

# 谐波合成脉冲电光调制

李世忱 倪文俊 李 明  
(天津大学精密仪器系)

## 提 要

本文论述一种新的光学调制器,阐述其构成原理、耦合电路、调制特性、调制参量的测定以及实验结果和应用。这类调制器的特别功能对激光技术有重要意义。

## 一、超高速率调制脉冲的产生

根据傅里叶变换,一种周期性脉冲可以用傅里叶级数来表示,其最简单的组合是基波及 $90^\circ$ 相移的二次谐波之和所代表的脉冲

$$v(t) = v_1 \sin \omega_m t + v_2 \cos 2\omega_m t, \quad (1)$$

显然它是一种形状对称的脉冲列。可以证明,当取 $v_1 = 2v_2 = v_0$ 时,该脉冲是底部较平坦的

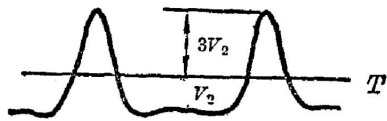


图 1

钟形脉冲列(如图1所示),称之为谐波合成脉冲或简称谐和脉冲。当取 $f_m = 200$  MHz时,这种脉冲的脉宽即可达到1.4 ns,而且由下述讨论得知有办法使这种脉冲的幅度高达千伏以上。

$v_1 \sin \omega_m t$  和  $v_2 \cos 2\omega_m t$  由功率信号源产生,通过一个适当的合成网络加于调制晶体便可构成谐和脉冲调制器。如果该调制器是以调相原理工作的,称为相位调制;如果调制方式设计为光强调制时,则称光强调制或振幅调制。

## 二、电光晶体谐和脉冲调制器的耦合电路

耦合电路必须具备谐振滤波电路和匹配电路那种功能。电光晶体在远离其谐振点的频段内可等效为电容和高阻并联,因此在 VHF~UHF 波段内的匹配宜采用电感电容组合的升压网络,如  $T$  型或  $\pi$  型网络,以  $T$  网络为例给出其设计计算方法。

图2(a)就是一个  $T$  型升压电路,  $C_1$ 、 $R_L$  是晶体等效电路,  $L$  是外加电感。图2(b)是其等效串联电路,根据二者总阻抗  $Z_i$  相等的原理得到其间参量关系为:

$$R'_L = R_L / [1 + (\omega R_L C_1)^2], \quad (2)$$

$$C'_1 = (1/\omega^2 C_1 R_L^2) + C_1 \approx C_1. \quad (\text{若 } \omega^2 C_1 R_L^2 \gg 1) \quad (3)$$

如果  $L$  与  $C_1$  正好与倍频  $\omega_0$  谐振,则  $Z_i = R'_L$ , 于是此谐振电路的负载  $Q$  值为

$$Q_L = \omega_0 C_1 R_L, \quad (4)$$



图 2

$$R'_L = R_L / (Q^2 + 1) \tag{5}$$

通常使用的电光调制晶体其等效电容约 10 pf, 设  $\omega_0 = 2\pi \times 200 \times 10^6$ ,  $R_L$  约 10 k $\Omega$ , 由 (4) 式晶体的  $Q_L$  约为 120; 由 (2) 式  $R'_L \approx 0.7 \Omega$ 。但通常的高频信号源的输出阻抗是 50  $\Omega$ , 远不匹配。因此如果要匹配成 50  $\Omega$ , 必须降低  $Q_L$  值, 从而必须减小  $C_1$ , 因此权宜的办法是在晶体两端并联一电感  $L_1$  抵偿之, 于是实际使用的电路是图 3 的形式。

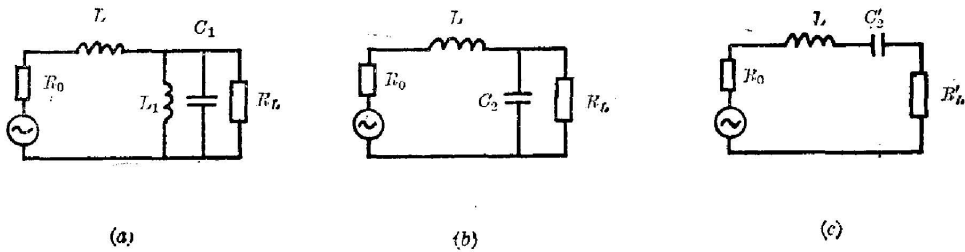


图 3

参数计算步骤是: 从阻抗匹配出发, 要求:  $R'_L = R_0 = 50 \Omega$ , 由 (5) 式  $Q_L \approx \sqrt{R_L/R'_L} = 44.7$ , 此  $Q_L$  值对应的  $C_2$  由 (4) 式得到  $C_2 = Q_L / \omega_0 R_L$ , 要求  $C_1$ 、 $L_1$  并联电路在  $\omega_0$  时的阻抗等于  $C_2$  的容抗, 则  $L_1$  可由下式求得

