

文章编号: 1672-2892(2011)03-0365-04

THz QCL 波导结构研究与光束质量分析

王 健¹, 吴卫东², 章小丽¹, 段素青³

(1.北京交通大学 光信息科学与技术研究所, 北京 100044; 2.中国工程物理研究院 激光聚变中心, 四川 绵阳 621900;
3.应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: THz 量子级联激光器是理想的固态 THz 源, 研究波导结构对激射光特性和远场光束质量的影响, 是 THz QCL 设计中的关键。本文采用有限元方法对 THz QCL 双面和单面金属波导结构的限制和损耗特性进行分析, 给出了限制因子、波导损耗和阈值增益随波导结构、激射波长等参数的变化关系。仿真实验结果表明: 与单面金属波导相比, 双面金属波导对光具有更好的限制作用, 损耗也比较小, 更适合做有源区的波导限制结构。在计算出波导中光场分布的基础上, 又利用矢量衍射理论分析了 THz QCL 的光束质量, 给出了不同波导宽度时出射光束的远场光束宽度和远场发散角, 从应用方面为 QCL 的设计提供了一定参考。

关键词: 太赫兹; 量子级联激光器; 波导; 光束质量

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

Research on waveguide structure and analysis of beam quality of THz QCL

WANG Jian¹, WU Wei-dong², ZHANG Xiao-li¹, DUAN Su-qing³

(1.Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China; 3.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: THz Quantum Cascade Laser(QCL) is an ideal solid-state THz source. It is an important part of THz QCL design to investigate the influence of waveguide structures on the properties of lasing light and beam quality. The confinement and loss properties for double-metal and single-metal waveguides of THz QCL are analyzed using finite element method. The dependence of confinement factor, waveguide loss and threshold gain on the waveguide structure, the lasing wavelength and other parameters is presented. The results show that compared with the single-metal waveguides, the double-metal waveguides have better light confinements and lower losses, so they are more suitable for waveguide confinement of active region. Based on the calculated light field distribution in the waveguides, the beam qualities are analyzed using the vector diffraction theory. Far-field beam widths and divergence angles for different waveguide widths are given, which has provided a helpful reference for QCL design from application perspective.

Key words: terahertz; Quantum Cascade Laser; waveguide; beam quality

在 THz 波段, 一方面波导对 QCL 有源区光场的限制十分困难; 另一方面自由载流子在此区域的吸收也很强, 因此设计一个对光场有良好限制的低损耗波导对于 THz QCL 的发展至关重要^[1]。另外, 出射光束质量对激光器性能的评估和应用非常重要。为此, 本文对 THz QCL 波导结构的限制和损耗以及出射光束质量这两方面的特性进行了分析和研究。

1 THz QCL 波导结构的研究

THz QCL 的常用波导结构有双面和单面金属波导 2 种^[2-3], 如图 1 所示。

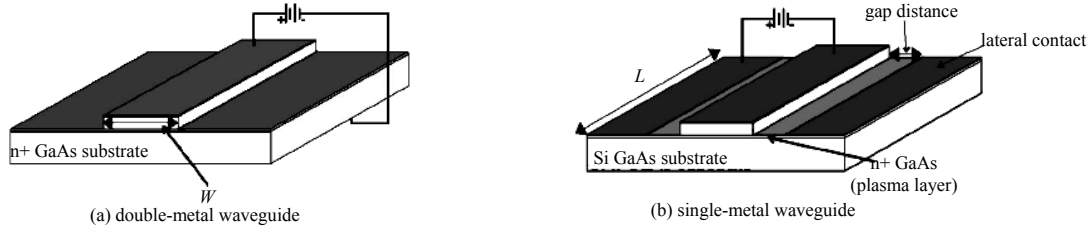


Fig.1 THz QCL waveguide structures

图 1 THz QCL 波导结构

根据麦克斯韦方程组可得波导中的电磁场应满足如下的 Helmholtz 方程:

$$\begin{cases} \nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \times (\varepsilon_r^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) - k_0^2 \mu_r \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_r 和 μ_r 分别是相对电容率和相对磁导率; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, λ 为真空中的波长。采用有限元法求解上述方程^[4-5], 求出波导中的电磁场分布即可求出波导限制因子、损耗等参数。

