

级联差频产生太赫兹辐射的理论研究*

钟凯^{1)2)†} 姚建铨¹⁾²⁾ 徐德刚¹⁾²⁾ 张会云¹⁾³⁾ 王鹏¹⁾²⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 天津 300072)

2) (光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

3) (山东科技大学理学院, 青岛 266510)

(2010年5月26日收到; 2010年6月7日收到修改稿)

针对差频产生太赫兹 (THz) 辐射转换效率低的缺点, 提出了级联差频的新机理以提高转换效率, 并以 ZnTe 晶体为例, 对级联差频产生 THz 辐射的原理和过程进行了理论研究. 通过对级联差频耦合波方程组的求解, 得出了 ZnTe 晶体中级联差频的最佳抽运条件和 ZnTe 晶体的最佳长度, 并且分析了晶体吸收、波矢失配及抽运强度对级联差频的影响. 计算结果表明, 通过级联差频可以大大提高 THz 波的转换效率, 其光子转换效率甚至可以超过 Manley-Rowe 关系的限制.

关键词: 太赫兹辐射, 差频, 级联, ZnTe 晶体

PACS: 42.65.Ky, 07.57.Hm, 42.70.Mp, 61.72.uj

1. 引言

相干、可调谐的太赫兹 (THz) 辐射源在高光谱分辨率的频域光谱分析、成像、检测等场合具有重要的应用价值. 用两束频率相近的可调谐近红外激光在非线性晶体中差频或太赫兹光学参量振荡器 (TPO)^[1-4] 可以满足这方面的需求, 尤其是差频方法具有方案简单灵活、没有阈值、调谐范围宽等优点, 近年来受到各国的研究者的重视^[5-14]. 然而根据差频的基本原理以及已报道的实验结果可以看出, 由近红外激光 ($\sim 1 \mu\text{m}$) 差频产生 THz 辐射 ($\sim 1 \text{ THz}$ 或 $300 \mu\text{m}$) 的转换效率很低, 即便是光子转换效率达到理论极值 100%, 相应的能量转换效率也只有 0.33% (ω_T/ω_1), 在实际实验中转换效率还要远低于此, 这也是差频方法最大的缺点.

从提高差频过程的增益和量子效率来讲, 提高差频转换效率的方法主要有以下几种: 1) 提高抽运光强度; 2) 增加差频晶体的长度; 3) 使用波长较长的中红外激光作为抽运源. 这几种方法的局限性也是显而易见的: 用于差频产生 THz 辐射的晶体通常损伤阈值都比较低, 因此不能无限制地提高抽运强度; 差频晶体对 THz 波段的吸收系数比较大, 单纯

增加晶体长度不一定能提高 THz 的产生效率, 晶体长度过大甚至会降低输出的 THz 能量^[14]; 另一方面, 除了 TEA-CO₂ 激光器以外^[15, 16], 目前高能量、窄线宽的长波中红外激光还很难实现. 为了从实质上提高差频产生 THz 辐射的效率, 本文将探索一种新的差频机理——级联差频.

2. 级联差频的基本原理

根据差频过程的基本原理^[17, 18], 当高频的抽运光 (ω_1) 没有明显耗尽时, 低频的抽运光 (ω_2) 与差频产生的 THz 波 (ω_T) 的强度随着在非线性晶体中相互作用长度的增加而同时迅速增加. 若 ω_2 与 ω_T 相互作用的相位匹配条件也能得到满足, 而且增益又足够高, 则二者可以差频产生一个新的频率 ω_3 ; 同理, ω_3 与 ω_T 满足条件也可以发生差频作用产生新的频率 ω_4 . 若此过程一直延续下去, 会通过级联效应产生频率为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ 的一系列光波, 如图 1 所示. 这些光频率的间隔相同均为 ω_T , 而且在级联差频的过程中 ω_T 的能量始终是增加的. 依据这种原理可以大大提高从光波到 THz 波的差频转换效率.

对于常用于差频产生 THz 辐射的非线性晶体 GaSe, ZGP 等, 由于它们是通过双折射来满足相位

* 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (批准号: 2007CB310403) 和国家自然科学基金 (批准号: 60801017 和 10874128) 资助的课题.

