

文章编号: 2095-4980(2016)02-0167-04

光泵气体 THz 激光器金属网栅输出耦合镜设计

郭 超, 孔维鹏, 王 度, 罗振飞, 周 逊

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为追求光泵气体 THz 激光器更高的输出功率和更好的光束质量, 设计制作了金属网栅输出耦合镜, 金属网栅输出耦合镜相比传统的小孔输出镜具有很多优势。详细描述了金属网栅输出耦合镜的结构, 研究了金属网栅的理论模型。选择 $g/2a=76\text{ }\mu\text{m}/20\text{ }\mu\text{m}$ 和 $g/2a=76\text{ }\mu\text{m}/10\text{ }\mu\text{m}$ 这 2 组参数制作了金属网栅输出耦合镜, 利用远红外傅里叶光谱仪对其 THz 波段的透过率进行测试, 根据计算仿真得到结论: 随着金属网栅线宽 $2a$ 的增大, 金属网栅的 THz 辐射透过率增大。

关键词: THz 激光器; 金属网栅输出耦合镜; 光刻技术; 远红外傅里叶光谱

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0167

Research of hybrid metal-mesh output coupler on optically pumped gas molecules THz laser

GUO Chao, KONG Weipeng, WANG Du, LUO Zhenfei, ZHOU Xun

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In the pursuit of increased THz laser output power and higher beam quality, hybrid metal-mesh output coupler is designed and fabricated. The advantages of hybrid metal-mesh output coupler and its structure are described in this paper. The model of metal-mesh is studied to evaluate the transmittance. $g/2a=76\text{ }\mu\text{m}/20\text{ }\mu\text{m}$ and $g/2a=76\text{ }\mu\text{m}/10\text{ }\mu\text{m}$ are chosen to fabricate hybrid metal-mesh output coupler, and its THz transmittance is evaluated by Far Infrared Rays(FIR) Fourier transform spectroscopy. This study and former researches show that the transmittance of metal-mesh gets higher with the increase of $2a$.

Key words: THz laser; hybrid metal-mesh output coupler; photoetching; far infrared Fourier transform spectroscopy

太赫兹(THz)波处在电磁波谱 0.1 THz~10 THz 的特殊位置^[1], 在它 2 侧的红外和微波技术已经十分成熟了, 而 THz 波段的应用却刚刚起步, 这是因为 THz 波缺乏有效的产生方法和检测手段。由于对 THz 波段电磁辐射的了解还处于一个相对“空白”的阶段, 所以 THz 波谱也被称为 THz 空隙(THz gap)。近几年来, 超快激光技术、非线性光学技术以及半导体微电子技术的飞速发展, 带动了 THz 技术的进步。THz 技术是目前非常热门的研究领域, 其中研制出高功率、高能量、高效率、宽带可调并且能在室温下稳定运转的 THz 辐射源是 THz 技术最关键的问题。

1 金属网栅输出镜

光泵气体 THz 激光器是目前研究较多且比较实用的 THz 辐射源, 因为它的输出功率较高且稳定, 设备造价低且室温运行稳定。在研究光泵气体 THz 激光器的过程中, 影响激光器输出功率和光谱性质的因素有很多, 其中就包括激光器谐振腔输出镜的光学性质(反射率 R , 透过率 T)。在其他影响因素固定的条件下, 存在一个可获得激光器最大输出功率的最优化的输出镜反射率 R 。通过一个连续可变反射率 R 的反射镜来获得最优化的反射率是一个很好的方法^[2], 同时也可以利用它研究激光器的增益性质。

对于大部分 THz 辐射源的应用场景, 尽可能高的功率输出和光束质量同等重要。为提供最优化的 EH_{11} 腔内模式的耦合, 从而得到最大的功率和最好的高斯光束质量, 本文描述了金属网栅输出耦合镜的设计和制作过程, 它相对传统的输出耦合镜技术具有很多优点^[3-4]。表 1 比较了传统的小孔输出耦合镜和金属网栅输出耦合镜的优劣。小孔输出耦合镜是镀有高导电性金属的平面或者球面镜子。为了获得输出功率, 2 个反射镜中的 1 个会被穿孔, 通常是在中间开一个圆孔。通过改变中间圆孔的大小, 可以获得不同的有效透射率 T ^[5-6]。小孔输出耦合镜的优点在于制作简单、耐受功率较高, 但由于中间小孔的存在会影响输出光束的质量, 因此选择制作较为复杂的金属网栅输出耦合镜来获得更好的输出光束质量。

