

自由电子激光——“新金矿”

赵小风 益关琪

一、“新金矿”

1986年5月著名物理学家杨振宁博士来华讲学时,有人问他:“应当选择哪些领域研究才有发展前途?”他在回答中特别提到了准晶和自由电子激光(以下简称 FEL),并说:“这好比淘金矿,当然以淘新金矿为好。”

为什么杨振宁把研究 FEL 称为“淘新金矿”?这可以从人类对电磁波资源的开发利用中得到答案。我们知道任何一种光都是一种电磁辐射,激光也不例外,它是整个电磁辐射波谱中的一个组成部分。整个电磁辐射波谱包括有长波、短波、微波、红外、可见光、紫外、X射线、 γ 射线等多个波段,如同人类对物质结构每一层次的探索必然会创造出新的巨大生产力一样,人类对电磁波谱每一波段的开发利用,也必然会把科学进步推进一大步。例如,对波长大于10cm的电磁波资源的开发,带来了现代无线电技术的蓬勃发展,使广播、电视、远程通讯等相继引进我们的日常生活;微波波段的开发,使近代雷达、导航、射频加速器等先进技术得到迅速发展,并促进了波谱学、核物理、航天等新兴学科的发展;X射线波段的开发,带来了透视、探伤及现代超大规模集成电路光刻等技术,促进了晶体学、医学、计算机科学的发展;60年代以后发展起来的激光物理和技术,开发了可见光($3000\text{ \AA} - 7000\text{ \AA}$)及其两侧(红外和紫外)的电磁波资源,使许多以往普通光学技术难以成功的事现在列入到了常规技术之列,例如激光手术、激光加热、激光复印和录音、激光准直和加工、激光在可控聚变等新兴学科研究中的应用。几乎在同一时期发展起来的同步辐射光源,开发了从近红外($\sim 1\mu\text{m}$)到软X射线($\sim 0.1\text{ \AA}$)的电磁波段,大大促进了表面物理、光化学、光生物学、形貌术、血管造影、集成电路光刻等许多学科和技术的发展。所以,有人说谁掌握了新的电磁波谱,谁就掌握了未来,这话不是没有道理的。近十年来迅速发展起来的 FEL,是人类开发新电磁波资源的又一次重大进展。这种能将相对论优质电子束的能量直接转换为激光的崭新光源,原则上讲可以覆盖从微波、红外、可见光、紫外直至X射线的一个很宽的电磁辐射波段,如图1所示。在毫米波、亚毫米波区, FEL 与回旋管相补充,但可以提供更大的功率;在 $200\text{nm} - 30\mu\text{m}$ 波段, FEL 与一些固定波长或波长调谐范围很窄的各种传统激光器相补充,但在波长 $\leq 200\text{nm}$ 或 $\geq 25\mu\text{m}$ 的区域, FEL 却是

目前唯一能提供可调谐、高功率的相干辐射源。更重要的是, FEL 具有以下优于其他电磁辐射源的重要特点:

(1) 宽调谐能力。一台 FEL 的工作波长可随电子束能量的变化而改变,而加速器输出的电子束能量可以方便地在相当大的范围里变化。FEL 的这种波长宽调谐能力,对化学家是特别珍贵的,因为只有很少几种激光器——准分子和 CO_2 激光器——才有窄的调谐范围,绝大多数激光器只能工作在固定的波长,同步辐射光源虽总的讲也有很大的波长覆盖范围,但对每个同步光源而言,为获得波长的宽调谐能力,需要十分复杂的分光束线系统,同时它是一种较弱的非相干光源,谱线宽,单色性差。

(2) 好的光束质量。FEL 的谱线窄、单色性好、光谱纯度可达亿分之一,甚至可达变换极限。它的光脉冲时间结构同样非常优异,从微微秒的短脉冲到几百微秒的长脉冲兼而有之,脉冲的时间结构还可以根据不同需要加以改变。这些特性正是许多新兴学科如生命科学研究所需要的。

