

# 半导体发光及其应用专题

## 编者的话

在 1983 年第 9 期《物理》上,原中国物理学会副理事长兼中国物理学会出版工作委员会主任周光召发表了《祝物理学和经济建设栏的开辟》一文(该栏于 2000 年更名为“物理学和高新技术”)。他在该文中精辟地指出:“我国的科学和工业要按照中国自己的国情走自己的发展道路,我们的工业一定要逐步用最新的科学研究成果武装起来,后来居上,跻身于日新月异的国际市场中去。我们需要为长期目标服务的,以基础研究为主的物理学家,更迫切需要从事应用和发展工作,能够直接推动我国工业起飞的物理学家。”“物理学和经济建设栏”将向广大的物理学工作者,向工业界的各级领导同志和工程技术人员介绍物理学研究中的最新成就以及它在国民经济和国防各部门中的应用前景,介绍世界各国在这些研究工作中的进展情况……”周光召院士的这段话为我刊“物理学和高新技术”栏目做了恰当的定位。

2002 年 9 月《物理》编辑部同志参加了第八届全国发光二极管(LED)产业研讨与学术会议,深感本次会议内容丰富,报告精彩,出席会议人数众多,盛况空前。从本次会议还可以明显感知世界发光技术发展的脉搏。古老的物理命题——发光已焕发新的活力。当年半导体能带理论、激子发光、等电子陷阱等物理机理的洞悉,推动着半导体发光的技术发展。如今,发光波长从红、橙、黄向绿、蓝、紫全色延伸,发光材料从 GaAlAs、GaAsP 向 Al-GaInP、GaN 和聚合物等新材料系开拓,器件结构从同质结到异质结,再到量子阱以至光子晶体高效发光,材料生长技术也从气相外延、液相外延向先进的 MOCVD 生长技术发展,可以说从技术层面看,发光技术已进入崭新的发展时期。除全色显示屏、交通信号灯和汽车灯等应用外,潜力无穷的是固态白光照明技术。日本业界估计,占全国能源消耗 20% 的照明用电,一旦为固态光源所代替,则可以在 20 年内不再新建发电厂、站,推而广之,在中国,在全世界发展固态白光照明,则是对 1997 年联合国关于防止地球变暖的京都会议的最好回应。据悉,此事已得到中国工程院的重视,由陈良惠院士负责开展咨询研究。可以看出,发光二极管技术从物理实验室走向应用、走向市场、形成产业意义是重大的。更可喜的是中国发光二极管产业经过几十年的拼搏,已初具规模,据权威部门统计,目前不仅从业厂商达 300 余家,从业人员达 2 万余人,产量超过百亿支,产值近百亿元,而且产业层次也从进口器件转卖,到进口管芯封装,再到进口外延片制管、封装,眼下国产外延片的生产正方兴未艾,呈现很好势头。可以说,发光二极管产业是源于半导体物理、内容丰富、应用前景广阔的产业,是值得企业家和应用物理学家联手合作为之奋斗的产业。

《物理》编辑部在此次会议学术委员会帮助下,成功地组织了一批反映发光二极管研究、应用、开发和产业化的最新进展和动向的稿件。本期先安排 5 篇文章以“半导体发光及其应用专题”的形式发表,还有一些文章将在本栏以后几期陆续发表。组织“半导体发光及其应用专题”的目的是向广大物理工作者,介绍发光二极管前沿热点领域的研究、应用与发展的历史、现状和最新研究成果,以促进我国发光二极管技术的创新与产业的发展。

# 发光二极管材料与器件的历史、现状和展望\*

方志烈<sup>†</sup>

(复旦大学分析测试中心 上海 200433)

**摘要** 文章介绍了发光二极管材料和器件的研究、开发的历史,概述了发光二极管技术的发展现状和进展.通过与其他类型光源的比较,向读者展示了发光二极管未来的重要地位和光明前景.发光二极管的最近的成就是实现了有色光方面的成功应用.高功率白色发光二极管已开始应用于便携式和特殊照明.而在通用的照明领域要成功地应用发光二极管,则需要通过性能和价格方面的继续突破来实现.

**关键词** 发光二极管,发光二极管技术,固体光源,半导体照明,发光二极管显示

## Future applications of light emitting diodes

FANG Zhi-Lie<sup>†</sup>

(Centre of Analysis and Measurement, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** An overview of light emitting diode( LED ) technology is given, including a preview of the future potential of LEDs in comparison with other types of light sources. Recent achievements have resulted in substantial LED utilization in colored light applications. High power white light LEDs are beginning to be utilized in portable and specialty applications. General illumination using LEDs can be expected in the future assuming continuing breakthroughs in performance and cost.

