

文章编号: 1672-8785(2013)08-0031-06

GaAs 参量振荡产生太赫兹波的腔相位匹配研究

王翠玲 徐世林

(山东科技大学理学院太赫兹技术重点实验室, 青岛 266590)

摘 要: 基于腔相位匹配的方法, 研究了 GaAs 微片状晶体构成的光学微腔光参量振荡产生太赫兹波的条件与参数设计。计算了腔相位匹配下 GaAs 晶体的最优化腔长, 通过调节 GaAs 晶体的温度研究了太赫兹波的输出情况, 模拟了不同波长下最低的能量阈值。结果表明, 在完全相位匹配很难实现的情况下, 采用腔相位匹配能很容易地实现大范围太赫兹波调谐输出。结果为小型化光学太赫兹源的实验与理论研究提供了参考。

关键词: 太赫兹波; 腔相位匹配; GaAs 晶体; 光参量

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.11.006

Study of Cavity Phase Matching for Terahertz Wave Generation Based on GaAs OPO

WANG Cui-ling, XU Shi-lin

(Key Laboratory of Terahertz Technology, College of Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The condition and parameter design for an optical microcavity parametric oscillator formed by micro-flake GaAs crystals to generate terahertz (THz) wave were studied according to a cavity phase matching method. The optimum cavity length under the cavity phase matching condition was calculated. The output of THz wave was studied by adjusting the temperature of the GaAs crystal. The lowest energy thresholds at different wavelengths were simulated. The result showed that a wider tunable THz output range could be achieved more easily by using the cavity phase matching when the perfect phase-matching was difficult to realize. This result could provide experimental and theoretical reference for the development of miniature optical THz sources.

Key words: terahertz wave; cavity phase matching; GaAs crystal; optical parametric oscillator

0 引言

太赫兹波在电磁波谱中位于红外与微波之间。由于太赫兹源、检测与功能器件等技术未能得到很好的解决, 形成了所谓的电磁波“空白”^[1,2]。太赫兹源一直是太赫兹技术应用和发展的

关键技术。光学太赫兹源是常用的方法之一, 但目前传统的产生太赫兹波(如差频、光参量等方法^[3-6])的光学方法体积大, 光路复杂, 运行稳定性差, 其市场化应用前景受到限制。开发新型、实用与小型化太赫兹源是目前太赫兹技术发展的重要方向之一。1962年Bloembergen

收稿日期: 2013-09-26

基金项目: 山东科技大学春蕾计划(2010AZZ083)资助课题

作者简介: 王翠玲(1978-), 女, 山东莱芜人, 讲师, 硕士, 主要从事激光光源及太赫兹辐射源的研究。

E-mail: clwang6366@163.com

等人在提出准相位匹配概念的同时,也预言了另外一种新的相位匹配方式,即腔相位匹配(cavity phase matching-CPM)^[7]。腔相位匹配是区别于双折射相位匹配和准相位匹配的另一种匹配方式。它利用法布里-帕罗微腔的全反射引入附加 π 相位以补偿由晶体色散造成的相位失配。在 CPM 概念提出后,人们进行了一些理论方面的探讨^[8-10],但实验上一一直未能取得突破。直到 2011 年南京大学祝世宁研究小组首先利用 II 类匹配的 KTP 晶体制成片状微腔振荡器,才在 532 nm 激光的抽运下获得了高效率、高峰值功率、窄线宽、单纵模的 1064 nm 近简并参量光输出^[11]。另外,他们还利用厚度仅为相干长度的掺氧化镁铌酸锂晶片制成了 I 类 CPM 的片状光参量振荡器,产生了可调谐的单纵模双光束,调谐范围覆盖铯原子线(852.1 nm)和光通信波段^[12]。这种光学微腔因为具有单纵模和窄线宽等独特的光谱特性^[13,14],在太赫兹源、集成光子学、光谱学和量子信息领域具有很好的应用前景。