(3) 高功率。FEL 很适于在高功率下运行。传统激光器的高功率运行受限于排除废热的能力及工作介质损坏带来的故障,对于 FEL 而言,工作介质是电子束,真空中运行的电子束不存在热效应问题,同时电子束在几毫微秒内便排出了光学谐振腔,加之已有运行在高功率下的电子加速器技术。

由于 FEL 具有上述这些作为理想光源的特点,自从1976年美国梅迪(Madey)等人研制成功世界上第

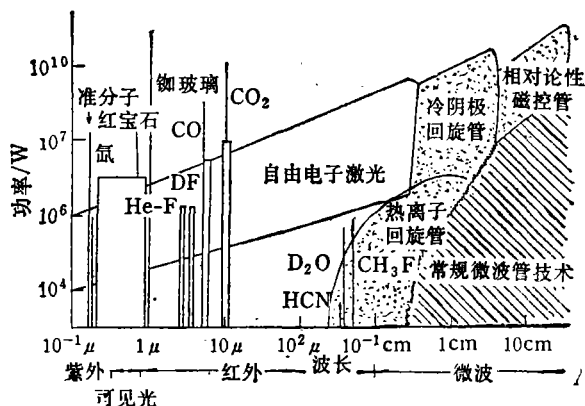


图1 产生高功率、相干辐射的各种辐射源(电磁波源)

一台 FEL 以来,美、英、法、苏、日本、意大利、西德等发达国家的一些高水平大学和国家实验室都竞相投入了 FEL 研究,目前已成功运行的 FEL 有十多台,正在设计或建造中的为数就更多了,我国也在北京和四川等研究单位开展红外和毫米波 FEL 的研究,每年一次的国际 FEL 会议已连续开了十一次,真可谓一派竞相争“淘新金矿”的势头。

二、工作原理、模式

FEL 是一种以在周期磁场中作振荡运动的相对论优质电子束作为工作物质的大功率、可调谐相干辐射源。由于电子不像在普通激光器中那样为原子所束缚,电子是“自由”的,故叫自由电子激光。它有多种工作模式,主要是振荡器、放大器和超级辐射三种。其工作原理可简述如下:如图 2 所示,由一系列沿着扭摆磁铁(Wiggler 或 Undulator)长度方向交替排列的朝上朝下的磁极,形成周期磁场,当来自加速器的电子束穿过扭摆磁铁时,电子便左右交替偏转,作以磁场周期长度 λ_w 为周期的振荡运动,并产生经典的偶极辐射(自发辐射),该辐射主要集中在与电子振荡运动方向相垂直的朝前方向。由于多普勒频移,实验观察到的该辐射电磁波波长为:

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2}(1 + a_w^2) \quad (1)$$

式中 γ 是以电子静止能量为单位的电子总能量; a_w 是扭摆磁铁磁场参数, $a_w = 0.093\lambda_w B_w$, B_w 是磁场强度(kG), λ_w 的单位是厘米。(1)式清楚表明了 FEL 得到短波辐射的原理,例如通常 $\lambda_w \sim 3\text{cm}$, $a_w \sim 1.0$, 当电子束能量为 100MeV (兆电子伏特)时,可以得到 $\sim 1\mu\text{m}$ 波长的短波辐射。当然,上述的辐射是一种自发辐射,是非相干的辐射。FEL 作为一种大功率相干辐射源,主要取决于其产生相干辐射的机理:电子在作振荡运动的同时,还沿扭摆磁铁长度方向作朝前向的运动,如果前向运动的速度使得前进一个 λ_w 距离所需要的时间是 $(\lambda_w + \lambda_e)/c$, (c 为光速, n 为整数 1、2、3、……),那么电子在振荡运动的相继周期期间内所产生的自发辐射,将是在光波长 λ 上相干的,产生在光波长 λ 上的相干辐射。实际上,(1)式所表示的共振条件正是对应于 $n = 1$ 的情形。

