

LiNbO₃-ZF₆ 玻璃声光 Q 开关

吕建华 刘伟 魏洁云 程关锴 朱三义 方正
(上海市激光技术研究所)

一、声光相互作用及声光介质几何尺寸的考虑

当波矢量为 \mathbf{K} 、角频率为 Ω 、宽为 L 的声波沿 z 轴传播, 而波矢量为 \mathbf{k} 、角频率为 ω 、束径为 d 的单色光在 xy 平面内与 x 轴成 θ_0 角入射时 (如图 1 所示), 由波动方程出发^[1,2], 声光相互作用区域内介质折射率为

$$n(z, t) = n + \Delta n \cdot \sin(\Omega t - Kz).$$

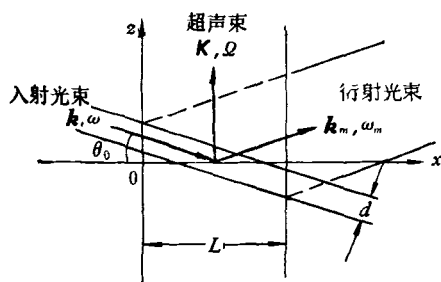


图 1 声光相互作用

超声不存在时, $\Delta n = 0$; 加上超声, 光波电场被展成相应各衍射级的一系列平面波. 在 $\frac{K^2 L}{k} < \pi$ 时为喇曼-奈斯 (Raman-Nath) 衍射, m 级衍射光强为

$$I_m = I_0 J_m^2 \left[\xi \frac{\sin(KL \tan \theta_0 / 2)}{KL \tan \theta_0 / 2} \right],$$

与 x 轴的夹角 θ_m 为

$$\sin \theta_m = \frac{\sin \theta_0 + mK/k}{1 + m\Omega/\omega},$$

式中 J_m 为 m 阶贝塞尔函数, $\xi = -k_f \cdot \Delta n \cdot L / \cos \theta_0$, k_f 为光在自由空间中的波数.

在 $\frac{K^2 L}{k} > \pi$ 时为布拉格 (Bragg) 衍射, 仅

E_1 (或 E_{-1}) 及 E_0 不为零, 当入射角 θ_0 为布拉格角 θ_B ($\equiv \frac{K}{2k}$) 时, 一级衍射效率 η_1 ($\equiv \frac{I_1}{I_0}$) 达到最大

$$\left(\frac{I_1}{I_0} \right)_{\max} = \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\lambda_l^2} M_2 \frac{L}{\omega} P_{\#}} \right],$$

式中 λ_l 为光在自由空间的波长, L 为声束在 x 方向的长度, 即换能器的长度; ω 为声束在 y 方向上的宽度, $P_{\#}$ 为声功率. M_2 为介质品质因数, $M_2 = n^6 \rho^2 / \rho v_m^3$, 其中 ρ 是介质密度, ρ 是介质光弹性常数, v_m 为声波在介质中的传播速度, n 为介质的折射率.

对于窄带器件设计来说, 效率是一个重要考虑因素, 因此介质的选择要权衡 M_2 值的大小. 在衍射效率低时, 上式近似为

$$\eta_1 \approx \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\lambda_l^2} M_2 \frac{L}{\omega} P_{\#}} \right]^2.$$

我们研制的 Q 开关是对 1.06 μm 波长设计的布拉格器件, 在 6328 \AA 波长下为喇曼-奈斯衍射. 用单模 He-Ne 激光进行器件测试和匹配工作, 可以提高器件在 1.06 μm 下的性能. 零级光调制度 M_0 ($\equiv \frac{I_{0\max} - I_{0\min}}{I_{0\max} + I_{0\min}}$) 的测试反映了开关设计、材料和工艺的综合状况.