**Key words** light emitting diode, LED technology, solid state light source, semiconductor lighting, LED display

1999年,国际上照明行业和半导体光电子行业发生了极为激动人心的事件,三大照明公司几乎在差不多时间内都与相应的半导体行业中的佼佼者成立合资的发光二极管(light emitting diode, LED)照明公司,GE公司与Emcore公司成立Gelcore公司,Philips照明公司与HP公司成立Lumileds Lighting公司,Osram公司与西门子光电子部门成立Osram光电子公司,并投入大量人力和财力进行研发工作,目标是使LED成为21世纪的新光源。

HP公司的Haitz R等人从节约能源的角度更明确地提出,半导体已在电子学领域完成了第一次革命,而另一次革命就在照明领域.能源是国民经济的命脉,在美国有20%的电能(或者说能源总量的7.2%)用于照明,假如将发光二极管的发光效率提高到200 lm/W(流明/瓦),那么就超过目前所有的电光源效率,如果到2025年有50%的通用光源被

取代,那就意味着全球每年能节约电费1000亿美元,并减少3亿5千万吨二氧化碳等污染物的排放.美国能源部和日本政府都拨巨资支持有关企业加速LED照明光源的研发工作。

## 1 发光二极管材料和器件的发展历史

可见光发光二极管进入商品化阶段最早要追溯到1962年,当时在美国通用电气公司工作的Holonyak博士用化合物半导体材料磷砷化镓研制出第一批发光二极管<sup>[1]</sup>.它们不怎么亮( $<0.1\text{lm/W}$ ,大约比白炽灯效率低150倍),而且很贵,通用电气公司当时未予重视,这第一批发光二极管非常重要,后来Monsanto和HP公司就在此基础上改进性能并降低

\* 2002-11-05收到初稿,2002-12-18修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zlfang220@yahoo.com.cn

成本,于1968年生产这种  $GaAs_{0.60}P_{0.40}/GaAs$  的红色发光二极管,在大约十年时间内,它成为市场上的主导产品. Holonyak 后来在 Illinois 大学当教授,继续从事半导体光电子材料和器件的研究. 1995 年他来到日本接受声望很高的日本奖,以表彰他早期在半导体发光二极管方面和其后在半导体激光器方面首创性工作的成就. 1997 年美国光学学会设立 Holonyak 奖,表彰他在这方面的功绩,并以此每年奖励一名半导体发光领域的优秀科学家. 1998 年首次获得 Holonyak 奖的正是先是在 Monsanto 公司,后来又在 HP 公司进行研究和开发 LED 新材料及新器件取得多项重要成果的 Craford G 博士.

自从 GaAsP LED 开始,连续不断的科研成果使 LED 的发光效率 ( $lm/W$ ) 提高的速度达到每 10 年提高 10 倍,30 年竟提高了 1000 多倍,导致今日的 LED 比之通用光源白炽灯甚至卤素灯具有更高的效率,LED 性能进展情况示于图 1.

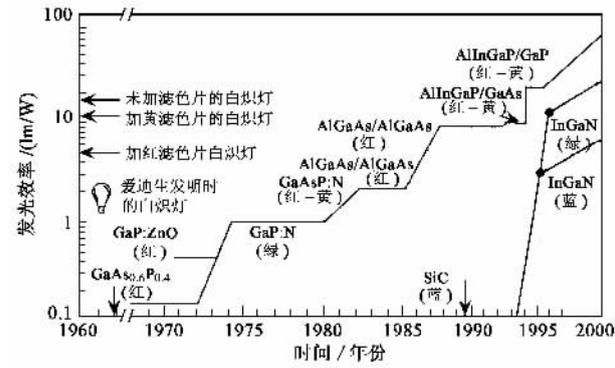


图1 商品LED性能随时间进展情况

继 GaAsP 红色发光器件之后,新研究和开发的液相外延生长(LPE) GaP: ZnO 红色 LED 和 GaP: N 绿色 LED 在 20 世纪 70 年代中期进入市场<sup>[2,3]</sup>,其后 Craford 等人研制的氢化物气相外延以磷化镓为衬底(即透明衬底技术)的  $GaAs_{0.35}P_{0.65}:N/GaP$  橙红色 LED 和  $GaAs_{0.15}P_{0.85}:N/GaP$  黄色 LED 面世,不久也成为商品<sup>[4]</sup>. 在 1985 年之前,LED 性能通常小于  $2 lm/W$ ,包括单异质结 AlGaAs/GaAs LED,其应用仅限于指示灯. 这种应用仅要求 LED 亮或不亮,显示一种状态而已.

AlGaAs 材料相对讲也是较早的 LED 原料,先用液相外延(LPE),后来也用金属有机物化学气相淀积(MOCVD)方法生产. 早在 1980 年前,首先由日本仙台大学的西泽润一教授研制成功<sup>[5]</sup>,后来在 Stanley 公司发展并进行生产,采用透明衬底技术,即 GaAlAs/GaAlAs 双异质结结构,使发光效率接近

10%. 这已在 20 世纪 80 年代后期到 90 年代初大量应用,但由于退化问题较为突出,在室外显示大屏幕和汽车高位刹车灯的应用上暴露出这一缺点. 发展新材料成为当时的迫切任务.

