

人工晶体研究进展及应用前景

蒋民华



作者简介 蒋民华,60岁,教授,中科院院士。1956年毕业于山东大学,从1958年开始一直从事晶体材料的研究工作,曾主持、直接参加和指导了数十种高技术单晶的研究工作,多次获得国家的奖励。现任山东大学副校长和晶体材料国家重点实验室主任、国家高技术(863计划)新材料领域第三届专家委员会首席科学家、国际晶体生长组织执委会委员。著有《晶体物理》,在国内外学术刊物发表论文50余篇。

摘要

叙述了人工晶体的现状和若干重要发展动向,提出了进一步发展我国人工晶体的建议。

The Research Progress and Application Prospects of Synthetic Crystals

Jiang Minghua

Abstract

The present status and several important application trends are described. The proposals for further developing synthetic crystals in China are put forward for discussion.

1. 现状分析^[1,2]

我国晶体生长有悠久的历史,但现代人工晶体生长起步较晚,五十年代中后期才有较大的发展。在近四十年期间,由一个基本上是空白的领域迅速提高到进入国际先进行列,在无机非线性光学晶体方面已处于国际领先地位,但还存在不少差距,特别是在人工晶体的产业化方面,我们从以下几方面即可窥及全貌。

1.1 人工晶体的研究和开发

人工晶体的水平主要表现在技艺和科学两个方面。晶体生长技术在人工晶体中占有极重要的地位,由于晶体可以从气相、液相和固相中生长,不同的晶体材料又有不同的生长条件,加上应用对人工晶体的要求有时十分苛刻,这样就造成了人工晶体生长方法的多样性以及生长设备和技术的复杂性:从高真空到超高压,从低温到等离子体高温,从精密检测生长参数到微机自动监控生长过程,从高纯原料到超净环境……,晶体生长技术几乎动用了现代实验技术中一切重要手段。目前国外已有的所有晶体生长方法我国都有。一些高精尖的生长设备,如MBE、MOCVD、上称重全自动单晶炉等都已能自己制造,利用自己的设备和技术,几乎目前所有重要的人工晶体都已成功地生长出来(见表1),许多晶体的尺寸和质量达到了较高水平,其

中以非线性光学晶体最为突出,如中国的 BBO,KTP,LBO 等晶体均已享誉国际市场,而 BBO 和 LBO 都是首先由我国研制出来的。我国晶体材料工作者基于结构和性能的关系的深入研究来探索新的非线性光学晶体,他们把实验探索和对非线性光学基团的理论计算、分子设计密切结合起来,取得瞩目的成就,先后推出了著名的 BBO 和 LBO 晶体。目前正将这一工作继续推向探索真空紫外非线性光学晶体。我国探索新非线性光学晶体材料的另一特色是将无机和有机的非线性光学基团(分子)结合起来,发现了诸如 LAP 和有机金属络合物等一类国际上称为半有机的非线性光学材料。我国还十分重视有经济效益的非线性光学晶体的开发工作,如将助熔剂法用于批量生长 KTP 晶体也是由我国首先突破,并扩展到其他非线性光学晶体。目前助熔剂法批量生长各种非线性光学晶体已成为我国晶体生长技术的一大特色。

除频率转换晶体外,光折变晶体是另一类有重要潜在应用的非线性光学晶体,该类晶体之所以受到重视,是因为只需使用低功率激光即可在室温下进行多种光信息处理。我国在主要光折变晶体材料研制方面工作也很出色,如 Ce:BaTiO₃,KNbO₃,KNSBN,KTN 等,受到了国际的重视。

表 1 一些重要的人工晶体

半导体晶体	Ge,Si, III - V 和 I - VII 化合物
激光晶体	Nd:YAG,Ti:Al ₂ O ₃ ,Cr:BeAl ₂ O ₄ ,Cr:LiSrAlF ₆ Nd:YAP,Nd:LiYF ₄ ,Nd:YVO ₄ ,NYAB
非线性光学晶体 (频率转换)	KDP family,BBO,LBO,KTP,MgO:LiNbO ₃ LAP,Tl ₃ AsSe ₃ ,LiIO ₃
光折变晶体	BaTiO ₃ ,KNbO ₃ ,KNSBN,KTN,BSO
电光、磁光、声光 调制晶体	LiNbO ₃ ,LiTaO ₃ ,R ₃ Fe ₅ O ₁₂ ,TeO ₂ ,PbMoO ₄
压电晶体	人工水晶,LiTaO ₃ ,LiNbO ₃ ,Li ₂ B ₄ O ₇
红外探测晶体	TGS,LiTaO ₃ ,SBN Ge,Si,GaAs,HgCdTe,InSb
光学晶体	NaCl,KCl,KBr,LiF,CaF ₂
闪烁晶体	BGO,NaI(Tl),BaF ₂ ,CsI,ZnWO ₄
宝石	Al ₂ O ₃ 系,ZrO ₂ (立方),GGG
超硬晶体	金刚石晶粒,金刚石薄膜,BN

在闪烁晶体中,锗酸铋(BGO)以其优异的综合性能受到重视,八十年代初我国首先实现了优质 BGO 大单晶的工业化生产,并大量应用于欧洲核研究中心正负电子对撞机电磁量能器,从而打破了掺铊碘化钠长期统治闪烁晶体市场的局面。

1.2 人工晶体的产业化

在数以千计的人工晶体中,真正称得上应用广,产量大,经济效益高,具有产业化规模的,只有硅单晶、金刚石、水晶和宝石等少数几种。

(1) 硅单晶。硅单晶是电子工业的“粮食”，目前仍在半导体材料中占首位，年产量达数千吨，在已实现产业化的晶体材料中名列前茅，其中约80%的体单晶是用直拉法生产的，主要用于大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)的芯片。目前以硅为基础材料的众多器件已成为电子器件的主体。其发展动向为：一方面，器件的集成度不断提高，集成电路线宽(即电路最小特征尺寸)已达0.35微米，这意味着在半张邮票大小的芯片上能包容百万个以上晶体管。发展最快的动态随机存取存储器芯片其容量已达64兆位；另一方面，硅单晶的直径、长度、纯度和完整性都在不断提高，目前已可直拉直径达12英寸(300毫米)，比一人还高，重达120公斤的大单晶。在国内，3~5英寸硅单晶和晶片已产业化。生长单晶的设备以及晶片加工设备基本上由国外引进。目前除硅晶片的表面质量与国外还存在一定差距外，主要是需要提高产品质量的稳定性。

(2) 金刚石。金刚石是目前自然界中已知硬度最高的物质，金刚石具有优异的力学、热学、光学和电学性质，是发展现代工业、国防和现代科学技术的一种重要超硬材料。人造金刚石从四十年代问世，经历了超硬材料(50~60年代)、工具应用(60~80年代)和功能材料(如金刚石薄膜)三个阶段，不断向前发展。金刚石的产量和消耗量也是衡量一个国家实力和技术进步的尺度之一。1990年世界金刚石年产量约5亿克拉，产值近10亿美元。随着金刚石应用的不断扩大，日本预测到2010年各类金刚石制品的市场为17000亿日元(约190亿美元)。我国从1961年开始研制金刚石，目前除个别研究单位外，大部份已转入企业生产。我国现有200多个厂家拥有1000多台压机，其中大多数为只有2~3台压机的小企业。1992年的产量约6千万克拉，每年出口高强度金刚石1千万克拉，多数产品强度不高。

(3) 人工水晶。水晶作为理想的压电材料，是电子工业的支柱，此外它还是重要的光学材料和装饰宝石。人工水晶始于1905年，二战前后，由于电子通讯技术的迅速发展，人工合成水晶有突飞猛进的发展，70年代，随着电子表的问世，人工水晶又掀起了第二次高潮，80年代当按钮电话、无绳电话和移动电话兴起时，人工水晶又出现了第三次高潮，每隔3~5年，随着新电子产品的问世，人工水晶还会掀起一个个新高潮。人工水晶的发展与岁月相伴，高潮迭起，确实是典型的经久不衰的人工晶体。全世界人工水晶年产量1989年为2330吨，1990年为2800吨，89年世界水晶器件产量达26亿只，产值约为18亿美元。我国人工水晶在50年代末60年代初起步，当时几家主要研究单位都已发展到相当规模，后主要转向工厂生产，目前人工水晶生产厂家已超过百家，其中年产十吨以上的只有十几家，而且大部分是近几年发展起来的中小企业和乡镇企业。89年人工压电水晶产量约300吨，90年约为360吨，除满足国内需求外，还有部分出口。由于生产厂多数是低水平的重复，中低档产品多，影响效益。如89年我国水晶器件产量为七千万只，和美国相同，但产值(3200万美元)只有美国的(2.5亿美元)八分之一。又如我国y棒水晶棒每公斤出口价为65~70美元，而日本和美国的y棒水晶棒每公斤售价达90~100美元，主要是因为我们人工水晶质量档次低。

(4) 人造宝石。人造宝石品种多，用途广。难以全面归纳和统计，这里只侧重分析最重要的人造宝石——刚玉($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)系列。刚玉宝石由于具有高强度、高熔点、化学惰性和多种光学特性等宝贵物理性能，因此应用十分广泛。作为装饰宝石，掺上不同元素可制成名贵的天然红宝石、蓝宝石以及其它颜色的宝石和星芒宝石的仿制品；作为超硬材料广泛用作钟表工业耐磨轴承(红宝石)和永不磨损的高档表蒙(白宝石)；作为稳定的惰性材料可用作耐腐蚀的化学器皿、外延基片和医用植入材料；作为光学介质，宝石是性能优良的红外窗口材料；作为激光材

料,红宝石是率先实现光受激发射的晶体,而钛宝石则是激光晶体中的一颗新星,它是目前最好的可调谐激光晶体。从红宝石到钛宝石把古老的人工宝石推上了重要功能材料的宝座。人造宝石的合成始于本世纪初,首先采用维涅尔法成批地生长数以吨计的宝石,可以说是最早的人工晶体产业。近百年来,根据应用要求不断发展的生长技术(如倒模法、热交换法、提拉法等),人造宝石一直在经久不衰的发展着。世界人造宝石的市场需求量目前还无法精确计算,根据日本人造宝石市场调查,87年为185亿日元,预测95年为270~390亿日元。估算目前世界对多种人造宝石的市场需求量近10亿美元。

我国人造宝石工作始于60年代初,工作时断时续,近年来一些单位开展了激光宝石和装饰宝石的工作,但多数都是作坊式的,没有形成规模。国内仅有的几家宝石工厂也因设备旧、品种少、质量差而缺乏竞争力,仅能维持运转。与金刚石、人工水晶相比,人造宝石相对较弱,未形成产业。

(5) 激光与非线性光学晶体。激光晶体作为固体激光器的主体,从科学研究到工业生产,从军用到民用,应用范围很广。对以Nd:YAG晶体为主的激光晶体,国外早已投入生产,在美国Nd:YAG晶体已形成产业(如美国Airton公司),产品质量稳定,占领国外大部分市场。我国Nd:YAG生长单位不少,少数质量尚可满足国内需要,但批量质量长期上不去,在国际市场上缺乏竞争力,作为产业并未形成,生长设备落后是其主要原因之一。用于频率转换的非线性光学晶体利用激光与晶体的相互作用产生的谐波、和频、差频和参量振荡等二阶非线性光学效应进行光的频率转换,扩展激光频率复盖的光谱范围,这是非线性光学晶体最重要和成熟的应用。由于这类晶体是配合激光晶体应用的,而且品种多,用量相对来说不是很大,在国外并未形成产业。我国非线性光学晶体的生长虽有优势和规模,但由于分散,而且内部竞争激烈,在国际市场上所占的份额和竞争力也不是很强的。

必须指出,在我国晶体生长发展初期,国外对于重要晶体生长原理和技术是严格保密的,对于上述已实现产业化的单晶硅、金刚石、水晶、红宝石和石榴石等晶体的生长技术是在自力更生的基础上,经过艰苦探索才取得突破的。但是一到产业化阶段,差距便拉大了,这与我国工业基础薄弱有关,也有体制和管理的问题。

1.3 我国人工晶体队伍的格局

经近四十年年的发展,我国人工晶体队伍格局已经形成,数十家研究单位分布在中科院、高校和产业部门,其中少数独立成所,多数以研究室的形式依附于所属单位;有的以研究或开发为主,多数两者兼而有之;少数单位重要人工晶体品种齐全,生长测试加工配套,多数则根据单位配套的需要侧重生长某类晶体,并逐渐形成特色。人工晶体作为功能材料具有小批量、多品种的特点,国内多数人工晶体研究机构在研究的同时,差不多都抓住一种或几种晶体进行作坊式的小批量生长,然后通过各自渠道对外销售,虽有点效益,但多数成不了大气候。全面来看实力较强、影响较大的单位不到十个,这是我国人工晶体的骨干队伍,其主要研究人员大都从事人工晶体事业数十年,基础好、技术全面、有奉献精神,他们是人工晶体队伍的中坚和精华。