在波动方程求解过程中, 光波和声波均视为平面波, 从而无法估计束几何结构的影响. 从偶极矩再辐射观点出发, 便能得到计及上述影响的密致解^[3]. 此时衍射光束功率为

$$P = \frac{nc}{8\pi} \left[\frac{\mathbf{P}_{in} \times \mathbf{k} \times \mathbf{k}}{k} \right]^2 \left(\frac{2\pi^2 \omega L}{n^2 \cos \theta_0} \right)^2 g,$$

式中 \mathbf{P}_{in} 为介质感生极化强度, g 跟束几何结构有关, 是 α ($\equiv 2L \sin \theta_0 / \omega$) 的函数. 当光束和声束为矩形均匀强度分布时, $g = 3\alpha - 1/3\alpha^2$

($\alpha \geq 1$) 或 $g = 1 - \alpha/3$ ($\alpha \leq 1$); 而当光束和声束为高斯强度分布时, $g = (1 + \alpha^2)^{-1/2}$. 这两种极端情形 g 的差值最大也不超过 8%. 仅当 $\alpha = 0$ 即 $\theta_0 = 0$ 时 $g = 1$. 故喇曼-奈斯衍射不用考虑几何结构, 而布拉格衍射必然会因计及几何结构而降低衍射效率.

Δn 可用介质应变 s 和光弹性常数 p 来描述, 即 $\Delta n = -n^3 ps/2$, 而介质中每单位体积总能的时间平均为 $\frac{1}{2} TS^2$, 其中 T 是介质的弹性模量, 则有

$$s = \sqrt{\frac{2I_m}{\rho v_m^3}}$$

式中 I_m 为声强. 此外 P_{in} 和 Δn 及入射光束电场 E 的关系为^[4]

$$P_{in} = \frac{n^2}{4\pi} \left(\frac{\Delta n}{n} \right) E.$$

结果我们就得到计及几何结构时布拉格衍射下的效率为

$$\eta = \left[\frac{1}{2} k \left(\frac{M_2 P_m L}{2\omega} g \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2.$$

这跟平面波条件下所得到的衍射效率在形式上极相似, 只是多了一个修正因子 g 而已.

声光介质的选取对换能器尺寸的确定以及给定衍射效率下要求的声功率密切相关. 通常选取透光性好、声衰减低、品质因数 M_2 大的介质.

由于玻璃光学质量均匀、价廉、易于加工, 我们选取 ZF₆ 玻璃作声光介质. 其声速 $v_m = 3.8 \times 10^5$ cm/s, 密度 $\rho = 4.8 \times 10^3$ kg/m³, 1.06 μ m 时折射率 $n = 1.72753$. 选取换能器中心频率 $f_0 = 40$ MHz, 则声波长 $\Lambda_m = v_m/f_0 = 0.95 \times 10^{-2}$ cm. 介质中的布拉格角 $\theta_B = \frac{K}{2k} = \frac{\lambda}{2\Lambda_m n} = 3.24 \times 10^{-3}$ 弧度 (0.186 度). 根据布拉格衍射要求 $\frac{K^2 L}{k} > \pi$, 声光介质长度 $L > \frac{2\Lambda_m^2 n}{\lambda} = 2.93$ cm; 另外, 考虑到换能器加工误差及超声源制作的要求, 设声频带宽为 ± 5 MHz, 要求 $L < \frac{v_m^2}{\lambda f_0 \cdot \Delta f} = 5.9$ cm. 其次, 为

确保声光充分相互作用, 要求入射光衍射角 $\delta\phi$ 近似等于声衍射角 $\delta\theta$. 而 $\delta\theta = \frac{\Lambda_m}{L}$, 当 $\delta\phi$ 为 2 毫弧度时, $\frac{L}{\Lambda_m} = 500$, 相应 $L = 4.75$ cm, 故取 $L = 4.8$ cm. 由此还可估算开关置于 1.06 μ YAG 腔内效率 $\eta_1 = 50\%$ 时所需的声功率: 这时有 $\frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\lambda_l^2} M_2 \frac{L}{\omega} P_m g}$, 设光束和声束均为矩形强度分布, 并假定光束与声束宽度相等取 $\omega = 0.3$ cm, 将 $M_2(1.06 \mu\text{m 时}) = 4.51 \times 10^{-15}$, $\alpha = \frac{2L}{\omega} \sin \theta_0 = 10.37 \times 10^{-2}$, $g = 1 - \frac{\alpha}{3} = 0.965$ 代入, 则 $P_m = \frac{\lambda_l^2 \omega}{8M_2 L g} = 2.02$ W.

