

# 分子波导激光器的光电流效应研究

马养武 黄霖

(浙江大学光仪系, 杭州)

**摘要:** 首次报导了关于分子波导激光器光电流效应的理论和实验研究结果。以 $\text{CO}_2$ 分子波导激光器为例, 由求解速率方程, 给出了分子激光光电流信号的数学表达式, 并由实验测量研究了光电流信号与各激光工作参量的关系。理论分析与实验结果吻合良好, 一致表明分子波导激光器系统具有明显的光电流信号优势, 因而展示了分子光电流效应在波导激光器的稳频以及其他领域中的应用前景。

The research on opto-galvanic effect of molecule waveguide laser

Ma Yangwu, Huang lin

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University)

**Abstract:** It is first to report the theoretical and experimental research results on the opto-galvanic effect (OGE) of molecule waveguide laser. Giving  $\text{CO}_2$  waveguide laser as a example, the mathematical expression of molecule opto-galvanic signal is gotten by solving the rate equation. And relationship between opto-galvanic signal and laser parameters is investigated by means of experimental measurement. The satisfactory agreement of theoretical analysis and experimental results shows that the molecule waveguide laser have the superior in opto-galvanic signal. Therefore, the foreground of applying OGE to stabilizing frequency of molecule waveguide laser and other domains is shown.

- [ 3 ] 叶声华主编. 激光在精密计量中的应用. 北京: 机械工业出版社, 1980: 155  
 [ 4 ] 激光参数编辑组. 激光参数测量. 上海: 上海人民出版社, 1976: 13  
 [ 5 ] 中国科学院计算中心概率统计组. 概率统计计算. 北京: 科学出版社, 1979: 32

\*

\*

\*

作者简介: 李岩, 男, 1963年4月出生。1986年毕业于电子科技大学电子工程系。现从事激光测量与接收处理工作。

收稿日期: 1991年4月16日。

收到修改稿日期: 1991年11月11日。

### 一、引言

分子波导激光器，像典型的CO<sub>2</sub>、CO分子波导激光器等，作为一种新颖构型的激光器，由于所具有的适应现代化仪器向高性能、多功能和微型化方向发展的要求，展示了在众领域中（如国防、通讯、微加工、生物工程等）的诱人的应用前景。

对于大多数的应用场合，都要求波导激光器以稳频方式工作，然而由于波导激光器所特有的高压、小电流运行的工作特性，使得那些运用于普通激光器中的稳频方案，如荧光探测法、光声稳频法、共振吸收法、偏频锁定法等都不能适用于波导激光器的稳频。

本文以复合腔CO<sub>2</sub>波导激光器为实例，首次报导了分子波导激光器光电流效应的理论和实验研究结果。论文由分子系统的能级模型，通过求解速率方程，给出分子激光光电流信号的数学表达式，并与实验研究结果相比较，二者吻合良好，表明了分子波导激光器具有明显的光电流信号优势，即随工作气压的升高，光电流信号的幅值、灵敏度、信噪比等也随之升高，且随着激光器最佳工作电流的减小，相应的光电流信号具有较大值。因此，这种具有明显优势的光电流效应应用于波导激光器本身的稳频，其前景是相当诱人的。

### 二、分子光电流信号的理论表达式

与较早为人们所确立的原子光电流效应的机理模型不同<sup>[1]</sup>，关于分子光电流效应的微观机理至今仍是众说纷纭<sup>[2~5]</sup>，我们在分析研究了最多为人们所涉及的三种机理模型后（即电离模型、动量交换模型、气体温度模型），认为：通常的分子激光系统，处于最佳激励状态时的辉光放电所能提供的高能电子数是很少的，因此分子系统的各激光能级参与电离的几率亦很小，这样，电离量的变化所引起的放电阻抗的变化也就微乎其微了，所以电离模型不太可能是分子光电流效应的主要机理，而基于分子系统的激光工作过程，研究表明：较能为人们所接受的描述分子光电流信号成因的观点是，动量交换模型和气体温度模型所描述的，由于放电管中的激光加热（冷却）过程和放电体粒子间的非弹性碰撞过程所引起的放电气体中电子迁移率*b<sub>e</sub>*的变化<sup>[4,6]</sup>。

