

学校编码: 10384
学号: 33120131152853

分类号____密级____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

多芯片 LED 热耦合效应的高效测量
Efficient Measurement of Thermal Coupling Effects
for Multi-chip Light-emitting Diodes

卢红丽

指导教师姓名: 高玉琳副教授
朱丽虹高级工程师

专业名称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 4 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

随着高亮度的白光 LED 在室内和室外领域的广泛应用,对大功率 LED 的要求越来越高,由此多芯片 LED 应运而生,同时多芯片 LED 也是大功率 LED 芯片的发展趋势之一。对于多芯片 LED 来讲,芯片之间的热耦合是一个重要的问题,因为芯片的温升不仅只是自身产生的热量引起的,还有一部分是由于其他芯片对其的热耦合产生的。本文主要研究的是多芯片 LED 模块的热耦合问题,主要从理论上推导了多芯片 LED 模块的热耦合矩阵,并通过热仿真和实验对多芯片 LED 模块的热耦合矩阵的合理性进行了验证。具体做了以下几个方面的工作:

1.多芯片 LED 的热耦合模型及其简化。对于单芯片 LED 来说,其温升主要是由自己产生的热量引起的,传热通道主要是纵向的,因此根据热阻定义我们可以算得单芯片的温升;而对于多芯片 LED 来讲,模块上每个芯片的温升不仅由自身产生的热量引起的,而且还受到周围工作芯片对它的热耦合的共同作用。多芯片 LED 模块中的每一个芯片都相当于一个热源,每个热源都会对周围芯片有热耦合效应,由于热耦合效应引起的温升称为耦合温升。多芯片 LED 之间不仅有纵向通道传热,还有芯片和芯片之间的横向传热通道,根据这两部分我们提出了多芯片 LED 模块的热阻,再通过热阻的定义算得多芯片 LED 模块上各个芯片的温升,多芯片 LED 模块上所有芯片的温升公式可以整理成一个矩阵,我们将其称为热耦合矩阵。这个热耦合矩阵可以通过多芯片 LED 模块几何位置的对称进一步简化,我们通过不同类型的阵列排布来说明简化过程。

2.热仿真验证热耦合矩阵简化的合理性。第一部分的主要工作就是多芯片 LED 模块的热耦合模型、多芯片 LED 模块的热耦合矩阵及其简化。对于第一部分中提到热耦合矩阵的简化是否合理,这里我们通过多芯片 LED 模块的仿真结果来验证。本文的样品有两类,我们称第一种结构的样品和第二种结构的样品。我们利用热仿真软件对第一种结构下和第二种结构下的两个类型的多芯片 LED 阵列排布进行仿真。这个仿真主要分为三个部分,一是,多芯片 LED 模块上每个芯片单独工作时进行仿真,对每个芯片单独工作时的仿真结果进行整理得到多芯片 LED 模块的热耦合矩阵;二是,根据多芯片 LED 模块的几何位置对称,算

得需要测试的芯片个数，对这些芯片单独工作的数据整理算得多芯片 LED 的热耦合矩阵；三是，对多芯片 LED 模块的其他不同情况进行仿真。对比两种仿真结果的热耦合矩阵的矩阵系数后证实了多芯片 LED 模块的热耦合矩阵简化的合理性，用其他情况的仿真结果说明多芯片 LED 模块热耦合矩阵的合理性。

3.通过热阻实验和红外热成像实验验证多芯片 LED 模块热耦合矩阵的合理性。第一部分和第二部分的主要工作是热耦合模型、热耦合矩阵的简化和仿真验证，第三部分我们用实验验证我们的理论的合理性，实验中我们有两类结构的样品，第一种机构的样本有 1×3 芯片矩阵模块、 2×2 芯片矩阵模块和 2×3 芯片矩阵模块；第二种结构的样本有 1×3 芯片矩阵模块。根据这些样品的几何位置对称算得需要测试的芯片个数，通过热阻实验测得这些样品上需要测试的芯片单独工作时的真实温升，由温升数据算得多芯片 LED 模块的热耦合矩阵，我们根据每个样品的热耦合矩阵反推其他情况下每个芯片的温升，跟实验测得的每个情况下的温升数据进行对比后，验证了这个热耦合矩阵的理论模型的合理性。同时用红外热成像实验测试多芯片 LED 模块经过几何位置对称后需要测试的芯片单独工作时每个芯片的温升，对比热阻实验测得的数据和红外热成像实验测得数据，发现多芯片 LED 模块每个芯片的温升趋势是一致的。