我国人工晶体队伍形成不久就组织起来进行交流,但分属不同的学会,人工晶体和半导体是分家的。中国的第一次晶体生长会议要比第一次国际晶体生长会议(ICCG-1,1966)早六年。自1978年开始参加国际交流以来,我国学者多次应邀在国际学术会议作有关人工晶体的特邀报告,被聘为相关国际学术刊物的编委;中国目前还没有加入国际晶体生长组织(IOCG),但中国学者仍在国际晶体生长大会上被选为IOCG理事和执委会成员。近几年来,国外十分注

意我国人工晶体的状况,积极与我国发展对口交流。这些都说明我国在人工晶体领域的国际地位不断提高。在改革开放和发展对外交流的形势下,我国的晶体生长研究人员已成为国外有关单位受欢迎的聘用对象,在第九次(1989),第十次(1992)和第十一次(1995)国际晶体生长会议上,在与会的中国人工晶体学者中,有一半以上是代表国外有关单位来参加会议的。我国人工晶体队伍的外流问题也不能不引起我们的重视。

2. 若干重要发展动向

应用是材料发展的驱动力,人工晶体作为重要的功能材料,不同的晶体有不同的功能和应用,表1中所列的各类重要人工晶体都有其应用领域和发展动向。这里仅重点结合半导体晶体、激光晶体和非线性光学晶体,分析一些应用热点和材料发展动向的关系。

2.1 LD泵浦的全固化激光系统

80年代是固体激光器发展史中一个重要的转折点,半导体激光器(LD)泵浦的固体激光器、固体可调谐激光器及高功率固体激光器取得了重大进展。LD泵浦固体激光器具有电注入,光谱匹配好,效率高,体积小,寿命长等优点,使发展全固化激光系统成为现实。主要包括以下几种类型。

(1) 全固态大功率激光器。采用大功率LD(808nm)阵列泵浦Nd:YAG和Nd:LiYF₄(Nd:YLF)。1992年美国劳伦斯,利弗莫尔实验室用输出峰功率8kW的二极管阵列侧面泵浦4×16×90mm³Nd:YAG板条,平均功率为1.05kW的准连续激光输出。器件光—光转换效率为28%。Nd:YLF热透镜焦距较长,本身又是具有自然双折射的单轴晶,热致双折射微弱到几乎可忽略不计,因此Nd:YLF晶体似乎是单横模,大功率激光器更为合适的激光晶体之一。利弗莫尔实验室分析了Nd:YLF的输出波长(1.047μm)可和铍玻璃放大器匹配,还在考虑将它作为用于激光聚变的前级激光器。

另据最新报导^[3,4],LD泵浦的Nd:YAG激光器可在946nm工作,在12.7W输入泵浦下可获得的2.3WTEM₀₀946nm输出,该波长诱人之处在于可倍频产生蓝光;另外用LD阵列泵浦的Nd:YVO₄可获得>13W的TEM₀₀的输出效率>50%。

(2) 全固态绿光激光器。在LD泵浦Nd激光晶体基础上再用非线性光学晶体倍频,获得绿光。1994年L. Y. Liu等人^[4]采用14只带输出耦合光纤的半导体激光器阵列(808nm输出总功率18W),泵浦Nd:YAG激光器,通过腔内KTP晶体倍频,获得波长为532nm约3.5W的单横模连续绿光输出。1993年意大利的V. Magni等人^[5]采用Nd:YLF作为激光晶体,通谐振腔内LBO晶体倍频,在约7千瓦的注入电功率的情况下获得了波长为532.5nm约13W的单横模连续激光输出。全固态绿光器的下一步目标是逐步取代氩离子激光器。LD泵浦Nd:YVO₄/KTP的全固态小型绿光激光器,我们将在下面另行叙述。

(3) 全固态可调谐激光器。这类激光器可分两种类型。一类是用上述绿光激光器为光源泵浦钛宝石(Ti:Al₂O₃)激光器形成的全固化宽波段可调谐激光器。1991年美国的James Harrison等人^[6]采用LD泵浦的小型单横模连续绿光激光器(532nm,180mW)作为泵浦源,演示了全固化波长可调谐连续掺钛蓝宝石激光装置。此后各种全固化光波段可调谐钛宝石激光器商品不断涌现,可取代氩离子泵浦的、实用化的全固化宽波段可调谐激光器已经逐步实现。

另一类新发展的全固态的可调谐激光器是用红色的LD(670nm)泵浦掺铬的晶体激光器产生可调谐的近红外激光如Cr:BeAl₂O₄(700—830nm),Cr:LiSrAlF₆(LiSAF),Cr:LiCaAlF₆

(LiCAF)等,其中以 Cr:LiSAF(780--1010nm)应用较为广泛,为提高泵浦光光束质量,最近还报导^[7]另一种全固态的形式:即由 LD(808nm)泵浦 Q 开关的 Nd:YLF,将产生的 1.32 μ m 激光,再用 LBO 晶体倍频产生的 ≤ 0.8 mJ, ≥ 60 ns 660.5nm 红光泵浦 Cr:LiSAF 获得输出为 60ns,0.11mJ 的输出。

(4) 全固态光参量激光器。这实际上也是一种全固态的可调谐激光器。自从 1965 年在 LiNbO₃ 晶体中首次观察到光参量效应以来,至今大约在 22 种晶体中产生了光参量激光,但直到近几年才有光参量激光器商品问世,光参量激光器近 30 年徘徊的根本原因是光参量激光对晶体材料和高质量的激光泵源要求十分苛刻,如要求晶体有宽广的透过谱和可匹配范围,高的有效非线性系数,很高的光破坏阈值和高质量的大块单晶等,目前仅 BBO,LBO,KTP,MgO:LiNbO₃ 等少数几种晶体能符合这一要求,紫外和可见光波主要用 BBO 和 LBO,红外波段以 KTP 为主。全固态、宽调谐光参量激光器的新近进展是,使用光束质量优良的 LD 泵浦的激光作光源,纳秒脉冲 LBO 器件获得了可见输出(450~1625nm),阈值低至 0.3mJ,转换效率达 27%^[8];纳秒脉冲泵浦的红外 KTP 器件,在 1.6 μ m 附近可输出 10mJ/脉冲,效率高达 47%^[9]。最近还报导了^[10]全固态的参量振荡(OPO)/参量放大(OPA)系统,该系统用 20W 807nmLD 泵浦锁模的 Nd:YVO₄ 激光器再经 Nd:YVO₄ 放大器和倍频器产生 2W,6ps 532nm 绿光同步泵浦 LBO 参量振荡器,可产生 300mW 4ps 的脉冲,在 450~1700nm 调谐范围脉宽小于 0.1cm⁻¹。全固态光参量激光器有希望发展成为高功率、高分辨、宽调谐的理想激光器。

2.2 紧凑的蓝绿光小型激光器

以红、绿、蓝为主的半导体发光管(LED)和半导体激光器(LD)是当今光电子技术的热点,世界市场分析表明,在五年内红绿蓝光电子产业将达到 200 亿美元,其中红光比较成熟,已大量进入市场,并正在向大功率,短波长(从 670nm 到 630nm)方向发展。蓝绿光还处在逐渐走向成熟的过程之中,材料在其中起着关键的作用。

蓝绿光波长范围是指从近紫外到绿光。廉价、高效、紧凑的蓝绿光激光器应用十分广泛;从光记录(存储)、激光打印到全色平面显示,从医学诊断(活组织成像,流动血细胞计数)到外科手术,从光通讯到军事应用等,是未来极有希望的高技术产业。用于紧凑蓝绿光激光器材料主要是人工晶体(包括半导体),现将各类激光器和相关材料及其发展动向分述如下:

(1) 半导体蓝绿光激光器。在半导体材料中,处在蓝绿波段的 LD 和 LED 尚在研究之中,主要是 II-VI 化合物 ZnSe, III-V 化合物 GaN。II-VI 族材料和器件的研制工作自从 1990 年 P 型掺杂得到实质性突破以来,进展十分迅速,已制成量子阱激光器,实现室温下激射(463nm),但输出 1mW 时,寿命只有 10 秒,这里有欧姆接触问题、掺杂问题和缺陷引起的退化问题,相当复杂。GaN 进展也不错,日本报导了制成 ZnGaN/AlGaIn LED 实现亮度为 1cd 的蓝光输出,并适于商业应用。最近还报导了用电子束微枪泵浦 CdZnSe/ZnSe 化合物,产生蓝绿光。到目前为止已有六、七个国家(美、日、英、德、法、俄)等,近二十个实验室实现了半导体蓝绿光发光或激射,为了参加国际竞争,西方各国纷纷成立了联合研究实验室,集中人力、物力开展研究,期望在未来这一高技术产业中占有一席之地。我国在这方面工作刚开始,差距较大。

(2) LD 泵浦晶体小型倍频绿光激光器。通常用 LD(808nm)泵浦掺钕的激光晶体再用 KTP 倍频产生绿光,最常用的晶体是 Nd:YVO₄,因该晶体吸收峰正好和 LD 的发射波长匹配,泵浦效率较高,其他合适的激光晶体还有 Nd:Sr₅(PO₄)₃F, Nd:Sr₅(VO₄)₃F,自倍频晶体(毋需 KTP)NdAl₃(BO₃)₄ 等。由于该项技术比较成熟,研究成果已商品化,100mW 单频、单横

模、低噪声、高稳定性的小型绿光激光器已投入批量生产,用于激光打印。我国也普遍开展了这方面的研究,单管泵浦器件效率最高达23%,输出功率最高接近200mW。

(3) 红外LD直接倍频小型蓝绿光激光器。这项技术原理简单,但对LD和倍频材料要求高,所以实现难度要比泵浦晶体再进行倍频的技术大多得。由于用于直接倍频,对LD的模式要求较高;由于是对LD直接倍频产生蓝绿光,这就要求材料有大的非线性光学系数,足够短的吸收边,低的双折射率,和易于实现非临界位相匹配,寻找同时符合这些要求的材料是一项难度较大的工作。迄今为止,只有 KNbO_3 能直接倍频产生蓝绿光,但还需严格控温,在有机和半有机材料中也的确找到能直接倍频产生蓝紫光的晶体,此外还可利用人工调制周期结构和波导技术进行倍频,但这些效应还不够强,离实用化器件还有相当长的距离。至今直接倍频工作尚未取得突破性的进展。我国在这方面的的工作还是处在前列的。

(4) 上转换纤维蓝绿光激光器。本项技术是利用某些稀土离子的上转换过程,用LD直接泵浦掺有上转换离子的特殊光纤直接产生并输出蓝绿光,可以直接用于医学诊断和手术,十分方便。国外近年来比较集中研究,不断取得进展,逐步向实用化迈进。

综上所述,在紧凑的蓝绿光小型激光器各项技术中,最有前途的是半导体蓝绿光激光器,由于材料和技术上的难度,估计至少还要五年以上的时间才能达到实用化的程度。在此以前,使用人工晶体倍频的技术还能充分发挥作用,我们应该抓紧这段时间充分利用我们的优势,努力突破,以获取效益。对于国外目前集中力量研究的半导体和上转换蓝绿光激光器,我们也需要安排一定力量,积极跟踪,力争形成特色。

3. 体会和建议

国外发达国家人工晶体已经发展了近百年,而我们则是在落后的工业基础上起步,用了不到四十年的时间就能使我国的人工晶体在国际上占有一席之地,中国的人工晶体正在走向世界。这一切来之不易,究其原因,以下几点可供商榷:(1) 在晶体材料的科学和技艺方面,在跟踪中不断创新。在探索新材料方面,推出了一批诸如BBO、LBO、LAP等有国际影响的新晶体。在晶体生长技术方面,基本上依靠自己力量建立起各种生长方法和设备,并有创新和发展。除了前面提到的首先将助熔剂法用于批量生长KTP等非线性光学晶体外,用坩埚下降法批量生长大尺寸高质量的BGO晶体也是由我国首创的。(2) 根据人工晶体的特点,我国十分重视晶体生长技艺的研究,因此许多晶体的尺寸和质量均达到了较高水平,享誉国际市场。(3) 我国拥有一批第一流的基础扎实、技术熟练、耐心的晶体材料工作者,没有他们几十年如一日地对晶体生长事业的投入,便没有我国人工晶体的今天。

回顾近四十年发展历程,我们还必须清醒地看到我国人工晶体发展中的问题:我们的优势是微弱的,不全面的;在人工晶体产业化问题上差距较大;我们的晶体生长“硬件”还比较落后,基础研究相对比较薄弱;我国目前人工晶体队伍的格局,不利于联合起来到国际上去竞争等等。

为了巩固和发展我国人工晶体在国际上得来不易的一席之地,特提出以下建议:

