

区域。于是在提高位置探测器的分辨率的同时,测量每一粒子对焦面的入射角度,通过计算机系统对每一条粒子轨迹参数综合计算来达到运动学修正的目的。这就意味着在不改变整个谱仪系统结构的前提下,通过改进探测器与数据获取手段来提高分辨能力。

### 参 考 文 献

[1] C. P. Browne, W. W. Buechner, *Rev. Sci. Instr.*, **27**(1956), 899.  
 [2] J. Borggren, B. Elbek, L. P. Nielsen, *Nucl. Instr. and Meth.*, **24**(1963), 1.  
 [3] H. A. Enge, *Nucl. Instr. and Meth.*, **28**(1964), 199; J. Spenceer, H. A. Enge, *Nucl. Instr. and Meth.*, **49**(1967), 81.

[4] M. J. Levine, H. A. Enge, *Bull. Am. Phys. Soc.*, **15**(1970), 1688; H. A. Enge, S. B. Kowalski, 3rd Proc. Int. Conf. Magnet. Technology, (1970). Hamburg.  
 [5] H. Ikegam, T. Yamazaki, Annual Report of RCNP (1976).  
 [6] B. E. Fischer, *Nucl. Instr. and Meth.*, **105**(1972), 413; R. Bauer, *Nucl. Instr. and Meth.*, **157**(1978), 83.  
 [7] G. Charpak, *Nucl. Instr. and Meth.*, **62**(1968), 262.  
 [8] Lee, D. M., *Nucl. Instr. and Meth.*, **107**(1972), 179; **109**(1973), 421; E. R. Flynn, *Nucl. Instr. and Meth.*, **111**(1973), 61.  
 [9] G. Charpak, *Nucl. Instr. and Meth.*, **126**(1975), 381.  
 [10] V. I. Baekakov, *Nucl. Instr. and Meth.*, **158**(1979), 129.

## X 射线激光器的实验探索

卢 仁 祥

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

### 一、X 激光概况及困难

人类认识电磁场的相干辐射已经经历了两次大的飞跃——微波受激发射及激光。目前正在向第三次飞跃——X 激光过渡,它比光频区激光波长又将缩短三个量级左右(波长约为 100—1 埃),尽管实现这第三次飞跃的困难更大,但仍可以预料,X 激光的出现将给人们认识世界及改造世界带来更为广泛的应用。

实际上,自从梅曼(Maiman)等人制造了第一台红宝石激光器以来,寻求更短波长落于真空紫外及 X 射线波段激光器的努力一直没有停止过。然而迄今为止所达到的最短波长相干辐射是用钽玻璃激光器的 28 次谐波所获得的 380 埃辐射,它保留了原来钽玻璃激光的相干性。

1972 年,凯普罗斯(Kepros)宣称他已获得较硬的 X 激光,引起了广泛的争论,现已基本否定。相形之下,巴黎大学耶格耳(Jaeglé)等人的实验似乎更有说服力,他们已经观察到  $Al^{3+}$  在 117.41 埃由于感应辐射所引起的放大,并答辩了一些质疑。我们准备在下面详细介绍这两个典型实验。美国罗切斯特大学的雅科比(Yaakobi)近来用大功率钽玻璃激光器轰击带有冷陷的铝靶,在 129.3 埃获得明显的增益而引人注目。

其它在大功率激光产生的等离子体中也曾观察到碳类氢离子及钙高阶离子的粒子数反转,在表 1 中列出了这些例子。

美国加利福尼亚高能物理所迪肯(Deacon)等人自 1977 年来将 43.5 兆电子伏、峰值电流 2.6 安培的相对论电子束贯穿周期磁场。利用

磁致辐射首次在 3.4 微米处获得了千瓦的脉冲输出功率。这一尝试的成功引起了人们将自由电子激光引伸到短波段激光的种种设想。但是计算表明利用目前这样的磁致辐射原理，要获得在 X 射线波段处的相干辐射所需要加速器的能量及流量远远超出目前技术许可的范围。其它利用受激康普顿散射、相对论离子束的束箔辐射或电子束穿越理想晶体时的沟道辐射来实现 X 激光都有同样技术上的困难。

