



# 2014诺贝尔物理奖的启示及我国 半导体照明现状和未来

李晋闽

中国科学院半导体研究所  
中国科学院半导体照明研发中心  
半导体照明联合创新国家重点实验室

2015.1.11





# 报告内容

- 一、诺贝尔奖背景介绍**
- 二、2014诺贝尔物理学奖获奖解读**
- 三、LED技术及产业二十年**
- 四、LED超越照明应用发展趋势**
- 五、结束语**

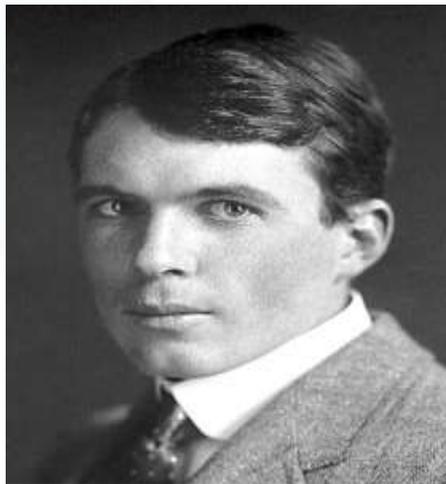




## 百年诺贝尔



目前为止，只有一个人两次获得过物理学奖，约翰·巴丁 (John Bardeen)，两次获奖分别在1956年和1972年，半导体晶体管+BCS超导理论。



最年轻的诺贝尔物理学奖获得者，劳伦斯·布拉格 (Lawrence Bragg) 1915年与父亲一同获得诺贝尔物理学奖时，年仅25岁。



最年长的诺贝尔物理学奖获得者，小雷蒙德·戴维斯 (Raymond Davis Jr.) 2002年获得诺贝尔物理学奖时，已有88岁高龄。



# 诺贝尔物理学奖



## TOP 10

### NOBEL LAUREATES IN PHYSICS SORTED BY FIELD

1. Particle physics (34)
2. Atomic physics (28)
3. Condensed matter physics (28)
4. Instrumentation (21)
5. Nuclear physics (17)
6. Electromagnetism (14)
7. Astrophysics (13)
8. Quantum mechanics (11)
9. Optical physics (10)
10. Superconductivity (9)

