

# 注入锁定准分子激光泵浦下氢 受激喇曼散射的气压特性

楼 祺 洪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院激光技术开放研究实验室, 上海 201800)

## 提 要

本文研究了注入锁定氟化氩准分子激光泵浦下氢受激喇曼散射的特性。三阶斯托克斯光最大转换效率的氢气压力低于相应的二阶斯托克斯光最大转换效率的氢气压力。通过测量斯托克斯光的光场分布, 讨论了上述现象产生的原因。

关键词: 准分子激光; 受激喇曼散射。

## 一、引 言

准分子激光在紫外波段具有高的平均输出功率及高的峰值功率, 在激光微细加工, 半导体材料处理及激光医学方面的应用愈来愈广泛。但是, 由于它们的输出局限于某些特定的波长数值, 通常是通过受激喇曼散射进行波长频移, 它具有转换效率高、结构简单等优点<sup>[1]</sup>。

在提高转换效率方面, 近年来进行了不少改进, 例如, 采用非稳腔的长脉冲准分子激光器, 对高阶斯托克斯光的转换效率有明显的提高<sup>[2]</sup>; 采用氢和其它气体混合物作为喇曼介质, 来提高某一斯托克斯光的输出<sup>[3]</sup>; Komine 等<sup>[4]</sup>采用振荡-放大系统作泵浦源, 进行高阶斯托克斯光的转换。以上研究表明, 泵浦光的光束质量及喇曼介质本身对提高转换效率都有很重要的意义。

本文报道用注入锁定准分子激光作泵浦源的受激喇曼散射实验。通过改变泵浦条件及氢气压力, 实现对一阶、二阶及三阶斯托克斯光的高的光子转换效率。实验结果还表明, 相应于三阶斯托克斯光 S<sub>3</sub> 最大转换效率的氢气压力为 10 atm, 它小于二阶斯托克斯光的最大转换效率对应的氢气压力 (>30 atm)。采用 COD 成像系统测量了各种气压下的斯托克斯光场的分布, 结果表明, 在一定的泵浦条件及气压下, 斯托克斯光场除了中间的强峰以外, 在周围呈现环状分布, 环状分布的强度随氢气压力而变化, 说明二阶和三阶斯托克斯光输出强度随气压而变化。

## 二、实验及测量装置

实验所用的准分子激光器为 Lambda-Physik 生产的 160 型激光器, 其主要结构如图 1

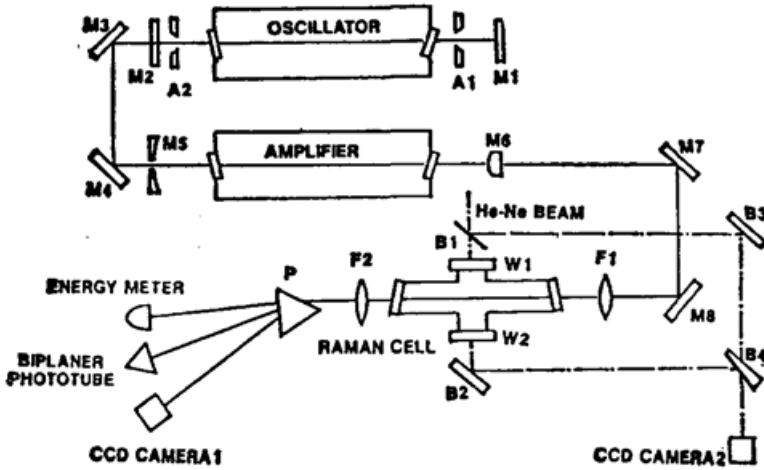


Fig. 1 Experimental set-up for stimulated Raman scattering with injection locking excimer laser as the pumping source