$$b_e = C(e\lambda/mE)^{1/2} \cdot X^{1/4} \tag{1}$$

式中，*e*是电子电荷，*m*是电子质量，*E*为电场强度， $\lambda$ 是电子平均自由程，*X*为运动粒子每次碰撞的平均交换能量，*C*为仅与电子分布函数有关的常量。由（1）式，放电电流密度为：

$$i = n_e \cdot A \cdot E \cdot b_e \tag{2}$$

式中，*A*是放电管横截面积，*n<sub>e</sub>*是电子密度。据（2）式，则辐射场作用于放电体后，可能引起的放电电流的变化是：（假定激光器具有稳压、稳流放电激励的工作条件，并略去电离项影响）

$$\Delta i/i \approx \frac{1}{2} \Delta \lambda/\lambda + \frac{1}{4} \Delta X/X \tag{3}$$

（3）式表示了放电气体中电子平均自由程的变化 $\Delta\lambda$ 和粒子间非弹性碰撞动量的变化 $\Delta X$ 是引起放电电流变化 $\Delta i$ 的主要因素。由此，通过对辐射场与分子激光系统间相互作用的分析，应是定性描述辐射场所引起的光电流信号与宏观

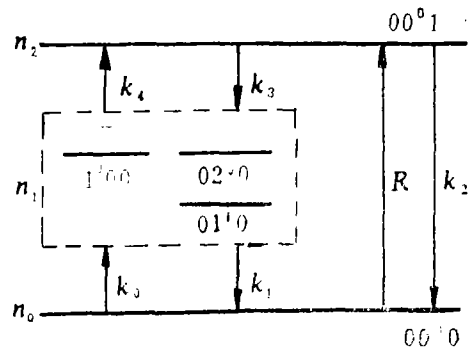


图1 CO<sub>2</sub>分子三能级（简化）模型

放电参量关系的最有效途径。

图1是一简化的CO<sub>2</sub>分子三能级激光系统<sup>[6]</sup>，其系统的速率方程为：

$$\begin{pmatrix} dn_2/dt \\ dn_1/dt \\ N \end{pmatrix} = [A_p] \begin{pmatrix} n_0 \\ n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中，矩阵 $[A_p]$ 为：

$$[A_p] = \begin{pmatrix} R & k_4 & -k_2 - k_3 \\ k_0 & -k_1 - k_4 & k_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中， $k_0$ 为基态到下能级的激发速率； $k_1$ 为下能级到基态的弛豫速率； $k_2$ 为上能级至基态的自发跃迁和碰撞弛豫速率； $k_3$ 为上能级到下能级的受激辐射和碰撞弛豫速率； $k_4$ 为下能级至上能级的跃迁速率； $R$ 为基态到上能级的激发速率； $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 分别是基态、下能级、上能级的粒子数密度。

当CO<sub>2</sub>分子激光系统被由外界的方波辐射场所周期调制时，分子系统将受到辐射场的干扰，对于调制过程中的通光和截光的情况，系统分别具有速率方程形式：

$$\begin{pmatrix} dn_2/dt \\ dn_1/dt \\ N \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{通光时} \\ \\ \end{matrix} = [A_p'] \begin{pmatrix} n_0 \\ n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} dn_2/dt \\ dn_1/dt \\ N \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{截光时} \\ \\ \end{matrix} = [B_p'] \begin{pmatrix} n_0 \\ n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中，

$$[A_p'] = \begin{pmatrix} R & k_4 & -k_2 - k_3 + k_A \\ k_0 & -k_1 - k_4 + k_A & k_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad [B_p'] = \begin{pmatrix} R & k_4 & -k_1 - k_3 + k_B \\ k_0 & -k_1 - k_4 + k_B & k_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