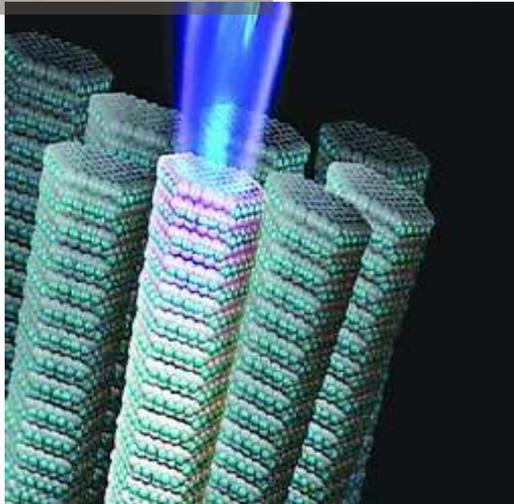


## 获得物理奖最多的Top10领域

粒子物理学拔得头筹, 然后依次为原子物理、凝聚态物理、仪器装置、核物理、电磁学、天体物理、量子力学、光学、超导等。



## 诺贝尔物理学奖



杨培东，

加州大学伯克利分校教授，

主要贡献：纳米线光子学。

1985年-1988年 就读于吴县木渎中学。

1988年-1993年中国科技大学化学系学习。

1993年-1997年美国哈佛大学获博士学位。

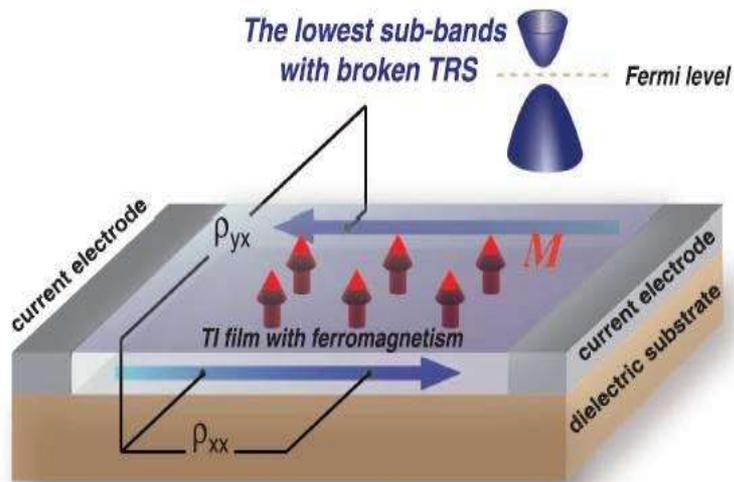
## 汤森路透预测2014年诺贝尔物理学奖得主

张首晟，

斯坦福大学教授，主要贡献：拓扑绝缘体

1978年-1983年 复旦大学。

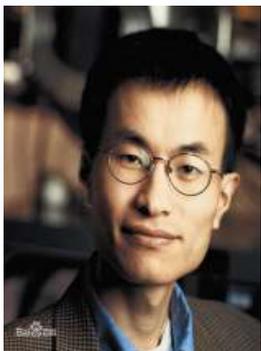
1983年-1987年 纽约大学石溪分校获博士学位（师从杨振宁）。





# 诺贝尔物理学奖

## 潜在诺贝尔奖得主的素质



好奇心



想象力



质疑精神



独立精神



# 诺贝尔物理学奖

**第一代半导体材料，以Si、Ge为代表**





## 诺贝尔物理学奖

1947年12月23日

第一只Ge晶体管

1956年获诺贝

尔物理学奖



J. Bardeen

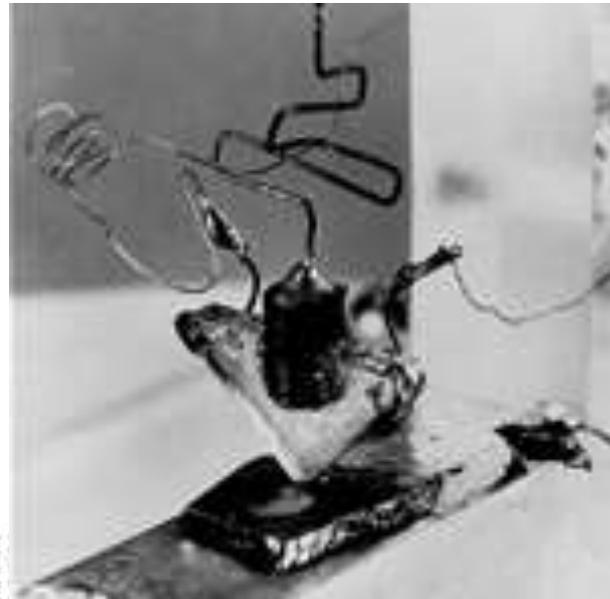


W. Brattain



W. Shockley

晶体管的发明是20世纪中叶科学技术领域有划时代意义的大事。晶体管比电子管体积小、耗电省、寿命长、易固化，它的诞生使电子学发生了根本性的变革。





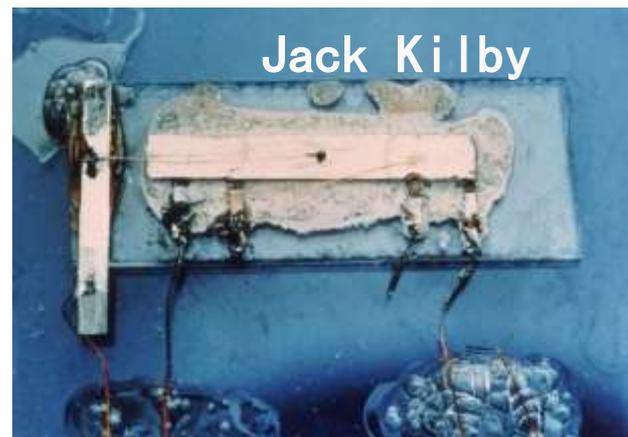
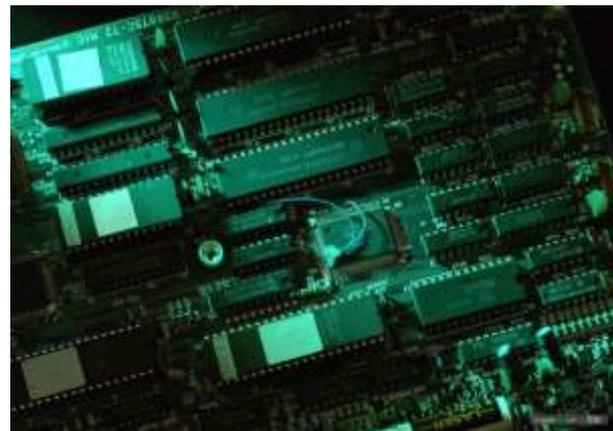
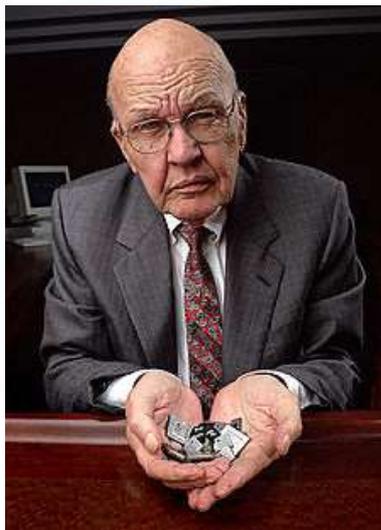
## 诺贝尔物理学奖

1958年

IC

J. S. Kilby

2000年获诺  
贝尔物理学奖



1958年第一块集成电路：TI公司Jack Kilby博士，12个器件，Ge晶片。

奠定了全世界微电子产业的基础



## 诺贝尔物理学奖

1958年

半导体和超导体中的  
隧道效应

Leo Esaki  
Ivar Giaever  
Brian Josephson

1973年获诺贝尔  
物理学奖



Brian Josephson



Ivar Giaever



Leo Esaki

1973年诺贝尔物理学奖一半授予美国IBM 瓦森研究室中心的江崎玲于奈(Leo Esaki, 1925-- ), 美国通用电气公司的贾埃沃(Ivar Giaever, 1929-- ), 以表彰他们分别在有关半导体和超导体中的隧道现象的实验发现; 另一半授予英国剑桥大学的约瑟夫森 (Brian Josephson, 1940-- ), 以表彰他对穿过隧道壁垒的超电流所作的理论预言, 特别是关于普遍称为约瑟夫森效应的那些现象。



# 诺贝尔物理学奖

1966年

CCD

Willard Boyle  
George E.  
Smith

2009年获诺  
贝尔物理学奖



Willard Boyle & George Smith





# 诺贝尔物理学奖

**第二代半导体材料，以GaAs、InP为代表**



# 诺贝尔物理学奖

1980年

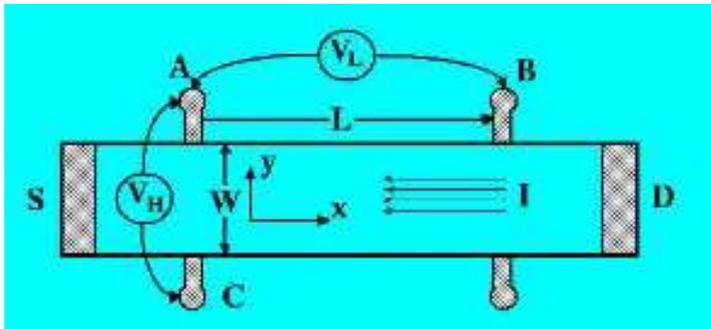
量子霍尔效应

Klaus von Klitzing

1985年获诺贝尔物理学奖



Klaus von Klitzing



霍尔效应是1879年美国物理学家霍尔研究载流导体在磁场中导电性质时发现的一种电磁效应，广泛应用于半导体研究。

1980年一种新的霍尔效应又被发现，这就是德国的冯·克利钦从金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)中发现的量子霍尔效应。





# 诺贝尔物理学奖

1980年

分数量子霍尔效应

Robert B. Laughlin  
Horst L. Stormer  
Daniel C. Tsui



Robert B. Laughlin



Horst L. Stormer



Daniel C. Tsui

美国斯坦福大学的劳夫林 (Robert B. Laughlin, 1950-- )

美国哥伦比亚大学与贝尔实验室的施特默 (Horst L. Stormer, 1949-- )

美国普林斯顿大学电气工程系的崔琦 (Daniel C. Tsui, 1939-- ), 发现了一种具有分数电荷激发状态的新型量子电子流, 这种状态起因于所谓的分数量子霍尔效应。

