

学校编码: 10384
学号: 19820121152755

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

InGaN/GaN 多量子阱垂直结构太阳能电池 研究

Study of vertical structure InGaN/GaN MQWs solar cells

余健

指导教师姓名: 张保平教授

专 业 名 称: 光伏工程

论文提交日期: 2015 年 月

论文答辩时间: 2015 年 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 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(厦门大学微纳光子学研究中心)课题(组)的研究成果,获得(张保平 教授)课题(组)经费或实验室的资助,在(厦门大学物理系)实验室完成。

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。

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

近年来,以氮化镓(GaN)、氮化铝(AlN)和氮化铟(InN)为代表的第三代半导体成为国际研究热点。它们具有吸收系数高、迁移率高、抗辐射能力强等特性,是很好的光伏材料。合金材料 InGaN 的带隙可调,其光谱响应区域可覆盖大部分太阳光光谱,是高效率太阳能电池的理想材料。垂直结构的 InGaN 太阳能电池具有电流分布均匀且可通过生长底部反射镜的方法减少光透过损失的特长受到极大关注。在本文研究中,我们对垂直结构 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的制作、性能测试和理论模拟进行了详细的研究。具体内容如下:

(1) 利用磁控溅射设备制备了低电阻率、高透过率的 ITO 薄膜作为 InGaN 材料太阳能电池的 p 型电极。具体分析了基底温度、Ar 气压强、射频电源溅射功率、直流偏压、退火温度和退火时间对 ITO 薄膜性能的影响。最后得到了电阻率为 $2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, 透过率最高可达 98.9% ITO 薄膜,可作为太阳能电池良好的 p 型接触层和电流扩展层。

(2) 提出利用 Ni/Ag/Ni/Au 作为垂直结构 InGaN 太阳能电池的底部反射镜。利用 AFM、SEM 等测试方法研究了 Ag 厚度和 Ni 厚度对反射镜反射率的影响,制作出了在波长 470nm 处反射率高达 94% 的反射镜。

(3) 系统模拟了谐振腔增强(RCE)结构对 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的量子效率的影响。研究了谐振腔增强型太阳能电池的腔长、顶部反射镜和底部反射镜的反射率对其量子效率的影响。模拟发现相比传统结构, RCE 结构电池的短路电流密度可以提高到 2.17 倍,光电转换效率可以提高到 2.16 倍。

(4) 利用胶键合技术,成功制作了垂直结构 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池。光敏胶作为粘结剂不仅简化了工艺且对器件性能影响不大。利用抛光技术对激光剥离后的样品进行抛光,有效地使样品表面 RMS 由 17.28 nm 降至 2 nm,使得后续工艺顺利进行。测试发现与传统结构相比,垂直结构电池的短路电流由 0.55 mA/cm^2 提高到 0.74 mA/cm^2 ,最后转换效率由 0.64% 提高到 0.92%,拓展吸收层光谱响应范围后转换效率提高到 1.165%。

关键词：RCE ； 量子效率； MQWs； 垂直结构；

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

As the third generation semiconductor material, GaN, AlN and InN have become a hot research field internationally. They have many advantages such as high absorption coefficient, high carrier mobility, high saturation velocity, and superior radiation resistance, which make them the good PV material. The InGaN alloy has tunable bandgap, which make it the ideal material for realizing full spectrum solar cells for high efficiency solar cells. Vertical structure technique for InGaN/GaN MQW solar cells allows to grow a bottom reflector to increase the light absorption and make the current smooth. That makes vertical structure solar cells cause a lot of attention. In the present work, the fabrication, characterization and simulation of vertical structure InGaN/GaN MQW solar cells were studied in details. The main contents are summarized as the follows:

(1) The ITO film with low resistivity and high transmittance was fabricated as InGaN solar cells p-type electrode using Magnetron Sputtering. We analysis the effect of sample temperature, Ar pressure, sputtering power, DC voltage, annealing temperature and annealing time on ITO film resistivity. The ITO film with resistivity $2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ and transmittance 98.9% was obtained as p-type contact layer and current extension layer for solar cells.

