

LVD无极灯

LVD Electrodeless Fluorescent Lamp

陈育明 陈大华 李维德 李文鹏 王爱群 编著



LVD无极灯

LVD Electrodeless Fluorescent Lamp

陈育明 陈大华 李维德 李文鹏 王爱群 编著



图书在版编目(CIP)数据

LVD 无极灯/陈育明等编著. —上海:复旦大学出版社,2009.8
ISBN 978-7-309-06754-5

I. L… II. 陈… III. 节能-灯 IV. TM923.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 113912 号

LVD 无极灯

陈育明 陈大华 李维德 李文鹏 王爱群 编著

出版发行 复旦大学出版社 上海市国权路 579 号 邮编 200433
86-21-65642857(门市零售)
86-21-65100562(团体订购) 86-21-65109143(外埠邮购)
fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

责任编辑 范仁梅

出品人 贺圣遂

印刷 丹阳市教育印刷厂
开本 787×960 1/16
印张 14.5
字数 260 千
版次 2009 年 8 月第一版第一次印刷

书号 ISBN 978-7-309-06754-5/T·336

定价 42.00 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

本书系统介绍了LVD无极灯的基本知识,从LVD无极灯的基本发光原理,到其实际应用剖析.全书内容包括LVD无极灯的发展、光源技术基础、气体放电原理、LVD无极灯原理、射频无极光源的放电模式研究、射频无极光源放电模式的光谱学诊断、无极荧光灯电子镇流器的分析和LVD无极灯的应用研究等8章.

本书可作为从事电光源专业的工程技术人员的参考用书.

编著单位

上海宏源照明电器设备有限公司

复旦大学电光源研究所

编委会人员

编委会主任

陈大华 李维德

主编

陈育明

副主编

王爱群 李文鹏

编委（以姓氏笔画为序）

王爱群	龙 奇	左春兰	刘 洋
李文鹏	李维德	张立诚	张秋玲
汪毓秦	陈大华	陈文成	陈育明
邹 坚	居家奇	林燕丹	

前 言

在全球经济的持续增长与资源短缺的矛盾日益突出的今天,能源问题已经成为当今世界发展的重要问题,节能减排已引起世界各国的高度重视. 照明用电占电力资源总消耗的 15% 左右,因此照明节能成为节能工作的一个重点. 作为实现照明可持续发展的一个重要内容,在照明工程中提高照明光源的光效和寿命十分重要. 无极放电光源由于没有电极,它与传统光源相比具有诸多优势,例如,寿命长,在寿命期间光衰十分小,而且不必担心发光物质和电极的相互作用,因此,采用无极放电光源无论是对节约能源,还是对减少环境污染都具有重要意义.

无极灯的研究可以追溯到 1891 年,当时 Tesla 发现在高频电磁场中等离子体能够产生光线;1907 年,Hewitt 发明了世界上第一个无极灯. 但无极灯的发展并不迅速,从概念到产品经过了一个多世纪,直到最近 20 年才有成熟产品出现. 究其原因,影响无极放电光源发展的最主要问题是高频功率电子器件. 20 世纪 80 年代,随着半导体电子和开关电源技术的逐渐发展,无极放电光源产品的实现才成为可能,目前已经有多种无极放电光源产品问世,相关研究也在不断深入. LVD 无极灯是我国自主研发的具有独立知识产权的新型节能光源. 它具有高效节能、超长寿命等众多优点,使用 LVD 无极灯可以节约大量自然资源并为环境保护作出巨大贡献. LVD 无极灯的成功发明及其在产业化和技术领域内的领先优势,已经引起了国际照明界的广泛关注.

本书是我们在学习和研究无极灯的基础上,参照国内外的文献进行编写的. 首先介绍了无极灯的发展、光源技术基础和气体放电原理等基本知识,为后面的内容进行铺垫;接着介绍了 LVD 无极灯原理、射频无极光源的放电模式的研究及其光谱学诊断和无极荧光灯电子镇流器的分析,最后介绍了 LVD 无极灯的应用研究.

由于我们从事无极灯研究的时间不长,理论水平有限,实践经验受到一定的限制,书中难免会出现很多不妥和谬误之处. 之所以敢于将此书面世,是希

望通过我们的工作总结,为从业人员提供参考.如果借助这种抛砖引玉的方式能够提高人们对无极灯的认识和理解,那将是我们最大的夙愿.为此,希望得到同行和相关科技工作者的不吝指教,对书中的不足和错误给予批评指正,我们将不胜感激并加以改正.