凝聚态物理学在20世纪有极大的发展, 分数量子霍尔效应正是继高温超导之后凝聚态物理学又一项崭新课题。



# 诺贝尔物理学奖

1970年代

Semiconductor  
Heterostructures

Z. I. Alferov  
H. Kroemer

2000年获诺贝尔  
物理学奖



Herbert Kroemer & Zhores I. Alferov

俄罗斯圣彼得堡约飞物理技术学院的若尔斯 阿尔费罗夫

美国加利福尼亚大学的赫伯特 克勒默

他们在半导体异质结方面的工作，广泛应用于高速电路、光电子器件中，奠定了现代通信技术的基础。





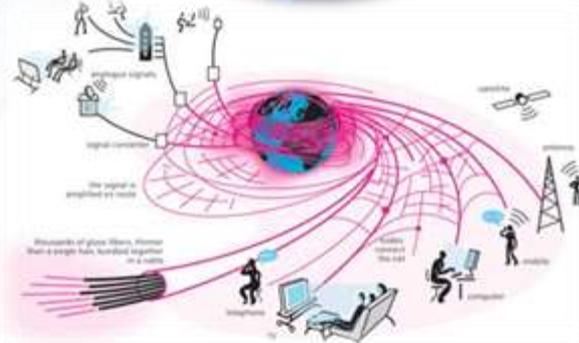
# 诺贝尔物理学奖

1965年

Optical fiber

Charles K. Kao

2009年获诺贝尔物理学奖



Charles Kuen Kao

1965年高锟提出了利用石英纤维传输光信号 (Fiber-optic communication) 的概念,并验证了其可行性,被誉为“光纤之父”。



# 诺贝尔物理学奖

**第三代半导体材料，以GaN、SiC为代表**





# 诺贝尔物理学奖

1993年

GaN Blue LED

Isamu Akasaki

Hiroshi Amano

Shuji Nakamura

2014年获诺  
贝尔物理学奖



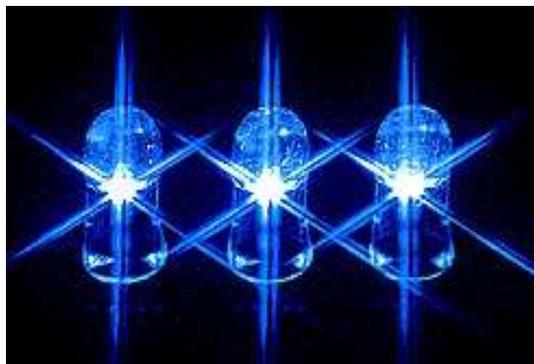
赤崎勇



天野浩



中村修二



成功研制出GaN基蓝光LED,  
并在此基础上研制出白光LED, 提  
出半导体照明的概念。





# 报告内容

- 一、诺贝尔奖背景介绍
- 二、2014诺贝尔物理学奖获奖解读
- 三、LED技术及产业二十年
- 四、LED超越照明应用发展趋势
- 五、结束语





## 诺贝尔物理学奖获奖解读

# 2014年诺贝尔物理学奖

2014年10月7日，贝尔奖委员会主席皮尔·德尔辛教授宣布2014年诺贝尔物理学奖授予：

## “蓝光发光二极管”

获奖理由 “发明了高效蓝光二极管，带来了明亮而节能的白色光源”。



赤崎勇



天野浩



中村修二



## 诺贝尔物理学奖获奖解读

### 为什么是GaN蓝光LED？

- 改变了人类照明历史，带来了照明方式的革命；
- 能节约大量能源，减少环境污染；
- 推进了光源的应用领域；
- 带动了巨大的产业链，引导了第三代半导体的发展，创造了极大的价值。



## 诺贝尔物理学奖获奖解读

### 前电力时代的人类照明：

- 公元前7万年：石头 + 苔藓 + 动物脂肪 —— 人类第一盏灯；
- 公元前7世纪：希腊人 —— 陶器灯（Lampas —— Lamp）；
- 公元1783年：瑞士化学家Ami Argand、植物油、灯芯
- 公元1853年：德国首次引入煤油照明。



## 诺贝尔物理学奖获奖解读

### 电力时代（电灯）：

- 1801年，英国的Humphrey Davy发明了电弧灯，电灯先驱。
- 1857年，法国的A.E. Becquerel 提出了荧光照明的理论。
- 1879年，爱迪生、白炽灯，历史上第一只真正的电灯。
- 1927年，Hans Spanner申请了第一盏日光灯的专利。
- 1993年，中村修二制作了第一颗高亮度蓝光LED，开启了人类的半导体照明史。





## 诺贝尔物理学奖获奖解读



**一个国家和地区照明的照明水平反映了这个国家或地区的经济水平。照明用电也成为人们关注的问题。**



## 诺贝尔物理学奖获奖解读

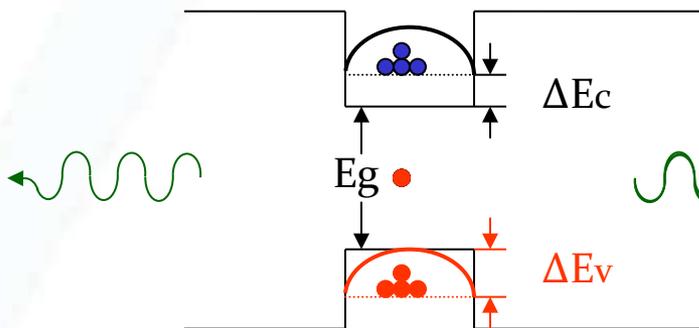
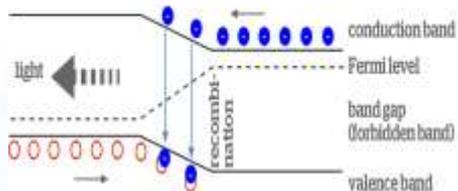
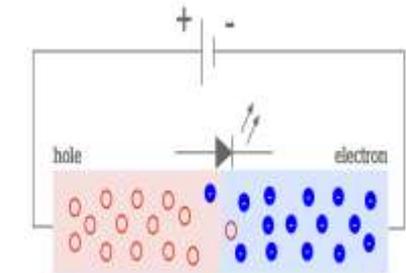


目前发达国家照明用电一般占总发电量的20%；发展中国家一般在10-15%；欠发达国家和地区一般在5%。我国照明用电占总发电量的12%左右。

# 诺贝尔物理学奖获奖解读

## 半导体照明如何发光？

### 半导体辐射复合——电子空穴对有效复合

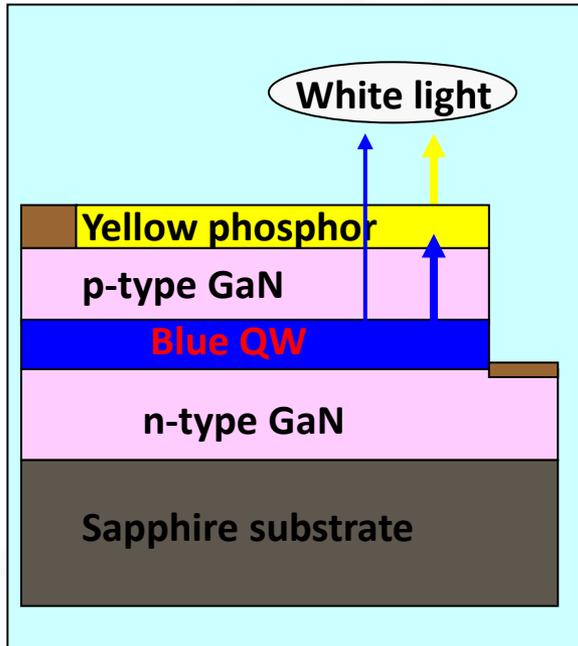


$$h\nu = E_g + \Delta E_c + \Delta E_v$$

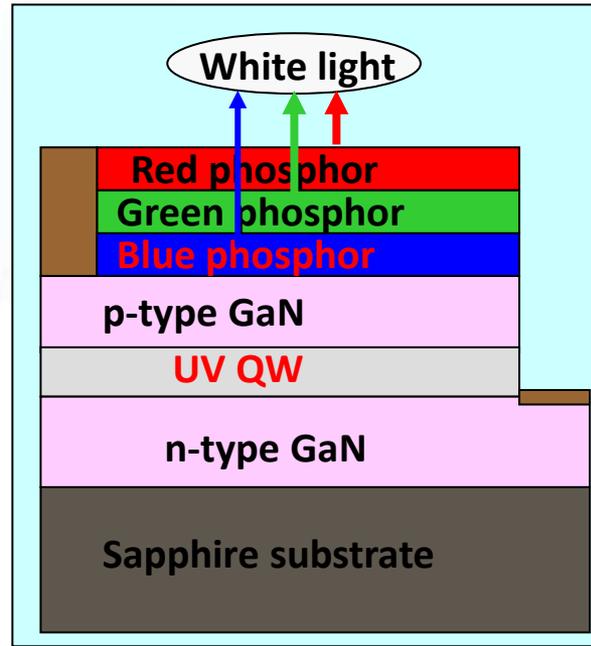
在正负极施以电压，利用p型层注入的空穴与n型层注入的电子在pn结复合发光，通过改变能带宽度来实现发光波长的变化。

