

非晶态磁性合金的研究与应用

杨国斌

(北京科技大学材料科学与工程系)

本文简要地介绍了国内外非晶态合金近年来的生产情况,介绍了非晶态合金在电力变压器方面应用的现状及其意义,列举了非晶态合金在电子变压器方面应用的实例,介绍了一些与非晶态磁性合金的应用密切相关的技术进展和研究工作,评述了非晶态磁性合金的发展前景。

非晶态合金的研究,在20年以前还不引人注意。自从 Duwez^[1]以每秒上百万度的冷却速度对金属熔体淬火,得到非晶态合金样品以来,这个领域的研究工作便开始活跃起来。特别是1970年陈鹤寿^[2]等人发明了双辊急冷法,并制作出长达100m以上的非晶带,打开了连续制带的新途径。这是金属材料领域中的一项重大突破。这种新的快淬成型工艺仅有两道工序,比传统的13道工序大为减少,节约能耗80%,提高收得率35—50%。以非晶带制备工艺突破为契机,70年代开始了非晶态合金的蓬勃发展时期。各国相继投入大量人力和物力,纷纷开展了有关非晶各项性能研究、应用研究以及制备工艺研究等。由于超急冷凝固,合金来不及结晶而形成非晶。非晶在结构上的特征是只有短程有序而无长程有序,这就带来了性能上的若干特点,有些性能明显优于相近成分的晶态合金。

我国自1977年以来开始非晶的研究工作,并取得很大进展,共召开了五次“全国非晶材料与物理讨论会”。经过世界各国十几年的努力,非晶态合金在实用方面取得重大进展。1987年,美国非晶带产量约为1000t,日本约为100t,中国约为60t。非晶态合金作为一类新型材料,十几年内发展到目前的规模,是一项了不起的成就。本文将国内外非晶态磁性合金应用为主线进行介绍,对与此相关的一些有实用价值的研究工作也作一些简介。

一、世界各国非晶态合金生产概况

世界上研究非晶的国家较多,但达到实用

阶段并具有一定生产规模的国家并不多。若按非晶态合金带的产量比,美国、日本、中国排列在前。近几年这三个国家的非晶带的年产量如表1所示。

表 1

年份	1979年	1982年	1983年	1984年	1985年	1986年	1987年
中国			1t	3t	10t	15t	60t
美国	1t	5t		100t		>300t	1000t
日本			10t	20t	30t	60t	100t

从表1不难看出,非晶合金已走出实验室研究阶段,形成一定规模的工业生产。英国、法国、和联邦德国等也已开始小批量生产非晶合金。这里要特别指出的是,这个年产量完全没有充分反映已建成的非晶带制造设备的生产能力。美国联合化学公司的非晶带制造技术一直处于世界领先地位。该公司对这项技术的投资约5000万美元。1982年,该公司首先建成了非晶带中试线,解决了旋铸集卷连续制带技术,单机生产能力每小时为1t,带宽为100mm,生产的铁基非晶带价格为硅钢的五倍。六年后的今天,联化公司已建成年产7000t非晶旋铸集卷连续生产线。日本非晶质金属公司是日本与美国联化公司合资的企业,将于1989年12月在日本建成一条与联化公司相同的旋铸集卷生产线。美国和日本现在已建成多条中试线规模的非晶带生产设备。因此,总的生产能力大大超过实际年产量。关键的因素是价格问题。美国发展非晶生产的战略目标是用电基非晶取代硅钢,确定这一目标的历史背景是世界石油危机,

而非晶作成变压器铁芯的损耗要比硅钢低得多。这是一项有巨大社会效益与潜在经济效益的课题。另外,由于非晶带生产工艺简单,预计设备投资将比建成同等规模的硅钢片厂节省设备投资 50%,生产能耗减少 75—80%,使用非晶带作成变压器铁芯,每台平均减少损耗 50W,全美国 2000 万台变压器,年节约 40 亿美元。非晶的问世给硅钢行业以巨大的冲击,特别是对在国际硅钢市场占垄断地位的日本厂商影响很大,在客观上促进了硅钢的研究与发展。近年来,日本每年推出大批有关新的硅钢的专利,硅钢的性能也在不断改进。可以毫不夸张地说,现在已形成硅钢与非晶的竞争形势。目前,非晶在价格上还处于劣势。据估算,只有当铁基非晶带的价格相当于硅钢价格二倍以下时,才具有市场竞争力。1987 年,美国联化公司非晶带的售价约为 3 美元/kg。行家们估计,三年内非晶价格达到硅钢价格二倍以下是可能的。这也是美国和日本大量投资建立非晶生产线的战略考虑。