(1) 为了发展人工晶体产业,一方面要重视量大面广,经久不衰的晶体;另一方面为将来可能成为新产业的生长点做好准备。

(2) 抓住热点,使材料、器件、应用配套。

(3) 将人工晶体的基础研究、产品开发和产业化三个方面加以衔接、贯通,建设相应的基

地。

4. 促进人工晶体和半导体的结合。
5. 联合起来,加入国际晶体生长组织,主办国际晶体生长会议
6. 稳定和发展人工晶体队伍。

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委. 无机非金属学科发展战略研究. 1993
- [2] 蒋民华. 硅酸盐学报, 1993, 21: 548~553.
- [3] CLEO'95, Technical Digest, CMD4, CMD5
- [4] Liu L Y et al. Opt. Lett., 1994, 19[3]: 189
- [5] Magni V et al. Opt. Lett., 1993, 18[24]: 211
- [6] James Harrison et al. Opt. Lett., 1991, 16[8]: 581
- [7] CLEO'95, Technical Digest, CMD1
- [8] Cui Y et al. Opt. 1992, 17: 646
- [9] Larry R, et al. J. Opt. Soc. Am. B., 1993, 10: 1730.
- [10] Anderson S G et al. Laser Focus World, 1995, 31[3]: 90
- [11] Compact Blue—Green Lasers. 1994 Technical Digest Series 1994, 1

(上接第 81 页)

发有我国资源特色的优质耐火材料指引新的方向和途径,并在学科理论上有新的发现,新的观点和新的启迪。

这样到 2010 年,我国耐火材料科技工作有可能摆脱落后、被动的局面,进入国际先进行列。我国耐火材料工业有可能初步改变品种结构和技术结构落后的局面,基本跟上钢铁工业和其他高温工业优化结构的前进步伐。

参考文献

- (1) 钟香崇,严东生. 十年来中国科学——冶金, 1959, 20~30.
- (2) 人民日报, 1995, 3. 1.
- (3) 钟香崇. 耐火材料, 1990, [4]: 1~4.
- (4) 钢铁研究总院. 内部报告. 1995.
- (5) 洛阳耐火材料研究院. 内部报告. 1994.
- (6) 抚顺钢厂. 内部报告. 1994.
- (7) 秦皇岛耐火材料厂. 内部资料. 1994.
- (8) 青岛耐火材料厂. 内部资料. 1994.
- (9) 张悦明等. 耐火材料. 1994, [1]: 26~28.
- (10) 冶金建筑研究总院. 内部资料. 1994.
- (11) 陶绍干,曹勇. 耐火材料. 1994, [3]: 163~166.
- (12) 石干等. 洛阳耐火材料研究院内部报告. 1993.
- (13) Liu X D et al. Proc. Intern. Symp. on Refractories Hangzhou, China, 1988. 609—716.
- (14) 周宁生等. 洛阳耐火材料研究院内部报告. 1995.

引起了国际上的重视。

高技术探索项目还资助国际合作项目,以及资助参加国际学术会议和考察,收到了很好的效果。例如,中国科学院动物研究所的“昆虫杀虫药剂抗性基因的研究”项目,被欧共体选为“农业基因工程”中-欧合作研究项目,与法国科学院科学与进化研究所、英国洛桑试验站签订了合作研究协议。该项研究取得了突出的进展,为昆虫的抗性机制奠定了基础,对药物设计等提出了新的方向;又如上海交通大学史常忻的“M₅M₅结构光电子器件及其单片集成工艺技术的研究”项目,通过中、德合作研制成功一种结构新颖、生产工艺简单的长波长、高速铟镓砷M₅M₅光电探测器,其综合技术指标达到90年代国际先进水平,并获4项中国发明专利。

实践说明,考虑到高技术探索项目既要服务于“863”计划的实施,又要适应其基础性、探索性强等特点等因素,采用目前对科

学基金面上项目的受理申请、评审办法,打破部门地区界限,从更广泛的范围受理申请,通过由学术造诣深、知识面广的同行专家组成的专家评审系统,在“依靠专家、发扬民主、择优支持、公正合理”的十六字评审方针指导下遴选优秀项目,是合适的。其中评审工作是核心环节,为了保证科学性和公正性,采用了同行评议与学科评审相结合的方式,使不同方面专家的评审意见,能够互相补充与制约,使评审结果比较客观、公正、合理和准确。近年来,又加强了以科研信用、绩效为依据的基金运行机制,加强了新立项目与开题项目执行情况的挂钩,从而有利于科学研究的连续性和研究队伍的稳定。

鉴于高技术探索项目的研究内容与国家自然科学基金各学科主要资助范围和鼓励研究领域既有自身特点、又有联系交叉的特点,除了通过项目指南的内容选择课题申请外,还在评审工作中

采取了一些专门的措施,如规定“高技术新概念新构思探索项目的评议人,必须有计划专家组成员”;“高技术探索项目的评审,要有其项目指南为依据,遴选为“863”计划起探路和先导作用的创新性强的项目,避免成为“863”计划的一般性补充”;规定“与“863”计划领域关系密切的评审组,要有相应的“863”领域专家组成员参加”如国家自然科学基金委员会第四、五届学科评审组中共有60余名各领域高技术专家委员会成员参加了与“863”领域相关的20个学科评审组的工作,从而加强了与“863”计划专家组成员的联系与沟通,使项目遴选更好地符合指南的要求。

“863”国家高技术研究发展计划已经实施10年,取得了辉煌的成绩。今后,国家自然科学基金将继续密切配合“863”计划的发展,精心组织好高技术新概念新构思探索项目的实施,为实现“科教兴国”战略积极作出新的贡献。

发展新材料 促进产业化

中国科学院院士 蒋民华

新材料技术是提高综合国力的共性关键技术

材料是人类社会发展的物质基础和先导。每一次重大的新材料的发现和利用,都把人类支配自然的能力提高到一个全新的高度,从而使材料成为人类历史发展和进步的里程碑。新材料,是指那些新近出现的或正在发展中的

具有优异性能的一个类材料,它具有传统材料所不具备的高性能。新材料在人类社会进步和世界工业革命中具有特别重要的基础和先导作用,其发展对提高国家的综合国力和国防实力具有重要的作用。

世界已经经历了两次工业革命,这两次工业革命都是与新材

料的发现和广泛应用为其先导的。制钢工业的发展,为18世纪以蒸汽机的发明和应用为代表的第一次世界工业革命奠定了重要的物质基础。本世纪中叶以来以电子技术(特别是微电子技术)的发明和应用为代表的第二次世界工业革命,硅单晶材料更在其中起着先导和核心的作用。

当今国际社会公认,材料技术、信息技术和能源技术是人类文明的三大支柱,同时也把新材料技术、信息技术和生物技术作为当代高新技术革命的主要标志。正是由于现代高技术的发展更加密切地依赖于新材料的发展,世界上主要的工业发达国家和新近崛起的发达国家都制定了发展高技术新材料的战略规划,并且将新材料技术列入优先发展的重点领域。

新材料技术具有广阔的市场。美国商业部1990年预测,到2000年,全世界12项新兴技术的市场总营业额将达一万美元,其中新材料将近4000亿美元,约占40%;到2000年,上述12项技术在美国的市场营业额将近3560亿美元,其中新材料约为1550亿美元,占40%还强。日本通产省估计到2000年,日本国内新材料的市场规模将达95000~126000亿日元,为1987年的3~4倍,年平均增长率约为11%,远远高于其国民生产总值的年增长率。除了新材料直接的销售市场外,与新材料技术相关的高技术市场更是巨大。美国预计与新材料相关的8个工业部门,到2000年时的年营业额要突破2万亿美元,可见与新材料技术相关的高技术市场潜力之巨大。

显然,材料科学技术是当代及下世纪初最重要的科学技术之一,是近年来发展最快的科学技术领域之一。新材料的研究开发和使用水平对国民经济各方面都有着广泛的影响,新材料技术的发展直接促进和推动了其他工程技术领域的发展,已成为现代工业各个领域技术进步的共性关键

技术。几十年来,我国新材料的发展,也有力地促进和推动了我国基础工业、传统产业的改造和升级,促进了新兴产业、高技术产业的形成和发展,为增强我国综合国力和国防实力,做出了重要贡献。

“863”计划有力推动了我国新材料技术的发展

我国政府历来重视新材料技术的发展,新材料技术一直作为优先发展领域被列入1956年以来的历次国家科技发展规划。在“863”计划中,新材料技术被选为七大重点研究领域之一。“863”计划有力地推动了我国高技术新材料的发展,实施10年来取得了丰硕成果。

1. 新材料的研究开发水平上了新台阶

通过“863”计划的实施,我国的新材料研究开发水平有了明显的提高,主要表现在以下几个方面:

(1) 开辟了重要的研究新领域 “七五”和“八五”期间,新材料领域结合我国国情,开辟了一批重要的研究新领域,如光电子材料及制备技术、金属有机化合物(MO)、多晶金刚石薄膜制备与应用、储氢材料等新能源材料及其应用、铁电薄膜、精细复合功能材料、金属间化合物材料、金属基复合材料、高性能树脂基体及复合材料、高性能固体推进剂材料、红外隐身材料、航天防热系统材料、材料微观设计与性能预测、材料表现改性新技术等。经过广大科技人员的努力,在这些研究领域取得了一批接近或达到国际先进水平的研究成果,在国际上占有了一席之地,提高了我国

新材料的整体研究与开发水平,为增强我国综合国力、参与国际竞争奠定了基础。

(2) 巩固了已有优势,发展了中国特色 我国的无机非线性光学晶体研究在国际上具有优势,晶体生长也有特色。通过“863”计划的安排,巩固和发展了这种优势,促进了开拓和创新。其中,三硼酸锂(LBO)的生长技术和材料性能有了进一步提高,已形成了批量生产;应用阴离子基团理论发现了新型紫外非线性光学晶体三硼酸铯(CBO),获中、美发明专利;新研究开发的光折变晶体KN SBN,是当前最好的光折变晶体之一,不仅获得国家发明专利,其原型光折变器件还出口欧、美、日等国。我国在高温结构陶瓷研究方面,在国际上也有一定地位,通过“863”计划的支持,新研究开发的SiC复相陶瓷等,也取得了颇具特色的研究工作。

(3) 突破关键技术,走向实用化 本领域的大部分课题,在“八五”期间都进入了攻坚阶段,经过努力,突破了技术关键,在实用化方面取得了很大进展。一些课题的研究工作,有所创新,达到或接近了国际先进水平。例如:

光电子材料的基础材料大直径GaSb(2-3)和InAs(2)单晶和抛光片质量达到国际先进水平;MO源研制成绩显著,目前已可以生产19个品种,在部分供应国内使用同时,已有少量出口。

掺杂石英光纤,研究出了1.5μm光纤放大器,在1.47μm和532μm倍频泵浦下,小信号增益分别为25和39dB;研制出卤化银多晶光纤,损耗<15B/m,弯曲半径<40mm,传输功率>

14W; GeO₂ 空心光纤也在医院得到应用。

有机光导鼓记录介质的研究进展顺利, 研制成的高灵敏、低残留电位的有机光导体和鼓, 效果与日本 Canon 原装机相当。

高性能树脂及复合材料方面, 耐高温 316 的 PI 树脂已达到国外同类产品的水平并具有吨级生产规模。PEEK、PPS、PEKK 树脂采用我国自己的合成路线, 重点解决了合成中的关键技术, 产品性能基本上达到国外同类产品的水平。

材料的特种制备加工技术方面, 如高温自蔓延合成 (SHS) 技术、材料表面改性技术、超细粉体制备技术等均取得很大进展。材料表面改性技术已稳步走上了工业应用。

2. 抓好重大成果转化, 推动成果的商品化和产业化

新材料领域专家委员会十分重视研究成果的实用化和产业化, 积极支持影响大、集成度和显示度高的重大成果转化项目。例如, 镍氢电池是新一代高性能无污染的可充电电池, 是替代镍镉电池的高技术产品, 具有十分广阔的市场。“863”计划自“七五”立项研究新型储氢材料以来, 根据国际市场发展的动向, 适时地将该专题研究重点转向镍氢电池。经过几年的联合攻关, 镍氢电池的研究与中试产品的主要技术指标已接近国际先进水平, 并拥有我国的专利技术, 组建了“国家高技术新型储能材料工程工发中心”, 积极开发具有市场竞争能力的电池产品。预计到本世纪末, 我国将达年产储氢材料 3000 吨、镍氢电池 2 亿安时的规模, 总产值

达 30 亿元人民币。镍氢电池是稀土金属的主要应用领域之一, 我国镍氢电池的研究与开发, 还势必带动一大批相关产业和高新技术的发展。

高性能低温烧结多层陶瓷电容器 (MLC) 在电子技术中有着广泛的应用。本领域于 80 年代中期从一开始就针对市场需求, 组织有高校、科研单位和骨干企业参加的产学研联合体, 开发了具有我国特色的高介电常数低温烧结 MLC 陶瓷, 并共同攻克技术难关, 迅速投入了生产, 并注意成熟一个, 推广一个, 尽快形成规模效益。目前, 该重点项目研究取得了一批具有国际先进水平、部分国际领先的科研成果。我国的 MLC 生产企业, 从 1994 年接受“863”研究成果以来, 利用低烧瓷料, 1995 年已生产 10 亿只 MLC 产品, 产值在 1.5 亿元人民币以上。低温烧结 MLC 由于成本低, 性能好, 极大地提高了产品竞争力, 低温烧结瓷料也已开始出口进入国际市场。生产企业认为这是几年来成果转化效率最高、速度最快、效益最好的项目。