1 腔相位匹配的基本原理

在参量相互作用时,我们通常希望相位能够完全匹配($\Delta k=0$),以实现参量相长输出。但在实际实验中,由于受到其他因素的影响,往往不容易实现完全相位匹配。

在腔相位匹配过程中,FP 型微腔的厚度小于或等于相干长度。如图 1(a)所示,在腔内振荡的参量光每经过一次腔镜的全反射,会引入附加 π 相位补偿相位失配。对于腔相位匹配,尽管没有实现完全相位匹配,但当相干长度大于晶体的长度时,参量光的强度得到增强,如图 1(b)所示。尽管目前 FP 腔的厚度仅为相干长度量级,但随着现代微加工技术的发展,微腔的 Q 值可以达到足够高,等效的非线性相互作用长度 $L=QL_c$ 也会相应变长,因而非线性过程的转换效率可以得到提高,可与准相位匹配过程的转换效率相匹敌。

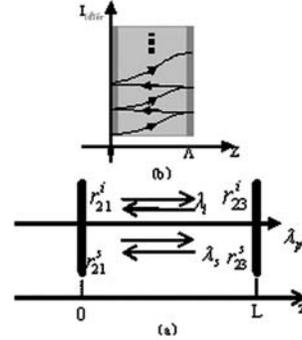


图 1 微腔参量振荡的示意图

2003 年 Riad Haidar 等人^[8]首次从理论上在 FP 型微腔中实现了光参量振荡过程,通过系统的推导,得到了最优化光学微腔的普适条件。在构建 FP 型光学微腔时,如图 1(a)所示,泵浦光(λ_p)单次通过,信号光(λ_s)与空闲光(λ_i)双共振, r_{21}^s 和 r_{23}^s 分别是信号光在输入端和输出端的反射率, r_{21}^i 和 r_{23}^i 分别是空闲光在输入端和输出端的反射率。为使振荡阈值降至最低,最优化腔长应满足:

$$\Delta k(\lambda_s, \lambda_i)L^{op} = \frac{(2n+1)\pi}{\sqrt{1 - (\frac{\pi}{F})^2}} \quad (1)$$

$$F = \pi / \sqrt{1 - (\frac{R_i + R_s}{1 + R_i R_s})^2} \quad (2)$$

$$\Delta k = k_p - k_i - k_s = \frac{2\pi n_p}{\lambda_p} - \frac{2\pi n_s}{\lambda_s} - \frac{2\pi n_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

三波相互作用时,还必须满足能量守恒式:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad (4)$$

式中, F 为精细系数, L^{op} 为最优化腔长, $n=0,1,2,3,\dots$ 等整数, Δk 为参量过程中三波的波矢失配量, k_p 、 k_s 、 k_i 分别为泵浦光、信号光和空闲光的波矢, $R = r_{21}^s r_{23}^s$ 和 $R = r_{21}^i r_{23}^i$ 分别为信号光和空闲光的总反射率。由式(1)可知,最优化腔长并不是唯一确定的值,而是可以人为选择的。当 Δk 较大时,可选择较小的腔长来实现腔相位匹配输出。此时的最优化腔长 L^{op} 仅由最低阈值条件决定。兼顾到非线性转化的效率,可以把该条件进一步细化。

2 GaAs 的色散方程

GaAs 晶体属 43m 族, 是光学各向同性半导体晶体, 对 0.9 μm~17 μm 这一较宽的红外波段透明^[15]。在已知晶体中, GaAs 晶体对频率小于 3 THz 波段光的吸收系数仅高于 GaSe 晶体^[16], 同时它还具有较高的抗损伤阈值^[17]和很好的热学性质^[18], 因此 GaAs 晶体具有广泛的应用前景。

