

太赫兹波在砷化镓波导中的产生与传输

吴斌^{1,2}, 刘志明^{1,2}, 王恒飞², 应承平², 王俊龙³, 刘红元², 李国超², 王洪超²

- (1. 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555;
2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555;
3. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 为提高太赫兹(THz)波的产生效率,研究了飞秒激光与 GaAs 晶体的相互作用。首先研究了块状 GaAs 晶体中泵浦光与 THz 波间的相位匹配,结果显示泵浦光的群折射率曲线与 THz 波的折射率曲线不存在交点,表明了块状晶体结构中相位失配问题的存在;然后设计了四种不同尺寸的波导结构,根据波导理论计算了波导结构在 0.1~6 THz 波段的折射率,并结合波导的吸收和色散参数分析了 THz 波在晶体中的最佳传输距离。研究表明,GaAs 波导结构能够有效增大泵浦光与 THz 波的相位匹配程度,从而提高飞秒激光与晶体耦合过程中 THz 波的产生效率。研究为基于飞秒激光与 GaAs 晶体相互作用的高效 THz 产生技术提供了理论依据。

关键词: 相位匹配; GaAs 波导; THz 产生

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-3903-04

Terahertz generation and transmission in GaAs waveguide structure

Wu Bin^{1,2}, Liu Zhiming^{1,2}, Wang Hengfei², Ying Chengping², Wang Junlong³, Liu Hongyuan²,
Li Guochao², Wang Hongchao²

- (1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China;
2. The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China;
3. The 13th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: To enhance the generation efficiency of THz wave, the interaction between femto-second laser pulse and GaAs crystal was studied. Firstly, the phase matching in bulk GaAs crystal between femto-second laser pulse and the generated terahertz wave was studied, and the result showed there was no intersection point between the refractive curve of pump laser and that of the THz wave, which indicated phase matching could not be achieved in this structure. Four waveguide structures then were proposed, and the refractive index curves in 0.1~6 THz were calculated based on related theory of waveguide, and the transmission length of the THz wave in the waveguide was also analyzed via the parameters of absorbance and dispersion. The results illustrate the phase matching is enhanced in the waveguide structures, and the generation efficiency of THz wave is supposed to get a promotion. The work serves the theory evidence for terahertz generation based on the interaction between femto-second laser and GaAs crystal.

Key words: phase matching; GaAs waveguide; terahertz generation

收稿日期: 2014-04-05; 修订日期: 2014-05-15

基金项目: 电子测试技术重点实验室基金项目(9140C12120C1202)

作者简介: 吴斌(1984-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事焦平面阵列探测器测试校准技术、太赫兹测试校准技术方面的研究。

Email: wubinw@126.com

0 引言

砷化镓(GaAs)属 III-V 族化合物半导体,是一种重要的半导体材料。GaAs 材料有较高的非线性系数,可在高温高频下工作,还具有大的电子迁移率和禁带宽度,适于制造 THz 产生器件,在 THz 科学技术领域是一种很有发展前途的半导体材料。目前在 THz 波产生方面,GaAs 常被用于光电导天线的研制,利用飞秒激光辐照产生的载流子的移动产生 THz 辐射^[1]。

GaAs 材料还可基于光整流原理产生 THz 辐射。光整流是一种产生宽频谱范围 THz 辐射的有效方法,其机理在本质上是一个差频过程^[2]:当一个超快光脉冲入射到 GaAs 晶体中时,入射光脉冲中的两种不同频率成份同时作用在晶体上导致晶体产生非线性极化,并以拍频形式产生出 THz 辐射,THz 辐射的强度与极化强度的二阶时间导数成正比^[3-4]。

相对于光电导天线产生 THz 辐射,光整流方法可以产生更短的电脉冲,因此,用光整流方法产生的 THz 辐射具有较高的时间分辨率和更宽的频谱宽度^[1],在分子动力学、宽光谱范围物质特性分析等方面具有独特应用优势。但由于光整流过程中往往存在严重的相位失配,制约了能量从泵浦光向 THz 波的转化,因此,基于光整流方法产生的 THz 波能量往往比较低,这很大程度上限制了此方法的应用。采用波前倾斜技术^[5]和对晶体的周期极化^[6-7]可在一定程度上克服光整流过程中的相位失配,从而提高光整流过程中 THz 波的产生效率。

波导结构也是一种可有效改善晶体中泵浦光与 THz 波间的相位匹配,文中通过设计波导结构研究 GaAs 的光整流效应以及 GaAs 波导结构对相位匹配效应的改善作用。

