

文章编号: 1002-2082(2005)05-0061-06

光学玻璃的发展及其应用

王耀祥

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘要: 随着光子学技术的发展, 利用玻璃和光的相互作用改变光的极化态、频率、相干性和单色性, 以及产生光子和探测光子的新型光功能玻璃成为光学玻璃发展的主要方向。本文针对光学玻璃及其在光学和信息技术等相关应用领域的重要性和发展作了介绍, 重点阐述了非线性光学玻璃、梯度折射率光学玻璃、激光玻璃以及其他光功能玻璃的主要特性和发展状况, 并对我国的光学玻璃工业发展作了回顾。

关键词: 光学玻璃; 光功能玻璃; 光子学

中图分类号: TQ171.734-39

文献标识码: A

Development and Applications of Optical Glasses

WANG Yao-xiang

(Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract: With the development of photonic technique, the novel optical function glasses which could change the polarization, frequency, coherency and monochromaticity of light, produce and detect photon, become a main development subject in optical glass field. In this paper the significant development of optical glasses and their applications in the fields of optics and information technology are introduced. The development trend and the characteristics of the main optical functional glasses such as nonlinear optical glass, gradient index glass, laser glass and other optical function glass are pointed out. Finally the progress made by chinese optical glass industry has been reviewed.

Keywords: optical glass; optical functional glass; photonics

引言

玻璃技术经历了 5000 多年的发展历史。直到近代, 为了适应军用光学仪器的发展, SCHOTT 公司的创始人 Otto Schott 于 1884 年发展了现代光学玻璃熔炼技术, 制造出世界上第一块高质量光学玻璃。由于军事上的需要, 光学玻璃及其制造技术一直被各国视为关键技术, 并严格保密。

目前, 随着光学、信息技术、能源、航空航天技术、生物技术以及生命科学等学科的迅速发展, 光学玻璃由传统意义上的光学仪器用成像介质——透镜(主要是应用几何光学原理进行成像)逐渐向新的应用领域迅速发展。尤其是伴随着光子学技术的发展, 光子继电子之后成为信息的主要载体。利用玻璃和光的相互作用改变光的极化态、频率、相

干性和单色性, 以及产生光子和探测光子的新型光功能玻璃成为光学玻璃发展的主要方向。

1 光学玻璃的发展

1.1 普通光学玻璃

普通光学玻璃主要是指传统意义上用于各种光学仪器(如光学镜头)的无色光学玻璃和用于滤光片的有色光学玻璃。目前普通光学玻璃有 200 多种牌号, 化学元素周期表中已有 2/3 以上的元素被引入到光学玻璃中。对于无色光学玻璃, 按其化学组成和光学常数特征, 主要分为冕类和火石类。冕类玻璃的 PbO 含量一般小于 3% 时, 折射率相对较低($n_d < 1.6$), 色散较小($\nu_d > 55$) 或者折射率相对较高($n_d > 1.6$), 色散较小($\nu_d > 50$); 当 PbO 含量大

收稿日期: 2005-01-10; 修回日期: 2005-03-15

作者简介: 王耀祥(1972-), 男, 陕西宝鸡人, 西安光机所副研究员, 主要从事光电工程功能材料的研究工作。

于 3% 时,折射率相对较高 ($n_d > 1.6$),色散较大 ($\nu_d < 55$)。而每一大类又可根据玻璃化学组成中的特征成分以及折射率 n_d 和色散 ν_d 的范围,进一步划分为许多亚类,图 1 为无色光学玻璃 $n_d-\nu_d$ 的示意图。

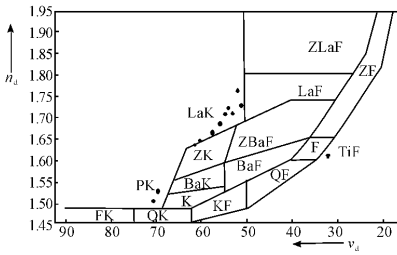


图 1 无色光学玻璃 $n_d-\nu_d$ 示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of the $n_d-\nu_d$ for achromatic optical glasses

有色光学玻璃是在玻璃组成中引入能够使玻璃着色的着色剂制得的。其所具有的选择吸收的性质取决于玻璃中着色剂的数量和性质。按光谱特性有色光学玻璃可分为 3 类:胶体着色玻璃(硒镉玻璃)、离子着色的选择性吸收玻璃和离子着色的中性暗色玻璃。图 2 为 3 种典型有色光学玻璃的光谱透过率曲线。