2003 年, T.Skauli 等人报道了 GaAs 晶体的折射率随温度变化的关系^[19], 如式(5)所示。此式主要适用于光波段及中红外波段。而在太赫兹波段, GaAs 晶体的折射率随温度变化的公式尚未有文献给出。室温下在光波段常用的色散公式有式(6-a)^[20], 在太赫兹波段常用的色散公式有式(6-b)^[21]。对以上两波段室温下折射率随波长的变化关系进行比较, 由图 2 可以看出, 在 0.6 μm~5 μm 的光波段, 两曲线基本重合; 在大于 5 μm 区域, 波长越长, 两式所得的折射率差别就越大。而由图 3 可以看出, 在 30 μm~65 μm 的太赫兹波段, 两曲线重合。在大于 65 μm 的波段两曲线的差别很小。因此我们选用 1.3 μm~1.4 μm 波长范围内的光为泵浦光, 通过腔相位匹配法来实现太赫兹波输出, 并选用式(5)进行数值分析。

$$n^2(\lambda) = g_0 + \frac{g_1}{A^{-2} - \lambda^{-2}} + \frac{g_2}{B^{-2} - \lambda^{-2}} + \frac{g_3}{C^{-2} - \lambda^{-2}} \quad (5)$$

式中, λ 的单位为 μm, T 的单位为 °C, $g_0 = 5.372514$, $g_1 = 27.83972$, $g_3 = 0.00143636$, $A = 0.4431307 + 0.000050564(T - 22)$, $g_2 = 0.031764 + 4.350 \times 10^{-5}(T - 22) + 4.664 \times 10^{-7} \times 10^{-7}(T - 22)^2$, $B = 0.8746453 + 0.00001913(T - 22) - 4.882 \times 10^{-7}(T - 22)^2$, $C = 36.9166 - 0.011622(T - 22)$

$$n_{opt}^2 = 8.95 + \frac{2.054\lambda^2}{\lambda^2 - 0.39} \quad (6-a)$$

$$n_{THz}^2 = 10.9 + \frac{269^2 \times 1.9}{269^2 - f^2 - i6.5f} \quad (6-b)$$

式中, f 为太赫兹波频率, 单位为 cm⁻¹。

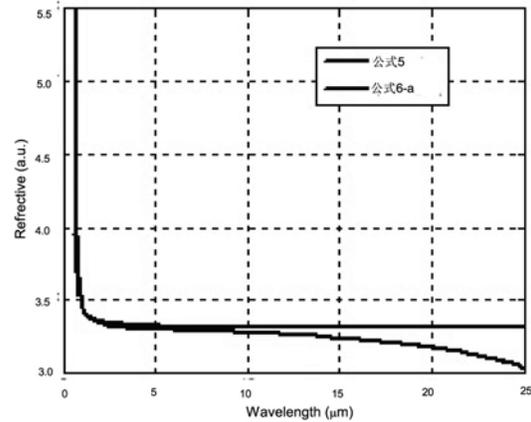


图 2 GaAs 晶体在光波波段的色散曲线

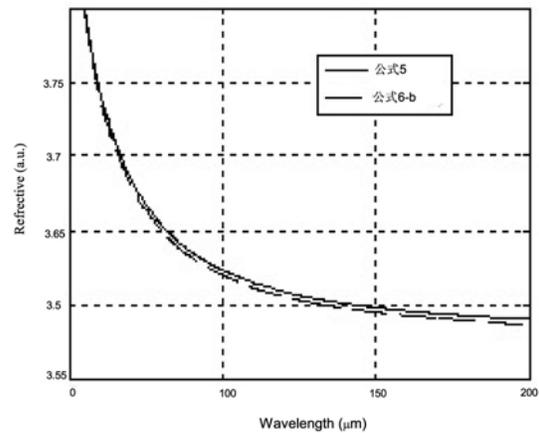
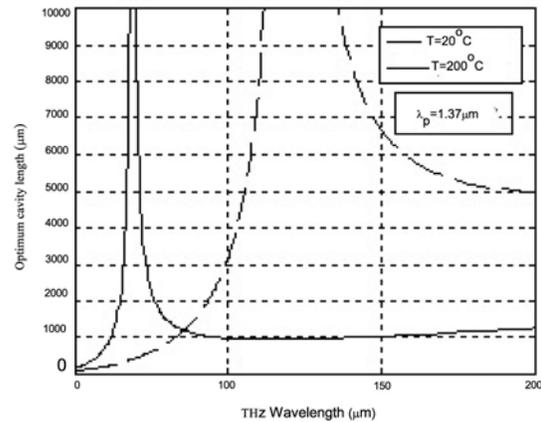
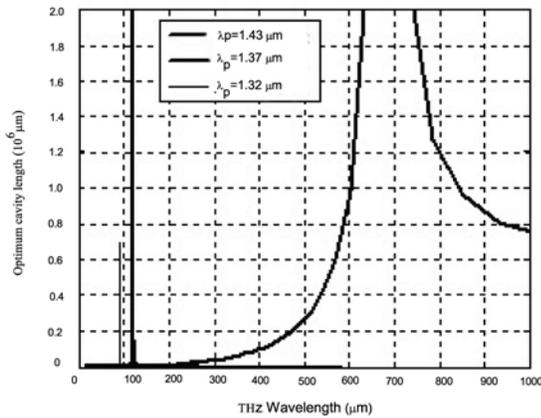