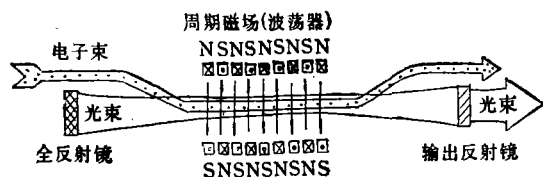


图 2 自由电子激光原理示意(振荡器)

如果有一个线偏振的平面电磁波,它在扭摆磁铁的中心平面上与扭摆磁场相叠加,则它们的组合作用

就给电子束提供一个沿扭摆磁铁长度方向的作用力,该作用力不是略微加速电子就是略微减速电子(这取决于电子所在的相位),造成电子束在光波长 λ 上的群聚,产生电子束的密度调制,使得原来的相干辐射输出被大大(放大)增强。根据平面电磁波来源的不同,FEL 的工作模式就不同,其基本工作模式是以下三种:如果电子束本身的自发辐射被一对光学反射镜所反射而形成平面电磁波,并与大部分电子束的相干辐射所共殖,则 FEL 工作于振荡器模式,见图 2;如果平面电磁波来源于某外来光源,则工作于所谓放大器模式,如图 3;如果电子束的光强足够大,扭摆磁铁也足够长,以致电子束单次通过扭摆磁铁的自发辐射就能造成电子束的群聚,于是电子束的相干辐射同时被增强放大,这时 FEL 工作于超辐射模式。

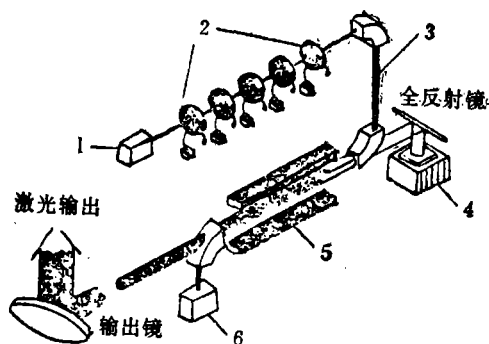


图 3 FEL 放大器示意图

1. 电子枪; 2. 直线加速器; 3. 大功率电子束;
4. 主振荡器; 5. 扭摆磁铁; 6. 电子束收集器。

近年来,为探索 FEL 向短波和高效方向发展的新路子,又实验研究成功了好几种其他工作模式,其中最有效的是两级振荡器模式、高次谐波光学速调管模式和主振荡功率放大模式(MOPA)三种。限于篇幅,这里不一一介绍了。

三、前景辉煌

任何一种新技术的生命力,从根本上讲取决于它自身的应用前景。由于 FEL 具有宽带调变、窄谱线和高功率(高亮度),这些超越传统激光器及其他相干辐射源的许多优点,使得它在医学、国防、能源、生物、材料、物理等诸多领域,有着辉煌的应用前景,例如:

(1) 国防领域。美国战略防御计划(星球大战计划)是美国 FEL 发展的最大支持者。FEL 被作为陆基定向能武器优先候选对象,用于摧毁处于助推段和初期中段弹道上的弹道导弹,并计划于 1994 年在白沙导弹试验场进行关键性陆基 FEL 整体技术实战试验。他们选择了两种加速器类型的 FEL (射频直线加速器和感应直线加速器)作为两匹参加角逐的赛马。目前的竞赛结果有利于射频直线加速器型 FEL 作为最终的

候选者,它的主要技术依托单位是洛斯阿拉莫斯国家实验室和波音航空公司,总投资高达几十亿美元。

此外, FEL 可作为激光雷达、激光通讯和光对抗的宽带可调高功率源。例如美国海军研究实验室已获得工作在毫米到微米的 FEL,峰值功率为兆瓦到千兆瓦,被用作频率捷变使敌方难以预先防御的雷达和通讯功率源。FEL 的宽带可调,还可用来调谐到大气或水下传输最佳点,用作战略武器通讯,或用来研究反隐身术和反潜术。在发展高分辨率雷达中, FEL 也会是很有用的。

