

# 基于超薄金属薄膜的超宽频太赫兹分束器

刘松林<sup>1,2</sup>, 薄报学<sup>1</sup>, 邹仪宣<sup>1,2</sup>, 夏良平<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 中国科学院重庆绿色智能技术研究院跨尺度制造技术重庆市重点实验室, 重庆 400714

**摘要** 提出了一种以聚酯薄膜作为支撑的超薄金属薄膜太赫兹分束器结构,建立了该结构的基于传输矩阵理论的分束模型,分析了不同厚度金属 Cr 膜和聚酯薄膜对超宽频段太赫兹分束器的反射率、透射率和分束比的影响。理论结果表明,太赫兹分束器的分束性能受金属 Cr 膜厚度的影响较大,而受聚酯薄膜厚度的影响较小。在此基础上,制备了不同厚度金属 Cr 膜的太赫兹分束器件,并进行了分束实验,获得了与理论分析一致的实验结果,确定了 1:1 分束比下的器件结构参数。

**关键词** 薄膜; 太赫兹; 分束器; Cr

中图分类号 O431.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1131002

## Ultrawide-Band Terahertz Beam-Splitter Based on Ultrathin Metallic Films

Liu Songlin<sup>1,2</sup>, Bo Baoxue<sup>1</sup>, Zou Yixuan<sup>1,2</sup>, Xia Liangping<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Chongqing Key Laboratory of Multi-Scale Manufacturing Technology, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

**Abstract** A terahertz beam-splitter structure with polyester films as the support based on ultrathin metallic films is proposed, and the splitting model based on the transmission matrix theory is built. The influences of the metallic Cr films and the polyester films with different thicknesses on the reflectivity, transmissivity and splitting ratio of this ultrawide-band terahertz beam-splitter are also analyzed. The theoretical results show that the splitting performance of the proposed terahertz beam-splitter is relatively sensitive to the thickness of metallic Cr films but insensitive to the thickness of polymer films. On this basis, the terahertz beam-splitters with different thicknesses of metallic Cr films are fabricated and tested experimentally. The experimental results are consistent with those from theory analysis. The structural parameters of this device with a splitting ratio of 1:1 are determined.

**Key words** thin films; terahertz; beam splitter; Cr

**OCIS codes** 310.6845; 260.2110; 040.2235; 230.1360

## 1 引 言

太赫兹波具有光子能量低、穿透性强等优点,在材料科学、生物医学、天文观测、无损检测、通信以及军事等领域具有巨大的应用前景<sup>[1]</sup>。学者们一般将太赫兹波看成超远红外波,主要采用光学方式对其进行控制处理<sup>[2]</sup>。光的分束在光学系统中十分常见,在基于光学方式处理的太赫兹光路中,实现太赫兹波的分束十分迫切。

收稿日期: 2017-05-23; 收到修改稿日期: 2017-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(61504147, 61605206, 11604332)、中国科学院西部之光资助课题

作者简介: 刘松林(1993—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹器件与系统方面的研究。E-mail: liusonglin@cigit.ac.cn

导师简介: 薄报学(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高功率半导体激光器物理与技术方面的研究。

E-mail: bbx@cust.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: xialp@cigit.ac.cn

实现太赫兹分束的传统方式主要分为两类。一类是基于金属光栅结构的太赫兹偏振分束器<sup>[3]</sup>。通过金属结构使分束后的两束太赫兹波呈现正交偏振态,但该器件只适用于偏振光路中,限制了其应用范围。另一类非偏振的太赫兹分束器主要有以下实现方式。其一是采用聚酯薄膜<sup>[4-5]</sup>,即利用一定厚度的聚酯薄膜双面干涉共振获得反射透射分束,其优点是分束效率高,缺点是不同频率范围需采用的聚酯薄膜厚度不同,对于频率范围极宽的太赫兹波段而言,只采用一种厚度的聚酯薄膜无法实现整个太赫兹频段的分束。其二是采用高折射率的硅片<sup>[6]</sup>,即利用硅片与空气的高折射率差,通过双面的共同作用,可在很宽的频率范围内获得能量比接近 1:1 的反射透射分束比,然而此种太赫兹分束的方式对太赫兹波入射角度、硅片厚度有严格要求,且其光谱间隔必须大于硅片干涉频率间隔。其三是在很薄的聚酯薄膜表面镀上一层微量量级的铬膜<sup>[7]</sup>,即通过高折射率的铬膜与聚酯薄膜共同作用,实现宽频太赫兹分束;虽然该器件不受分辨率限制,但铬膜在聚酯薄膜表面的应力较大,易发生碎裂,导致器件可靠性不高。