† E-mail: zhongkai1984@gmail.com

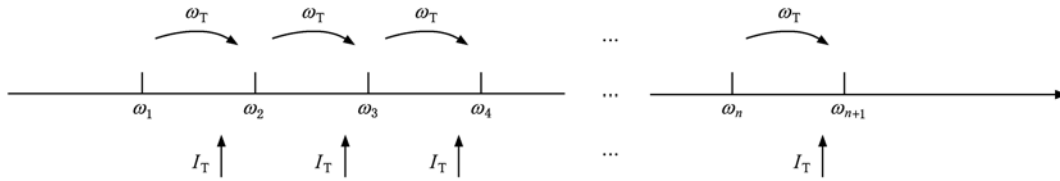


图1 级联差频的示意图

匹配条件的,两束差频抽运光的偏振方向不同,受到偏振条件及允许参量的限制,无法满足级联差频的条件.而对于各向同性的半导体晶体如 ZnTe, GaAs 等以及相应的周期极化晶体,它们都具有很高的非线性系数;具有较高的破坏阈值,有利于采用较强的抽运光来提高级联过程中的增益;而且在采用某些波段的近红外激光差频产生 THz 辐射时,很宽的波长范围内保持很小的相位失配量,可以满足级联差频的条件.下面以剩余射线带色散补偿实现相位匹配的 ZnTe 晶体为例,分析级联差频对 THz 辐射转换效率的提高作用.

3. ZnTe 晶体级联差频产生 THz 辐射的理论分析

3.1. 级联差频的耦合波方程

假设两束注入抽运光频率分别为 ω_n, ω_{n+1} , 差频产生的 THz 波频率为 ω_T . 若级联效应存在,则通过非线性相互作用有可能产生频率分别为 $\dots, \omega_{n-1}, \omega_n, \omega_{n+1}, \omega_{n+2}, \dots$ 的一系列波长,其频率随着下标的增加而减小,相互间隔均为 ω_T . 其中比注入频率低的 $\omega_{n+2}, \omega_{n+3}, \dots$ 和比注入频率高的 $\dots, \omega_{n-2}, \omega_{n-1}$ 可以分别认为是斯托克斯光和反斯托克斯光,在后面的计算过程中将发现斯托克斯光的作用在级联差频中占主导地位.

根据差频三波相互作用耦合波方程组^[17, 18],可以导出级联差频过程的耦合波方程组

$$\frac{dA_T}{dz} = -\frac{\alpha_T}{2}A_T - i\kappa_n \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n A_{n+1}^* e^{-i\Delta k_n z}, \quad (1a)$$

$$\frac{dA_n}{dz} = -\frac{\alpha_n}{2}A_n - i(\kappa_{n-1}A_{n-1}A_T^* e^{-i\Delta k_{n-1}z} + \kappa_n A_{n+1}A_T e^{i\Delta k_n z}), \quad (1b)$$

在这里同时考虑了斯托克斯光和反斯托克斯光在级联差频中的作用.上述方程组中 A_n, A_T 分别表示光波与 THz 波的复振幅, α_n, α_T 分别表示光波与

THz 波在非线性晶体中的吸收系数, Δk_n 为差频相互作用过程的波矢失配, κ 为耦合参量,表达式分别为

$$\Delta k_n = k_n - k_{n-1} - k_T, \quad (2)$$

$$\kappa_n = \omega_n d / cn_n,$$

以 ZnTe 晶体为例,其非线性光学系数 d 约为 100 pm/V,光在真空中的速度 $c = 3 \times 10^8$ m/s. (1a)式等号右边第二项表示级联过程中任意频率相邻的两束抽运光 ω_n 和 ω_{n+1} 差频产生的 THz 波相加即为总的 THz 波场强;(1b)式中括号内第一项表示 ω_{n-1} 与 ω_T 作用对 ω_n 的强度起增强作用,第二项表示 ω_n 与 ω_{n+1} 作用产生 ω_T 对 ω_n 的强度是消耗减弱的过程.

我们引入 $E_n = A_n \exp(i\varphi_n), E_T = A_T \exp(i\varphi_T)$, 其中 E_n, E_T 表示抽运光和 THz 波的标量振幅,将其代入耦合波方程组(1a)和(1b).在差频过程中保持相对相位角 $\Phi_n = \varphi_n - \varphi_{n+1} - \varphi_T = \pi/2$,耦合波方程组可以化简为

$$\frac{dE_T}{dz} = -\frac{\alpha}{2}E_T + \kappa_n \sum_{n=-\infty}^{+\infty} E_n E_{n+1} \cos(\Delta k_n), \quad (3a)$$

$$\frac{dE_n}{dz} = -\frac{\alpha}{2}E_n + \kappa_{n-1}E_{n-1}E_T \cos(\Delta k_{n-1}) - \kappa_n E_{n+1}E_T \cos(\Delta k_n). \quad (3b)$$

只有当在注入光频率附近的较宽范围内波矢失配 Δk_n 很小时,才会发生明显的级联差频效应,否则随着级联级数的增加,斯托克斯光或反斯托克斯光的强度会随着波矢失配的增大而迅速减小,对 THz 波的贡献度也大大降低.为实现最佳差频效果,我们需要对 ZnTe 晶体级联差频的最佳参数进行计算.