新材料领域的重大关键技术项目也取得了显著的进展。其中, 金刚石膜在生长技术、工具制备技术上取得了重大突破, 应用开发进展良好, 前景诱人, 金刚石膜的热沉应用也进展顺利; 双层辉光离子渗金属技术手工锯条示范生产线的调试已顺利完成; 自蔓延技术研究也取得显著进展, 开发的陶瓷内衬钢管已走上了产业化, 建立了工业性生产线, 生产的直径 100—300mm、长度达 3—4M 的陶瓷内衬钢管性能达到国际 90 年代先进水平, 并已有近千

万元的订货。

3. 为相关领域和国防建设提供了关键新材料

为相关高技术领域和国防建设提供所需的关键配套新材料, 在新材料领域“七五”、“八五”项目安排中均给予了高度的重视。如, 我们安排了航天用低密度烧蚀材料、红外隐身材料、航空航天用金属基复合材料及金属间化合物材料、表面改性新技术等。这些军用关键新材料的研究均取得显著进展。低密度烧蚀材料、红外隐身材料已经得到应用, 我国自己研究开发的铸造 Ni3Al 合金做成定向凝固导向器叶片, 用在航空发动机上, 正在进行试车, 效果良好; Ti3Al、TiAl 金属间化合物材料, 也开始在航天上应用。

4. 提高技术装备水平, 加强人才培养

新材料的发展与制备科学、制备技术和技术装备密切相关。要研制和发展新材料技术, 必须下大力气发展制备科学和技术, 提高技术装备水平。在“七五”和“八五”期间, 新材料领域一方面注意从国外引进关键的新材料技术装备, 又注意立足国内, 研究和发展的材料合成和制备技术与装备, 提高新材料的研制开发能力。例如, 研制的 YAG 晶体自动化生产设备达到国际先进水平, 性能良好, 适用面广。研究开发的直流等离子喷射金刚石薄膜生产装置、热阴极直流辉光等离子体 CVD 金刚石薄膜生产装置、MEVVA 源强流金属离子注入装置、全方位离子注入装置等都具有我国的特色和创新。这些设备已从原型机发展到工业样机, 可在工业上得到实际应用。这些

设备的研制成功,不但为新材料的研制提供了先进的工具,而且也有力地促进了新材料、新技术的实用化进程。此外,也研制开发了一批新材料的表征和检测新技术和新装备,如用于精密陶瓷缺陷检测的扫描电声显微镜、微焦点X光CT、高分辨超声显微镜等,达到了国际先进水平。

通过“863”计划新材料领域项目的实施,在国内组织起了一支新材料骨干研究队伍,形成了一批有特色的、在国内有影响的研究群体,形成了一批有实力的研究中心。国际合作与交流也取得了一些实质性的进展。一大批从事新材料研究的科技人员为

完成“863”计划任务不计条件,不怕困难,奋力拼搏,表现出了高尚的精神境界。很多年轻科技人员从“863”计划新材料的研究中得到锻炼,迅速成长起来,从他们身上可以看出我国新材料技术发展的未来和希望。

新材料技术的发展展望

新材料领域经过“七五”和“八五”阶段的工作,已经取得了很大的进展。“九五”期间将进入全面攻坚的决战时期和收获时期。“九五”期间新材料领域的总体目标和任务是:发展材料科学与技术,加强新材料的应用研究与工程开发,提高材料应用部门的创新能力,增加产品的竞争力,

促进新材料及其相关领域的产业化。为国防建设和国民经济支柱产业服务,提供关键的和配套的新材料,有重点地研究发展新材料的关键工艺技术和重点产品,择优支持其应用和推广,并注意抓好重大成果转化的示范和典型,争取新材料在“九五”期间达到50亿的产值。在“九五”期间,要在新材料若干领域继续保持我国的优势,培养造就一支跨世纪的人才队伍,为我国新材料在下一世纪的持续发展打好基础。

(作者单位:山东大学副校长、“863”计划新材料领域专家委员会首席科学家)

C M S 技术的研究、开发与应用

中国工程院院士 吴澄

近30余年,全球制造业市场竞争日益激烈,其竞争要素从50至60年代产品的功能(F)与成本(C),到70年代增加了产品质量(Q),到80年代末期又增加了产品及时交货的时间(T),至90年代在T、Q、C基础上又增加了服务(S)要素。为了适应这种激烈竞争的局面,人们充分运用信息时代发展着的高技术的成果,使制造业进入了巨大的变革时期,1973年美国约瑟夫·哈林顿(Joseph Harrington)博士在《Computer Integrated Manufacturing》一书中率先提出了CM(计算机集成制造)的概念。近20余年,尤其是近10年,CM的概

念与技术在实践中不断充实、完善与发展。至今,CM哲理及其技术研究已成为制造业发展中的热点,人们普遍认为,CM是信息时代企业组织、管理与生产运行的新哲理,在1995年美国国家关键技术中仍列为重点项目。

对于CM尚无确切性定义,基于863/CM S主题的实践,目前,我们对CM及CM S的含义概括如下:“CM是一种组织、管理与运行企业生产的哲理,它借助计算机硬件及软件,综合运用现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术、系统工程技术,将企业生产全过程(市场分析、经营管理、工程设计、加工制造、装

配、物料管理、售前售后服务、产品报废处理)中有关的人/组织、技术、经营管理三要素及其信息流、物流有机集成并优化运行,实现企业整体优化,以达到产品高质、低耗、上市快、服务好,从而使企业赢得市场竞争。CM S(Computer Integrated Manufacturing System)是基于CM哲理构成的系统。”这里,强调了改善产品T、Q、C、S以赢得竞争为目标;系统全过程中人为核心的三要素和二种流的集成优化;多种技术的综合运用——CM技术是应用性很强的系统技术。

多年来,CM的发展表现在各国纷纷列入国家重点计划并取

信心。

十年来我国生物技术有了巨大发展,这无疑是令人鼓舞的,但是我们不能不看到在前进的道路上还存在很多问题,阻碍我们前进:

首先,我国生物技术发展水平虽在技术上与发达国家差距不大,但是下游技术差距很大,因此今后要加强生物技术的开发研究,要拨出更多的资金加强生物技术成果的转化和产品开发。

第二,我国生物技术仅在有限项目方面达到国际先进水平,但在产品开发上创新有限;今后要加强创新,鼓励创新,以便形成我国自己的特色,参与国际竞争。为此,组建生物技术产品开发、研究基地和中心是十分迫切的。

第三,为了鼓励创新,在生物技术基础研究方面仍要加强力量,特别是对在产品开发上存在的难关进行攻关,以便取得自己的专利,推动生物技术的发展 and 产业化。

发挥新材料技术的先导作用

蒋民华 (中国科学院院士、863 计划新材料领域专家委员会首席科学家)

材料科学技术是近年来发展最快的领域之一,新材料的发展是相关高技术发展的先导和基础。材料的门类、品种和规格奇多,各有各的用途,这些特点充分说明发展新材料的重要性以及组织材料研究和开发计划的复杂性。

863 新材料领域在第一、二、三届专家委员会主持下,经过“七五”“八五”计划制定和实施以及战略目标和课题的调整,滚动运行已近十年,其主要进展可概括如下:

1. 开辟了一些重要的新材料研究领域,如光电子材料及金属有机化合物(MO 源),金刚石薄膜制备与应用,金属间化合物材料,材料改性及表面优化新技术等。

2. 巩固和发展了我国有优势的人工晶体,使我国无机非金属材料在国际上继续保持领先地位,激光晶体缩短了差距。

3. 抓住了一批集成度和显示度较高的重大成果转化项目,如镍氢电池,高性能低温烧结多层陶瓷电容器(MLC)等,推动了 863 成果的商品化和产业化。

4. 为相关领域和国防建设提供了关键新材料,如低密度抗烧蚀材料,红外隐身材料,新型固体推进剂等。

5. 提高了装备技术水平,如立足国内研制了有国际水平的全自动 YAG 单晶炉,直流等离子喷射金刚石薄膜生长装置,全方位离子注入装置等。

近十年来,新材料领域鉴定成果共 322 项,取得专利 193 项,获得国家、省部级奖励的共 155 项,发表论文共 7536 篇。

新材料领域 863 计划的实施有力地推动了我国新材料技术和相关高技术的发展,同时也在国内组织起了一支新材料骨干研究队伍,他们为完成 863 计划的任务奋力拼搏,充分体现了 863 精神。通过 863 计划的实施共培养了硕士研究生 528 人、博士生 221 人、博士后 35 人,吸收国外留学人员参加工作 42 人,其中 200 多人被提升为教授和研究员。从年轻科技人员的迅速成长,可以看出我国新材料领域发展的未来和希望。

面临世纪之交,展望未来,材料科学技术仍然是最重要的科学技术之一。现代高技术的发展密切依赖于新材料的发展,在今后一段时期内,新材料的研究、开发、生产、市场将愈加趋向

一体化,新材料的工艺技术将会更密切地与产品设计、性能、质量和成本结合起来。促进新材料成果实用化、产业化,同时重视材料的综合利用、回收及环境保护,已是重要的发展趋势。结构材料在向复合化方向发展,功能材料在向低维化、集成化方向发展,材料和器件一体化趋势十分突出,尤其是电子、光子功能材料对电子、光电子信息产业的基础和先导作用越来越明显,并将成为发展新材料的重点。此外,现代计算机技术与材料科学的结合是未来发展新材料的重要研究方法,它将从根本上改变新材料研究与开发的面貌。

新材料领域“七五”、“八五”863计划的实施为“九五”863和下世纪的超级863发展新材料计划,打下了坚实的基础。总结过去,面向未来,根据新材料领域的特点,今后应着重处理好以下几个关系:

1. 加强材料制备技术、工艺研究和重视材料科学的关系,这是发展新材料的两手,两手都要硬。
2. 处理好材料的多样性和突出重点的关系,即发展新材料中面和点的关系,面出点,点带面,点面要结合。
3. 正确处理材料研究与产品开发的关系,也就是创新与转化的关系,创新是基础,转化是目的。

一场新的工业革命——制造过程自动化

李耀通 (863计划智能机器人主题专家组组长)

1961年,美国的乔治·迪沃尔获得一项专利—U.S. 2988237,这个当时被发明人称作“可编程关节式操作器”的“家伙”就是工业机器人的最早的祖先。它在34年后的今天,繁殖了60多万人口。

真正的机器人并不象科幻电影里的那些机器人有血有肉。工业上最早应用的机器人不过是一种特殊的机器—它的形态象人的胳膊,可以在事先被“教会”作事情——如焊接、喷漆、切割金属、搬运等等,可以无限地加以重复。

现在,每月大约有2000人前去日本的法那克公司的自动化工厂参观,他们对机器人的一举一动看得目瞪口呆,机器人在厂房里到处走动,哧哧地焊接电路板,用眼睛检验质量,用腕子上的传感装置从事手工不能做到的精密安装,在夜幕降临之后,继续在黑暗中准确无误、不知疲倦地工作。

当然还有其他特殊用途的机器人,样子千姿百态,如:采矿、消防、清除污染、深海探矿、登月探索、下棋等,技术复杂性差别很大。但是工业机器人对一个国家的工业化的整体素质和对经济的长期影响,以及对本国产品在世界产出中的份额肯定有极为重要的作用。

发展工业机器人需要三个基本条件:(1)明确的使用需求;(2)训练有素的技术人才;(3)启动资本。日本在这些方面拥有许多优势,再加上政府长期致力于发展制造工业和多数大公司终身雇佣的劳资政策,使今天的日本拥有世界机器人总数的60%,使日本的汽车、微处理器、计算机和电气等产品在日益加剧的市场竞争中处于非常有利的地位。

国际著名战略研究专家保罗·肯尼迪在《为21世纪作准备》一书中详细地分析了当今机器人自动化生产和19世纪发生在英国的由蒸汽机带动的工业革命,认为现在可能是一场新的工业革命的开始,这场工业革命就是制造过程自动化。蒸汽机和机器人在许多方面都有类似之

面向新世纪的人工晶体

蒋民华

(山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘要:人工晶体是重要的电子、光子材料。本文结合信息技术的进步来考察电子材料、光电子材料和光子材料中人工晶体的发展。在新世纪(太元世纪)的全球信息科技的构架材料中人工晶体仍起着中心作用。

关键词:人工晶体; 电子材料; 光电子材料; 光子材料

中图分类号: O799

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2001)01-0001-09

Synthetic Crystals toward New Era

JIANG Min-hua

(State Key Lab. of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

(Received 1 January 2001)

Abstract: Synthetic crystals are the basic electronic and photonic materials. This paper reviews the development of synthetic crystals in the fields of electronic, opto-electronic and photonic materials with respect to the progress of IT. In new century(Tera-Era) the central role of single crystals is and will almost certainly continue to be in global IT.