日本和中国发展非晶生产的路子与美国不同,即采用多渠道开发非晶实用领域,不仅在电力变压器方面,而且在电子变压器等其他方面也采用非晶态合金。几年来的实践表明,非晶的应用是在电子变压器方面和非晶钎焊料方面首先取得经济效益的。

二、非晶在电力变压器方面的应用

这类非晶态合金是上面提到的与硅钢竞争的一类合金,这类非晶产品目前已发展成若干成熟的型号,其中有代表性的是美国的 2605SC (成分为 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$) 和 2605S-2 (成分为 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$)。后者的磁性指标为: $B_s = 1.52-1.56\text{T}$, $T_c = 415^\circ\text{C}$, $T_x = 550^\circ\text{C}$, $\lambda_s = 27 \times 10^{-6}$, $\rho = 130\mu\Omega \cdot \text{cm}$, $P_{1.4}/60 = 0.21\text{W/kg}$, 工作温度 $-50-150^\circ\text{C}$ 。在上面列举的磁性指标中, B_s 为饱和磁感应强度, T_c 为居里温度, T_x 为晶化温度, λ_s 为饱和磁致伸缩系数, ρ 为电阻率, P 为损耗。用 2605S-2 作成的 25kVA 的配电变压器与取向硅钢作成的变压器

对比,如表 2 所示。

表 2

	$B_s(\text{T})$	$P_{1.4}/60$ (W/kg)	空载电流	噪音(dB)	重量(kg)
2605S-2	1.4	0.21	0.3%	38	88
M-4 硅钢	1.6	0.9	0.9%	48	90

由表 2 可知,非晶变压器铁芯损耗与激磁电流分别为硅钢的 1/3,据此推算,日本总发电量为 7000 亿度,现用硅钢片配电变压器的损耗占其中 1.5%,即 105 亿度,若全部用非晶取代,可降低损耗 2/3,即 70 亿度,每年折合 6 千万升石油。我国若用非晶取代硅钢每年可节电近 100 亿度。冶金工业部钢铁研究总院、上海钢铁研究所及首都钢铁公司冶金研究院已先后制成几台每炉 50kg 的中试线水平的设备,预计到 1990 年可制成年产 100t 级非晶生产设备一台,现正在进行联合攻关。我国已制造出 100kVA 和 500kVA 的非晶变压器样机,目前正进行运行实验。这项新材料技术对我国有特殊意义。在国民经济总产值翻两翻的目标下,能源消费增长 2/3 要靠提高能源利用率与降低能耗来解决。我国中小型配电变压器的用量相当大,仅农用配电变压器,1985 年有 14.37 万台,105.063MVA,其中 80—90% 以上的变压器为 100kVA 以下的。据调查我国大西北与大西南尤其急需中小型配电变压器。

正是基于用非晶代硅钢具有潜在的巨大经济效益与社会效益,各国近年来开展多项非晶合金实用技术研究,下边简单介绍有关非晶叠片技术、非晶应力敏感问题及非晶变压器结构和制造技术。

1. 非晶叠片技术

为了扩大市场和满足大型三相变压器的需求与硅钢竞争,美国联化公司于 1985 年研制成非晶叠片材料 (powercore strip),并在新泽西州建成一条叠片中试线,把 2605S-2 非晶带多层固结在一起,如图 1 所示。由图 1 可见,将多层非晶带材送入滚轧加温加压装置,在接近玻璃化温度时,非晶合金硬度明显下降,塑性良

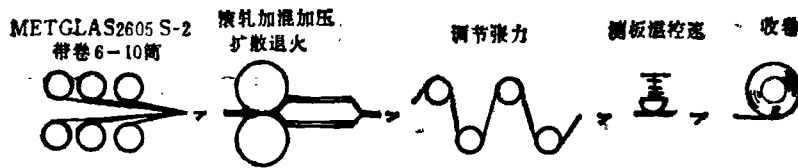


图1 非晶叠片制备工艺流程示意图

好，在加温加压条件下使多层非晶片固结为一体，然后切割成所需尺寸。切割非晶叠片是联化公司目前正待解决的问题，已试验过热切（280—310℃）和冷切（25℃）两种方式。从损耗特性来看，热切叠片的损耗略低于冷切叠片的损耗。