# 诺贝尔物理学奖获奖解读

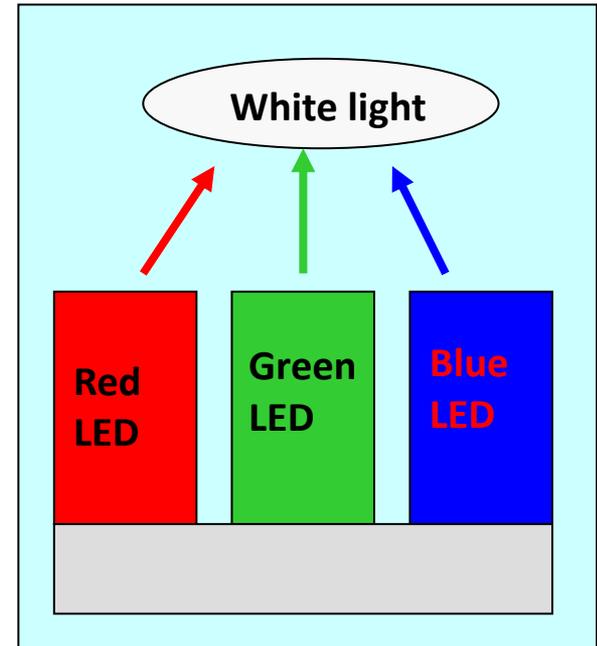
## LED实现白光照明的方式



蓝光+黄色荧光粉



紫外+RGB荧光粉



RGB

- 蓝光+黄色荧光粉：最大理论效率约为330lm/W左右；
- 紫外+RGB荧光粉：最大理论效率约为300lm/W左右；
- RGB：最大理论效率约为400lm/W左右。



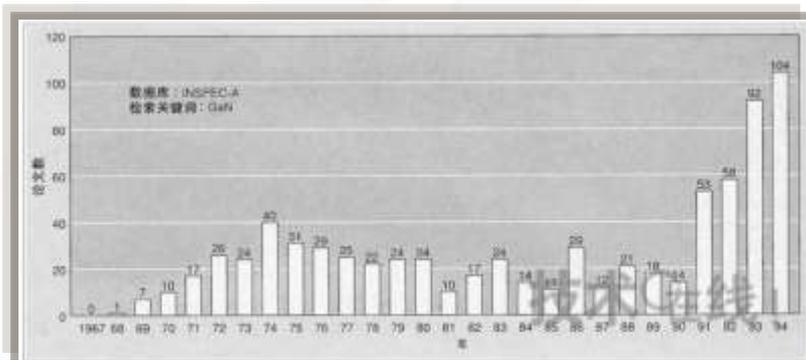
# 诺贝尔物理学奖获奖解读

## 基础研究：独到眼光、不畏艰难



赤崎勇

日本工程学、物理学家，1929年出生于日本。1964年获得日本名古屋大学博士学位。曾任松下电器研究员，现任名城大学终身教授、名古屋大学特聘教授。文化勋章得主、文化功劳者。赤崎勇开发了氮化镓结晶化技术。



GaN相关论文的数量在不同年份的变化

1986年，赤崎勇与天野浩采用AlN缓冲层成功生长出高质量GaN薄膜材料；  
Appl. Phys. Lett. 48, 353 (1986)

## 高质量GaN薄膜材料及p型掺杂

- 1966年前后开始想要开发蓝色LED和蓝色半导体激光器。
- 1973年把“通过GaN类氮化物的pn结实现蓝色发光器件”这个挑战当成毕生的事业。
- 尝试了MBE，HVPE，并最终选择MOCVD。
- 确定了蓝宝石衬底技术路线。
- 1980年代有了低温缓冲层想法。



# 诺贝尔物理学奖获奖解读

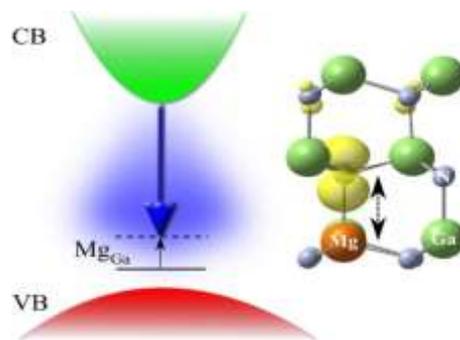
## 基础研究：路线确定，坚持不懈

- 尚无人取得成功的pn结蓝色LED的研究激起了天野的挑战欲望，于是他叩响了赤崎研究室的大门。
- 从制造MOCVD装置开始做起。
- 经历无数次的失败，在偶然与必然中找到并总结规律，研制出高质量GaN薄膜材料以及p GaN。



天野浩

日本工程学家，1960出生于日本滨松市。1989年在日本名古屋大学获得博士学位，赤崎勇的学生，目前是名古屋大学的教授。



## 高质量GaN薄膜材料及p型掺杂

1989年，赤崎勇与天野浩利用电子辐照实现GaN材料的p型掺杂；  
Jpn. J. Appl. Phys. 28 L2112



## 诺贝尔物理学奖获奖解读

### 产品开发：抓住机遇，坚持不懈



中村修二

1954年出生于日本爱媛县，日裔美籍电子工程学家，加州大学圣芭芭拉分校(UCSB)工程学院材料系教授。

- 玻璃焊接、气体管路以及装置制造，这一切都是为成功开发出蓝色发光二极管所做的铺垫。
- 在制造GaP结晶时，虽然开发取得了成功但却没能战胜大型厂商的痛苦经历让中村坚定了“**做别人没有做过的事**”这一信念，这成为了他取得成功的契机。
- 被人认为是危险的MOCVD装置改造工作，中村也都能够充满勇气地果敢前行。
- 中村决定以论文的方式让世界来给出评判。他瞒着公司，持续在研发取得关键性进展时投稿论文。



## 诺贝尔物理学奖获奖解读



杨祖佑 (Henry T. Yang 1940年 - )，生于中国重庆，拥有中华民国与美国双重国籍，是航空航天领域专家，中华民国中央研究院院士，美国工程院院士，美国航空航天协会会员。于**1994年担任圣塔芭芭拉加利福尼亚大学第五任校长。**

### 题外话：人才抢夺

**中村获得诺贝尔奖，UCSB和杨祖佑应该非常高兴与自豪，因为中村是UCSB的教授**

“当我们飞到日本时，发现中村修二在地下室做实验，职位只是一个技术员，我知道这就是我们的机会。”美国加州大学圣塔芭芭拉分校华裔校长杨祖佑说。

为了邀请中村修二，这所高校专门为他配置了研究团队，并让研究人员到日本工作一年，学习日语，为他营造一种日本文化环境，让他能愉快地待在大学里。

这也是中村修二拒绝了斯坦福大学和惠普公司派专机邀请，而选择到圣塔芭芭拉分校的原因。





# 诺贝尔物理学奖获奖解读

## 对我们的启示

### 领导者：人才挖掘

- 日亚给予中村资助的社长
- UCSB校长：杨祖佑

### 基础研究：远见卓识

- 赤崎勇

### 应用研究：坚持不懈

- 天野浩

### 产业技术：勇于开拓

- 中村修二





# 报告内容

- 一、诺贝尔奖背景介绍
- 二、2014诺贝尔物理学奖获奖解读
- 三、LED技术及产业二十年
- 四、LED超越照明应用发展趋势
- 五、结束语





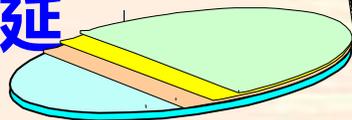
# LED技术及产业二十年

## 白光照明技术产业流程

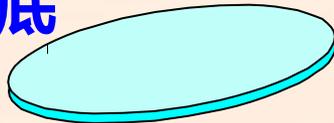
**Metal Organic  
Chemical Vapor  
Deposition**