Key words: synthetic crystal; electronic material; opto-electronic material; photonic material

1 引言

原国际晶体生长组织主席,著名的晶体生长和电子材料专家,美国工程院院士,贝尔实验室的 R. A. Laudise(1930~1998)博士,在他 1974 年第四届国际晶体生长会议的特邀报告“晶体生长的未来需要和机遇 - 展望 2000 年的晶体生长”中,曾对人工晶体作过这样的预言:“单晶肯定将继续在电子学的研究和技术中起着中心作用”。经过了科学技术飞速发展的四分之一世纪,今天我们的社会已全面进入了以计算机、通信和光网络等 IT 技术为代表的信息时代,光子继电子之后也成了信息的主要载体。电子、光电子、光子材料是信息功能材料的主体,也是新材料最活跃的领域。人工晶体在其中的作用和地位有没有变化?这是大家所关心的问题,本文将结合 IT 的进步和电子、光子材料的发展来考察面向新世纪的人工晶体。

2 电子材料和人工晶体

电子材料扎根于 20~40 年代的固体基础科学和早期的固体材料和器件研究,如天然压电水晶,硒整流器,聚合物电介质等。1948 年贝尔实验室发现了半导体效应,随后发明的半导体晶体管使电子工业发生了革命,带来了从晶体管到集成电路的飞速发展,从根本上改变了电子工业的面貌,给人类社会带来不可估量的影响。半导体材料成了电子材料的主体,其它 3 个

收稿日期: 2001-01-01

作者简介: 蒋民华(1935-),男,浙江省人,中国科学院院士。

主要分支则分别是光学材料、超导材料和磁性材料。这些材料大都是人工晶体。

微电子产业是国民经济最重要的支柱产业之一。材料在微电子(集成电路)技术发展过程中起着非常重要的作用。它主要包括芯片材料、基板材料、封装材料、光刻材料和多种电子化学材料等。其中最重要的是作为集成电路衬底材料的硅单晶。自 70 年代至今集成电路(IC)芯片的集成度(每个微电子芯片上集成的器件数)大体每 18 个月翻一番(Moore 定律),其特征尺寸大体每 3 年缩小 1.414 倍。一般认为,在一个硅晶圆片上集成 250 个以上的芯片时,从性能价格比角度看,在经济上才能合理,因此随着 IC 集成度的提高,管芯面积增大,要求晶片直径也越来越大(表 1)。

Table 1 The development of IC and Si single crystal

Year	Integration	DRAM(Mbit)	Pattern width (μm)	Diameter (mm)	(inch)
58	SSI $10^1 - 10^2$			25	1
65	MSI $10^2 - 10^3$		10	50	2
73	LSI $10^3 - 10^5$		7	100	4
78	VLSI $10^5 - 10^6$		2 - 3	127	5
87	ULSI $> 10^6$		0.8 - 1	178	7
95	$10^9 - 10^{10}$	64	0.35	200	8
98		256	0.25	300	12
2001		1000 (1G)	0.13	400	16
2007		16G	0.10	475	18

一般常以动态存储器(DRAM)芯片的存储容量来代表 IC 芯片的集成度,用微处理器(MPU)芯片的主频来衡量 IC 芯片能达到的速度。目前 0.25 μm 的 CMOS 技术已经开始进入大生产,生产 256 兆 DRAM 开始采用 300 毫米(12 英寸)的硅片。此外,随着特征尺寸的缩小,集成度的提高以及芯片面积的增大,对硅单晶的完整性提出了更高的要求,这是因为硅材料中缺陷的平均密度和 IC 成品率是一个倒指数的关系;对硅片局域平整度的要求也越来越高,如:0.35 μm 工艺中,要求 22mm \times 22mm 区域内不平整度小于 0.23 μm ;而 0.18 μm 工艺要求在 22mm \times 32mm 内的不平整度小于 0.12 μm 。

目前硅芯片技术,仍按著名的摩尔(Moore)定律继续向前发展。最近英特尔公司向所谓芯片极限挑战,开发出 30nm 的晶体管,使摩尔定律在未来 5 至 10 年内继续有效。有专家估计,最迟到 2020 年,硅芯片技术将达到其极限。一系列物理和技术的限制将会不可避免地出现。这意味着传统计算机快速更新换代的势头将终结。

硅材料工业是信息产业的基础,在可以预见的将来,硅材料仍将主宰计算机和消费类电子产业。目前全球硅单晶年产量已达万余吨,半导体工厂每年生产约 40km² 的硅芯片,可以覆盖从圣何塞(San Jose)到帕拉阿图(Palo Alto)之间的硅谷。硅芯片已深深渗透到我们经济和生活的各个方面,我们的确生活在以硅为基础的世界中。

如果说计算机的应用驱动了 IC 半导体 - 硅单晶的研发,那么移动电话的兴起带动了电子材料中另一类 RF 半导体的发展。RF 半导体主要是指用于制作高频电子器件(模拟数字转换器,振荡器,低噪声放大器,发射器,接收器等)的化合物半导体如 GaAs, InP 及其多元固溶体(AlGaAs, GaInP 等),此外还有 SiGe 等。移动电话用的 RF 半导体的市场走向如图 1 所示。目前 GaAs 约占 RF 功率器件全部市场的一半以上,而异质结双极晶体管(HBT)又差不多占了其中的一半。随着 RF 半导体的发展,其他材料特别是 SiGe 在市场中所占份额将会逐步增加。

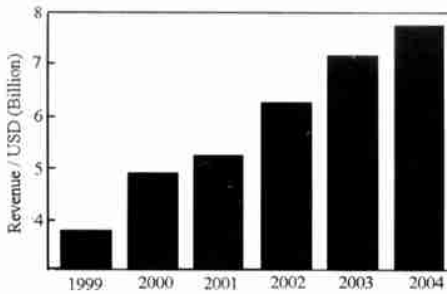
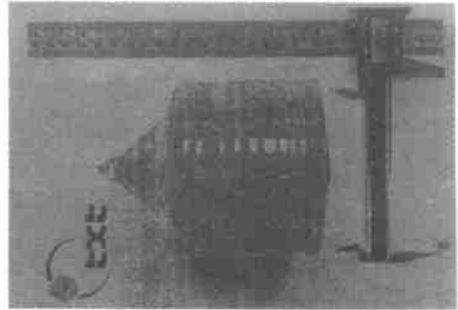


Fig. 1 RF semiconductors for mobile phones

Fig. 2 100mm(4 inch) 36 YLiTaO₃ single crystal (TXT CO.)

水晶是经不久衰的电子材料。自 1880 年发现其压电效应以来,它作为理想的压电材料,一直是电子工业的支柱。此外它还是重要的光学材料。人工水晶始于 1905 年,二战前后由于通信技术制作谐振器和滤波器的需要,人工合成水晶发展迅速。70 年代,随着石英电子表的问世,人工水晶又掀起第二次高潮。80 年代当按钮电话、无绳电话、传呼机兴起,人工水晶又出现第三次高潮。90 年代由于移动电话的迅猛发展,对声表面滤波器(SAW)的需求剧增,人工水晶再掀高潮。各种新电子产品的不断涌现,不但对人工水晶需求量持续增长,而且对其质量和尺寸的要求也在不断提高。目前世界人工水晶年产量已超过 3000 吨,生产水晶的高压釜已发展到 $\varnothing 800\text{mm} \times 11\text{m}$ 。

手机的飞速发展也给其他压电晶体带来了鸿运。如市场对高频(200MHz) RF - SAW 器件的需求,使得大尺寸(4 见图 2)钽酸锂单晶供不应求,同时也刺激了有望用于 SAW 器件的新压电晶体材料的研发,涌现了 Langsite 系列晶体,如 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, $\text{La}_3\text{Ga}_{5-x}\text{Al}_x\text{SiO}_{14}$ 等。

综上所述,单晶仍是今天电子材料的主角。

3 光电子材料与人工晶体

光与电的结合是促成全球信息构架的基本科技,靠电子与光子共同完成信息的获取、传输、储存、显示、处理的材材称之为光电子材料。它是随光电子技术的兴起而发展起来的,按其功能,一般可分为以下 7 类:

- (1) 发光(包括激光)材料
- (2) 光电显示材料
- (3) 光存储材料
- (4) 光电探测器材料
- (5) 光学功能材料
- (6) 光电转换材料
- (7) 光电集成材料

化合物半导体是最重要的光电子材料,LED(LD)是其最重要的应用。

硅是理想的电子材料,但其间接带隙性质使之不易跃迁发光。与半导体硅相比,以砷化镓为代表的化合物半导体具有直接带隙,其导带底和价带顶之间的光跃迁可以垂直进行。因此有发光的特性,此外还具有高速、耐高温、抗辐射和对磁敏感等特点,在红外、激光、微波等器件方面显示出很大的优越性。化合物半导体由于其能带结构上的特点,可以通过变动组分来调节带隙,即所谓“带隙工程”。例如利用 $-V$ 化合物及其固溶体的能隙/波长、晶格常数和组分的关系来选择合适的 LED(LD) 组成以产生需要的波长(图 3)。图中的点表示二元化合物,线代表三元固溶体,线间的面代表四元固溶体。GaAs、InP、InAs 及其固溶体常常被称为第 2 代半

目前只能在低功率的应用中使用,要取代白炽灯用于照明,还有很长和相当难的一段路要走。

在 90 年代有机发光(OLED)的发展速度差不多和氮化物 LED 一样快(图 4),但在高亮度和可靠性方面还远远不能和 LED 相比,目前主要用于室内和车内显示,它是 LCD 的竞争者。

半导体激光器(激光二极管 LD)是化合物半导体光电子材料的另一个重要应用领域。和 LED 一样,LD 的波长也是由化合物半导体的带隙决定的并可运用带隙工程,通过改变固溶体的组成和晶格常数进行设计和调整(图 3),目前 LD 的波长已覆盖了从紫外(300nm)到近红外(2000nm 以上)的广阔范围。表 2 是各种 LD 及其波长范围。

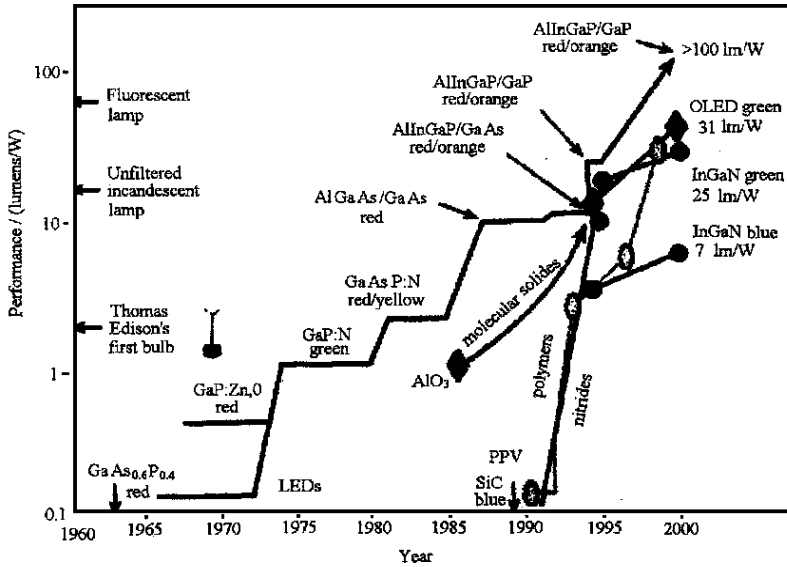


Fig. 4 The development of LED

Table 2 The wavelength of LDs

Compounds/ substrats	Wavelength (nm)
Nitrides (InGaN/ Al ₂ O ₃ , InGaN/ SiC)	300 - 600
- (ZnSe/ GaAs)	400 - 600
AlInGaP/ GaAs	610 - 690
AlGaAs/ GaAs, InGaAsP/ GaAs	780 - 880
InGaAs/ GaAs	880 - 1100
InGaAsP/ InP	1100 - 1600
InGaAs/ InP	1600 - 2100
- antimonides	2000 - 4700

LD 面世以来,除波长不断扩展外,结构也在不断发展,70 年代的 LD 是双异质结激光器;80 年代主流是量子阱激光器,90 年代的明星则是垂直腔面发射激光器(VCSELs)、量子点激光器和量子级联激光器。

LD 由于其效率高(60%)、体积小、可靠性好和价格低等优点,应用日益广泛。在光通信中,波长为 1.55μm 的 InGaAsP/ InP 激光器是光通信的光源;波长为 980nm 的 InGaAs/ GaAs 的激

激光器被用来泵浦掺铒光纤放大器,LD 使光盘存储技术实用化,3 代光盘存储技术的形成也是以 LD 波长的缩短(从 $0.8\mu\text{m}$ 到 $0.66\mu\text{m}$ 和 $0.5\mu\text{m}$)为标志的;用 LD 来泵浦激光晶体使固体激光器发生革命性的变化,诞生了紧凑、稳定、高效率、长寿命、可靠性好的全固化激光器,把固体激光器技术大大向前推进了一步。

由于通信产业的驱动,在过去 10 年里化合物半导体的需求量在稳定而大幅度地增长。预测在新世纪,这一增长势头还将继续。目前世界 GaAs 年产量已突破千吨大关,世界最大的 200mm (8 inch) GaAs 单晶 ($\phi 200 \times 300\text{mm}$) 已在日本控制成功。GaAs 兼有电子材料和光电子材料两者的优势,借通信之“东风”在稳步地追赶硅单晶,因此以 GaAs 为主的化合物半导体光电子材料也有“Optical Silicon”的美称。

用先进外延技术在单晶衬底上生长和制备各种具有器件结构的多层单晶薄膜是化合物半导体光电子材料的特点。显而易见,单晶依然是光电子材料的基础。

4 光子材料与人工晶体

在信息技术中,光子材料是指利用光子和光相互作用来实现信息的产生、传输、存储、显示、探测处理的材料。与电子相比,光子作为信息载体不仅响应速度快,而且信息容量大。电子通信载频最高只有 10^{11} Hz ,而光子的载频却是 10^{14} Hz ,提高了 3 个数量级,但光通信技术的实现最终还得依赖于发现、研制和生产可靠性和经济性都好的光子材料—光纤。

70 年代前,大部分玻璃能达到的光学损耗都超过 1000 dB/km ,1970 年康宁公司抽出了第一根损耗为 20 dB/km 的石英光纤。人们看到了光纤通信的曙光。此后仅用了 10 年的时间,光纤传输损耗在 $1.55\mu\text{m}$ 处,已降至 0.2 dB/km ,使光通信从梦想变成商业化的现实。特别是进入 90 年代以后,全世界掀起建设信息高速公路的高潮,作为信息基础设施的光纤网,迅速在全球扩展,世界通信光纤铺设速度达到 1000 m/s ,相当于 2 马赫飞行器的速度!