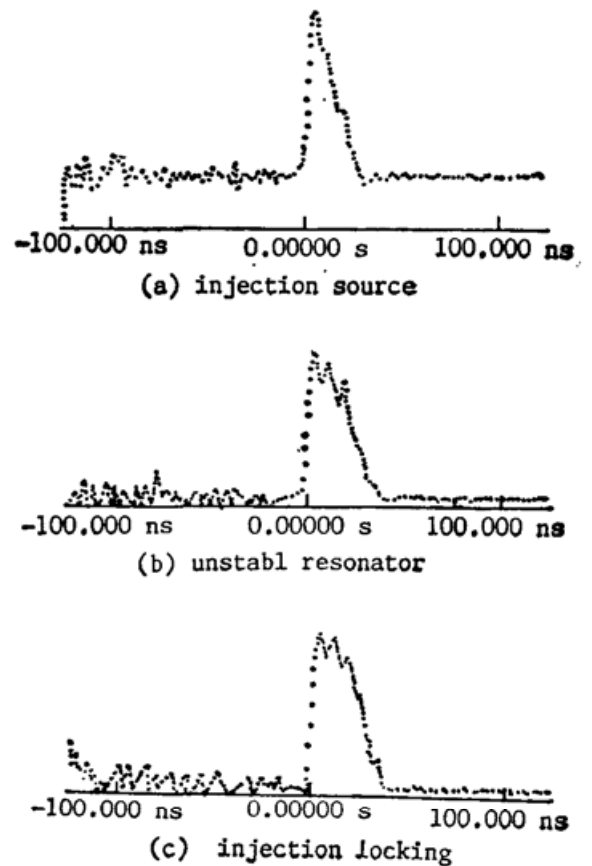


Fig. 2 Laser pulse waveforms for (a) injection source; (b) amplifier with unstable resonator and (c) injection locking laser system

所示。其中 M1 由三块石英棱镜及一块紫外光栅组合而成，M2 为石英平板，光阑 A1 和 A2 用以控制振荡器的横模为低阶模，激光输出波长在 248.18~248.88 nm 范围内可调，带宽为  $0.2 \text{ cm}^{-1}$ 。作为注入源的振荡器光脉冲波形如图 2(a) 所示，脉冲宽度为 13.2 ns (FWHM)；放大器的谐振腔由 M5 及 M6 组成，M5 是一块中间带有  $\phi 1 \text{ mm}$  小孔的凹面全反射镜，M6 是一块中间  $\phi 2 \text{ mm}$  部分有对 248 nm 100% 反射率全反膜的凸面镜，当放大器在 M5 端没有注入讯号时，M5 及 M6 组成一个非稳腔，其振荡输出脉冲宽度 (FWHM) 为 21 ns，如图 2(b) 所示，当注入讯号通过 M3 及 M4 反射进入放大器实现注入锁定后，激光脉冲宽度增加到 25.8 ns (见图 2(c))。这一注入锁定光束经反射镜 M7 和 M8 由透镜 F1 聚焦后进入氢喇曼池，透镜 F2 用作准直输出光束用。

由喇曼转换后的输出光束经石英棱镜后进行各种检测。除用能量计和双平面紫外光电管进行能量和脉冲波形检测外，还利用 CCD 照相机对泵浦光及各级斯托克斯光的空间强度分布进行测量。该检测系统由总面积约为  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ， $256 \times 256$  个单元组成<sup>[5]</sup> 的 CCD 列阵，控制器及微型计算机组成。对于氟化氦激光 (248 nm) 的最小响应率为  $40 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。其线性相应范围可达  $2.2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ，为了保证所检测的光束强度在接收器的线性范围之内，一般在接收器 CCD 列阵前要放置适当的衰减片。

喇曼池为 1 m 长的不锈钢管二头分别有倾斜角为  $3^\circ$  的平板石英窗口，其氢气压力在 1~30 atm 内连续可调。为了研究在高光束质量泵浦下，喇曼池中聚焦区的情况，这个喇曼

管的中间还装有二个石英窗口 W1 及 W2, 其中一个由 He-Ne 激光束作为光源的迈克尔逊干涉仪用以检测在聚焦光束作用下聚焦区的密度变化, 另一个则用于 COD 照相机进行拍摄干涉仪的干涉光束。

在所有测量中, 维持激光器的工作条件不变, 即恒定的充气压力及比份, 以及恒定的充电电压。采用可变光阑限制光束的大小, 以实现泵浦能量的变化。文中所提在喇曼池中的泵浦能量是以进入喇曼池窗口处的能量再减去一块石英板的两面反射损耗后计算得到的。实验结果表明, 采用光阑衰减比用中性滤光片容易在低能量下获得高的转换效率, 其原因可能是光束的中心部分比边缘部分具有较好的光束质量。

### 三、选择泵浦受激喇曼散射

由注入锁定准分子激光输出的光束具有十分良好的方向性, 通过对其远场分布的测量, 发散角约为  $0.1 \text{ mrad}$ 。实验首先改变聚焦透镜 F1 的焦距, 从而选择高转换效率的合适的泵浦结构。