用于制造高性能 LED 的材料、器件和相应的技术示于表 1. AlGaInP LED 是 1991 年由美国 HP 公司的 Craford 等人和日本东芝公司研制成功<sup>[6-8]</sup>,并于 1994 年采用低压金属有机物化学气相淀积(LP-MOCVD)技术改进成功,通常采用 GaAs 作衬底. 其后 Craford 等人又开发了 GaP 透明衬底技术,将红色和黄色双异质结材料制成 LED,其发光效率提高到  $20 lm/W$ ,这就使 LED 的发光效率超过了白炽灯的  $15 lm/W$ ,后又提高到  $40-50 lm/W$ ,最近再加上多量子阱结构,红光达到  $73.7 lm/W$ . 而在近两年来采用截头锥体倒装结构技术,红、黄光 LED 可分别达到  $102 lm/W$  和  $68 lm/W$ ,外量子效率提高了 5—7 倍. 用此材料制成的绿光( $525nm$ ) LED,也达到了  $18 lm/W$ . 台湾的 UEC 公司最近研制成用透明胶质粘接蓝宝石晶片到外延片正面,再移除 GaAs 衬底的方法,制成了 GB 黄色 InGaAlP LED,发光效率达到  $40 lm/W$ . 目前已推广到红色 LED,效果也很好.

表1 超高亮度LED商品技术

材料	技术	色	起始年份
AlGaAs	LPE, MOCVD	红外、红(880—650nm)	~1983
AlGaInP	LPMOCVD	红、橙、黄、绿(650—560nm)	1991
InGaN	TFMOCVD	绿、蓝、紫外(525—385nm)	1993

高性能的 InGaN LED 于 1993 年由日本 Nichia Chemical 公司的 Nakamura 博士研制成功<sup>[9]</sup>. 他在用 InGaN 材料设计研制双异质结紫外光激光器时,一通电竟然跳出来一个灿烂夺目的超高亮度蓝光( $450nm$ )LED,光强达到  $1-2cd$ ,采用的方法是双气流(TF)MOCVD,在器件工艺中采用了氮气氛下热退火制作 InGaN P 型层的新工艺,1996 年 Nakamura 因此项发明获得了国际信息显示学会(SID)的特别奖. 当然他和他的课题组的成功也得益于坚持此项开拓性课题研究的名古屋大学赤崎勇教授(现在名城大学),是他发展了用缓冲层生长优质 GaN 晶体的方法,还发展了用电子束处理制得 P 型薄膜,致使 P/N 结能够制成. 他的工作曾得到丰田合成的大力资助. 所以,目前 Toyoda Gosei 公司也已成为国际上生产这类器件的大公司之一. 日亚和丰田的蓝色 LED 生产后,很快又推出了绿色( $525nm$ )和蓝绿( $505nm$ )LED. 不久日亚推出了以蓝色 LED 芯片上

覆盖以钇铝石榴石为主体的荧光粉制成的白色发光二极管. 它是由蓝光激发荧光粉产生黄绿光并与蓝光合成的白光, 由于荧光光谱较宽, 几乎覆盖了整个可见光谱范围, 所以合成的白光的显色指数可达到 80—85, 亮度目前已达到 6.5cd, 发光效率也达到了 25 lm/W, 非常成功. 日亚公司在 2000 年就生产了 1 亿只白光 LED. 目前, 这两家日本公司正以每年提高发光效率 10%—20% 的速率改进这类 LED.

美国的 Cree 公司在 20 世纪 90 年代末用 SiC 制成蓝光 LED, 但亮度很低, 在 20mA 正向电流下, 仅为 20mcd 以下. 后来, 采用 SiC 衬底生产 InGaN 获得成功, 制成的蓝色和绿色 LED 性能不断提高. 这种器件的衬底材料热导率较蓝宝石高得多, 还具有抗静电方面的优势. 他们努力提高发光效率, 最近取得了较大进展, 接连推出了 XB 和 MB 两种性能更好的新产品, 据称绿光外量子效率达到 32%. 在紫外光(405nm)LED 方面也取得了突破, 外量子效率已达 28%. 不同 LED 的性能与波长的关系如图 2 所示. 图中实心标记为商品发光效率, 实验室水平要高得多, 以中空标记示出.