3.2. 级联差频的近似计算方法

根据 ZnTe 晶体在光学波段和 THz 波段的 Sellmeier 方程^[19],可以计算出当抽运光频率(若无特殊说明,本文中抽运光均代表频率较高的一束)在 362 THz 附近、差频产生的 THz 辐射频率为 1 THz(300 μ m)时,波矢失配量接近于 0,如图 2 所示.如果级联效应存在,这时前后几阶级联差频的

波矢失配量都很小,相干长度大于 1 cm,满足高效率非线性光学频率变换的相位匹配条件.

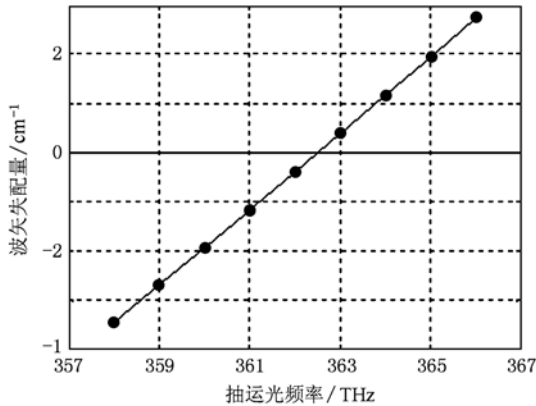


图2 ZnTe 晶体差频产生 1THz 时的波矢失配

在计算中我们设定每束注入抽运光的强度均为 50 MW/mm^2 (总抽运功率小于文献报道的破坏阈值 1 GW/mm^2 [20]), 抽运光和 THz 波在 ZnTe 晶体中的吸收系数分别为 3 cm^{-1} 和 6 cm^{-1} . 首先不考虑级联效应, 假设两束抽运光频率分别为 362 THz 和 363 THz, 根据耦合波方程组 (3a) 和 (3b) 式可以计算出差频产生的 THz 波强度随抽运光在 ZnTe 晶体中相互作用长度的变化关系, 如图 3 所示. 当晶体长度为 0.87 mm 时产生的 THz 波的强度达到最大值, 此后 THz 辐射开始向抽运光转化, 并在 3.02 mm 处又达到峰值, 但由于晶体对 THz 波及抽运光的吸收, 第二个峰值弱于第一个.

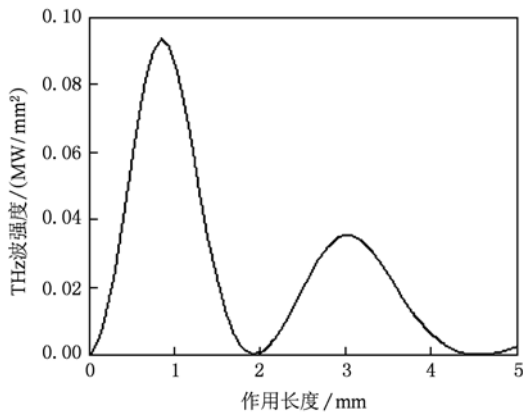


图3 不考虑级联效应时差频产生 THz 波的强度随相互作用的变化

在级联差频中,需同时考虑波矢失配以及非线性晶体对抽运光和 THz 波的吸收对差频过程的影响. 由于斯托克斯光及反斯托克斯光的强度均随着

其阶数的增加而减小,所以对产生 THz 波的贡献也就越低. 虽然计算中考虑的阶数越多越准确,但在实际计算中我们只能取有限的阶数. 以注入抽运光波长为 362/363 THz、抽运光强度为 50 MW/mm^2 为例,只考虑斯托克斯光的作用,分别假设级联差频过程包含两束抽运光在内总共有 5, 10, 15, 20 个波长相互作用,四种近似情况下产生的 THz 波强度如图 4 所示. 从图中可以看出,斯托克斯光的阶数大于 15 时,产生的 THz 波最高强度基本不再发生变化,也就是说,只考虑 15 个级联波长就可以很好的近似整个级联过程.

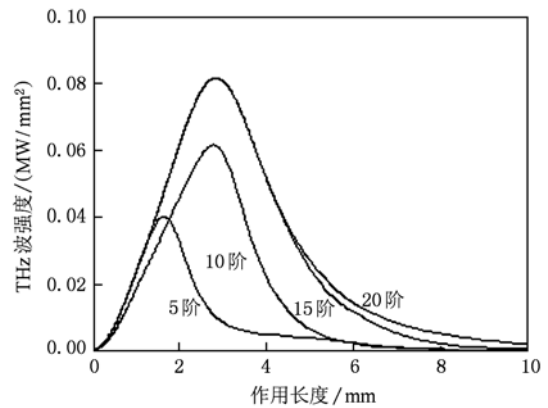


图4 分别考虑 5, 10, 15, 20 阶级联近似时产生的 THz 波的强度变化

为准确起见,计算中我们采用 20 阶级联波长进行近似,两束注入抽运光的强度均为 50 MW/mm^2 不变. 假设级联过程中存在的 20 个波长为 350—369 THz, 间隔均为 1 THz. 改变注入抽运光的波长从 351 THz 到 369 THz, 产生的 THz 强度最大值及其最佳作用长度随抽运光频率的变化如图 5 所示.