1 光整流过程中的相位匹配

光整流过程可以解释为入射脉冲的不同频率成分进行非线性差频的过程。飞秒激光脉冲具有很宽的频谱范围,在二阶非线性过程中,不同频率的光通过差频作用产生低频的电磁波,这就是 THz 辐射。在经过长度为 L 的非线性晶体后,产生的 THz 波的强度可表示为:

$$I_{\text{THz}} \propto \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) \quad (1)$$

当相位匹配条件得到满足,即 $\Delta k=0$ 时, I_{THz} 达到最大值,一般情况下,由于介质本身存在着色散, $\Delta k \neq 0$,即相位失配作用。

光整流过程中,相位失配量可表示为:

$$\Delta k = k(\omega_{\text{opt}} + \omega_{\text{THz}}) - k(\omega_{\text{opt}}) - k(\omega_{\text{THz}}) \quad (2)$$

式中: ω_{opt} 和 ω_{THz} 分别为入射飞秒脉冲和 THz 波的频率。

若 $\Delta k=0$,即相位匹配时,将上式进行泰勒展开:

$$\Delta k = k(\omega_{\text{opt}}) + \omega_{\text{THz}} \frac{\partial k}{\partial \omega} \Big|_{\omega=\omega_{\text{opt}}} - k(\omega_{\text{opt}}) - k(\omega_{\text{THz}}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{k(\omega_{\text{THz}})}{\omega_{\text{THz}}} = \frac{\partial k}{\partial \omega} \Big|_{\omega=\omega_{\text{opt}}} \quad (4)$$

$$v_{g,0} = v_{ph,THz} \quad (5)$$

以上关系表明:当 THz 波的相速度和光波的群速度相等时,或者说对 THz 波的折射率和光波的群折射率相等时,可以实现相位匹配。当相位匹配条件得不到满足时,光整流过程只发生在一定长度范围内,之后 THz 波和激发光脉冲随着传输长度的增加会发生走离。只有满足相位匹配条件时才能提高泵浦光向 THz 波的转换效率。

2 块状晶体结构与波导结构中的相位匹配

文中分析表明,GaAs 晶体在 THz 波段折射率与光波段折射率之差决定了相位匹配的程度,光整流过程的相位匹配条件是 THz 波段的折射率等于光脉冲的群折射率。下面围绕折射率参数分别研究块状晶体和波导结构中的相位匹配情况。

2.1 块状 GaAs 晶体中的相位匹配

由 Sellmeier 方程,GaAs 晶体在光波段的折射率为^[8]:

$$n_{\text{opt,phase}} = \sqrt{8.95 + 2.054 \times \frac{\lambda_{\text{opt}}^2}{\lambda_{\text{opt}}^2 - 0.39}} \quad (6)$$

式中: λ_{opt} 为飞秒光脉冲的中心波长。

飞秒激光脉冲在晶体中的群折射率的值可根据晶体的色散特性表示如下:

$$n_{\text{opt,group}} = n_{\text{opt,phase}} - \lambda_{\text{opt}} \frac{dn_{\text{opt,phase}}}{d\lambda_{\text{opt}}} \Big|_{\lambda_{\text{opt}}} \quad (7)$$

GaAs 晶体的 $n_{\text{opt,group}}$ 为:

$$n_{\text{opt,group}} = n_{\text{opt,phase}} + \lambda_{\text{opt}} \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{11.004 \lambda_{\text{opt}}^2 - 0.49}{\lambda_{\text{opt}}^2 - 0.39} \right) - \frac{1}{2} \cdot \right]$$

$$\left. \frac{1.602\lambda_{opt}}{2} \right] (\lambda_{opt} - 0.39)^2 \quad (8)$$

以中心波长为 1 550 nm 的飞秒激光器作为泵浦源, 飞秒脉冲在晶体中的群折射率可由上式计算为 3.517。

GaAs 晶体在 THz 波段的折射率可根据晶格振动动力学理论进行计算: 在 THz 波段, 晶体的复介电常数 $\epsilon = n - ik$ 可由洛伦兹模型表达为^[9]:

$$(n - ik)^2 = \epsilon_\infty \left[1 + \frac{\omega_L^2 - \omega_T^2}{\omega_T^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \right] \quad (9)$$