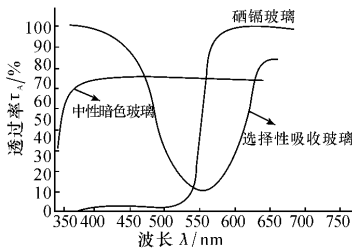


图 2 3 种典型有色光学玻璃光谱透过率曲线

Fig. 2 Spectral transmissivity of 3 types of typical colored optical glasses

2.2 新型光功能玻璃

2.2.1 非线性光学玻璃

由于玻璃的各向同性,玻璃具有反演对称中心,而具有反演对称中心的介质偶阶的非线性电极化率为零。因此,理论上玻璃中仅存在三阶非线性光学效应,而不产生二阶非线性光学效应^[1]。但是,在 1986 年,Osterber 等人发现含 Ge 的石英玻璃光纤却可以表现出二阶非线性光学效应。经过研究发现^[2],通过电场/温度场极化法、激光诱导法和电子束辐照法可使玻璃产生二阶非线性光学效应。

目前,在玻璃光纤中,利用激光诱导法已经实现了准相位匹配的二阶非线性光纤光栅。一般情况下,高折射率和高平均色散的玻璃如高铅氧化物玻璃、碲酸盐玻璃和硫系玻璃具有高的三阶非线性光学系数 $\chi^{(3)}$ 。由于量子尺寸效应缘故,半导体纳米微粒 CdS 和 CdSe 掺杂玻璃也具有较高的 $\chi^{(3)}$,这类玻璃可以用于四波混频、相位共轭及光开关。另外,采用溅射和离子注入等玻璃改性处理方法,在玻璃中引入 Au, Ag 和 Cu 等纳米金属粒子,也可以得到高 $\chi^{(3)}$ 值的非线性玻璃。以高 $\chi^{(3)}$ 值非线性光学玻璃作为基底,采用光刻和离子交换工艺产生低损耗非线性光波导,可制备小尺寸密集型超快全光速调制集成光路波导器件,为以超大规模数据传输与处理为基础的信息高速公路通讯网络信息的快速处理和容量的提高提供实用性元件。非线性光学材料和器件已成为光子学微结构和新型光子器件研究的前沿。表 1 列举了一些不同玻璃种类的三阶非线性光学特性。

2.2.2 梯度折射率光学玻璃

由于梯度折射率光学玻璃材料具有特殊的光学特性,因此在微小光学、集成光学、空间光学和信息光子学器件研究领域具有不可替代的优势。梯度折射率材料 (GRIN) 按照折射率分布的方向分类,可分为径向、轴向和球面梯度 3 种,见表 2 所示。

表 1 三阶非线性光学玻璃的非线性光学特性

Table 1 Nonlinear optical properties of third-order nonlinear optical glasses

Glass	λ/nm	$\chi^{(3)}/\text{esu}$	$n''_2/\text{cm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$
SF59(PbO-silicate) ^[3]	650	$2.6 \sim 3.7 \times 10^{-14}$	—
As ₂ S ₃ ^[4]	1319	1.2×10^{-11}	4.2×10^{-14}
Schott-RG695(dopant: CdS _x Se _{1-x}) ^[5]	694.5	3×10^{-9}	—
Corning-CS2-73(dopant: CdS _x Se _{1-x}) ^[5]	580	5×10^{-9}	—
CuCl-borosilicate ^[4]	384	3×10^{-6}	—
Au-doped SiO ₂ (ion implantation) ^[4]	—	1.2×10^{-7}	—

表2 GRIN材料的分类
Table 2 Classification of GRIN materials

材料分类	折射率分布方向	实用制造技术
径向 GRIN	在垂直于光轴方向,沿径向 r 折射率呈梯度变化: $N(r) = N_{00} + N_{10}r^2 + N_{20}r^4 + \dots$	离子交换法 ^[6] 溶胶-凝胶法 ^[7] 气相扩散共聚法 ^[8]
轴向 GRIN	沿光轴 Z 方向,折射率呈一定规律的梯度分布: $N(Z) = N_{00} + N_{01}Z + N_{02}Z^2 + \dots$	离子交换法 ^[9] 熔融/扩散法 ^[10] 气相扩散共聚法 ^[11]
球面 GRIN	沿球对称中心,折射率发生变化: $N = f(r), r^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$	离子交换法 ^[12] 悬浮聚合 ^[13]