表1 金属网栅输出镜与小孔输出镜的比较结果
Table1 Comparison between hybrid metal-mesh output coupler and hole output coupler

	beam quality	propagating mode	pumping light	adjust reflectivity
hole output coupler	diameter of hole $>\lambda$, beam diffraction and divergence	attenuation in hole stimulates high order mode EH_{nm}	pumping light leaks from hole	diameters of hole impact both pumping light and THz radiation
hybrid metal-mesh output coupler	mesh period $<\lambda$, no diffraction	surface homogeneity, most fundamental mode EH_{11}	reflectivity of pumping light $>95\%$	changing metal-mesh only impacts THz radiation

金属网栅输出耦合镜中的金属网栅是决定其 THz 透过率性质的关键因素, 各国科学家很早就开始了对远红外波段金属网栅的理论研究, 1951 年 Marcuvitz 首先提出利用等效电路模型研究条状网栅性质^[7], Ulrich 等人把他的研究结果发展到网状金属网栅并得到了很好的实验结果^[8], 后续 Whitbourn 和 Compton 给出了计算电解质衬底上金属网栅的光学性质的公式^[9]。

金属网栅输出耦合镜如图 1 所示, 由 3 部分组成, 用于支撑整个耦合结构的低损耗衬底; 沉积在衬底上的红外增反多层介质膜, 它对 $9\text{ }\mu\text{m}$ 泵浦辐射的反射率 $R\geq 95\%$, 因此可以优化泵浦效率。沉积在红外增反膜表面的金属网栅决定了输出镜的 THz 辐射性质, 整个镜面的反射率均匀, 从而很好地维持了腔内模式。

单晶硅和石英是比较好的衬底材料, 据报道, 电阻率 $\rho\geq 1\text{ k}\Omega/\text{cm}$ 的 N 型硅(Si)的吸收系数 $\alpha\leq 0.1\text{ cm}^{-1}$, 并且具有平坦的色散曲线^[10], C 切割石英晶体对于 $\lambda\geq 100\text{ }\mu\text{m}$ 的波长吸收系数 $\alpha\leq 1.2\text{ cm}^{-1}$ ^[11], 使用傅里叶透射光谱仪定性证实, N 型硅和石英具有低损耗。因为输出镜高度暴露在 $9\text{ }\mu\text{m}$ 波长的泵浦激光下, 所以必须考虑衬底的红外(IR)性质, 镀有红外增反膜的硅衬底具有相当高的损伤阈值, 可以泵浦激光承受很高的功率密度^[11], 虽然石英在 $9\text{ }\mu\text{m}\sim 11\text{ }\mu\text{m}$ 波段具有较强的吸收, 但给石英衬底镀上红外增反膜之后, 可以承受大于 10 W 的泵浦激光功率。综合考虑各种因素, 选择直径 36 mm , 沿着 C 轴切割的石英晶体片作为衬底材料, 考虑输出镜要承受的气体压强, 厚度设计为 2 mm 左右。一般作为红外波段高反膜, 可以考虑在衬底上镀一层金属, 但作为气体泵浦 THz 激光器输出镜, 必须考虑输出镜的 THz 性质, 因此红外高反膜选择多层介质膜。由 Ge 和 ZnS 组成的多层介质膜可以依靠光栅光谱法, 产生与镀金膜表面相当的反射率^[12]。由于多层介质红外增反膜的厚度远远小于 THz 辐射波长, 因此认为它对输出镜的 THz 性质影响很小。

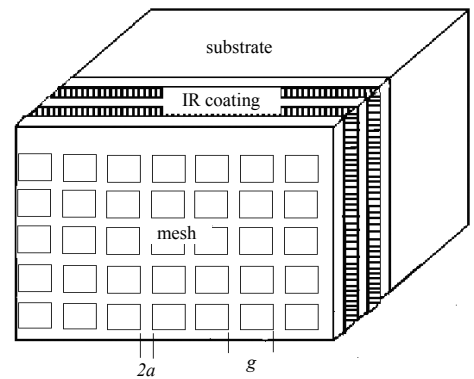


Fig.1 Schematic of hybrid metal-mesh output coupler
图 1 金属网栅输出耦合镜结构图

2 金属网栅设计制作

从目前的加工工艺考虑, 一般选择制作二维电感性金属网栅, 如图 1 所示, g 为网栅周期, $2a$ 为线宽。二维电感性金属网栅的对称性决定了入射光的偏振方向不影响网栅的透射率。