比较(4)式与(6)式，易见，由于外界辐射场的干扰，引入了系统的附加跃迁速率 $k_A$ 和 $k_B$ 。据此，由方波辐射场调制的连续边界条件：

$$n_i(t^+) = n_i(t^-) \quad (8)$$

以及速率方程组(6)有非零解的系数行列式条件：

$$[A_p'] = 0; \quad [B_p'] = 0 \quad (9)$$

可求得方程组(6)的解，即通光和截光过程中，CO<sub>2</sub>分子激光系统的各能级上的粒子数密度 $n_{iA}(t)$ 、 $n_{iB}(t)$ 分别为<sup>[7]</sup>：

$$\begin{aligned} n_{iA}(t) &= n_{iA} + n_{iA}' e^{-k_{2A}t} + n_{iA}'' e^{-k_{1A}t} \\ n_{iB}(t) &= n_{iB} + n_{iB}' e^{-k_{2B}t} + k_{2B}^{T/2} + n_{iB}'' e^{-k_{1B}t} + k_{1B}^{T/2} \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $T$  是调制方波的周期,  $A$  表示  $t = (T, T + T/2)$  通光期间;  $B$  表示  $t = (T + T/2, 2T)$  的截光期间;  $i = 0, 1, 2$ ;  $n_{iA}$ ,  $n_{iB}$  分别是通光和截光时系统各能级上的稳态粒子数密度, 可直接由方程式 (4) 给出;  $n_{iA}'$ ,  $n_{iB}'$  和  $n_{iA}''$ ,  $n_{iB}''$  分别是系统在通光和截光时产生的各能级上粒子数密度变化的二个分量;  $k_{2A}$ ,  $k_{1A}$  和  $k_{2B}$ ,  $k_{1B}$  分别为通光和截光时系统产生的附加跃迁速率的二个分量。(10) 式也指出了外界辐射场调制对分子激光系统的作用关系, 即这种外界辐射场对分子系统的周期加热 (冷却) 过程, 将引起放电系统中各能级粒子的分布状态和运动状态的变化, 由此所引起的电子迁移率的变化将是产生光电流信号的主要原因。

比较 (1) 式与 (3) 式, 由运动粒子数密度与运动自由程的关系:

$$\Delta\lambda/\lambda = -\Delta n/n \quad (11)$$

式中,  $n = n_1(t) + n_2(t)$ ,  $\Delta n = \Delta n_1(t) + \Delta n_2(t)$ 。

则 (1) 式具有形式:

$$\begin{aligned} \Delta i/i &= -\frac{1}{2} \frac{\Delta n/n}{n} + \frac{1}{4} \frac{\Delta X/X}{X} \\ &= -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta n_1(t) + \Delta n_2(t)}{n_1(t) + n_2(t)} \right) + \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta X_1 + \Delta X_2}{X_1 + X_2} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $X_2$ ,  $X_1$  和  $\Delta X_2$ ,  $\Delta X_1$  分别是上、下能级粒子间碰撞动量和动量的变量,

$$\begin{aligned} X_1 &= (E_1 - E_0) [n_1(t)k_1 - n_0(t)R] \\ \Delta X_1 &= (E_1 - E_0) [\Delta n_1(t)k_1 - \Delta n_0(t)R] \\ X_2 &= (E_2 - E_0) [n_2(t)k_2 - n_0(t)R] \\ \Delta X_2 &= (E_2 - E_0) [\Delta n_2(t)k_2 - \Delta n_0(t)R] \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  分别是分子系统的基态、下能级、上能级的能级高度。(12) 式可以改写成更通常的形式, 即分子系统光电流信号总响应表达式:

$$S(t) = S_{01}(1 - e^{-t/\tau_{1A}}) + S_{02}(1 - e^{-t/\tau_{2A}}) \quad (14)$$

$$\text{式中, } S_{01}(1 - e^{-t/\tau_{1A}}) = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta n_1(t)}{n_1(t) + n_2(t)} \right) + \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta X_1}{X_1 + X_2} \right)$$

$$S_{02}(1 - e^{-t/\tau_{2A}}) = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta n_2(t)}{n_1(t) + n_2(t)} \right) + \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta X_2}{X_1 + X_2} \right)$$

式中,  $\tau_{2A}$ ,  $\tau_{1A}$  分别是上、下能级的弛豫时间, 即  $\tau_{2A} = 1/k_2$ ,  $\tau_{1A} = 1/k_1$ , 由于  $\text{CO}_2$  分子激光系统显然有的关系:

$$\tau_{2A} \gg \tau_{1A}$$

因此,  $S_{01}$  和  $S_{02}$  分别表征了光电流信号的高频和低频响应部分。

对 (14) 式作富氏变换, 即有光电流信号振幅表达式:

$$R(\omega) = \frac{S_{01}\tau_{1A}^{-1}}{\omega^2 + \tau_{1A}^{-2}} - \frac{S_{02}\tau_{2A}^{-1}}{\omega^2 + \tau_{2A}^{-2}} \quad (15)$$