编者

2009年4月于上海

目 录

第一章 LVD 无极灯的发展	1
§ 1.1 无极放电光源的进展	1
一、无极放电光源的类型	1
二、无极光源的进展	4
三、无极放电的发展展望	7
§ 1.2 无极荧光灯从概念到产品的发展之路	8
一、前期探索	8
二、无极荧光灯产品的发展	10
三、无极荧光灯的发展趋势	14
§ 1.3 LVD 无极灯的发展	15
一、发光机理的突破	17
二、IC 芯片技术的应用	19
三、全新放电结构的设计	21
四、数码调光的实现	22
五、生产工艺的突破	23
第二章 光源技术基础	24
§ 2.1 光	24
一、光的本质	24
二、光的产生	25
§ 2.2 视觉	27
一、人眼	27
二、视觉的特征与功能	29
三、人眼的光谱灵敏度	34
§ 2.3 光度学	36
一、基本单位	36
二、照度和亮度的测量	40
§ 2.4 颜色	41
一、颜色的性质	41
二、国际照明委员会色度学系统	43

三、色度学及其测量	47
§ 2.5 光源	50
一、自然光源	50
二、人工光源	51
第三章 气体放电	53
§ 3.1 气体放电光源的工作原理、结构、外形、光电参数及使用条件	53
一、气体放电现象	53
二、辉光放电	55
三、弧光放电	56
四、低气压放电和高气压放电	56
五、灯的稳定工作条件和启动方式	57
§ 3.2 低气压的汞蒸气放电	57
一、汞的基本特征	58
二、低压气体放电建立	58
三、汞低气压放电光谱	60
四、辉光放电和弧光放电	60
§ 3.3 灯用荧光粉	62
一、发光颜色	63
二、显色性	63
三、荧光灯的光效	64
四、发光色一致性	64
§ 3.4 高频低压 Ar-Hg 放电无极荧光灯的模拟	66
一、高频 Ar-Hg 放电理论	66
二、放电基本特性	68
第四章 感应无极荧光灯原理	71
§ 4.1 基本原理	71
一、传统荧光灯与 LVD 无极灯	71
二、灯的启动特性	72
三、提高无极灯系统效率的方法	74
§ 4.2 变压器模型	75
一、感应无极灯发光原理	75
二、变压器模型描述	76
三、模型计算	78
§ 4.3 数据的测量和计算	80

一、整灯调频实验	80
二、单侧磁环实验	82
三、灯管阻抗及耦合系数的计算	85
四、对模型计算的验证和修正说明	86
§ 4.4 讨论	91
一、磁环铁氧体功率损耗分析	91
二、铁氧体损耗整体分析	92
三、灯管等效阻抗分析	92
第五章 射频无极光源的放电模式研究	97
§ 5.1 引言	97
§ 5.2 射频无极光源的稳态放电模式研究	98
一、实验构架和实验方法介绍	98
二、放电模式转变和滞后现象	99
三、放电模式转变的频率特性	101
四、匹配条件对放电模式的影响	105
五、发射光谱在不同放电模式下的变化	106
§ 5.3 射频无极光源的启动瞬态过程研究	108
一、实验构架和实验方法介绍	108
二、实验结果和讨论	109
§ 5.4 重要结论	113
第六章 射频无极光源的光谱学诊断	115
§ 6.1 引言	115
§ 6.2 理论基础	115
一、ICP 放电模式转变的物理解释	115
二、发射光谱在 ICP 放电模式转变中的应用	117
§ 6.3 实验构架和实验方法	119
§ 6.4 结果与讨论	120
一、发射光谱随放电条件的变化	120
二、电子能量分布和电子温度随放电条件的变化	122
三、亚稳态浓度随放电条件的变化	126
四、方位角环形电场对放电的影响	128
五、放电模式转变和滞后现象的物理解释	129
§ 6.5 重要结论	132

第七章 无极荧光灯电子镇流器的分析	134
§ 7.1 基本原理	134
一、无极荧光灯的工作原理	134
二、高频电子镇流器的结构	136
§ 7.2 无极灯电子镇流器的设计	140
一、电子镇流器的元件分析	140
二、设计结果分析	143
§ 7.3 高频电子整流器的调光实验	144
一、实验数据	145
二、实验结果分析和讨论	147
第八章 LVD 无极灯的应用研究	149
§ 8.1 LVD 无极灯与绿色照明	149
一、绿色照明与环境的保护	149
二、“绿色光源”的起源和发展	150
三、LVD 无极灯与绿色照明	150
§ 8.2 LVD 无极灯在道路照明中的应用	151
一、道路照明简介	151
二、道路照明的常用光源及参数	154
三、道路照明的相关国际标准	157
四、中间视觉与道路照明	160
五、LVD 道路照明案例	166
§ 8.3 隧道照明中 LVD 无极灯的应用	168
一、隧道照明简介	168
二、电磁感应无极灯在隧道照明中的应用前景	170
三、隧道照明案例分析	172
§ 8.4 LVD 无极灯在室内体育场馆照明中的应用	174
一、室内体育馆的照明设计要点	175
二、无极灯用于体育馆室内照明中的案例分析	177
§ 8.5 LVD 无极灯在工厂照明中的应用	180
一、照度设定	181
二、光源和灯具的选择	182
三、照明设计和控制	184
四、照明环境的评价方法	185
五、无极灯用于工厂照明中的案例分析	187