对轴向梯度透镜而言,沿光轴 Z 方向的折射率呈梯度分布,而在垂直于光轴的平面内折射率恒定。除色差外,轴向梯度透镜的特征基本上与球面透镜相似。利用轴向梯度折射率材料制成的球面轴向梯度折射率透镜,对光学系统像差的纠正等效于普通光学材料制成的非球面透镜。在许多光学系统中,轴向梯度透镜可在保证成像质量的同时,减少系统光学元件的数量,这一点对空间光学有效载荷设计极为有用。轴向梯度折射率材料在高能激光领域以及各种数码可变焦成像系统中的应用也具有特殊的意义。由于离子交换法生产的折射率梯度在材料中分布较浅,因此轴向梯度折射率材料的应用受到了很大限制。直到20世纪90年代,利用发展起来的熔融/扩散法成功地制得了大体积轴向梯度光学玻璃^[11],从而使轴向梯度光学玻璃的应用发展成为可能。

径向梯度透镜的折射率沿垂直于光轴方向变化,且具有圆对称分布,沿轴向折射率不发生变化。长棒径向 GRIN 透镜可将像成在棒透镜内部,因此常用于像中继系统中,例如各种内窥镜。在小型复印机和传真机中利用其非常短的共轭距离,通过透镜阵列可实现 1:1 成像。另外,四分之一周期长度的径向 GRIN 透镜的焦点恰好在其两端面上,这为耦合技术带来了方便。光纤耦合器、波分复用器、光开关、半导体激光器或激光二极管的准直以及光盘物镜均已采用这种透镜。

球面梯度透镜的折射率分布对原点具有球面对称形式,而球面 GRIN 透镜因其对球心呈球对称形式且无光轴存在,因此利用它可完全消除径向 GRIN 透镜中离轴空间光线(非子午光线)产生的像差。利用离子交换法制得的球面梯度透镜阵列已用于集成光学和微小光学等领域。

2.2.3 激光玻璃

近年来,伴随着高功率掺镜双包层光纤激光器的出现,对传统的 CO_2 气体激光器和 YAG 固体激光器提出了严峻的挑战。光纤激光器已从通信领域迅速地与其他应用领域(如材料处理及加工技术、激光检测和测量、激光雷达系统、传感技术和空间技术以及生物医学等)扩展。另一方面,提高和改善光纤放大器的增益带宽也一直是光纤通信中的关键问题。因此,研究新型稀土离子掺杂玻璃材料已成为研究新型光纤激光器和光纤放大器等光纤光子器件的技术关键。

光纤激光器研究领域有两大热点:频率上转换光纤激光器和双包层光纤激光器。氟化物玻璃由于具有较低的声子能量,能够降低玻璃在泵浦过程中的无辐射弛豫几率,提高稀土离子中间亚稳态能级的荧光寿命,从而有效提高上转换发光效率,所以氟化物玻璃 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ 已成为上转换发光基质材料的主要研究对象。掺杂 ZBLAN 光纤的稀土离子主要有 Pr^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 等^[14~15]。在20世纪90年代初硫化物玻璃光纤开始兴起,由于稀土离子掺杂硫化物玻璃具有大的受激辐射截面和极高的辐射跃迁率^[17],获得的量子效率远高于氧化物和氟化物光纤,所以稀土离子掺杂硫化物也已成为适宜于制造光纤激光器和光纤放大器的基质材料。近年来出现了多种新基质材料掺杂的光纤放大器,主要包括工作在 S^+ 波段(1450~1480 nm)的掺铈光纤放大器(TDFA);工作在 S 波段(1480~1510 nm)的增益迁移掺铈光纤放大器(GS-TDFA);工作在 $C+L$ 波段或 L 波段的掺铈碲基光纤放大器(EDTFA)。这些新型光纤放大器中的增益介质基本上采用的是掺杂稀土的低声子能量玻璃-重金属氧化物玻璃系统中的碲酸盐玻璃、

铋酸盐玻璃以及氟化物玻璃和硫系玻璃(见表3所示),特别是碲酸盐玻璃基质光纤在实现超宽带通信方面应用前景广阔。前4种基质的玻璃光纤已有产品问世,但用在光纤放大器上的硫系玻璃光纤迄今还没有实现实用化。

2.2.4 其他光功能玻璃

光子是继电子之后成为信息的主要载体,其信息的获取、传输、存储、显示和处理技术在很大程度上依赖于先进的光功能材料和器件(先进光功能材料和器件已成为信息技术发展的基础和先导)的发展。表4列出了另外一些应用于信息技术和其他领域的光功能玻璃。