对于金属网栅, 要求只存在零级反射和透射, 不产生衍射, 因此必须满足 $g/\lambda<1$ 。金属网栅结构的控制原理为 $g/\lambda\rightarrow 1$, 透射率 $T\rightarrow 0$, 考虑光泵气体 THz 激光器输出镜的要求, 选择 $g/2a=76/20$ 和 $g/2a=76/10$ 这 2 组参数设计制作金属网栅输出耦合镜。根据透射率的计算公式并参考之前研究人员的研究结果^[13]得出结论, 随着金属网栅周期与线宽之比 $g/2a$ 的增大, 金属网栅的 THz 波透射率降低。

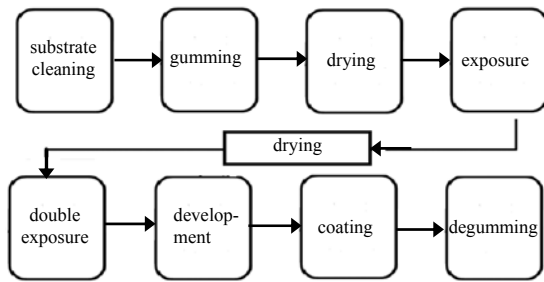


Fig.2 Fabrication flow chart of metal-mesh
图2 金属网栅制作流程图

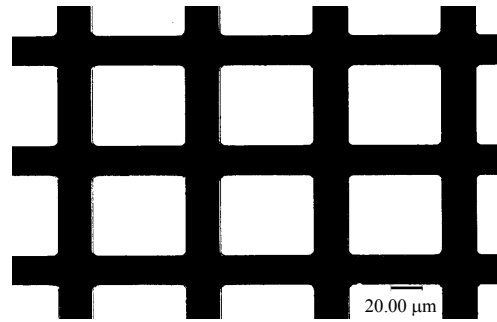


Fig.3 Surface structure of hybrid metal-mesh output coupler
图3 金属网栅输出镜表面结构

金属网栅制作工艺如图2所示。利用掩膜投影曝光光刻技术,在镀有红外增反膜的石英衬底上制作金属网栅^[14]。首先用丙酮清洗衬底,然后将衬底吹干烘烤,烘干之后使用光刻胶进行涂胶。在60 RPM转速下,光刻胶可以均匀地涂在洁净的样品上,涂好胶后在烘烤机上烘烤样品,然后在光刻机上曝光,曝光结束后进行反转烘,然后再次曝光、显影,使用磁控溅射技术镀上金膜,最后去胶之后就得到了金属网栅输出耦合镜。使用光学显微镜观察其表面如图3所示。

3 结果与测试

使用远红外傅里叶光谱仪测试制备好的金属网栅输出耦合镜在1.2 THz~4.8 THz波段的透射率,测试结果如图4所示, $g/2a=76/20$ 的样品平均THz透射率为10%, $g/2a=76/10$ 的样品平均THz透射率为4%,而且金属网栅输出耦合输出镜的THz辐射透射率随着金属网栅的 $2a$ 加宽而增大。结果表明制作好的样品基本达到作为光泵气体THz激光器输出耦合镜的要求。

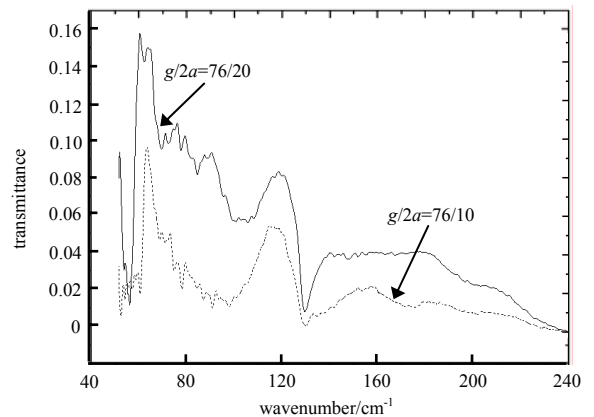


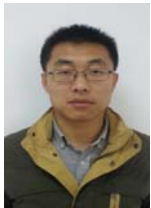
Fig.4 THz transmittance of hybrid metal-mesh output coupler
图4 金属网栅输出耦合镜THz透射率测试结果

参考文献:

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学与技术[M]. 北京:北京大学出版社, 2007. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. Science and Technology of Terahertz[M]. Beijing:Peking University Press, 2007.)
- [2] ULRICH R,BRIDGES T J,POLLACK M A. Variable metal mesh coupler for far infrared lasers[J]. Applied Optics, 1970,9(11):2511-2516.
- [3] DANIELEWICZ E J. Assignments of the high power optically pumped cw laser lines of CH₃OH[J]. Journal of Quantum Electronics, 1977,13(6):485-490.
- [4] DANIELEWICZ E J,COLEMAN P D. Hybrid metal mesh-dielectric mirrors for optically pumped far infrared lasers[J]. Applied Optics, 1976,15(3):761-767.
- [5] KOTTHAUS J P. High power output from a submillimeter cw gas laser[J]. Applied Optics, 1968,7(12):2422-2423.
- [6] MCCUMBER D E. Eigenmodes of an asymmetric cylindrical confocal laser resonator with a single output-coupling aperture[J]. Bell System Technical Journal, 1969,48(6):1919-1936.
- [7] ULRICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J]. Infrared Physics, 1967,7(1):37-55.
- [8] WHIBOURN L B,COMPTON R C. Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary[J]. Applied Optics, 1985,24(2):217-220.
- [9] DENSING R,ERSTLING A,GOGOLEWSKI M,et al. Effective far infrared laser operation with mesh couplers[J]. Infrared Physics, 1992,33(3):219-226.
- [10] GRISCHKOESKY D,KEIDING S,VAN E M,et al. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990,7(10):2006-2015.
- [11] LOEWENSTEIN E V,SMITH D R,MORGAN R L. Optical constants of far infrared materials. 2:crystalline solids[J]. Applied Optics, 1973,12(2):398-406.

- [12] HEANEY J B, STEWART K P, HASS G. Transmittance and reflectance of crystalline quartz and high-and low-water content fused silica from 2 μm to 1 mm[J]. Applied Optics, 1983,22(24):4069.
- [13] MARCUVITZ N. Waveguide Handbook[M]. New York:McGraw-Hill Book Company, 1951.
- [14] 冯晓国,方梁,孙连春. 金属网栅结构参数设计与制作[J]. 光学精密工程, 2005,13(1):59–64. (FENG Xiaoguo, FANG Liang, SUN Lianchun. Design and fabrication of metal-mesh[J]. Optics and Precision Engineering, 2005,13(1):59–64.)

作者简介:



郭 超(1988–), 男, 山东省滨州市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为光学器件.
email:394045623@qq.com.

孔维鹏(1985–), 男, 河北省邯郸市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为气体太赫兹激光器.

罗振飞(1985–), 男, 广西壮族自治区罗城县人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹与物质相互作用.

王 度(1986–), 男, 湖北省安陆市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹激光器及应用技术.

周 逊(1968–), 男, 成都市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为光电和信息技术.

(上接第 166 页)

- [5] SUTHERLAND Richard L. Handbook of Nonlinear Optics[M]. New York:Marcel Dekker, INC., 1996.
- [6] KARAPUZIKOV A I, MALOV A N, SHERSTOV I V. Tunable TEA CO₂ laser for long-range DIAL lidar[J]. Infrared Physics & Technology, 2000,41(2):77–85.
- [7] GORDON L A, WOODS G L, ECKARDT R C, et al. Diffusion-bonded stacked GaAs for quasiphase-matched second-harmonic generation of a carbon dioxide laser[J]. Electronics Letters, 1993,29(22):1942–1944.
- [8] DMITRIEV V G, GURZADYAN G G, NIKOGOSYAN D N. Handbook of Nonlinear Optical Crystals[M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 1999.

作者简介:



赵 刚(1962–), 男, 成都市人, 研究员, 主要从事军用激光与光电子技术产品及装备的研究与批量生产.email:zg41@126.com.

彭续金(1968–), 男, 湖北省潜江市人, 研究员, 主要从事军用激光电子学方面的研究.

杨 闯(1978–), 男, 黑龙江省绥化市人, 高级工程师, 主要从事固体激光研究.

蔡 和(1987–), 男, 四川省内江市人, 工程师, 主要从事激光光学研究.

刘亚萍(1982–), 女, 四川省西昌市人, 高级工程师, 主要从事机械结构研究.

黄俊峰(1988–), 男, 重庆市人, 工程师, 主要从事固体激光器及其应用研究.