在具体的应用中, 一般要求在喇曼输出中, 某一阶的斯托克斯光为主, 而对其它阶的斯托克斯光转换效率要尽量减小, 从而实现所谓“选择性泵浦”的喇曼转换。经过改变泵浦光的能量及改变喇曼池中的氢气压力, 实验测量了不同泵浦能量、不同氢气压力下 S1、S2 和 S3 的光子转换效率, 其主要结果由图 3 给出。

从图 3 可见, 当喇曼池内泵浦光能量在  $30 \sim 120 \text{ mJ}$  之间, 一阶斯托克斯(氢气压力  $3 \text{ atm}$ )、二阶斯托克斯(氢气压力为  $30 \text{ atm}$ )和三阶斯托克斯光, (最佳氢气压力为  $10 \text{ atm}$ ), 其转换效率均可达到  $40\%$  以上。

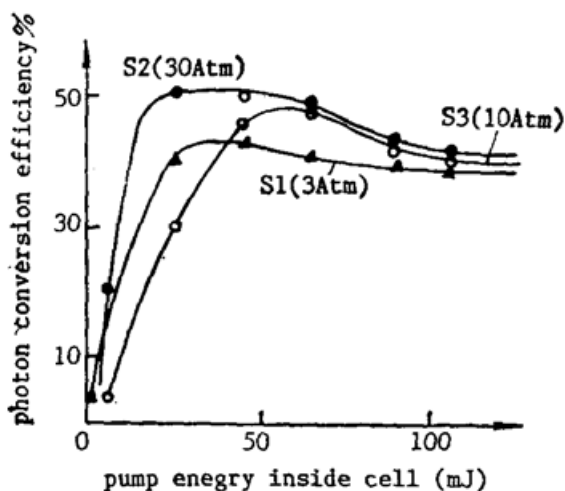


Fig. 3 Selective pumping for the first, second and third Stokes emissions

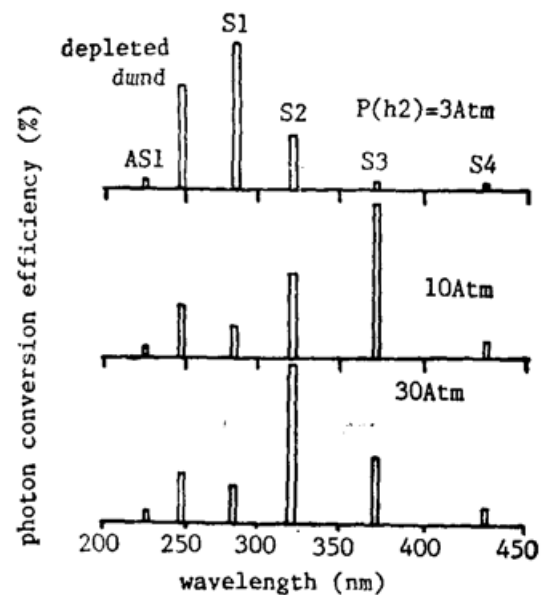


Fig. 4 The photon conversion efficiencies for AS1, depleted pump, S1, S2, S3 and S4 with the pumping laser energy of  $100 \text{ mJ}$  inside the Raman cell at different hydrogen gas pressures

图 4 给出喇曼池内泵浦光能量为  $50 \text{ mJ}$  时, 氢气压力分别为  $3 \text{ atm}$ ,  $10 \text{ atm}$  和  $30 \text{ atm}$

时光子转换效率的分布特性。其中除了一阶、二阶和三阶斯托克斯光外,还包括四阶斯托克斯光及一阶反斯托克斯光。图4还给出了残余泵浦光在受激喇曼散射输出光中所占的百分比。图中有关的主要数据由表1给出。由表1可见,对S1最大光子转换效率为43%,对S2为48%,对S3为46%,相应的能量转换效率分别为38%,38%及32%。

Table 1 Selective pumping for S1, S2 and S3 at different hydrogen gas pressure with 100 mJ pump laser energy inside cell

H <sub>2</sub> pressure (Atm)	photon conversion efficiency(%)			
	depleted pump	S1	S2	S3
3	30	43	16	2
10	15	10	25	46
30	14	11	48	14

从图4及表1可见,实验已较好地实现了对S1、S2及S3的选择性泵浦,即只要选择合适的泵浦结构及合适的氢气压力,可以在近百毫焦耳的泵浦能量范围内分别实现对S1、S2及S3高效率喇曼转换,这对实际应用是非常方便和有利的。