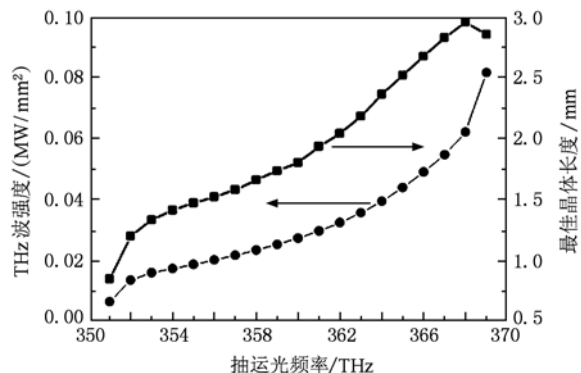


图5 THz 波强度的最大值及其最佳作用长度随抽运光频率的变化

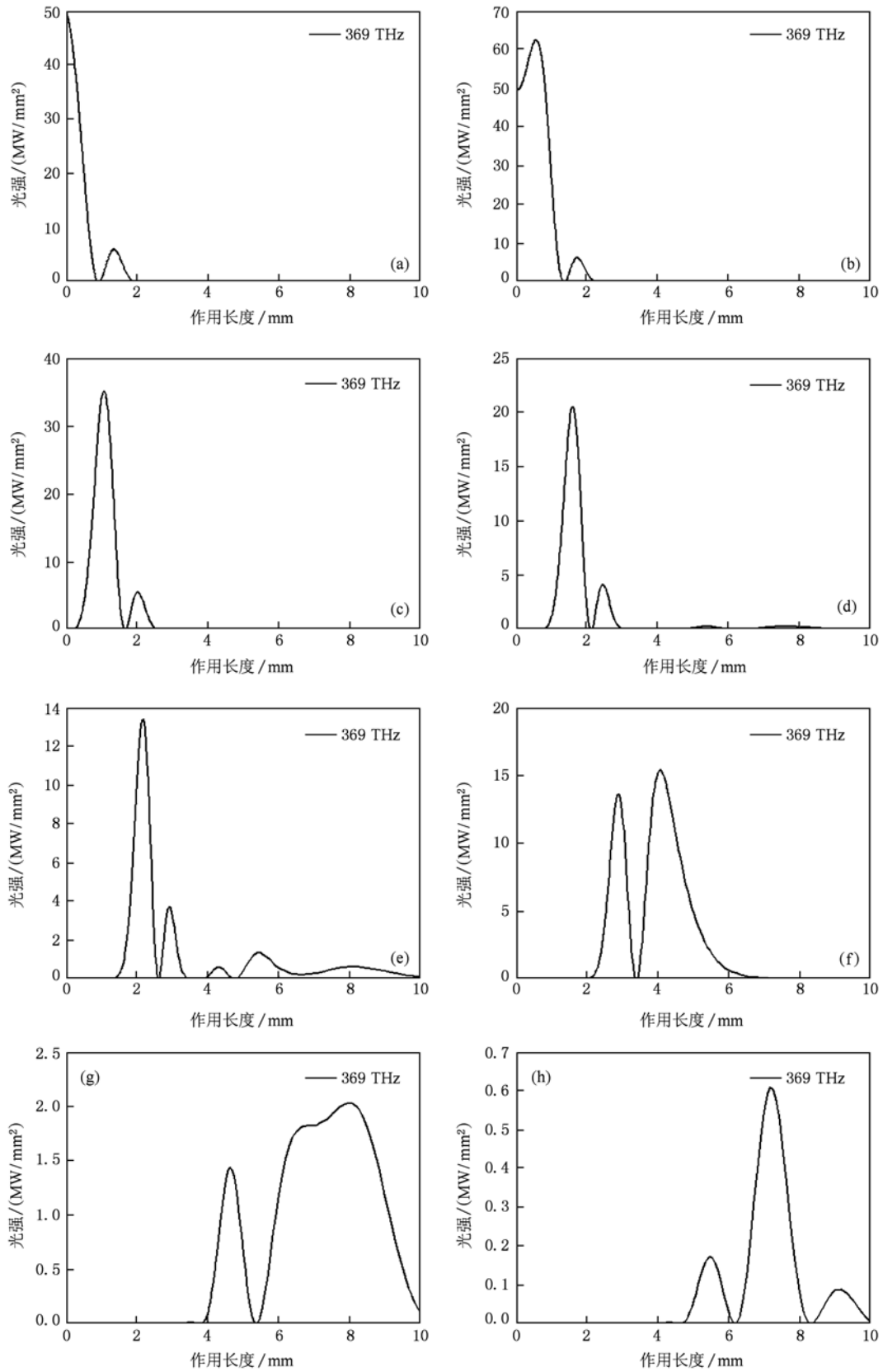


图 6 抽运光及各阶斯托克斯光的强度随相互作用长度的变化 (a)369 THz; (b)368 THz; (c)367 THz; (d)365 THz; (e)362 THz; (f)358 THz; (g)354 THz; (h)350 THz

由图 5 可以看出,如果级联过程可能存在的波长为 350—369 THz (相应的抽运光波长可能为 351—369 THz),当两束抽运光的波长分别取为 369 THz 和 368 THz 时产生的 THz 强度最大.也就是说,级联差频过程中斯托克斯光对 THz 波的产生起主要作用.在此过程中各级抽运光、斯托克斯光的光强及产生的 THz 波强度的变化分别如图 6 和图 7 所示.随着级联差频产生的一系列光波与抽运光的频率差越来越大,它们的最强峰的强度和出现的位置基本呈逐渐减弱和依次向后延迟的规律.当差频晶体 ZnTe 的长度为 2.85 mm 时 THz 波的强度达到最高值.

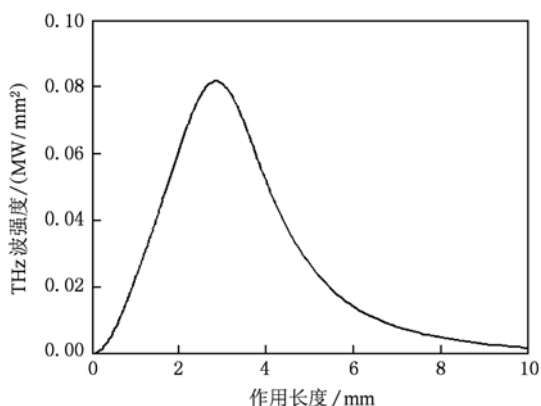