$$L_1 = 1 / [\omega_0^2 (C_1 - C_2)] \tag{6}$$

此外尚有升压比和驱动功率两个重要参量, 设调制信号电压  $v = v_m \sin \omega t$ , 则串联谐振电流  $i = (v_m / R'_L) \sin \omega t$ , 晶体电压  $v_c = v_m \sqrt{Q_L^2 + 1} \sin \omega t$ , 于是

升压比

$$(v_c / v_m) = \sqrt{Q_L^2 + 1} \tag{7}$$

驱动功率

$$P = v_m^2 / 2R'_L \tag{8}$$

我们的最终任务是把  $\omega_m$  和  $2\omega_m$  的调制功率信号加于晶体, 在其内产生相应电场, 因此需要一个特别的双共振耦合电路解决此问题。例如我们采用过的电路之一,  $I'$  型电路示于图 4。

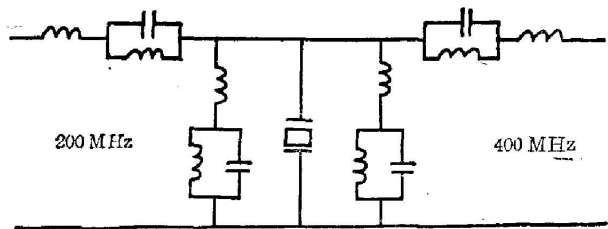


图 4

图中四个 LC 并联网是隔离电路, 因此本质上仍然是共振  $I'$  型升压电路。图中对 400 MHz 呈现高阻的隔离网络, 对

200 MHz 应微呈感性, 所以需要再串入电感。基本电路的  $C_1L_1$  对 200 MHz 和 400 MHz 呈现的容抗有 4 倍之差, 因此对两个频率的补偿电感  $L_1$  必须采用各自需要之值, 为解决两个  $L_1$  支路在补偿时的交叉影响, 我们在晶体两端设置了图 4 所示的两条串并联支路。于是此双共振电路的各参数完全可按上述讨论进行设计工算。然而最后测定调制器的有效 Q 值和调制度等参数是十分必要的, 为此借助光频谱分析方法是最好的方法。

### 三、激光场的谐和脉冲调制谱

利用普克尔效应的电光晶体无论是相位调制还是振幅调制, 所产生的光波场的相位  $\delta(t)$  或振幅  $e(t)$  的变化都正比于所加电压  $v_o(t)$ 。

#### 1. 谐和脉冲电场对光场的相位调制谱

设加于晶体的电压为(1)式, 则所引致的光场的相位变化  $\delta(t) \propto v(t)$ , 所以有

$$\left. \begin{aligned} \delta(t) &= \delta_1 \sin \omega_m t - \delta_2 \cos 2\omega_m t, \\ e(t) &= E_0 \cos [\omega t + \delta_1 \sin \omega_m t - \delta_2 \cos 2\omega_m t]。 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

用贝塞尔函数表示这一调制光场, 可推出如下结果:

$$\begin{aligned} e(t)/E_0 &= \cos \omega t \{ J_0(\delta_1) J_0(\delta_2) + 2J_0(\delta_1) \sum_{n=1}^n J_{2n}(\delta_2) \sin 4\omega_m t + 2J_0(\delta_2) \sum_{n=1}^n J_{2n}(\delta_1) \cos 2n\omega_m t \\ &+ 2 \sum_{k,l=1}^n J_{2k}(\delta_1) J_{2l}(\delta_2) [\sin(4l\omega_m + 2k\omega_m)t + \sin(4l\omega_m - 2k\omega_m)t] \\ &+ 2 \sum_{k,l=1}^n J_{2k-1}(\delta_1) J_{2l-1}(\delta_2) [\sin(2k\omega_m + 4l\omega_m - 3\omega_m)t \\ &+ \sin(2k\omega_m - 4l\omega_m - \omega_m)t] \} \\ &+ \sin \omega t \{ 2J_0(\delta_1) \sum_{n=1}^n J_{2n-1}(\delta_2) \cos(4n\omega_m - 2\omega_m)t \\ &+ 2 \sum_{k,l=1}^n J_{2k}(\delta_1) J_{2l-1}(\delta_2) [\cos(2k\omega_m + 4l\omega_m - 2\omega_m)t \\ &+ \cos(2k\omega_m - 4l\omega_m + 2\omega_m)t] + 2J_0(\delta_2) \sum_{n=1}^n J_{2n-1}(\delta_1) \sin(2n\omega_m - \omega_m)t \\ &+ 2 \sum_{k,l=1}^n J_{2k-1}(\delta_1) J_{2l}(\delta_2) [\cos(2k\omega_m - \omega_m - 4l\omega_m)t - \cos(2k\omega_m - \omega_m + 4l\omega_m)t] \} \\ &= A(\omega_m t) \cos \omega t + B(\omega_m t) \sin \omega t。 \end{aligned} \quad (10)$$

当调制度  $\delta_1, \delta_2 \leq 0.5$  时, 在(10)式中取  $n=1$  得到的结果其误差  $< 1\%$ , 于是即可得到一个包含载波和六个与调制频率  $\omega_m$  成整数倍的上下边带构成的调制光谱, 其各边带振幅由各调制度的贝塞尔函数决定。但通常的光谱仪器能够分辨的光功率不是  $I(t) = e^2(t)$ , 而且  $I(t) = \langle e^2(t) \rangle$ , 尖括号表示对无限长时间求平均。于是由(10)式可以得到

$$I(t)/I_0 = (1/2) \langle A^2(\omega_m t) \rangle + (1/2) \langle B^2(\omega_m t) \rangle。 \quad (11)$$

计算(11)式并略去含  $J_2$  的各小项可得到扫描干涉仪所探测出的各边带值服从如下方程:

$$\begin{aligned} I(\omega) : I(\omega \pm \omega_m) : I(\omega \pm 2\omega_m) : I(\omega \pm 3\omega_m) : \dots \\ = [J_0(\delta_1) J_0(\delta_2)]^2 : \{ [J_0(\delta_2) J_1(\delta_1)]^2 \\ + [J_1(\delta_1) J_1(\delta_2)]^2 \} : [J_0(\delta_1) J_1(\delta_2)]^2 : [J_1(\delta_1) J_1(\delta_2)]^2 : \dots \end{aligned} \quad (12)$$

这便是我们所寻求的调制度测量方程。由它决定的调制谱示意于图 5, 它可由图 7 的装置测得, 其各边带比值服从方程(12), 由此可推算出调制度  $\delta_0$  (已设  $\delta_1 = 2\delta_2 = \delta_0$ ); 进而由(8)、(6)式和后面讲到的(17)式又可推算出耦合电路的  $Q_L$  值。

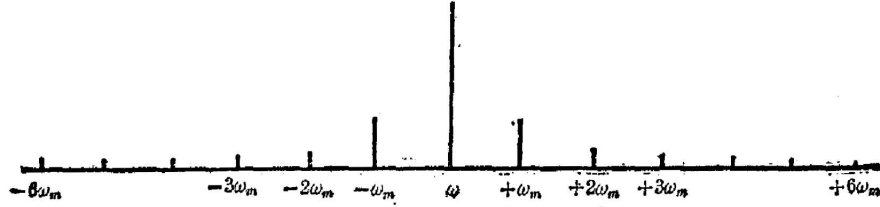


图 5

还指出, 对于正弦调制取  $n=1$  时只会出现  $(\omega \pm 2\omega_m)$  的边带, 而这里由(10)式取  $n=1$  时则出现到  $(\omega \pm 6\omega_m)$  的边带, 说明谐波和脉冲调制有利于边带扩展, 增加有效调制度, 显然对有些应用是极为有利的, 例如激光器的锁模调制。对于强调制(实用上最大  $\delta_0 = \pi/2$ ), 在(10)式中取  $n=2$  已足够精确。