#### 四、斯托克斯光场的环状分布

从图4及表1,还可以发现一个十分有趣的现象:一般而言,随着氢气压力的升高,

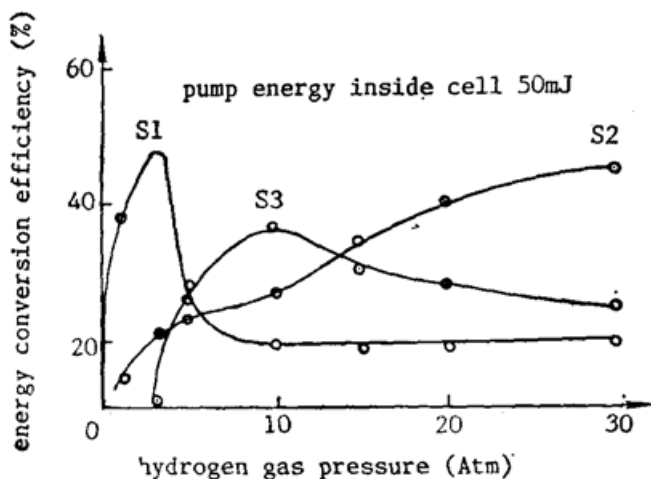


Fig. 5 The energy conversion efficiencies of S1, S2 and S3 vs hydrogen gas pressure

高阶斯托克斯光的效率随之升高,在文献[2]中,作者曾采用非稳腔的XeCl准分子激光作泵浦源,在近焦耳量级的泵浦能量下,得到相应于最佳转换效率的气压(如图5所示)分别为3 atm(S1), 5 atm(S2)和大于17 atm(S3)。但是本文的结果表明,相应于S3最佳转换效率的氢气压力为10 atm,它小于S2最佳转换效率所对应的气压为30 atm以上。

为了研究产生上述现象的原因,用CCD阵列检测了二阶和三阶斯托克斯光在不同氢气压力下的近场分布,其结果分别如图6、图7所示,此时相应的泵浦光是一个中间带有小孔的均匀环状分布。

从图6可见,对于二阶斯托克斯光,随着喇曼池中氢气压力的增大,中心区的直径也变大;而周围环状光的区域亦有增大趋势,如取环状光最强处的直径作为测量值,它也随氢气压力的增高而略有增长。如果注意到中心区的幅度,当气压从10 atm上升到30 atm时,其峰值强度几乎保持不变。

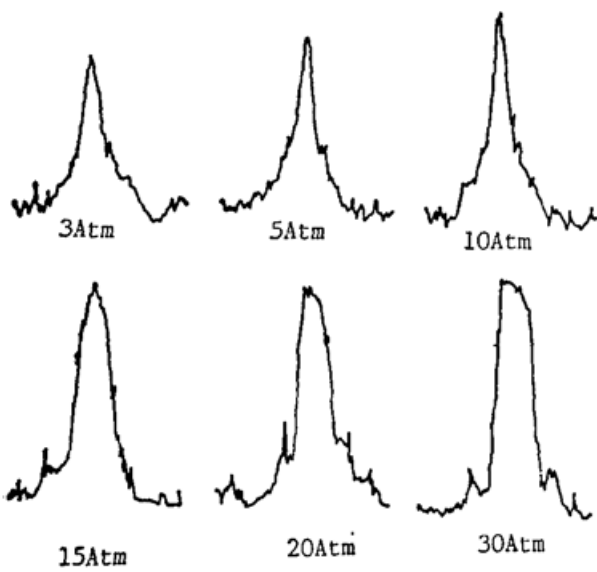


Fig. 6 The near-field beam profiles of the second Stokes emission at different hydrogen gas pressures