本文提出了一种以聚酯薄膜作为支撑的超薄金属 Cr 薄膜太赫兹分束器,利用金属 Cr 薄膜的高电导率控制太赫兹波的透射率与反射率。采用的金属 Cr 薄膜和聚酯薄膜的厚度小,可避免器件内部发生干涉,因此分束响应频率范围极宽,器件结构与性能稳定,且无光谱分辨率限制。基于传输矩阵理论,建立了该分束器的理论模型,分析了金属 Cr 薄膜和聚酯薄膜厚度对分束性能的影响,并以 12.5 μm 厚的聚酯薄膜为支撑,制作了不同厚度的金属 Cr 薄膜分束器,在太赫兹时域光谱系统中获得了与理论分析吻合的实验测试结果,该研究为无偏振宽频太赫兹分束的实现提供了参考。

## 2 分束结构与理论

图 1 所示为基于超薄金属薄膜的超宽频太赫兹分束结构示意图,其中 1 为表面金属 Cr 薄膜层,其厚度为  $d_1$ ,折射率为  $n_1$ ; 2 为聚酯薄膜层,其厚度为  $d_2$ ,折射率为  $n_2$ ; 0 和 3 分别为器件前后空气层; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  分别为金属层、介质层、空气层的入射角。太赫兹波从金属一侧以  $\theta_0$  角度入射到器件表面,其中一部分能量穿透器件形成透射波束,另一部分则经金属薄膜反射形成反射波束,最终被分成两束。

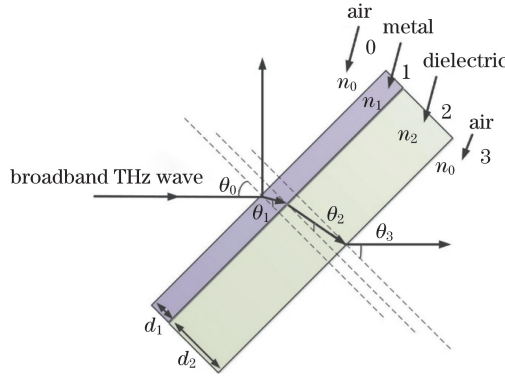


图 1 超薄金属薄膜的超宽频太赫兹分束结构示意图

Fig. 1 Schematic of ultrawide-band terahertz splitting structure based on ultrathin metallic films

为了分析该器件的结构参数,采用传输矩阵理论建立其分束模型。建立了图 1 所示的双层薄膜结构的入射介质与出射介质间的场关系<sup>[8]</sup>,即

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^2 \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} E_3 \\ H_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $E_0, H_0$  和  $E_3, H_3$  分别为入射介质的电场强度大小、磁场强度大小和出射介质的电场强度大小、磁场强度大小; $\eta_j$  为第  $j$  层导纳; $\delta_1, \delta_2$  分别为金属层和介质层的相位厚度;矩阵  $\begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}$  为第  $j$  层膜的特征矩阵。将 1, 2, 3 层的组合导纳  $Y = \frac{E_0}{H_0}$  以及第 3 层导纳  $\eta_3 = \frac{E_3}{H_3}$  代入(1)式中可得

$$E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^2 \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_3 \end{bmatrix} E_3, \quad (2)$$

令

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^2 \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_3 \end{bmatrix} = \left[ \left( b - \frac{\eta_2}{\eta_1} a \right) + i \eta_3 \left( \frac{d}{\eta_2} + \frac{c'}{\eta_1} \right) - \eta_3 \left( \frac{\eta_1}{\eta_2} a + b \right) + i(\eta_1 c' + \eta_2 d) \right], \quad (3)$$

式中  $a = \sin \delta_1 \sin \delta_2$ ,  $b = \cos \delta_1 \cos \delta_2$ ,  $c' = \sin \delta_1 \cos \delta_2$ ,  $d = \cos \delta_1 \sin \delta_2$  为自定义变量。定义  $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$  为 1, 2, 3

层组合膜系的特征矩阵。 $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1$ ,  $\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \cos \theta_2$ , 其中  $\lambda$  为太赫兹波的波长。各层导纳在不同的偏振模式下满足如下关系, 即

$$\eta_j = \begin{cases} n_j / \cos \theta_j & \text{p polarization} \\ n_j \cos \theta_j & \text{s polarization} \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $n_j$  为第  $j$  层的折射率。以聚酯薄膜作为支撑, 其太赫兹波段的折射率  $n_2$  取值为 1.7。金属 Cr 薄膜的介电常数通过 Drude 模型<sup>[9]</sup>可表示为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega + i\gamma}, \quad (5)$$