关键词：多芯片 LED 模块，热阻，热仿真，热耦合矩阵

Abstract

There are more and more requirements for high power devices in terms of wide applications of high-brightness white light-emitting diodes (LEDs), and therefore, the multi-chip LED emerges. For multi-chip LEDs, thermal coupling phenomena between chips is an important issue. Because the temperature rise of the chip is not only due to the heat generated by itself, but also due to the heat brought by thermal coupling effects among multiple chips. In this paper, we focus on studying thermal coupling problems for multi-chip LEDs. First, the theory of the temperature rise matrix of multi-chip modules has been derived. Then, the rationality of this temperature rise matrix has been verified by experiments. The main work of this paper includes the following aspects:

1. The thermal coupling model of multi-chip modules is generated and simplified. As well known, the single chip' temperature rise can be calculated by using the definition of the thermal resistance. For the single chip, its temperature rise is mainly due to the heat generated by itself. But for the multi-chip module, the temperature rise for each chip is composed of two parts, one is due to the heat generated by itself, and the other is due to the heat generated by the thermal coupling among chips. Each chip, treated as a heat source, may cause thermal coupling effects on its surrounding chips, and the temperature rise due to the thermal coupling effect can be called as the coupling temperature rise. According to the definition of the thermal resistance of the single chip, its heat transfer channel is mainly vertical. But there are both vertical channel and longitudinal channel for multi-chip modules. According to these two channels, we can re-define the thermal resistance of the multi-chip module. The temperature rise of each chip is calculated, and a matrix, which can be called as the temperature rise matrix, is derived. The temperature rise matrix can be further simplified according to the symmetry of the chip position in the multi-chip module. Finally, we illustrate the simplification process.

2. The thermal simulation is conducted to verify the rationality of the simplified temperature rise matrix. The main work of the first part is the thermal coupling model

of the multi-chip module, the temperature rise matrix of the multi-chip module, and the simplification of this temperature rise matrix. And the main work of this part is to verify the rationality of the temperature rise matrix through the thermal simulation of multi-chip modules. There are two kinds of samples used in this work. First, we have conducted a thermal simulation of each chip working individually, and obtain the temperature rise matrix by simulation. Second, we obtain the simplified temperature rise matrix according to simulation results. Third, comparison of the matrix coefficients between these two temperature rise matrix is carried out to confirm the rationality of this simplification.

3. The rationality of the temperature rise matrix for the multi-chip module is also verified by the experiment of testing the temperature through the forward-voltage method (FVM) and the thermal imaging method (TIM). The main work of the first part and the second part are proposing, simplifying, and confirming the temperature rise matrix. In the third part, we validate the rationality of the above model through experiments. Here, we have used two types of samples with different structures. The first sample has 1×3 module, 2×2 module, and 2×3 module. The second sample has 1×3 module. We measured the real temperature rise of each chip by experiments. Then we can deduce the temperature rise of each chip in other cases through the temperature rise matrix. By comparing the experimental data with the theoretical data, the rationality of the temperature rise matrix can be verified. At the same time, the temperature rise of each chip is tested by the TIM. It is concluded that the temperature rise remains consistent by comparing the experimental data measured by the FVM and the TIM.

Key words: Multi-chip module, thermal resistance, thermal simulation, thermal coupling matrix

摘要.....	I
目录.....	V
第一章 绪论	1
1.1 LED 的历史、现状和发展趋势	1
1.2 LED 的重要概述.....	1
1.2.1 LED 的发光原理.....	1
1.2.2 LED 的芯片结构和封装技术.....	2
1.2.3 LED 的主要参数.....	3
1.3 LED 的热阻测试方法.....	4
1.3.1 单芯片 LED 的热阻测试方法.....	4
1.3.2 多芯片 LED 的热阻测试方法.....	5
1.4 多芯片 LED 模块的现状和存在的问题	7
1.4.1 多芯片 LED 模块的现状.....	7
1.4.2 多芯片 LED 模块主要存在的问题.....	7
1.5 选题依据和主要工作.....	8
1.5.1 选题依据.....	8
1.5.2 主要工作	9
第二章 多芯片 LED 模块的热耦合模型.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 单芯片的热阻模型.....	11
2.3 多芯片 LED 的热阻模型	12
2.4 对称多芯片 LED 模块的热耦合矩阵简化	14
2.5 本章小结.....	17
第三章 多芯片 LED 模块的热仿真.....	18
3.1 引言.....	18
3.2 热仿真软件 COMSOL 介绍.....	18