图 3 GaAs 晶体在 THz 波段的色散曲线



(a)



(b)

图 4 GaAs 晶体的最优化腔长与 THz 波长的关系 (a) 在不同温度下 (b) 在不同泵浦波长时

3 腔相位匹配的最优化腔长

对 GaAs 晶体薄片两端进行镀膜, 使得晶体两端对 $1.37 \mu\text{m}$ 泵浦光的反射率 $R < 0.5\%$ 。泵浦光通过晶体时, 晶体输入端对 $1.38 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 波段的光反射率很高 ($r_{21}^i = r_{21}^s = 99.8\%$)。输出端对 $1.38 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段光的反射率为 r_{23}^s , 对 $100 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 波段的光反射率为 $r_{23}^s = 95.4\%$ 。根据式 (1) ~ (4), 可得室温 22°C 时 GaAs 晶体的最优化腔长与输出 THz 波长的关系, 如图 4 (a) 所示。可以看出, 室温 22°C 时 THz 波长在 $121 \mu\text{m}$ 附近的最优化腔长趋于无穷大, 可认为对应完全相位匹配 ($\Delta k = 0$)。腔长有限为腔相位匹配情况, 完全相位匹配视为其特例。 200°C 时在 $69 \mu\text{m}$ 附近 THz 波长的最优化腔长趋于无穷大, 与 22°C 时的曲线相比, 最优化腔长往短波方向偏移, 带宽非常小, 为 $3 \mu\text{m}$ 左右。室温时在 $100 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 范围内所对应的最优化腔长可达到几千微米。即使温度升到 200°C , 太赫兹波的绝大部分区域的最优腔长值也能达到上千微米。所以腔长为 $1000 \mu\text{m}$ 的晶体可以满足式 (1) 的腔相位匹配条件, 在微腔中形成信号光与空闲光双谐振, 可大大地提高信号光与空闲光的等效相互作用长度 $L = QL^{op}$ 。

L 值约为 3855.3 mm , 可与准相位匹配光参量过程的相匹敌, 而且非线性过程的转换效率也可以得到提高。

室温下最优化腔长随泵浦光波长的变化如图 4 (b) 所示。可以看出, 在 $1.32 \mu\text{m} \sim 1.43 \mu\text{m}$ 范围内, 泵浦光的波长越短, 其完全相位匹配的 THz 波的波长就越短, 带宽就越窄, 出现完全相位匹配的情况就越难。相比而言, 腔相位匹配较容易实现完全相位匹配。选择一定的微腔, 可在更大波长范围内获得太赫兹波输出。