式中  $\omega$  为角速度, Cr 的高频介电常数  $\epsilon_\infty = 3.2$ , Cr 的等离子体频率  $\omega_p = 2.2 \times 10^{16}$  rad/s, Cr 的碰撞频率  $\gamma = 3.8 \times 10^{15}$  rad/s。因此, 其折射率为

$$n_1 = \sqrt{\epsilon(\omega)}. \quad (6)$$

由(2)式可得, 1, 2, 3 层组合后的导纳为  $Y = C/B$ , 则图 1 所示结构的反射率  $R_{s,p}$  和透射率  $T_{s,p}$  满足如下关系, 即

$$R_{s,p} = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2 = \frac{\left[ 2\eta_0 b + \frac{\eta_0(\eta_1^2 - \eta_2^2)}{\eta_1 \eta_2} a \right]^2 + \left[ \left( \frac{\eta_0^2 - \eta_2^2}{\eta_2} \right) d + \left( \frac{\eta_0^2 - \eta_1^2}{\eta_1} \right) c' \right]^2}{\left[ \frac{\eta_0(\eta_1^2 + \eta_2^2)}{\eta_1 \eta_2} a \right]^2 + \left[ \left( \frac{\eta_0^2 + \eta_2^2}{\eta_2} \right) d + \left( \frac{\eta_0^2 + \eta_1^2}{\eta_1} \right) c' \right]^2}, \quad (7)$$

$$T_{s,p} = \frac{4\eta_0 \eta_3}{|\eta_0 B + C|^2} = \frac{4\eta_0 \eta_3}{\left[ \frac{\eta_0(\eta_1^2 + \eta_2^2)}{\eta_1 \eta_2} a \right]^2 + \left[ \left( \frac{\eta_0^2 + \eta_2^2}{\eta_2} \right) d + \left( \frac{\eta_0^2 + \eta_1^2}{\eta_1} \right) c' \right]^2}. \quad (8)$$

在 s 偏振和 p 偏振的共同作用下, 太赫兹分束器的平均反射率  $R$  与平均透射率  $T$  分别为

$$R = 0.5R_s + 0.5R_p, \quad (9)$$

$$T = 0.5T_s + 0.5T_p. \quad (10)$$

在获得了器件的反射率与透射率后, 其太赫兹分束比  $S_R$  定义为

$$S_R = R/T. \quad (11)$$

太赫兹波的入射角度设置为  $45^\circ$ 。在 s 偏振和 p 的共同作用下, 分析金属 Cr 薄膜和聚酯薄膜厚度对太赫兹分束性能的影响情况。由(9)~(11)式获得了理论结果, 如图 2 所示, 其中图 2(a)、(b)分别给出了在 0.1~20 THz 范围内, 不同厚度金属 Cr 薄膜对应的器件反射率和透射率, 此时聚酯衬底厚度为 12.5  $\mu\text{m}$ 。结果显示, 在 0.1~20 THz 范围内, 当金属 Cr 薄膜的厚度增加时, 其反射率增大, 而透射率减小。图 2(c)所示为理论分束比, 可以看到, 当金属 Cr 薄膜的厚度为 5 nm 时, 其分束比接近 1:1, 此时其反射率和透射率均接近 30%。在图 2(a)~(c)中, 反射率、透射率和分束比随频率的震荡现象由聚酯衬底引起, 但其震荡引起的能量最小值大于纯聚酯薄膜分束器的, 在反射/透射消光频点上, 该器件仍可实现 1:1 分束, 因此其工作频段远大于相同厚度的纯聚酯薄膜分束器。图 2(d)、(e)分别对应 5 nm 厚金属 Cr 薄膜在不同厚度聚脂薄膜上的反射率和透射率。结果显示, 当衬底薄膜的厚度增加时, 由衬底引起的干涉级次增加, 并且级次频宽变窄。图 2(f)对应的结果显示, 聚酯薄膜衬底厚度的改变对太赫兹分束比的影响很小, 这一结果表明该分束器对