3.3 多芯片 LED 模块的热仿真	19
3.3.1 仿真样品的结构属性	19
3.3.2 基于两种结构下的 1×3 多芯片 LED 模块的热仿真证实热耦合矩阵是对角矩阵	20
3.3.3 基于两种结构下的 1×3 多芯片 LED 模块的热耦合矩阵系数	22
3.3.4 多芯片 LED 模块的仿真与简化分析	26
3.4 本章小结	32
第四章 多芯片 LED 模块热耦合矩阵的实验验证	34
4.1 引言	34
4.2 热阻实验及实验结果分析	34
4.2.1 热阻测试仪 T3Ster 的工作原理	34
4.2.2 多芯片 LED 模块的热阻实验	35
4.2.3 多芯片 LED 模块的热阻实验结果分析	37
4.3 多芯片 LED 的红外热成像实验及芯片温升结果分析	40
4.3.1 红外热像仪的工作原理	40
4.3.2 多芯片 LED 模块的红外热成像实验及结果分析	41
4.4 本章小结	45
第五章 总结与展望	46
参考文献	48
硕士期间发表成果	53
致谢	54

Contents

Abstract.....	I
Contents	V
CH.1 Introductions	1
1.1 History, present state and development tendency of LED	1
1.2 Introductions on LEDs	1
1.2.1 Radiation theory of LED	1
1.2.2 Chip structure and encapsulate technology of LED	2
1.2.3 Main parameter of LED.....	3
1.3 Thermal resistance test method of LED.....	4
1.3.1 Thermal resistance test method of single-LED.....	4
1.3.2 Thermal resistance test method of multi-LED.....	5
1.4 Present state and existential questions of mult-chip	7
1.4.1 Present state of mult-chip	7
1.4.2 Main problems of mult-chip	7
1.5 Topic basis and main works	8
1.5.1 Topic basis	8
1.5.2 Main works	9
CH.2 Thermal coupling model of mult-chip	11
2.1 Introductions	11
2.2 Thermal resistance model of single-chip.....	11
2.3 Thermal resistance model of mult-chip.....	12
2.4 Temperature risr matrix simplification of mult-chip	14
2.5 Conclusions	17
CH.3 Thermal simulation of mult-chip	18
3.1 Introductions	18
3.2 Intruduction of simulaiton software COMSOL	18

3.3 Thermal simulation of mult-chip	19
3.3.1 The structural properties of the two material in the experimen	19
3.3.2 Temperature rise matrix has been confirmed by the simulation of 1×3 model in two structure	20
3.3.3 The temperature rise matrix coefficient of the mult-chip module	22
3.3.4 Simulation example and simplified analysisi of mult-chip module.....	26
3.4 Conclusions	32
CH.4 Thermal resistance test and thermal imaging experment	34
4.1 Introductions	34
4.2 Experimental and analytical results of thermal resistance	34
4.2.1 Working principle of thermal resistance tester T3Ster	34
4.2.2 Thermal resistance experiment of mult-chip module	35
4.2.3 Experimental result analysis	37
4.3 Experiment and experimental results analysis of infrared thermal imaging system	40
4.3.1 Working principle of infrared thermal imaging system.....	40
4.3.2 Experiment and experimental results analysis of infrared infrared imaging system ...	41
4.4 Conclusions	45
CH.5 Conclusions and expectations	46
References	48
List of reserch achievements	53
Acknoledgements	54

第一章 绪论

1.1 LED 的历史、现状和发展趋势

20 世纪 60 年代, 使用 GaAsP 材料应用 PN 结发光机理制成的 LED 光源, 这个时候只能发红光; 70 年代中期, LED 发展到黄光、绿光和橙光; 80 年代初期, 发光的亮度有很大的增大; 1996 年白光 LED 出现, 并在 1998 年正式推向市场; 随后随着技术的不断进步, LED 迅速发展。