(2) A metallization scheme of Ni/Ag/Ni/Au has been developed for obtaining high reflectivity as vertical-type InGaN solar cells. We studied the effect of Ni thickness and Ag thickness on its reflectivity using AFM and SEM. We improved the reflectivity up to 94% (470nm).

(3) We systematically studied the effect of RCE structure on the quantum efficiency of InGaN/GaN MQW solar cells. We also estimate the best parameters of the RCE structure, which include the thickness of layers, the reflectivity of top mirror and bottom mirror. The RCE InGaN/GaN MQW solar cells show an enhancement in short circuit current density by 2.17 times and conversion efficiency by 2.16 times,

compared to that of a conventional InGaN/GaN MQW solar cell.

(4) The vertical structure solar cells has been achieved by using wafer bonding. Photosensitive glue as binder makes the process simple and would not affect the device performance. We make process smoothly by using the polishing technology to make the RMS of sample decreased from 17.28 nm to 2 nm. The short circuit current density of the vertical structure solar cells improve from 0.55mA/cm² to 0.74 mA/cm² and conversion efficiency improve from 0.64% to 0.92%, compared to that of a conventional InGaN/GaN MQW solar cell. We also improve the conversion efficiency to 1.165% by enhancing the absorbable spectral range.

Keywords: RCE; Quantum efficiency; MQWs; Vertical structure;

目录

摘要	I
Abstract	III
目录	V
TABLE OF CONTENTS	VII
第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 太阳能电池发展的历史进程	1
1.1.2 InGaN 太阳能电池的研究意义	4
1.1.3 InGaN 太阳能电池的发展现状	6
1.1.4 InGaN 太阳能电池存在的问题	7
1.2 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的特点	9
1.3 本论文的研究内容与结构安排	10
参考文献	11
第二章 InGaN 太阳能电池研究基础	15
2.1 太阳能电池基本原理	15
2.1.1 太阳能电池的基本工作原理	15
2.1.2 太阳能电池的 J-V 特性及主要表征参数	17
2.2 太阳能电池模拟	23
2.2.1 电池模拟的意义	23
2.2.2 电池模拟的历史	24
2.2.3 wxAMPS 软件介绍	24
2.3 本章小结	27
参考文献	28
第三章 垂直结构 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池关键工艺研究	29
3.1 透明电极 ITO 的优化	29
3.2 底部反射镜的测试结果与分析	37
3.2.1 Ag 厚度的影响	37
3.2.2 Ni 厚度的影响	41
3.3 本章小结	42
参考文献	43
第四章 垂直结构 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池模拟	45
4.1 谐振腔结构对 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池量子效率的影响	45
4.2 电池结构优化	49
4.2.1 腔长 L 的优化	50
4.2.2 底部反射镜反射率 R_2 的优化	51
4.2.3 顶部反射镜反射率 R_1 的优化	52
4.2.4 wxAMPS 软件模拟	54
4.3 本章小结	55
参考文献	55
第五章 垂直结构 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的研制	57
5.1 制作过程	57
5.2 性能测试与分析	60

5.3 本章小结.....	65
参考文献.....	65
第六章 结论与展望.....	67
硕士期间发表的论文.....	69
致谢	70

厦门大学博硕士论文摘要库

TABLE OF CONTENTS

Chapter I Introduction	1
1.1 Research Background and Significance	1
1.1.1 Developments of Solar Cells	1
1.1.2 Research significance of InGaN Solar Cells	4
1.1.3 Research Progress of InGaN Solar Cells	6
1.1.4 Problems and Challenges of InGaN/GaN MQWs Solar Cells	7
1.2 The Characteristics of InGaN/GaN MQWs Solar Cells	9
1.3 Main Works and Structural Arrangement	10
References	11
Chapter II The Basics of InGaN Solar Cells Research	15
2.1 Fundamentals of Solar Cells	15
2.1.1 Working Principle	15
2.1.2 J-V Characteristics & Main Characterization Parameters	17
2.2 Simulation of solar cells	23
2.2.1 Significance of simulation	23
2.2.2 History of simulation	24
2.2.3 The introduction of wxAMPS software	24
2.3 Concluding Remarks	27
References	28
Chapter III Research of key technologies for vertical structure	
InGaN solar cells	29
3.1 ITO optimization	29
3.2 Results of bottom reflector	37
3.2.1 The effect of Ag thickness	37
3.2.2 The effect of Ni thickness	41
3.3 Concluding Remarks	42
References	43