图 7 级联差频产生 THz 波的强度随相互作用长度的变化

3.3. 最佳抽运频率的计算

得出了上面的结论,我们在此后的计算中只考虑斯托克斯光的作用.当抽运光的频率从 320 THz 到 400 THz 变化时,我们可以获得差频产生 THz 波的最大强度及非线性晶体的最佳长度随抽运光频率的变化关系,如图 8 所示.

图 8 中比较了存在与不存在级联效应两种情况时的计算结果.显然级联差频产生的 THz 强度相比无级联效应时有了很大提高,尤其是在波矢失配为零的频段附近,相应差频晶体的最佳长度也有明显的增加.不考虑级联效应时,差频产生的 THz 波强度最高为 0.0939 MW/mm²,此时相应的两束注入抽运光频率分别为 360 THz 和 359 THz,差频晶体的长度为 0.87 mm;而级联差频时产生的 THz 强度最高可达 0.815 MW/mm²,对应的两束注入抽运光频率分别为 369 THz 和 368 THz,差频晶体的最佳长度为 2.85 mm.级联差频使得 THz 波的输出强度提高了 7.7 倍;从差频效率来说,级联差频的总能量转换效率

率最高可达 0.815%,光子转换效率超过 600%,远远突破了 Manley-Rowe 条件的限制.