作为光通信的传输媒体材料,光纤的主要特性有损耗、色散和非线性。损耗问题到 80 年代末期已基本解决,光通信的两个窗口, $1.55\mu\text{m}$ 为最低损耗波长, $1.31\mu\text{m}$ 为最低色散波长(图 5)。

光纤通信容量是很大的,每根像头发丝一样光纤的容量至少是“空气”容量的千倍,从这个角度看问题,现在光纤通信容量潜力还远未利用,光纤还是很“暗”的。所以如何提高容量(带宽)成了光纤通信的关键问题,多路波分复用技术(WDM)也就应运而生。WDM 是在 1 根光纤上承载多个波长(信道)系统。将 1 根光纤转换为多条“虚拟”纤,每条虚纤独立工作在不同波长上。每个信道的运行速度高达 $2.5\text{ Gbps} \sim 10\text{ Gbps}$,使用频谱为 $1.55\mu\text{m}$ 窗口范围内的不同波长(图 5)。第 2 代 WDM 系统即密集波分复用技术(DWDM)可以承载 8~160 个波长,其带宽增长速度远远超过了将信号以电的方式进行复用的时分复用技术(TDM),甚至比摩尔定律的增长还要快,可以满足互联网对带宽增长的需求(图 6)。

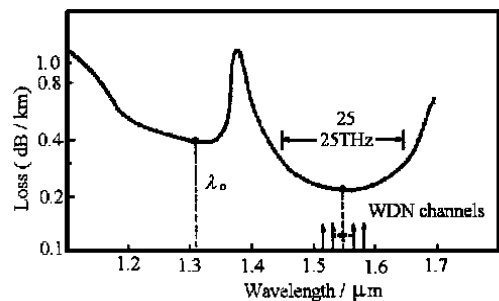


Fig. 5 The usable wavelength of optical fiber and WDM channels

光纤通信带宽的增长速度可用类似于摩尔定律的电信 (Telecosm) 定律描述:在今后 25 年内通信系统的总带宽每年将增加 3 倍。照此估算,集成电路集成度在 10 年内将增加 60 倍,而光纤通信容量在 10 年内将增加 100 倍。对带宽需求的不断增长,驱使计算机时代走向通信时代。

标准 DWDM 系统,包括许多光学部件,主要有:激光器、光复用器、掺铒光纤放大器、光调制器、光隔离器、光接收器、增益展平滤波器、色散补偿器、光耦合器(互联器),光开关等。而这些光学元件的制作都离不开光电子材料和光子材料。

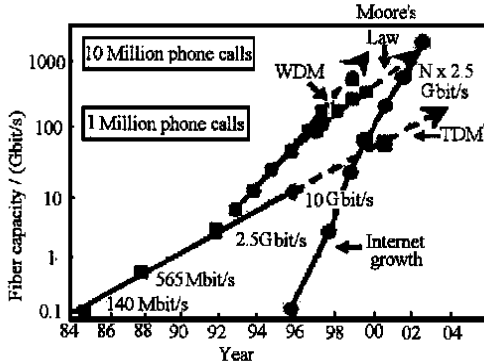


Fig. 6 Bandwidth explosion WDM technology is now allowing fiber capacity to grow faster than Moore's Law

基于 InGaAsP/InP 的分布反馈 (DFB) 激光器,在 1.55 μm 范围内工作,内含介质光栅,单色性极强(光谱半宽可窄至 0.001nm 以下),加上调节器还可成为 WDM 的多波长光源,它是大容量高速光纤通信系统的理想光源,并在实用化方面取得了长足的进步。由于 WDM 系统的大量部署,使得 DFB 激光器销售量以每年 40% 的速度增长。

掺铒光纤放大器 (EDFA),在 InGaAs/ GaAs (980nm) 或 InGaAsP/ InP (1480nm) 激光器泵浦下,提升信号强度,补偿传输损耗,解决了长距离传输的信号放大问题而毋须经过光电转换的瓶颈,大大增加了传输距离,并已经在长距离无中继光纤通信系统中使用(图 7)。DWDM 系统的广泛应用需要大量的隔离器,它给 YVO₄ 和磁光晶体带来勃勃商机。光复用器(光纤晶栅)

掺铒光纤放大器 (EDFA),在 InGaAs/ GaAs (980nm) 或 InGaAsP/ InP (1480nm) 激光器泵浦下,提升信号强度,补偿传输损耗,解决了长距离传输的信号放大问题而毋须经过光电转换的瓶颈,大大增加了传输距离,并已经在长距离无中继光纤通信系统中使用(图 7)。DWDM 系统的广泛应用需要大量的隔离器,它给 YVO₄ 和磁光晶体带来勃勃商机。光复用器(光纤晶栅)

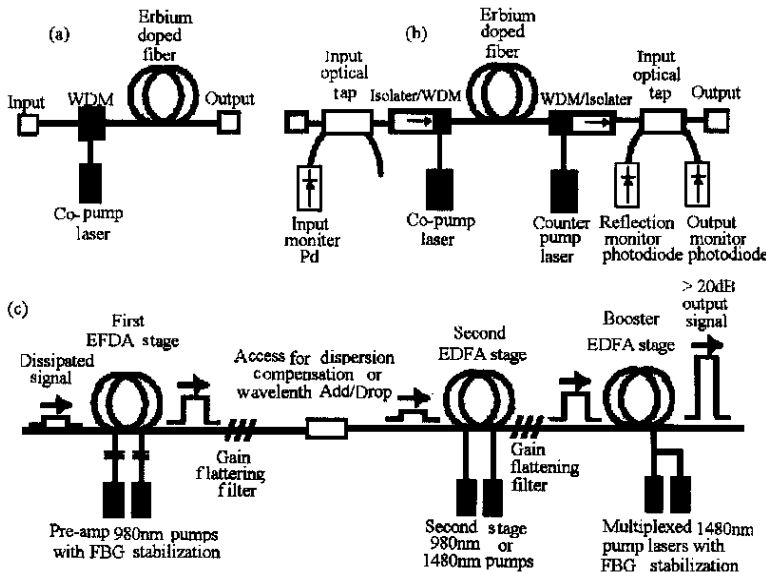


Fig. 7 EDFA evolution

(a) simple coarse WDM EDFA, 1994; (b) upgraded single stage amplifier suitable for 16 - channel WDM system, 1997; (c) state-of-art DWDM EDFA with increased functionality

将不同波长的发送信号混合在一条单独的光纤上,而分路器则将混合信号分解为接受器的分支波长;光接收器(一般是用化合物半导体光电子材料做的光二极管)负责检测进入的光波信号且将它转变为一种适当的电信号,以便接收设备处理。

非线性光学晶体是重要的光子材料,利用激光与晶体的非线性相互作用,扩展激光的有限光谱范围,是非线性光学晶体最重要和成熟的应用。在光纤通信系统中非线性光学材料中用得最多是作为光调制器和光波导用的 LiNbO_3 晶体。由于光网络逐渐向全光方向发展,光集成技术将日趋成熟,与硅单晶大量用于集成电路的芯片相似,未来的集成光路也需要大量的高质量的晶片作为光子器件衬底(光芯片)。新近成为研究热点的光子晶体是一类具有折射率调制结构的材料,利用其光子带隙(PBG)特性可以在微米尺度上来约束光的传播,从而实现光芯片的全光集成。从设计、计算、制备的全过程看,光子晶体称得上是完全的人工晶体,三维光子晶体的制备是其难点。

严格地说,作为传输介质的石英光纤才是真正的光子材料。DWDM 系统中绝大多数材料是光电子材料。目前技术相对成熟的 MEMS 光开关还是在硅片上制作的。在光纤通信的信息处理系统中,执行逻辑功能还主要依靠电子元器件,现在的光纤通信只是综合利用了光子的部分传输能力和电子的终端处理能力,光子相对于电子的优势并没有得到匹配。全光通信的技术还不成熟,对于应用来说,这里还有个成本问题。在 IT 中,电子和光子好像有天然分工:电子主宰计算机,光子主宰通信,两者互补多于竞争,光和电技术的结合今后还将继续下去。在电子材料、光电子材料和光子材料之间没有清晰的界面。作为信息功能材料,我们模糊地称为电子、光子材料还是合理的。随着微光子技术的发展,光子材料也会逐步成熟起来。人工晶体在目前光子材料中仍然起着重要作用。

5 面向新世纪的人工晶体

21 世纪人类将全面进入网络时代。‘光纤球’等‘通信外壳’的形成使世界成为‘比特大气’中的“地球村”。计算机、通信和消费类电子一体化(3C 融合)、移动化和智能化要求信息系统获取、存储和处理容量更大的信息并以更高的速度传输和处理这些信息。据预测,在未来的 10~15 年内,在信息的传输方面,长距离主干高速网络比特率将从现在的 Gbps(每秒传输以吉位计即 10^9 位数字信息)发展到 Tbps(每秒传输以太位计即 10^{12} 位数字信息),网络存取达 100 Gbps,城域网达 10 Gbps,桌面计算机达 1 Gbps;在信息处理方面,计算机处理速率将由 Gbps(每秒作吉次操作)发展到 Tbps(每秒作太次操作);在信息存储方面,存储容量由 Gbit 发展到 Tbit,这就是说,21 世纪将是“太元世纪”(“Tera - Era”),也就是电信时代。通信产业领域发生的变革是史无前例的。20 世纪的通信革命带来了电子邮件和因特网等计算机通信手段。下一代网络将是智能通信网络,它可强化和扩展人类的知识,提高我们的生活质量。传统媒体将进一步和网络融合。新网络的核心是光子,光网络的传输因子将直接是波长而不是分组,载有信息的光子将直接进入城域网、企业网、路由器、服务器甚至用户家庭。解决“最后 100 米”的各种接入技术将使宽带到家,“蓝牙技术”将在短距离内建立起个人网络。硅片仍是新一代网络的重要基础,网络的价值将持续向芯片转移。集成电路(IC)将向集成系统(IS)发展,即在 1 个微电子芯片上将信息的采集、传输、存储、处理等功能集成在一起,真正实现系统芯片。“单芯片系统技术”将得到发展,未来的手机和计算机都将架构在单芯片之上。

太元世纪要求信息的传输、处理能力有 3 个数量级的提高。这与摩尔定律以及电信定律

推算结果是大致相符的。电子光子材料也将按这个方向继续向前发展。硅微电子极限能否突破?如何突破?光网络技术如何发展和融合以进一步扩展和提高通信网络的性能,全光技术如何发展以进一步增大光通信容量和速度,人们将拭目以待。不过有一点是清楚的,电子、光子材料仍是新世纪 IT 的基础材料。综合本文所述,人工晶体仍在其中起着中心作用。(表 3)

Table 3 Synthetic crystals as basic electronic and photonic materials

Synthetic crystals
Si single crystal
Compound semiconductor GaAs, InP, GaN, SiC
SiO ₂ , LiNbO ₃ , LiTaO ₃
Laser and nonlinear optical crystals
Birefringent crystal YVO ₄ as optic isolator and magneto-optical crystals (BiRE) ₃ (FeGa) ₅ O ₁₂
Single crystal substrate, sapphire
Photonic crystal

在上一世纪,硅单晶曾对人类社会作出巨大的贡献,试看目前的集成电路技术实际上是把整个计算机系统都构架在硅晶圆片之上,考虑到计算机对国民经济和社会发展的巨大影响,从材料角度来看,把 20 世纪称之为“硅材料世纪”也是合适的。在今天的通信世纪,光子开始进入角色,作为光子材料,石英光纤已崭露头角,能否在本世纪找到真正的 Optical Silicon 这是大家所关注的问题。由于硅材料和硅微电子技术已经十分成熟,要在光子材料领域找到一种可能与硅媲美的材料还需要经过长期的艰苦努力和重大突破。

在太元时代,电子、光子材料将会再创辉煌。在新世纪,人工晶体的前景仍是一片灿烂。

参 考 文 献

1. Laudie R A. Future Need and Opportunities in Crystal Growth-Crystal Growth Toward the Year 2000. *J. Crystal Growth*, 1974, 24/25, 32-42
2. Glider Technology Report 1999 (2), 2000 (1)
3. Optical Science and Engineering for 21st Century National Research Council, 1998
4. Joannopoulos J D, Villeneuve Pierre R, Shanhui Fan. Photonic Crystals: Putting a New Twist on Light. *Nature*, 1997, 383: 143-149
5. *Compound Semiconductor* 1999, 5(9), 2000, 6(8)
6. MRS BULLETIN 2000, 25 (10)
7. Gahners IN - STAT - GROUP, DWDM Systems: The Bright Future of Net Working, June 2000.

