



七大光电子产业介绍

刘文

中国科学技术大学物理学院光学与光学工程系

刘文教授简介



刘文是国内外知名的光电子器件专家，他1992-1998年就曾任原邮电部固体器件研究所总工程师；1992年开始获得国务院特殊津贴；2003~2011年任光迅科技公司总工程师，在2008年8月获得中国证监会正式批准在深圳中小企业版上市（深市代码002281）。是国内第一家通信光电子器件上市企业。2005年获国务院颁发的华人华侨专业人士“杰出创业奖”，2006年3月他受武汉邮科院委派，兼职参加华中科技大学武汉光电国家实验室建设，后受聘为教育部“长江学者奖励计划”特聘教授、博士生导师；刘文已获美国发明专利授权10项、中国专利授权80余项。

刘文1998~2000曾经在加拿大北方电讯（NORTEL）公司工作，期间曾经获得北方电讯总裁奖。2013年调入中国科技大学工作。现任光学与光学工程系光电子科学与技术省重点实验室主任，还兼任先进技术研究院副总工程师。

wenliu@ustc.edu.cn, QQ/微信号1214740116

光电子研究与产业概况

An overview of optoelectronics R&D and Industries

光电子技术涉及七大领域：包括太阳能光伏、显示、图像探测、LED、激光与激光应用、光纤通信、红外与光传感等产业。总的产业规模不亚于微电子。



- 光伏产业 (Photovoltaic Industry)
- LED产业 (LED Industry)
- 光电显示 (Optoelectronics Display)
- 激光与激光应用 (Laser and the applications)
- 图像探测 (Imaging Detection), CCD 和 CMOS 成像芯片
- 红外探测、传感 (Infrared detector and Sensors)
- 光纤通信产业 (Fiber optical Communication)



图像探测

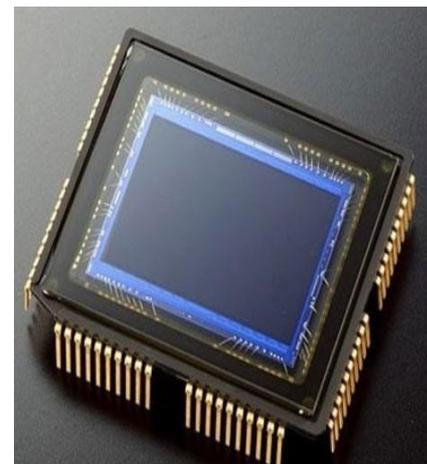
CCD and CMOS Imaging Detection Chips



何为CCD?

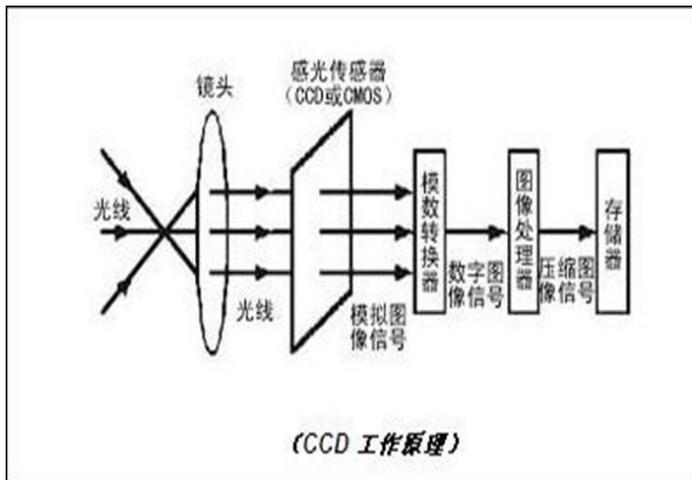
成像技术在我们的生活中发挥着重要的作用，人们对图像的清晰度，分辨率等方面的要求也在逐日提升。例如在选购数码相机时，我们主要会碰到两种原理的成像器件：**CCD**和**CMOS**。它们到底是什么？应该选择**CCD**还是**CMOS**的产品？二者之间在成像质量、价格等方面有哪些差别？

所谓**CCD**，全称为**Charge Coupled Device**（电荷耦合器件），是一种半导体成像器件，属于固体成像器件，由数千个排列成矩阵的独立的光敏元件组成。它通过接受外界的光信号，并将之转化为电信号，再经处理形成影像信息，具有灵敏度高、抗强光、畸变小、体积小、寿命长、抗震动等优点。广泛应用于数码摄影，医学，通讯，航空，航天，天文，军事等领域。





CCD的工作原理

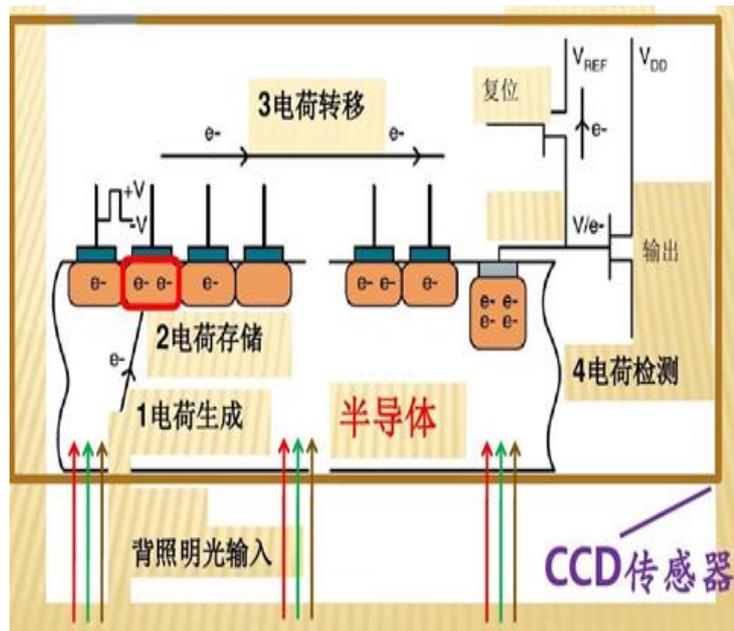


光电转换：依据半导体内的光电效应将入射光信号转化为电信号。

电荷储存：把之前产生的电荷搜集起来，成为信号电荷包。

电荷转移：把搜集的电荷包从一个像元转移到下一个像元，直到全部电荷包输出完成。

电荷检测：把转移到输出极的电荷转化为电流或者电压。





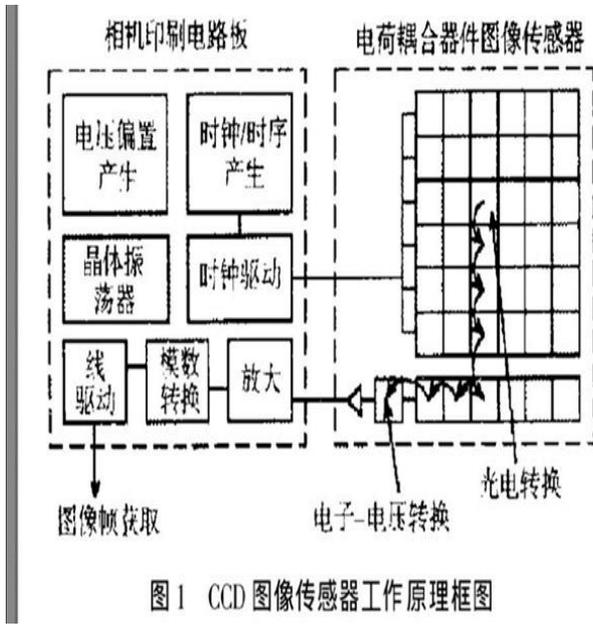
CCD的结构

CCD由光敏单元，转移栅，移位寄存器（分垂直和水平移位寄存器），辅助输入、输出电路组成。

光敏单元：接收光信号，根据光的强弱产生不同量电荷。

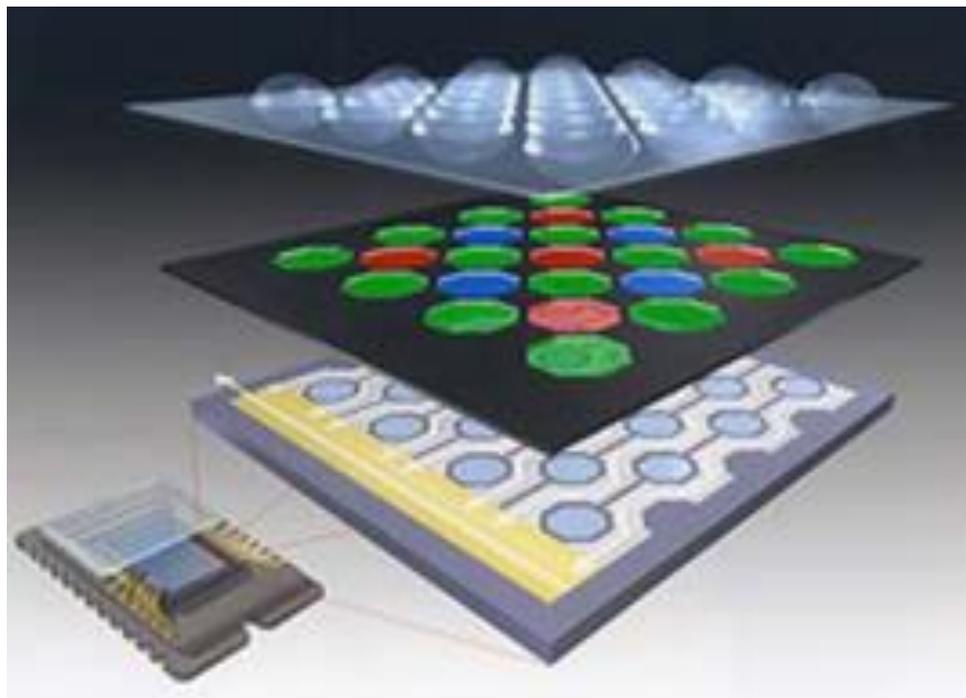
转移栅：把各光敏元电荷转移到移位寄存器的相应单元中。

移位寄存器:在驱动时钟的作用下，把所存电荷依次转移到输出端。





微型镜头：在感光层前面加上一副“眼镜”，因此**感光面积**不再因为传感器的开口面积而决定，而改由微型镜片的表面积来决定。



分色滤色片：可分**RGB**原色分色法和**CMYK**补色分色法，前者优势在于画质锐利，色彩真实，但缺点则是噪声问题；后者在色彩的分辨上比较仔细，但却牺牲了部分影像的分辨率。

感光层：主要是负责将穿过滤色层的光源转换成电子信号，并将信号传送到影像处理芯片，将影像还原。



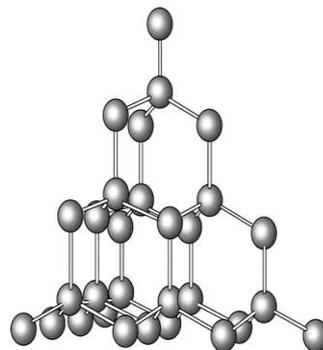
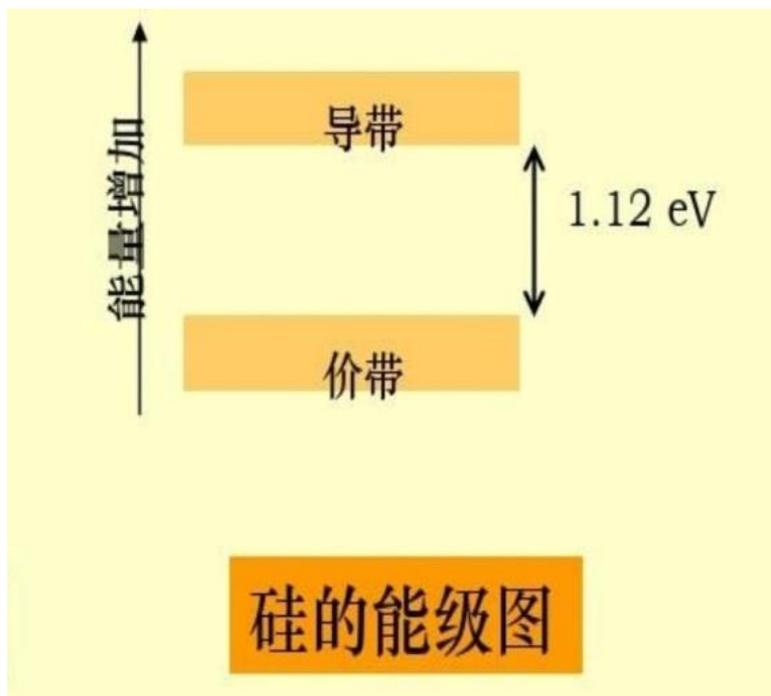
CCD的诞生

1969年，美国贝尔实验室（Bell Labs）的维拉·[波义耳](#)（Willard S. Boyle）和[乔治·史密斯](#)将影像电话和半导体气泡式内存两种技术结合，得出一种名叫“电荷‘气泡’元件”。这种装置的特性就是它能沿着一片半导体的表面传递电荷，便尝试用来做为记忆装置，但当时只能从暂存器用“注入”电荷的方式输入记忆。后发现光电效应能使此种元件表面产生电荷，从而组成数位影像。到了70年代，贝尔实验室的研究员已经能用简单的线性装置捕捉影像，CCD就此诞生。[乔治·史密斯](#)和维拉·[波义耳](#)也因此获得2006年电机电子工程学会（IEEE）颁发的Charles Stark Draper奖章（工程界的“诺贝尔奖”）和2009年的诺贝尔物理学奖。





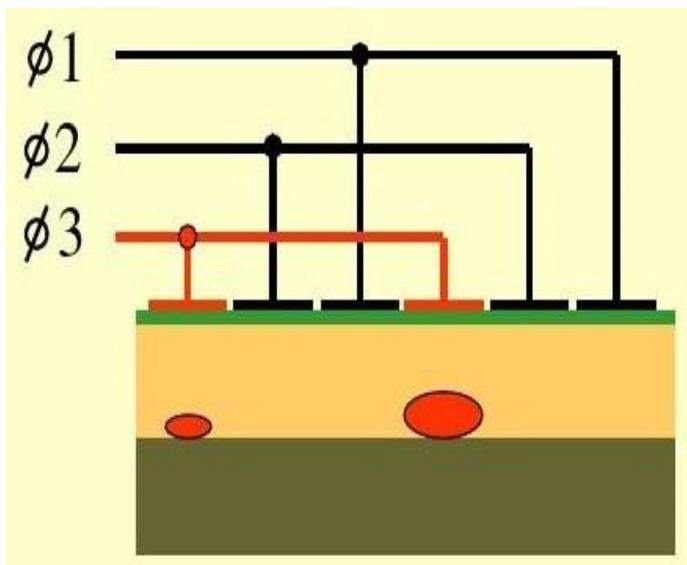
光电转换



光敏单元采用半导体材料硅，为金刚石状晶体结构，每个原子与周围四个原子自建以共价键相连，有四对共用电子对。当入射光子的能量 \geq 硅材料导带与价带之间的能隙时，会导致一个共价键断开，其中一个电子会从电子对中脱离，成为自由电子，其原位置会形成一个空穴，成为带正点的载流子。



电荷转移



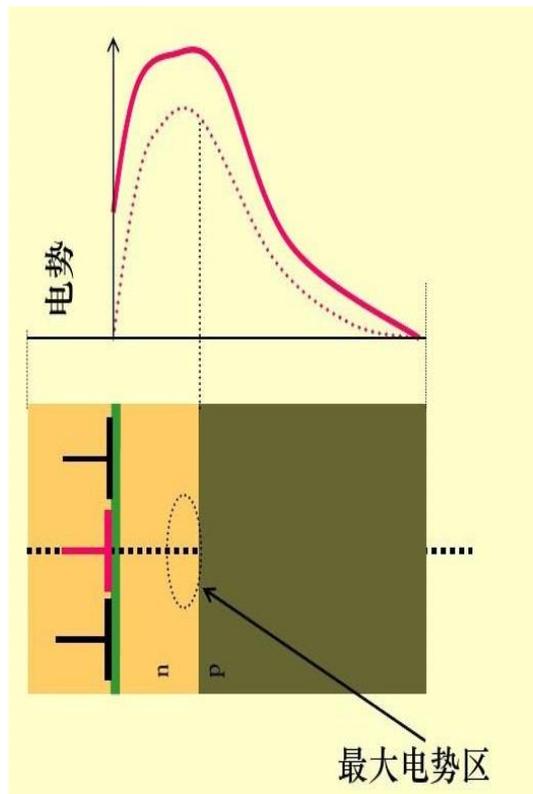
电荷包储存之后，就要进行电荷包的转移，把电荷包从一个像元转移到下一个像元，直到全部电荷包完成转移。一次转移过程中正确转移的电荷百分比称为电荷转移效率。

以三相CCD为例：红色表示高电势，黑色表示低电势。转移时，2电极转为高电势，其下形成势阱，这样会使部分电荷从3电极转移到2电极。然后3电极转为低电势，则能让几乎所有电荷转移到2电极下。依次类推，使电荷从上一个电极转移到下一个电极，再转移到下一像元，完成像元间电荷的转移。



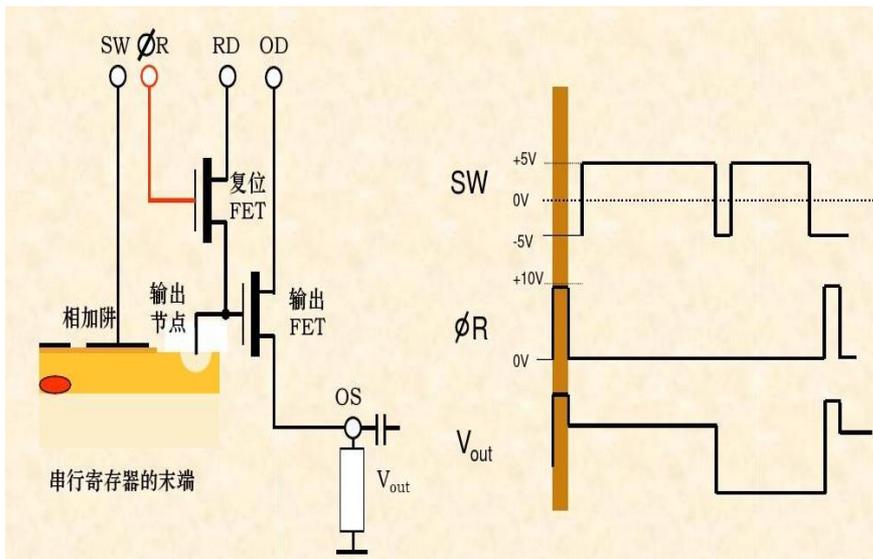
电荷转移

光电转换过程中形成的载流子在没有外电场的情况下存在时间并不长，在其复合寿命内，电子和空穴会复合并湮灭。因此，要将产生的电荷收集起来成为电荷包，需要有一个收集区域——势阱，这样不仅可以收集电荷，还能防止电荷被复合并湮灭。CCD曝光时，像元有一个电极处于高电位（CCD一个像元的电极数通常有2~4个，分别成为二相、三相、四相），该电极下电势升高，光生电荷聚集，形成势阱；其附近电极处于低电位，称作势垒。