Chapter IV Simulation of RCE-type InGaN/GaN MQWs Solar Cells	45
4.1 The effect of RCE structure on quantum efficiency	45
4.2 Optimization of RCE structure	49
4.2.1 Optimization of the total thickness of solar cells	50
4.2.2 Optimization of the reflectivity of bottom reflector	51
4.2.3 Optimization of the reflectivity of top reflector	52
4.2.4 Simulation of wxAMPS software.....	54
4.3 Concluding Remarks	55
References	55
Chapter V Fabrication of vertical structure InGaN/GaN MQWs	
Solar Cells	57
5.1 Fabrication progress	57
5.2 Performance Analysis	60
5.3 Concluding Remarks	65
References	65
Chapter VI Conclusions & Prospects	67
Achievements	69
Acknowledgements	70

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

目前,伴随着人类生产力和经济的迅猛发展,使得我们赖以生存的地球资源日益消耗,全球性的能源问题愈来愈突出。当前,我们主要依赖的能源有煤炭、石油、天然气、油页岩等,其中煤炭、石油和天然气三种能源是一次能源的核心,它们是全球能源的基础。然而,它们的消耗使得全球的平均气温逐步上升,造成南极冰川融化,危害我们的生产和生活环境。不仅如此,传统能源的消耗会释放大量的有毒气体造成雾霾等环境问题。为了应对这些问题,人类已经开放许多新型的替代能源,例如核能、太阳能、地热能、风能、潮汐能^[1]。其中,专家预测核能和太阳能将会是人类主要利用能源^[2]。然而,核反应能源的安全问题一直无法解决。为了降低对环境质量的损害,开发和利用太阳能应当给予高度重视。太阳能光伏技术是通过转换装置把太阳辐射能直接转换成电能^[3]。目前,光电转换装置通常是利用半导体器件进行光电转换的,由于其拥有光伏效应,因此又称太阳能光伏技术。这二十多年来,对太阳能的技术研究、商业化生产、市场拓展等各方面都取得了深远的发展,成为全球快速、稳定发展的新兴能源产业之一。

从 1954 年贝尔实验室制备出单晶硅太阳能电池起^[4],科研工作者们都一直在寻找新型高效率的太阳能电池。InGaN 作为第三代半导体材料,拥有高质量的光伏特性,这使得它有希望作为高效率的太阳能电池。近年来,业界也逐渐关注 InGaN 材料。随着制造技术和设备不断进步与革新,相信 InGaN 太阳能电池将会得到广泛的应用。

1.1.1 太阳能电池发展的历史进程

太阳能转换的历史与当代的科学发展历史有着非常密切的联系。在所有研究中,物质与光的相互作用一直被定位在中心位置。1900 年,普朗克通过建立黑体辐射定理奠定了量子物理基础,他第一次提出了电磁波辐射与吸收过程中波长与能量之间的关系。贝克勒尔在法国首次研究了光对物质的作用。他研究了光对

电解液中的金属电极和金属盐的影响，发现光照会改变硒的导电性。1876 年，在硒的全固态系统中也观察到类似现象。后来，研发了以硒和氧化亚铜作为材料的光电池。虽然在 1941 年就报道了硅电池，但直到 1954 年，在贝尔实验室出现了现代意义上硅电池的的产品。因为它是第一个可以以适当效率将太阳能转化为电能的光伏器件，所以硅电池的出现标志着太阳能光伏电池研究工作取得历史性突破。