§ 8.6 太阳能 LVD 无极灯	188
一、太阳能电磁感应灯系统	189
二、系统的设计	190
三、注意事项	195
四、设计实例	196
附录 1 LVD 无极灯的基本参数	198
附录 2 LVD 照明工程测试报告	206
参考文献	216

第一章

LVD 无极灯的发展

§ 1.1 无极放电光源的进展

在照明工程中提高照明光源的光效和寿命十分重要,追求高光效、长寿命的光源成为实现照明可持续发展的一个重要内容. 电极的寿命成为制约传统光源寿命的瓶颈,目前延长照明光源寿命的方法包括改进灯丝和电极的结构与材料,蒸镀二向色性反光镜、使用高频电子镇流器点灯线路等. 而无极放电光源采用了无电极的结构,使电极不再成为制约光源寿命的瓶颈,因此,无极光源的发展符合照明可持续发展的基本要求,是未来光源发展的一个重要方向.

无极放电光源由于没有电极,因此它与传统光源相比有诸多优势,例如寿命长,在寿命期间光衰十分小,而且不用担心发光物质和电极的相互作用,这无论是对节约能源还是对减少环境污染都有重要意义. 但从 1891 年 Tesla 首次发现在高频电磁场中等离子体能够产生光辐射到现在已经过去了一个多世纪,无极放电光源的发展并不迅速,直到最近 20 年才有成熟产品出现. 究其原因,影响无极放电光源发展的最主要问题是高频功率电子器件. 20 世纪 80 年代,随着半导体电子和开关电源技术的逐渐发展,无极放电光源产品的实现成为可能,目前已经有多种无极放电光源产品问世,相关研究也在不断深入.

一、无极放电光源的类型

无极放电是指放电中没有内置电极,使放电腔可以采用单种材料密闭而成. 无极放电最早由 Hittorf 发现,随后 Thomson 作了更完整的研究, Tesla 首先采用无极放电原理设计了照明概念灯. 随着 20 世纪末半导体技术的突飞

猛进,制造性能可靠、价格低廉的镇流器成为可能,无极放电光源的研究得到深入的开展,在过去的 20 年,超过 500 项无极灯专利得到批准,多种产品面世并表现出巨大的潜力. 无极放电光源既可以是高气压放电也可以是低气压放电,根据目前的发展情况,无极放电光源可以有以下 4 种类型.

1. 感应放电

感应放电有时候也称为 H 型放电,驱动场是方位场,这样导致线圈内的磁通量发生变化. 在放电管的内部或外部缠绕有感应线圈,在高频电流经过线圈时,通过电磁感应原理在放电管中形成放电电流. 从电学角度看,等离子体对激励线圈来说是单匝的次级线圈,线圈通过适当的阻抗匹配连接到功率源,吸收能量来维持放电. 因此考虑放电的能量传输可以采用变压器模型来近似,等离子体产生闭合的电流可以看作变压器的次级线圈(如图 1.1 所示),而初级线圈可以放在等离子体中间或者放在等离子体的周围. 这样的放电被称为“感应耦合”(ICD)、“感应灯”、“螺线管电场”(SEF)和“无散度场”等. 这样放电的灯管可以设计成很多形状,根据磁芯线圈的组成和结构可以分为内置式和外置式两种. 在这样的放电中只要提供足够的功率来维持 H 型放电,它可以在比较低的频率下就得到足够的耦合效率,因此可以得到比较理想的发光效率. 目前,感应放电可以实现的功率范围为 $10 \sim 1\,000\text{ W}$,放电频率在 $50\text{ kHz} \sim 100\text{ MHz}$ 之间. 在实际的研究中还发现,这样的设计相对比较简单,而且电磁干扰比较小. 另外,可以采用相对较低的频率,所以可以降低镇流器的电子元件成本.