玻璃介质虽然声衰减较大, 但使用时只要将通光区域靠近换能器, 仍能得到很好的效果. 实验表明, 选用 LiNbO₃ 作换能器材料是比较合适的, 它的驱动功率低、效率高, 不会象石英-熔石英开关那样出现严重的温升.

二、换能器及其匹配问题

换能器晶片切型及外加电场方向应使晶片产生的超声波以纯粹纵模(或切变模)向声光介质传播. 为使器件发挥最佳性能, 必须做好两部分的匹配工作: 首先, 换能器与声光介质两者声阻抗要匹配, 以使声功率最大限度进入介质. 这可适当选取两者材料及控制换能器粘结层厚度来解决; 其次, 要求超声激励源电输出阻

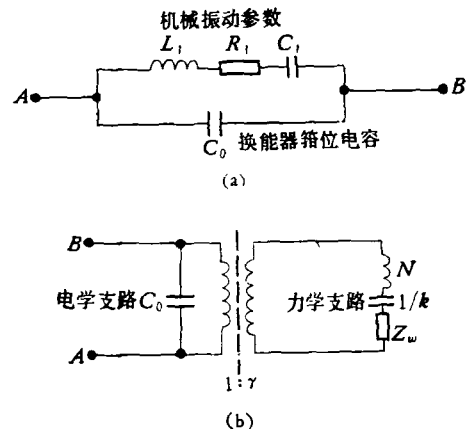


图 2 换能器的等效电路

抗(50Ω)与器件阻抗相匹配,以使电功率尽可能多地加到换能器上.这工作通常基于图2换能器等效电路来分析^[5].

f_0 是晶片的机械振动频率,由晶片厚度决定; C_0 是换能器箝位电容.在高频情况下,为使换能器获得足够的电功率,通常用外加电感 L 与 C_0 在 f_0 频率下谐振,其等效电路见图3. C_0 和 C_1 的关系为 $C_0 = \frac{\pi^2(1-k^2)}{8k^2} C_1$,式中 k 是换能器的机电耦合系数,当 k^2 值较小时 $C_0 \approx \frac{\pi^2}{8k^2} C_1$.

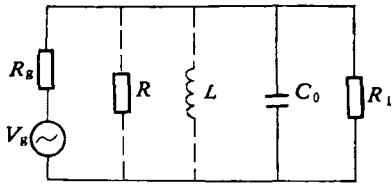


图3 器件匹配的等效电路

若器件跟源输出阻抗 $R_g(50\Omega)$ 不匹配,则传输线上任一点电压和电流为向器件传播的“入射波”与向源传播的“反射波”迭加而成.仅在理想匹配时,反射波功率为零,传输线处于行波工作状态.通常匹配优劣用驻波比来表示.此外,匹配最好不用图3外加电阻 R ,而采用由电感电容组成的T型网络来进行.

设 $\rho_0 v_0$ 和 $\rho_1 v_1$ 分别为换能器及声光介质的单位面积声阻抗,当换能器向单边声光介质辐射声波时,换能器的机械 Q 值为 $Q_m = \frac{\pi \rho_0 v_0}{2 \rho_1 v_1}$.由图3令 R'_g 为 R_g 与 R 的并联电阻,则谐振时电路电 Q 值 $Q_e = \omega_0 C_0 R'_g \approx \frac{\pi^2}{8k^2} \cdot \frac{R'_g}{R_1} \cdot \frac{1}{Q_m}$,

代入 Q_m 整理可得

$$R_1 = \frac{\pi}{4k^2} \cdot \frac{R'_g}{Q_e} \cdot \frac{\rho_1 v_1}{\rho_0 v_0}$$

可见在理想匹配 $R'_g = R_1$ 时,

$$[Q_e]_{\text{理}} = \frac{\pi}{4k^2} \cdot \frac{\rho_1 v_1}{\rho_0 v_0}$$

实际情况是

$$Q_e = [Q_e]_{\text{理}} \cdot \frac{R'_g}{R_1}$$

因此实际等效电路的电 Q 值小于 $[Q_e]_{\text{理}}$,只有通过阻抗合理匹配才能达到 $[Q_e]_{\text{理}}$.