(2) 医学和外科手术。各国医学界对 0.6~3 μm 波长区的 FEL 非常感兴趣,因为人体各种组织的吸收系数在该波段有四个量级的变化(3 μm 端有非常强的吸收),显然波长的连续可调性,对研究治疗效果至关重要。激光脉冲宽度的可调性也很重要,因为它可以控制从慢扩散加热到具有蒸发、等离子体形成的强加热来影响激光手术效果。波长和脉冲宽度还影响光纤和其他将激光传输到手术部位的器件的使用。FEL 的波长、功率和脉冲结构(宏脉冲宽)均可变的能力,是大多数常规激光器所无法相比的,成为光线疗法研究中的理想辐射源。一旦 FEL 用于确立不同外科手术的最佳参数,就既可以用常规的或更经济的激光技术来提供这些参数,也可以直接使用具有实时适应外科手术环境变化能力的 FEL 本身。

FEL 在医学上应用的最突出例子是前些年,美国国会下达了关于发展和加强 FEL 技术和评定其在医学、生物物理和材料科学方面潜在应用的指示,有关部门据此指示制定了一个医用 FEL 计划,并投以巨资,分地区建立了五个以大学和研究所为基础的医用 FEL 中心。这些中心到 1989 年已取得了以下四个方面的突出成果:

① 光动力学治疗癌症:把无毒光敏化学染料注入人体,恶性组织容易吸收这种染料而健康组织不易吸收它。利用这种染料对激光波长吸收的选择性,既可以诊断和定位恶性肿瘤,也可以使含这种染料的肿瘤细胞产生单氧态从而杀死它们。FEL 的可调波长特性和高的平均功率,使它在光动力学治癌中独占鳌头。已鉴定了 35 种以上光敏染料,在光动力学治癌中已取得重大进展,并促进了白血病骨髓治疗和淋巴瘤治疗,因为精确可调波长的 FEL 使癌细胞遭破坏而无损于健康细胞。

② 外科手术:用 FEL 实现了干净地切割骨骼而不把它烧黑。这种方法大有希望简化和缩短更换髓关节和治疗急性关节炎这类关节外科手术的时间。还发展了一种用短脉冲 FEL 击碎肾结石的方法,并已在十几家医院中使用。

③ 眼科手术:1.5 μm 是眼睛安全波长,这是 FEL 能方便地提供的。它比 Na:YAG 激光安全 8000 倍,

比 CO₂ 激光安全 100 倍。FEL 的微脉冲(几十微微秒)用于透明的或染色的眼睛组织的外科分裂,而宏脉冲(几十微秒)用于视网膜光焊接。激光眼科手术中激光的单色性是光凝固的关键,需根据被治疗部位是眼前部(结膜、角膜、虹膜)还是眼底部(玻璃体、脉络膜、视网膜)来选择波长,同时能量密度和聚焦性是进行精确凝固的条件。FEL 波长可调、光束品质好,能量密度高,在眼科光凝固中发挥了巨大作用。

④ 心血管手术:激光能摧毁动脉粥样斑块和血管血栓,关键是要选择波长。FEL 的波长可调性,使 FEL 仅被动脉粥样斑块吸收而对血管壁无影响。

(3) 能源领域:FEL 在毫米波区可以提供兆瓦级的平均功率输出,可用于对强磁场约束的等离子体作电子回旋共振加热,或对高 β 等离子体进行加热和诊断,研究可控核聚变,如美国劳伦斯、利弗莫尔国家实验室,用 ETA II FEL 为托克马克装置提供大功率微波加热源。该实验室还建造用于激光核聚变的 FEL (并联多级),波长~0.3 μm 总能量达 10 兆焦耳级。