**外延**

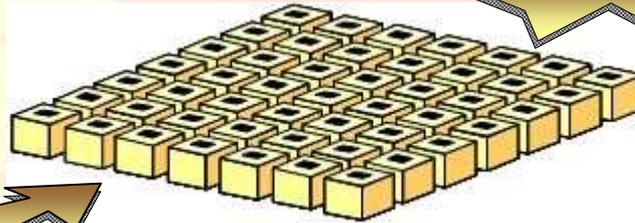


**衬底**



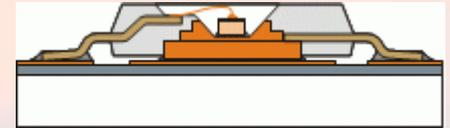
**Internal Q. efficiency**

**芯片工艺**



**Light extraction  
Electr. losses**

**封装**

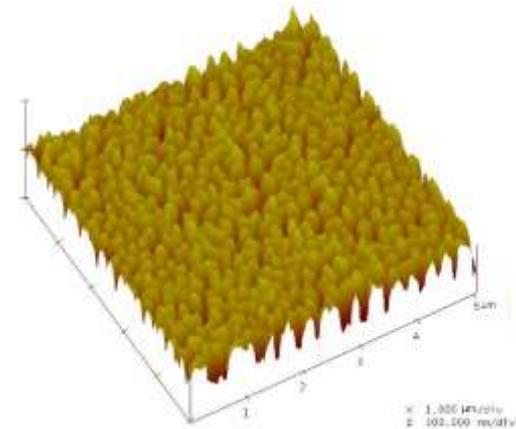
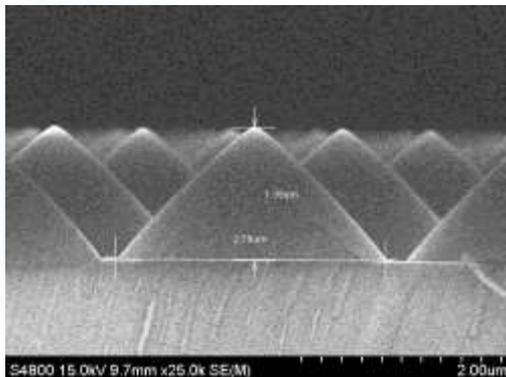
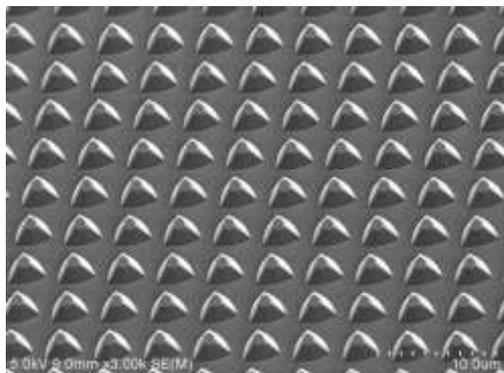


**Heat dissipation  
Light extraction  
(I-conversion  
+ Stokes losses)**

$$\eta_{\text{Wall plug}} = \eta_{\text{int}} \cdot \eta_{\text{electr.}} \cdot \eta_{\text{extr}} \cdot \eta_{\text{package}}$$

# LED技术及产业二十年

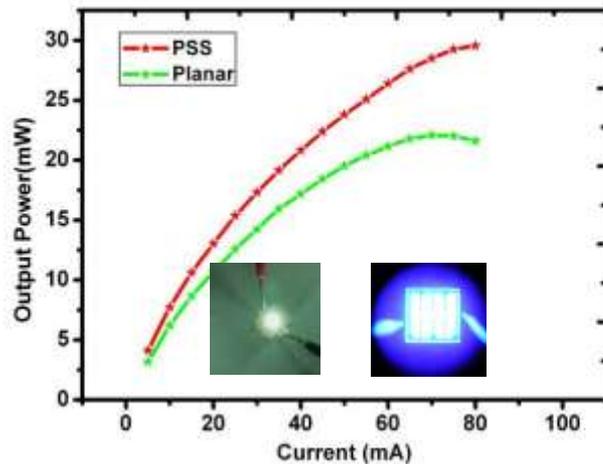
## 衬底材料选择



微米蓝宝石图形衬底

纳米蓝宝石图形衬底

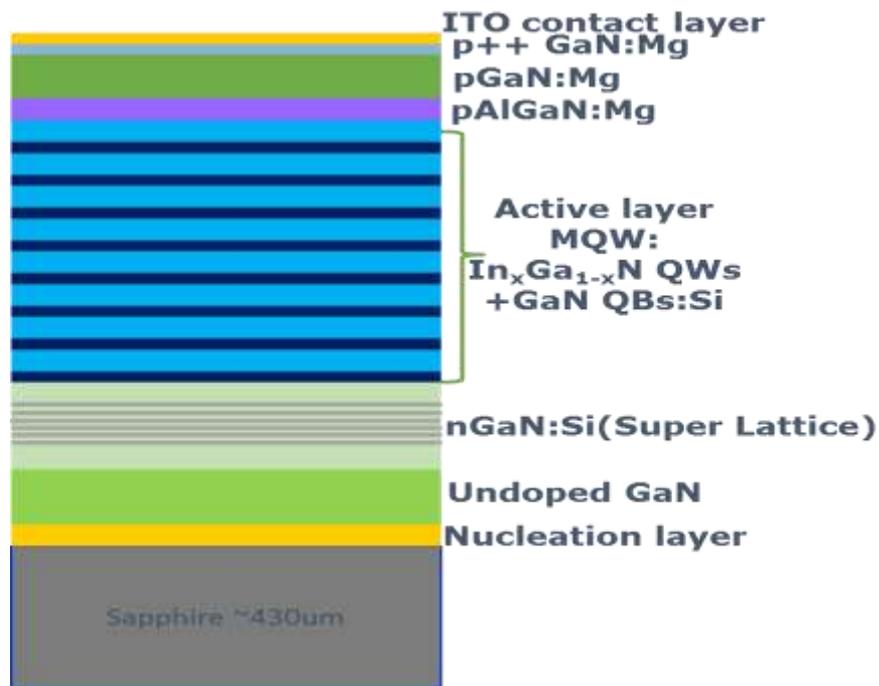
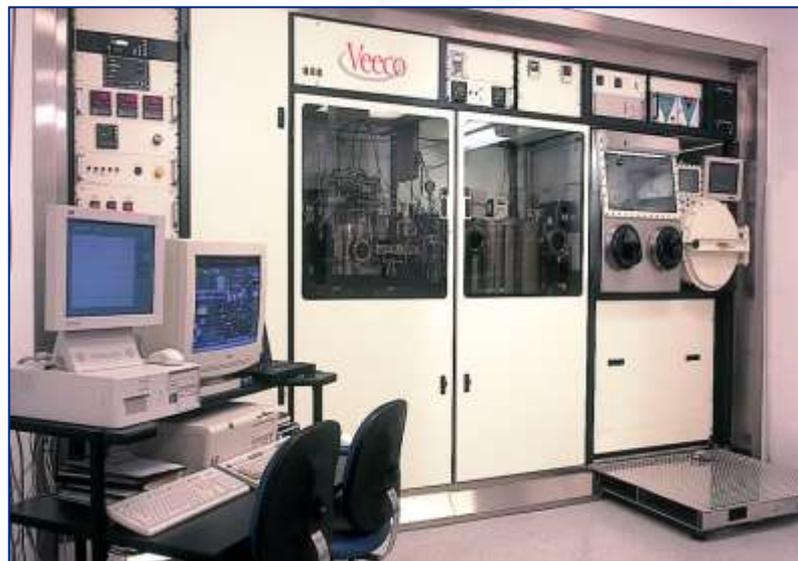
- 发光效率的提高
- 制成简单、可重复
- 成本低
- 可批量化生产