为便于匹配,我们采用 36° Y切型 LiNbO_3 作换能器.其机电耦合系数 $k = 0.50$,介电常数 $\epsilon_r = 39$,声速 $v_0 = 6.5 \times 10^5 \text{cm/s}$,密度 $\rho_0 = 4.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$.以共振方式工作的压电换能器厚度 $z_0 = \frac{\lambda_{\text{声}}}{2} = 0.081 \text{mm}$, $[Q_e]_{\text{理}} = 1.88$.故实际电 Q 值做到1.88就能使阻抗匹配.这时换能器体电容 $C_0 = \frac{Q_e}{\omega_0 R'_g} = 149 \text{pF}$,在静电单位制下有 $C_0 = \frac{\epsilon_r S}{4\pi z_0}$, S 为换能器面积.取换能器长为1.2cm,宽为0.3cm,则 $C_0 = 153 \text{pF}$.因介质长4.8cm,故取四块 0.3×1.2 换能器串并联,但换能器之间应留有间隙,声光介质取4.9—5.0cm较合宜.

LiNbO_3 介电常数很高,数十兆赫工作频率下相应电抗值只有几十欧姆,因此换能器电极引线及匹配元件引线的寄生电感影响很大.例如对 $\phi 0.15$ 镀银铜丝,我们测得 $f_0 = 40 \text{MHz}$ 时,每厘米电感量为 $0.02 \mu\text{H}$.故外加电感还应根据对器件的实测数据来匹配,把电极引线的影响也考虑进去.

匹配工作的步骤是在 He-Ne 激光下把待配器件在恒定激励功率下对 f_0 附近频率作零级光调制测试,找出最佳工作频率.然后在该频率下测量器件驻波比和相角.设由此求得未匹配器件复数阻抗为 $Z_1 = r + jX_c$,配上满足谐振要求阻抗为 Z_2 的电感 L 时,使该器件复阻抗的虚部为零.由此可得到 $\frac{1}{C} = \omega^2 L + \frac{r^2}{L}$,代入复数阻抗就可求得待配的 L .其后再配以

表1 LiNbO_3 -ZF₆声光开关匹配前后性能

器件编号	工作频率(MHz)	匹配前		匹配后	
		驻波比	相角	驻波比	相角
122	40.87	5.2	153°	1.42	180°
604	41.50	5	170°	1.57	180°

T型网络就能使器件驻波比趋于1.实际情形中尚须对匹配元件作微小调整才能达到最佳状

态。自然,匹配只能做到使器件性能有改善,驻波比的实际数值还取决于声光介质和换能器的光学性质,以及晶片平整度、压焊工艺等因素。表1为器件匹配前后性能对照举例说明。

三、器件工艺

声光器件主要工作特性,如器件输入阻抗、超声功率跟频率的依赖关系等,除取决于换能器电声参数和声光介质的声阻抗外,还跟粘结层参数有关,后者对器件性能一致性有很大影响。在频率低于100 MHz时,换能器与声光介质通常采用钢或环氧树脂粘结。钢具有低的插入损耗、所需粘结压力较低($\approx 100 \text{ kg/cm}^2$),且阻抗跟大多数声光介质较接近。实验表明钢层厚度局部变化对器件频率特性影响不大,当钢层厚度 $\leq 1 \mu\text{m}$ 时就足以保证频率响应一致性。

图4是设计中所采用的层结构,钢的压焊粘结在镀膜机真空罩内进行,防止沾污和氧化。必须注意镀膜均匀和压力均匀,以提高压焊过程的结合率。压焊上的 LiNbO_3 晶片毛坯厚度约80丝,然后上石膏盘减薄,盘面要配置同样材料作保护垫片,尤应注意换能器两顶端要放置垫片,防止细沙冲击使晶片顶端碎裂。起初减薄用302号砂,到厚度约30丝左右改用303号砂并放慢盘速,速率约每15分钟减薄8丝。接近预期厚度时,用千分表测试,校正厚度的不均匀性。减薄过程中,应避免温差过大造成晶片开裂。