相干性进入短波段乃是未来 X 激光潜在应用的基础。它的最大应用是可以作生物大分子的全息照相，拍摄脱氧核糖核酸，癌细胞或病毒的分子结构，这对弄清生命及癌症的起源具有不可估量的意义，并为生物科学、固体物理及化学研究提供强有力的研究工具。

实现 X 激光的困难首先在于受激发射几率与波长的三次方成正比，当波长减少时，受激几率急剧下降。其次是物质对 X 射线的吸收损耗太大(主要是光电吸收)，除等离子体以外，几乎找不到象玻璃透光那样对 X 射线有那么透明的工作物质。为了克服光电损耗，需要有比光频段高上万倍的增益系数。最后是在具有足够增益的稠密等离子体区缺乏可利用的亚稳能级，在 X 射线区上能级的寿命是太短了，为  $10^{-14}$  秒。

由于上述原因，要使一台输出铜  $K_{\alpha}$  线 1.54 埃受激发射的 X 激光连续地工作，必须把全世界所有的发电站都停下来单独给它供电才行。

当然此处所提的困难是指传统的利用原子或离子束缚能极的方案，对自由电子激光另当别论。

## 二、X 激光的典型实验

### 1. 凯普罗斯实验的争论

1972 年夏天，美国犹他大学凯普罗斯等人宣布了一个惊人的消息，X 激光问世了！他们使用一台功率约  $10^9$  瓦脉冲宽为 20 毫微秒的钽玻璃大功率激光器，运转在 1.06 微米的近红外波段。激光束经过球-柱面透镜组 [图 1(a)]，

形成  $0.1 \times 10$  毫米大小的细长焦线，并落在厚 100 微米的玻璃薄片之间。

在激光的每一次轰击中，光束透过玻璃片强烈地加热夹层硫酸铜明胶，最后玻璃片连同明胶均被击成碎片。

凯普罗斯设想，如果在被激光轰击的等离子体焦线区产生出 X 射线波段的激光，那末用不着谐振腔它就可以沿着焦线传播。因此他们用一张被几层黑纸和铝箔包裹着的 X 光底片作

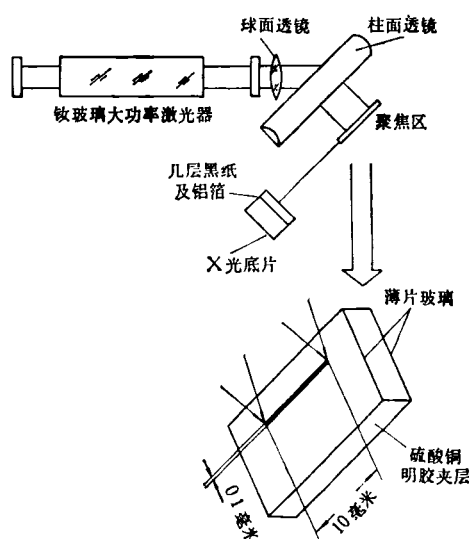


图 1 大功率激光在硫酸铜明胶上聚成条形焦斑，沿焦斑纵长方向发射的 X 射线具有准直性

探测试验。在距离焦线延长线约 10 厘米处观察到一个  $\phi 200$  微米大小的可疑曝光黑斑。在下次实验中，另换两块夹有硫酸铜明胶的玻璃片放在原来的焦线位置，并将包裹着的 X 光底片沿原聚焦焦线方向再移开 1 米，结果仍然有一个不扩大的曝光黑斑。这就是说曝光黑斑是由具有一定穿透性和准直性的射线束造成的。凯普罗斯等人不顾该实验现象还只有十分之一的成功几率，也未精确测量未知射线的波长，就贸然宣布已获得铜 1.54 埃  $K_{\alpha}$  受激发射。