# LED技术及产业二十年

## 高质量外延技术



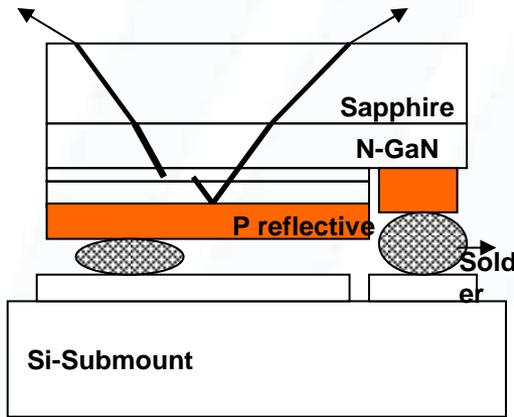
GaN基LED典型的结构包括衬底材料、低温缓冲层、n型掺杂GaN层、InGaN/GaN多量子阱结构发光有源区、p型掺杂GaN层和电极接触层等。



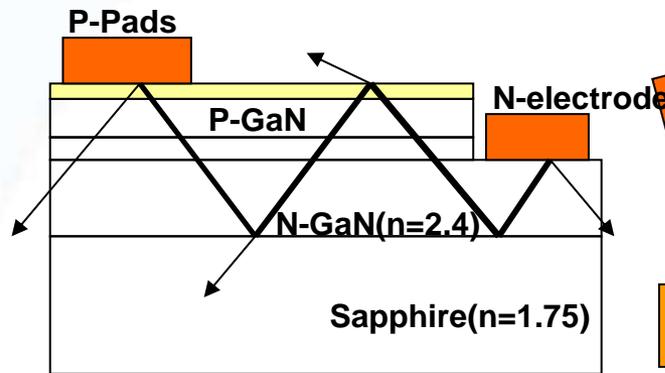
# LED技术及产业二十年

## 芯片技术

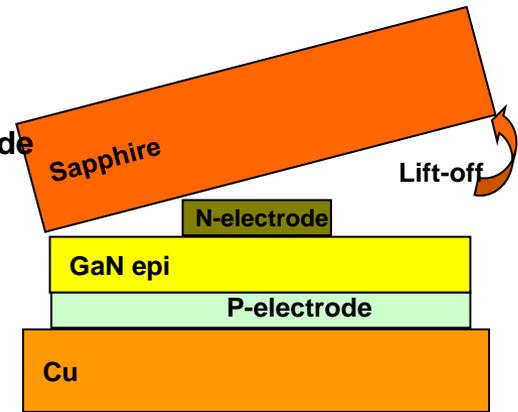
● 正装、倒装和垂直结构三种工艺技术路线。



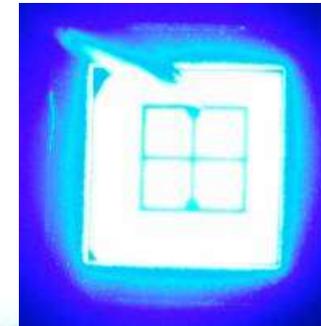
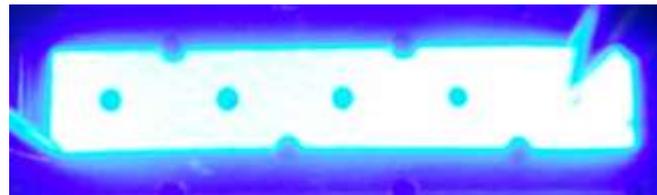
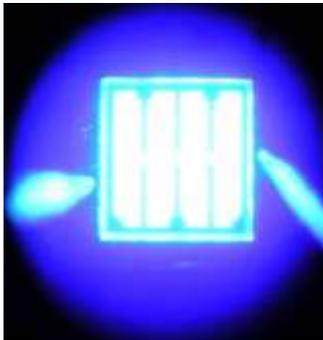
倒装结构



正装结构



垂直结构

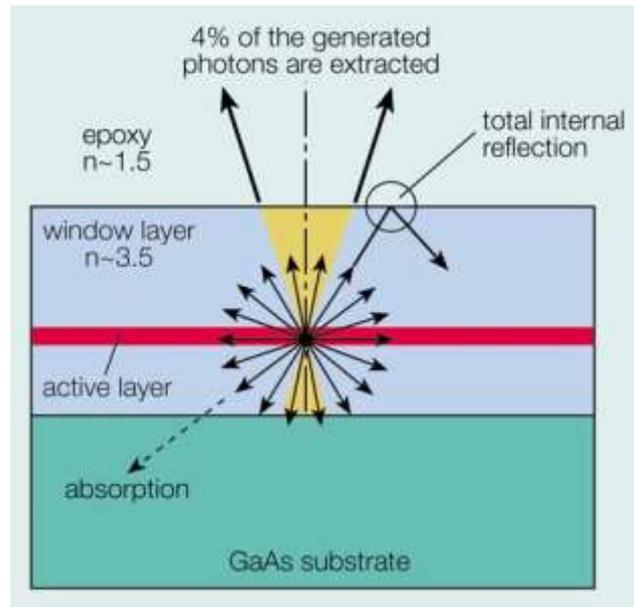


# LED技术及产业二十年

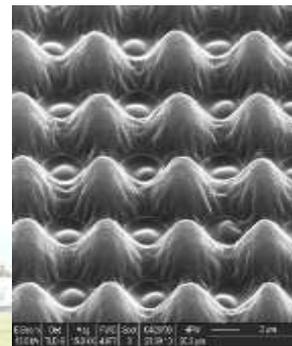
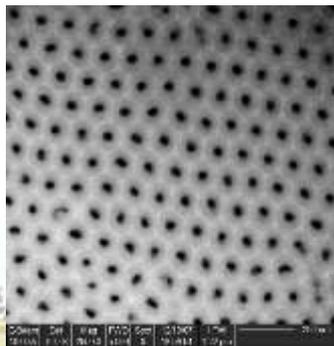
## 重点解决提取效率问题

### LED中光子传输行为、出光效率模式及机理研究

- 蓝光从LED中传播到空气中的全反射角小，导致大部分光不能够出射
- 光子与晶体、缺陷的作用
- 光子在微纳结构中的行为规律
- 输出光偏振模式及传播特性



高折射率限制了光提取效率





# LED技术及产业二十年

## GaN-LED产业化技术里程碑

- 1993年 日本日亚公司研发成功了**首只GaN蓝光LED**
- 1995年 研发成功单量子阱**蓝光和绿光LED**
- 1998年 日本、美国和欧洲的主要公司的蓝光LED功率**达到2-3mW**
- 2000年 Lumileds公司开发了**第一个大面积LED芯片**
- 2001年 台湾开发了提高LED出光效率的**表面粗化技术**
- 2001年 **图形衬底技术**
- 2003年 **多量子阱发光技术**
- 2005年 表面粗化的**大面积芯片**
- 2007年 **垂直结构技术突破**
- 2008年 **非极性半极性氮化物LED技术突破**
- 2010年 **纳米图形衬底**
- 2012年 **新型COB封装**
- 2013年 **新型倒装芯片技术**



# LED技术及产业二十年

## 中国产业政策

### 国内积极出台相关政策，大力扶持行业高速增长

2009年4月

- 国家科技部启动“十城万盏”半导体照明试点示范应用工程

2009年9月

- 国家发改委联合科技部、工信部、住建部、财政部、质检总局等六部委联合发布《半导体照明节能产业发展意见》

2009年10月

- 国家发改委/联合国开发计划署/全球环境基金共同启动“中国逐步淘汰白炽灯、加快推广节能灯（PIESLAMP）”计划

2010年4月

- 发改委、财政部、人民银行、税务总局四部门发布《关于加快推行合同能源管理促进节能服务产业发展的意见》

2010年10月

- 《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》将半导体照明列入我国战略性新兴产业：节能环保和新材料产业的重要发展方向