表3 用于光纤放大器材料的基质玻璃的特点

Table 3 Properties of the host glasses for optical fiber amplifier material

基质玻璃	主要特点
碲酸盐玻璃	较宽的红外透过范围(一直到6 μm);在氧化玻璃中具有较低声子能量(约为650 cm ⁻¹);高折射率(大于2.0)、高非线性折射率且高绝缘常数;化学稳定性较氟化物玻璃好;原料成本高
铋酸盐玻璃	高折射率(约1.9),高非线性折射率且高绝缘常数;化学稳定性较碲酸盐和氟化物玻璃好,原料成本低
磷酸盐玻璃	成纤性能好,对稀土离子溶解度高,基质声子能量高(约为1100 cm ⁻¹),稀土在其中的上转换效率低,原料成本低
氟化物玻璃	较宽的红外透过范围;较低的声子能量(约为400 cm ⁻¹);化学稳定性和成玻璃性能差,制备条件苛刻,原料成本高
硫系玻璃	良好的可见/红外透过区域(1.2~12 μm);高折射率;低声子能量(350 cm ⁻¹);成玻璃性能较好;原料成本昂贵

表4 光功能玻璃及其应用

Table 4 Optical function glasses and their applications

光功能玻璃	主要应用领域	主要成份	主要特性和参数
磁光玻璃 ^[18]	磁光调制器和隔离器等磁光器件;磁场或电流传感器;磁光偏频激光陀螺	掺 Tb ³⁺ 的硅酸盐和硼酸盐玻璃;掺 Ce ³⁺ 的磷酸盐玻璃;含铅量较高的火石类玻璃	Farady 效应: $\theta = V \cdot H \cdot L$, V 为费尔德常数 (min/Oe.cm)
声光玻璃 ^[18]	声光调制器;隔离器;写入光栅	碲酸盐玻璃和硫系玻璃	声光品质因数: $M_e = \frac{4}{E\nu} (\rho \frac{dn}{d\rho})$
光致变色玻璃 ^[18]	光存储及全息术	Ag ⁺ , Cu ⁺ , Au ⁺ (Br/I); Na ₂ O-Al ₂ O ₃ -B ₂ O ₃ -SiO ₂	$nAg + nX (Br/I) \xleftrightarrow{h\nu} nAgX$
激光诱导型光子玻璃 ^[19~21]	三维信息存储,光波导,衍射光栅及光子晶体	稀土离子掺杂氟化物或者碱硼酸盐玻璃;硅酸盐玻璃等	稀土离子变价;激光诱导产生吸收带;光诱导高密度化
闪烁玻璃 ^[22]	高能物理和核医学	Ce ³⁺ : 铝硅酸盐、磷酸盐玻璃和锆酸盐玻璃	Ce ³⁺ : 5d-4f 跃迁
偏振玻璃 ^[23]	光纤传感器,光隔离器,液晶显示及近红外成像	纳米粒子 Ag, Cu; 碱硼硅或铝硼硅玻璃	电子等离子振荡机制

3 我国光学玻璃发展展望

20世纪90年代以后,随着光学与信息科学和新材料科学的不断融合,光学与电子科学的不断融合以及信息产业的崛起,使光学玻璃在光传输、光储存和光电显示三大领域的应用更是突飞猛进。光学玻璃被广泛应用于光电产品对信息采集、传输、存贮、转换和显示的各个方面,这有力地促进了光学玻璃向更高层次的发展。

目前,传统光学玻璃虽在生产上的增长开始减缓,但在医学、航天、航空和常规武器装备等领域依然呈增长态势。在光电信息领域,传统的K₉光学玻璃及ZK系列光学玻璃的需求量仍然巨大,主要体现在三大领域:一是光信号传输转换领域,如数码照相机、液晶投影电视、影像扫描器、条码扫描器、数码复印机、激光打印机和可视电话等;二是在光储存领域,如CD-ROM, DVD-ROM 和 MD-PLAYER 等光读取头计算机硬盘玻璃基板等;三

是在光电显示器领域,包括背投电视投影管镜头和LCD投影机光学引擎等。在传统的光学玻璃方面,我国已经形成了技术成熟、品种齐全的各种规格光学玻璃,并且能够规模化生产,不仅能够满足国内需要,而且大规模出口。