上世纪六十年代，由于太空领域的发展，空间太阳能电池制造已经非常成熟，包括国际空间站、航天器、人造卫星等在内的绝大部分仪器的供电来源都是太阳能电池。航空工业的迅猛崛起也使得太阳能电池研究与制造进入了蓬勃发展的时代^[5]。

上世纪七十年代，苏联研制出了世界上第一块 GaAs 异质结太阳能电池。由于世界性的石油危机使得许多发达国家决定大力开展可再生能源的研发工作，这使得太阳能电池的大规模地面使用得到实现。政府的扶持也使得市场愈来愈繁荣，太阳能电池的制造成本也在逐年下降。

上世纪八十年代，美国制造出了世界上第一个光电转换效率超过 10% 的 CuInSe 电池。在随后的几年中，出现大量新的制造工艺，不同材料的太阳能电池转换效率也在不断的创造纪录，比如澳大利亚新南威尔士大学在 1985 年制造了转换效率超过 20% 的硅太阳能电池，砷化镓电池转换效率高达 22.5%。一系列的商业化的太阳能电池制造企业也欣欣向荣。美国 Acro Solar 生产了世界上第一个商业化的薄膜 a-Si 太阳能电池。这说明了太阳能电池被广泛地使用有了可能，标志着太阳能电池能够进入民用领域。

上世纪九十年代，由于太阳能电池的公用电力并网发电技术取得的重大突破，德国率先提出了“2000 个光伏屋顶计划”。随后各个发达国家先后都启动了各自的“屋顶计划”，例如美国的“克林顿总统百万屋顶计划”和日本的“新新阳光计划”等等。这些政府主导的计划都使得太阳能电池的研究得到了充足的资金和相关的产业支持。大型的光伏电站也相继建成并且投入使用。

进入 21 世纪后，澳大利亚的奥林匹克运动会供电是由大量的太阳能电池组件完成的。新南威尔士大学的 M.A. Green 教授按照能量转换效率和生产成本将太阳能电池分为三代^[6]。

第一代太阳能电池：由晶体硅及其他半导体单一材料制成的太阳能电池。自从贝尔实验室发明晶体硅太阳能电池以来，晶体硅已经发展了半个多世纪。由于技术的不断完善，目前商业上利用最广泛的就是这种第一代太阳能电池，约占太阳能电池市场份额的 90%。M.A. Green 研究小组制造的单晶硅电池转换效率记录一致保持至今^[7]。

第二代太阳能电池：主要以薄膜材料为主，其主要结构覆盖于价格比较低廉的基底材料之上、薄膜的厚度仅为几个微米的太阳能电池吸收薄膜。其基底可以是玻璃或者是陶瓷等廉价材料。与第一代太阳能电池相比，第二代太阳能电池的转换效率不及第一代，最高约为 20%。但是，由于近年来，硅材料价格不断上涨使得第一代太阳能电池的制造成本迅速上升，这使得薄膜电池凭借较低的制造成本优势在市场中有较强竞争力。

第三代太阳能电池：包括利用不同材料相互叠加而成的叠成电池、量子点太阳能电池、热载流子电池、多激子产生太阳能电池、光化学太阳能电池、高分子太阳能电池，还有利用红外部分能量的中间带电池等新型太阳能电池。它们主要的优点是极高光电转换效率、性能稳定、制作工艺流程简单、材料成本低等。与第二代电池的不同，第三代太阳能电池的转换效率将远远超过第一代（经过了十几年的发展单晶硅电池的转换效率一直在 25%左右，无法取得革命性的突破）。这一代电池理念的提出将为未来太阳能电池的全面使用提供了可能，目前许多科研人员正在研究第三代太阳能电池，相信在未来会取得重大突破。

当前，第三代太阳能电池转换效率的最高纪录为 44%（在 947 倍太阳光照下），这是 2012 年美国 Solar Junction 创造的。他们制造的是多结聚光太阳能电池。在非聚光条件下，双节和双节以上的太阳能电池光电转换效率分别是由美国的 Alta Devices 和 Boeing Spectrolab 的 30.8%和 37.8%。图 1.1 是由美国可再生能源实验室提供的不同类型太阳能电池的最高转换效率记录图。