衬底厚度没有苛刻要求。

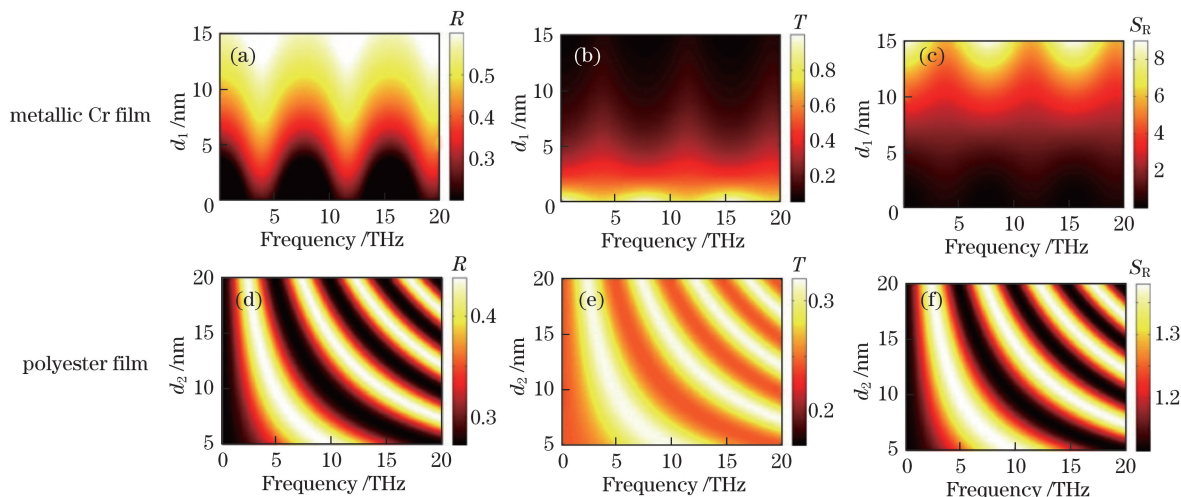


图2 理论结果。(a)(d)反射率;(b)(e)透射率;(c)(f)分束比

Fig. 2 Theoretical results. (a)(d) Reflectivity; (b)(e) transmissivity; (c)(f) splitting ratio

### 3 实验与分析

在理论分析的基础上,选择厚度为 $(12.5 \pm 0.1) \mu\text{m}$ 的聚酯薄膜作为衬底,该厚度的聚酯薄膜不仅柔性好,且力学支撑性优异,不易发生塑性变形,便于器件制作。然后在其表面溅射不同厚度的金属 Cr 薄膜,最后采用环形支撑支架将其绷平,以获得实验测量器件。

太赫兹分束实验测试采用是太赫兹时域光谱系统(THz-TDS, T-Ray5000, API 公司, 美国),该系统为线偏系统,通过旋转 THz-TDS 的发射和接收探头方向改变太赫兹波的偏振态。在透射模式下,以镜架固定的太赫兹金属 Cr 薄膜分束器与 THz-TDS 光轴成  $45^\circ$  夹角,以空气为参考获得不同厚度分束器的透射率。在反射模式下,THz-TDS 的发射和接收探头成  $90^\circ$ ,太赫兹金属 Cr 薄膜分束器与入射和反射太赫兹波均成  $45^\circ$ ,以金属反射镜为参考获得不同厚度分束器的反射率。测量结果分别如图 3(a)、(b)所示。实验结果表明,随着金属 Cr 薄膜厚度从 5 nm 逐渐增加至 17 nm,器件的反射率从 12% 逐渐增大至 45%,而透射率从 50% 逐渐减小至 8%,这一趋势与理论结果一致。在该器件中,金属 Cr 薄膜存在一定的吸收损耗,因此其反射率和透射率之和小于 1。然而,由于其超宽的工作频段和无光谱分辨率限制的优势,该器件仍具有重要的实用价值。

