E N , Diddams S A , Hollberg L 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1059
- [4] Diddams S A , Bartels A , Ramond T M *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1072
- [5] Ma L S , Zucco M , Picard S *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1066
- [6] Seitz W , Ell R , Morgner U *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1093
- [7] Yoon T H , Park S T , Kim E B 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1025
- [8] Shelton R K , Ma L-S , Kapteyn , H C *et al* 2001 *Science* **293** 1286
- [9] Baltuška A , Fuji T , Kobayashi T 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 133901-1
- [10] Kobayash Y , Wei Z Y , Kakehata M *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1011
- [11] Schibli T R , Kuzucu O , Kim J-W *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 990
- [12] Xiang W H , Chen X W , Tan B *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 137 (in Chinese) [向望华、陈晓伟、谈 斌 等 2004 物理学报 **53** 137]
- [13] Song Z M , Pang D Q , Zhang Z *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2769 (in Chinese) [宋振明、庞冬青、张志刚 等 2005 物理学报 **54** 2769]
- [14] Yamashita M , Sone H , Morita R *et al* 1998 *IEEE Quantum Electron.* **34** 2145
- [15] Wu Z B , Wang Z , Liao C Y *et al* 2005 *Acta Optica Sinica* **25** 216 (in Chinese) [吴祖斌、王 专、廖春艳 等 2005 光学学报 **25** 216]
- [16] Helbing F W , Steinmeyer G , Keller U 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1030
- [17] Fortier T M , Jones D J , Ye J *et al* 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1002
- [18] Cundiff S T 2002 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **35** R43
- [19] Wei H Z , Zhang Z , Chen S H *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1391 (in Chinese) [位恒政、张志刚、陈盛华 等 2004 物理学报 **53** 1391]

Influence of carrier-envelope phase on synthesizing of fundamental and its second-harmonic pulses^{*}

Deng Yu-Qiang^{1)†} Wang Qing-Yue¹⁾ Wu Zu-Bin¹⁾ Zhang Zhi-Gang¹⁾²⁾

¹ *Ultrafast Laser Laboratory , School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science , EMC , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)*

² *Institute of Quantum Electronics , School of Electronics Engineering and Computer Science , Peking University , Beijing 100871 , China)*

(Received 26 November 2004 ; revised manuscript received 1 July 2005)

Abstract

Ultrabroadband spectrum is necessary for generation of ultrafast laser pulses ; however , the extent of broadening the spectrum by its own nonlinear effect , such as self-phase modulation or cross phase modulation etc. , is always limited. An easy way to broaden the spectrum to an octave is synthesizing the spectrum of its second-harmonic and the spectrum of itself. In this paper , influence of carrier-envelope phase on the synthesizing of two laser pulses is studied.

Keywords : ultrashort pulse , carrier-envelope phase , optical frequency comb , synthesized pulse

PACC : 4280W , 4265K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60178007) , and the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60490280) .

[†] Corresponding author. E-mail : yuq Deng @ yahoo . com