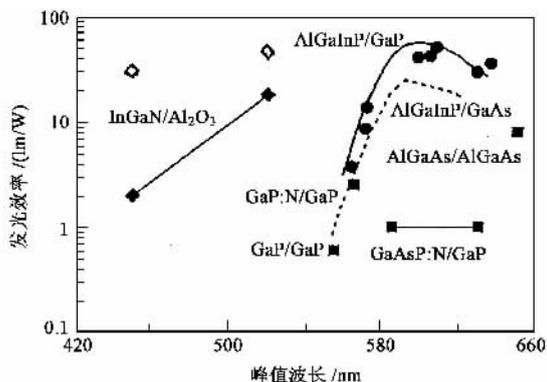


图 2 不同 LED 性能与波长的关系

从图 2 可以看出, AlGaInP LED 在红色和琥珀色区域性能最好, 而在绿色区很快下降, 虽然比起类似波长的 GaP: N 亮度仍可达到 4 倍, 但波长较长 (>565nm), 对于全色 LED 显示屏来说并不合适, 其下降的根本原因是, 在这波长区域内 AlGaInP 的半导体能带结构从直接跃迁向间接跃迁型转变, 而后的辐射复合几率仅为前者的千分之一. 直接跃迁型向间接跃迁型的变化在 AlGaAs LED 中也同样发生, 它在红外到红色较高, 绿色区则不行. GaP 和 GaAsP/GaAs LED 也可以用间接跃迁型来解释他们的效率较低的原因. 至于 GaP: ZnO, GaP: N 和 GaAsP: N/GaP 还可以作为较好发光效率的 LED 使用, 那是因为在这类材料中加入了等电子陷阱(如 N, ZnO

对)这种发光中心, 才适当提高了发光效率.

诚如作者在 1992 年初所指出的<sup>[10]</sup>, InGaN 是一种引人注目的材料, 它在整个组分范围内全是直接跃迁型结构, 带隙宽度的整个范围为 1.95(636.6nm)—3.4(365nm)eV, 覆盖了整个可见光谱. 目前最好的器件还是在紫外、蓝、绿光区, 而在黄色区就明显下降, 其原因主要是器件结构不同层之间晶格失配所致.

## 2 发光二极管的现状

20 世纪 90 年代 LED 技术的长足进步, 不仅是发光效率超过了白炽灯, 光强达到了烛光级, 而且颜色也从红色到蓝色覆盖了整个可见光谱范围, 这种从指示灯水平到超过通用光源水平的技术革命导致各种新的应用, 诸如汽车信号灯、交通信号灯、室外全色大型显示屏以及特殊的照明光源.

### 2.1 目前 LED 性能水平

超高亮度发光二极管性能水平列于表 2. 表中 DH 为双异质结, TS 为透明衬底, MQW 为多量子阱, TIP 为截头倒装堆体, SQW 为单量子阱. 表中“外量子效率”一栏中未给出数据的是指 20mA 下的外量子效率.

表 2 超高亮发光二极管目前的性能水平

材料	颜色	峰值波长 /nm	结构	外量子效率 /%	照明效率 /lm/W
AlGaAs	红	650	DH	8	4
	红	650	DH-TS	16	8
AlGaInP	红	636	DH-TS	24	35.5
	红	632	MQW-TS	32	73.7
	橙红	620	DH	6	20
	橙	610	TIP-MQW-TS	~30	102.0(100mA)
	橙	607	DH-TS		50.3
	橙	598	TIP-MQW-TS	~35	68(100mA)
InGaIn	琥珀	590	DH-TS	10	40
	黄	585	DH	5	20
	黄绿	570	DH-TS	2	14
	绿	525	SQW-TS	6.3	18
	InGaN	绿	570	DH-TS	2
绿		520	SQW-TS	11.6	30
蓝		450	DH-TS	5.5, 15	50
紫外		405		28	

## 2.2 发光二极管应用情况

LED 应用与它的光性能、颜色的关系示于图 3。

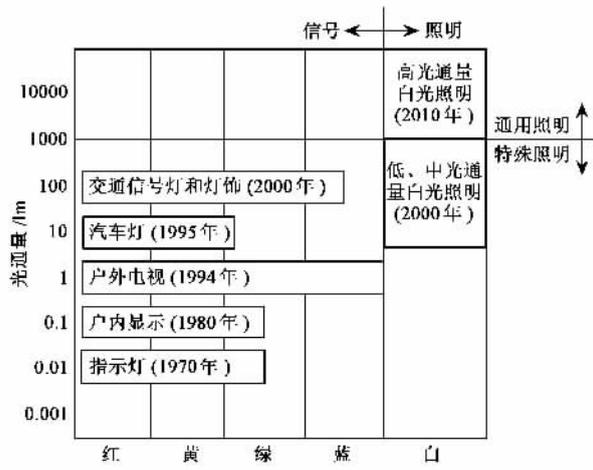


图 3 LED 应用与它的光性能、颜色的关系

随着发光二极管高亮度化和多色化的进展,应用领域也不断扩展。由图 3 可见,从下边较低光通量的指示灯到显示屏,再从室外显示屏到中等光通量功率信号灯和特殊照明的白光光源,最后发展到右上角的高光通量通用照明光源。