现已制成多种厚度的非晶叠片产品，例如0.13mm厚的2605S-2，其性能如下：

$$B_s = 1.58T, B_r = 1.2T,$$

比重7.18，叠片因子0.9，矫顽力 $H_c = 3.2A/M$ ， $T_c = 415^\circ C$ ， $P(1.4T, 60Hz) = 0.25W/kg$ ， $T_s = 535^\circ C$ 。由数据可见，叠片非晶性能与单片非晶带性能大体相当。

2. 非晶应力敏感问题

大家知道，非晶受压后会导致磁性恶化，即使是自重引起的应力，也会使磁损耗增大。日本东芝公司等单位作过研究，研究的结论是：非晶合金应力敏感性很强，无论是张力还是弯曲力，均导致损耗增大。非晶所受应力影响经过退火后均能消除。故建议在铁芯制作过程中应先装配成型后退火，在保管与使用过程中，应尽量避免受应力作用。

3. 非晶变压器结构和制造技术研究

把非晶合金用于电力变压器时，存在一系列实际问题。美国西屋公司的E. Boyd等人对非晶合金变压器的结构设计作了专题研究。按各种选择因素，定性地对铁芯-绕组结构进行分析，然后考虑非晶材料的厚度、硬度、叠片系数、退火等因素，提出多种装配方案。例如非晶铁芯用不同宽度的非晶带卷制而成，其截面接近于圆形，绕制绕组时，在芯柱上装有可旋转的圆筒，将导线绕在圆筒上形成绕组。

4. 非晶变压器寿命

非晶为亚稳态材料，由它作成的器件的使用寿命问题自然受到用户关注。美国通用电气公司作过系统实验研究。寿命实验按美国国家标准协会标准C57100进行。最高环境温度为30℃，连续额定负载的条件换算成等效老化试验。变压器的寿命均在100年以上。当油浸非晶变压器温度升高到65℃，额定负载运行20年，它的磁性能不会明显衰减。进一步通过加速老化试验，证明非晶合金变压器的稳定性超过标准使用寿命的20—30年。因此，非晶合金变压器寿命稳定性是令人满意的。

1985年，英国通用电气公司生产1000台25kVA非晶配电变压器，分送到各地长期运营试验，检测负载条件下非晶铁芯损耗和激磁功率的变化。初步证明，2605S-2非晶变压器在工作温度为75—120℃范围内能可靠地使用20—30年。

三、非晶态合金在电子磁性器件中的应用

如果说非晶在电力变压器中应用，由于与硅钢相比在价格上还处于劣势，那么将来在多大程度上取代硅钢，目前在科技界的看法有很大分歧。作者的看法是：非晶是能部分取代硅钢，二者形成竞争，从而促进二者的不断发展。而非晶合金在电子磁性器件方面的应用，情况就大不相同了。这里非晶的竞争对象主要是坡莫合金。从世界各国的近几年情况看，非晶在这方面已经站稳了脚跟。非晶在性能上与坡莫合金相当，高频磁特性还优于坡莫合金，而在价格上低于坡莫合金，在当前镍价猛涨的情况下，

非晶合金与坡莫合金相比则有更大的优势。

日本和中国对开发非晶在电子磁性器件方面的应用均较为重视,目前已形成批量产品,并获得了经济效益,下面介绍几种应用情况。

1. 开关电源

采用非晶态合金制造开关电源变压器铁芯,是非晶合金应用项目最多的一个方面。在大功率开关电源方面,采用 Fe 基非晶合金的 10kHz 5kW 开关电源变压器,效率高达 87%,电源重量为 40kg,比用 0.03mm 厚的硅钢制成的电源开关变压器的重量 160kg 要小得多。在小功率开关电源方面,可采用 Co 基非晶与 Fe 基非晶的 20kHz 开关电源,也有采用 Co 基非晶的 50kHz, 100kHz, 150kHz, 200kHz 开关电源。