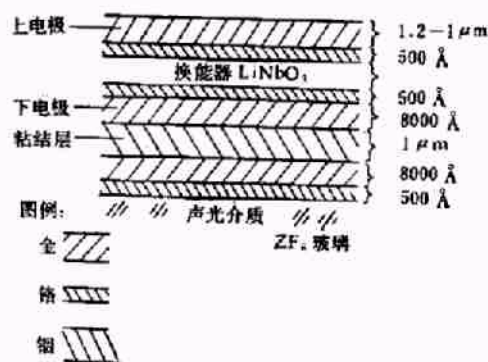


图4 各层结构示意图

为避免声光介质底端对声波的反射造成对声行波的干扰,设计中把介质底端磨 30° 楔角,此角度加工要求不严,特别在采用 ZF_6 玻璃时反射影响极小。最后在楔角斜面上用真空油脂粘贴铝片作吸声用。

声光介质的顶面和通光面及 LiNbO_3 压焊面精度为 $\frac{\lambda}{4}$,两通光面平行度要求 $< 10''$,晶片平行度误差 $1-5 \mu\text{m}$,通光面上 $1.06 \mu\text{m}$ 增透膜要求反射率 $\leq 0.2\%$ 。

四、器件性能测试

匹配后的器件在 He-Ne 单模激光下的零

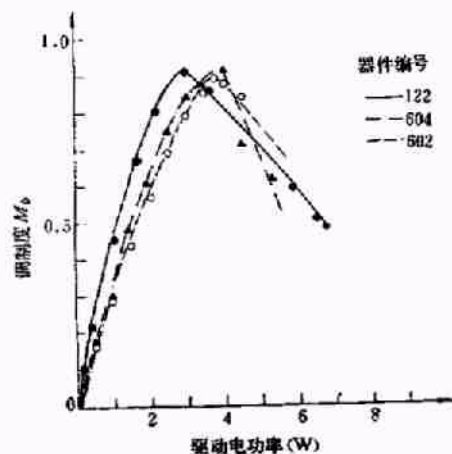


图5 He-Ne 单模激光下零级光调制曲线

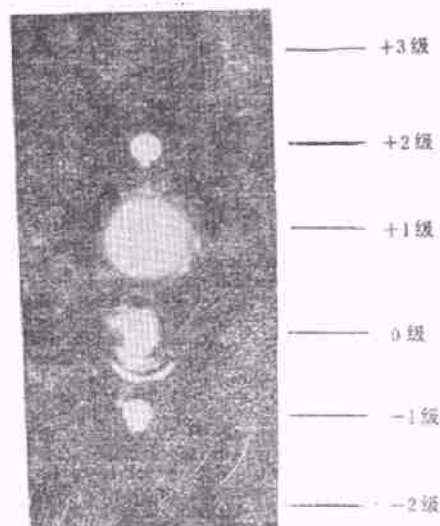


图6 He-Ne 激光的喇曼-奈斯衍射

级光调制度 M_0 实验曲线见图 5, 所有器件零级光衍射效率均大于 90%, 最佳可达 96%, 显然器件具有低驱动功率, 高对比的优良性能。相应 He-Ne 光下的喇曼-奈斯衍射图案照片如图 6 所示, 图 7 是 $1.06 \mu\text{m}$ Nd:YAG 多模激光

