

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0866-03

# 表面等离子体激光 Q 开关原理研究

唐永新 杨 华 郭继华 吴念乐 李师群

(清华大学物理系, 北京 100084)

摘要: 提出了表面等离子体波调 Q 方法, 阐述了它调 Q 的原理, 对表面等离子体波 Q 开关的特性进行了理论和原理性实验研究。

关键词: 表面等离子体波; Q 开关; Otto 结构

中图分类号: TN241 文献标识码: A

## 1 引 言

调 Q 技术是一种获得高峰值功率光脉冲的激光技术。近十几年来, 受抑全内反射 (FTIR) 调 Q 技术正越来越受到人们的重视<sup>[1~8]</sup>。受抑全内反射 Q 开关有诸多优点, 被广泛应用于医疗外科、军事、精密测量等领域

受抑全内反射 Q 开关的反射率特性曲线 (如图 1 所示) 表明, 只有当两个棱镜的间距为  $0.1\lambda$  左右时, Q 开关方能充分地闭合。实际应用中, 这个间距难以达到 (尤其对于较短波长的激光器), 所以不能达到很高的调制深度。为了克服这个缺点, 我们提出了表面等离子体波 Q 开关的新方法。

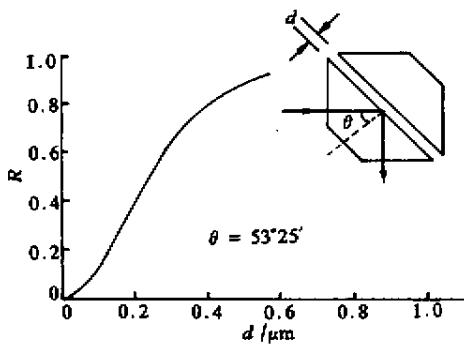


Fig. 1 Reflectivity of the FTIR Q-switch versus thickness of the air gap  $d$

## 2 表面等离子体波 Q 开关的原理

### 2.1 表面等离子体波

金属自由电子可看作是高密度的电子液体 (等离子体), 发生在这种等离子体表面的起伏称为表面

等离子体波 (SPW)。p 偏振单色光通过玻璃棱镜入射到玻璃/金属膜/电介质界面上, 如果入射角大于全反射的临界角, 入射光被强烈反射, 只有一小部分消逝波渗透进金属膜。对于一特定入射角, 消逝波平行于金属/电介质界面的分量与表面等离子体波的波矢完全匹配, 两种电磁波模式会强烈地耦合, 导致入射光到表面等离子体波的能量共振转移, 反射光强度显著降低。表面等离子体波在表面非线性光学检测、表面膜层特性研究以及表面生物、物理、化学传感器等研究领域已经得到了应用<sup>[9, 10]</sup>。

### 2.2 计算模型

根据表面等离子体的激发条件, 有所谓 Otto 结构和 Kretschmann 结构<sup>[9]</sup>。Kretschmann 结构从入射面开始, 按“棱镜-金属-空气”排列, 如作 Q 开关, 激光脉冲容易对金属膜造成损伤; 而 Otto 结构从入射面开始, 按“棱镜-空气-金属”排列, 不用镀金属膜的表面作反射面, 不容易造成激光损伤, 所以我们采用 Otto 结构设计表面等离子体波 Q 开关。考虑单层空气膜, 金属设为无限厚 (金属膜只要足够厚就可以激发表面等离子体波)。由膜系的特征矩阵<sup>[11]</sup>, 可以得到空气膜与金属基片的组合导纳:

$$Y = \frac{i\eta_1 \sin\delta_1 + \eta_2 \cos\delta_1}{\cos\delta_1 + i(\eta_2/\eta_1) \sin\delta_1}, \quad (1)$$

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 d_1 \cos\theta_1, \quad (2)$$

下标 0 代表玻璃, 1 代表空气, 2 代表金属;  $\lambda$  为真空中入射光波长,  $d_1$  为空气间隙,  $\theta_0$  为入射角,  $\theta_1$  为折射率  $\theta_2$  由折射定律导出, 为复数;  $N_j (j = 0, 1, 2)$  为复折射率,  $\eta_j$  为有效导纳, 由于只有 p 波才能激发表面等离子体波,  $\eta_j = N_j / \cos\theta_j$ 。反射率为:

$$R = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2. \quad (3)$$

### 2.3 计算结果及讨论

对于波长  $1.064 \mu\text{m}$ , 选取不同的参数<sup>[11]</sup>; 对 Au、Ag、Al 三种情况, 用数值求解方法可求出 Otto 结构中反射率与入射角、空气间隙的关系。