## 2. 谐波和脉冲对光场的强度调制谱

利用晶体的电光效应进行调制都是改变晶体折射率的结果, 因而本质上都是相位调制, 都有类似的谱结构。只是适当设置晶体的光轴和偏振即可表现为相调或光强调制的形式。对于后者, 若以入射光偏振方向为参考, 则透过晶体的正交分量的一般表示式为

$$I(t) = (I_0/2) \{1 - \cos[\varphi(t) + \varphi_0]\}, \quad (13)$$

式中  $\varphi(t)$  和  $\varphi_0$  都自该正交方向量起。  $\varphi_0$  是晶体的自然双折射和引入的固定相差,  $\varphi(t)$  是晶体内  $o, e$  光波的相位差, 它与晶体种类及运用方式有关, 但都正比于调制电压, 因此由(1)式得

$$\varphi(t) = kv(t) = \varphi_1 \sin \omega_m t - \varphi_2 \cos 2\omega_m t. \quad (14)$$

把(14)式代入(13)式所得结果与(10)式的形式相同, 只是把(10)式中的  $\omega t$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别换为  $\varphi_0$ 、 $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ , 我们不再写出。

弱调制时取  $n=1$ , 同样可得强度调制谱:

$$\begin{aligned} & [I_0 - 2I(t)]/I_0 \\ &= \cos \varphi_0 [J_0(\varphi_1)J_0(\varphi_2) + 2J_0(\varphi_1)J_2(\varphi_2) \sin 4\omega_m t + 2J_0(\varphi_2)J_2(\varphi_1) \cos 2\omega_m t \\ & \quad + 2J_2(\varphi_1)J_2(\varphi_2) (\sin 6\omega_m t + \sin 2\omega_m t) + 2J_1(\varphi_1)J_1(\varphi_2) (\sin 3\omega_m t - \sin \omega_m t)] \\ & \quad + \sin \varphi_0 [2J_2(\varphi_1)J_1(\varphi_1) + 2J_0(\varphi_1)J_1(\varphi_2) \cos 2\omega_m t + 2J_2(\varphi_1)J_1(\varphi_2) \cos 4\omega_m t \\ & \quad + 2J_0(\varphi_1)J_1(\varphi_1) \sin \omega_m t + 2J_1(\varphi_1)J_2(\varphi_2) (\cos 3\omega_m t - \cos 5\omega_m t)]. \end{aligned} \quad (15)$$

对于  $\varphi_0 = 0, \pi/4, \pi/2$  诸情况(15)式可以简化, 但对于由(1)式所描写的调制脉冲显然不宜取  $\varphi_0 = 0$ , 而应在  $(\pi/4) \sim (\pi/2)$  内取值, 给定  $\varphi_0$  后把(15)式写成  $I(t)/I_0$  的形式便可定出各边带幅度比, 实际上此功率谱由实验测得, 反过来推算出  $\varphi_1, \varphi_2$  (我们已取定  $\varphi_1 = 2\varphi_2$ ), 从而由(17)式算出  $v_c$ , 再由(6)式算出  $Q_L$ 。

设  $I_M$  为最大调制光强, 则调制度定义为

$$M = (2I_M - I_0)/I_0. \quad (16)$$

由(1)式知, 当  $\omega_m t = \pi/2$  时,  $I(t) = I_M$ , 于是由(15)式令  $\omega_m t = \pi/2$ , 可求得  $M$  值。

对于强调制, 由于  $\varphi_M$  最大只能取到  $\pi$  (开关调制), 因此由贝塞尔函数的性质可证明取  $n=2$  时, 其结果已足够精确。至于振幅调制的数字描述只有理论意义, 此时上述调制光场可表示为

$$e(t) = E_0 \sin \{ [\varphi(t) + \varphi_0] / 2 \} \sin \omega t, \quad (17)$$

相同的推演可得其幅谱。

### 四、超高频谱和脉冲调制器和实验结果

我们采用  $\text{LiNbO}_3$  晶体研制成该调制器并通过了鉴定。其基本结构如图 6 所示, 前述谱和脉冲相位和强度调制的各参量关系是

$$\delta_1 = 2\delta_2 = \delta_0, \quad \delta_M = 2\delta_0, \quad \varphi_1 = 2\varphi_2 = \varphi, \quad \varphi_M = 2\varphi_0. \quad (18)$$

对于  $\text{LiNbO}_3$  或  $\text{LiTaO}_3$  晶体在最有利的方式下

$$\left. \begin{aligned} \delta_0 &= (2\pi/\lambda) n_o^3 \nu_{33} (l/d) v_0, \\ \varphi &= (2\pi l/\lambda) (n_o - n_e) + (2\pi/\lambda) (n_o^3 \nu_{33} - n_o \nu_{13}) (l/d) v_0 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