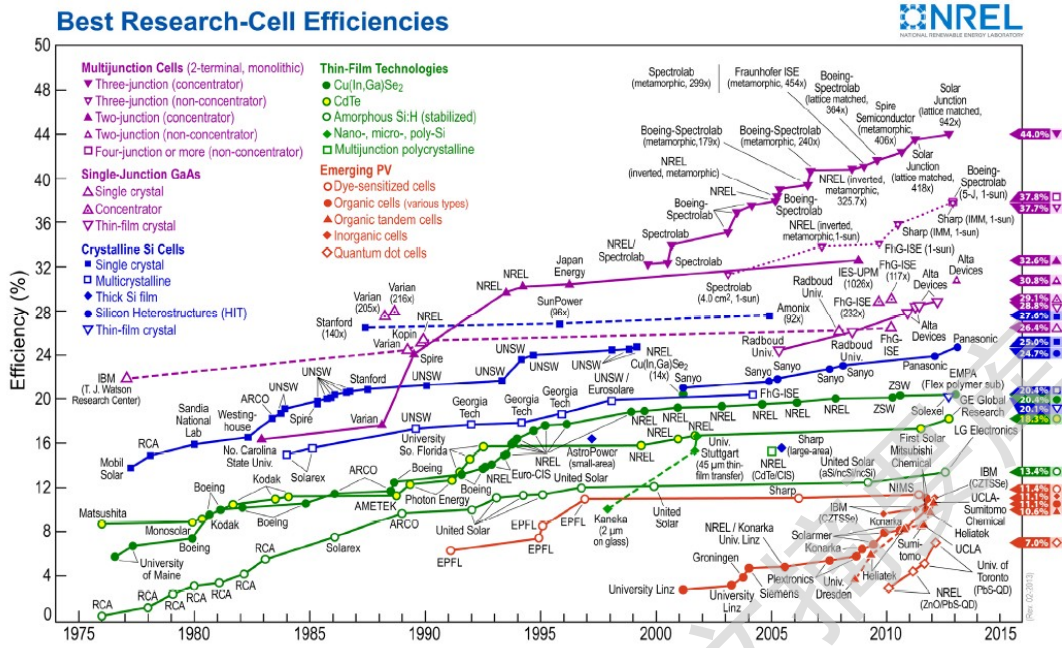


图 1.1 美国可再生能源实验室提供的不同类型太阳能电池最高效率

在新的时代背景下，提高太阳能电池的应用范围和比例具有重大意义，对人类文明的可持续发展奠定坚实的基础。随着制作工艺的不断发展和新材料的发现及利用，太阳能电池的制造将会变得愈来愈简单及环保，这对我们赖以生存的地球环境和有限的地球资源来说是及其利好的。不仅如此，太阳作为可持续为人类提供能源的源头，它辐射的能量及持续能量超过任何我们所拥有的资源。综上所述，虽然太阳能光伏的发展道路委蛇崎岖，但它能够为人类的未来带来新的发展动力^[8]。

1.1.2 InGaN 太阳能电池的研究意义

III-V 族化合物材料有许多的优点，比如，它们具有较大的光吸收系数，大部分都是直接带隙的能带材料，而且具有非常强的抗辐射能力和不受温度影响，因此 III-V 族材料的太阳能电池愈来愈成为最前沿的研究热点^[9]。作为 III-V 族化合物材料中的一种，InGaN 太阳能电池由于宽广的能带间隙，使得其可以成为高效的全光谱太阳能电池。目前来说，对 InGaN 太阳能电池的研究与其他类型的电池相比比较少，处在初级阶段，但是随着这几年来迅猛发展，已经成为了全世界科研小组的热门研究对象。在 III-V 族化合物材料中，InN 和高 In 组分的 InGaN