X 激光这么容易就做起来，立即在世界上引起一场轩然大波。因为  $10^9$  瓦的激光器并不是要求很高的，当时有条件的大学和实验室纷纷重复这一实验。一些重要杂志也纷纷以快讯形式连篇累牍地报道重复实验的结果，赞成的一派与否定的一派各自用自己的实验事实与对

表1 近年来实现 X 激光的实验报道

| 实验单位                         | 工作物质  | 波 长  | 泵 浦 手 段  | 现 象  | 备 注  | 消 息 来 源  |
|------------------------------|---|--|--|--|--|--|
| 美国<br>犹他大学                   | Cu <sup>2+</sup><br>或<br>Cu <sup>26+</sup>  | 1.54 埃<br>或<br>4.2 埃(??)   | 用钽玻璃大功率<br>激光器柱面透<br>镜线状聚焦到硫<br>酸铜明胶中  | 在焦线延长线<br>上观察到了不随<br>距离增加而变化的<br>感光斑点  | 经剧烈争论<br>后,基本上否定。<br>但感光斑点的来<br>源仍未弄清。而且<br>Kepros 计算<br>铜的类锂 K 线跃<br>迁波长为 4.2 埃<br>是不对的 | ① Proc. Nat'l. Ac-<br>ad. Sci., <b>69</b> (1972),<br>1744<br>② Opti-Flec., <b>6</b><br>(1974), 197<br>③ A. O. <b>13</b> , 453,<br>695; <b>12</b> , 2529, 2005,<br>1095 |
| 美国<br>得克萨斯大<br>学             | Cu <sup>+</sup>                             | 1.54 埃   | 用细聚焦电子<br>束激发, 弯晶谱<br>仪聚焦继发的 X<br>射线, 计数器计<br>数。   | K <sub>α</sub> 线反常变窄   | 有争议  | PL, <b>46</b> A (1973),<br>179.<br>Proc IEEE, <b>69</b><br>(1976), 1059  |
| 美国海军<br>研究所                  | Fe <sup>16+</sup><br>Fe <sup>17+</sup>      | ~1.9 埃   | 等离子体箍缩<br>放电   | K <sub>α</sub> 线谱变窄<br>20%   |  | LF, 1973, No. 11,<br>p. 41   |
| 美国<br>海军研究<br>所              | Ne  | 380 埃<br>(自由-束缚<br>跃迁)   | 用 30 ps 的锁<br>模钽玻璃激光器<br>先四倍频再七倍<br>频  | 记录到 28 次<br>谐波 380 埃谱线   | 这是目前公认<br>的最短相干波长  | LF, 1977, No. 1,<br>14   |
| 美国海军<br>研究所                  | C <sup>4+</sup> 及 C <sup>5+</sup>           | 350—760 埃<br>$n p^1 P_1 \rightarrow 1 s^1 s_0$<br>( $n \geq 4$ ) | 钽玻璃激光器<br>泵浦产生 C <sup>5+</sup> 及<br>C <sup>4+</sup> 与中性碳电<br>荷共振交换                                   | 观察到粒子数<br>反转   |  | PRL, <b>38</b> (1977) 1072   |
| 澳大利亚<br>国立大学<br>及美国海<br>军研究所 | C <sup>3+</sup>                             | 182.2 埃<br>( $n = 3 \rightarrow 2$<br>跃迁)<br>135 埃               | 用大功率钽玻<br>璃激光器泵浦,<br>1974 年澳大利<br>亚分析碳的 X 线<br>谱, 1976 年美国<br>NRL 打 $\phi 5.3$ 微<br>米细长碳丝(为<br>快冷复合) | 1974 年观察<br>到粒子数反转,<br>1976 年估算出<br>增益系数 $\alpha$ 与增<br>益长度 $l$ 之积为<br>$\alpha l \sim 10^{-1}$ | 增益太小   | J. Phys., B7(1974),<br>1109; LF, 1977, No.<br>3, 68. PRL, <b>37</b> (1976),<br>1265  |
| 法国<br>巴黎大学                   | Al <sup>13+</sup>                           | 117.41 埃<br>$2 p^3 4 d^3 p_1$<br>$\rightarrow 2 p^4 1 s_0$       | 用钽玻璃大功<br>率激光打铝靶,<br>形成两团等离子<br>体, 一个作振荡<br>器, 一个作放大<br>器  | 1974 年报道<br>117.41 埃有 16%<br>增益, 1976 年报<br>道有 60% 增益  | 有争议  | PRL, <b>33</b> (1974),<br>1070; LF, 1976, No.<br>12, 4   |
| 美国罗彻斯<br>特大学                 | Al <sup>11+</sup>                           | 129.7 埃<br>( $n = 4 \rightarrow 3$<br>跃迁)                        | 钽玻璃大功率<br>激光打铝(快冷<br>复合方案)   | 观察到粒子数<br>反转 $\alpha \sim 0.1$ /厘<br>米   |  | LF, 1977, No. 12, 30<br>Opt. Commu., <b>24</b><br>(1978), 331  |
| 苏联列别捷<br>夫研究所                | 在 CaCO <sub>3</sub><br>中的 Ca <sup>10+</sup> | 500—700 埃<br>$2 p^3 3 p \rightarrow$<br>$2 p^4 3 s$              | 用钽玻璃大功<br>率激光经由柱面<br>透镜聚焦线打<br>方解石(CaCO <sub>3</sub> ),<br>以光栅零级衍射<br>构成腔, 一级衍<br>射测试                | 对应波段底片<br>发黑, 目前仅能<br>用受激发射解释  |  | Письма в ЖЭТФ,<br>1977, 569  |
| 苏联光谱<br>学研究所                 | KCl 中<br>Cl <sup>14+</sup> 离子               | 58.23 埃<br>$2 p^3 3 s 3 d \rightarrow$<br>$2 p^4 3 s$            | 钽玻璃激光柱<br>面透镜线状聚焦  | 58.23 埃发射<br>有各向异性   | LF1977 年 No.<br>8 以重要位置报<br>道后, 美国 NRL<br>认为 58.23 埃是<br>混在 KCl 中 Na<br>的跃迁              | Письма в ЖЭТФ,<br>1977, 325<br>LF, 1977, No. 6, 4,<br>No. 10, 46   |