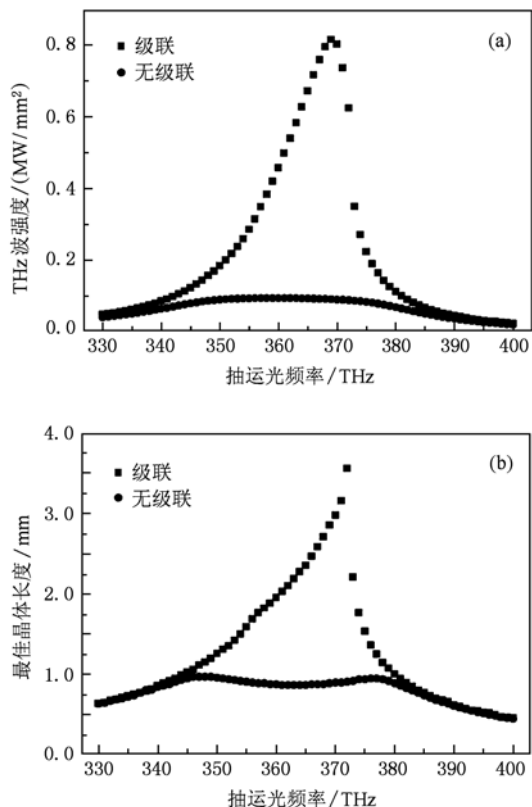


图 8 差频产生 THz 波的最高强度(a)与相应最佳晶体长度(b)随抽运光频率的变化关系

3.4. 晶体吸收及波矢失配的影响

前面的计算过程中均计入了波矢失配及晶体吸收两种因素,它们对级联差频过程的影响可以由图 9 表示.当吸收和波矢失配均被忽略时,差频产生的 THz 波强度随在晶体中传播距离增大呈指数迅速增加,在差频晶体小于 2 mm 时就可以达到很高

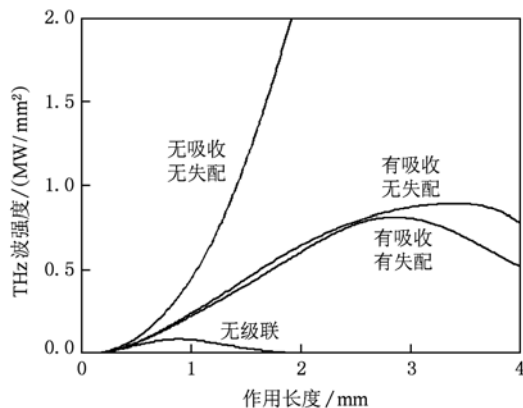


图 9 晶体的吸收及波矢失配对级联差频的影响

的数值. 考虑 ZnTe 晶体吸收的影响, 在波矢失配存在和不存在的两种情况下, THz 波的最高强度相差不多, 分别为 0.815 MW/mm^2 和 0.893 MW/mm^2 . 也就是说相对于波矢失配, 抽运光和 THz 波的吸收损耗对差频效率的影响要大得多.

3.5. 抽运光强度的影响

改变抽运光的强度从 1 MW/mm^2 到 100 MW/mm^2 , 在考虑波矢失配和吸收损耗的影响下产生的 THz 波最高强度及差频晶体的最佳长度的变化如图 10 所示. 随着抽运强度的增加, 差频产生的 THz 波强度呈指数增长, 在抽运强度为 100 MW/mm^2 时产生的 THz 波强度可以达到 2.7 MW/mm^2 ; 差频晶体的最佳长度先增大后减小, 在抽运强度为 23 MW/mm^2 时达到最大值 4.18 mm .

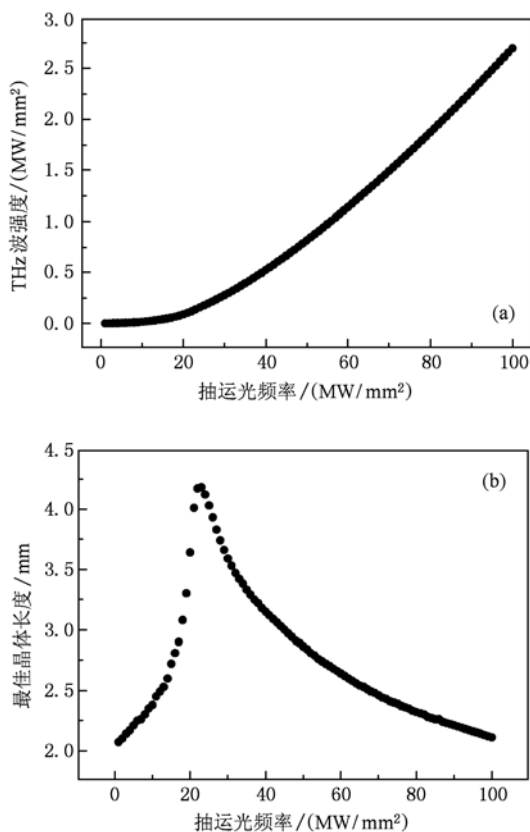


图 10 级联差频产生的最高 THz 强度 (a) 与相应最佳晶体长度 (b) 随抽运强度的变化关系

4. 周期反转 GaAs 晶体级联差频产生 THz 辐射

GaAs 晶体具有很高的非线性系数, 而且在近红

外和太赫兹波段的吸收系数也比较低, 是一种非常理想的用于产生 THz 辐射的非线性晶体. 但由于 GaAs 是中心对称晶体, 无法利用双折射来实现相位匹配. 已报道的利用 GaAs 差频产生 THz 波的方案一般采用非共线的相位匹配方式^[15, 16]. 由于 GaAs 晶体易于生长和加工, 目前已有包括 Fejer 课题组在内的多个研究单位利用扩散键合 (DB-GaAs)、分子束外延定向生长 (OP-GaAs) 和光学胶合 (OC-GaAs) 等技术制作出了高质量的周期反转 GaAs 晶体, 并对这类晶体通过准相位匹配方式的非线性频率变换产生 THz 波的技术进行了深入研究^[21-24], 利用差频已经实现了平均功率达 1 mW 的 THz 波输出^[24]. 在周期反转的 GaAs 晶体内也可以通过准相位匹配的级联差频实现高效率 THz 波的产生.