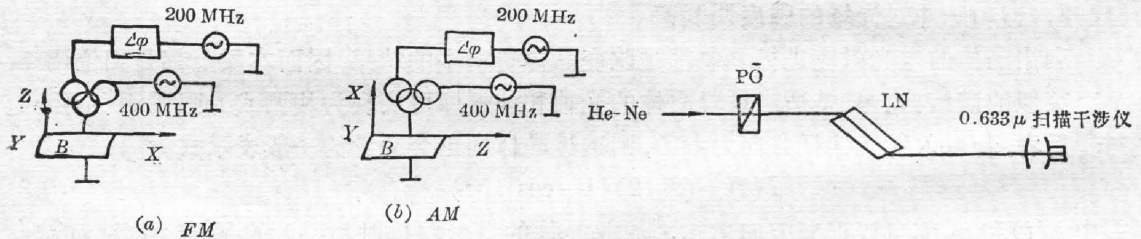


图 6

图 7

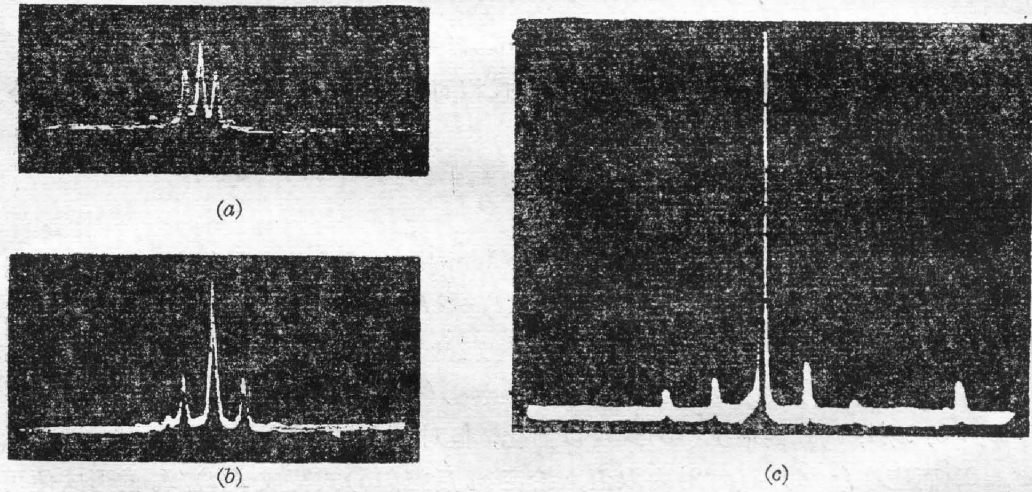


图 8

实验用 LN 晶体尺寸为  $5 \times 5 \times 16 \text{ mm}^3$ ,  $1.06 \mu\text{m}$  波长的布在角为  $56^\circ 10'$  (PM) 和  $56^\circ 30'$  (AM)。对于相位调制器的测试装置如图 7 所示; 对于光强调制需在 LN 晶体的输出端加正交检偏器。图 8 为在图 7 装置上得到的光谱照片。图 8(a) 为 200 MHz 调制谱; 图 8(b) 为 400 MHz 调制谱; 图 8(c) 为 200 MHz 和 400 MHz 复合驱动时的谱和脉冲调制谱,

图中右边部凸起为 He-Ne 激光器的另一模式。该实验的目的是: (1) 精调耦合电路; (2) 调整 200 MHz 的  $45^\circ$  相移(或 400 MHz 的  $90^\circ$  相移), 当它恰为  $45^\circ$  时图 8(c) 的谱才取完全对称的图象; (3) 依靠实验得到的谱图边带幅度比从前述理论分析结果推算出调制度  $\delta_0$  或  $\varphi$ , 以及耦合电路的有效  $Q$  值。

据以上实验测定, 该调制器达到的有效值对 200 MHz 为 43, 400 MHz 时为 30, 匹配阻抗  $50 \Omega$ 。

该调制器的另一特点是其多用性, 利用图 4 的耦合电路使它既能以 200 MHz 或 400 MHz 单频正弦调制, 又可以其双频合成为谐波和脉冲调制。

## 五、应用结果及讨论

利用该调制器于 Nd:YAG 激光器调频锁模实验得到了极好的效果<sup>[1]</sup>, 彻底消除了  $FM$  锁模的双解效应, 并得到窄脉宽输出, 当使用 200 MHz 的调制度 0.25 rad 和 400 MHz 的调制度 0.13 rad 并把图 8 的谱线调到对称后极易获得 66 ps 脉宽和 10.6 GHz 带宽的稳定的完全锁模输出, 脉宽带宽积 0.7。图 9(a) 是这种锁模脉冲的取样示波图; (b) 是由扫描干涉仪得到的相应光谱(全线宽 24 GHz)。当使用 200 MHz 单频调制时脉宽增到 80 ps 以上, 并且由于双解效应的影响有可能出现不稳定。