电荷检测



复位管电阻的热噪声（主要），输出管的闪烁噪声以及输出电阻的热噪声会叠加到信号上，降低信号质量。

1. 电荷包移动到寄存器末端时，进行复位，清除前一个电荷包的电荷。
2. 把电荷移动到相加阱，此时外部电路测量参考电平。
3. 电荷到达输出节点，与外电路相接处电势降低，下降到信号电平。
4. 外电路采样，得到 V_{out} 电平（二者之差，与电荷包内的电荷量成正比）。由此，完成从电荷信号到电压信号的转化。



水桶比喻

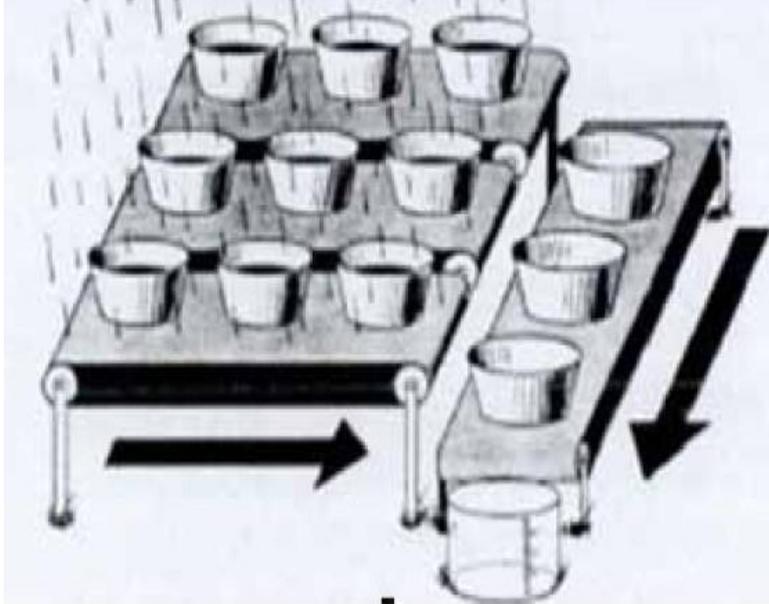


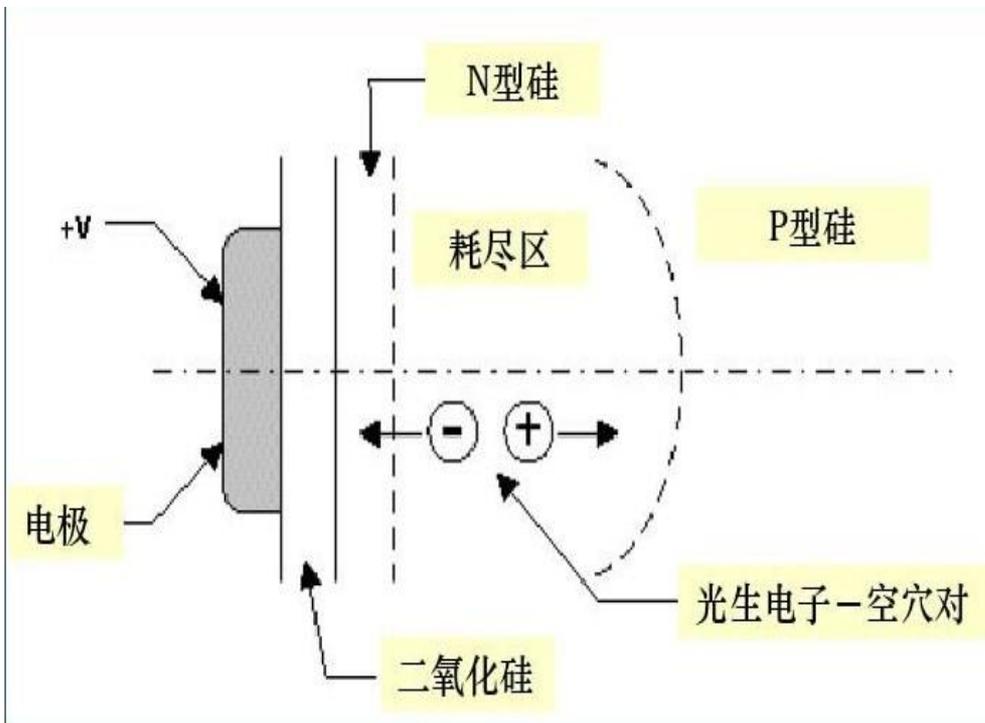
图 2.1 CCD 的“水桶”比喻

横排的小盆中的水依次向左转移，进入纵排的喷中。纵排盆的水依次进入量筒，进行测量，记录数据，在测量一盆的水后再倒空，测量下一盆。

小盆≈像元 雨滴≈光子 水≈电荷
纵排盆≈移位寄存器 量筒≈放大器



电荷储存



电荷储存过程需要MOS（金属-氧化物-半导体）电容器。MOS电容器是构成CCD的基础，有表面沟道和埋沟结构两种，如今CCD的几乎都采用埋沟电容结构。其优点是能够避免光生电荷被CCD表面被俘获，还能降低暗电流。



把电荷比作水，电极看作水池，当中间的电极电势变为高电势时，相当于形成和前一个等深的水池，这样会让前一水池的水部分流向中间的水池。然后迁移电极转为低电势，相当于把前一水池填平，使迁移水池几乎所有的水都流入下一水池，完成水在相邻水池之间的转移，即电荷在相邻电极之间的转移。





IT(Interline Transfer)型CCD

IT型CCD的像元与垂直移位寄存器相连，垂直移位寄存器与水平移位寄存器相连。

IT型CCD感光后，像元中的电荷包转移到垂直移位寄存器中，再转移到水平移位寄存器，然后输出。不过电荷在两种寄存器之间的转移所用时间较长，造成拖尾和闪光。

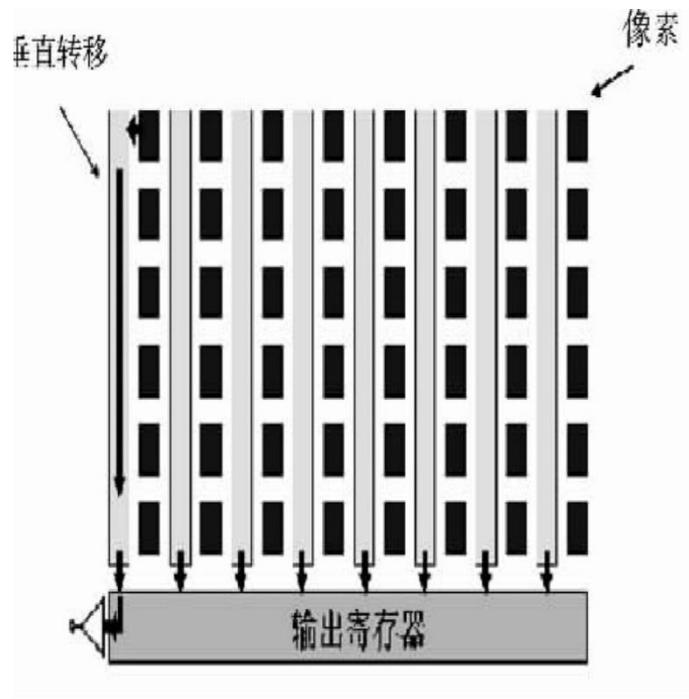


图1 IT型CCD电荷转移方式的工作原理



FT(Frame Transfer)型CCD

和前两种CCD相比，FT型CCD无垂直移位寄存器，结构简单，容易制造。上方的矩阵接受光学信号，在将产生电荷转移到下方矩阵（下方不感光），再把电荷转到水平移位寄存器上输出，转移电荷速度快，无拖尾现象。但造价较高。

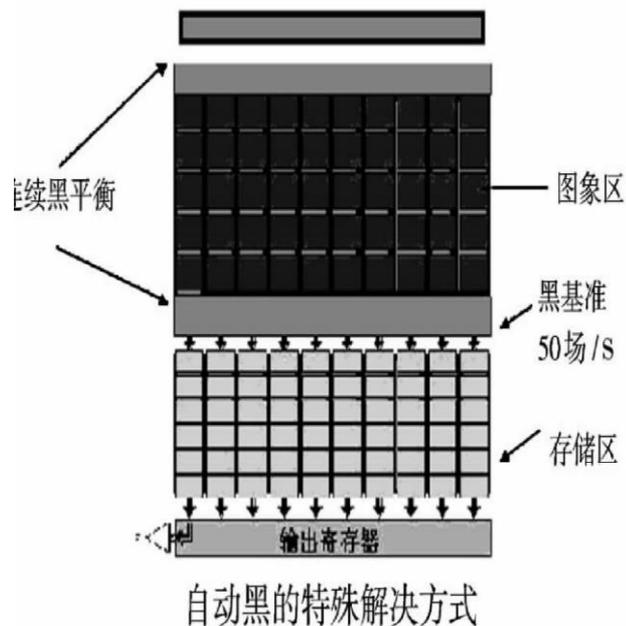


图5 FT型CCD电荷转移方式的工作原理



CCD的主要性能指标

量子效率：某一特定波长下单位时间内产生的平均光电子数于入射光电子数之比，**CCD**在某些波长位置量子效率超过90%。

转移效率和转移损失率：电荷在转移时会有损失。

CCD像素：它决定了显示图像的清晰程度，分辨率越高，图像细节的表现越好。**CCD**是由面阵感光元素组成，每一个元素称为像素，像素越多，图像越清晰。

暗电流：ccd内部通电产生热量后，随机产生热噪音电荷，在无光子撞击条件下，会残留在像元内。暗电流越低，曝光时间越长，图像越理想。

CCD尺寸：在像素数一样的情况下，**CCD**尺寸越大单位像素就越大。这样，单位像素可以收集更多的光线，因此，理论上可以说有利于提高画质。目前采用的芯片大多数为1/3和1/4英寸。



CCD的主要性能指标

水平分辨率：彩色摄像机的典型分辨率是在320到500电视线之间，主要有330线、380线、420线、460线、500线等不同档次。分辨率是用电视线（简称线TV LINES）来表示的，彩色摄像头的分辨率在330~500线之间。分辨率与CCD和镜头有关，还与摄像头电路通道的频带宽度直接相关，通常规律是1MHz的频带宽度相当于清晰度为80线。频带越宽，图像越清晰，线数值相对越大。

最小照度：也称为灵敏度。是CCD对环境光线的敏感程度，或者说是CCD正常成像时所需要的最暗光线。照度的单位是勒克斯（LUX），数值越小，表示需要的光线越少，摄像头也越灵敏。月光级和星光级等高增感度摄像机可工作在很暗条件，2~3lux属一般照度，日前也有低于1lux的普通摄像机问世。

信噪比：典型值为46db，若为50db，则图像有少量噪声，但图像质量良好；若为60db，则图像质量优良，不出现噪声。

制冷：CCD在工作时温度会升高，从而产生噪声。所以外界环境温度也影响着CCD的性能，降温可以提高其灵敏度和降噪能力。



与电荷生成有关参数:量子效率、暗电流。

- 1) 影响后者的主要因素是温度，**CCD**在工作室会产生热量，因此需要及时对**CCD**进行散热或制冷，降低暗电流对生成电荷的影响。
- 2) 影响前者的因素有吸收、穿越、反射等。在理想状况下应当使用完全透明的电极材料，避免对入射光的影响，但实际上没有这样的材料，所用材料或多或少都对光有一定的反射和吸收，比如多晶硅对电极对短波的蓝光有很强的吸收和反射。而增透膜技术可有效解决这个问题。

增透膜技术：

在被压至**15**微米左右的硅片与空气之间加上一层材料为二氧化铪的增透膜，这样，空气与二氧化铪、硅界面上光子的反射率降为零，避免了光子的损失，是**CCD**能够更充分接受光信号。



传统CCD发展

1969年，CCD美国贝尔实验室诞生。

1972年，人们在多数载流子CCD形式的基础上开发出体沟道CCD和“蠕动”型CCD结构，提高了CCD的性能。

1973年，美国仙童公司制作出CCD摄像传感器，从此，CCD由实验室走向工业生产。

1975年，中国研制出32位CCD移位寄存器。

1980年，索尼做出了世界上第一台CCD彩色相机。

1981年，诞生了28万像素的CCD，1984年实现低污染点高解析度的CCD，到90年代CCD像素可达百万。

1990年，经冷冻的CCD广泛应用于天文摄影和夜视。



自诞生至今，CCD的发展成如下趋势

1. 单位面积减小，重量减轻。1/3英寸的CCD芯片已经普及，1/4，1/5英寸的CCD芯片的产量在增加。
2. 像素增加，成像清晰度提高。
3. 开口率增大，有效透光区占比变大；感光度，即对光的灵敏程度提高，只需要较弱光线即可满足成像要求，使元件对光的利用率增大。
4. 可视光范围扩大，可感应到红外线，扩大了应用范围。
5. 能耗，成本降低。



超级CCD

1991年，富士的第一代超级CCD诞生。在第一Super CCD之后，CCD开始不断重视噪点控制与降噪技术的研发，第二代和第三代Super CCD就是在具体的电路控制方面不断改进。

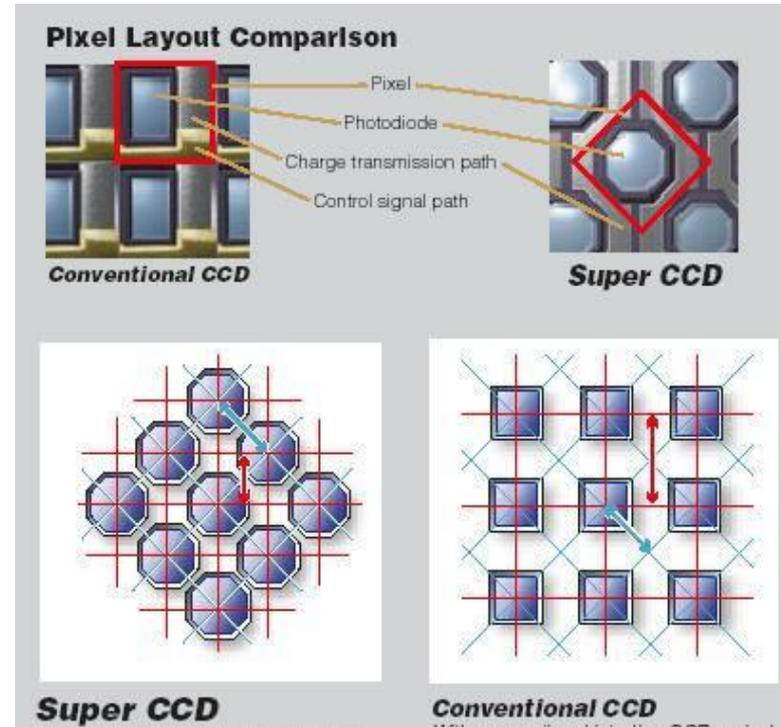
2003年，CCD实现四色滤光技术，CCD发展到第四代，使用它的数码相机效果已达到人眼视觉水平。

2009年，发明出Super CCD EXR,采用双重曝光时间控制来控制不同的曝光时间，以实现不同的感光度，可以对高光和低光细节进行全面捕捉。



超级CCD与传统CCD的不同

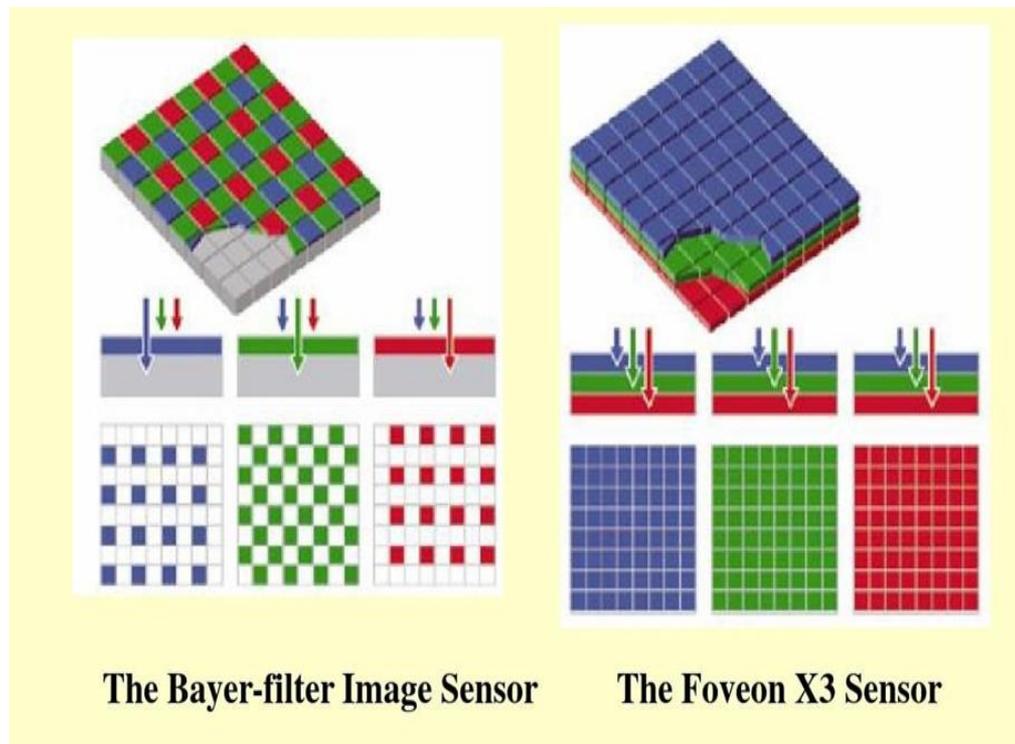
1) 相较于传统CCD，超级CCD采用蜂窝网结构来排列像元，同时取消了控制信号通道，为光电二极管留出空间，而且，相比于传统CCD的矩形光电二极管，超级CCD采用八角形的形状，使其感光效率，感光度，信噪比提高，扩大了动态范围。2) 传统CCD水平像素只有两种颜色，必须读出两行数据才能形成彩色；超级CCD的每行像素具有红，绿，蓝三色，输出影像质量高。3) 其电荷通道更宽阔，便于告诉传输扩大一次读出所有像素的数据，使产品具有进行精确连续拍摄的潜能。