2000 年是时间的分界线。在 2000 年已解决所有颜色的信号显示问题和灯饰问题,并已开始低、中光通量的特殊照明应用,而作为通用照明的高光通量白光照明应用,似乎还有待时日,需将光通量进一步大幅度提高方能实现。当然,这也是个过程,会随亮度提高和价格下降而逐步实现。

### 2.2.1 LED 显示屏

自 20 世纪 80 年代中期,就有单色和多色显示屏问世,起初是文字屏或动画屏。90 年代初,电子计算机技术和集成电路技术的发展,使得 LED 显示屏的视频技术得以实现,电视图像直接上屏,特别是 90 年代中期,InGaN 蓝色和绿色超高亮度 LED 研制成功并迅速投产,使室外屏的应用大大扩展,面积在 100—300m<sup>2</sup> 不等。目前 LED 显示屏在体育场馆、广场、会场甚至街道、商场都已广泛应用,美国时代广场上的纳斯达克全彩屏最为闻名,该屏面积为 120 英尺×90 英尺,相当于 1005m<sup>2</sup>,由 1900 万只超高亮蓝、绿、红色 LED 制成。此外,在证券行情屏、银行汇率屏、利率屏等方面应用也占较大比例,近期在高速公路、高架道路的信息屏方面也有较大的发展。发光二极管在这一领域的应用已成规模,形成新兴产业,且可期望有较稳定的增长。

### 2.2.2 交通信号灯

航标灯采用 LED 作光源已有多数,目前的工作是改进和完善。道路交通信号灯近几年来取得了长足的进步,技术发展较快,应用发展迅猛,我国目前每年有四万套左右的订单,而美国加州在去年一年内就用 LED 交通信号灯更换了五万套传统光源的信号灯,根据使用效果看,寿命长、省电和免维护效果是明显的。目前采用 LED 的发光峰值波长是红色 630nm,黄色 590nm,绿色 505nm。应该注意的问题是驱动电流不应过大,否则夏天阳光下的高温条件将会影响 LED 的寿命。

最近,作者研制的应用于飞机场作为标灯、投光灯和全向灯的 LED 机场专用信号灯也已获成功并投入使用,多方反映效果很好。它具有自主知识产权,获准两项专利,可靠性好,节省用电,免维护,可推广应用到各种机场,替代已沿用几十年的旧信号灯,不仅亮度高,而且由于 LED 光色纯度好,特别鲜明,易于信号识别。

铁路用的信号灯由于品种系列较多,要求光强和视角也各不相同,目前正加紧研制中,估计会逐步研制成功并陆续投入应用,从数量看,也是一个颇大的市场。

### 2.2.3 汽车用灯

超高亮 LED 可以做成汽车的刹车灯、尾灯和方向灯,也可用于仪表照明和车内照明,它在耐震动、省电及长寿命方面比白炽灯有明显的优势。用作刹车灯,它的响应时间为 60ns,比白炽灯的 140ms 要短许多,在典型的高速公路上行驶,会增加 4—6m 的安全距离。据 Lumileds 公司称,已有 1500 万辆汽车用上了他们的 LED 产品。现国内的桑塔纳汽车已将 LED 高位刹车灯作为汽车必装件,效果颇好。国外某公司的一部概念车,除前照灯外,其他光源全用 LED,共用了 600 多个 LED。2002 年 4 月日内瓦车展上,展出一辆用 LED 制成前照灯的概念车十分引人注目。它的前照灯由 51 个 Lumileds 公司提供的 Luxeon LED 器件组成,其中还包括方向灯。当然,由于汽车的定型过程较长,估计其推广应用还有一个过程。

### 2.2.4 液晶屏背光源

LED 作为液晶显示的背光源,它不仅可作为绿色、红色、蓝色、白色,还可以作为变色背光源,已有许多产品进入生产及应用阶段。最近,手机上液晶显示屏用 LED 制作背光源,提升了产品的档次,效果很好。采用 8 个蓝色、24 个绿色、32 个红色 Luxeon LED 制成的 15in(1in≈2.5cm)液晶屏的背光源,可

表3 白光 LED 光源分类

方式	源	发光材料	备注
单芯片	蓝色 LED	InGaN/YAG 荧光粉	15—20lm/W, 已实用
	蓝色 LED	InGaN/荧光染料	蓝光激发产生蓝、绿、红三色的染料
	蓝色 LED	ZnSe	外延层出蓝光, 激发衬底出黄光
	紫外 LED	InGaN/荧光粉	紫外光激发三基色荧光粉
双芯片	蓝色 LED + 黄绿 LED 蓝色	InGaN/GaP	补色产生白光
	LED + 黄色 LED	InGaN/AlGaInP	补色产生白光
叁芯片	蓝色 LED + 绿色 LED + 红色 LED	InGaN/AlGaInP	三基色, 效率可达 20lm/W

达到 120W 2500 lm, 亮度 18000nits( 尼特,  $\text{cd}/\text{m}^2$  ). 22 吋液晶屏背光源也已制成, 仅为 6mm 厚, 不但显色效果好, 显色指数也达到 80 以上. 目前大型背光源虽处于开发阶段, 但潜力很大.