在新型光功能玻璃方面,声光玻璃和磁光玻璃等一些光功能玻璃能够满足国内需要,但尚未形成系列化。径向梯度折射率透镜在国内也已经能够小规模化生产,但对空间光学和光学可变焦系统方面有着巨大应用潜力的大尺寸轴向梯度折射率材料来说仍然是空白。我国从事激光技术的科研人员自力更生发展了我国的激光玻璃,为我国固体激光技术的发展打下了良好基础。但光纤激光器和放大器用稀土离子掺杂光学玻璃仍然未能达到实用化和规模化生产。在国内,新型光功能玻璃的研究、发展能力与国外相比较弱,这主要是由于我国在相关材料研究和相关器件的应用上仍处于劣势,而且在相关应用领域的研究也比较落后。

总的来看,在传统光学玻璃领域,由于我国有资源的优势,在国内市场上具有一席之地,但是付出了能源和资源大量消耗和环境污染的巨大代价。而世界上一些著名的光学玻璃生产厂家,如美国的 Corning 公司、德国的 Schott 公司、日本的 HOYA 公司等已经把光学玻璃重点由传统光学玻璃转向新型光功能玻璃,基本上垄断了新型光功能玻璃的国际市场。从光学玻璃价值来看,由于这些新型光功能玻璃的技术含量高、生产工艺复杂,而且在光电技术领域应用范围广,甚至是不可或缺的,所以附加值大,价格是传统光学玻璃的数十倍,成为光学玻璃行业发展的主要动力。因此,我国应加大光功能玻璃材料和相关器件的应用研究,继承并发扬老一辈光学玻璃工作者的创业精神,推动我国光学玻璃事业的进一步发展。

参考文献:

[1] Osterber U, Margulis W. Dye laser pumped by Nd : YAG laser pulses frequency doubled in a glass optical fiber[J]. Optics letters, 1986, 11(8): 516—518.

[2] 杨尊先, 赵修建, 陈文梅, 等. 二阶非线性光学氧化物玻璃的研究进展[J]. 材料导报, 2000, 14(10): 47—50.

[3] Thomazeau I, Etchepare J, Grillon G, *et al.* Electronic nonlinear optical susceptibilities of silicate glasses[J]. Optics letters, 1985, 10(5): 223—225.

[4] Yamane M, Asahara Y. Glasses for photonics[M]. Cambridge: Cambridge university press, 2000.

[5] Jain R K, Lind R C. Degenerate four-wave mixing in semiconductor-doped glasses [J]. J Opt Soc Am, 1983, 73: 647—653.

[6] Amagishi T, Fujii K, Kitano I. Gradient-index rod lens with high $N \cdot A$ [J]. Applied Optics, 1983, 22(3): 400—403.

[7] Amane M, Inami M. Variable refractive index systems by sol-gel process [J]. J Non-cryst solids, 1992, 147&148: 606—613.

[8] Koike Y, Asakawa A, WU S P, *et al.* Gradient ind-ex contact lens [J]. Applied Optics, 1995, 34(23): 4669—4673.

[9] Kindred D S, Moore D T. Design, fabrication and testing of a gradient index binocular objective [J]. Applied Optics, 1988, 27(3): 492—495.

[10] Hagerty J, Pulsifer D N. Glass plate fusion for macro-gradient refractive index materials [P]. US Patent, 4929 065, 1990.

[11] Koike Y, Hidaka H, Ohtsuka Y. Plastic axial gradient index lens [J]. Applied Optics, 1985, 24(24): 4321—4325.

[12] Hamanaka K, Nemoto H. Multiple Fourier transformation using planar micro lens arrays [J]. Applied Optics, 1990, 29(28): 4064—4070.

[13] Koike Y, Kanemitsu A. Spherical gradient index polymer lens with low spherical aberration [J]. Applied Optics, 1994, 33(16): 3393—3400.

[14] Pask H M, Tropper A C, Hanna D C. A Pr^{3+} -doped ZBLAN fiber upconversion laser pumped by an Yb^{3+} -doped silica fiber laser [J]. Opt Commun. 1997, 134: 139—144.

[15] Massicott J F, Brierley M C, Wyatt R, *et al.* Low threshold, diode-pumped operation of a green, Er^{3+} -doped fluoride fibre laser [J]. Electron Lett, 1993, 29: 2119—2120.

[16] Leflochic M P, Allain J Y, Stephan G M, Maze G. Room-temperature continuous-wave upconversion laser at 455 nm in a Tm^{3+} fluorozirconate fiber [J]. Optics Letters, 1994, 19(23): 1982—1984.