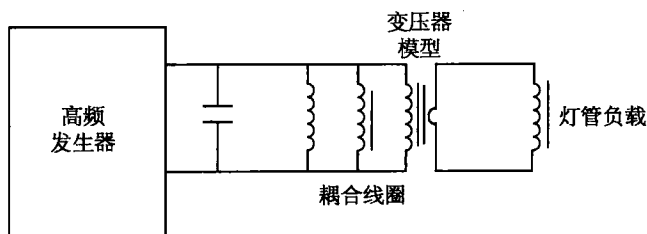


图 1.1 感应放电的变压器模型示意

2. 容性放电

容性放电通常又称为 E 型放电,这样的等离子体可以看成是一个密封的玻璃容器放在电容的两个极板之间. E 型放电在原理上与普通的电极间放电十分类似,只是把两个电极移到放电管外部罢了(如图 1.2 所示),能量耦合时必须通过电极附近的鞘层,这样的放电类似电容的放电,导致这种放电的特性受驱动频率的影响十分大. E 型放电同 H 型放电相比,它的耦合效率要低很多,而且功率密度也要低很多. 要得到足够高的功率密度以满足光源设计的

需要,就要求镇流器的驱动频率十分高,这样就使电子元件的成本急剧上升.更值得注意的是,电磁干扰也变得严重了,相关的专利报道采用 915 MHz 的驱动频率来实现容性放电的照明.容性放电由于其优异的放电稳定性,在飞机的仪表盘等指示照明中得到应用.

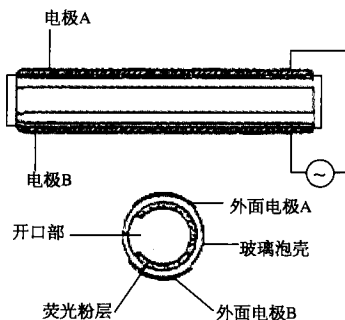


图 1.2 容性放电的荧光灯示意

3. 微波放电

此时电磁波的波长和耦合器及放电管的尺寸可以比拟,在这样的放电中,由于频率很高的电子如果不与周围粒子碰撞就很难得到足够的能量来激发原子(分子)发光,因此在微波放电中电子与周围粒子的弹性碰撞具有决定性作用.电子通过弹性碰撞来不断改变运动方向,逐渐从微波场中得到足够能量来激发和电离原子(分子).微波放电的特点包含了 E 型放电和 H 型放电的特点,但由于微波频率较高,因此有较高的耦合效率,光效也较高.微波放电的一个主要特点是趋肤效应,当驱动频率或功率升高时,趋肤深度就会减少,因此输入功率集中在管壁附近,放电时的温度最

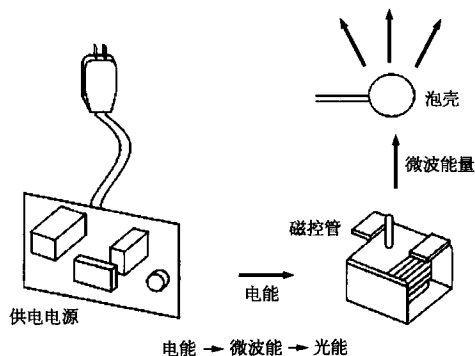


图 1.3 微波放电灯的工作示意

高值不在电弧中心,而是在靠近管壁的地方.这样的温度轮廓对辐射有好处,可以有利于共振辐射的产生(气体冷却的自吸收减少)和分子连续辐射的产生(整个电弧的温度不是很热).由于产生微波的磁控管是比较成熟的产品,因此成本稍低,但由于微波频率高的缘故,需要波导和耦合腔等装置,设计时结构会比较复杂一些,图 1.3 所示是微波放电灯的原理示意.

4. 行波放电

等离子体可以在行波放电中产生,典型的的就是表面波放电,电磁波会随着等离子体形成的通道传播.电磁波在传播的过程中不断地加入电子来电离气体,从而确保电磁波在气体形成的等离子体中传播,因此,气体电离形成等离子体本身可以作为一个波导来约束等离子体的传播方向.与前面介绍的微波放电有一个很大的不同,等离子体不需要全部包围在波导或耦合腔内,可以通过电磁波传播方向来控制电磁波的传播结构.图 1.4 所示是一种小型的谐振腔式的表面波放电结构示意,微波经过谐振腔以后可以沿石英管进行传播并形成等离子体放电.19 世纪 80 年代开始,科学家们就试图将行波放电应用到荧光灯中来,但由于功率密度和高频电子元件成本等问题阻碍了其发展速度.