### 2.2.5 灯饰

由于发光二极管亮度的提高和价格的下降, 再加上长寿命、节电、驱动和控制较霓虹灯简易, 不仅能闪烁, 还能变色, 所以用超高亮度 LED 做成的单色、多色乃至变色的发光柱配以其他形状的各色发光单元, 装饰高大建筑物、桥梁、街道及广场等景观工程效果很好, 呈现一派色彩缤纷、星光闪烁及流光异彩的景象. 已有不少单位生产 LED 光柱达万米以上, 彩灯几个, 目前正逐步推广, 估计会逐步扩大单独形成一种产业.

### 2.2.6 照明光源

作为照明光源的 LED 光源应是白光, 白光 LED 光源分类如表 3, 目前作为军用的白光 LED 照明灯具, 已有一些品种投入批量生产. 由于 LED 光源无红外辐射, 便于隐蔽, 再加上它还具有耐振动、适合于蓄电池供电、结构固体化及携带方便等优点, 将在特殊照明光源方面会有较大发展. 作为民间使用的草坪灯、埋地灯已有规模生产, 也有用作显微镜视场照明、手电、外科医生的头灯、博物馆或画展的照明以及阅读台灯. 随着光通量的提高和价格的下降, 应用面将逐步拓展, 以完成特殊照明向通用照明的过渡, 估计 2005—2010 年会进入通用照明领域.

## 3 发光二极管的光辉前景及应重视的课题

到目前为止, 半导体发光二极管技术进展主要反映在解决了颜色光的应用问题, 而且这些应用都已形成或正在形成新兴产业. 而白光 LED 目前还只

能开始用到便携式和特殊照明应用方面, 通用照明无疑是 LED 最有光辉前景的应用产业, 但这一领域尚待今后在 LED 性能和价格上的继续突破<sup>[11—16]</sup>. 根据对半导体发光材料和器件的发展和现状分析, 下述课题应予重视.

### 3.1 InGaN, AlInGaN 材料的研究

研究这两种材料如何减少缺陷和提高效率问题. 与此相关, 还要研究制作白光 LED 时如何提高所用荧光粉的发光效率和稳定性问题.

### 3.2 AlGaInP 材料的研究

研究如何采用布拉格反射和透明衬底技术来提高该材料的外量子效率. 通过研究, 外量子效率有望提高 50%.

### 3.3 硅衬底外延 InGaN 技术研究

硅衬底 (2in) 价格是蓝宝石的十分之一, 热导率是蓝宝石的 11 倍, 而且抛光切割加工容易, 近来已取得  $\phi 5$  LED 近 1cd 光强的结果, 今后扩大尺寸也极方便, 这对降低成本有重要作用.

### 3.4 GaN 和 AlN 衬底单晶的研究

为提高发光效率, 减少晶格失配可提高外延层质量, 这两种单晶正积极研制中, 生长条件要求很高, 要 2400—2700℃ 的高温炉, 并有高压设置. GaN 已得到 2in 直径的单晶, AlN 也得到了  $\phi 15$  的单晶. InGaN 外延效果有待研究.

### 3.5 紫外光 LED 和相应的三基色荧光粉的研究

Cree 公司已开发出 405nm 和 395nm 波长的 LED, 外量子效率达到 28%. 紫外光激发产生三基色的荧光粉和抗紫外线退化的封装材料应加以研制.

### 3.6 截头锥体倒装结构 (TIP) 的研究

红、黄、蓝色 LED 都有研制品, 目前发光效率达到 102 lm/W 的 610nm 峰值波长的 LED, 就是采用这种结构, 但工艺较复杂, 还须进一步完善, 以利推广.

### 3.7 光子再循环半导体器件( PRSD )的研究

这一技术的器件发光效率非常高,从理论上讲,白光可以达到 300 lm/w. 美国波士顿大学目前做出的 PRS-LED 还仅产生 10 lm/w 的白光. 其关键是利用蓝光直接激发 AlGaInP 这种光—光转换材料,调节组分,使产生黄绿光,两种光混合产生白光,值得深入研究.

### 3.8 垂直腔表面发射激光器结构( VCSEL )的研究

这类结构在激光器中已得到很好应用. 1997 年,美国国家实验室在 850—980nm 波长范围内转换效率达到 50%; 1999 年,美国 Agilent Tech 证明这种红光 LED 外量子效率可以达 45%,理论上发光效率可达 320lm/w.