式中,  $R(\omega)$  是光电流信号振幅,  $\omega$  是方波辐射场调制频率。令  $\omega_c$  为调制频率反转点, 即

$$R(\omega_c) = 0$$

时的频率点, 并利用  $\tau_{2A} \gg \tau_{1A}$  条件, 则有:

$$\omega_c = (S_{01}/S_{02})^{1/2} / (\tau_{1A} \cdot \tau_{2A})^{1/2} \quad (16)$$

(15) 式和 (16) 式表明, 当方波辐射场调制频率  $\omega < \omega_c$  时, 有  $R(\omega) < 0$ , 即光电流信号为负值 (反相位) [8], 当  $\omega > \omega_c$  时, 有  $R(\omega) > 0$ , 即光电流信号为正值 (同相位)。

### 三、实验研究结果与分析

#### 1. 实验装置

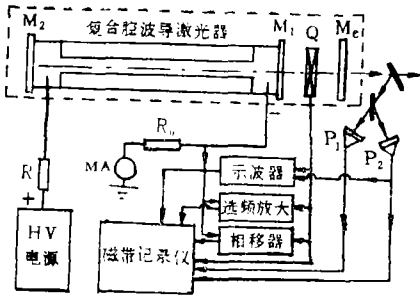


图2 复合腔CO<sub>2</sub>波导激光器光电流信号测量装置

$R_0$ —取样电阻, 100 $\Omega$   $P_1$ —平均光功率计  
 $M_3$ —输出镜  $R$ —限流电阻, 2M $\Omega$   $P_2$ —瞬态功率计  
 HV—波导激光器电源  $M_2$ —全反射镜  $Q$ —斩光器, 20Hz~2000Hz  $M_1$ —部分反射镜

图2是用于测量CO<sub>2</sub>分子波导激光系统光电流信号的实验装置。中心部分是一复合腔CO<sub>2</sub>波导激光器 [9], 复合腔由主腔和子腔组成。波导放电管置于反射镜M<sub>2</sub> 与部分透射镜M<sub>1</sub> 所构成的主腔中, 波导管管长30cm, 管径 $\phi$ 3mm, 典型的工作气体组分为: CO<sub>2</sub>: N<sub>2</sub>:He::Xe=4:3:16:1。工作气压调节范围是20Torr~120Torr, 对每一气压, 在2mA~15mA范围内改变工作电流。用作腔内辐射场方波调制的斩光器置于M<sub>1</sub> 和输出镜M<sub>3</sub> 构成的子腔中, 斩光器的截止频率范围是20Hz~2000Hz。串联于放电回路中的取样电阻R<sub>0</sub> 上的感生光电压经锁相放大后, 显示在示波器和记录于磁带记录仪中。

#### 2. 实验结果与分析

(1) 光电流信号与工作气压、调制频率关系 图(3)、图(4)所示的光电流信号幅值与工作气压和调制频率关系的实验测量结果表明: 随着工作气压的升高, 反转频率点 $\omega_c$  移向高频端, 其原因可分析为由于气压升高, 分子能量的碰撞转移过程大大加快, 即使得分子系统的激光下能级弛豫速率 $k_1$  大大加快, 也即是下能级寿命 $\tau_{1A}$  减小, 而使得(16)式中的 $\omega_c$  上移 (见图3), 因此, 在高气压放电条件下, 就有可能实现高调制频率的光电流信号探测。同时,  $\tau_{1A}$  的减小, 也使得(14)式的光电流信号的高频部分 $S_{10}$  项减小, 这样, 当分子激光系统受到低于 $\omega_c$  频率的辐射场调制时, (15)式所示的光电流信号振幅 $R(\omega)$  将随工作气压