式中: ϵ_∞ 为晶体的高频介电常数; ω_L, ω_T 分别为晶体晶格振动的横模和纵模频率; ω 为 THz 波的频率; γ 为阻尼系数。对于 GaAs 晶体, $\epsilon_\infty = 11.0, \omega_T = 268.7 \text{ cm}^{-1}, \omega_L = 292.1 \text{ cm}^{-1}, \gamma = 2.4 \text{ cm}^{-1}$ 。由上式可计算得到 GaAs 晶体在 0.1~6 THz 波段的折射率 n_{THz} , 如图 1 中实线所示。

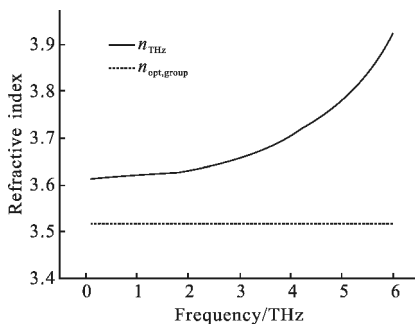


图 1 块状 GaAs 晶体在 THz 波段的折射率曲线与在光波段的群折射率

Fig.1 Refractive index curve of bulk GaAs crystal in terahertz region and group refractive index curve in optical region

由图 1 可见, 块状 GaAs 晶体在光波段的群折射率与在 THz 波段的折射率曲线不相交, 说明用波长位于 1 550 nm 的飞秒激光泵浦块状 GaAs 晶体时泵浦光与晶体中产生的 THz 波间存在较严重的相位失配, 导致光整流过程中 THz 波产生效率低下。

2.2 波导结构中的相位匹配

光学整流产生 THz 波所选用的晶体发射器厚度受限于非线性相干长度, 对于确定的材料和泵浦光参数, 这个长度是固定的, 但是通过将块状材料改变为波导结构, 就有可能改变其折射率特性, 与泵浦光更加有效地匹配, 以实现通过增加非线性作用距离提高输出功率的目的。

对于宽为 a 、高为 b 的矩形 GaAs 波导(图 2), 考虑到电磁波在离开波导的区域内衰减很快, 另外波导中 THz 波基模的能量占到总能量的 95% 以上, 因此仅对波导内的基模电磁场进行求解。

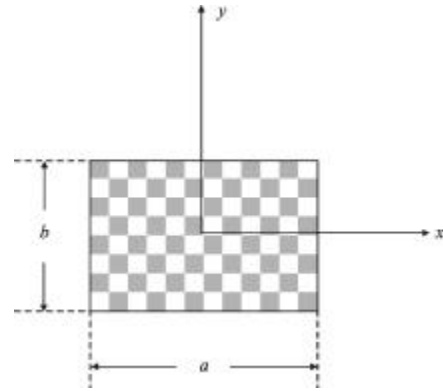


图 2 波导结构示意图

Fig.2 Scheme of waveguide structure

根据波动理论和相关边界条件可求得波导区域内基模的传输常数:

$$\beta = \frac{\omega}{c} n_{\text{THz,WG}} \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} n_{\text{THz}}^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{b}\right)^2} \quad (10)$$

进而可求出波导中基模的有效折射率:

$$n_{\text{THz,WG}} = \frac{c}{\Omega} \sqrt{\left(\frac{\Omega}{c} n_{\text{THz}}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{b}\right)^2} \quad (11)$$

对于横截面尺寸分别为 0.3 mm×0.2 mm、0.4 mm×0.3 mm、0.6 mm×0.4 mm、1.0 mm×0.8 mm 的波导结构而言, 按照公式(11)计算得到了它们的折射率曲线; 对于波长为 1 550 nm 的泵浦光, 波导结构对其群折射率并不构成影响, 把波导结构在太赫兹波段的折射率曲线与泵浦光的群折射率曲线一同示于图 3 中。

由图 3 可见, 相对于图 1 中 GaAs 块状晶体在 THz 波段的折射率曲线, GaAs 波导结构在 THz 波段的折射率曲线发生了明显变化, 块状晶体中存在相位失配问题, 泵浦光的群折射率曲线和 THz 波的折射率曲线并不存在交点, 而波导结构的引入改变了 THz 波的折射率曲线, 使其与泵浦光的群折射率曲线能够相交, 从而实现了相位匹配, 限制 THz 波与泵浦光的空间分离, 可大大提高泵浦光向 THz 波的转化效率, 并最终增大 THz 波的输出功率。

此外, 从图 3 还可以看出, 随着波导横截面积的增加, 波导在 THz 波段的折射率曲线与泵浦光的折

射率曲线的交点向高频方向移动。由于交点处满足最佳相位匹配条件,因此,交点处频率处可达到最佳的转换效率。利用这个特性通过改变波导尺寸可有效调谐波导中输出的 THz 波频率。