宽可调谐性和高效率,使 FEL 在激光同位素分离和富集工艺中很有吸引力。如 16 μm FEL 已用于铀 235 的分离,因为 UF₆ 在该波长处有很强的吸收峰,分离系数高,成本低,又可充分利用铀资源。目前日本、意大利、美国等均在开展 FEL 用于大规模同位素分离的研究,以改进核燃料生产。据估算,一台平均功率为 50 千瓦的 FEL,在吸收系数为 24% 时,每年能生产同位素铀 235 含量为 3.5% 的浓缩铀六千吨,可满足目前世界的总需求,而成本仅为气体扩散法或离心分离法的 30%,可见其前景之吸引人。

(4) 材料科学。世界上的一些主要 FEL 研究中心,已纷纷开展材料科学研究,并取得了进展。目前,美国贝尔实验室和加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的远红外 FEL 处于领先的地位。FEL 在材料科学研究中的巨大生命力,来自其他强相干辐射源难以达到的波长区。FEL 有宽的调谐能力和能提供极短的强脉冲。在化学指纹区 ($\frac{1}{200} \text{cm} \sim \frac{1}{4000} \text{cm}$), FEL 使吸收分

子振动谱学得到巨大益处。可使 FEL 的脉冲宽度比分子的弛豫时间还短,这就能够精确控制键选择化学过程,这对材料科学极为重要。在一个分子的光致离解可催化大数目的他种分子形成时,高效的 FEL 可用于控制催化作用,并达到商业开发程度。几微微秒的极短脉冲非常适合于各种材料激光过程的研究。远红外短脉冲 FEL 将为材料的非线性谱和瞬态现象研究提供最重要的手段。半导体材料中的热电子问题,是能借助于亚毫米 FEL 来了解它的最重要的合适问题之一。在激发了的超导体中准粒子扩散时间的研究,声子传播和相互作用的研究,以及在 MOS 场效应管内二维电子气的激发和弛豫的研究中, FEL 同样占有

特殊的地位。FEL 的极高峰值功率在适当的波长条件下,可用于材料改性,例如某些宝石在高能光子辐射下,颜色加深,增加了宝石价值;氢化非晶硅薄膜,经可调谐 FEL 照射,其器件性能提高;FEL 照射 SiH 气体,使其分解并沉积出高质量的非晶硅,这是 FEL 用于材料制造工艺的一例。利用波长小于埃的 FEL (硬 X 射线 FEL) 可确定物质的准晶结构及内部能量转换关系。软 X 射线 FEL, 可用于绝缘体、半导体和金属的能带结构和表面态光谱研究,提供设计和制造光学、电子学元件(如光纤、超大规模集成电路)的手段。

(5) 生命科学。FEL 的微微秒窄脉冲对光生物学有重要意义,例如用 $0.6\mu\text{m}$ 波长的微微秒级激光脉冲研究光合作用反应中心的电子转移过程,测定其转移速率常数,是光合作用原始过程的中心议题。工作于真空紫外到 X 射线区的 FEL, 可用于探测生物学上有重要意义的分子,以了解处在分子结构中金属原子的作用,例如钼可能在酶中起着重要作用,而酶使植物能进行光合作用。FEL 的短脉冲和可调谐,对研究 DNA 复制的动力学过程和机制,研究 DNA 的共振态,都有重大意义。运行于紫外和真空紫外的 FEL, 大批实验中,包括有大生物分子结构及动力学分析, DNA 光谱等。