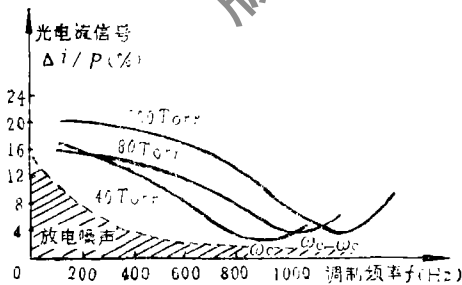


图3 光电流信号与调制频率、气压的关系  
 $\Delta i/P$ —单位功率对应的光电流变化  
 $\omega_c$ —频率反转点  $I$ —放电电流, 8mA

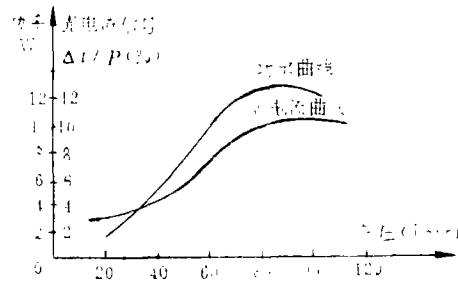


图4 光电流信号与气压输出的功率关系  
 $I = 6mA$   $f = 1000Hz$

的升高而增大。在最佳工作气压点，上、下能级间达到最佳粒子数反转分布，也即对应着最大的光电流信号点（见图4）。并且，高压使得 $\omega_0$ 的上移，所意味的更高调制频率的使用，就将使放电噪声对光电流的影响大为减少，从而大大改善了光电流信号的信噪比（见图3）。而高压运行，正是分子波导激光器的工作特性。

(2) 光电流信号与工作电流关系 图5所示的光电流信号与工作电流、气压关系的实验测量结果表明：随工作电流的变化，光电流信号出现极大值，并对应于激光器的最佳工作电流。原因是，最佳工作电流状态下具有最大的上能级激发速率，而下能级激发速率却较小，因此(15)式中的 $S_{02}$ 项大大提高。图5还表明，具有较高工作气压（即对应有较小最佳工作电流的波导激光器比同样腔长的普通激光器具有明显的光电流优势，原因是，较高的气压和较小的工作电流将使上能级的弛豫时间 $\tau_{21}$ 增加和使下能级的弛豫时间 $\tau_{12}$ 减小，因而，(14)式中 $S_{01}$ 项的值锐减， $S_{02}$ 项值增加，即当在 $\omega < \omega_0$ 工作条件下，总的光电流幅值 $R(\omega)$ 增大。

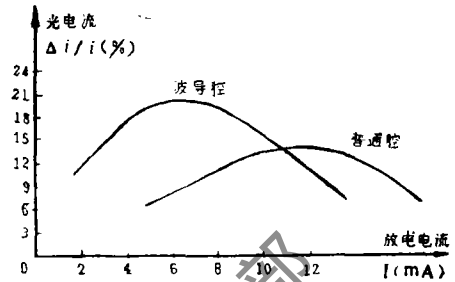


图5 光电流信号与放电电流、气压的关系  
普通腔—气压 $P=30$ Torr 波导腔—气压 $P=80$ Torr  $f=1000$ Hz

#### 四、讨论

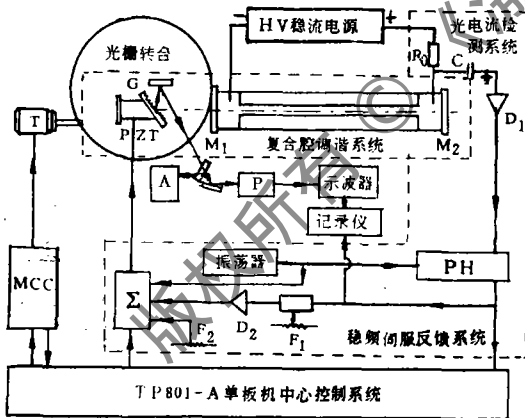


图6 光电流稳频、复合腔调谐 $CO_2$ 波导激光器装置原理图

$R_0, C$ —光电流信号检测网络 PH—相敏检波与同步积分电路 P— $CO_2$ 功率计  $D_1$ —前置选频放大器 T—步进马达 G—原刻光栅  $D_2$ —电压转换、功率放大器 MCC—步进马达控制电路 PZT—压电陶瓷  $F_1$ —微分补偿放大器 A— $CO_2$ 谱线分析仪  $F_2$ —直流偏压调整器  $\Sigma$ —信号总成