为减小 GaAs 晶体对抽运光的吸收, 采用 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 附近的双波长激光作为抽运光, 假设两束注入抽运光的频率分别为 143 THz ($2.098 \text{ }\mu\text{m}$) 和 142 THz ($2.113 \text{ }\mu\text{m}$), 当差频产生的 THz 波频率为 1 THz (波长 $300 \text{ }\mu\text{m}$) 时准相位匹配的波矢失配量表示为

$$\Delta k_Q = k_1 - k_2 - k_T - \frac{2\pi m}{\Lambda}, \quad (4)$$

其中 m 为准相位匹配的阶数, Λ 为晶体的反转周期. 参考 Skauli 等给出的 GaAs 晶体的色散方程^[25], 可以计算出实现一阶准相位匹配时反转周期 Λ 的值约为 1.79 mm . 以反转周期为 1.79 mm 的 GaAs 晶体差频产生 1 THz 为例, 在相位匹配点附近波矢失配量随抽运光频率的变化关系如图 11 所示.

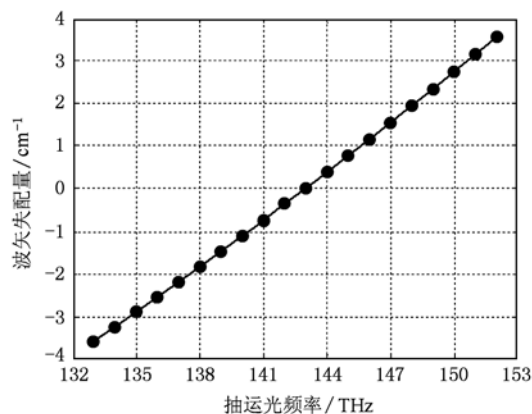


图 11 周期反转的 GaAs 晶体中波矢失配量随抽运光频率的变化关系

由图 11 可以看出, 当抽运频率在 $134-151 \text{ THz}$ 之间时, 波矢失配量很小, 相干长度大于 1 cm , 符合级联差频的条件. 级联差频的过程与前面所述的

ZnTe 类似,这里不再做具体的分析. Fejer 课题组曾经报道了利用 DB-GaAs 晶体在皮秒 PPLN OPO 谐振腔内差频,观察到了级联斯托克斯光的产生^[26, 27],但由于仅仅产生了两阶斯托克斯光,而且它们的相对强度也不高,因此实验中级联过程对差频转换效率的提高作用并不明显.

5. 结 论

本文通过求解耦合波方程组,对 ZnTe 晶体中级联差频产生 THz 波的过程进行了理论分析. 根据我

们的计算结果,当两束抽运光的频率分别为 369 THz 和 368 THz,强度均为 50 MW/mm²,差频晶体 ZnTe 的长度为 2.85 mm 时,可以实现 0.815 MW/mm² 的 THz 波输出,从抽运光的总能量到 THz 波能量的转换效率为 0.815%,光子转换效率超过 600%,远远突破了 Manley-Rowe 条件的限制. 考虑到级联差频需要峰值功率很高的抽运光,高能量、窄脉冲宽度的皮秒激光是比较理想的选择,但短脉冲激光存在一定的群速度色散,在实际应用中需要加以考虑.