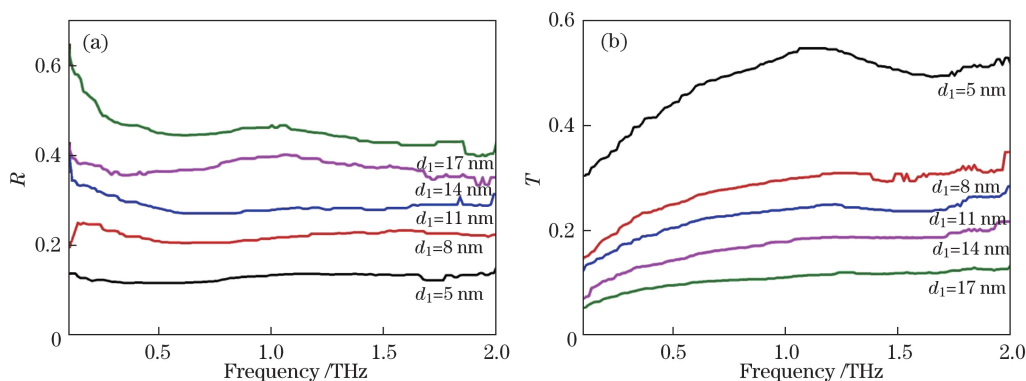


图3 实验结果。(a)反射率;(b)透射率

Fig. 3 Experimental results. (a) Reflectivity; (b) transmissivity

根据实验结果,在所测量的频率范围内,计算得到了该太赫兹分束器的理论平均分束比  $S_{R1}$ ,如图 4 所示,其中  $S_{R2}$  为实验获得的平均分束比。可以看到,实验结果表现出了与理论结果一致的变化趋势,即太赫兹平均分束比均随金属 Cr 薄膜厚度的增加而呈指数增加。这表明该分束器受金属 Cr 薄膜厚度影响十分明

显,在器件制备过程中,金属 Cr 薄膜的厚度是关键因素。同时,该结果还显示,实验获得的分束比在数值上低于理论值,这是由于金属 Cr 薄膜的厚度较薄,在溅射工艺中薄膜的成膜性欠佳,导致器件的实际反射率低于理论值。要获得接近 1:1 的分束比,金属 Cr 薄膜的厚度范围为 7~11 nm,其镀膜厚度和容差范围均远大于理论值,故实际器件制备相对于理论要求更宽松,有利于器件的实用化。

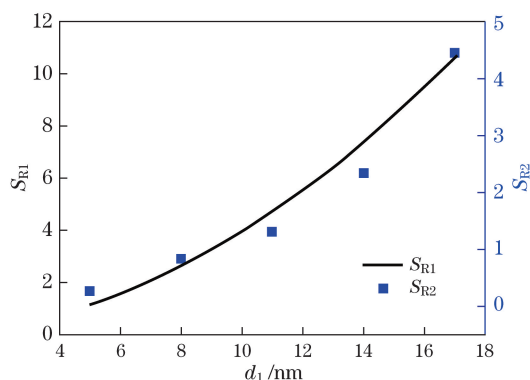


图 4 不同金属 Cr 薄膜厚度下的平均分束比

Fig. 4 Average splitting ratios under different thicknesses of metallic Cr films

## 4 结 论

提出了以聚酯薄膜支撑的超薄金属 Cr 薄膜太赫兹分束器,对该太赫兹分束器进行了理论分析和实验制备与测试,理论上证明了其在 0.1~20 THz 范围内可获得良好的太赫兹分束性能,实验测试结果表现出了与理论结果一致的变化趋势,确定了金属 Cr 薄膜厚度为 7~11 nm 时,器件可获得 1:1 的分束比。因其超宽的工作频段、无光谱分辨率限制、无偏振选择性和优异的力学稳定性能等特点,该太赫兹分束器在太赫兹光路系统中具有重要的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou Yongjun, Zhang Hui, Zhang Xuanni, *et al.* Experimental research on cigarette humidity and density detection based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 013001.  
周永军, 张辉, 张宣妮, 等. 基于太赫兹时域谱烟支湿度密度检测的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 013001.
- [2] Zhang Xingning, Chen Ji, Zhou Zekui. THz time-domain spectroscopy technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(7): 35-38.  
张兴宁, 陈稷, 周泽魁. 太赫兹时域光谱技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(7): 35-38.
- [3] Berry C W, Jarrahi M. Broadband terahertz polarizing beam splitter on a polymer substrate[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(2): 127-130.
- [4] Naylor D A, Boreiko R T, Clark T A. Mylar beam-splitter efficiency in far infrared interferometers: angle of incidence and absorption effects[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(7): 1055-1058.
- [5] Kampffmeyer G, Pfeil A. Self-supporting thin-film beam splitter for far-infrared interferometers[J]. *Applied Physics A*, 1977, 14(3): 313-317.
- [6] Homes C C, Carr G L, Lobo R P S M, *et al.* Silicon beam splitter for far-infrared and terahertz spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(32): 7884-7888.
- [7] Rowell N L, Wang E A. Bilayer free-standing beam splitter for Fourier transform infrared spectrometry[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(16): 2927-2933.
- [8] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 20-29.  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 20-29.
- [9] Xu T, Fang L, Ma J, *et al.* Localizing surface plasmons with a metal-cladding superlens for projecting deep-subwavelength patterns[J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(1): 175-179.