蒋民华简历

蒋民华,晶体材料学家。1935年8月生于浙江临海。1956年毕业于山东大学化学系。历任山东大学副校长、晶体材料研究所所长、晶体材料国家重点实验室主任、国家高技术产业发展计划(863)新材料领域第三届专家委员会首席科学家等职。1991年当选为中国科学院院士。现为山东大学教授、材料学院院长,晶体材料研究所和晶体材料国家重点实验室学术委员会主任,中国科学院院士,中国材料研究学会副理事长,中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会理事长,《人工晶体学报》编委会主任委员,国际晶体生长组织(IOCG)理事和执委会委员,《Journal of Materials Research》主编,美国光学学会资深会员(Fellow)。

人工晶体发展动向的探讨

蒋民华

(山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘要:本文评述了人工晶体在体块大单晶生长、薄膜的外延生长、微结构和光子晶体、微米晶和纳米晶等方面的新近发展,并对未来的智能晶体进行了讨论。

关键词:人工晶体;外延薄膜;微/纳米晶;智能晶体

中图分类号:O799

文献标识码:A

文章编号:1000-985X(2002)03-0177-05

Trend of Synthetic Crystals

JIANG Min-hua

(State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

(Received 4 May 2002)

Abstract: This paper reviews the recent trend of synthetic crystals in following fields: growth of very large size crystals, thin film crystals by epitaxy, microstructures and photonic crystals and micro/nanocrystals. The forthcoming intelligent crystals were also discussed.

Key words: synthetic crystal; epitaxy film; photonic crystal; micro/nanocrystal; intelligent crystal

1 引言

我国晶体生长有悠久的历史^[1],但现代人工晶体的系统研发起步较晚。经近半个世纪的发展,由一个基本上是空白的领域上升到在国际上占有一席之地,来之不易,但还存在不少差距^[2]。在新世纪,飞速发展的科学技术,特别是生物技术、信息技术、纳米科技和环境科学,对社会经济发展和人民生活质量的提高起着越来越重要的作用。应用需要是材料发展的驱动力,在新形势下探讨人工晶体的发展动向,对我们把握研究方向和机遇是有益的。以下几个方面的孔见,仅供商榷。

2 单晶生长向更大更完整和更难驾驭的方向发展

美丽的天然晶体是大自然亿万年的杰作,人工单晶则是晶体生长科学和技艺的集中体现。在新世纪,体块单晶的生长仍是晶体生长的基础,但对尺寸和质量要求越来越高。硅单晶的发展是一个突出的例子。随着 IC 集成度的提高,管芯面积增大,要求单晶圆片直径越来越大,硅单晶尺寸已发展到 12 英寸并逐步向 18 英寸过渡,与此同时对硅单晶的完整性提出了更高的要求,这是因为硅材料中缺陷的平均密度和 IC 成品率是一个倒指数的关系。水晶和钽酸锂单晶也是如此,移动电话的发展给这两种老晶体带来了鸿运,由于大量生产表面波滤波器(SAW)需要 4 英寸以上均匀性良好的晶片,因而带动大尺寸水晶和钽酸锂体块单晶生长技术的发展。激光惯性压缩核聚变需要 300mm 的大口径晶体倍频器件,这也推动了有自己特色的四槽流动

收稿日期: 2002-05-04

作者简介: 蒋民华(1935-),男,浙江省人,晶体材料学家,中国科学院院士。

法生长 KDP 大晶体技术的诞生(图 1)。

铌酸锂(LiNbO₃)是应用十分广泛的多用途功能晶体,有关文献就有万余篇之多。光通信用波导需要高光学质量的化学计量比(Li₂O : Nb₂O₅ = 1 : 1)的单晶体,通常生长 LiNbO₃ 单晶都是在其同成份点(Li₂O 48.6, Nb₂O₅ 51.4)进行控制,但由于成份偏离计量比造成固有内部缺陷(如 Nb 的反位缺陷和 Li 的阳离子空位),对许多性能产生不利影响;在化学计量比组分拉晶则由于固液相成份的差别而不易生长均匀性良好的晶体。因此需要采取特殊的生长技术如自动加料双层坩埚提拉法来生长高光学质量的近化学计量比的铌酸锂大单晶。

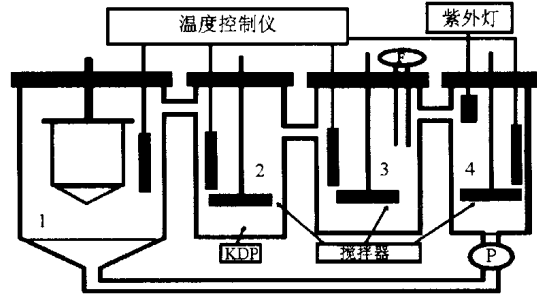


图 1 四槽循环流动生长 KDP 大晶体的装置
1 生长槽 2 溶解槽 3 过热槽 4 平衡槽

SiC 单晶是宽禁带高温半导体材料,也是第三代半导体的关键材料。因受 Si 和 C 体系相平衡的限制, SiC 单晶主要采用物理气相传输法生长,多晶 SiC 需在 2200 ~ 2400 °C 下升华结晶到 SiC 籽晶上,由于温度高,温度梯度难以精确控制,加上 SiC 的多型性,给生长大面积均匀单晶带来很大的困难,掺杂和微管缺陷的控制是生长 SiC 单晶的技术关键和方向。目前只有极少数国家能生产 2 ~ 3 英寸的单晶,并且视同战略物资严格管制。

科技的发展对单晶的尺寸、完整性提出了越来越高的要求。晶体生长有“尺寸效应”,大尺寸和高质量往往相互制约,一般来说,大晶体的缺陷要比小晶体多,因此生长高质量的大单晶是晶体生长的高技术。

3 薄膜晶体的制备向材料和器件一体化方向发展

体块单晶生长周期长,加工困难。许多晶体如金刚石, III-V 化合物, 氮化物等均难以获得均匀完整的大单晶,因此促进了薄膜晶体的发展。各种功能薄膜如雨后春笋般地涌现,如磁性薄膜、超导薄膜、铁电薄膜、液晶、薄膜晶体管(TFT)和金刚石薄膜等,薄膜晶体是人工晶体重要发展方向。在同质或异质衬底单晶上外延则是生长薄膜晶体的主要手段,许多重要晶体因无法获得体块单晶,往往需要在异质单晶衬底上生长薄膜晶体,因此两者晶格匹配情况对外延层的质量影响很大。以 GaN 外延层为例,可用的各种衬底单晶的晶格匹配情况大致可以分三类(表 1)。

表 1 可生长 GaN 外延层的衬底单晶

类 型	实 例
晶格严重失配:	Al ₂ O ₃ (0001), MgAl ₂ O ₄ (111), Si(111)
晶格失配小:	6H-SiC, ZnO, LiGaO ₂ (LCO), ScAlMgO ₄ , YB ₂
晶格匹配好:	AlN, GaN

常用的蓝宝石衬底,晶格失配达 17%,造成外延层的位错密度高达 10⁸/cm²。如改用 SiC 则失配大为减少,外延层质量明显提高。

Al₂O₃ 晶体理化性能好,硅片物美价廉,是经常选用的衬底材料。硅基薄膜最为普遍。最近金刚石纳米单晶膜可以在 Si 片台阶上成核生长得到实验证明^[3],为今后在 Si 衬底上获得外延金刚石单晶膜指出了方向。

在衬底单晶上外延生长各种器件结构的外延层,

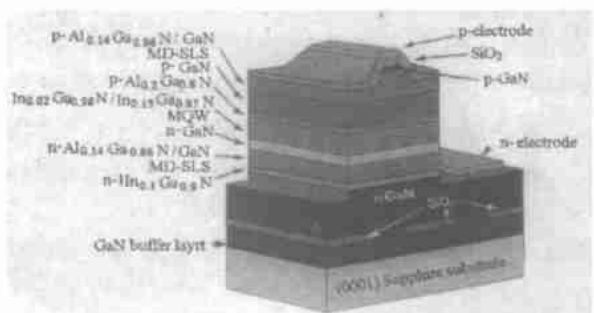


图 2 日亚公司的 1 万小时蓝色 LD

使材料器件一体化,是用先进外延技术(MBE、MOCVD等)生长薄膜晶体的一大优点。如日亚公司中村秀二在93年取得重大突破的蓝光激光器(图2)生长的结构就相当复杂,其有源层 $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 是多量子阱(MQW)结构,周期为纳米量级,小于电子的平均自由行程,因而产生量子效应(电子垂直薄层的运动受限,具有准二维效应)。这种MQW结构也可称之为二维纳米材料。

用先进的外延技术,在单晶衬底上生长和制备各种具有器件结构的多层单晶薄膜是化合物半导体光电材料的特点,可见单晶依然是该类材料的基础,但外延层和单晶衬底的最佳配合是一个关键。

4 人工周期微结构与光子晶体

半导体超晶格的周期为纳米量级,可与de Broglie波波长相比拟,因此产生一系列新的效应(量子效应),半导体超晶格也可称之为纳米超晶格。与此相似,在介电材料中,重要的物理过程是经典波,如光波和超声波的传播与激发过程;在具有调制结构介电晶体中,与微米量级的调制周期相应的倒矢量将参与经典波过程,并产生重要的光学效应和声学效应,因而将这一类人工微结构材料称为微米超晶格或介电超晶格^[4]。

微米超晶格可在压电、铁电晶体生长过程中利用生长条纹制备(即聚片多畴晶体),也可利用电极化技术制备(周期或准周期极化)。此外,还可利用光折变晶体的光折变效应制备。微米超晶格可使非线性光学晶体实现准位相匹配(QPM)。这就意味着可利用晶体中无法实现位相匹配的最大的非线性光学系数,如铌酸锂晶体中的 d_{33} ,通过QPM使倍频效应大大增强,同样也可以产生具有高转换效率的耦合的其他光参量过程。这类微米超晶格也可称为光学超晶格。无论是半导体的纳米超晶格,还是介电晶体的微米超晶格都是在晶体的晶格上形成的人工周期或准周期微结构。

半导体中存在能带和带隙,载流子运动可控。在信息时代,光子和电子是信息的主要载体,那么能否出现一种像能控制电子的半导体一样,可以控制光子的介质晶体呢?