一般来讲, 波导各层的物质为非铁磁性的, 可近似认为相对磁导率 $\mu_r=1$, 而电容率一般与激光的激光频率(或波长)有关, 可使用 Drude-Lorentz 模型进行计算^[2,6]。根据此模型, 对于没有掺杂的砷化镓(GaAs)衬底, 其电容率的计算公式为:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \omega_{T_0}^2}{\omega_{T_0}^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_0=12.9$; $\varepsilon_\infty=11$; $\omega_{T_0}/2\pi=8.1\text{ THz}$; $\gamma/2\pi=0.07\text{ THz}$ 。对于有掺杂的砷化镓有源区(Active Region), 高掺杂的等离子接触层(Plasma Layer)和金属 Au 的电容率的计算都可使用以下公式:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_b \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau} \right) \quad (3)$$

式中: $\omega_p = \sqrt{Ne^2/\varepsilon_0 \varepsilon_b m}$, $e=1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$; $\varepsilon_0=8.854 \times 10^{-12}\text{ F/m}$ 。对于砷化镓有源区: $N=2 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$, $\varepsilon_b=12.96$, $m=6.23 \times 10^{-32}\text{ kg}$, $\tau=0.5\text{ ps}$; 对于高掺杂的等离子接触层: $N=5 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, $\varepsilon_b=12.96$, $m=6.23 \times 10^{-32}\text{ kg}$, $\tau=0.1\text{ ps}$; 对于金属 Au: $\varepsilon_b=8$, $N=5.9 \times 10^{22}\text{ cm}^{-3}$, $m=9.3 \times 10^{-31}\text{ kg}$, $\tau=21\text{ ps}$ 。

根据式(2)和式(3)求出的电容率, 再代入式(1), 采用有限元的方法即可解出波导中的电磁场分布和有效折射率, 为进一步分析波导的限制和损耗特性打下基础。波导的限制特性由限制因子 Γ 来描述, 其定义为:

$$\Gamma = \frac{\text{有源区的光功率}}{\text{总光功率}} = \frac{\iint_{\text{Active Region}} \text{Re}[(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \hat{z}] dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} \text{Re}[(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \hat{z}] dx dy} \quad (4)$$

波导的损耗 α_w 与有效折射率 N 之间的关系为:

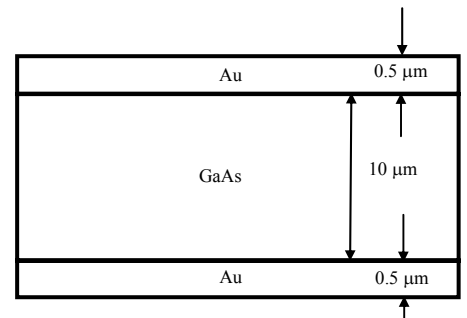
$$\alpha_w = \frac{4\pi}{\lambda} \text{Im}(N) \quad (5)$$

由此求出激光器单位长度阈值增益 g_{th} 与限制因子和波导损耗之间的关系为:

$$g_{th} = \alpha_w / \Gamma \quad (6)$$

2 计算结果及其分析

图 1 所示波导的横截面结构分别如图 2 和图 3 所示。为了分析波导限制因子、损耗随波导宽度、激光波长的变化关系, 在下面计算中, 设双面金属波导有源区的厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 上下包层 Au 的厚度都为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$; 单面金属波导有源区的厚度也为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 上包层

Fig.2 Cross section of double-waveguide structure
图 2 双面金属波导横截面图

的厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 接触层的厚度为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$, 衬底的厚度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。表 1 和表 2 分别为双面和单面金属波导的计算结果。

从表中的结果可以得出如下结论:

1) 双面金属波导的限制因子接近于 1, 而单面金属波导的限制因子比 1 小得多; 对于同一结构的波导, 波长越大, 损耗越大; 对于同一波长, 波导宽度越大, 损耗越小。