(6) 高能物理。高能加速器是极其庞大、复杂和昂贵的高能物理设备之一。利用良好聚焦的高强度激光,可造成比高频加速腔中高出几个数量级的电场强度,从而使加速器的尺寸大为减小,这就是所谓激光加速器。从能量转换角度看,它是 FEL 的逆过程。FEL 与电子加速器相结合可组成激光电子加速器,其原理如图 4 所示。目前激光的辐射能密度经聚焦已可达 $10^{20}-10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$,在合适的偏振分布下,对应的电场强度可达 $10^{11}-10^{12}\text{V}/\text{M}$,而目前加速器的最大加速梯度为 $10^7-10^8\text{V}/\text{M}$,相差 4 个量级,因此激光加速器被认为是实现超高能加速和加速器小型化的有竞争力的途径。此外,激光脉冲加速器输出的粒子束脉冲可短到微微秒,是物质超短过程研究的有力工具。美国已有好几个大学和国家实验室正在进行这类加速器的研制,例如桑迪亚国家实验室已在 1987 年研制成一种激

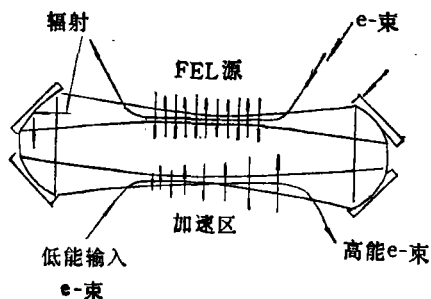


图 4 用 FEL 作为加速器

光加速器,其中(30cm长)IFA-2 加速段已加速质子到 5MeV,氦到 10MeV,氩到 10MeV;最终可将离子加速到 1GeV,其全长仅为常规加速器的 $1/10\sim 1/100$ 。

四、对加速器技术的挑战

FEL 的最重要物理设备是电子加速器。理论和实验都证明,作为 FEL 工作物质的电子束必需具有非常好的总体综合品质,它包括五个方面的电子束品质参数指标:很高的脉冲峰值电流(几十到几千安培);很小的束发射度(束的截面尺寸和散角都很小);很低的束能散(所有电子的能量偏差小于 1%);足够长的脉冲持续时间(宏脉冲宽);在长脉冲期间内,脉冲时间结构上的稳定性(例如微脉冲间隔的时间晃动小于微脉冲宽的 $1/10$)。尽管加速器已有了半个世纪多的发展历史,但对于提供这样高品质的电子束,现有各类电子加速器都面临着技术上的严峻挑战。实验已证明,FEL 研究的一个前提环节是加速器性能的提高,任何一台成功运行的 FEL,都离不开加速器性能的突破性提高以提供所需的优质电子束,所以发展 FEL 的大量技术改进措施首先集中到加速器方面,其次是振荡器技术和光学技术。

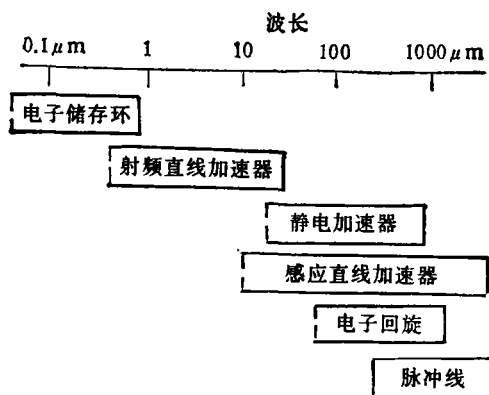


图 5 自由电子激光波长区对应的加速器技术

由于不同能区的电子束要由不同类型的加速器来提供,所以运行在不同波长区的 FEL 所对应的电子加速器类型也不同,大体如图 5 所示。FEL 的迅速发展,已大大推动了上述不同类型电子加速器相关理论和技术的发展,也引起了加速器界的广泛注意,目前特别突出的技术发展如下:

(1) 高亮度电子枪和注入器。这是提高电子束品质的基础。无论在静电加速器、射频直线加速器和感应直线加速器中都得到了发展,特别是在射频直线加速器中近年发展起来的光阴极电子枪、微波电子枪和多级变频聚束器系统,已使电子束的亮度和峰值电流都有了量级提高。