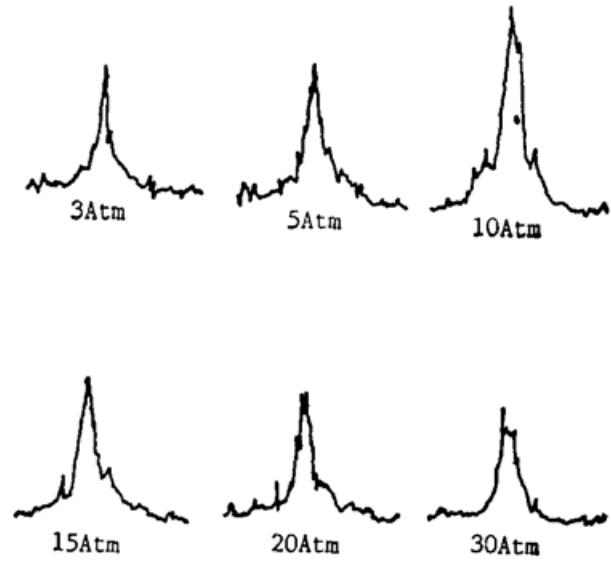


Fig. 7 The near-field beam profiles of the third Stokes emission at different hydrogen gas pressure

对于三阶斯托克斯光,情况就有所不同。在 10 atm 中心区的直径(取 FWHM 值)也随氢气压力的增大而增大,但峰值强度在 10 atm 时达到最大,当氢气压力进一步增大时,峰值强度减小。与此同时,环状结构也在气压为 10~15 atm 时达到最大。当气压达到 30 atm 时,环状结构已不明显。显然转换效率随气压变化的趋势主要是主峰的贡献,但环状结构随气压的变化也是原因之一。定量的分析还有待于进一步对波面结构的研究。

## 五、讨 论

上述压力效应的产生原因,来源于产生高阶斯托克斯光的不同机理。当强的泵浦光束聚焦到喇曼池中心以后,强度很弱的斯托克斯光自发辐射在泵浦场中被放大,首先产生的一阶斯托克斯光 S1,当 S1 足够强时又作为光泵去产生 S2,依此类推来产生高阶斯托克斯光输出,一般称这种机理为级联泵浦过程。

一阶斯托克斯光的强度可表达为<sup>[6]</sup>

$$I_{s1}(l) = I_{s1}(0) \exp \left[ g_{s1} \int_0^l I_L dl \right], \quad (1)$$

式中  $I_L$  为泵浦激光的强度,  $g_{s1}$  为一阶斯托克斯光的增益,  $I_{s1}(0)$  为一阶斯托克斯光自发辐射强度。根据级联泵浦过程的原理, S2 和 S3 强度分别为

$$I_{s2}(l) = I_{s2}(0) \exp \left[ g_{s2} \int_0^l I_{s1} dl \right], \quad (2)$$

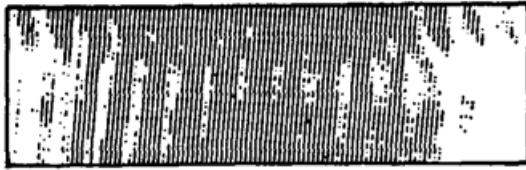
$$I_{s3}(l) = I_{s3}(0) \exp \left[ g_{s3} \int_0^l I_{s2} dl \right]. \quad (3)$$

从上面公式可见,每一阶斯托克斯光的强度既受到上一阶泵浦强度的影响,还要考虑本身作为泵浦源去泵浦下一阶斯托克斯光。

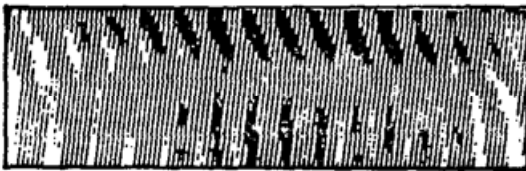
另一种产生高阶斯托克斯光的机理是四波混频过程<sup>[7]</sup>。正如所有的参量过程一样,四

波混频过程不存在阈值。在受激喇曼散射过程中,二个 S1 光子及一个泵浦光子可以通过四波混频产生 S2 光子;同样 S3 光子可以由二个 S2 光子及一个 S1 光子混频产生。这一过程的特点是需要合适的位相匹配条件,因此其输出光斑呈环状分布。从图 6、图 7 均可看到, S2 及 S3 除中间主峰以外,在一定的气压下均有环状输出分布,这部分的能量来自四波混频过程。

以 S3 为例,当氢气压为 10 atm 时,环状结构最为明显,进一步提高氢气压力,环状结构几乎消失。这一结果与文献[8]中报道的一致,这是因为在高气压下,由于气体线性色散的增大,其相位角的匹配较难满足。对于 S2,在高气压下(如 30 atm),环状结构的强度也



(a)



(b)

Fig. 8 The interferometer patterns show the focus region of the Raman cell. (a) pumped by the injection locking laser; and (b) pumped by the laser with unstable resonator