2) 双面金属波导性能比单面金属波导性能优越。更适合做 THz 量子级联激光器的波导结构。

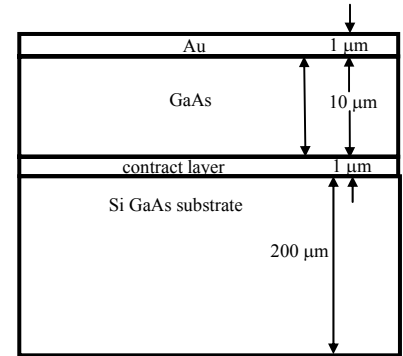


Fig.3 Cross section of single-waveguide structure
图 3 单面金属波导横截面图

表 1 双面金属波导的有效折射率、波导损耗、限制因子和阈值增益随激光波长和波导宽度的变化关系

Table1 Effective refractive index, waveguide loss, confinement factor and threshold gain vs. lasing wavelength and waveguide width in double-metal waveguide

lasing wavelength/ μm	waveguide width/ μm	N	α_w	Γ	g_{th}
100	50	3.487 5+0.011 3i	7.119 1	0.994 2	7.160 5
	100	3.548 0+0.010 5i	6.591 3	0.996 1	6.617 1
	150	3.562 0+0.010 4i	6.570 1	0.996 7	6.591 6
150	50	3.380 3+0.023 0i	9.627 3	0.993 7	9.688 4
	100	3.479 6+0.022 0i	9.232 1	0.996 0	9.269 2
	150	3.505 5+0.021 9i	9.198 6	0.996 7	9.229 0

表 2 单面金属波导的有效折射率、波导损耗、限制因子和阈值增益随激光波长和波导宽度的变化关系

Table2 Effective refractive index, waveguide loss, confinement factor and threshold gain vs. lasing wavelength and waveguide width in single-metal waveguide

lasing wavelength/ μm	waveguide width/ μm	N	α_w	Γ	g_{th}
100	50	3.538 2+0.120 7i	50.600 3	0.758 0	66.755 0
	100	3.617 9+0.110 5i	46.335 8	0.770 2	60.157 2
	150	3.639 8+0.108 4i	45.425 0	0.775 4	58.580 3
150	50	3.659 2+0.101 8i	63.994 3	0.649 3	98.555 6
	100	3.709 3+0.096 8i	60.875 6	0.657 5	92.593 3
	150	3.721 7+0.095 9i	60.274 2	0.660 8	91.212 6

3 光束质量的分析

对于 THz QCL, 其有源区的厚度仅为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 比激光光的波长小得多, 因此在研究其光束的特性时, 应使用矢量衍射理论。按照矢量瑞利——索末菲积分理论^[7-8], 若已知 $z=0$ 时平面 (x', y') 上的电场分布, 则可求出 z 为任意值时平面 (x, y) 上的电场分布, 其关系式为:

$$E_x(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_x(x', y', 0) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right) dx' dy' \quad (7)$$

$$E_y(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x', y', 0) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right) dx' dy' \quad (8)$$

$$E_z(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[E_x(x', y', 0) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right) + E_y(x', y', 0) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right) \right] dx' dy' \quad (9)$$

式中 $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}$ 。利用第 1 部分的有限元法求出激光器横截面电场分布之后, 再根据式(7)~式(9)即可求出空间中任意一点的光场, 从而进一步计算出光束宽度和远场发散角。

4 计算结果

1) 双面金属波导

经计算可知: 对于双面金属波导结构的激光光束, 随着 z 值的增加, 光斑呈椭圆形状, 并有规律地向外扩展。

在 $z=1\ 000, \lambda=0.1\ \text{m}$ 时, 对于波导宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 的波导, 光束宽度分别为: $W_x=0.205\ 7\ \text{m}, W_y=0.706\ 9\ \text{m}$, 远场发散角分别为 $\theta_x=45.806\ 4^\circ, \theta_y=74.202\ 6^\circ$; 波导宽度为 $50\ \mu\text{m}$ 的波导, 光束宽度分别为: $W_x=0.180\ 9\ \text{m}, W_y=0.705\ 7\ \text{m}$, 远场发散角分别为: $\theta_x=42.136\ 0^\circ, \theta_y=74.177\ 7^\circ$ 。