在当今这个时代, LED 已经无处不在, 应用领域也日益广泛。主要有以下几个方面的应用: LED 采用固态封装具有结构牢固、光响应速度快、抗震耐冲击和寿命长的优点, 在各种室内外显示屏、交通信号和汽车用灯等领域已广泛应用^[1-2]; LED 由于耗电较低、无干扰、寿命长和性价比高等特点, 已经广泛应用于手机和电脑等高科技产品中^[3]; LED 光谱中没有紫外线和红外线, 没有热量辐射, 改善人们的生活居住环境, 是一种真正意义上的绿色光源, 越来越受到普通家庭的喜爱^[4]; 同时 LED 又可以节约能源^[5], 理论上可以达到白炽灯 10% 的能耗, 这对于能源节省有很大的意义。

现在对于 LED 灯来讲, 目前还存在以下问题: 一是, 内量子效率可以达到 90% 以上, 但是外量子效率仍普遍很低^[6], 如果能大幅度提高外量子效率, 就可大大提高 LED 的发光效率; 二是, 在一些应用领域, 对光源的显色指数要求很高, 一般来说显示指数和光效是负相关的^[7], 即显色指数高则光效会低些, 光效高的则显色指数会差一点; 三是, 随着 LED 广泛应用, 对 LED 的功率要求越来越高, 现在更大的功率的 LED 都是多芯片 LED 模组, 这样大量的 LED 芯片封装在一起会出现发热高的问题^[8-9], 所以解决散热也是很重要。所以对于 LED 发展趋势主要有它的发光效率、显色指数和多芯片 LED 的散热问题。

1.2 LED 的重要概述

1.2.1 LED 的发光原理

LED 的基本结构又 PN 结芯片、电极和光学系统组成^[10]。其中 PN 结是发光区域, 发光的主要过程主要有部分: 在正向偏压下的载流子注入, 复合辐射和光能传输, 如图 1.1 所示。在正向电压下, 由于大量电子和空穴的注入, P 区和 N

区的多数载流子向对方扩散，这时 P 区将注入电子少数载流子，N 区将注入空穴少数载流子，大量的空穴和电子在 PN 复合，复合时将能量以光的形式释放出来，整个过程是将电能转化为光能输出。

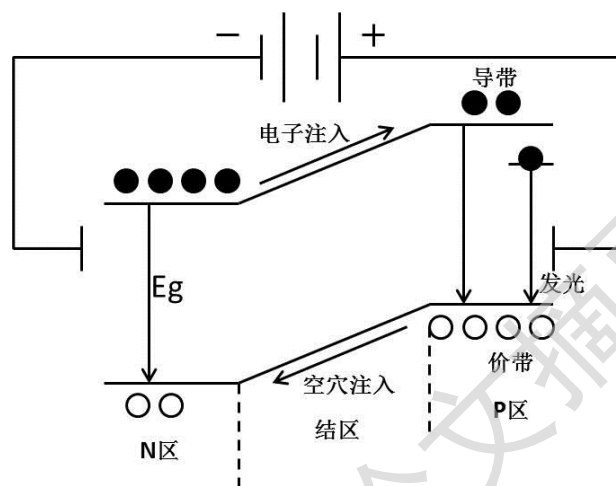


图 1.1 LED 的发光原理图

LED 可以发出不同颜色的光，即不同波长的光，我们知道光子是在复合过程中释放出来的，那么发光的波长主要取决于半导体的禁带宽度 E_g ， E_g 的单位是电子伏特 (eV)。半导体材料 E_g 在 1.63 ~ 3.26eV 之间时，就能产生可见光(波长在 380nm~780nm)。

1.2.2 LED 的芯片结构和封装技术

LED 产品主要有两部分组成：芯片和封装^[11]。要想掌握 LED 的相关问题必须掌握 LED 的芯片结构和封装技术，在此基础上对 LED 其他方面再深入进行学习。