方进行激烈的论战，其活跃程度是激光发展史上少见的。

在理论上因预言激光而获得诺贝尔奖金的肖托 (Schawlow) 表示支持这一实验，然而美国磁学实验室的拉克斯 (Lax) 等人认为激励的功率太低了，要产生铜的  $K_{\alpha}$  受激发射至少要  $10^{13}$  瓦以上的激励功率。凯普罗斯著文争辩道，毫微秒激光脉冲可能有更短的微微秒亚结构脉冲存在，而且在焦斑区还可能有丝状或自聚焦效应使焦区变小，能量在更小时空区间的集中，使得真实的激励功率密度远高于原先  $10^{11}$  瓦/厘米<sup>2</sup> 的估计。然而凯普罗斯在这里只是引用了别人的实验结果，在他自己特定实验条件下，却没有观察到上述现象的确凿证据，因而他的辩解是缺乏说服力的。

美国劳伦斯·利弗莫尔实验室的博斯特 (Boster) 从实验上提出反对，他认为感光斑点甚至根本用不着 X 辐射来解释。他在一次会议上讽刺地用手拍拍底片盒说，静电摩擦就足以引起类似的感光小点。在这一点上，美国海军实验室的埃尔顿 (Elton) 帮了一下凯普罗斯的忙，他在仔细排除了静电摩擦效应之后，做了重复实验，仍然观察到可疑的曝光斑点。