2) 单面金属波导

对于单面金属波导结构的激光光束, 当波导宽度为 $50\ \mu\text{m}$ 时, 光斑呈椭圆形, 且光斑有规律地向外扩展, 在 $z=1\ 000, \lambda=0.1\ \text{m}$ 时, 光束宽度分别为: $W_x=0.098\ 2\ \text{m}, W_y=0.307\ 9\ \text{m}$, 远场发散角分别为: $\theta_x=26.148\ 1^\circ, \theta_y=56.991\ 2^\circ$ 。当波导宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 时, 在近轴区域, 光斑不规则。随着 z 值的增加, 光斑逐渐变成 2 个椭圆的组合, 呈葫芦形状, 且有规律地向外扩展, 在 $z=1\ 000, \lambda=0.1\ \text{m}$ 处, 光斑在 y 轴上有 2 个极值点, 分别在 $y_1=-0.056\ \text{m}, y_2=0.076\ 5\ \text{m}$ 处。在 y 轴上光束的宽度为 $W_y=0.926\ 6\ \text{m}$, 远场发散角为 $\theta_y=77.819\ 3^\circ$, 在 y_1 处, 光束在 x 方向上的宽度为 $W_x=0.091\ 8\ \text{m}$, 远场发散角为 $\theta_x=24.645\ 3^\circ$; 在 y_2 处, 光束在 x 方向上的宽度为 $W_x=0.135\ 2\ \text{m}$, 远场发散角为 $\theta_x=34.055\ 5^\circ$ 。

5 结论

通过有限元方法, 首先计算了双面和单面金属波导结构 THz QCL 的限制因子、波导损耗和阈值增益。计算结果表明: 双面金属波导的限制因子接近于 1, 限制损耗和阈值增益又比单面金属波导的小, 双面金属波导更适合做有源区的波导限制结构。其次, 又利用矢量衍射公式计算了双面和单面金属波导结构 THz QCL 出射光束的远场光束宽度和远场发散角。单面金属波导结构 THz QCL 远场光束宽度和远场发散角一般比双面金属的小, 说明单面金属波导结构 THz QCL 的光束质量比双面金属的光束质量好。但 2 种波导结构的光束发散角都很大, 必须对光束进行整形处理后才可使用。

参考文献:

- [1] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. Nat. Photonics, 2007(1):517-525.
- [2] Kohen S, Williams B S, Hu Q. Electromagnetic modeling of terahertz quantum cascade laser waveguides and resonators[J]. J Appl. Phys., 2005, 97(5):1-9.
- [3] Williams B S, Callebaut H, Hu Q et al. Terahertz quantum-cascade laser at $\lambda \approx 100\ \mu\text{m}$ using metal waveguide for mode confinement[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83(11):2124-2126.
- [4] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 王建国, 译. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [5] 王健, 雷乃光, 余重秀. 圆空气孔微结构光纤限制损耗的分析[J]. 物理学报, 2007, 56(2):946-951.
- [6] Sachs R, Roskos H G. Mode calculations for a terahertz quantum cascade laser[J]. Opt. Express, 2004, 12(10):2062-2069.
- [7] Rudolf Karl Luneburg. Mathematical theory of optics[M]. California: University of California Press, 1964.
- [8] Ciattoni Alessandro, Crosignani Bruno, Porto Paolo Di. Vectorial analytical description of propagation of a highly nonparaxial beam[J]. Optics Communication, 2002, 202(1-3):17-20.

作者简介:



王 健(1963-), 男, 天津市人, 副教授, 博士, 主要研究方向为光波导理论、光纤传感、全光信号处理等. email: jwang@bjtu.edu.cn.

吴卫东(1967-), 男, 武汉人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为纳米功能材料。

章小丽(1956-), 女, 安徽桐城人, 副教授, 主要研究方向为凝聚态物理。

段素青(1963-), 男, 山西朔州人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向凝聚态物理。