2010年11月

- 发改委等三部委联合组织“半导体照明产品应用示范工程项目”，在全国共选择50个半导体照明应用项目开展示范

2011年6月

- 开展第二批“十城万盏”半导体照明应用工程试点示范

2012年6月

- 《中国淘汰白炽灯路线图》公布

2012年7月

- 发改委LED照明产品招标

2013年8月

- 国务院印发关于加快发展节能环保产业的意见

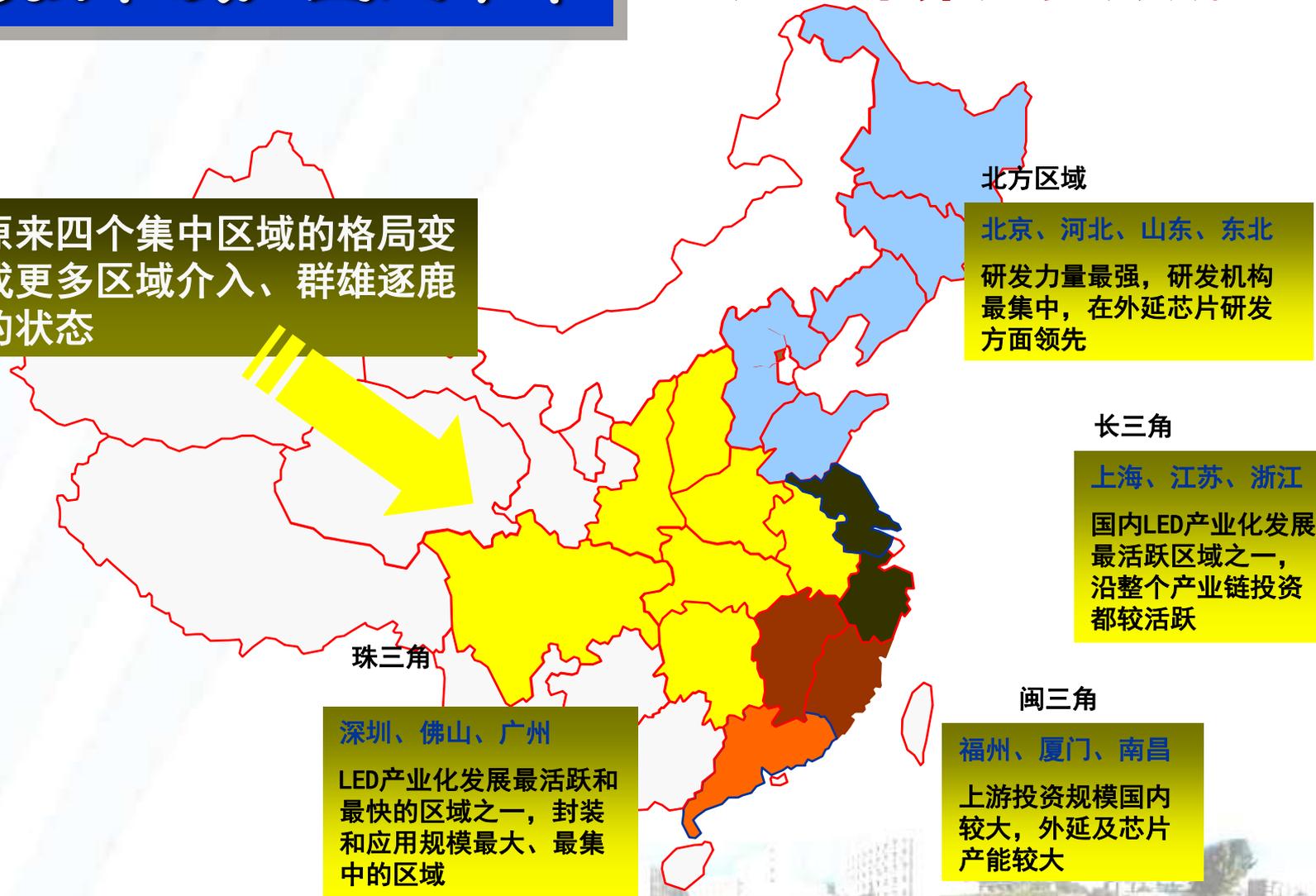




# LED技术及产业二十年

## 产业集聚逐步形成

原来四个集中区域的格局变成更多区域介入、群雄逐鹿的状态





# LED技术及产业二十年

光效  
流明/瓦

200

150

100

50

光效  
流明/瓦

### ◆已解决的技术问题：

中低端外延材料生长、芯片制备，封装与中低端应用技术

### ◆主要应用：

指示、显示、信号



### ◆正在解决的技术问题：

大功率外延材料生长、芯片制备，大功率LED封装与功能性照明应用技术

### ◆主要应用：

景观与白光功能性照明



### ◆下一步需要解决的技术问题：

白光普通照明低成本、高可靠性技术、装备及应用系统集成；白光核心专利

### ◆主要应用：

室内外白光普通照明



“十三五”全部国产化  
(装备、材料)

“十二五”芯片、器件国产化

“十一五”采用国产器件，  
进口80%功率型芯片

“十五”白光技术从无到有





# LED技术及产业二十年

## 半导体照明是一场**成功的技术革命**，确立了照明产业变革中的**主导地位**

160 lm/W

75%

24000件

3507亿元

26家

18%

芯片国产化率70%

130 lm/W

人民大会堂照明改造

产值2000亿元

19家以LED为主营业务上市公司

2014

20 lm/W

0%

1400 件

90亿元

0家

0%

北京奥运示范应用

产值首次超过1000亿元

芯片国产化率50%

100lm/W

2013

2012

2010

2008

2003



亮度提高40%，能耗降低了70%。



京沪高铁照明



广州亚运会



上海世博会中国馆等





# 报告内容

- 一、诺贝尔奖背景介绍
- 二、2014诺贝尔物理学奖获奖解读
- 三、LED技术及产业二十年
- 四、LED超越照明应用发展趋势
- 五、结束语





# LED超越照明应用发展趋势

## 新一代光源系统的创新应用

- 智能照明可见光通信
- 新一代光源在农业、生物的应用
- 深紫外LED应用研究
- .....