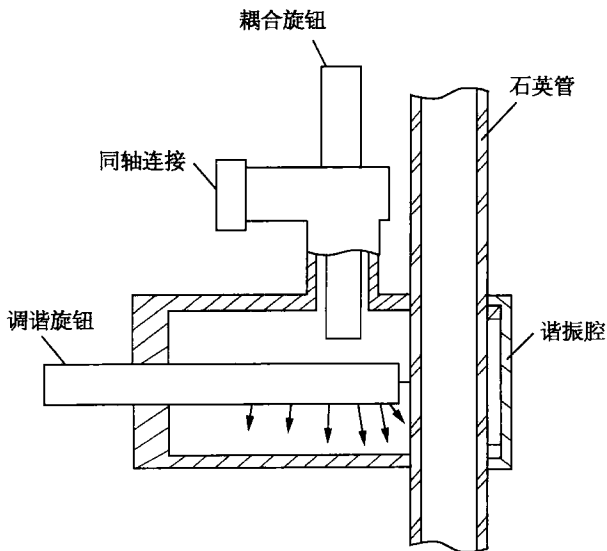


图 1.4 谐振腔式表面波放电装置示意

二、无极光源的进展

尽管无极光源的探索进行得比较早,但作为成熟的普通照明的进展比较缓慢,目前,比较成熟的两种无极放电光源为感应放电荧光灯和微波放电灯.

1. 感应放电荧光灯

目前,感应放电主要用在荧光灯方面.早在 1907 年,P. C. Hewitt 就申请了感应无极灯原理的专利,但由于当时电子学技术水平的限制,因此这种灯只能在实验室存在,没有可能进入市场.无极灯真正发展和进入实际使用是 20 世纪 90 年代以后的事情.

1991年,松下照明电气有限公司首先推出了 Everlight 无极荧光灯并投入日本市场。这种感应灯没有使用磁芯进行能量耦合,而是直接在球形泡壳外绕上线圈,通以 13.65 MHz 的高频电流,使感应泡壳内的等离子体发光(如图 1.5(a)所示)。当时 27 W 的 Everlight 无极荧光灯的光效是 $37 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$,平均寿命是 40 000 h。

同年,Philips 公司的 QL 无极荧光灯也投入市场。它在一梨形泡壳内置一中空管道,将绕以线圈的铁磁芯柱插入中空管道(如图 1.5(b)所示),线圈内交流电频率是 2.65 MHz。QL 无极荧光灯光效达到了 $70 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$,平均寿命是 60 000 h。

1994年,GE 公司推出了 GENURA 无极荧光灯,这是一种镇流器与灯一体化的紧凑型无极荧光灯,其结构与 Philips 的 QL 无极荧光灯相似,外形与反射型白炽灯相仿,工作频率也选用了 2.65 MHz,光效是 $50 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$,寿命是 15 000 h。

随后,Osram 公司推出了 ENDURA 无极荧光灯,该灯采用闭合放电回路,一个或多个绕有线圈的铁芯磁环环绕在闭合放电管上,套在灯管上的铁芯的作用犹如变压器的初级,而闭合的灯管的作用犹如变压器的次级线圈(如图 1.5(c)所示)。ENDURA 无极荧光灯的工作频率是 250 kHz,光效达到 $75 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$,平均寿命是 60 000 h。

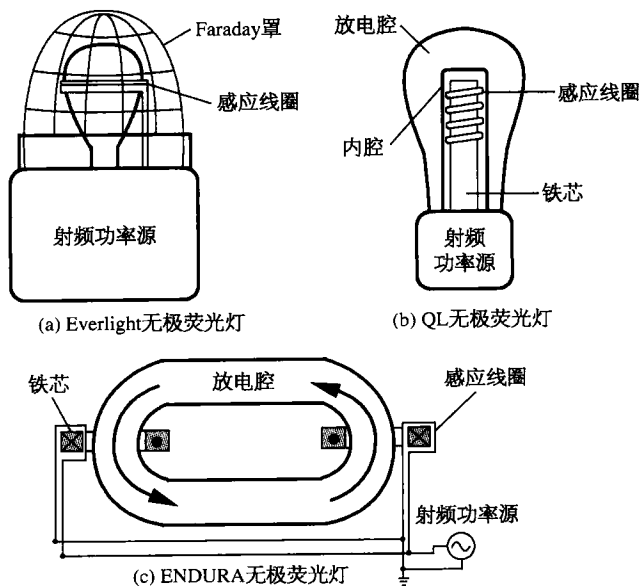


图 1.5 几种典型的感应放电荧光灯的结构