化合物材料以极其不同的性质慢慢地成为一个研究热点。InN 的禁带宽度在早期一直被认为为 1.89eV，导致这样的测量结果原因是基于溅射生长的 InN 的光吸收实验。2002 年后，许多科研小组开始运用外延手段（MOCVD 和 MBE）生长了质量较高的 InN 薄膜，测量发现比 1.89eV 更小的光吸收边和光荧光发光，大概在 0.7eV 左右^[10]。伴随 InN 的禁带宽度变更为 0.7eV，InGaN 太阳能电池对太阳光谱吸收范围由 InN(0.7eV)的红外波段一直覆盖到 GaN(3.4eV)的紫外波段，这样大大地提高了电池的光谱响应范围。通过改变 InGaN 合金的组分，就可以制造完全匹配太阳光谱的电池，如图 1.2 所示。

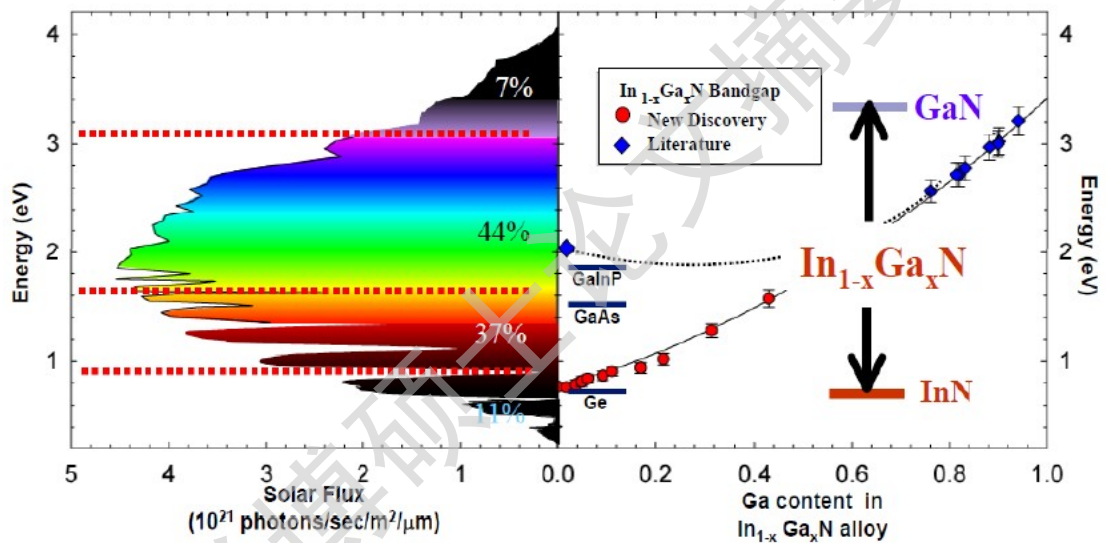


图 1.2 In_{1-x}Ga_xN 材料带隙对应的太阳光谱覆盖范围

InGaN 材料可作为太阳能电池材料除了上述的在禁带宽度（0.7eV~3.4eV）连续并且可调控外，还有诸多优点：InGaN 材料太阳能电池可以在极其恶劣或者是高温的环境下正常工作，因为它具有耐高温、抗辐射、高硬度、耐腐蚀等一系列优点。与 GaAs 电池相比，它无毒环保的优点尤为突出。实验表明，InGaN 材料的抗辐射能力非常的强，被高能粒子轰击后，InGaN 材料的光学性质和电学特性都没有发生显著变化。综上所述的这些优点足以证明它可作为良好的太空电池。另外，由于 GaN 和 InN 都是直接带隙半导体，所以 InGaN 在所有的 In 组分区间内都是直接带隙半导体，这个特性使得 InGaN 材料具有极高的吸收系数。在 1997 年 Muth 等人^[11]发现 InGaN 的吸收系数可达 10^5cm^{-1} ，这代表着 98% 以上的光可被约 400nm 左右的 InGaN 材料吸收^[12]。这也使得在制造 InGaN 太阳能电池时，在原料节约问题上可以有比较大的商业优势。所以，对 InGaN 太阳能的

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.