# LED超越照明应用发展趋势

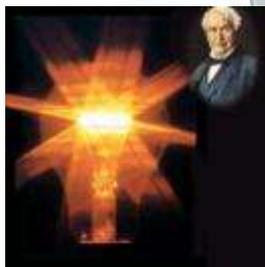


烽火台  
通信

火光  
照明



电灯  
照明

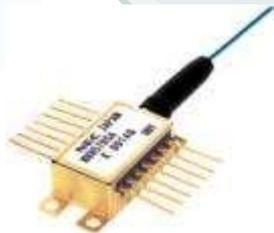


智能照明可见光通信  
——同时进行照明、通信、智能控制

激光  
通信

半导体  
照明

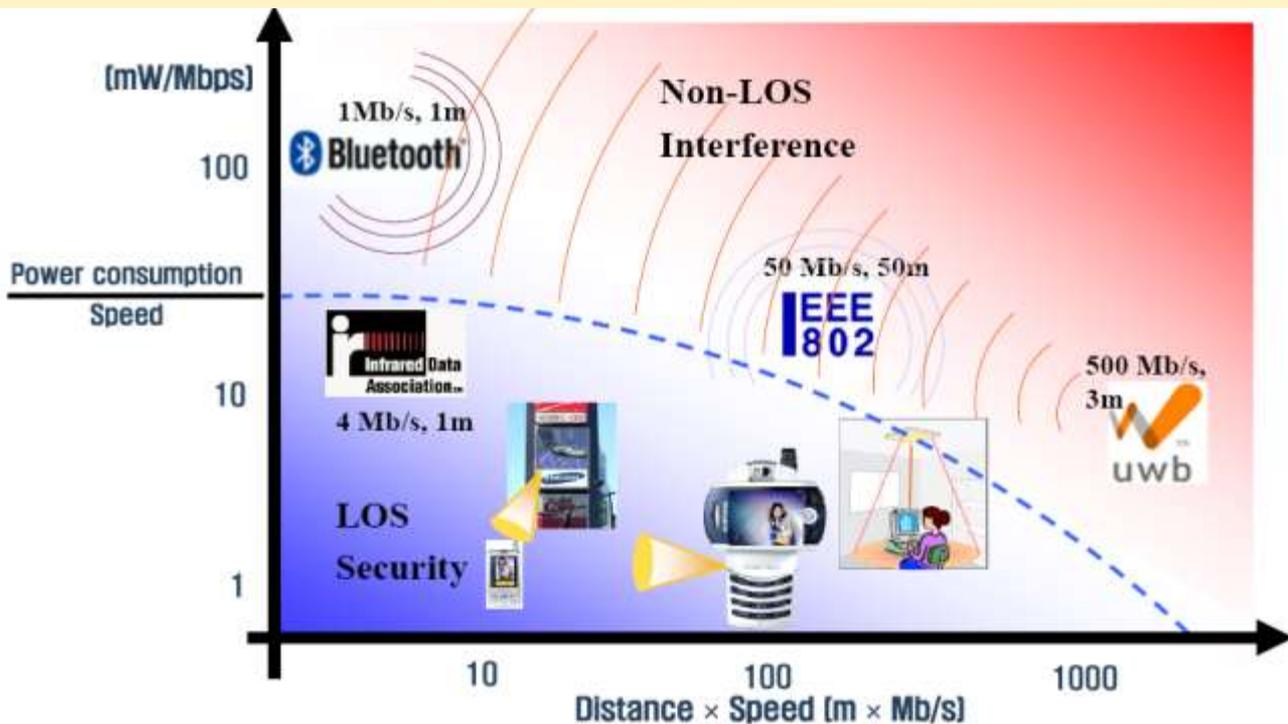
智能  
照明  
通信



# LED超越照明应用发展趋势

## 可见光通信的优越性

1. 无电磁污染→有利于人体健康
2. 私密性强→安全性高
3. 与照明结合→无处不在、无须新建专用网络、节能和环保
4. 网络带宽高→可快速下载网络上信息
5. 无需频率许可证



Directivity + Simplicity



Optical connectivity saves power

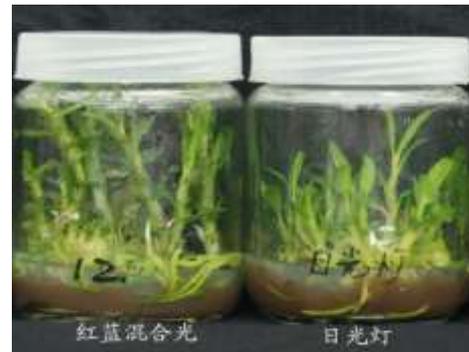




# LED超越照明应用发展趋势

## LED在农业与生物领域中的应用

- 人工补光
- 组织培养
- 植物工厂
- 特种条件下的应用（太空农业、远洋航船及其他星球等）
- 太阳能LED植物生长照明系统（新能源和新光源的完美结合）
- 细胞培养及需特殊波长调控的动物、微生物、病毒培养
- LED食物保鲜
- .....





# LED超越照明应用发展趋势

## LED与光生物作用

### LED特征

- 全固态
- 小尺寸
- 温度敏感
- 亮度
- 色度
- 高效
- 响应快
- 高可靠性

视觉  
情绪  
生/化

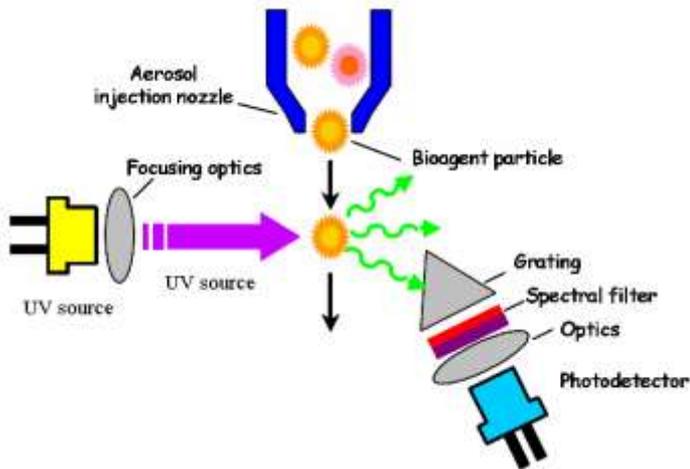
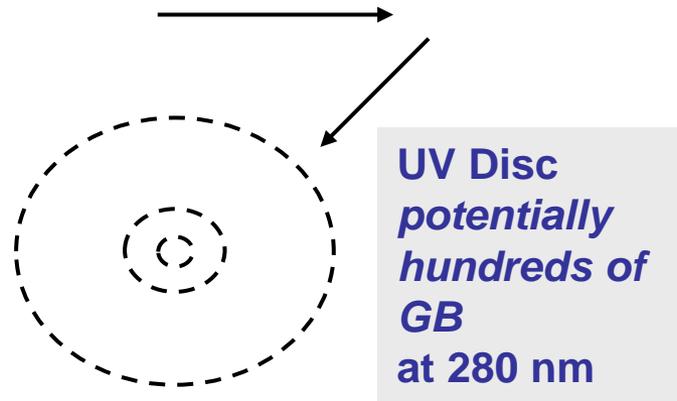
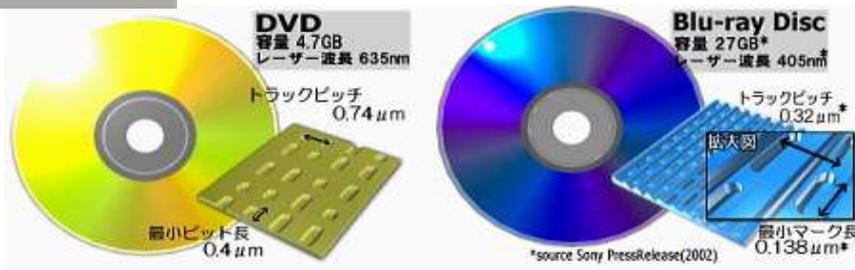
.....



# LED超越照明应用发展趋势

- 净化（水、空气等）领域
- 生物和化学鉴定
- 紫外印刷和防伪
- 光信息处理及保密通讯
- 计算机数据存储

## 深紫外LED



Air Purifiers



UV Water Purifiers



# 报告内容

- 一、诺贝尔奖背景介绍
- 二、2014诺贝尔物理学奖获奖解读
- 三、LED技术及产业二十年
- 四、LED超越照明应用发展趋势
- 五、结束语



# 结束语

在现代复杂科学中，一个发现唯有经过长时间测试，才能被证实是真正的杰出研究。

## ➤ 不懈的努力

任何时候都不能轻言放弃（斯维德伯格）

## ➤ 独到的见解

做别人没有做过的事（中村修二）

## ➤ 重大的意义

所有科技的努力，总以造福人类，关切人类的命运为主要目标的（居里夫人）





**LED Lighting,  
Lights the future.**

**谢谢!**