理论分析和实验结果吻合，一致表明，与普通的分子激光器相比，高压、小电流运行特性的分子波导激光器呈现有明显的光电流优势：高的信号灵敏度和幅值，高的响应频率和信噪比，以及光电流探测法本身所具有的装置简便、成本低、灵敏度高、抗干扰能力强等优点，因此，分子光电流效应用于分子波导激光器本身的稳频是极为适宜的。

在我们进一步的关于光电流稳频、光栅复合腔调谐的 $CO_2$ 分子波导激光器的研究中<sup>[10]</sup>所建立的稳频且可调谐的激光器系统(见图6),通过改变光栅复合腔光栅的入射角和子腔的耦合率获得 $9\mu m \sim 11\mu m$ 波长范围内的60条谱线输出,对每一支选出的输出谱线,光电流稳频过程包括:通过支撑光栅座的压电陶瓷以1000Hz频率

调制主腔腔长, 而实现系统内的辐射场周期调制, 取样电阻 $R$ 。检测出的光电流信号输入稳频伺服反馈系统, 即经过同步积分器、相敏检波器、低通滤波器, 再经电压转换和功率放大后反馈到压电陶瓷上, 以控制腔长, 而确保各支输出谱线的频率和功率的高度稳定性。由TP 801-A单板机完成整个复合腔调谐和光电流稳频过程。单线最大输出功率8W, 长时间频率稳定度达 $\Delta\nu/\nu = 10^{-9}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Erez G, Rigden J D. IEEE J Q E, 1979; QE-15: 1328
- [2] Kerecman A J. IEEE J Q E, 1969; QE-5: 474
- [3] Nowicki R, Smith A L S. J Phys (D), 1982; 15: 1165
- [4] Lobov G D, Radio Eng Elect Phys, 1971; 16: 968
- [5] Moffatt S, Smith A L S. J Phys (D), 1984; 17: 59
- [6] Smith A L S, Brooks M. J Phys (D), 1979; 12: 1237
- [7] 黄霖. 硕士学位论文. 浙江: 浙江大学出版社, 1988: 32
- [8] Moffatt S. Opt Commun, 1981; 37: 119
- [9] 马养武, 陈钰清. 中国激光, 1986; 13 (1): 29
- [10] 马养武, 陈钰清. 光电流稳频复合腔调谐 $\text{CO}_2$ 波导激光器研究. 中国激光,

待发表

\*

\*

\*

作者简介: 马养武, 男, 1946年7月出生。副教授。现从事激光技术与器件的研究工作。

黄霖, 女, 1963年出生。硕士。现任美国Dolan-Jenner光纤公司工程师, 美国MIT博士生和SPIE奖学金获得者。

收稿日期: 1991年7月3日。

(上接封三)

片, 介质反射膜, 双波段反射和增透膜, 分光膜, 中红外介质膜, 金属反射膜及装饰膜, BDN染料盒; 3. 激光晶体及光学材料: Nd: YAG激光棒, 优质掺镁铌酸锂晶体, 铌酸锂Q开关, 光学滤波器用铌酸锂晶体, 人造石榴石型宝石, 砷酸二氢铯晶体(CDA); 4. 技术服务项目: 各种类型光电器件的开发研究, 硅材料高均匀度镓扩散, 氮化硅、二氧化硅薄膜生长, 光刻、制版, 半导体微型焊接装配, 薄膜混合电路设计与制作, 蒸镀各种金属反射膜、导电膜, 半导体电阻率、杂质浓度分布、结深测量, 红外分光光度计测试分析, IV-V族半导体体内杂质浓度分布测量, 气体分析, 各种光电探测器件的直流、低、高频参量测试, 通用200MHz放大器技术及有关电子电路设计制作, 伺服系统测试, 微机数字图象处理技术, 工业技术微机控制器, 高纯三氧化二钇( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), 高纯三氧化二钕( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ), 稀土氧化物分析标准, 设计和制作各种规格印刷电路板。

通信地址: 四川成都238信箱

电 话: 581312, 582123

电报挂号: 0238

图文传真: FAX 028 583120

电政编码: 610015

Add.: P.O.Box 238, Chengdu, Sichuan, PRC

Tel.: 581312, 582123

Cab.: 0238

Fax.: 028 583120

ZIP Code.: 610015