多层感色CCD

在美国Foven公司开发的多层感色CCD（X3）之前，一般CCD采用蜂窝技术，一个像素只能感应一种颜色，导致分辨率低，辨色能力差，成本高。X3技术下一个像素能感应三种颜色，实现“逐层感色”，提高了影像的品质和色彩表现。





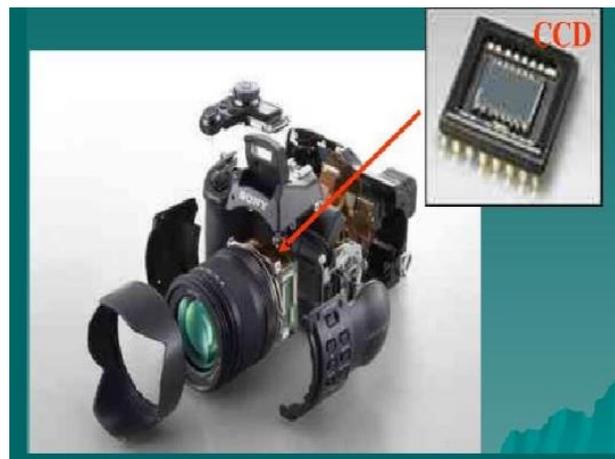
CCD国内外发展情况

CCD技术具有广泛的应用价值，在摄像、信号处理和存储领域发挥很大作用。美国的CCD起步最早，投入力量最大，还得到了政府和军方的支持，一直处于领先地位。特别是美国的贝尔实验室、麻省理工学院林肯实验室、仙童公司、福特航空公司在CCD领域的开发和应用具有雄厚的实力。日本的CCD起步较晚，但发展很快，是CCD生产大国，在民用CCD产品的开发和生产上居世界第一。日本的索尼、日立公司在CCD产品的创新上均有重要突破。其他国家，如法国、英国在CCD领域也有不低的实力。而我国的CCD起步晚，目前仍落后于欧美先进国家，CCD的研究还有所欠缺。



摄像领域

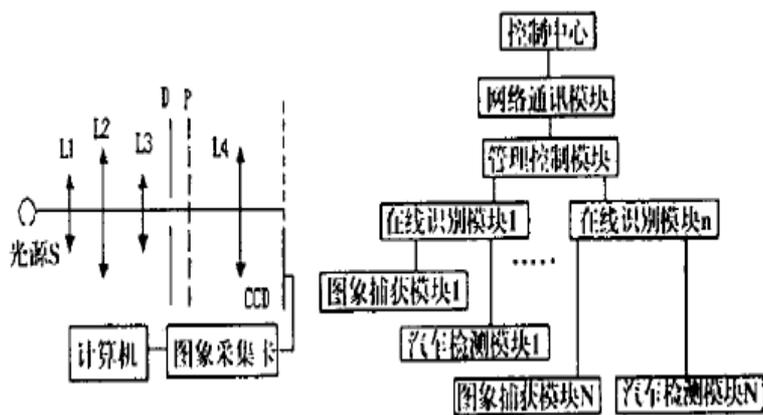
- 1.数码照相机：经CCD处理光学信息后，在进行数字处理，然后将信息记录在磁卡上，可利用计算机和各种图像处理软件进行图像的读取、处理和编辑。
- 2.医用小型摄像机、内窥镜:可用于人体显微手术，便于对手术细节的观察和处理，降低手术失误率。
- 3.车载CCD摄像机：如车内摄像机、后视镜系统。驾驶员可通过它们既是获取车内车外信息，使行车安全。





光学信息处理

- 1.分析光谱能量：CCD可用于光信号的采集，将它与计算机结合，把所收集数据交由计算机处理，可很快得到光谱的光强分析图。
- 2.图像识别：利用CCD图像传感器可进行图像的识别，如高速公路自动收费出对车牌的识别，图文传真。





军事

在军事领域，**CCD**发挥着重要作用，主要用于导航、自动跟踪、侦察等方面。

自动化工作

对生产工作过程进行实时信息更新，机械可通过获取的外界信息来调整工作，如自动售货机、监控器、工业机器人的视觉传感器。



CCD发展趋势

而在未来，CCD趋向：

1. 像面尺寸集成化、轻量化：在保持高灵敏度的同时减小CCD尺寸。
2. 高像素密度：提高CCD元件的像素数。
3. 低工作电压，低能耗。
4. 扩展光谱范围：扩大可识别光信号范围，提高图像质量。
5. 低成本。



CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor

CMOS

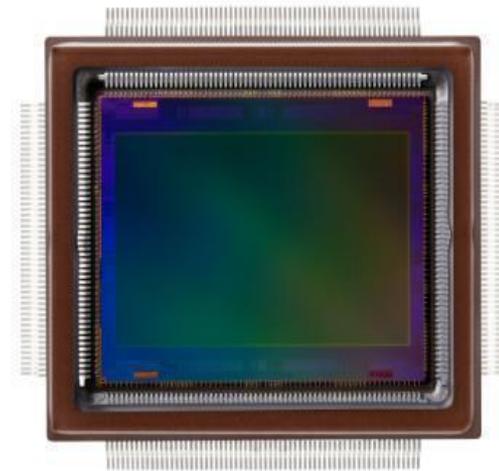
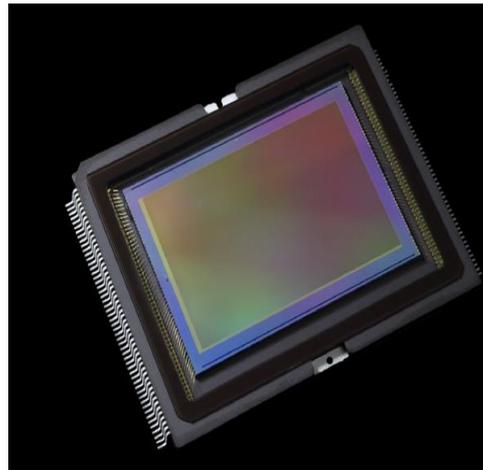
CMOS传感器
简介

成像原理

被动式与主动式

发展前景

与CCD间的不同



T



CMOS简介

Complementary
Metal Oxide
Semiconductor

CMOS是互补金属氧化物半导体的缩写，是指制造大规模集成电路芯片用的一种技术或用这种技术制造出来的芯片。

在数字影像领域，CMOS作为一种**低成本**的感光元件技术被发展出来，市面上常见的数码产品，其感光元件主要就是**CCD或者CMOS**，尤其是低端摄像头产品，而通常高端摄像头都是CCD感光元件。在今日CMOS制造工艺也被应用于制作数码影像器材的元件，尤其是片幅规格较大的**单反数码相机**。

主要是利用**硅**和**锗**这两种元素所做成的半导体，使其在CMOS上共存着带N（带负电）和P（带正电）级的半导体，这两个互补效应所产生的电流即可被处理芯片记录和解读成影像。然而，CMOS的缺点就是太容易出现**杂点**，这主要是因为早期的设计使CMOS在处理快速变化的影像时，由于**电流变化过于频繁**而会产生过热的现象。



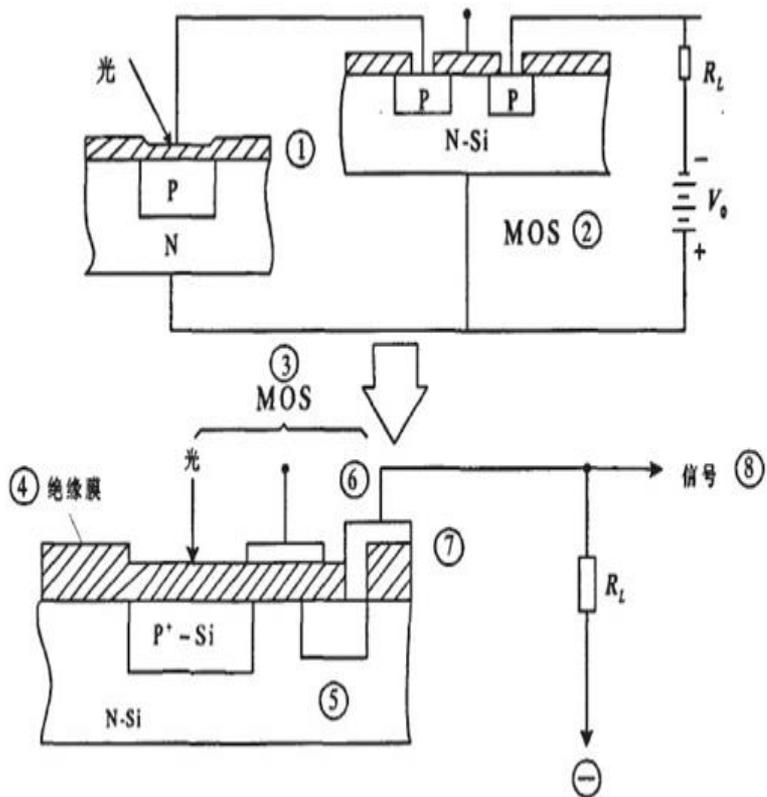
CMOS图像传感器基本原理

*光敏元件，是CMOS的重要感光器件，常用的是光电二极管。

光电二极管利用的是半导体的光生伏特效应（Photovoltaic effect）。当光子入射到PN结形成的耗尽层内时，PN结内的原子吸收光子能量，并产生本征吸收，激发出电子—空穴对，在耗尽区内建电场的作用下，空穴被拉到P区，电子被拉到N区，形成反向电流即光电流。简而言之，CMOS图像传感器和CCD图像传感器在光检测方面都是基于硅的光电效应。



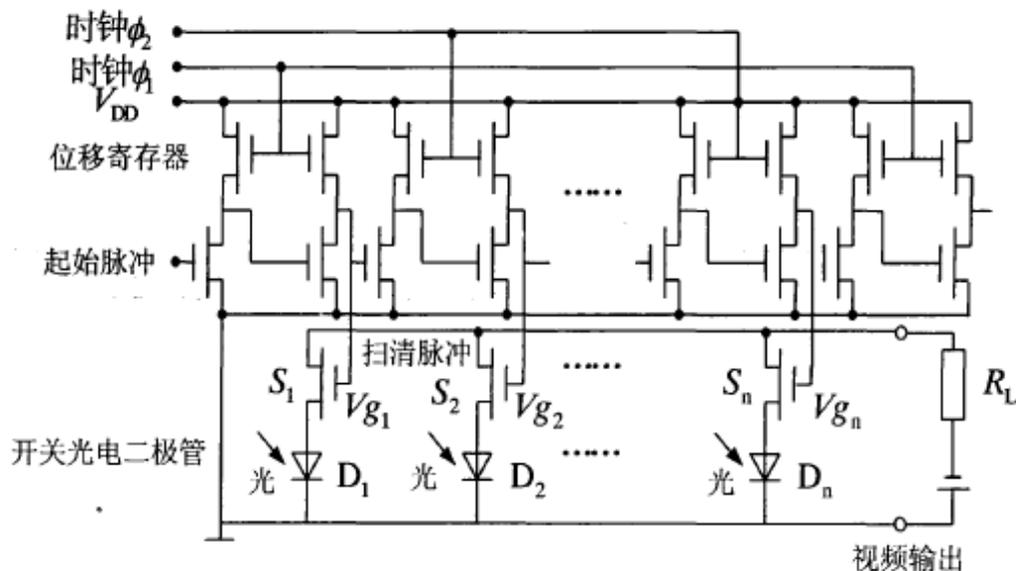
像元结构剖面



像元，亦称像素点或像元点。即影像单元 (picture element)。是组成数字化影像的最小单元。

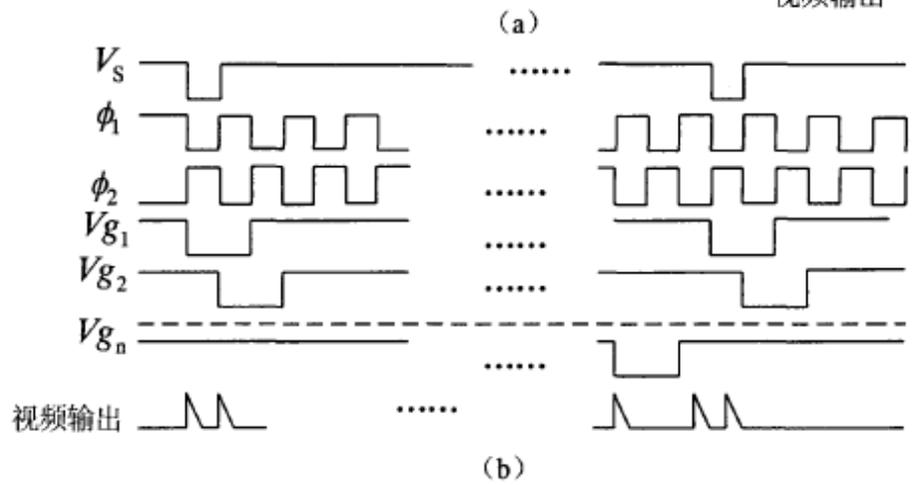


CMOS一维图像传感器



(a) 基本电路; (b) 时序

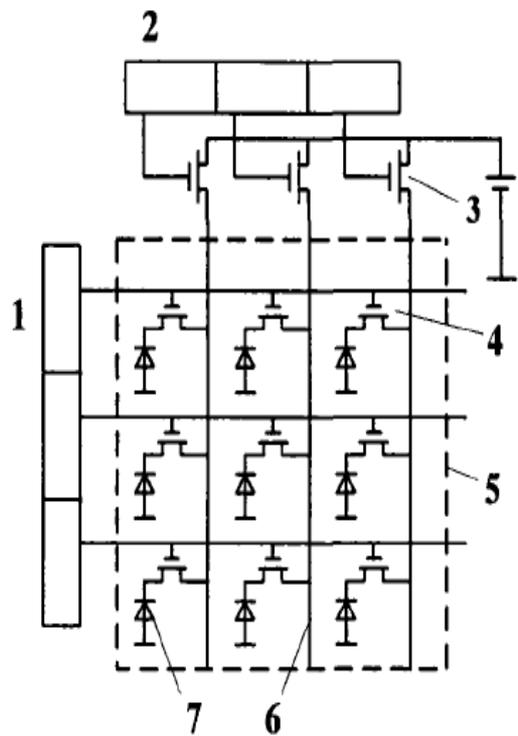
两时钟 ϕ_1, ϕ_2 为两相反的矩形方波电压, V_{DD} 为单极器件的供电电压。可以看到, 不同位移寄存器通电感光时间不同, 也就有了不同的感光时间。



(b)

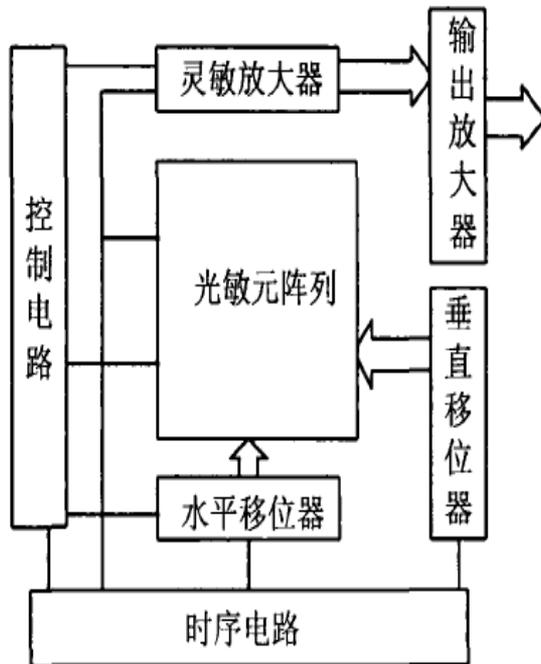


CMOS图像传感器工作原理



CMOS 像敏元阵列结构

- 1—垂直移位寄存器；2—水平移位寄存器；3—水平扫描开关；4—垂直扫描开关；5—像敏元阵列；6—信号线；7—像敏元



CMOS 摄像器件原理框图



CMOS 的三个发展阶段



CMOS 无源
像素传感器

(CMOS-
PPS, Passive
Pixel Sensor)



CMOS 有源
像素传感器

(CMOS- APS,
Active Pixel
Sensor)



CMOS 数字
像素传感器

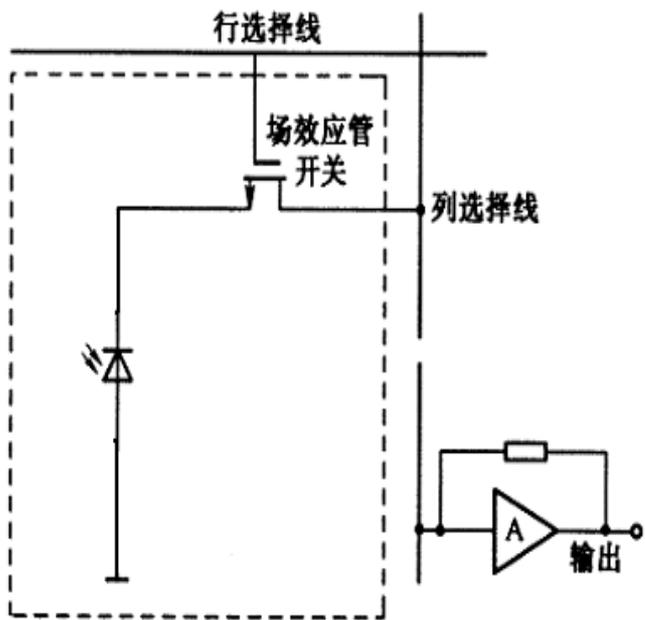
(CMOS- DPS,
Digital Pixel
Sensor)



1. CMOS无源像素传感器

组成原件

- 光电二极管
- 开关管（开关三极管，PNP型 NPN型）



特点：量子效率较高，但噪声较大 ↓

量子效率：单位时间内产生的平均光电子数与入射总光子数之比，即为光电流与入射光子流之比。

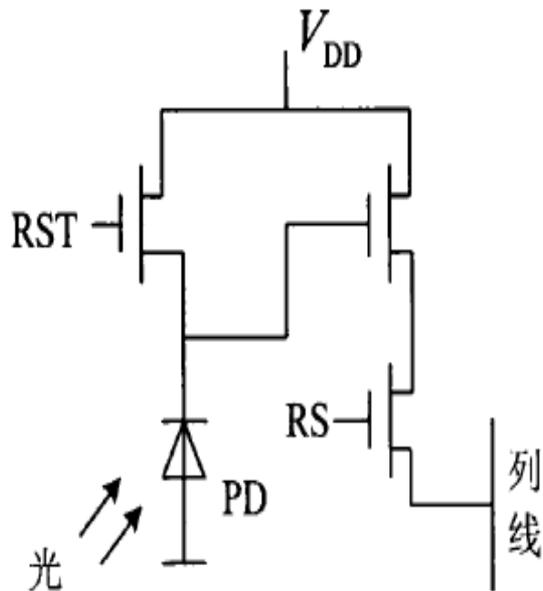
无源器件为本身电路性质，与有无电源无关。



2.CMOS有源像素传感器

光敏二极管型有源像素结构

单极器件供电
电压



RST:接收方
区分异常关
闭及正常关
闭

组成原件:

光电二极管、放大器
和开关管

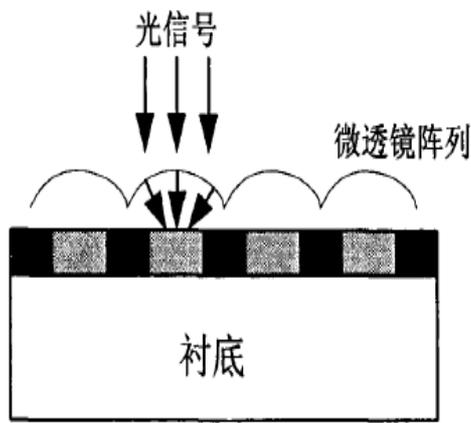
特点: 灵敏度高、
功耗低, 但是像
素单元尺寸大、
填充系数小

器件中感光元件的**空间占用比例小**, 其余电路元件空间占用大, 使得元件体积较大。



2.CMOS有源像素传感器

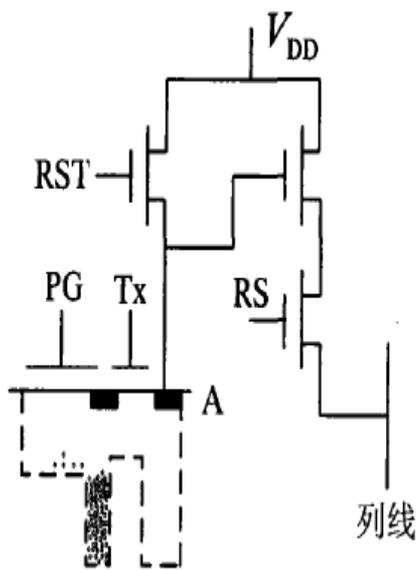
光栅型有源像素结构



非感应区
 光感应区

微透镜阵列原理示意图

用于会聚，发散光辐射



grating: 等间距平行狭缝

$$(a+b)(\sin\phi \pm \sin\theta) = k\lambda$$

\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow
 狭宽 间距 衍射角 入射方向
 光栅常数

组成原件:

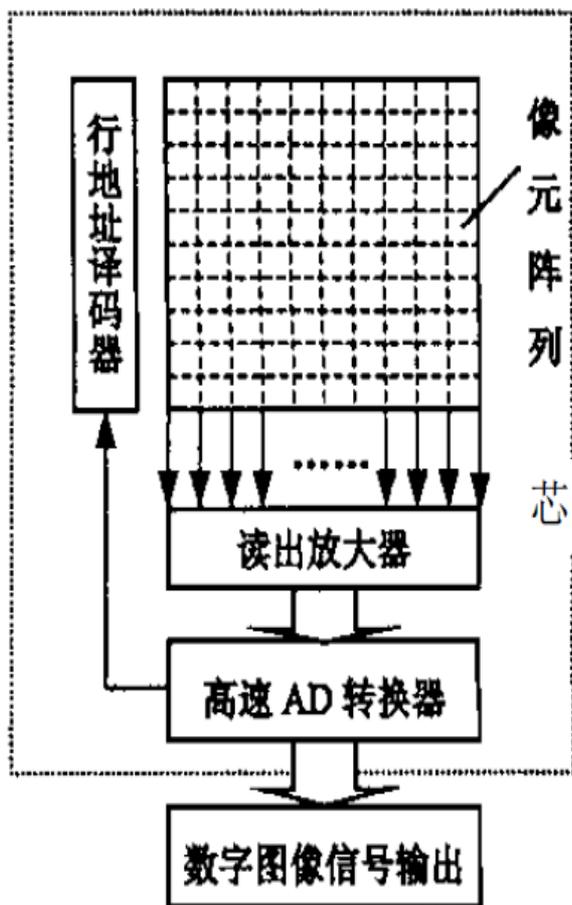
光栅PG、放大器和开关管

特点: 灵敏度高、功耗低, 但是像素单元尺寸大、填充系数小。



3.CMOS数字像素传感器

芯片级ADC 的数字图像传感器



芯片级 ADC DPS 结构框图

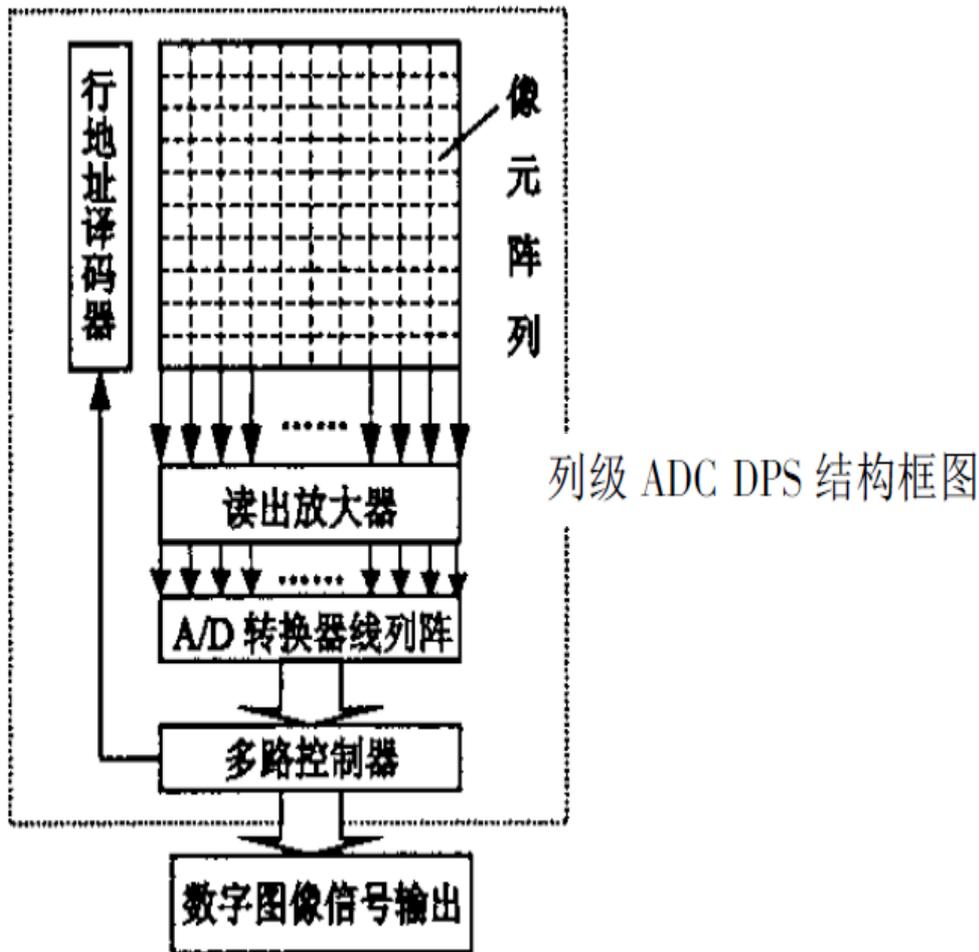
A/D转换器（ADC）：模拟转换器。将输入电压转化为数字信号加以输出

芯片上集成一个A/D转换器,每个像素的输出都要经过该ADC转换后输出，形成数字化影像。



3.CMOS数字像素传感器

列级ADC 的数字图像传感器

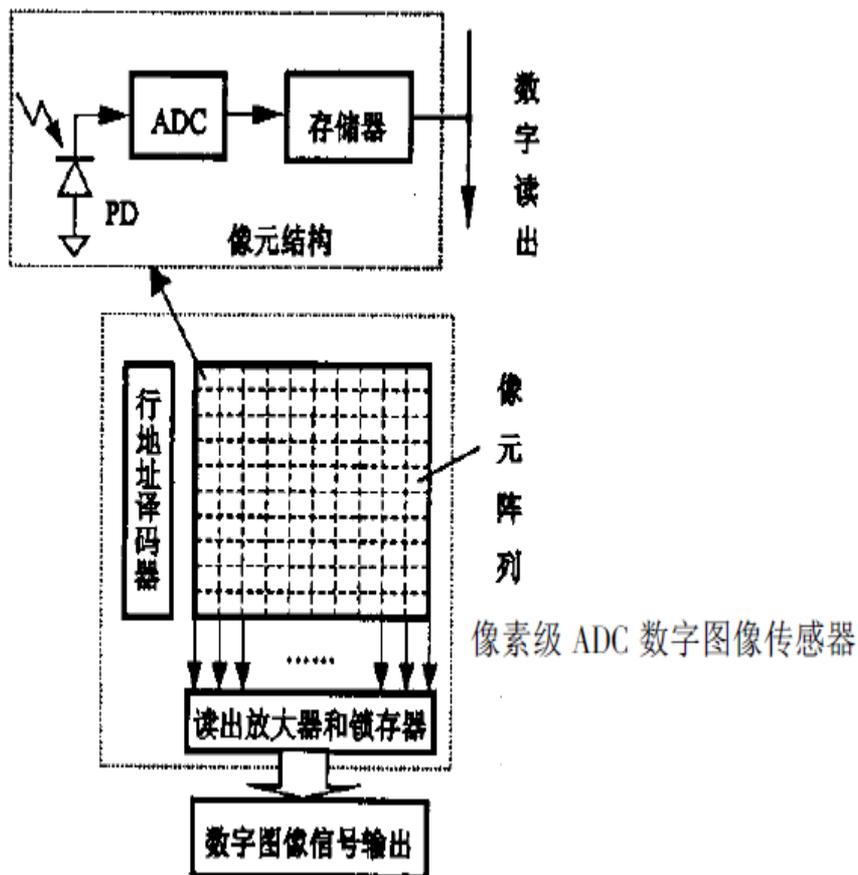


图像传感器阵列的一列
共用一个ADC，
从而构成一个ADC线阵列。
ADC在并行方式下，对逐列信号进行AD转换



3.CMOS数字像素传感器

像素级ADC 的数字图像传感器



图像传感器的每一个像元
或者邻近的一个像元组

(如 2×2 、 2×3 等)

对应一个ADC，而ADC在并行方式下工作。



CMOS 传感器的主要参数

1. 传感器尺寸
2. 像素总数和有效像素数
3. 动态范围
4. 灵敏度
5. 分辨率
6. 光电影响不均匀性
7. 光谱响应特性



传感器尺寸

参数影响因素：CMOS图像传感器的尺寸越大，则成像系统的尺寸越大，捕获的光子越多，感光性能越好，信噪比越低。

目前，CMOS图像传感器的常见尺寸有1英寸、2/3英寸、1/2英寸、1/3英寸、1/4英寸等

格式	长度 (mm)	宽度 (mm)	对角线	面积
全画幅	36	24	43.27	864.00
佳能 APS-H	27.9	18.6	33.53	518.94
尼康 DX	23.6	15.8	28.40	372.88
佳能 APS-C	22.3	14.9	26.82	332.27
佳能 1.5英寸	18.7	14	23.36	261.80
4/3英寸	17.3	13	21.64	224.90
尼康 1系列	13.2	8.8	15.86	116.16
富士 2/3英寸	8.8	6.6	11.00	58.08
1/1.7英寸	7.76	5.82	9.70	45.16
1/2.3英寸	6.16	4.62	7.70	28.46
1/3.2英寸	4.13	3.05	5.13	12.60





像素总数和有效像素数

像素总数是指所有像素的总和，像素总数是衡量CMOS图像传感器的主要技术指标之一。CMOS图像传感器的总体像素中被用来进行**有效的光电转换并输出图像信号**的像素为有效像素。显而易见,有效像素总数隶属于像素总数集合。有效像素数目直接决定了CMOS图像传感器的分辨能力。

有效像素：实际参与成像的像素

最高像素：相机DSP芯片自动模拟出的像素

关于数码相机，我们只关注有效像素即可，最高像素也是数码相机能力指标，但并不是很真实



动态范围

动态范围(Dynamic Range), 对于感光元件来说, 动态范围表示图像中所包含的从"最暗"至"最亮"的范围。动态范围越大, 所能表现的层次越丰富, 所包含的色彩空间也越广。

动态范围由CMOS图像传感器的**信号处理能力**决定,反映了CMOS图像传感器的工作范围。

像素曝光的过程中吸收光子, 转化成数字信号, 然后成像。没有吸收光子和吸收光子至满载的像素值分别显示为"0"和"255", 即代表纯黑色和纯白色。



像素满载, 光子便会溢出, 溢出会导致信息(细节)损失。也使周围像素数字信号发生变化



数码单反的感光元件尺寸一般是消费级数码相机的4~10倍, 允许承载更多的像素而不至于缩小像点之间的距离, 而产生噪点。更多的像素不会很快被"填满", 因此表现昏暗环境的像素在表现光亮环境的像素"满载"之前, 有更多时间吸收光子, 从而画面细节便会更加丰富。





灵敏度

图像传感器对入射光功率的响应能力被称为响应度。对于CMOS图像传感器来说,通常采用电流灵敏度来反映响应能力,电流灵敏度也就是单位光功率所产生的信号电流。

响应度（R）是描述器件光电转换能力的物理量，响应度与器件材料、光波长有关。即输出电信号电流大小与输入光信号功率大小之比。用公式表示为：

$$R=I_p/P_o$$

单位为A/W



分辨率

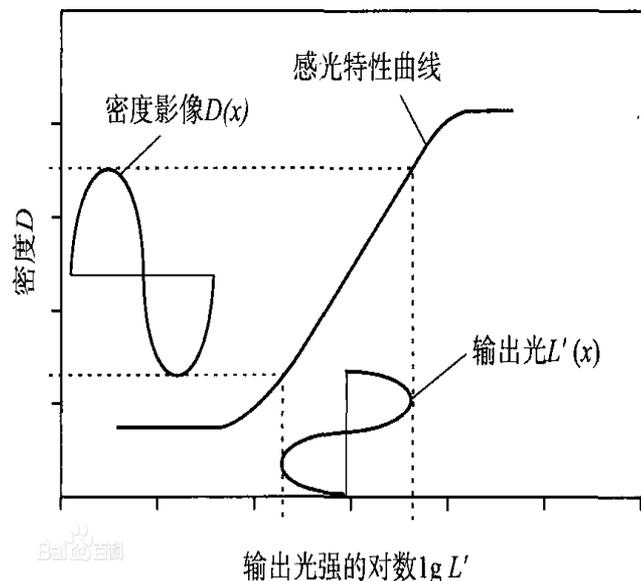
分辨率是指CMOS图像传感器对景物中**明暗细节的分辨能力**。通常用调制传递函数(MTF)来表示,同时也可以**用空间频率(lp/mm)来表示**。

一般通过光学系统的输出像的对比度总比输入像的对比度要差,这个对比度的变化量与空间频率特性有密切的关系。把输出像与输入像的对比度之比成为调制传递函数 (Modulation Transfer Function)

MTF=输出图像的对比度/输入图像的对比度

在波动力学中,空间频率常用字母 ξ 来表示,其与波长 λ 互为倒数。同时角波数 k 也与空间频率和波长有关,有

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi\xi$$





光电影响不均匀性

CMOS图像传感器是离散采样型成像器件,光电响应不均匀性定义为CMOS图像传感器在标准的均匀照明条件下,各个像元的固定噪声电压峰峰值与信号电压的比值。

电子测量中,习惯上把信号电压以外的电压统称为**噪声**。从这个意义上说,噪声应包括外界干扰和内部噪声两大部分。由于外界干扰在技术上是可消除的,所以最终关心的噪声电压的测量主要是对电路内部产生的噪声电压的测量。测量噪声电压峰峰值一般使用示波器

理想的交流电,波形为正弦波或方波或三角波,但实际电网中存在负载不平衡、设备开和关瞬间的电涌波、电路负载变化时电压的变化等诸多因素,导致理想波形产生变形,而不是完美原始波形。叠加在原始波形上的各种被合成的无规则电压就是噪声电压。

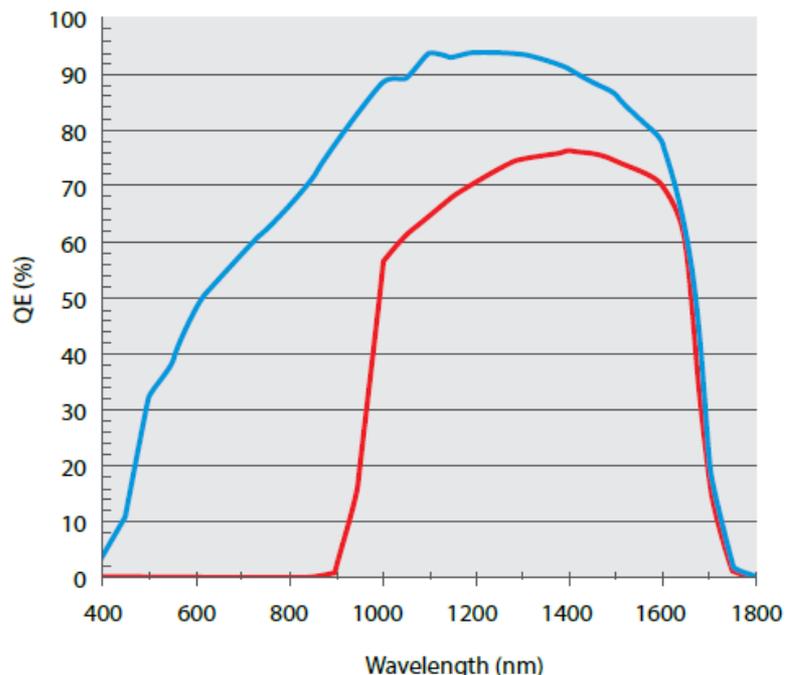


光谱响应特性

光谱响应表示不同波长的光子产生电子-空穴对的能力，CMOS传感器光谱响应特性是其感光范围和宽度的重要参考，对其性能产生影响。

CMOS图像传感器的信号电压 V_s 和信号电流 I_s 是入射光波长 λ 的函数。光谱响应特性就是指CMOS图像传感器的响应能力随波长的变化关系,它决定了CMOS图像传感器的光谱范围。