- [1] Shikata J, Kawasa K, Karino K, Taniuchi T, Ito H 2000 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **48** 653
- [2] Sun B, Liu J S, Ling F R, Wang K J, Zhu D Q, Yao J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1745 (in Chinese) [孙博、刘劲松、凌福日、王可嘉、朱大庆、姚建铨 2009 物理学报 **58** 1745]
- [3] Sun B, Liu J S, Li E B, Yao J Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2846
- [4] Li Z Y, Yao J Q, Li J, Bing P B, Xu D G, Wang P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6237 (in Chinese) [李忠洋、姚建铨、李俊、邴丕彬、徐德刚、王鹏 2010 物理学报 **59** 6237]
- [5] Kawase K, Mizuno M, Sohma, Takahashi H, Taniuchi T, Urata Y, Wada S, Tashiro H, Ito H 1999 *Opt. Lett.* **24** 1065
- [6] Kawase K, Hatanaka T, Takahashi H, Nakamura K, Taniuchi T, Ito H 2000 *Opt. Lett.* **25** 1714
- [7] Shi W, Ding Y J, Fernelius N, Vodopyanov K 2002 *Opt. Lett.* **27** 1454
- [8] Shi W, Ding Y J 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 848
- [9] Sun B, Yao J Q, Wang Z, Wang P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1390 (in Chinese) [孙博、姚建铨、王卓、王鹏 2007 物理学报 **56** 1390]
- [10] Liu H, Xu D G, Yao J Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5662 (in Chinese) [刘欢、徐德刚、姚建铨 2008 物理学报 **57** 5662]
- [11] Huang N, Li X F, Liu H J, Xia C P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8326 (in Chinese) [黄楠、李雪峰、刘红军、夏彩鹏 2009 物理学报 **58** 8326]
- [12] Liu H, Xu D G, Yao J Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1077
- [13] Wang Z, Wang Y Y, Yao J Q, Wang P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3249 (in Chinese) [王卓、王与焱、姚建铨、王鹏 2010 物理学报 **59** 3249]
- [14] Zhong K, Yao J Q, Xu D G, Wang Z, Li Z Y, Zhang H Y, Wang P 2010 *Opt. Commun.* **283** 3520
- [15] Tochitsky S Ya, Ralph J E, Sung C, Joshi 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 026101
- [16] Tochitsky S Ya, Sung C, Trubnick S E, Joshi C, Vodopyanov K L 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 2509
- [17] Ji J R, Feng Y 2008 *Advanced Optics Textbook* (Beijing: Science Press) p60 (in Chinese) [家镕、冯莹 2008 高等光学教程 (北京: 科学出版社) 第 60 页]
- [18] Qian S X, Wang G M 2001 *Nonlinear Optics* (Shanghai: Fudan University Press) p87 (in Chinese) [钱士雄、王恭明 2001 非线性光学 (上海: 复旦大学出版社) 第 87 页]
- [19] Cronin-Golomb M 2004 *Opt. Lett.* **29** 2046
- [20] Yuan T, Xu J Z, Zhang X C 2004 *Infrared Phys. Techn.* **45** 417
- [21] Vodopyanov K L, Fejer M M, Yu X, Harris J S, Lee Y S, Hurlbut W C, Kozlov V G, Bliss D, Lynch C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 141119
- [22] Lee Y S, Hurlbut W C, Vodopyanov K L, Fejer M M, Kozlov V G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 181104
- [23] Trubnick S E, Tochitsky S Ya, Joshi C 2009 *Opt. Express* **17** 2385
- [24] Schaar J E, Vodopyanov K L, Fejer M M 2007 *Opt. Lett.* **32** 1284
- [25] Skauli T, Kuo P S, Vodopyanov K L, Pinguet T J, Levi O, Eyres L A, Harris J S, Fejer M M, Gerard B, Becouarn L, Lallier E 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 6447
- [26] Vodopyanov K L 2008 *Laser Photon. Rev.* **2** 11
- [27] Schaar J E, Vodopyanov K L, Kuo P S, Fejer M M, Yu X, Lin A, Harris J S, Bliss D, Lynch C, Kozlov V, Hurlbut W 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 354

Theoretical research on cascaded difference frequency generation of terahertz radiation *

Zhong Kai^{1)2)†} Yao Jian-Quan¹⁾²⁾ Xu De-Gang¹⁾²⁾ Zhang Hui-Yun¹⁾³⁾ Wang Peng¹⁾²⁾

1) (*Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

3) (*College of Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China*)

(Received 26 May 2010; revised manuscript received 7 June 2010)

Abstract

A novel mechanism of cascaded difference frequency generation (DFG) is advanced in this article to solve the problem of low-efficiency in terahertz (THz) DFG. The cascaded DFG process is theoretically analyzed using ZnTe crystal as an example. The optimal pumping condition and crystal length is obtained, and the effects of crystal absorption, wave number mis-match and pumping intensity are investigated by solving the coupling wave equations of cascaded DFG. It is obviously seen from the calculation results that the terahertz conversion efficiency can be greatly enhanced in cascaded DFG, in which the photon conversion efficiency can even break through the Manley-Rowe limit.

Keywords: terahertz radiation, difference frequency generation, cascaded, ZnTe crystal

PACS: 42.65.Ky, 07.57.Hm, 42.70.Mp, 61.72.uj

* Project supported by the National Basic Research Program of China (973) (Grant No. 2007CB310403) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60801017 and 10874128).

† E-mail: zhongkai1984@gmail.com