腔外摄得的布拉格衍射图案。这两种情形均因 1 级衍射光比零级光强得多而呈现出 1 级光斑较大。

连续工作 4 小时, 曾用点温计测量换能器两电极的温升, 室温 30°C 左右时温升约 10°C ,

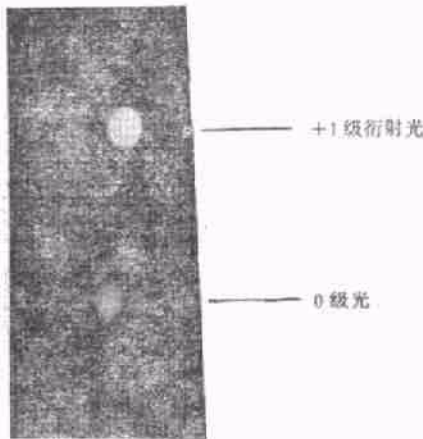


图 7 Nd:YAG 激光的布拉格衍射

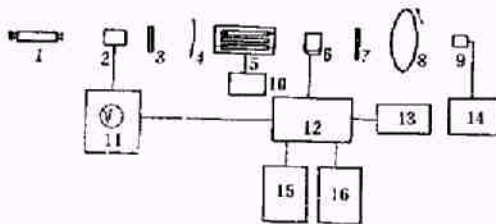


图 8 Nd:YAG Q 开关激光器实验装置

1 为 He-Ne 激光器; 2 为对 $1.06 \mu\text{m}$ 灵敏的光电倍增管或硅光二极管; 3 为衰减片; 4 为 $R=100\%$, $\tau=770$ 的谐振腔镜; 5 为 Nd:YAG ($\phi 4 \times 62$); 6 为声光开关; 7 为 $R=89\%$ 的谐振腔镜; 8 为转盘; 9 为功率计; 10 为 YAG 的电源; 11 为示波器; 12 为超声源; 13 为调制源; 14 为检流计; 15 为 GZ3 中功率计; 16 为 PS-43 数字频率计

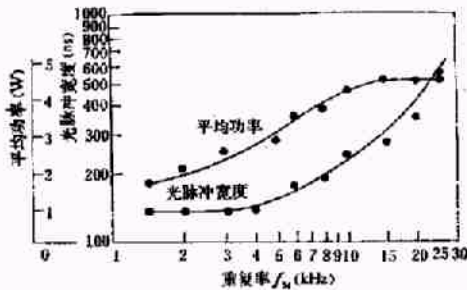


图 9 Q 开关激光器实验测试结果

器件编号 602; 激光器工作电流 24A ; 连续输出功率 4.35W

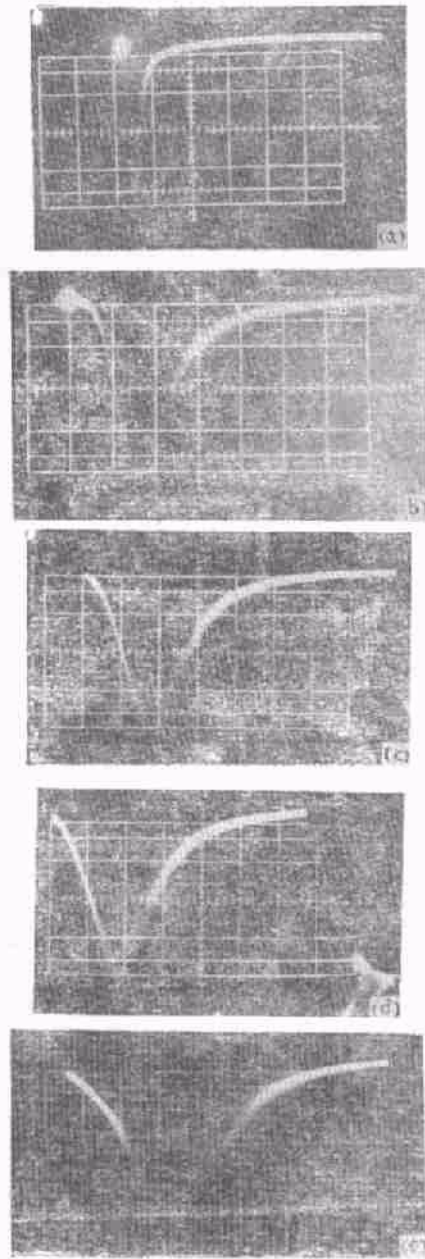


图 10 不同调制重复率的光脉冲波形

- (a) 1.4 kHz , 标尺 $0.5 \mu\text{s}/\text{cm}$;
- (b) 2 kHz , 标尺 $0.1 \mu\text{s}/\text{cm}$;
- (c) 5 kHz , 标尺 $0.1 \mu\text{s}/\text{cm}$;
- (d) 6 kHz , 标尺 $0.1 \mu\text{s}/\text{cm}$;
- (e) 15 kHz , 标尺 $0.1 \mu\text{s}/\text{cm}$

实验中器件性能无明显变化。这表明器件装夹结构中换能器电极用金属压块及声光介质两侧面用金属夹板来散热是可行的,免去水冷结构。但要注意电极和压块接触面应保持清洁。

对于开关器件置于腔内的连续泵浦 $1.06\ \mu\text{m}$ 重复率 Q 开关系统,通常只要采用 Wagner-Lengyel 理论作一些适当修改,就能使单个 Q 开关脉冲所得到的结论适用于重复率 Q 开关情形^[6]。