该感光点的来源马上又有人提出怀疑，说这是由于在焦线区激光轰击产生等离子体中的高能电子所形成的，与 X 激光根本无关。凯普罗斯接着做了实验，他在射束的途径中加一强磁场，射束在磁场中不经受偏转，排除了感光点由带电粒子所造成的可能性。

保加利亚索非亚大学的实验小组还改进了凯普罗斯的实验。他们将激光的脉宽时间从 20 毫微秒缩短到 6 毫微秒，结果发现感光事件的几率大大增加，从原来十次中只有一次提高到十次中有九次能看到这一现象。

然而，奇怪的是除底片以外的其它探测工具如电离室、闪烁计数器和正比计数器都没有观察到响应信号，这确实是给凯普罗斯实验的致命一击。

凯普罗斯本人并未测量出发射 X 射线的波长。他只是根据射线对黑纸及铝箔的穿透性来

进行估计，而当有人指出实际穿透性并不如 1.54 埃那么强时，他马上又修改他的理论模型说，沿焦线出射的是铜的类锂跃迁 (即铜 29 个电子还剩下三个电子的跃迁)。

目前重复实验的热潮早已过去，并已基本否定，凯普罗斯在理论上的混乱和 X 射线主动接收器未接收到 X 射线信号，增加了人们的怀疑，更重要的是该实验并未揭示象谱线变窄和呈现出增益之类更重要的激射标志。具有准直性并非是激光的充分条件，至于 X 底片上可疑的曝光斑点究竟是什么，目前众说纷云，留下了一个疑团。

## 2. 还在继续着的争论

然而几乎就在凯普罗斯实验的同时，法国巴黎大学光电子实验室耶格耳等人报道了存在 X 射线受激较有说明力的证据，图 2 是实验示意图。功率为  $10^8$  瓦，脉宽为 30 毫微秒的大功率激光被分束，并聚焦在两块铝板上，在金属表面产生了两团等离子体。借助于掠入射光栅谱仪，发现第一团等离子体所发射的 117.41 埃软 X 谱线被第二团等离子体所放大，测出净增益为 17% 增益系数为  $10$  厘米<sup>-1</sup>，谱线约略变窄。

耶格耳实验同样也经受了非难，美国劳伦斯·利弗莫尔实验室、宇航研究中心，还有苏联

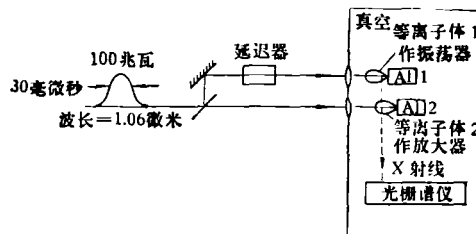


图 2 耶格耳实验 (一团等离子体在 117.41 埃被另一团等离子体放大)

光谱学研究所卡舍列夫 (Коселев) 等都对实验提出了非受激的复杂解释。有的人认为耶格耳没有考虑在温度非均匀等离子体中的辐射传递衰减，有的人认为还应该计及自电离效应。

提出责难的苏联光谱学研究所中的同一组作者，自己做了一个实验，他们将能量为 6—8 焦耳、脉宽为 0.25 毫微秒的钨玻璃大功率激光，通过特殊的透镜以条形焦斑 ( $0.1 \times 1.5$  毫米)，