反射率随入射角和空气间隙的关系比较复杂。首先确定激光的入射角, 使得以此角度入射的激光, 在某个确定的空气间隙有最小反射率。称此入射角和此空气间隙为最佳入射角和最佳空气间隙。对 Au、Ag、Al 三种情况, 分别求得最佳入射角  $\theta$  和最佳空气间隙  $d$  的值为:

$$\begin{aligned} \text{Au: } \theta &= 44.12^\circ, & d &= 1.85 \mu\text{m}; \\ \text{Ag: } \theta &= 44.23^\circ, & d &= 1.87 \mu\text{m}; \\ \text{Al: } \theta &= 43.65^\circ, & d &= 1.46 \mu\text{m}. \end{aligned}$$

以最佳入射角入射, 作出反射率随空气间隙变化的曲线, 如图 2 所示。反射率最小值都出现在间隙为  $1 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$  的范围内, Q 开关工作区可选在  $d$  大于该值的区域, 这使得两棱镜无需靠得很近, 就可以获得较高的调制深度。对于其它波长, 反射率随空气间隙变化的曲线形状基本相似, 但反射率最低点会水平移动。例如对  $0.6328 \mu\text{m}$ , 反射率最低点对应空气间隙约为  $0.65 \mu\text{m}$ (对 Al 而言)。另外, 最佳入射角、最小反射率也都会因波长不同而有变化。

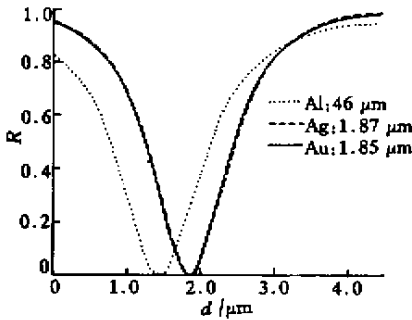


Fig. 2 Comparison of theoretical reflectivity curves with different metals: Au, Ag, Al

### 2.4 表面等离子体波 Q 开关与受抑全内反射 Q 开关的比较

表面等离子体 Q 开关与受抑全内反射 Q 开关相比, 空气间隙较大就可以获得较好的调制效果。这就弥补了受抑全内反射 Q 开关不适用于短波长激光器的缺陷, 另外, 表面等离子体 Q 开关更容易调节两棱镜的初始间距。

当然, 表面等离子体 Q 开关也存在着一些缺陷。如: 只有 p 偏振波才能激发表面等离子体波, 所以激光腔内需插入一偏振片; 激光的腔内功率密度

不能太高, 否则有可能损伤金属膜, 所以比较适用于二极管抽运的中、小功率全固化激光器。

## 3 表面等离子体波 Q 开关的原理性实验

图 3 为用  $632.8 \text{ nm}$  的 He-Ne 激光测得的表面等离子体 Q 开关  $45^\circ$  入射时反射率随空气间隙  $d$  的关系, 为保护铝膜, 在未镀膜棱镜的表面两端各贴了一层很薄的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 光刻胶, 所以实验曲线没有反映  $d$  小于  $0.1 \mu\text{m}$  时的反射率。可以看到, 实验曲线与理论计算曲线形状基本一致, 确实可以在较大空气间隙时利用这类器件作为 Q 开关。

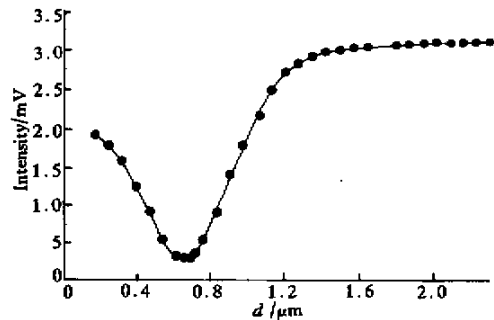


Fig. 3 Experimental reflectivity curve of the SPW Q-switch versus thickness of the air gap