4 腔相位匹配时的温度调谐

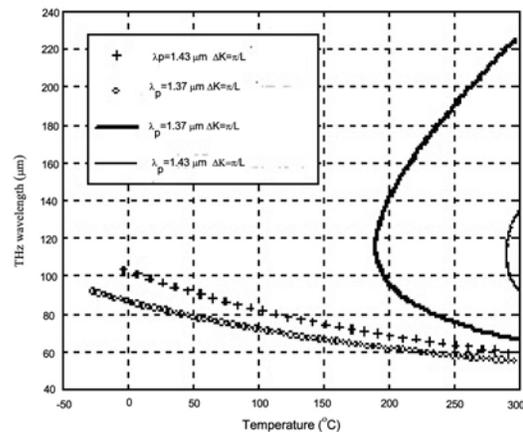


图 5 腔相位匹配时 GaAs 晶体的输出 THz 波长与温度的关系

实验中, 由于受到其他因素的影响, 完全相位匹配往往不容易实现, 而腔相位匹配却是容易实现的。根据式 (1), 取 GaAs 晶体的长度 $L = 1000 \mu\text{m}$ 时, 腔精细系数 F 可达 89.25 , 式 (1) 可近似为

$$\Delta k = (2n + 1)\pi/L \quad (7)$$

尽管没有实现完全相位匹配 ($\Delta k = 0$), 但只要满足上式, 仍然可认为太赫兹辐射能够实现相长输出。n 取 0 和 -1 时, 根据 GaAs 晶体的色散方程, 输出的 THz 波波长随温度变化的关系如图 5 所示。温度在 -30°C 至 300°C 内变化时, 对于 $1.37 \mu\text{m}$ 的泵浦光, 输出的 THz 波可以从 $55 \mu\text{m}$ 调谐到 $95 \mu\text{m}$; 对于 $1.43 \mu\text{m}$ 泵浦光, 输出

的 THz 波可以从 $58 \mu\text{m}$ 调谐到 $105 \mu\text{m}$ 。此时, 每一温度下仅有一对信号光和空闲光能实现腔相位匹配。满足 $\Delta k = \pi/L$ 时, 对于 $1.37 \mu\text{m}$ 的泵浦光, 仅当温度超过 190°C 时才能实现腔相位匹配, 在 190°C 到 300°C 的范围内, THz 波长可以从 $70 \mu\text{m}$ 调谐到 $225 \mu\text{m}$; 对于 $1.43 \mu\text{m}$ 的泵浦光, 到 290°C 时才出现 THz 波, 而且调谐范围比较小。值得注意的是, 在 $\Delta k = \pi/L$ 时, 同一温度下会出现两对信号光和空闲光都满足腔相位匹配条件的情况。

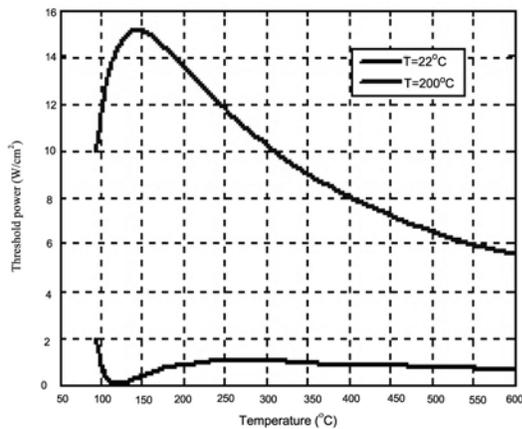


图 6 腔相位匹配时 GaAs 晶体的最低能量阈值与 THz 波长的关系

5 腔相位匹配时的最低能量阈值

根据 Riad Haidar 等人^[8]给出的 GaAs 参量振荡的最低能量阈值公式

$$I_t = \frac{n_p n_s n_i}{2Z_0} \frac{\lambda_s \lambda_i}{(\chi^{(2)})^2} \left(\frac{\Delta k}{2F}\right)^2 \quad (8)$$