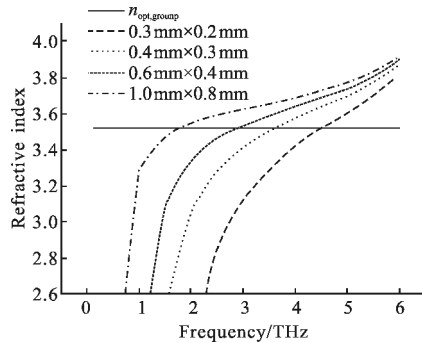


图 3 不同尺寸波导结构在 THz 波段的折射率曲线与在 1550 nm 波长的群折射率

Fig.3 Refractive index of GaAs waveguides of different sizes in THz and group refractive index curve of optical pulse centered at 1550 nm

2.3 THz 波在波导中的传输

依据 THz 波产生理论,输出的 THz 波的功率应该一直随着在波导中传输距离的增加而增大,但事实上,当传输距离达到一定阈值时,材料对 THz 波的损耗将大于 THz 信号的产生,这就制约了 THz 功率的继续增大。材料损耗对传输距离的限制主要包括两个方面:一方面是波导材料对 THz 波的线性吸收;另一方面是飞秒光脉冲在晶体中的群速度色散效应,这种色散效应会导致飞秒光脉冲在时域上发生展宽,这就降低了泵浦光的峰值功率,并从而使转换效率降低。波导材料对 THz 波的线性吸收作用和泵浦光的群速度色散效应都是随着传输距离的增加而线性增大的,当传输距离超过吸收长度 $L_{\alpha}=1/\alpha$, (α 为晶体线性吸收系数)和色散长度 $L_{\text{GVD}}=\tau^2/\left|\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\right|_{\omega=\omega_p}$ 时,将导致 THz 波转换效率的降低。因此,波导长度应由 L_{α} 和 L_{GVD} 中较小的一个来决定。

3 结论

文中研究了块状 GaAs 晶体与 GaAs 波导结构中泵浦光与 THz 波的相位匹配情况,通过理论计算得到了块状晶体与波导结构中泵浦光与 THz 波的

折射率曲线。结果表明:在块状晶体中,块状晶体与波导结构的折射率曲线并不相交,无法实现相位匹配,因而不能实现泵浦光到 THz 波的高效转换;采用波导结构可改变 GaAs 晶体在 THz 波段的折射率,折射率曲线与晶体对泵浦光的折射率曲线存在交点,因而可实现特定波长处的相位匹配,有效增加泵浦光和 THz 波的相干长度,提高转化效率,并从而提高 THz 波的产生功率。另外,受材料损耗与色散的限制,THz 波在波导中的传输距离存在上限。

参考文献:

- [1] Zhang Liwei, Shang Liping, Tang Jinglong, et al. Simulation of radiation characteristics of 34 μm aperture GaAs dipole photoconductive antenna [J]. *Infrared and laser engineering*, 2013, 42(1): 108-112. (in Chinese)
张李伟, 尚丽平, 唐金龙, 等. 34 μm 孔径 GaAs 偶极子光电导天线辐射特性仿真研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 108-112.
- [2] Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong, et al. THz sensing and imaging [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
张存林, 张岩, 赵国忠, 等. 太赫兹感测与成像 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] Auston D H, Cheung K P, Valdmanis J A, et al. Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in electro-optic media[J]. *Physical Review Letters*, 1984, 53(16): 1555-1558.
- [4] Huang S W, Granados E, Huang W R, et al. High conversion efficiency, high energy terahertz pulses by optical rectification in cryogenically cooled lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 796-798.
- [5] Bodrov S B, Murzanev A A, Sergeev Y A, et al. Terahertz generation by tilted-front laser pulses in weakly and strongly nonlinear regimes [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(25): 251103.
- [6] Kitaeva G K, Kovalev S P, Naumova I I, et al. Terahertz wave generation in periodically poled lithium niobate crystals fabricated using two alternative techniques [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 055404.
- [7] Farooqui M, Mishra A, Dixit N, et al. Study of Phase Matching Schemes in PPLN for THz Generation [M]// Germany: Springer International Publishing, 2014: 803-806.
- [8] Nagai M, Tanaka K. Generation and detection of terahertz radiation by electro-optical process in GaAs using 1.56 μm fiber laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 3974-3976.
- [9] Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. New York: Academic Press, 1985.