Spectral response





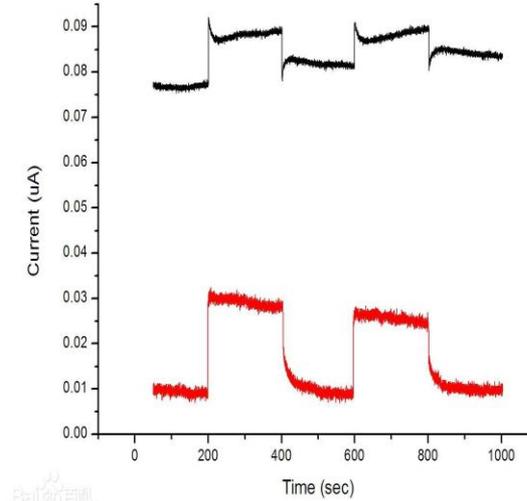
影响CMOS 传感器性能的一些问题

1. 暗电流
2. 噪声
3. 填充系数



暗电流

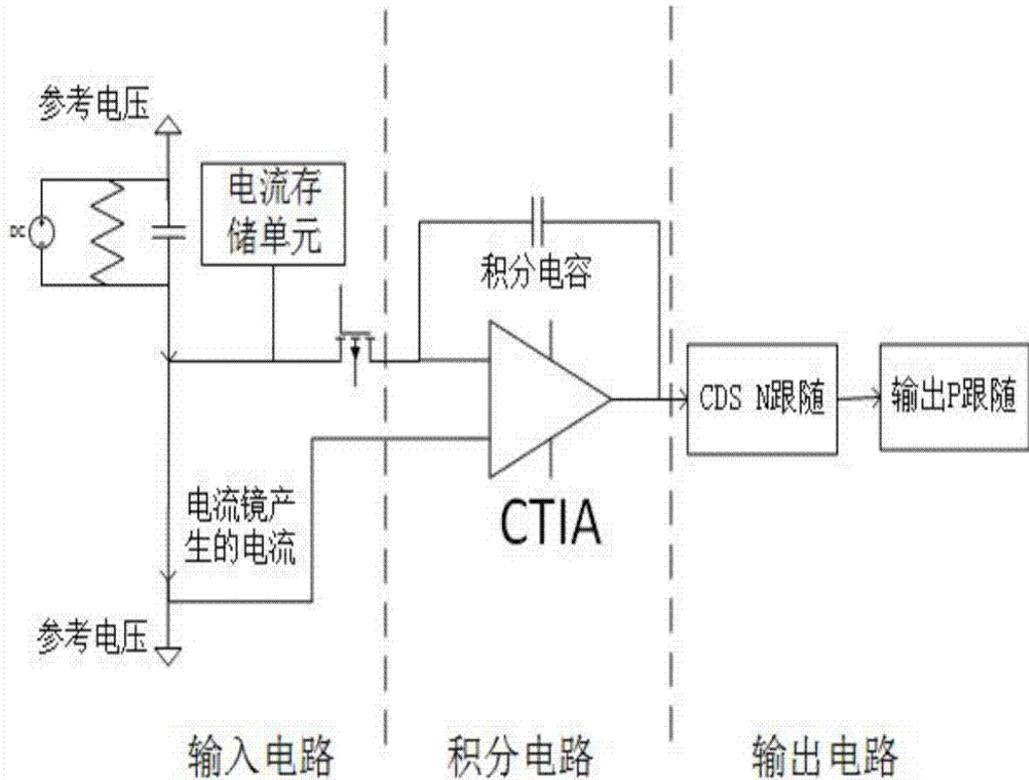
暗电流起因于**热激励产生的电子空穴对**,其中耗尽区内产生的热激励是主要的,其次是耗尽区边缘的少数电荷的热扩散,还有界面上产生的热激励。暗电流的产生需要一定的时间,**势阱存在时间越长,暗电流也越大**。为了减小暗电流,应尽量缩短信号电荷的存储与转移时间,**暗电流限制了成象器件的灵敏度与动态范围**。



暗电流 (dark current), 也称无照电流, 指在没有光照射的状态下, 在太阳电池、光敏二极管、光导电元件、光电管等的受光元件中流动的电流。暗电流的大小与温度的关系极为密切, 温度每降低 10°C , 暗电流约减小一半。



中国科学院上海技术物理研究所：一种逐元暗电流抑制的CMOS红外探测器读出电路



该发明公开了一种逐元暗电流抑制的**CMOS**红外探测器读出电路，读出电路包括输入电路、积分电路、输出电路三部分。输入电路采用电流存储单元和电流镜相结合的结构。其中，电流存储单元分布在线列电路每个象元中，由传输门、虚拟开关对以及电容耦合回路组成，可以实现暗电流定制化调制；电流镜布局在线列电路的左右两端，可以实现暗电流整体抑制。



噪声

噪声的大小直接影响 CMOS 图像传感器对信号的采集和处理，因此，如何提高信噪比是 CMOS 图像传感器的关键技术之一。

CMOS的噪声主要有：

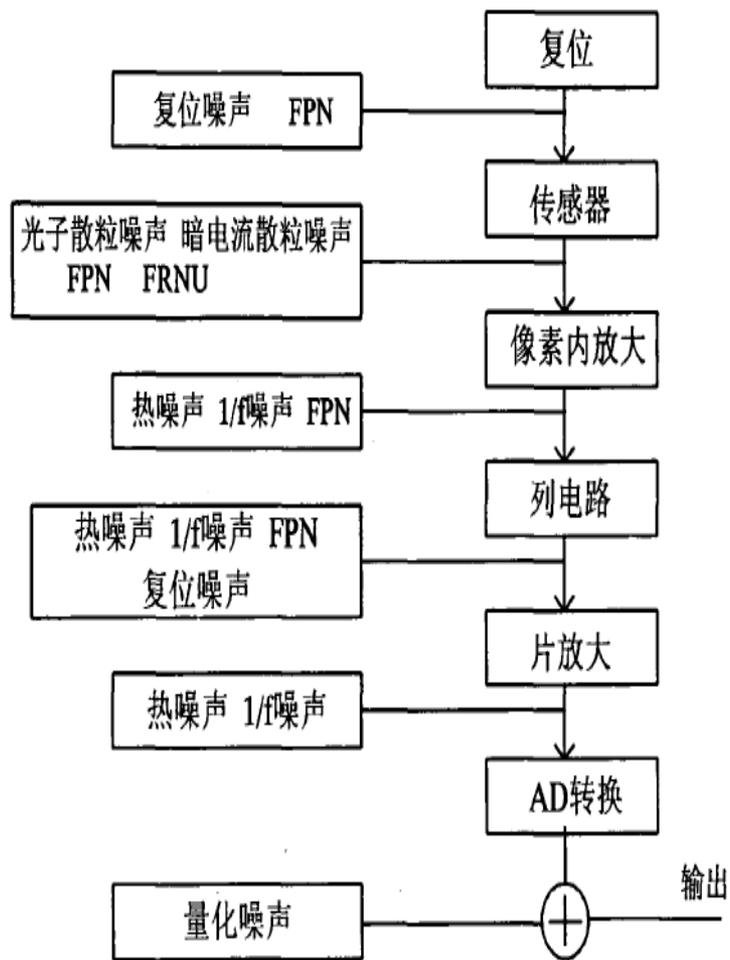
热噪声

复位噪声

散粒噪声

低频噪声

固定模式噪声



受噪声干扰的 CMOS 图像传感器信号流图



热噪声

热噪声是导体中被热激发的载流子进行不规则布朗运动所产生的随机电流，通过欧姆定律就产生了随机电压。

采用较小尺寸器件有利于减少热噪声。热噪声常与实际电路带宽有关，因而放大器输入级尤为重要。

复位噪声

当复位开关与低阻电源断开时，信号储存在电容上的残存电荷往往是不确定的，这就引起了一种复位噪声。这种复位噪声电荷的均方根值为：

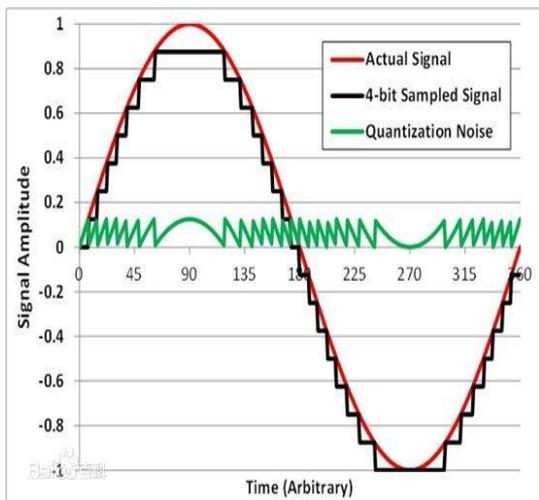
$$Q_n = \sqrt{kTC}$$

一般，复位噪声的抑制方法是先测量复位噪声，然后从信号中减去。



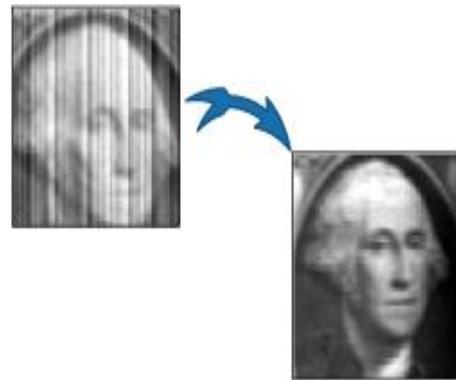
低频噪声

低频噪声又称 $1/f$ 噪声，也叫闪烁噪声（flicker noise），它产生于像素级源跟随器以及列放大电路中，是有源器件中载波密度的随机波动而产生的，它会对中心频率信号进行调制，并在中心频率上形成两个边带，降低了振荡器的Q值。由于 $1/f$ 噪声是在中心频率附近的主要噪声，因此在设计器件模型时必须考虑到它的影响。可以通过减小器件面积的方法来有效抑制，应用前级电路也可使噪声最小化。



固定模式噪声

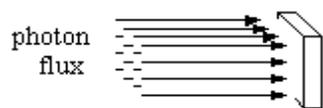
该噪声是空间噪声，是不随时间变化的，主要归因于各种偏差，如光探测器尺寸，掺杂浓度，MOS特性的偏差等。通常消除固定模式噪声采用“双采样降噪”方法，这是CMOS感光器件特有的一种降噪方式。在光线较暗的环境下使用时，画面会有明显的噪声，这时通过对景物进行两次不同曝光率和敏感度的采样，然后将两次采样的结果进行综合处理，就可以有效解决低照度下的图像噪声问题。





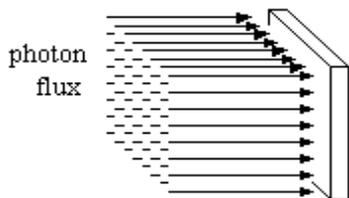
光子散粒噪声

这类噪声是由于光子到达传感器的数量在时间和空间上具有随机性而产生的。一般认为，光子噪声是光子数量的平方根（见下图）。



$4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ pixel
 $4 \times 4 = 16$ photons captured
noise = $\text{sqrt}(16) = 4$ photons
signal to noise ratio = $16\ \text{photons} / 4\ \text{photons} = 4$

figure 1a. $4\ \mu\text{m}$ pixel typical for point and shoot camera



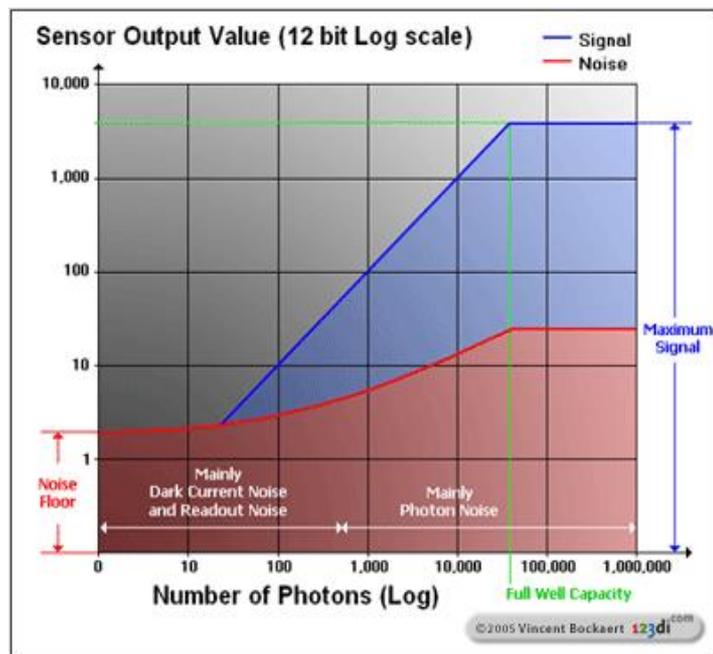
$8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ pixel
 $8 \times 8 = 64$ photons captured
noise = $\text{sqrt}(64) = 8$ photons
signal to noise ratio = $64\ \text{photons} / 8\ \text{photons} = 8$

figure 1b. $8\ \mu\text{m}$ pixel typical for SLR camera

一般认为：由于光子到达的时间是随机的，所以在光子的物理计数上，信号中的噪声是光子数量的平方根，服从泊松分布。



光子散粒噪声是光子数量的函数（平方根），传感器接收的光子越多，光子噪声也越多，没有接受到光子（如全黑状态），光子噪声为零，只有本底噪声存在。但光子噪声的增长速度没有光子数量（信号）增长得快。所以，光子噪声不会降低信噪比，反而会增加信噪比，因为信号（光子数量）是光子噪声的平方。



图中的坐标是对数单位，横轴是传感器接收的光子数量即输入，纵轴是传感器输出的电子数量。红色的部分是噪声，由两部分组成：左边的是暗电流以及读出噪声，右边的是光子噪声。蓝色的是信号，绿线表示最大阱容。可以看出，当电子数（以及对应的光子数）达到最大阱容时，信号就不再增加（噪声也不再增加），噪声比信号增长的慢。从这张图上我们可以看到，传感器在光子数达到一个阈值后才开始有信号的（图上是在10与100个光子之间），也就是说如果传感器接受的光子数少于某个阈值，就不会有信号输出。这个阈值一般认为是读出噪声。



数码相机的噪声模型为：

$$N = \sqrt{P + r^2 + t^2}$$

式中**N**是以电子为单位的总的噪声，**P**是光子的数量，**r**是以电子为单位的读出噪声，**t**是以电子为单位的热噪声。



填充系数

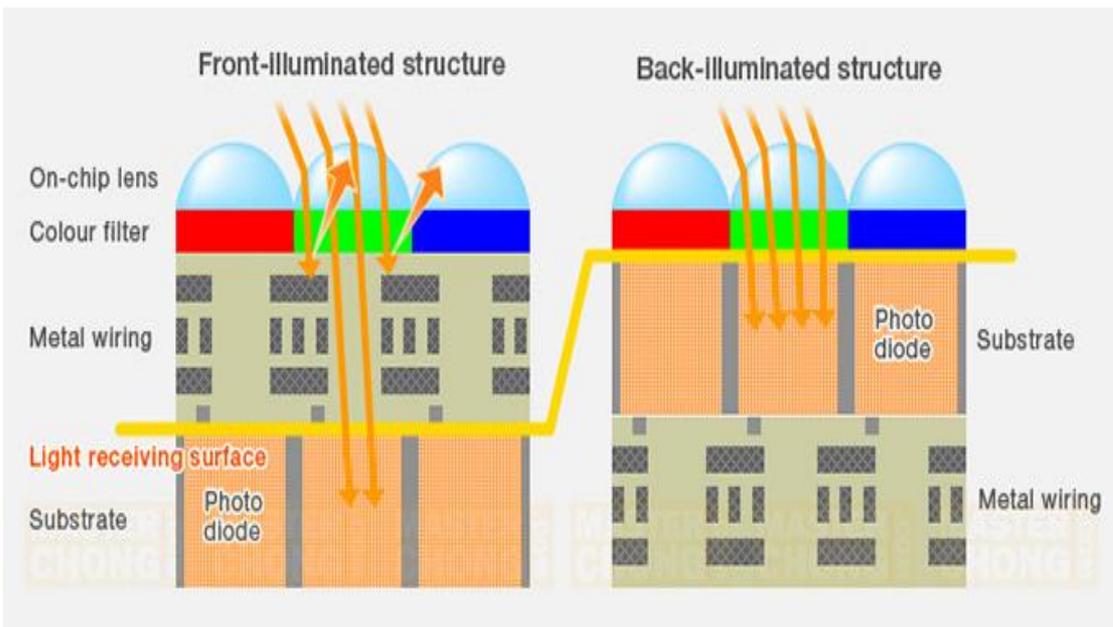
CMOS填充系数（fill factor）或开口率，其内涵定义为：CMOS像素光电二极管的实际受光面积与其本身受光面积的比值。

CMOS 图像传感器的填充系数一般在 **30%左右**，而 CCD 图像传感器则高达 **80%以上**，这主要是由于 CMOS 图像传感器的像素中集成了读出电路，即放大器等晶体管以及相关的金属布线。

CMOS填充系数实际上与像素的大小有关。因为金属布线的宽度和晶体管的尺寸与制程有关，而与像素的面积无关。随着技术的不断进步，布线宽度和晶体管尺寸可以做得越来越小，



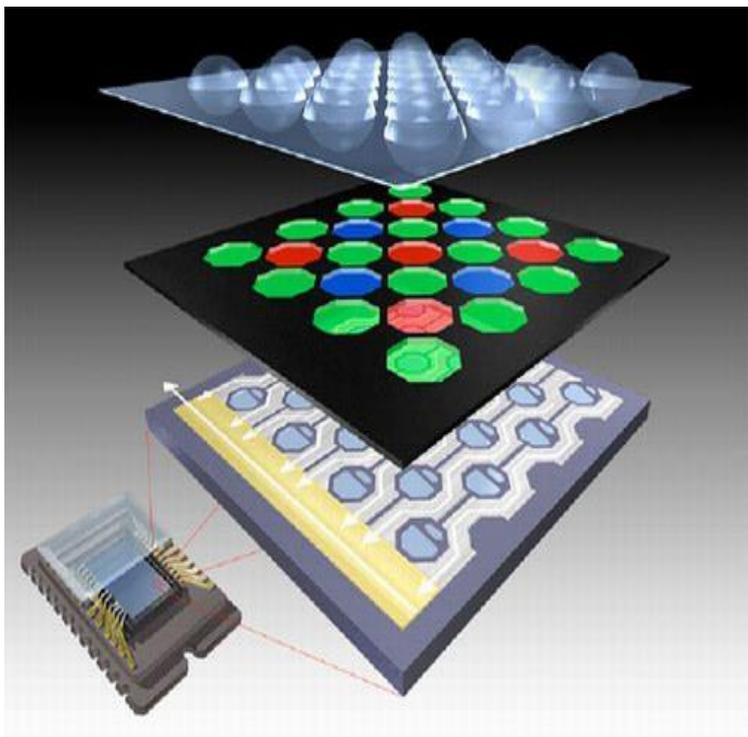
下图是SONY的Exmor R CMOS背面照明技术感光元件与传统CMOS感光元件的区别：