芯片的组成部分主要是半导体材料的层叠，这些层叠结构构成了能发光的 PN 结。目前市场上的芯片结构主要有表面两个电极结构、垂直结构和倒装结构。两个电极结构优点是电极在表面，容易加工和打线；不足之处是由于表面的电极分布要牺牲一部分出光面积。垂直结构芯片优点是省去了电极，并且底部可以直接散热，内建电阻比较低；不足之处就是 LED 的 P 电极和 N 电极在 LED 的同侧，电流须横向流过 N-GaN 层，导致电流拥挤，局部发热量高，限制了驱动电流，而且由于蓝宝石衬底的导热性差，严重阻碍了热量的散热。倒装结构就是芯

片倒过来，电极在底部，克服了垂直结构中的电流问题和发光效率的弊端，倒转结构是目前中应用最广泛。

LED 封装是指对发光芯片的封装，LED 的封装不仅要求能够保护芯片并且能够透光。LED 的封装形式可以分为：引脚式封装、表面贴封装、功率型封装和 COB 封装。LED 引脚式封装是最先研发成功投放市场的封装结构，是采用引线架作为各种封装外型的引脚，其 90% 的热量是由负极的引脚架散发至 PCB 板，再散发到空气中，并且目前 LED 引脚式封装的封装材料多采用高温固化环氧树脂，其工艺适应性好，光性能优良，产品可靠性高，可做成有色透明、无色透明、有色散射和无色散射的透镜封装，而且透镜形状可以有多种外形及尺寸。表面贴装封装技术 (Surface Mounted Devices 简称 SMD)，封装形式转向 SMD 是整个电子行业发展大趋势，因为 SMD 很好地解决了亮度、平整度、视角、一致性、可靠性等问题，采用更轻的 PCB 板和反射层材料，显示反射层上需要填充更少的环氧树脂，去除了较重的碳钢材料引脚，通过降低重量，缩小尺寸，可轻易地将产品重量减轻一半，使得应用更趋完美，特别适合户内，半户外全彩显示屏应用。COB 封装 (Chip on board) 可将多颗芯片直接封装在金属基印刷电路板 MCPCB，通过基板直接散热，这种结构的封装不仅具有减少热阻的散热优势，还能减少支架的制造工艺及其成本。从成本和应用角度上来看，COB 将成为未来灯具化设计的主流方向，COB 封装的 LED 模块是在底板上安装多枚 LED 芯片，多芯片 LED 的存在不仅能够提高亮度，还有助于实现多芯片 LED 模块的合理配置，降低单个 LED 芯片的输入电流以达到高效率，而且这种面光源需要扩大封装的散热面积，而更大的散热面积会使热量更容易传导至外壳。

1.2.3 LED 的主要参数

为了提高 LED 技术方面的交流和推广，我们需要知道 LED 的主要参数有光学参数、色度学参数和热学参数。

LED 的光学参数^[12]重要的几个参数有：波长、光通量、发光效率、发光强度和发光亮度。从 LED 的光谱上我们可以看出它的单色性，光谱是由不同波长下的强度分布，波长的单位是 nm。光通量是辐射能量和视见函数的积分，光通量的单位是流明 (lm)。发光效率是光通量与电功率的比值，发光效率是衡量现代光源节能的一个重要指标。发光强度是指光源在指定方向上的立体角内的光通

量的多少，发光强度的单位是坎德拉 (candela 简称为 cd)。发光亮度是指发光体表面上单位投射面积在单位立体角内所辐射的光通量，单位为 cd/m^2 或 Nit。目前用于测试 LED 的光学参数的主流方法是积分球法和分布光度计法两种^[13]。积分球法直接测试 LED 的光学和色学参数，分布光度计法是测量光强随空间的角度变化时的光学参数。

LED 的色度学参数^[14]重要的几个参数有：色温、显示指数和色坐标。色温是指发光体发出的颜色与黑体发出相同时，黑体的温度称为发光体的颜色温度。显色指数是评价光源显示物理颜色能力的指标，黑体的显色能力是 100，挑选 8 个标准色板，用它的颜色在黑体和被测发光体下的表现做比较，这样得到显示指数 Ra。色坐标是指物体的颜色在 CIE 色度图上的色度坐标值，主要用来反映 LED 光源所表示出来的物理颜色，色坐标比色温表示的颜色更精确清楚。

LED 的热学参数重要^[15]的几个参数有：结温和热阻。结温是指 LED 芯片 PN 结的温度，结温的变化会严重影响到 LED 的光效、色温、发光波长、配光和光效等光学和电学参数。热阻的定义是热通道上的温升差与热通道上消耗的热功率的比值，热阻是用于评估 LED 散热效能的指标，也是热设计中一个重要参数。