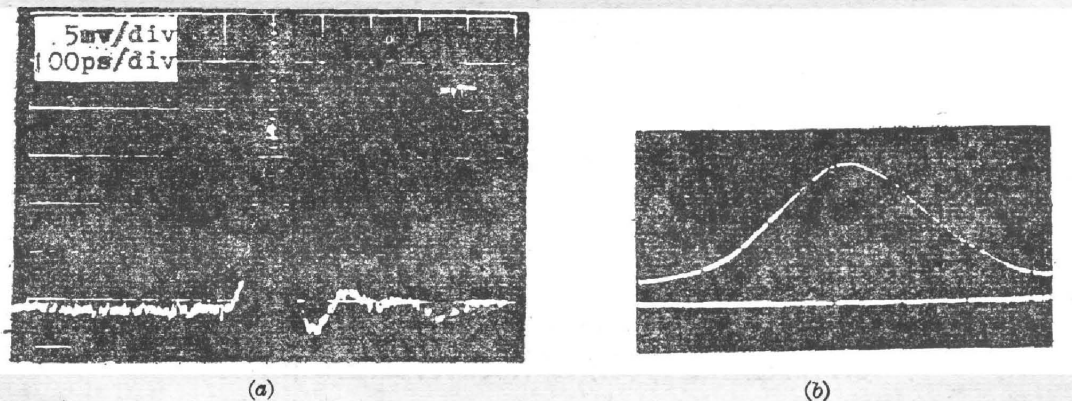


图 9

这种谐波和脉冲型调制的重要特点是使调制晶体上产生高频高压窄脉冲成为可能, 从强度调制工作时依靠前述升压电路可把调制电压升高到晶体的半波电压, 从而不难做成重复率高达 200 Mpps 以上的  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  sec 脉冲光闸, 这将有許多重要应用(另文报道)。因此发展这种方法和器件无疑对激光技术是很有意义的。

### 参 考 文 献

- [1] 李世忱等;《光学学报》, 1984, 4, No. 5 (May), 467.

## The electro-optical modulation by harmonic-synthesized pulse

LI SHICHEN NI WENJUN AND LI MING

(Department of Precision Instrument, Tianjin University)

(Received 17 July 1984; revised 13 November 1984)

### Abstract

A new type of optical modulator is described in this paper. The principal couple circuit, modulating characteristic of the modulator, the measuring method of the modulation parameters, its experimental results and applications are presented. The function of this modulator is significant for laser technology.

---

## 第六届全国红外科学技术交流会在洛阳市举行

第六届全国红外科学技术交流会于一九八四年十一月二日至七日在河南省洛阳市举行,由中国光学学会与中国电子学会、中国宇航学会联合主办。参加会议的有来自 63 个单位的代表 132 人。本届会议的中心议题是红外探测系统及其应用,大会特邀报告五篇和分组交流论文八十四篇,内容涉及跟踪制导和热成像、遥感以及测温等技术。《红外研究》杂志专为这次会议出版了论文摘要选辑(1985, No. 2)。

会议表明,我国近年来各种类型红外搜索跟踪装置的研制有了很大进展,十字型、圆锥扫描型和调制盘圆周平移扫描型等各具特色;热成像系统的研究设计水平有了明显提高,基础研究颇为活跃(特别在系统工作模式、仿生等方面),应用研究已达相当规模,反向工程研究受到重视;红外和多光谱遥感专题交流中涌现不少学术价值较高的论文,在改善仪器分辨率、红外外差接收、图象处理、理论论证双积分电路优越性等方面提出了独到的见解;其他诸如红外测温仪及其对热网管道热损测试、常温地物发射率和表面温度测量等内容也引起了与会代表的很大兴趣。

会议决定,一九八六年举行第七届红外科学技术交流会,内容为红外器件和材料以及其配套技术和应用。

(俞福堂)