所用实验装置如图 8 所示,谐振腔为平凸型,腔长 500 mm,激光器阈值电流为 18 A,激光器工作电流保持为 24A。测试结果见图 9。图 10 是相应于不同调制重复率的光脉冲波形照片。在重复率 2 kHz 时,能满足光脉冲半宽度 $\leq 150\ \text{ns}$ 的设计要求。图 11 是由图 9 实验数据算得的光脉冲峰值功率与重复率的关系曲线。

由图 9 和图 11 可见,当重复率 $f_M > 14\ \text{kHz}$ 时,平均功率已接近连续功率输出。而在 $f_M < 10\ \text{kHz}$ 时 $P_{\text{峰值}}$ 大致跟 f_M 成正比。光脉宽在 $f_M < 5\ \text{kHz}$ 时基本上保持恒定,约为 140 ns。 $f_M = 2\ \text{kHz}$ 工作重复率下光脉冲峰值功率 $P_{\text{峰值}} = 7.3 \times 10^3\ \text{W}$,要比连续功率输出 4.35 W 高得多。以上实验曲线跟连续泵浦重复率 Q 开关系

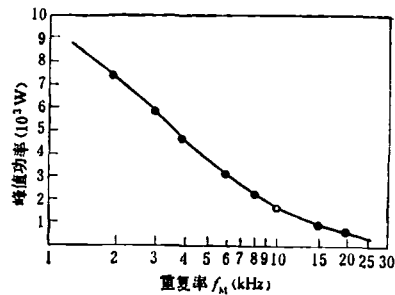


图 11 光脉冲峰值功率与重复率关系曲线

统理论预期相符。

综上所述, $\text{LiNbO}_3\text{-ZrF}_6$ 玻璃声光 Q 开关具有驱动功率低、对比度高、重复性好等优点,且 ZrF_6 玻璃价廉、易加工,故适宜在激光显示、刻线、电阻微调等各种激光应用中广泛采用。

参 考 文 献

- [1] W. R. Klein and B. D. Cook, *IEEE Trans.*, SU-14 (1967), 123—124.
- [2] B. Chu, *Laser Light Scattering*, Academic Press, New York, (1974).
- [3] D. H. McMahon, *IEEE Trans.*, SU-11(1969), 41—44.
- [4] D. H. McMahon, *Proc. IEEE*, 55(1967), 1602—1612.
- [5] *Acousto-optic Q switch Design*, R. Mauro, AD. 712977 (1970).
- [6] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer-Verlag, New York, (1976).

第一届全国半导体表面、界面物理学术会议简讯

第一届全国半导体表面、界面物理学术会议于 1980 年 12 月 1 日至 7 日在杭州召开。来自全国有关的领导机关、科研机构、高等院校及工厂等 60 个单位, 115 名代表参加了会议。

中国物理学会常务理事、中国科学院半导体研究所所长黄昆、复旦大学副校长谢希德、清华大学教授李志坚分别主持了开幕式和闭幕式,并作了学术报告。

会议有 71 篇报告,其中综述报告 8 篇,工作报告 63 篇。报告涉及的内容包括表面电子态理论、表面电子谱实验、椭圆偏振术、成份结构分析、MOS 结构研究、分子束外延、二维材料等。

半导体表面、界面的物理研究是六十年代以来发

展的新领域,是半导体物理基础研究的重要方面。它同制备新型材料和器件以及发展大规模集成电路有着密切的关系,世界各先进国家均十分重视。这次会议表明,我国初步形成了一支从事半导体表面、界面物理研究的队伍,改变了过去很多年来只做工艺和工艺测试的局面;开展了涉及半导体表面、界面物理问题的研究,取得了一定的进展。会议初次检阅了这一领域的科研成果。与会代表认为,在较短的时间内取得如此可喜的成绩是令人鼓舞的。但目前工作面较窄。电学测量较多,光学测量较少;测量工作较多,物理分析较少。许多方面尚属空白。会议希望各单位根据各自的条件,选择合适方向和课题,深入研究,逐步形成自己的特点。

会议决定第二届全国半导体表面、界面物理学术会议于 1982 年举行。

(中国科学院半导体研究所 马国凤、邢步高)