[17] 黎敏, 廖延彪, 赖淑蓉, 等. 硫化物光纤及其功能器件的应用 [J]. 光电子激光, 1999, 10(5): 480—486.

[18] 曹志峰. 特种光学玻璃 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.

[19] Qiu Jianrong, Kojima K, Miura K, *et al.* Infrared femtosecond laser pulsed-induced permanent reduction

of Eu^{3+} to Eu^{2+} in a fluorozirconate glass[J]. Optics Letters, 1999, 24(11): 786—788.

- [20] Hirao K, Todorki S, Cho D H, Soga N. Room-temperature persistent hole burning of Sm^{2+} in oxide glass [J]. Optics Letters, 1993, 18(19): 1586—1587.
- [21] Hongbo Sun, Ying Xu, Saulius J, *et al.* Arbitrary lattice photonic crystals created by multiphoton micro-

fabrication[J]. Optics Letters, 2001, 26(6): 325—327.

- [22] Baccaro S, Dalligna R, Fabeni P, *et al.* Ce^{3+} or Tb^{3+} -doped phosphate and silicate scintillating glasses[J]. J Lumin. 2000, 87: 673—675.
- [23] 王大巍, 果世驹, 任海霞, 殷声. 光学偏振玻璃的发展[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 128—131.

21 世纪的精确制导武器技术

现代高技术局部战争表明:军队正在由“体能型”、“技能型”向“智能型”的方向发展;由单纯的兵器对抗向作战体系之间的对抗方向发展,由单纯的防守型向攻防并重的方向发展;由临空、近距作战向防区外远距离作战的方向发展。因此,21 世纪的战争,对制导兵器的发展提出了更高的要求:必须建立完善的作战系统;必须对不同目标具备精确的打击能力;具有应急机动作战能力;具有远程精确打击能力;具有防空作战能力;具有较高的战场适应能力。

目前,国外对精确制导武器发展提出的具体需求是:杀伤概率提高到100%,弹药需求量降低到20%~30%的空地导弹战斗部;可以对付多种目标并能抵抗现代化干扰,并使弹药库存需求量降低30%~40%的自适应战斗部;侵彻能力提高300%,可以摧毁更坚硬目标的侵彻武器;使现役战斗部的杀伤力提高20%~30%,成本比现役产品低20%的制导一体化引信和能够摧毁地下坚固目标的硬目标灵巧引信;对付各种轻型和重型装甲目标,弹药需求量降低30%~40%的综合效应自锻破片战斗部;小型多用途武器和反装甲武器,用以装备各种新型飞机;重量更轻,尺寸更小,成本更低的防区外多用途武器。

现在,制导兵器需要攻克的技术难点主要有:低成本高性能制导与控制部件的设计和制造;多模/多光谱寻的头技术;高速信号及图像处理技术;低成本涡喷发动机技术;微型制导与控制舵机及先进的复合高性能推进系统在小口径高速动能导弹上的集成技术;适于发射多种导弹的发射装置在舰船上的安装技术;低阻和低雷达散射截面弹体形状的设计;满足战术导弹高温和高硬度需求的低成本轻型复合壳体材料;高能量、高密度固体推进剂发动机技术;改善惰性发动机材料的强度和重量/体积比,减小烧蚀和绝缘及喷嘴材料的重量;提高吸气式发动机的燃料效能,降低烧蚀和燃烧室绝缘物质重量;减轻冲压式发动机的振动,提高其部件的性能并缩小其尺寸。

据预测,2020 年前后精确打击武器领域的先进技术主要有:(1)微型精密惯性陀螺技术;(2)微型制导炸弹技术;(3)硬目标侵彻技术;(4)三模复合寻的制导技术;(5)超音速燃料发动机技术;(6)新概念无弹翼自适应超音速导弹技术;(7)合成孔径雷达制导技术;(8)惯性导航和全球定位系统(INS/GPS)一体化技术。

尽管 21 世纪是高技术主宰的时代,但改造后的准制导武器将在相当长一段时间内与精确制导武器并存。为满足作战需求,目前国外主要是通过集成化生产和成品率的提高以及新的采购体系达到降低武器生产成本,提高武器可靠性之目的。例如,联合直接攻击弹药、风力校正弹药布撒器和 GPS 辅助弹药均属准制导武器,命中精度分别为 13 m、26 m 和 6 m。它们采用 INS/GPS 即达到了所要求。因此,占有相当比例的准制导武器与有限的精确制导武器将在未来战场并存,我们也应当重视对老产品的改造,以尽可能低的造价达到所需的要求。