有所减小。

另一方面,环状结构的产生与聚焦情况有关,文献[3]研究了氢气中受激喇曼散射的环状输出,作者发现紧聚焦下容易出现环状分布。本文的实验中也发现,如不采用注入锁定激光作光泵,而采用一般的非稳腔输出,其环状结构就不如用注入锁定光泵条件下明显,这可能与非稳腔情况下聚焦程度差,而不易满足匹配角有关。这一点是与聚焦区的情况一致的,图 8 给出二种情况下,喇曼池中心聚焦区的折射率分布干涉图,聚焦区的光腰在注入锁定光泵下要明显小于一般非稳腔的情况。因此进一步验证了四波混频过程的作用。

综上所述,本文观察到的压力效应是一个比较复杂的过程,要对上述结果进行定量的解释需要进行数值模拟计算,除了上面所讲的二种主要机理,也有可能包括其它更为复杂的参量过程,这方面的工作有待进一步进行。但是本文已经在选择光泵条件及气压方面获得较好的结果,从而确定了选择激发的参量,达到选择激发的效果,这对受激喇曼散射光的应用提供了方便的选择激发方法。

### 参 考 文 献

- [1] T. Znotins; *Proc. SPIE*, 1986, Vol. 710, 55.
- [2] X. Cheng, Q. Lou *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**, No. 2 (Jul), 76.
- [3] A. Luches, V. Nassisi *et al.*; *Opt. Lett.*, 1987, **12**, No. 1 (Jan), 33.
- [4] H. Komine, E. S. Stappaterts; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 4 (Feb), 157.
- [5] T. Yagi, Y. Mutsumi *et al.*; *Appl. Opt.*, 1989, **28**, No. 10 (Oct), 3775.
- [6] M. G. Raymer, J. Mostowski; *Phys. Rev. (A)*, 1981, **24A**, No. 4 (Oct), 1980.
- [7] M. D. Levenson, S. S. Kano; *«Nonlinear Laser Spectroscopy»*, (Academic press, 1988), **18**.
- [8] Q. Lou; *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**, No. 6 (Sep), 2265.

## Hydrogen pressure dependence of stimulated Raman scattering pumped by an injection locking excimer laser

LOU QIHONG

*(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)*

(Received 2 May 1990; revised 17 July 1990)

### Abstract

The characteristics of hydrogen stimulated raman scattering pumped by an injection locking Krf excimer laser were investigated. The optimum hydrogen gas pressure for maximum conversion efficiency for third Stokes emission is lower than that for second Stokes emission. By measuring the beam patterns of these Stokes emissions, the mechanism for these phenomena is discussed.

**Key words:** excimer laser, stimulated raman scattering.

~~~~~

### 第七届全国磁学和磁性材料会议在湖南省娄底市召开

由中国物理学会、中国电子学会、中国金属学会、中国稀土学会、中国计量测试学会、中国仪器仪表学会和中国仪表材料学会联合举办的全国第七届磁学和磁性材料会议于1990年11月10日~18日在湖南省娄底市召开。会议由娄底地区电子研究所任东道主，娄底地区党、政领导全力支持下进行。来自全国22个省市500多位代表聚集一堂。会议共征集论文654篇，经评审委员会审定录取563篇。并由大会论文编审委员会编辑成1052页的会议论文集。

会议论文就其内容可分为九类，其分布为：1. 基础理论(66篇)；2. 永磁及软磁铁氧体(52篇)；3. 金属永磁(84篇)；4. 非晶及金属软磁(76篇)；5. 磁记录(69篇)；6. 微波磁学(71篇)；7. 生物磁学(31篇)；8. 磁测量技术(65篇)；9. 新工艺、新技术、新应用及其它(49篇)。分别以七个分会场进行交流，此外，大会每天(11、12、13日)组织特邀专题报告十四个，涉及各专题进展、国外动态、评述和展望未来等，会议自始至终在热烈的交流和探讨气氛中进行。

会议涉及到光学方面的论文既有基础理论方面的，也有磁光材料的研究以及磁光性能的测量及其磁光记录等方面的应用。

这次会议征集和审定的稿件，无论在数量上和质量上都明显高于以往各届。它反映了我国磁学和磁性材料领域这几年来飞跃发展。应与会代表的一致要求，并经大会领导小组同意，今后每三年举行一次综合性学术交流会。

(黎 风)