### 3.9 功率型 LED 技术的研究

LED 在通用照明领域应用的障碍之一是以以往的 LED 功率太小,研制高功率 LED 是重要课题. Lumileds lighting 公司研制成功 Luxeon 器件比较好的解决了器件的散热问题,5W 的白光 Luxeon LED 光输出达 187lm,发光效率为 44.3 lm/w,是由 4 个  $1 \times 1 \text{mm}^2$  的蓝色 LED 芯片涂复上荧光粉制成,驱动电流密度为  $50 \text{A}/\text{cm}^2$ ,绿色器件(519nm)达到 170lm,蓝绿色器件(506nm)达到 175lm. Osram 光电子公司推出 AlGaInP(As)纹理表面高效取光结构的器件,发光效率达到 30lm/w. UEC 公司开发的 10 W LED,采用  $2.5 \times 2.5 \text{mm}^2$  的大面积芯片,在 5A 电流下工作,光输出达到 200lm. 这些器件的研制成功,加快了光通量输出的上升趋势,对推动通用照明上的应用有重要意义,今后研制力度还应加大.

### 3.10 有机半导体发光二极管( OLED )的研究

自 20 世纪 80 年代开始研究的小分子有机半导体发光二极管和后来研制的聚合物发光二极管,统称为 OLED. 90 年代以来取得重大进展,在全色化、高亮度及长寿命方面取得了突破. 现在已有可见光全部色彩,发光效率超过 20 lm/w,一般寿命超过 20000h. 而红光 OLED 寿命仅 3000—4000h,急待提高. 由于与 LCD 相比,具有视角广( $160^\circ$ )、主动、明亮及响应快等优点,目前的应用研制主要在全色显示屏方面展开,小型的手机显示彩屏已接近生产,质量明显高于 LCD,作为室内使用的仪表显示也非常合适,正向大尺寸发展,13in 和 15in 的 OLED 显示屏已研制成功,20in 的也即将问世. 由于它具有原材料丰富及加工简便等优点,它在包括照明在内的其他方面的应用也十分看好.

图 4 所示是 LED 性能与其他光源的比较及理

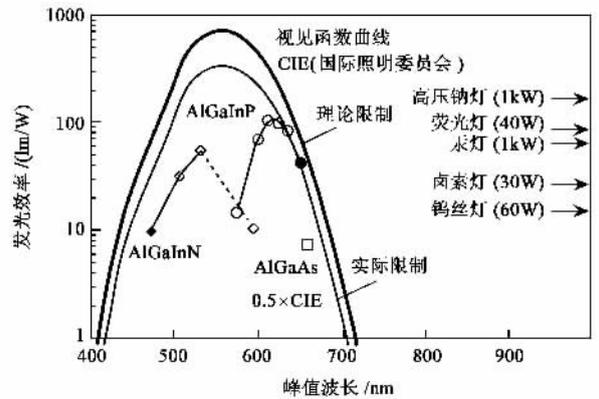


图 4 LED 性能与其他光源的比较及理论限制和实际限制

论限制和实际限制. 图中由国际照明委员会( CIE )规定的视见函数曲线给出的粗线是理论限制,假定器件的光取出效率是 50%,那么实际限制就是  $0.5 \times \text{CIE}$ ,图中以细线示出,最高处 555nm 的实际限制为  $680 \text{lm}/\text{w} \times 0.5$  等于  $340 \text{lm}/\text{w}$ ,红光区已接近实际限制,蓝光、绿光处还可有较大的提高. 如果 LED 达到  $200 \text{lm}/\text{w}$ ,那么 LED 光源就超过了图中所列的所有光源.

展望 LED 发展的未来,有两种预计,即一般估计和乐观估计. 按一般估计,2005 年达到  $50 \text{lm}/\text{W}$ . 事实上目前实验室已达到或超过这一数值. 按乐观估计,以往每十年发光效率提高 10 倍,到 2010 年就可以达到  $200 \text{lm}/\text{W}$ ,留些余地的预计是 2010 年达到  $100 \text{lm}/\text{W}$ ,2020 年或 2025 年达到  $200 \text{lm}/\text{W}$ . 最近 Lumileds 公司报道在 610nm 达到  $102 \text{lm}/\text{W}$ ,蓝光、绿光和白光也都达到了  $30\text{—}50 \text{lm}/\text{W}$ ,进展之快,令人振奋. 如果 2025 年有 50% 的照明光源被 LED 光源所取代,那么其产值就是每年一千多亿美元,就全球来说,每年可节省照明电费一千亿美元,每年还可少排放三亿五千万吨二氧化碳等大气污染物.