1983年,日本的开关电源产值已达 1800 亿日元。每年有数百万只磁芯用作开关电源,其中非晶磁芯比例逐步增加,1987年非晶磁芯比例已达 90%。国外开关电源变压器有向高频化发展的趋势,从 20kHz 至 50kHz 向 80kHz 至 250kHz 发展。随着使用频率的提高,损耗的矛盾更突出了,在这方面非晶与薄硅钢和坡莫合金相比,占有一定的优势。Fe-Si-B 系非晶合金显示出良好的高频特性,例如美国牌号 2605SC(Fe₈₁B_{13.5}Si_{3.5}C₂),经 365℃ 最佳退火温度退火后,所得到的 10—100Hz 下的损耗约为坡莫合金的一半,在 50kHz 和 100kHz 下的损耗与铁氧体相当。Fe-Si-B 系经合金化添加少量金属(Ni, Mo, Mn, Cr, V)后,并采用局部晶化热处理法,可得到很好的高频磁特性。例如(Fe_{0.97}Mn_{0.03})Si₁₄B₁₀和 Fe₇₇Ni₄Mo₃B₁₆Si₂,经局部晶化热处理后都具有优异高频特性,可用作高频开关电源。经过上述局部晶化处理,可以改善高频磁特性,其原因是微晶相或沉淀粒子导致磁畴细化,使涡流损耗降低^[3]。

采用非晶作高频开关电源铁芯,可以减小器件体积,降低成本。例如一个 600W 的开关电源,当工作频率从 50kHz 上升到 150kHz 时,变压器滤波电抗器和输出电容体积缩小为 1/3,电源体积缩小为 1/2。据预测,电源频率

达到 500kHz 时,经济效益最好,故开发用于 500kHz 甚至更高频率的非晶合金将是很有意义的。

磁放大器式开关电源,由于工作频率容易提高,而且控制电路简单,可靠性高,故在日本受到重视。日本东芝公司生产的开关电源主要是磁放大器式开关电源,其中开关电源器件所需非晶合金约几十吨之多。东芝制成用于 200kHz 至 500kHz 的 Co 基非晶合金磁芯,其损耗值为 $P_2/500$,仅为 80Ni-Fe 坡莫合金的 1/4。

我国已研制出大功率开关电源用的 Fe 基非晶合金以及多种高频开关电源用的 Co 基非晶合金,包括 20kHz, 50kHz, 100kHz 与 200kHz 用的开关电源变压器均已开始小批量应用。

2. 漏电开关

我国已成功研制出用于漏电开关的 Co 基和 Fe-Ni 基非晶合金^[4]。由于非晶态合金磁芯的性能特别适用于零序电流互感器,与传统使用的坡莫合金 1J₆₅ 及 1J₇₉ 相比,动作电流小,灵敏度高,已广泛用于各种触电保安器中。在研制过程中,曾在 -25℃ 到 120℃ 的七个温度试验点上,进行过 120℃ 到室温的 30 个周期的交变温度试验,两年零四个月的长期时效试验以及六个月的现场运行试验,证明非晶漏电开关性能稳定,完全满足使用要求。Fe-Ni 基非晶磁芯价格只是高 Ni 坡莫合金的一半。目前我国每年已有 100 多万支非晶漏电开关投放市场,是我国目前实用非晶合金中产量最大的一类。

3. 脉冲变压器

我国现在已研制出小功率、中功率和大功率单极性与双极性脉冲变压器用的一系列非晶合金,如表 3 所示^[5]。

对多种非晶脉冲变压器进行应用试验。Co 基非晶 $\phi 8 \times \phi 12 \times 5$ 磁芯制成的 1W, 100 kHz, 1 μ s 小功率脉冲变压器,顶降为 23%,反冲为 41.6%,比用 1J₇₉ 坡莫合金和 $M \times 10-2000$ 铁氧体制成的性能都好。铁基非晶 $\phi 25 \times \phi 40 \times \phi 12.5$ 磁芯制成的 20kHz 150W