传统CMOS传感器（左边）的金属布线在光电二极管的上面，因此会遮挡住一部分入射的光线，减少光通量，同时还会反射一部分光线造成噪声。而SONY的背照式技术将金属布线做到了光电二极管的背面，光线可不受阻碍的全部照射到光电二极管的受光面上。因此，Exmor R CMOS传感器（右边）的CMOS填充系数接近1或100%。



还有一种填充系数是微透镜的覆盖率，其定义为微透镜覆盖象素的面积/象素的几何面积，即透镜是否可以将整个像素的面积全部覆盖。



从富士的这张图上可以看出，由于工艺上的问题，微透镜之间不可能没有缝隙，因此微透镜不可能100%的覆盖。微透镜覆盖率与CMOS填充系数一样，与像素的面积正相关，象素面积越大，微透镜的覆盖率越大，象素面积越小，微透镜覆盖率越低。

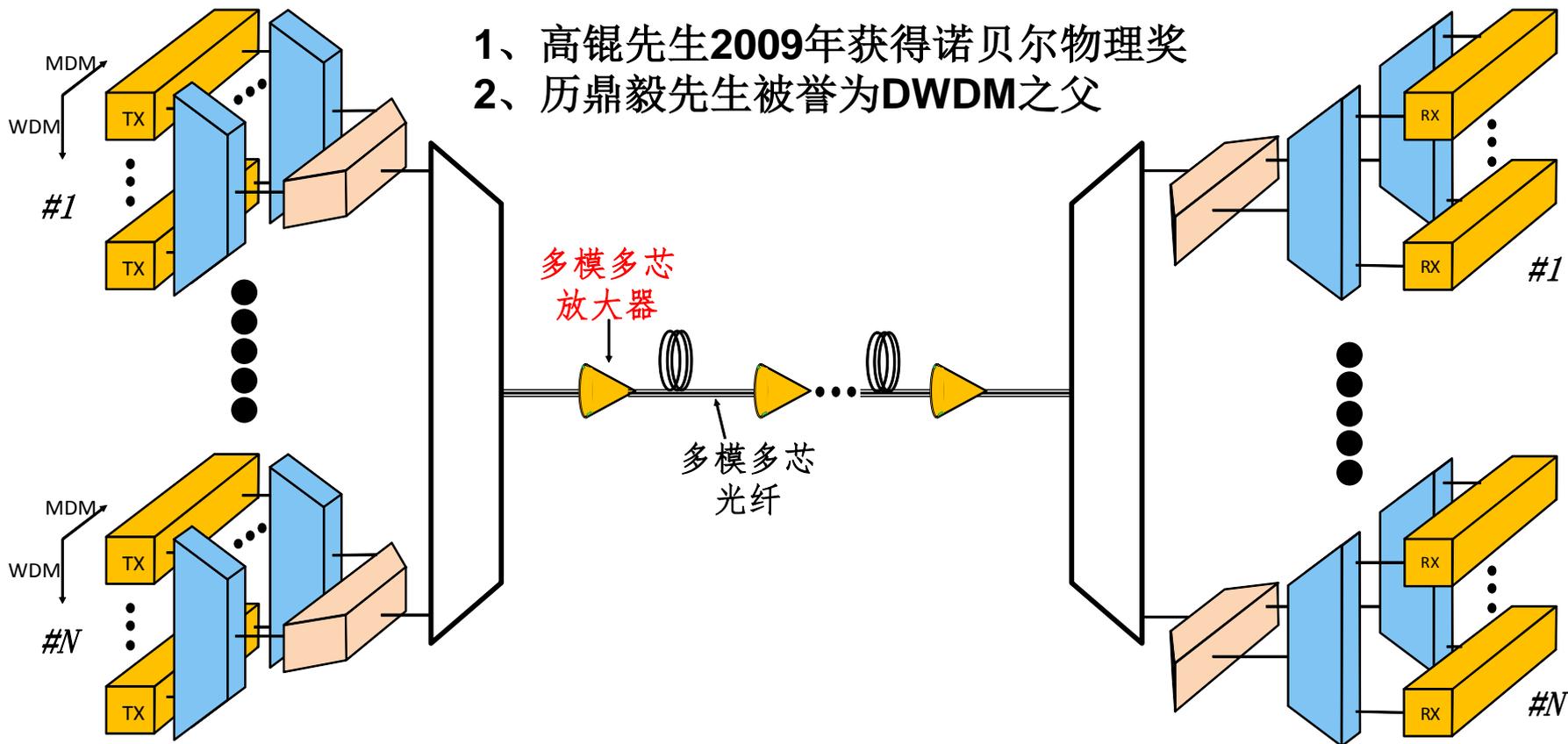


光通信产业核心光器件

**Optical fiber communication and
the key devices**



光纤通信技术发展历史



- 1、高锟先生2009年获得诺贝尔物理奖
- 2、历鼎毅先生被誉为DWDM之父

波分复用-相位复用-模分复用传输示意图

第二代光通信系统：波分复用
第三代光通信系统：相位复用
第四代光通信系统可能是：模分复用



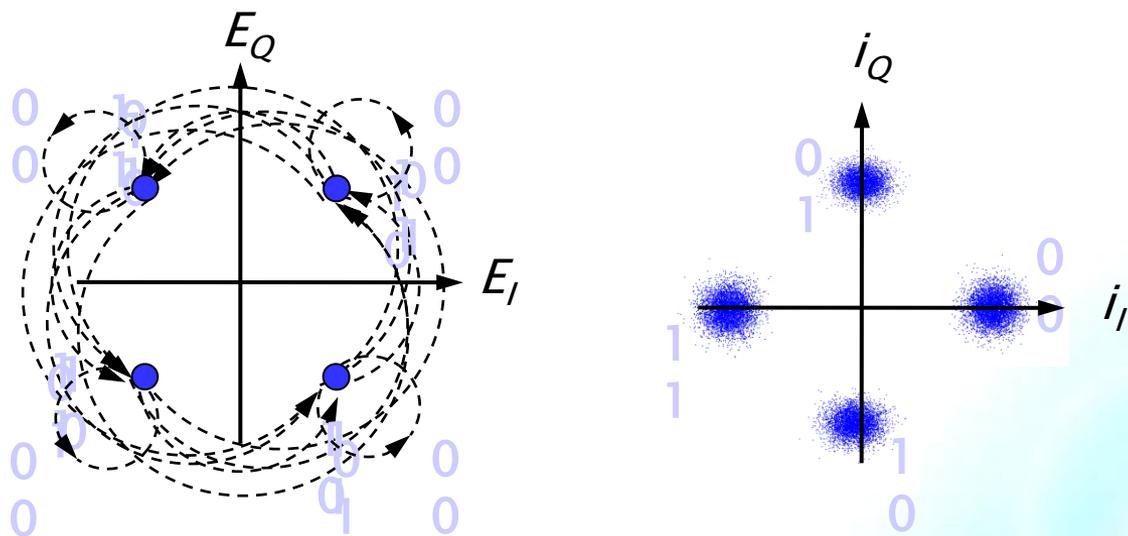
光纤通信技术进入相干光通信时代

国内外主要光通信干线在2012年前后已经进入100G时代，最近400G系统也开始实用化，100G/400G系统现在的主流方案都是相干光技术方案，这个方案采用差分正交相移键控（DQPSK），相当于过去传统编码方式，相当于4组高速信号共享一个窄线宽激光器，每组信号分别加载在4个不同的相位上及两个正交偏振态上，既然是相位复用，直接调制激光器就不适用了。

实际上25GHz高速外调制器是100Gbit/s光纤通信系统的核心器件（LN或者InP、硅基）高速光调制器是100G相干调制器的核心基础单元芯片，通过并联两个25G子MZ调制器，构成一个50G DPSK MZ调制器，而后通过正交偏振复用构成100G调制器。一般50G DPSK MZ调制器是单片集成两个子25G MZ调制器。两个50G DPSK MZ调制器的偏振复用有单片集成的也有空间光集成的，一般以空间光集成为主。所以25G MZ调制器是目前整个100G调制器芯片的核心基础单元，是100G调制器芯片研发的前提。

DQPSK调制与解调原理图示

DQPSK调制(动画)



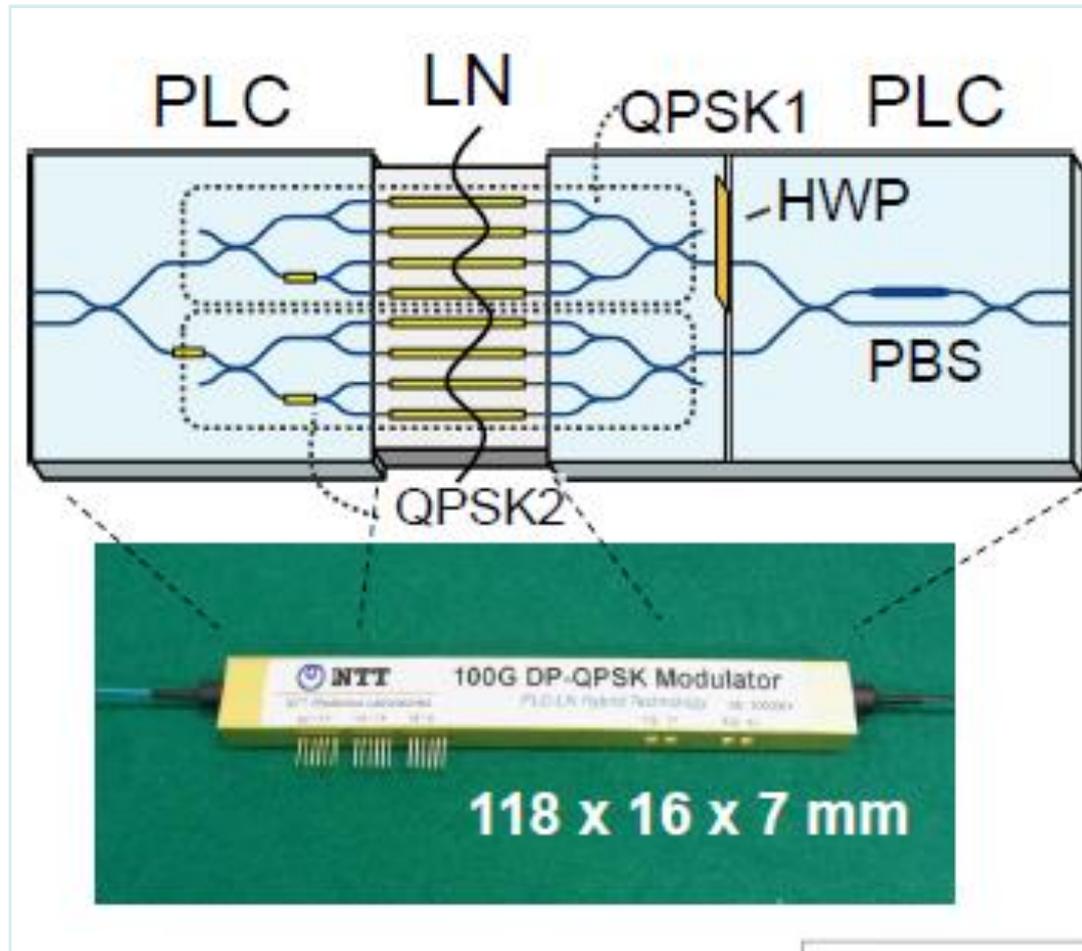
E: Optical field, i: Bit information

调制原理如上图所示:

设初始数据为“0, 0”, 当数据仍为“0, 0”时, 信号相位不发生变化; 当数据变为“0, 1”时, 信号相位改变 $\pi/2$; 当数据变为“1, 1”时, 信号相位改变 π ; 当数据变为“1, 0”时, 信号相位改变 $3\pi/2$ 。



混合集成LiNbO3外调制器





混合集成LiNbO3外调制器

Flexible-format Optical Modulator by Silica-LiNbO3 Hybrid Integration Technology

Takashi Goh, *NTT Photonics Laboratories,*

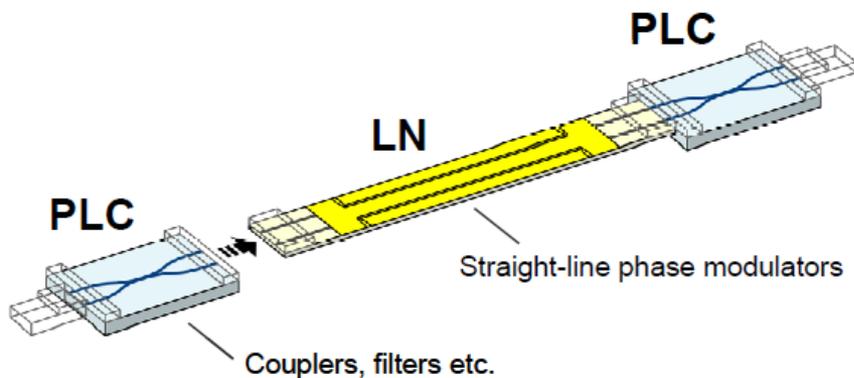


Fig. 1. Basic structure of PLC-LN modulator.

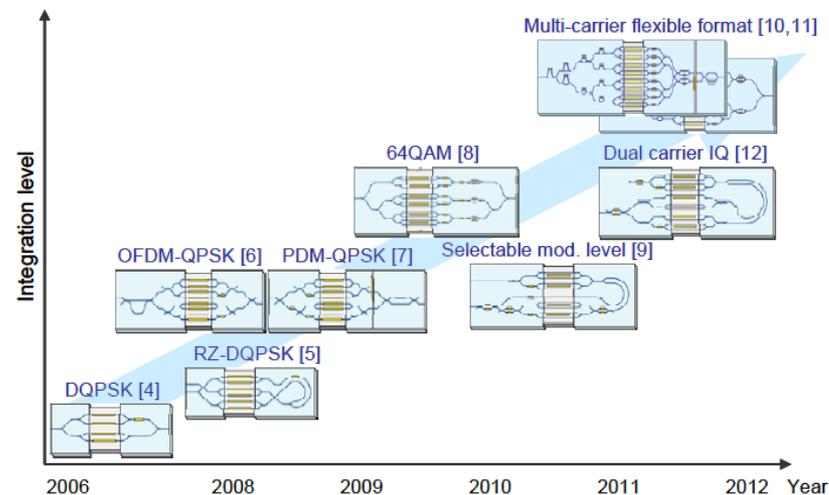
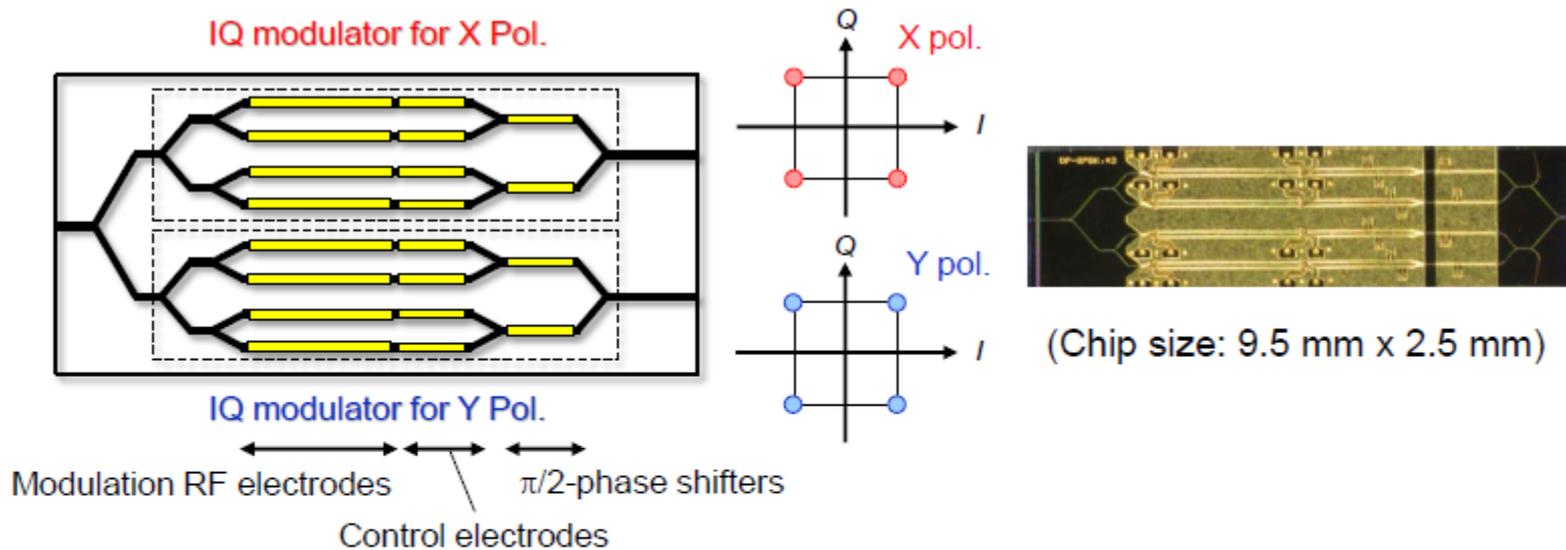


Fig. 2. Demonstrated PLC-LN modulators.