轰击氯化钾晶体(图3)。

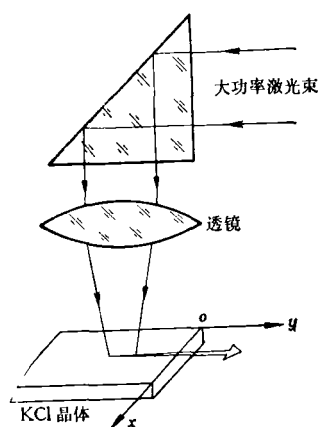


图3 KCl 晶体表面沿激光条形焦斑的纵长方向( $oy$ ) 58.23 埃软 X 射线强度异常

结果在掠入射光栅谱仪中发现, 等离子体中的氯高阶离子在 58.23 埃软 X 射线波段其强度沿纵长方向有异常. 因此他们认为这一现象只能用受激放大来解释. 然而不出两个月, 美国海军实验室的埃耳顿等人又著文给以责难, 说苏联人认错了谱线, 58.23 埃应该是混在氯化钾中杂质钠的 X 线谱.

紧接着在 1978 年初我们看到报道, 法国巴黎大学的实验工作者们改进了他们的实验, 不但把在 117.41 埃的增益系数提到 60%, 而且发现谱线的精细结构也与理论预言符合得很好. 图 4 给出利用稠密等离子体中的辐射传递方程获得的谱线强度与实验光栅谱仪所获得谱线黑度曲线的比较.

### 三、X 激光的几种研究途径

从上面的介绍来看, 用激光辐照固体靶产生等离子体, 在软 X 射线波段实现粒子数反转, 呈现增益并进一步实现有一定相干性的 X 激光是目前所有途径中最活跃的. 在有些途径中提出了使用激光预脉冲, 设置冷陷阱, 打纤维状靶, 行波激励等巧妙的设想. 然而由于在等离子体中产生了原子、离子、电子与光子之间各种复杂的相互作用, 加上等离子体在时间、空间上的极端不均匀性, 粒子集居数分散在不同离子

的不同能级上(有一统计分布), 使激光等离子体具有难以控制的性质. 在表 1 中所引的实验报道可以说还没有一个真正被公认.

与此同时, 近年来通过以激光核聚变为目的的大量实验研究对激光等离子体中的吸收机构, 热导受限, X 射线及超热电子的产生, 等离子体中的动力学过程有了深刻的了解. 这反过来对 X 激光课题的研究也具有促进作用.

第二条途径是现有激光技术的延长. 已经指出通过倍频手段的钨玻璃激光器高次谐波 380 埃是迄今最短的波长, 但是倍频阶次越高, 高次谐波的输出能量也迅速减少.

此外含有惰性气体原子的准分子和氮分子可以产生 1000 埃以下的激光, 受气体离子化能量的制约, 使用准分子技术所获得的最短波长只能达到 500 埃左右.

第三条途径类似于第一条途径, 只不过使用高能电子束或离子束代替激光束轰击固体靶. 微观过程与激光等离子体有许多共同点. 以束箔相互作用为例, 相对论粒子束轰击薄膜可以快速剥离薄膜的大部分或全部电子. 这种高度电离的条件将大大减少 X 射线的光电损耗, 而且如果离子束的能量合适, 还可以在薄膜靶中选择性地产生亚稳能级空穴. 当然这种束箔相互作用理论上尚有不清楚的问题. 另外, 目前加速粒子束的流量水平离产生 X 激光尚有一段距离, 为此我们关注着美国桑迪亚为实现核聚变而设计的高通量轻离子束加速器的筹建.

下面再分析一下高能正电子穿越晶体时的沟道辐射. 这种沟道辐射是带电粒子通过晶体中的通道时受周期性晶格场的影响而产生的, 它具有随正电子速度而改变的极狭窄的辐射频带及辐射高度定向. 目前已观察到 X 射线区的沟道辐射, 但要做出在 X 射线区的放大, 需要  $10^6$  安培/厘米<sup>2</sup> 的束流, 这比现在技术上允许的差三个量级.