(2) 长脉冲和高稳定度功率源:例如工作于 s 波段或 L 波段的速调管调制器其输出脉冲宽已由几微秒

如何使英文论文写作的表达精确 而明白无误

程 鹏 翥



英文论文写作除了要求简炼等特点以外,还要求表达精确而明白无误。否则读者会对作者阐述的内容不知所云或发生误解。有些论文的研究内容是有意义的,研究结果也是正确的,但由于表达不够精确和不明白无误而使该论文够不上论文的水平而未获发表,由此可见英文论文写作的表达精确而明白无误的重要性。为此笔者拟就此问题作一介绍。本文共分十一个大项目来阐述,所列举的大部分例句由不正确和正确的例子组成,目的是为了有助于读者对本文所阐述的内容有较透彻的了解。

(一) 不要用含混的表达方式,例如

The conservation Board will confer on Nantucket Island Tuesday.

此句子的意思是含混的,因为该岛是协商的地址还是协商的主题是不清楚的,应按下述二者之一的方式来写:

The Conservation Board will confer about Nantucket. 或 Nantucket will be the site of Board's meeting.

(二) 代词与先行词的关系必须清楚

(1) 不要用含糊不清的代词。例如

Our patients are enjoying the warm days while they last.

此处的“*They*”到底是指病人还是天气是不清楚的,正

向几百微秒甚至几毫秒方向发展,而输出脉冲的平顶平坦度一般均要求好于1%。

(3) 电子能量回收。把从扭摆磁铁出来的电子束送入减速器,使其剩余能量返回给电子加速器。这种电子能回收技术,是提高 FEL 总效率的主要措施之一,但对静电加速器而言,还是使其能提供安培级电子束流而不引起过大电压波动以满足 FEL 运行需要的唯一办法。目前的电子束能量回收水平已达 90% 以上。

(4) 强流电子束的加速和传输。强流电子束在加速和输运到扭摆磁铁的过程中,存在着破坏电子束品质的许多因素,为此近年来研究了尾场的控制和偏转模的抑制技术;谐振加速腔主频叠加高次频(三倍频)以平坦化电场峰的技术;对称消色散和等时偏转技术;高能电子束磁压缩技术;使用激光产生电离导引强

确的写法为下述二者之一。

While these warm days last, our patients are enjoying them.

Our terminal patients are enjoying the warm days.

(2) 若能用具体的名词时,不要用不明确的 *it*, *they* 等。但下述句子例外:

It is raining 和 It is apparent that...等。

含糊的例子如 In restricted areas, they require that visitors be identified. 中, *they* 到底是指谁是不清楚的,此句应改为下列二者之一。

The Company requires that in restricted areas, visitors be identified.

In restricted areas, visitors must be identified.

(3) 应避免 *which* 或 *this* 与前面的分句和短语总的意义相关联,而应与前面的一个具体的词相关联。

He has been studying every night, which should increase his value to the company.

应改为

The study he has been doing every night should increase his value to the company.

或 He has been studying every night, so his value to the company should be increasing.

(4) 不要用 *you* 代替 *one*, 这种方式一般用于非

流束的技术等。

(5) 电子束诊断技术。主要是微脉冲和宏脉冲的时间分辨能谱诊断及微微秒电子束脉冲诊断。

五、向实用化迈进

FEL 作为一种现代科技的新分支,在经历了十多年的理论和实验研究发展后,现在已走过了它的幼年时期,由实验室里复杂而昂贵的珍品向着各种特定用途的装置实用化方向发展。从实用化、小型化和经济性的角度看,现在还没有任何一台投入运行的 FEL 达到了要求。总的来讲, FEL 是综合性很强的现代高技术产物,为达到实用化、商品化,尚有大量的艰巨的发展性工作等待科技界去解决,有些问题也许要经过较长时期的努力才能解决,当然一旦这些问题被解决, FEL 就步进入了光辉的成熟时期,从而给人类的物质文明和文化进步带来难以估量的影响。