式中, $\chi^{(2)}$ 为二阶非线性系数, $\chi^{(2)}=150 \text{ pm/V}$, Z_0 为真空电阻率, $Z_0=377 \Omega$ 。由式(8)可以得出温度分别为 22°C 和 200°C 时 $1.37 \mu\text{m}$ 泵浦光的最低能量阈值和 THz 波长变化的关系。由图 6 可以看出, 当室温为 22°C 、THz 波长约为 $122.5 \mu\text{m}$ 时, 能实现完全相位匹配, 此时的能量阈值最低。当温度为 200°C 、THz 波长为 $144.4 \mu\text{m}$ 时, 三个相互作用波的波矢失配量最大, 能量阈值最大。比较以上两种温度的情况, 可知温度越高能量阈值越高, 200°C 时的最低能量阈值比室温时的高一个数量级。

6 结论

基于腔相位匹配的基本原理, 研究了 GaAs 微片状晶体构成的 FP 型光学微腔中光参量振荡输出太赫兹波的情况。研究了泵浦光单次通过时信号光和空闲光双谐振的过程, 比较了 GaAs 晶体的色散公式。数值计算表明, 腔长为 $1000 \mu\text{m}$ 的晶体可以满足腔相位匹配公式条件, 其等效相互作用长度可以与准相位匹配光参量过程的相匹配, 而且腔相位匹配容易实现更大范围的太赫兹波输出。通过改变温度可以实现太赫兹波的调谐输出。选用 $1.37 \mu\text{m}$ 的泵浦光, 在 190°C 至 300°C 温度下进行调谐, THz 波长可以实现 $70 \mu\text{m}$ 至 $225 \mu\text{m}$ 的大范围输出, 而且能够同时输出两对信号光和空闲光。此外, 温度越高, 能量阈值越高。 200°C 时的最低能量阈值比室温时的高一个数量级。结果表明, 腔相位匹配方法是一种能在很难实现完全相位匹配的情况下实现 THz 波输出的较为有效的方法。研究结果为进一步的实验和理论研究奠定了基础, 对开发小型化光学太赫兹源具有参考价值。

参考文献

- [1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. *Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 910-928.
- [2] Bradley F, Zhang Xi-Cheng. Materials of Terahertz Science and Technology [J]. *Physics*, 2003, **32**(5): 287-293.
- [3] Kawase K, Sato M, Taniuchi T, et al. Coherent Tunable THz-wave Generation from LiNbO₃ with Monolithic Grating Coupler[J]. *Applied Physics Letter*, 1996, **68**(18): 2483-2485.
- [4] Shi W, Ding Y J. Continuously Tunable and Coherent Terahertz Radiation by Means of Phase-matched Difference-frequency Generation in Zinc Germanium Phosphide[J]. *Applied Physics Letter*, 2003, **83**(5): 848-850.
- [5] Shi W, Ding Y J. Tunable Terahertz Waves Generated by Mixing Two Copropagating Infrared Beams in GaP[J]. *Optics Letter*, 2005, **30**(9): 1030-1032.
- [6] Powers P E, Alkuwari R A, Haus J W, et al. Terahertz Generation with Tandem Seeded Optical Parametric Generators[J]. *Optics Letter*, 2005, **30**(6): 640-642.