图 4 为表面等离子体 Q 开关在压电陶瓷驱动下的动态特性曲线。下方的曲线为压电陶瓷脉冲驱动电源的信号(电压为  $300 \text{ V}$ , 已衰减 10 倍), 上方的曲线为 Q 开关反射率随时间变化的信号。可以看出, 由于声波在石英中传输需一定时间, 反射率信号较电源信号有一定的时间滞后; Q 开关上升沿时间约为  $2.0 \mu\text{s}$ , 并在打开状态维持  $10 \mu\text{s}$  左右, 加大电源电压, 上升沿基本不变, 其原因可能是压电陶瓷的中心响应频率所致。上述动态特性曲线与普通受抑全内反射 Q 开关的同类曲线相似, 可用于激光器中

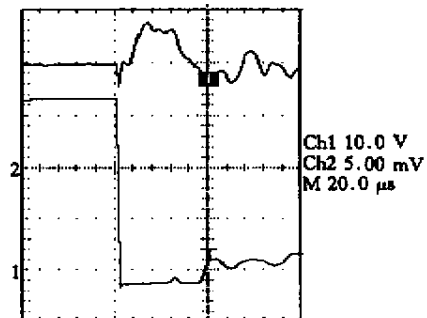


Fig. 4 Experimental characteristic of SPW Q-switch

作为调  $Q$  器件。

结论 提出了表面等离子体波  $Q$  开关,阐述了表面等离子体波的原理,计算了 Otto 结构的反射率特性曲线,计算表明,表面等离子体  $Q$  开关较受抑全内反射  $Q$  开关可以在较大空气间隙时获得更高的调制深度;同时对表面等离子体  $Q$  开关的特性进行了测量,实验数据表明,在较大空气间隙时可以利用这类器件作为  $Q$  开关。

### 参 考 文 献

- [1] 张镇西, 张志勇, 程向明. FTIR- $Q$  开关的理论探讨. 光学学报, 1984, 4(5): 450 ~ 455
- [2] 屈乾华, 时顺森. FTIR- $Q$  开关 Nd:YAG 激光器巨脉冲特性的研究(第一部分:理论分析). 兵器激光, 1982, (2): 21 ~ 30
- [3] 程向明, 黄丽清, 王祥林. 受抑全内反射  $Q$  开关性能的研究. 激光杂志, 1997, 18(5): 32 ~ 34
- [4] Sverchkov S E, Dender B I *et al.*. Effective eyesafe

frustrated total internal reflection  $Q$ -switched erbium glass lasers. *Proc. SPIE, Solid State Laser III*. 1992, 1627: 42 ~ 45

- [5] Konz F, Frenz M, Roamano V *et al.*. Active and passive  $Q$ -switch of a 2.79  $\mu\text{m}$  Er, Cr: YSGG laser. *Opt. Commun.*, 1993, 103(5,6): 398 ~ 404
- [6] Hoge A, Horbe G, Lubatschowski H *et al.*. 2.70  $\mu\text{m}$  CrEr: YSGG laser with high output energy and FTIR- $Q$ -switch. *Opt. Commun.*, 1996, 125(1~3): 90 ~ 94
- [7] Hoge A, Ziolk G C, Lubatschowski H *et al.*. FTIR- $Q$ -switched 3  $\mu\text{m}$  Erbium lasers for applications in laser surgery. *Laser und Optoelektronik*, 1997, 29(2): 45 ~ 51
- [8] Georgescu S, Lupei V.  $Q$ -switch regime of 3  $\mu\text{m}$  Er:YAG lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, QE-34(6): 1031 ~ 1040
- [9] 杜卫冲, 陈抗生. 采用表面等离子体激元波技术测定 LB 膜的光学参数. 光学学报, 1991, 11(12): 1125 ~ 1129
- [10] 郭继华. 表面等离子体波检测的新技术研究. 光学学报, 1996, 16(9): 1322 ~ 1325
- [11] 唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术. 北京: 机械工业出版社, 1989. 19, 143

## Study of Surface Plasma Wave $Q$ -Switch

Tang Yongxin Yang Hua Guo Jihua Wu Nianle Li Shiqun

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 3 July 2000; revised 21 August 2000)

**Abstract:** The surface plasma waves (SPW)  $Q$ -switch is proposed. The principle of SPW  $Q$ -switch is described and the characteristic of SPW  $Q$ -switch is obtained by theoretical and experimental investigation.

**Key words:** surface plasma waves;  $Q$ -switch; Otto structure