如果说,半导体在电子学领域完成了第一次革命的话,那么第二次革命就在照明领域.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Holonyak N Jr, Bevaqua S F. Appl. Phys. Lett., 1962, 1 82
- [ 2 ] Niina T. J. Electrochem. Soc., 1977, 124( 8 ) :1285
- [ 3 ] Lorimor O G. J. Electrochem. Soc., 1975, 122( 3 ) :407
- [ 4 ] Craford M G. IEEE. Trans. E. D., 1977, 24 935
- [ 5 ] Nishizawa J, Suto K. J. Appl. Phys., 1977 48 3484
- [ 6 ] Tang C W, Van Slyke S A. Appl. Phys. Lett., 1987, 51 913
- [ 7 ] Kuo C P, Fletcher R M, Osentowski T D et al. Appl. Phys. Lett., 1990, 57 2937
- [ 8 ] Sugawara H, Ishikawa M, Hatakoshi G. Appl. Phys. Lett., 1991, 58 1010

- [ 9 ] Nakamura S , Senoh M , Iwasa N *et al.* Jpn. J. App. Phys. , 1995 , 34 :L1332
- [ 10 ] 方志烈. 半导体发光材料和器件. 上海 :复旦大学出版社 , 1992. 139 [ Fang Z L. Semiconductor Luminance Materials and Devices. Shanghai : Fudan University Press , 1992. 139 ( in Chinese ) ]
- [ 11 ] Haitz R , Kish F , Tsao J *et al.* Innovation in Semiconductor Illumination : Opportunities for National Impact ( 1999 ). Summaries of This Talk are Available from the Optoelectronics Industry Development Association , 1133 Connecticut Ave. , NW , Suite 600 , Washington , DC 20036—4380
- [ 12 ] Craford M G , Stringfellow G B. High Brightness Light Emitting Diodes. San Diego : Academic Press , 1997
- [ 13 ] Craford M G , Holonyak N Jr , Kish F A. Sci. Am. , 2001 , 284 :63
- [ 14 ] Wierer J J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001 , 78 :3379
- [ 15 ] Kish F A *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1994 , 64 :2839
- [ 16 ] Krames M R *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1995 , 75 :2365

· 物理新闻与动态 ·

## 引力的速度 ( The speed of gravity )

大多数的科学家们都明确地认为 ,引力作用应该与电磁力作用相似 ,不是一种瞬态作用 ,而是有一定的速度的.例如我们看到的太阳 ,实际上是它 8 分钟以前的状态.一般来说 ,要用实验的方法来确定引力的强度还比较容易 ,但要用实验方法来测定引力的速度却比较困难.那么我们能否用引力透镜效应的监测直接地测量引力的速度呢?

2002 年 9 月 8 日 ,土星巡弋在类星体 J0842 + 1835 的附近 ,虽然土星没有一般恒星的质量大 ,但它仍有相当大的引力.按照广义相对论的推测 ,在天空中类星体的位置在土星引力的作用下 ,将在若干天内完成一个小小的回路.

美国 Missouri 大学的 S. Kopeiken 教授和国家射电天文观测台的 E. Fomalont 教授观察到了这个回路 ,这两位科学家使用了具有非常长的基线阵列射电望远镜 ,因为这种抛物型探测器的配置可以提供  $10 \mu\text{s}$  的角度分辨率.实验观察到的回路是按瞬态传播的引力所产生的回路间存在着一个微小的位移 ,两位科学家认为 ,这小位移的产生是由于引力具有一定的速度所致.在此基础上 ,他们计算出引力的速度是光速的 1.06 倍(其误差约为 20% ).

当他们将这个观测结果在 2003 年 1 月 ,在位于美国西雅图召开的“美国天文学年会”上报告后 ,就受到了来自美国华盛顿大学的 C. Will 教授与日本 Hiroasaki 大学的 Hideki Asada 教授的质疑 ,他们认为用射电透镜实验只能很粗略地测量光速 ,而不可能提供引力速度的数据 ,因此这两种不同意见的争论要等待新实验的验证.

( 云中客 摘自 American Astronomical Society abs. astroph. 0301145 2003 )

## 紫外光刻术 ( Ultraviolet lithography )

随着科技的发展 ,集成电路芯片上的插口与记忆元件会愈来愈多 ,所以在硅或金属底板上的空间显得极其拥挤.现有的短波光刻技术能生产 65nm 宽的连线以及 90nm 的连线间距 ,因此微型芯片的制造商们都力图寻找能雕刻更加精细连线的光刻技术.为此 ,美国政府(以加洲劳伦斯伯克利国家实验室的近代光源研究所为主)和跨国工业财团(如 AMD , IBM , 微软 , 摩托罗拉等)携手合作 ,现在以 P. Naullear 教授为首的研究组已开发出了紫外波段的光刻技术 ,这种紫外光刻术能在芯片底板上生产出 39nm 的线宽和 70nm 的线间距.他们计划在 2007 年以前生产出 25nm 的线宽和 45nm 的线间距的集成电路芯片.

( 云中客 摘自 Journal of Vacuum Science Technology B , December 2002 )