1.3 LED 的热阻测试方法

1.3.1 单芯片 LED 的热阻测试方法

芯片的热阻和结温是反应芯片热特性的两个重要的参数，目前 LED 结温测量方法主要有正向电学参数法^[16-17]、电致和光致发光法^[18-19]、显微拉曼光谱法^[20]、微型热敏电阻^[21]和红外热成像法^[22]等等。电致和光致发光是基于 LED 光谱的参量，如峰值，波长和半高宽等随着结温的升高而偏移的原理，经过校准后得到这些参量与温度之间的关系系数，通过它们之间的关系系数可以算得不同条件下的光谱参量大小对应的结温大小；显微拉曼光谱的依据是拉曼散射谱中的 Stokes 和 Antistokes 谱线在不同温度下有不同的移动量，根据移动量来得到温度大小；红外热像仪的依据是物体表面的红外辐射可以反映不同的温度情况，通过光学系统将物体表面的红外辐射映射到探测器上，再进一步转化为电信号，这样我们得到的红外热像仪图是一张温度分布图。目前使用最普遍的 LED 结温测量方法是正向压降法。对于一些不能使用接触法测量热阻的可以通过非接触式测热阻，非

接触式测量主要是通过光谱参数反应结温变化。

正向电学参数法是目前测试 LED 热阻最常用、最有效的方法，这种方法具有非破坏性和快速的特点。电学法的理论基础是正向电压法，正向电压法就是利用 LED 器件在热稳态的状态下两端的正向电压和结温之间的线性关系，再通过将大电流迅速切换成小电流测试其正向电压，然后再转换成温度的方法来测试 LED 器件的结温的。如图 1.2，大电流 I_{Force} 是为了保证 LED 能处于正常工作状态；小电流 I_{sense} 是测试电流，大电流迅速变换成小电流，在小电流下捕捉 LED 的电压值；DVM 是实时测试电压；Meas.Ch.是实时监测通道。针对单芯片的电学测试，要求电压在 0-5V 内，要在做实验前确保正常工作下两端的电压范围，如果电压超过 5V 需要加反向电压，这样做的是为了保证要测试的总电压在 0-5V 内。

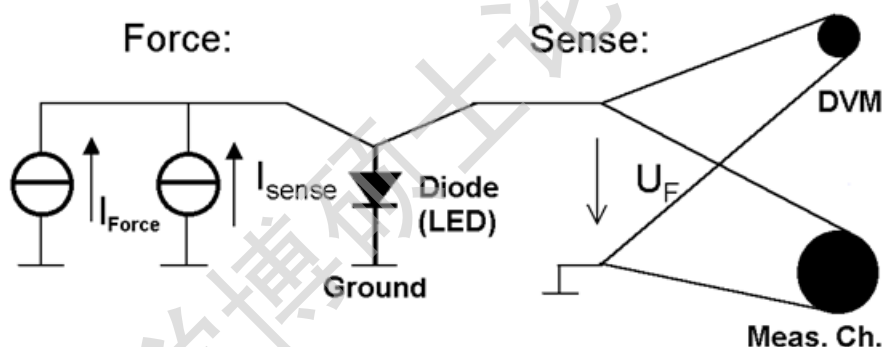


图 1.2 单芯片 LED 的电学测试原理图

1.3.2 多芯片 LED 的热阻测试方法

对于多芯片 LED 模块来说，上面的芯片个数是两个以上，多芯片 LED 每个芯片的热阻测试方法是采用多通道测试方法，用多通道测试方法时显示的电压是所有芯片两端的总电压，这个时候多芯片 LED 模块上的电压肯定超过 5V，所以多芯片 LED 的热阻测试需要加负向偏压，这个负向偏压值是我们总的工作电压减去 5V，这样总的电压值减去负向偏压值就一定在 0-5V 内。多芯片 LED 模块测试原理如图 1.3，大电流 I_{Force} 是为了保证 LED 能处于正常工作状态；小电流 I_{sense} 是测试电流，大电流迅速变换成小电流，在小电流下捕捉 LED 的电压值；DVM 是实时测试电压；Meas.Ch.是实时监测通道，多芯片 LED 的 Meas.Ch.

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.