第四条途径是利用真空中相对论电子束作为放大介质的所谓自由电子激光器, 目前格兰纳斯坦 (Granatstein) 等人已用受激磁喇曼散射

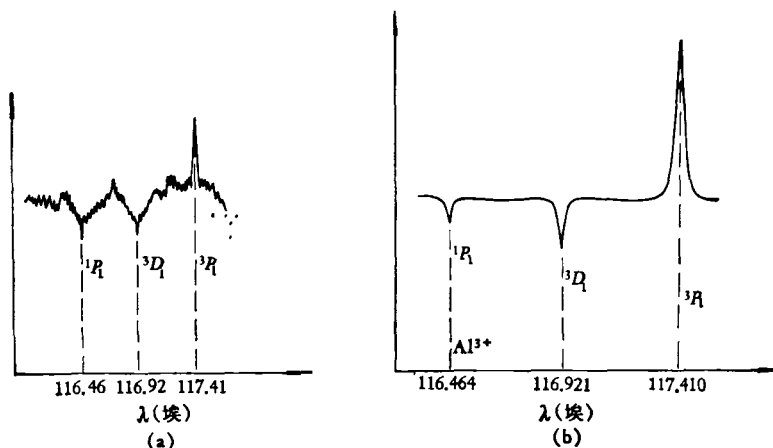


图 4

(a) 是耶格耳实验光栅谱仪记录的铝等离子体辐射黑度扫描曲线;  
 (b) 是用辐射传递方程算出的谱线发射强度

获得高功率亚毫米波段的激光。皮克康 (Peacock) 等人用受激磁致辐射获得了 3.4 微米的红外区激光。另外受激逆康普顿散射机理等还在探索。理论方面的工作相当活跃。

从原理上看自由电子激光的优点是频率可调及工作物质处于真空状态, 不会象普通激光

器那样有自聚焦和气体击穿的限制。因此即使是先做出在光频段波长可调的自由电子激光也有很大意义。

除了上述四种途径之外, 当然也不排除还有其它基于新原理的实现 X 射线区相干辐射的方案。

## 第一次全国激光新材料协作交流会简讯

第一次全国激光新材料协作交流会于 1980 年 11 月 15 日至 20 日在厦门市举行。这次会议是国家科委光学及应用光学学科组光学材料分组委托中国科学院福建物质结构研究所负责筹备召开的。出席这次交流会的有研究机构、高等院校、工厂等 20 多个单位, 40 多名代表。

在全体会议上宣读了 8 篇邀请报告, 内容有

- (1) 中国科学院上海硅酸盐研究所张绶庆作《国际第六届晶体生长会议概况》报告;
- (2) 北京 1411 研究所张英侠作《激光新材料国际发展动态》报告;
- (3) 中国科学院物理研究所梁敬魁作《相图与新材料探索》报告;
- (4) 中国科学院长春应用化学研究所于亚勤作《稀土磷酸盐激光晶体的研究概况》报告;
- (5) 中国科学院上海光学精密机械研究所吴光照作《可调谐激光晶体的几个问题》报告;
- (6) 中国科学院福建物质结构研究所孙琼丽作

《硼酸盐体系激光新材料研究》报告;

(7) 中国科学院福建物质结构研究所陈长康作《激光晶体的组成、性能与结构因素》报告;

(8) 张绶庆作《长波段光通讯用光源》报告。

与会代表介绍了本单位有关新激光晶体材料的研究情况, 分组讨论了色心激光晶体、自激活激光晶体、掺不同激活元素激光晶体等的目前国内外研究概况及其主攻方向。代表们对我国激光材料研究及新材料探索现状进行了分析, 认为近年来我国激光新材料在基础理论研究、合成、相图相变、晶体生长、物化性能和器件研究等方面, 开展了一系列的研究工作, 初步建立起一支科研队伍。但与国际水平相比, 仍存在着相当大的差距。大家认为, 必须加强交流与协作, 并讨论了相应的措施。

会议商定, 第二次全国激光新材料协作交流会由中国科学院长春应用化学研究所负责筹备, 将于 1983 年在长春市召开。

(梁敬魁、王耀水)