光在介电材料中传输,在高低介电材料的交界处反射,光纤就是利用这种全反射原理传输光的。在这种模式下,界面相对于光波来说必须是光滑的,这就限制了这类光学元件不能做得太小,而且光路的弯角不能太大。

1987年Yablonovitch首先提出了光子晶体的概念^[5],引入了另一种完全不同的控光机制。光子晶体是一种介电常数周期性变化排布的材料,也就是具有折射率调制结构的材料。在半导体中,当电子在晶体中扩散时,原子点阵形成一种周期性的势场。点阵的空间排布和势场导致了类布拉格散射,于是就会出现一个能量的禁带(带隙),在这个禁带中电子在任何方向都不能传播。在光子晶体中,介电常数不同的材料代替了原子,也会形成一种周期性的“势场”,如介电常数的差异足够大的话,在电介质的界面上也会产生布拉格散射(此时结构周期与光子波长相当),同样会有能量的禁带出现,称为光子带隙(PBG)。在完整的三维光子晶体中,光不能向任一方向传播,如果出现点缺陷(微腔),光就可以从缺陷处射出;如果出现线缺陷,光就会沿着线缺陷行进,这样就可以做到控制光波方向(微波导),光波也可以拐很尖锐的弯,由于有光子禁带,拐弯时几乎没有能量损失。利用光子晶体这一特性,就可以在更小的尺度(微米,亚微米)上来控制光的传播,无损失地传递信号,所以光子晶体也可称为光的半导体。

由于材料制备滞后,光子晶体的实验落后于光子晶体的理论研究,目前光子晶体的制备是发展光子晶体的关键。光子晶体实际上也是一类亚微米量级的人工周期微结构,它由两种介电常数反差大的材料交替排列,并具有一定的对称性。美丽的欧泊宝石可近似

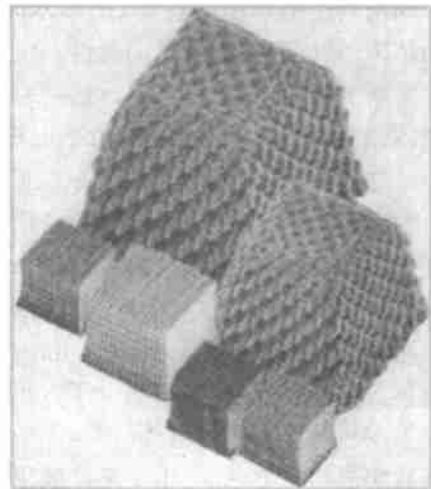


图3 双光子聚合产生的3-D微结构

地看成天然的光子晶体,而实用的光子晶体则是名符其实的人工晶体,多数光子晶体均用无机材料制作,最近科学家用高分子材料通过双光子聚合也制出了光子晶体(图3)^[6]。

光子晶体的制备既可采用微电子技术的自上而下的光刻法,也可采用由下而上的自组装法。由于制备技术的发展,1-D,2-D,3-D的光子晶体及器件已在一些领域取得成功,如光子晶体二极管、光开关、光子晶体谐振腔和光子晶体光纤等。预计光子晶体将逐步应用于大多数传统的光子器件的领域,并使其尺寸大为缩小。显然,光子晶体的出现和逐步走向成熟,将引起光电子学和光子学领域的一场革命。

5 微米晶和纳米晶

人工晶体的另一个重要动向是向小尺寸方向发展。微米晶和纳米晶过去常称为超微细粉体,都是多晶,也是人工晶体的普遍存在的形式,由于小尺寸效应(对纳米晶来说还有许多新的性质和效应)而具有许多独特的性能。纳米科技的兴起进一步引起人们对微米晶和纳米晶的关注,成为一个新热点。微/纳米晶作为分散相可与其它材料组成各种复合材料,它们也可形成聚合物(聚晶),也可以进行多种组装,其防特性能和应用倍受关注。

对微米晶来说,除尺寸小之外,其物理性质和体块单晶并无二致。近年来,一种环境和健康的新材料-电气石(Toumaline)受到了青睐。电气石, $\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Li}, \text{Al})_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{BO}_3)_3(\text{OH}, \text{F})_4$,成份复杂,品种繁多,宝石级的单晶称为碧玺,它是一种热释电晶体,将电气石粉碎成微米级(可达 $0.1\mu\text{m}$)的微晶,具有多种保健和环保功能,如发射远红外线、释放负离子、持续产生直流静电、在水中释出多种微量元素等,应用十分广泛,已开发出众多的系列产品^[7]。这一切都离不开电气石微晶的小尺寸优势和热释电功能的巧妙结合。

最近透明YAG微晶陶瓷研究取得了长足的进展,由纳米 Al_2O_3 和 Y_2O_3 ,采用真空烧结技术制成的激光陶瓷,晶粒平均尺寸为 $10\mu\text{m}$,完整性很好,晶粒间界只有 1nm ,大大降低了光散射引起的损耗,Nd YAG激光陶瓷的光谱特性和Nd YAG激光晶体几乎完全相同。由于Nd YAG微晶陶瓷制作工艺相对简单,而且易于获得大尺寸高掺铽量的激光工作物质。它将对占据激光晶体首席达40年之久的Nd YAG激光晶体提出强有力的挑战^[8]。

对于超微细的多晶粉体来说,微米晶和纳米晶是很难区分的。通常纳米尺寸定在 $1\sim 100\text{nm}$ 之间,纳米材料被定义为颗粒至少在一维尺度上小于 100nm ,而且各种性能迥异于体块单晶的材料,如磁性纳米晶的超顺磁性,金属纳米晶的光学行为,半导体纳米晶的量子效应等。对纳米晶的研究也集中在了解这些新性质的起因和如何利用纳米晶的特性,把纳米晶组装成更加复杂的结构,做成有应用前景的器件。

过渡金属Fe,Co,Ni及其合金,每一颗纳米晶粒都是单畴磁体,利用其超顺磁性可作为靶向输送药物微球的核心。这些纳米晶还可自组装成二维、三维的有序阵列(超晶格,见图4)^[9],显示了集合的纳米颗粒之间的相互作用,它有助于探索新的磁记录介质。

用MBE技术在衬底上生长半导体纳米岛并做成量子点激光器已获得成功。最近由 10nm CdSe纳米晶密排成的多层膜形成纳米晶量子点(NQDs)也成功地实现了激射,这表明半导体纳米晶量子点也可独立地产生激光,NQDs还可与光纤技术相容。NQDs的成功还为自下而上的组装各种光学器件(包括光学放大器和激光器)打下了基础。

纳米晶的晶格是完整的,由于尺寸的限制,它的重复周期又是有限的,所以它的许多性质不同于晶格周期近于无限的体块晶体,有关纳米晶的形成和生长特点以及纳米晶各种物理特性的成因,还有待进一步深入研究。

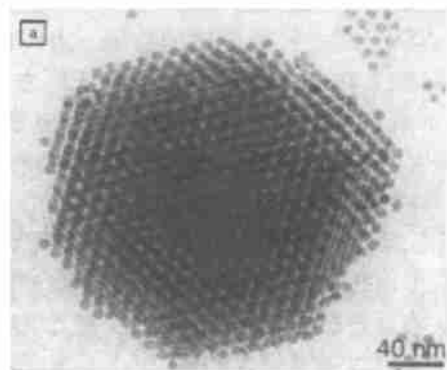


图4 由8nm Co纳米晶自组装成六方超晶格的TEM图像

6 展望智能晶体

许多到晶体生长实验室参观的客人对晶体自己能不断地成长感到很惊奇。的确,培养晶体和种庄稼表面上有些相似:要选种、下种,生长期要严格管理:除杂晶(除草)避缺陷(病虫害)、防事故(天灾)、收获、后加工等。晶体生长和生物成长最大的不同是后者是有生命的,而前者是无生命的,但在两者之间是否存在不可逾越的鸿沟呢?

晶体生长是生长基元(原子、分子、离子基团等)在化学势驱动下,由其他聚集态向晶相转变的过程,它包括运输过程和界面过程,界面过程是生长基元在晶体表面进入晶格位置的过程,实质上也可看成在生长界面通过分子识别^[10]靠共价键或分子键(离子键)进行自组装的过程。而这一过程在物理学、化学、材料科学和生物学中具有普遍性。晶体界面上的分子识别具有类似于生物学中酶与底物、抗体和抗原的专一性,它来源于生长基元和晶体生长界面“活性中心”的互补性,这也是为什么自然界许多晶莹剔透的天然矿物晶体在成份复杂的地壳中,经过长时间的生长仍能“出污泥而不染”的原因。在人工晶体的生长中也常利用分子识别进行改性,如降低对称性,控制成核,利用溶剂的影响等。有利于实施“晶体工程”。所以分子识别是多学科交叉的,通过分子识别的研究,有利于非生物界(无生命)和生物界的沟通,也有利于推动新材料领域的生物活性材料和智能材料的发展。

智能材料一般是指对环境可感知并作出响应的材料,这种材料具有传感和执行功能,智能材料要求材料具有生物所赋予的高级功能,如预知与预告能力,自修复能力,认识与鉴别能力,刺激响应与环境应变能力等,所以智能材料是最高级的功能材料。

各种功能晶体是功能材料的重要组成部分,功能晶体经历了从天然晶体到人工晶体,从体块晶体到薄膜,从自组装到人工微结构,从大晶体到纳米晶以及从单一材料的生长到具有器件结构多种材料一体化制备的发展历程。人工晶体的领域已被大大拓宽,晶体的概念早已不再停留在有棱有角规则的多面体上,但晶体最本质的东西—周期性构造仍保持着。现在人工晶体的功能已大大扩展,与器件和其他材料的结合也越来越紧密,并逐步向智能化方向发展,试看在当今的信息时代,硅芯片已成为电脑的核心;把生物工程技术和微电子技术结合起来的生物芯片(图5),可以快速进行基因识别并诊断出异常基因。智能晶体正在逐步向我们走来。纳米科技的发展将会加速这一进程。纳米技术是一种从原子着手由小到大(由下而上)合成和组建纳米材料并利用纳米材料来实现特有功能和智能作用的高技术,它的实现将使人类进入智能化的类生物体系生产的时代^[11],就像一个土豆知道如何从周围泥土、水和空气中把原子加以安排来创造自身一样。因此在21世纪运用纳米技术自下而上的组装智能晶体,甚至是有生命的晶体应该也不是“天方夜谭”。

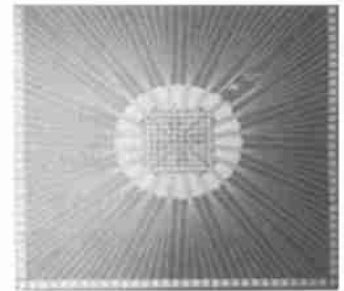


图5 生物(DNA)芯片

参 考 文 献

- 1 JIANG M H. *Optic & Photonics News*, 1990, 1(10): 5 - 10
- 2 蒋民华. 硅酸盐学报, 1993, 21(6): 548 - 553
- 3 Lee S T, et al. *Science*, 2000, 284: 104 - 106
- 4 阎乃本. 物理学进展, 1993, 13: 26 - 37
- 5 Yablonovitch E. *Phys Rev. Lett.*, 1987, 58: 2059
- 6 Cumpston B H, et al. *Nature*, 1999, 398: 51
- 7 姚鼎山. 环保与健康的新材料-托玛琳. 中国纺织大学出版社, 2001
- 8 Lu J, et al. *Japn. J. Appl. Phys.*, 2000, 39: L1048 - 1050
- 9 Murry C B, et al. *MRS BULLETIN*, 2001, 26(12)
- 10 Weissbuch I, et al. *Science*, 1991, 9 AUGUST: 637 - 645
- 11 王中林. 中国科学基金, 2001, 5: 272 - 275

年会特邀报告摘录

大尺寸优质 SiC 晶体生长 及其应用进展

山东大学晶体材料国家重点实验室 蒋民华

综述了近几年国内外大尺寸SiC单晶及器件应用的研究进展。介绍了SiC半导体材料的物理特性和其能制备的半导体特种功能器件,着重介绍了大尺寸SiC单晶的研究进展。虽然SiC单晶有多达200种的多型,但是目前常用(易于制备)的多型仍然只有少数,其中最常见的是6H-SiC, 4H-SiC和3C-SiC。由于它们的物理特性不同而导致其有不同的用途。6H-SiC单晶是最普遍应用的多型之一,主要作为GaN材料的衬底,被广泛用于蓝绿光超高亮度发光二极管的制备;4H-SiC和3C-SiC的迁移率较高,其单晶生长的窗口很小,材料生长难度较大,特别是3C-SiC单晶的生长,材料生长工艺复杂,至今得不到优质大直径单晶材料。但其独特的电学性质为微电子应用提供了条件。SiC材料

以硬度高而首先获得推广应用,在50年代初其半导体特性受到重视,单晶的制备提到研究日程上来,但是由于材料自身的特性,大尺寸晶体生长一直没有解决。上世纪末,国外首先获得2英寸直径的单晶,为基于SiC特性的半导体器件研制提供了基础。国内SiC单晶的研究起步于90年代,由于受设备和原材料等因素的影响,进展较慢。山东大学在分析了国内外研究进展的基础上,采取高起点的策略,引进国外先进生长设备,结合自身多年在晶体生长方面的长期经验积累,掌握了关键的技艺,首次在国内成功地生长出直径为2英寸的SiC单晶,可用面积大于1.5英寸,为我国SiC半导体器件和高效蓝光衬底的研发打下了基础。

蒋民华:中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会理事长,中国科学院院士。

年会特邀报告摘录

功能陶瓷材料及应用研究新进展

清华大学材料系新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室 李龙士

功能陶瓷及其元器件在电子信息、通信技术、集成电路、计算机、自动控制、航空航天、海洋超声、汽车和精密仪器等现代高新技术领域应用日益广泛。随着以数字化、网络化、集成化为主要特征的电子信息技术的迅速发展,作为新型电子元器件的关键基础材料,功能陶瓷面临严峻的挑战和空前的发展机遇。它是新世纪最具发展活力的新型无机非金属材料之一。高性能、低成本、片式化和微型化是功能陶瓷及其元

器件的发展趋势。本文主要介绍功能陶瓷的主流材料铁电陶瓷及其应用研究的某些新进展,包括钛酸钡基高介电常数温度稳定型多层陶瓷电容(MLCC)及薄层大容量贱金属内电极MLCC的材料组成、制备科学、显微结构及介电特性;超高介电常数低容温变化率的金属复合钛酸钡基铁电陶瓷材料;多相多层复合功能陶瓷共烧行为,异质界面互扩散,致密化速率调控机制及共烧匹配技术以及铁电陶瓷片式元件三层镀技术与失