- [7] Armstrong J A, Blombergen N, Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric[J].*Physics Review*, 1962,**127**(6):1918–1939.
- [8] Haidar R, Forget N, and Rosencher E, Optical Parametric Oscillation in Microcavities Based on Isotropic Semiconductors: A Theoretical Study [J].*Quantum Electron*, 2003,**39**(4):569–575.
- [9] Berger V, Second-harmonic Generation in Monolithic Cavities[J].*JOSA B*1997,**14**(6):1351–1360.
- [10] Rosencher E, Vinter B, and Berger V, Second-harmonic Generation in Nonbirefringent Semiconductor Optical Microcavities[J].*Journal of Applied Physics*,1995, **78**(10):6042–6045.
- [11] Xie Z D, Lv X J,Liu Y H, et al. Cavity Phase Matching via an Optical Parametric Oscillator Consisting of a Dielectric Nonlinear Crystal Sheet[J]. *Physical Review Letters*,2011,**106**(8):083901.
- [12] Liu Y H, Xie Z D, Ling W, et al. Generation of a Twin Beam at the Cesium Line and Telecom Wavelength by Cavity Phase Matching[J]. *Optics Letters*, 2011,**36**(16):3139–3141.
- [13] Fürst J U, Strekalov D V, Elser D,et al. Naturally Phase-matched Second-Harmonic Generation in a Whispering Gallery-mode Resonator[J]. *Physical Review Letter*, 2010,**104**(15): 153901–153904.
- [14] Andronico A, Favero I, Leo G.Difference Frequency Generation in GaAs Microdisks[J].*Optics Letter*, 2008, **33**(18): 2026–2028.
- [15] Johnson C J, Sherman G H, and Weil R. Far Infrared Measurement of the Dielectric Properties of GaAs and CdTe at 300 K and 8 K[J]. *Applied Optics*, 1969,**8**(8),1667–1671.
- [16] Sardar D, Becker M, Walser R. Multipulse Laser Damage of GaAs Surfaces[J].*Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(9): 3688–3693.
- [17] Sato K, Adachi S. Optical Properties of ZnTe[J].*Journal of Applied Physics*, 1993, **73**(2):926–931.
- [18] Shoji I, Kondo T, Kitamoto A, et al. Absolute Scale of Second-order Nonlinear-optical Coefficients[J]. *JOSA B*, 1997, **14**(9):2268–2294.
- [19] Skauli T, Kuo P S, Vodopyanov K L, et al. Improved Dispersion Relations for GaAs and Applications to Nonlinear Optics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(10): 6447–6455.
- [20] Marple D T F. Refractive Index of GaAs[J].*Journal of Applied Physics*, 1964,**35**(4): 1241–1242.
- [21] Edward D P. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. Academic press, 1998:32–33.

(上接第 7 页)

图), 这样相同的扫描角便可以减小扫描角对定标的影响。

反射阳光波段定标使用黑体作为光学“零”, 并使用太阳漫散器作为光亮源。黑体可为望远镜每转一次提供相应的零测量, 而太阳漫散器在每一轨(大约 100 min)中只能照射到很短的时间, 这样太阳通道的完整定标就只执行 1 次/轨。太阳漫散器因暴露于紫外线辐射而逐渐老化是一个不可避免的问题。尽管在 METImage 设计中漫散器暴露在紫外线下只有很短的时间, 而且短期紫外线照射所致老化几乎可以忽略不计, 但是在 8 年的使用寿命中, 总的累积退化也会远远超过寿命稳定性 1% 的要求。所以将采用一个可避免紫外线照射的监控装置对主漫射器偏差进行标定, 并对其衰退进行监控和修正。

5 结束语

随着人们对气象卫星监测需求的不断增加, 星载探测仪器在数量、种类和功能上发生

了巨大变化。欧洲下一代气象卫星无论是地球同步轨道还是极轨均采用了承载不同载荷的双星配对运行。另外, 极轨卫星通过国际合作与资源共享也降低了发射成本。

参考文献

- [1] ESA. Satellite Missions Database [EB/OL]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>, 2013.
- [2] Antonio Rodriguez, Rolf Stuhlmann, Stephen Tjemkes, et al. Meteosat Third Generation: Mission and System Concepts [C]. *SPIE*, 2009, **7453**: 74530C.
- [3] Aminou D M, Lamarre D, Stark H, et al. Meteosat Third Generation (MTG) Status of Space Segment Definition [C]. *SPIE*, 2009, **7474**: 747406.
- [4] Banfi S, Schlusser P, Diebel D. Feasibility Studies for the Follow-on EUMETSAT Polar System [C]. *SPIE*, 2010, **7826**: 78260O.
- [5] EUMETSAT. Post-EPSS Mission Requirements Document [EB/OL]. <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/Post-EPSS/Resources>, 2010.