表3 大、中、小功率变压器用的非晶合金的性能*

	合金	性能*	ΔB	μ_p	τ (μs)	B_s (T)	H_c (A/M)	P (W/kg)
小功率	Co ₆₉ Fe _{4.4} Ta _{1.4} Si ₁₇ Co _{68.5} Fe _{4.3} V _{1.5} Si ₁₆ B ₁₅		0.4	7000	1	0.78	0.4776	$P_{5/20K} = 16$
			0.4	9000—10000	1	0.69	0.597	$P_{5/20K} = 12—14$
中功率	Fe _{77.5} B ₁₇ Si _{3.5} C ₂ (环形) Fe ₇₇ B _{15.5} Si _{3.5} C ₂		0.6	4200—4800	3	1.55	3.98	$P_{9/20K} = 33—50$
			0.6	4560	3	1.4	6.37	$P_{10/400} = 1.2$
大功率	Fe ₇₂ Ni ₉ Si ₃ B ₁₄ C ₂ Fe ₇₃ B _{13.5} Si _{3.5} C ₂		1.5	9000—12000	3	B ₁₀ 1.59	3.98	
			1.5	10000	3	B ₁₀ 1.57	2.39	

* 表中 ΔB 为磁感应强度变化量, μ_p 为脉冲导磁率。

中功率单端正激开关电源变压器,磁芯重量只有 1J₆₂ 坡莫合金的 2/3 左右,温升低 25℃。铁基非晶矩形磁芯制成的脉冲功率为 2MW,平均功率为 2kW,频率为 400Hz 的 2.8MS 大功率脉冲变压器,磁芯重量为 2.3kg,比原来用硅钢做的磁芯重量 17kg 要小得多,变压器从油浸式结构变为环氧树脂灌注乾式结构,重量从 40kg 减小为 13kg,成本只有原来的 1/4 左右。今后还应在两个方面拓宽应用领域。一是大功率脉冲变压器用非晶代替硅钢,可以使脉冲变压器体积和重量下降,成本降低。另一个是可控硅触发电路用脉冲变压器,国内每年产量上万只,如用非晶代替硅钢,可以大大改善脉冲特性和缩小体积。

4. 磁头

用非晶合金作成磁头,其优点是高频性能好,耐磨,耐蚀,噪音小,日本多家公司已将非晶态合金作成各种磁头出售。TDK 公司已用非晶合金作成录音机和计算机磁头。下一步的目标看来是要适应金属磁带的发展,研制出一种 B_s 达 1.5T 的非晶磁头材料。另一个方向是要研制无 Co 的、高 B_s 、高 μ 和低 H_c 的 Fe 基非晶磁头,而且要求 λ 要低,以减少磁头制作过程中应力的影响。

高 B_s 值 ($> 1T$) 的 Co 基合金,由于 $T_c > T_r$,所以退火时会产生感生各向异性,从而对磁性不利。日本人用旋转磁场和斜磁场进行处理,或采用垂直磁场加转动磁场的磁场退火方法,解决了这个问题,从而获得了 B_s 和 μ 都高的非晶磁头材料。

关于 Co 基合金的磁稳定性问题,研究表明,提高类金属元素的含量,或加入熔点较高的元素如 Cr, Nb, Ta, Nb, Ni 等,可以改善热稳定性。

5. 磁屏蔽

开始曾采用 Fe₈₀Ni₁₀P₁₀B₆ 非晶作磁屏蔽之用,但由于它 μ_0 低, λ 偏大,屏蔽效果不好。现在采用零磁致伸缩 Co 基非晶作磁屏蔽。西德 VAC 发表过有关磁屏蔽文章,该公司用 Co 基非晶合金做成编织的屏蔽罩,尺寸达 200—1000mm,作成电缆屏蔽管和易携式屏蔽组件,取得十分良好的效果。非晶合金不仅 μ_0 高,而且强度高,磁性不受弯曲或弹性变形等的影响,因此在作细电缆屏蔽管时效果尤其好,如电缆直径为 8mm 时,非晶的屏蔽系数比晶态高 4 倍。

6. 磁分离

所谓磁分离技术是指在磁场下将磁性微粒子与非磁性微粒子进行分离的技术。它广泛应用于选矿、废水处理及油净化等方面。承担进行分离技术的材料(磁分离材料)的 B_s 值要高, H_c 值要低,要具有高强度、高韧性、高弹性,耐蚀性要好,要易于获得细丝和薄带。研究表明,磁感应强度越高,尺寸越薄,则吸附力越大。Fe 基非晶可以满足上述要求。如日本的 Fe-CrMn(ρ_c)₂₀,美国联化公司的 Fe₃₃Ni₃₆Cr₁₁P₁₂C₆ 等。做电磁过滤器的细丝一般用晶态 Cr 不锈钢 SUS430,厚度 100—150 μm ,其 $B_s = 1.6T$,而非晶材料,其厚度为 10—20 μm , $B_s = 0.8T$,其吸附力也要比 SUS430 高 2—3 倍,耐