InP-based Twin-IQ Modulator Chip

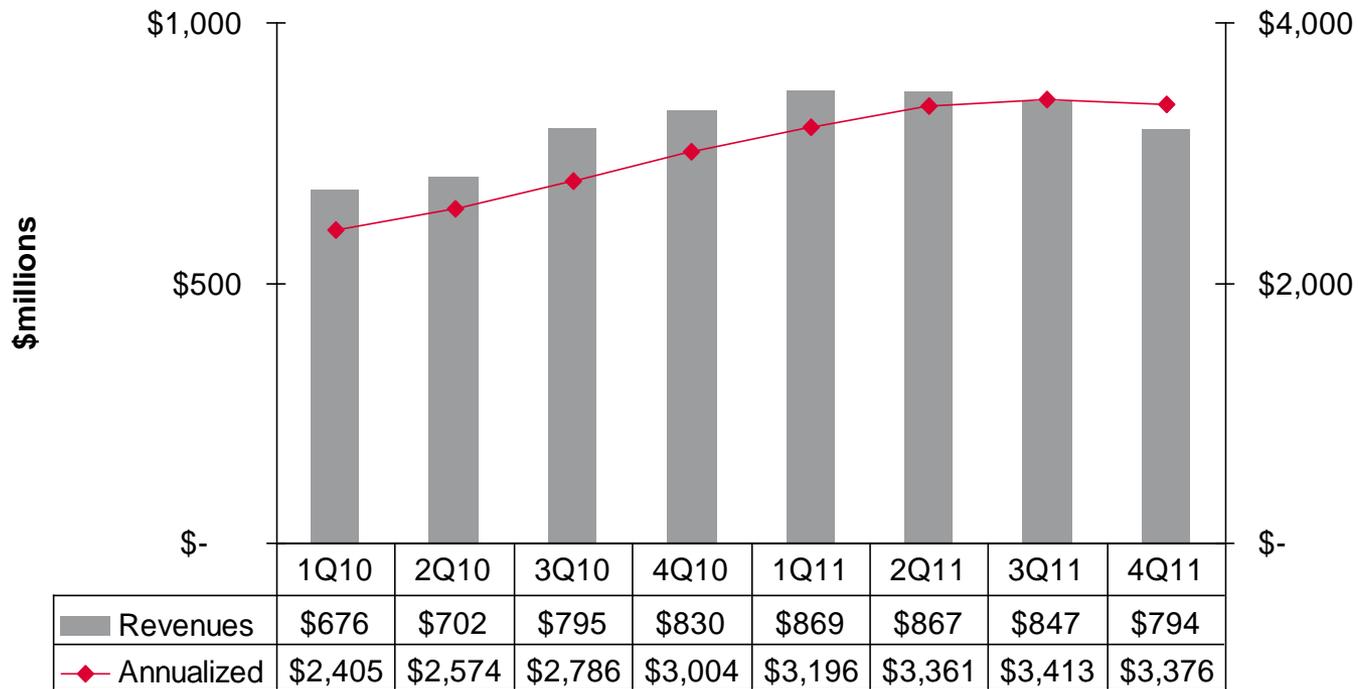


✓ Two IQ modulator are monolithically integrated.

- **Driving voltage:**
 $3 V_{pp} \times 2$ (differential) for $2 V\pi$
- **Length of electrode:**
2.5 mm (Mod.), 1.5 mm (Cont.), 1.0 mm ($\pi/2$ -phase shifter)
- **Chip size:** 9.5 mm x 2.5 mm



2012年激光器及模块占63亿美元中的一半以上

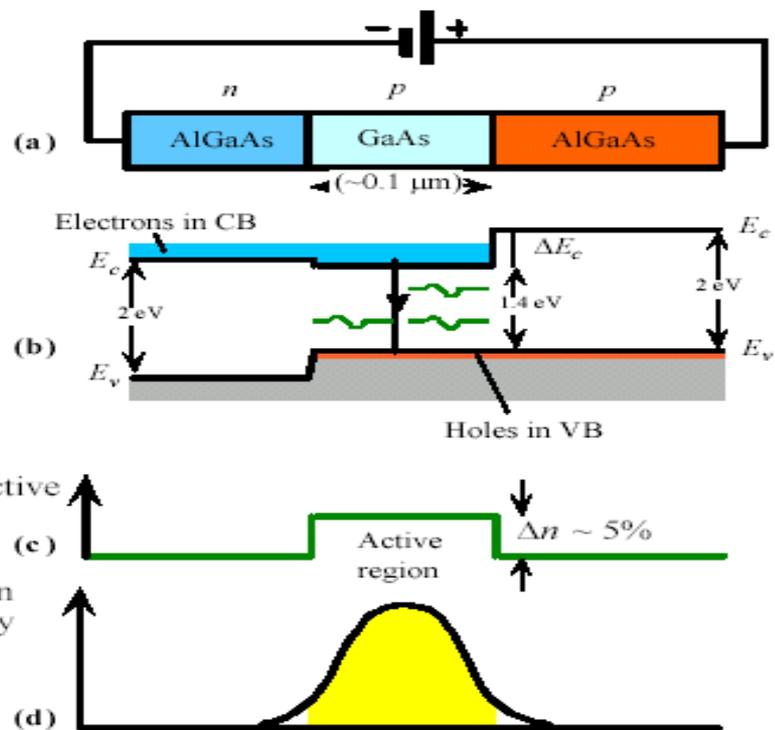


据OVEM-RHK公司权威数据，2012年全球光通信器件市场规模约63亿美元，其中激光器和激光器相关的收发模块约占34亿美元，因此过去20年在光通信器件行业，可谓“得激光器者得天下”。



半导体异质结

- 异质结的作用：
- 异质结对载流子的限制作用
- 异质结对光场的限制作用
- 异质结的高注入比





阿尔费罗夫：半导体异质结理论和应用的创始人

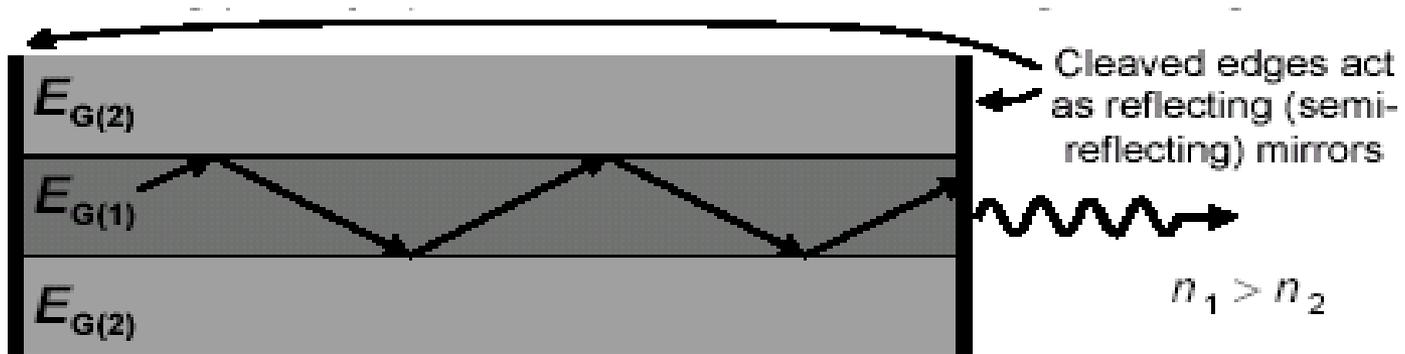


阿尔费罗夫院士是异质结构物理学的创立者。他于1970年在世界上首先实现了半导体激光器的室温连续运转，拉开了 [光纤通信](#) 大发展的序幕，奠定了因特网以及当代电子和光电子技术，特别是相关信息及能源技术的基础。同时，他还是低维（纳）异质结构研究的倡导者和领军人物。

若列斯·伊万诺维奇·阿尔费罗夫，俄罗斯籍，男，1930年3月生。半导体物理学家，俄罗斯科学院院士，从1990年至今先后担任前苏联科学院副院长、俄罗斯科学院副院长。享有中国科学院外籍院士、美国科学院及美国工程院外籍院士等许多国家的院士称号，荣获2000年度诺贝尔物理学奖。



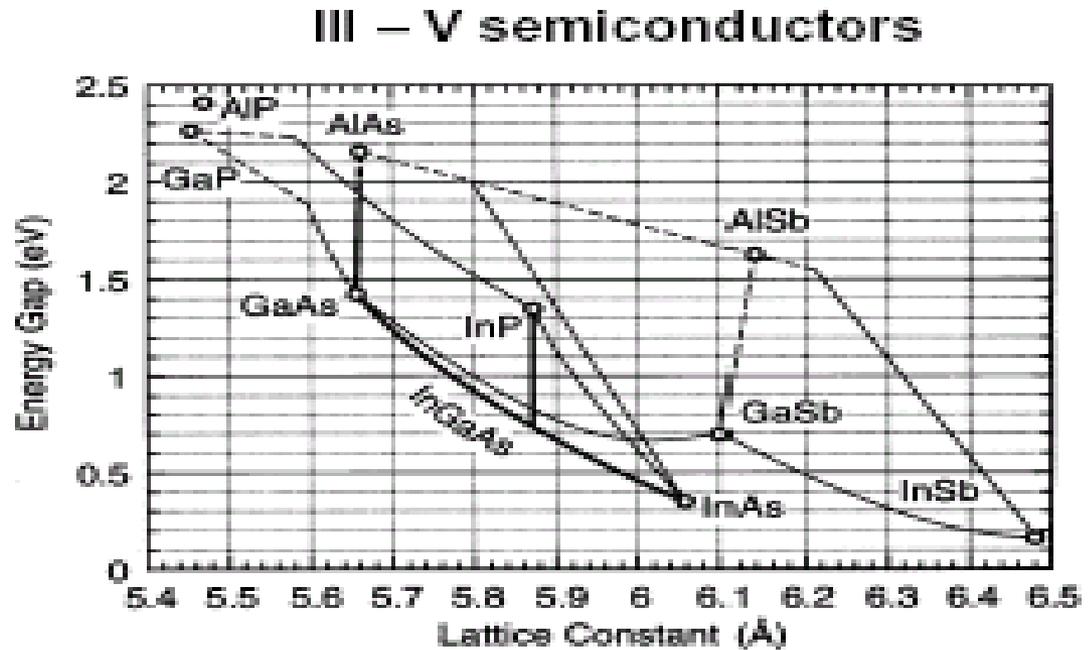
异质结对光场的限制作用





半导体激光器的材料选择

- 1-能在所需的波长发光
- 2-晶格常数与衬底匹配

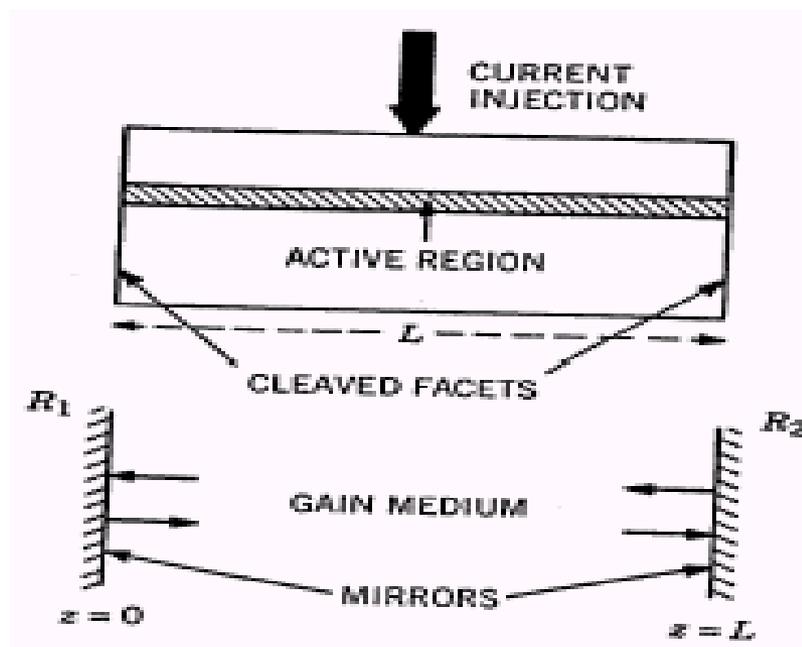




半导体激光器的工作原理

基本条件:

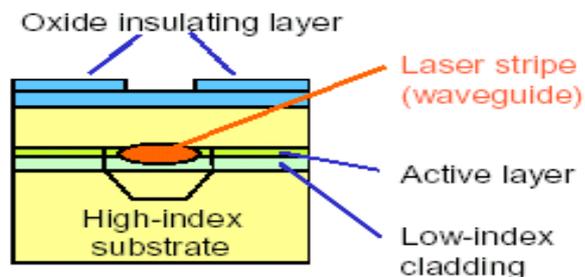
- 1有源区载流子反转分布
- 2谐振腔：使受激辐射多次反馈，形成振荡
- 3满足阈值条件，使增益>损耗，有足够的注入电流。



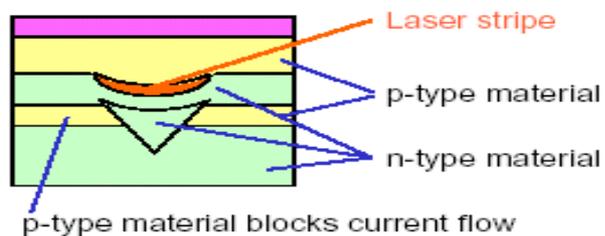


几种典型的折射率导引激光器

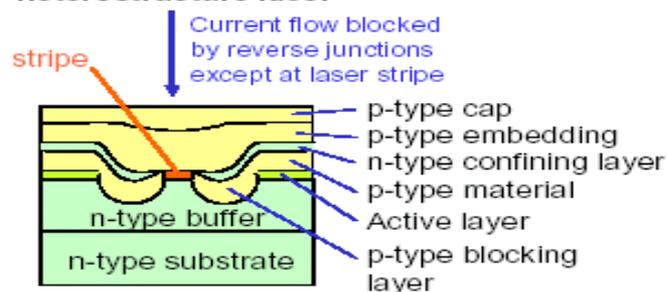
Channeled substrate planar laser



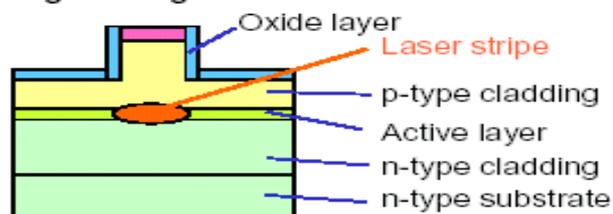
Buried crescent laser



Dual-channel planar buried-heterostructure laser



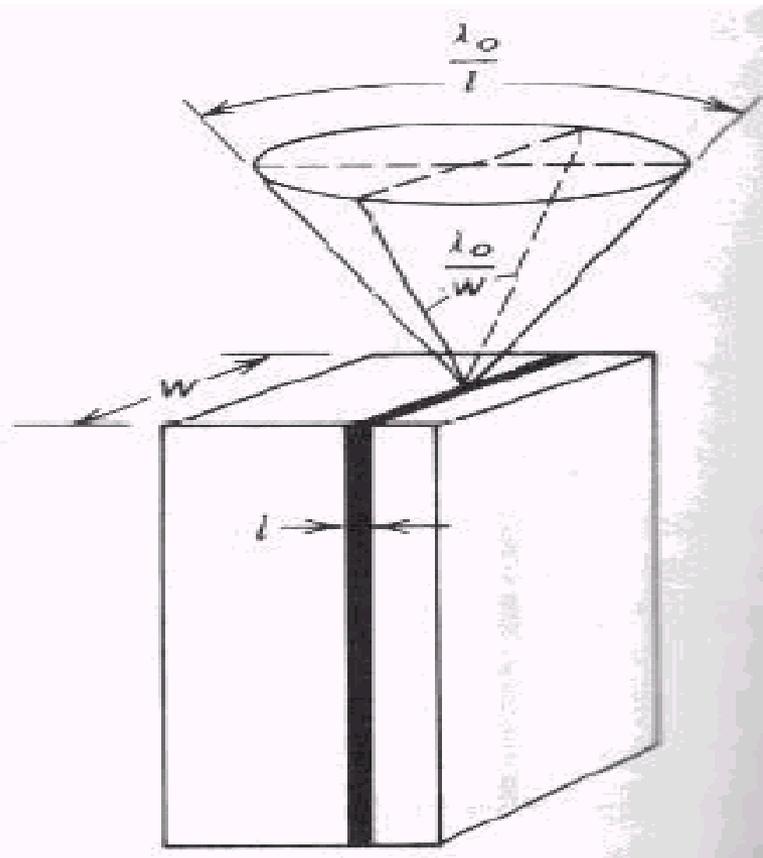
Ridge waveguide laser





远场特性

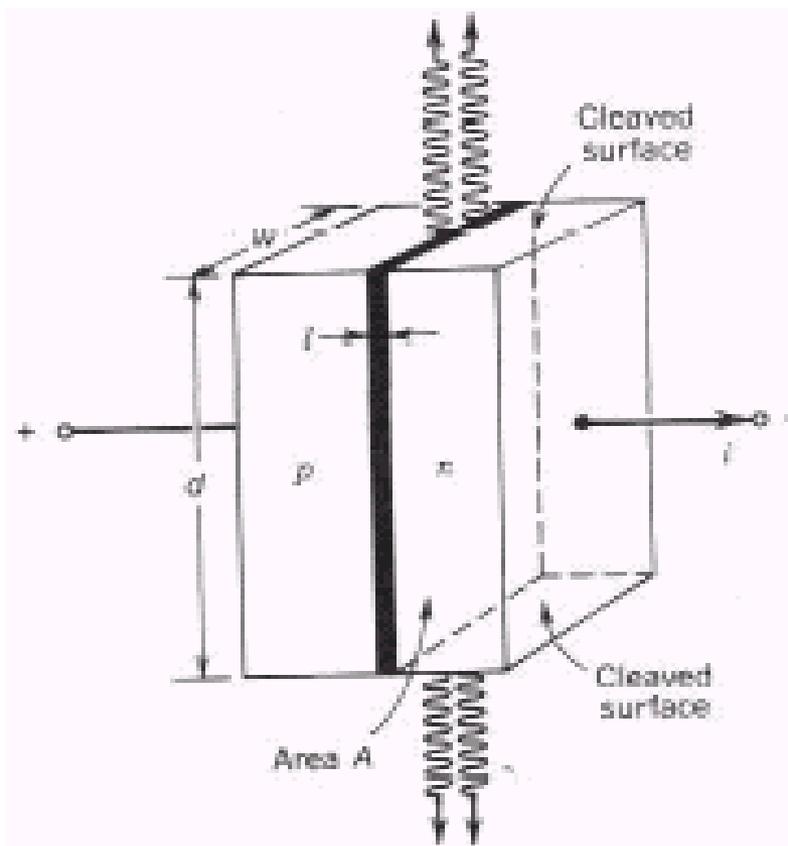
- θ_{\perp} 随有源区厚度及折射率差的减小而减小。
- θ_{\parallel} 随有源区宽度的减小而增大。
- 减小有源区的宽度，可以使远场更趋向于圆形光斑。
- 减小有源区宽度可以使高阶模截止。