蚀性比 SUS430 约高 5 倍。故可以长时间浸泡在矿浆或废水中而吸附性能不变。再者由于 H_c 低,在反复磁化和去磁过程中,磁性微粒子易于去除,从而提高了磁分离的效率。过去油净化装置都是用永磁合金组合而成,价格便宜,但吸附粒子直径在 $10\mu\text{m}$ 以上,吸附率低。若用非晶材料,不仅净化特性好,而且装置简单,所以采用非晶材料做油净化装置,有利于提高油路系统的可靠性与寿命。

7. 非晶传感器

非晶传感材料具有若干优异特性,例如:高强度和高弹性,抗拉强度高 250—400kg/mm²,弹性极限约为 15kg/mm²,非晶合金电阻率高达 120—190M Ω ·cm,加上薄带的尺寸微小,有利于制作快速响应传感器。此外,由于非晶态合金(特别是零磁致伸缩合金)不存在晶界和晶体各向异性,因此都有很高的导磁率,最大导磁率高达 10^6 以上。铁基非晶可制作具有

大磁致伸缩的传感器(如压力、位置和转矩等传感器)以及超声传感器等。非晶态合金传感器按其所用非晶材料特性的不同,可分为两类:第一类是采用零磁致伸缩合金,主要利用其高导磁特性,第二类是采用高磁致伸缩合金。

非晶传感器在国外已初步形成商业化生产系统,生产的非晶传感器供信息元件和计算机应用。在汽车工业、工业机器人、马达起动系统、工业测量以及医学电子学领域的应用开发也正在迅速取得进展^[6]。我国在非晶传感器方面已开展了工作,并已在非晶防盗传感器、应力传感器等方面取得成果。

- [1] P. Duwez et al., *J. Appl. Phys.*, **31**(1960), 1136.
- [2] H. S. Chen et al., *Rev. Sci. Instr.*, **41**(1970), 1237.
- [3] 唐与谋,国外金属材料, No. 1(1983), 35.
- [4] 张洛,物理, **15**(1986), 355.
- [5] 陈国均,金属材料研究, **14**(1988), 37.
- [6] 林冰、王润、杨国斌,仪器仪表分析监测, No. 1(1987), 22.

向染料激光说再见

最近,美国光谱物理公司(Spectra-Physics)研制成功一种蓝宝石-掺钛(Ti: sapphire)可

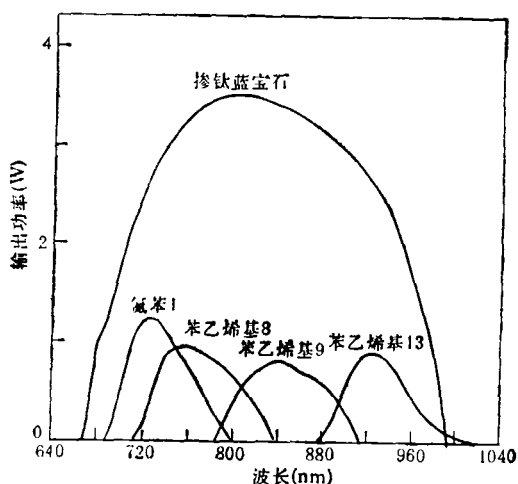


图1 在 20 W 输入泵浦功率下,四种红外染料激光与蓝宝石-掺钛固体激光的比较

调谐连续固体激光器。它的优异性能和宽广的调谐范围可以取代四种低性能的红外染料激光器。图 1 给出蓝宝石-掺钛激光与四种红外染料激光的调谐范围与输出功率的比较曲线。这种新型的固体激光光源使红外染料激光显得大为逊色。蓝宝石-掺钛固体激光器的突出特点是:输出功率比任何一种染料激光器的输出功率高三倍以上,而且还可以更高;在 700—1000 nm 的宽广调谐范围内,其功率输出几乎是相等的;此外它更具有染料激光所不能比拟的长寿命、使用方便以及多用性等突出优点。蓝宝石-掺钛激光的问世使人们可以进行昨天还不可能的实验,探索新的研究可能性,扩大基于激光的工作领域。

(陈正豪根据 *Physics Today* 1989 年第 3 期第 110 页后的插页编译)