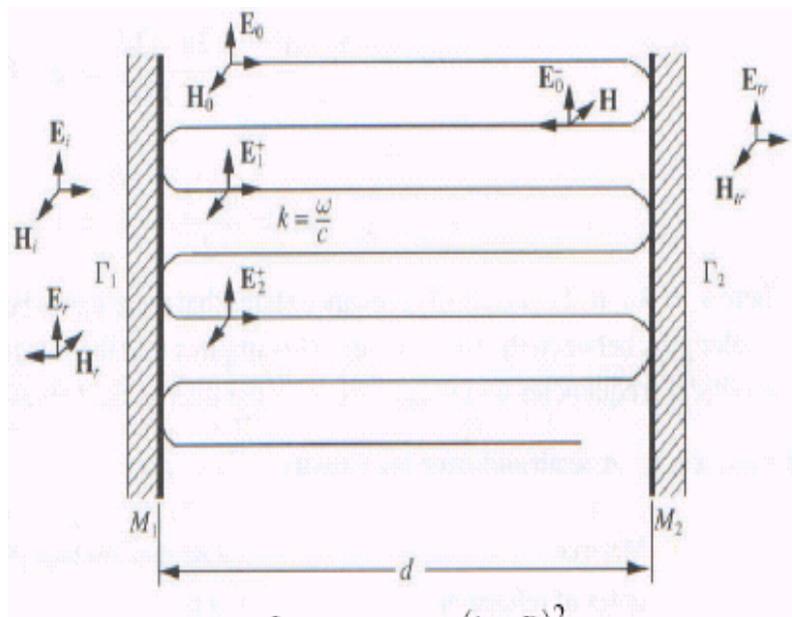
纵模

- **F-P腔激光器:**
多纵模工作
- **DFB激光器**
单纵模工作





F-P腔激光器

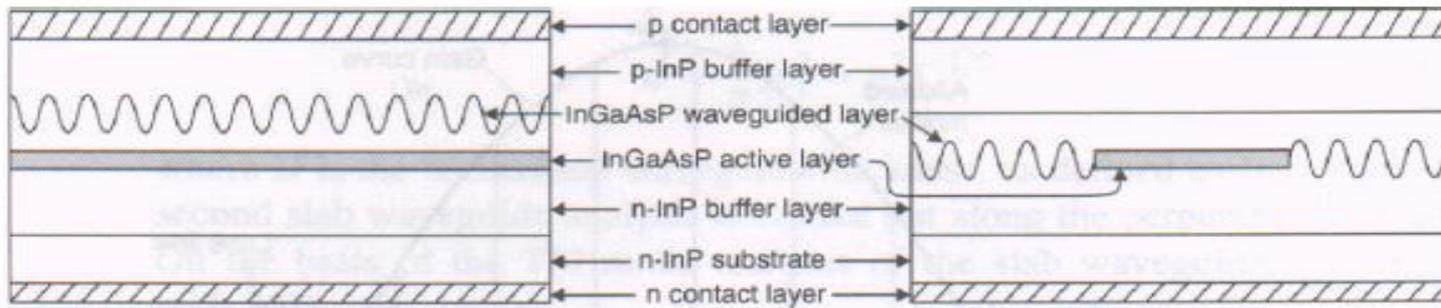


$$T(\delta) = \frac{I_{trans}}{I_{inc}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \delta}$$

$$\delta = \frac{2\pi nd}{\lambda}$$



DFB-LD与DBR-LD



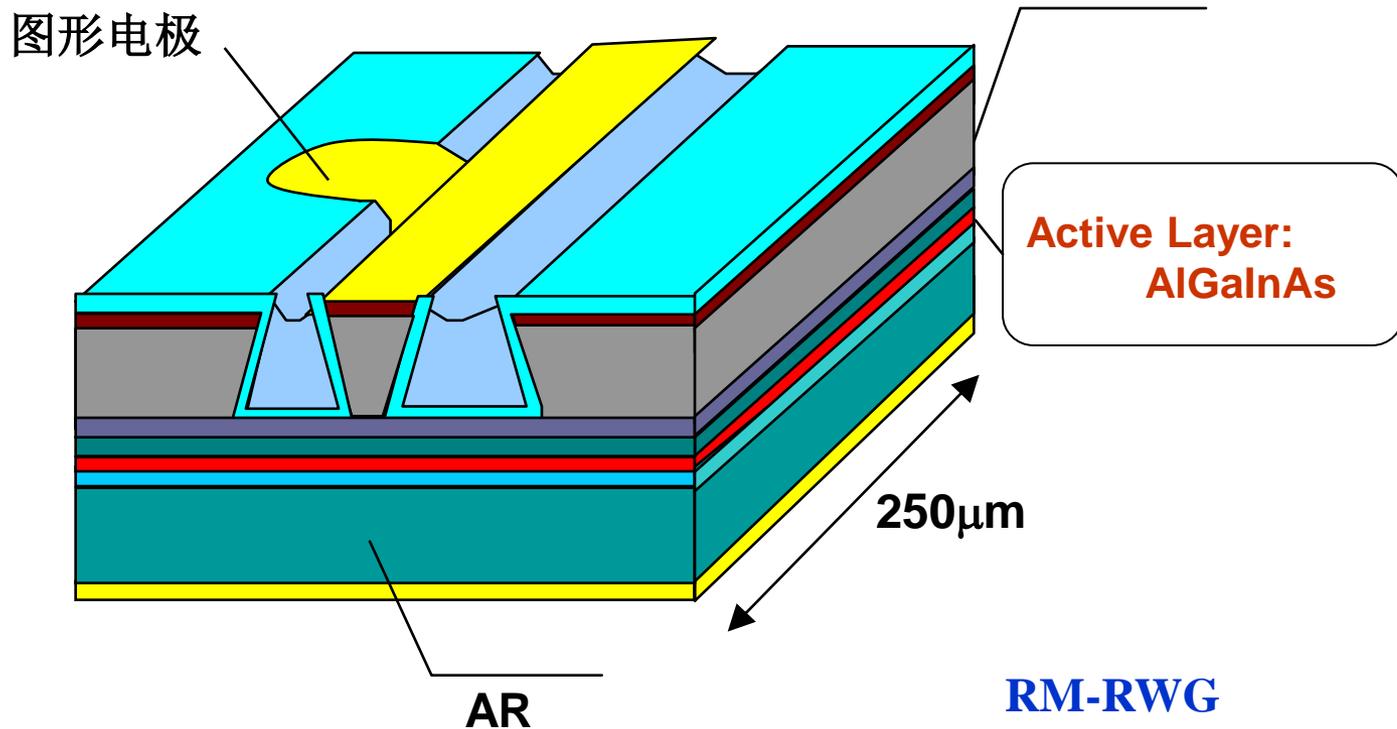
Distributed Feedback
DFB

Distributed Bragg Reflector
DBR



DFB激光器的类型

- 从器件结构上分，目前产品主要采用二种结构：
 1. 脊型波导（**RWG**）结构：工艺简单，成本低，易于集成，大电流下功率曲线会出现扭折

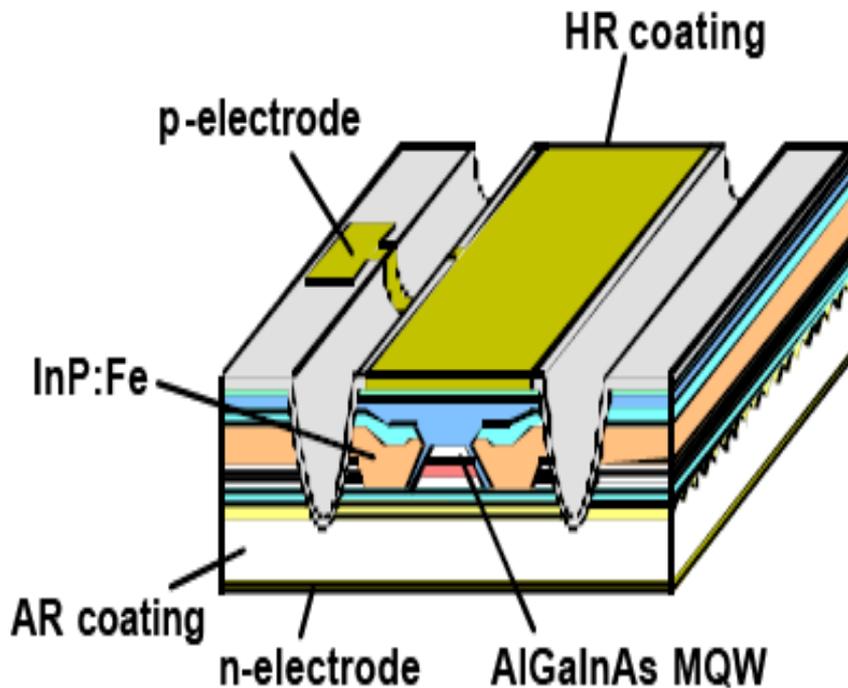




DFB激光器的类型

2. DC-PBH结构:

特点：阈值电流小，耦合效率高，由于多二次MOCVD掩埋生长，工艺比较复杂。





几种DFB激光器产品

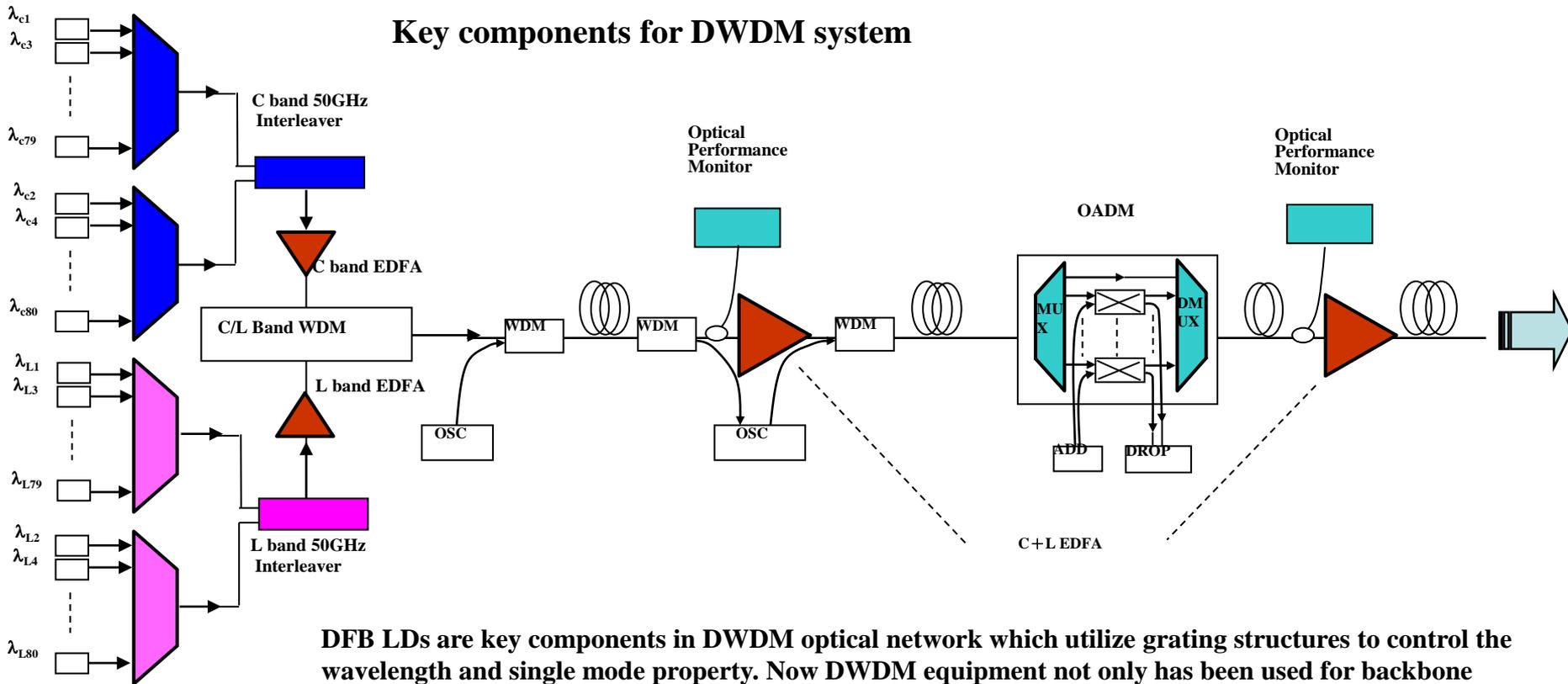
用于CWDM， DWDM系统的特定波长的DFB激光器：

DWDM系统对激光器的特殊要求主要是特定波长和波长稳定性能。ITU-T建议G. mcs规定了激光器中心波长 (λ) 的特定值和波长间隔最小为0.8nm (100GHz) ， 。中心波长的允许偏移 ($\Delta\lambda$) ， 即波长稳定性能， ； 对于光信道间隔为100GHz (0.8nm) 的DWDM系统， $\Delta\lambda \leq \pm 0.15\text{nm}$ (± 20) GHz。

一般采用具有相移光栅或增益光栅的DFB激光器来提高单模成品率和保证波长的稳定性。



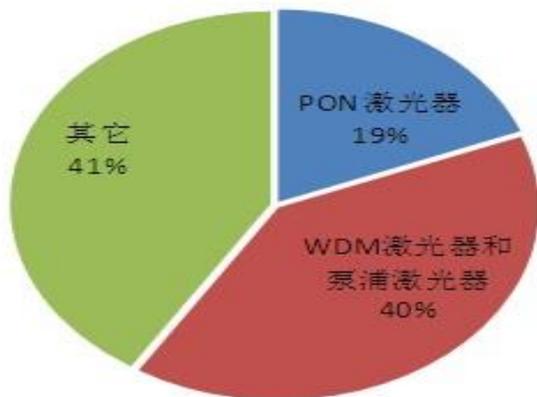
Key components for DWDM system



DFB LDs are key components in DWDM optical network which utilize grating structures to control the wavelength and single mode property. Now DWDM equipment not only has been used for backbone networks, but also may be deployed in access networks, like WDM PON.



2014年通信激光器市场销售额构成预测



2008年Ovem-RHK Report

According to CIR forecast, LD for Communication will Over 1 Billion US\$ in 2014. Most basic optical communication devices are pretty cheap now except the DFB LDs which satisfied the DWDM requirement. Therefore it is highly desirable to develop a low cost DFB LD manufacture process.

DFB Laser price

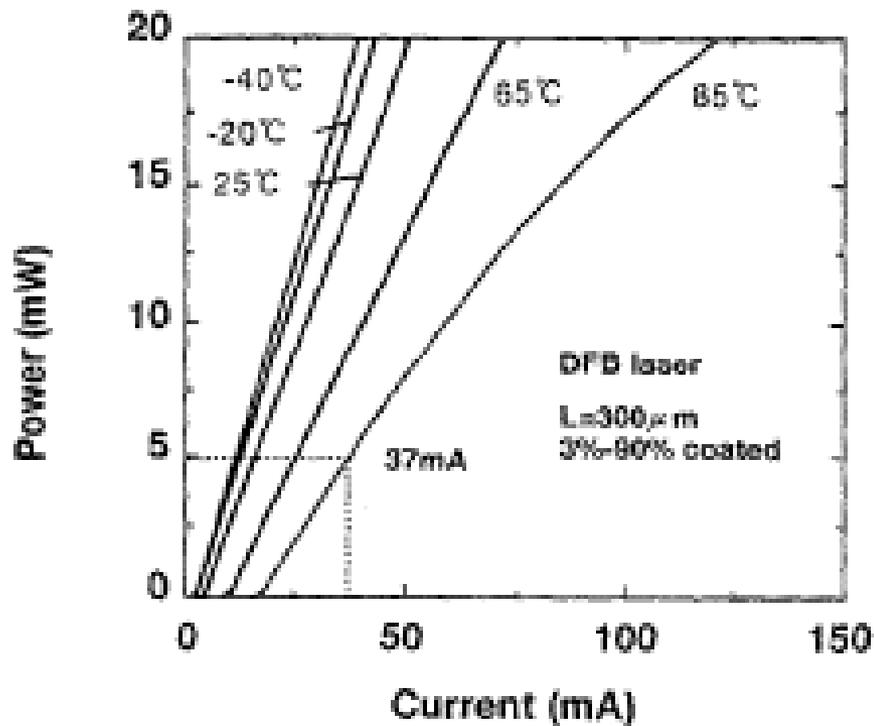
DFB LD Die (10G)	Regular DFB	2.5Gbit/s DFB (DWDM)	10Gbit/s DFB (DWDM)	DFB for CATV
\$50	about \$100	\$250-\$500	\$600-\$1000	\$300

ASP (\$ US)	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
DWDM Components								
DWDM Source lasers	\$565	\$615	\$580	\$601	\$547	\$498	\$444	\$395
DWDM External Modulators	\$705	\$595	\$488	\$420	\$369	\$346	\$326	\$308
DWDM Receivers	\$208	\$135	\$147	\$153	\$152	\$150	\$145	\$136
Pump lasers	\$956	\$665	\$603	\$548	\$496	\$449	\$412	\$375

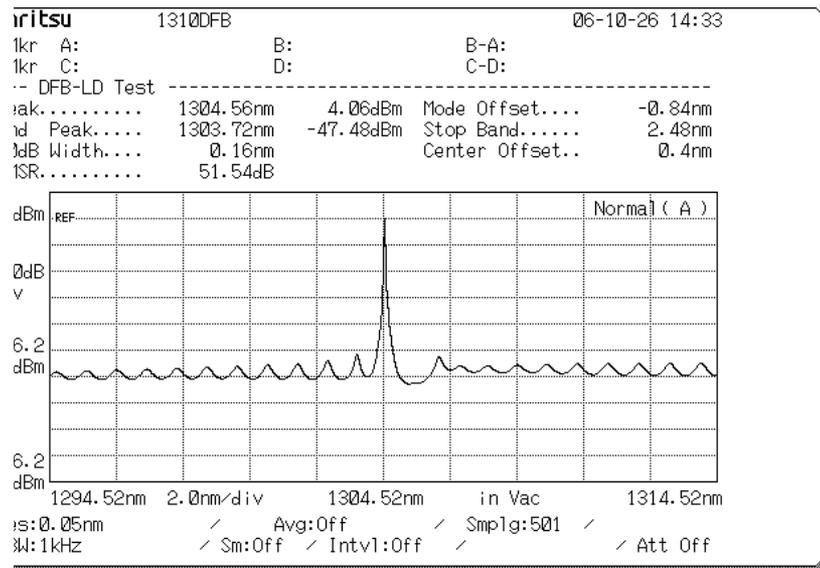


DFB激光器主要特性曲线

P-I曲线



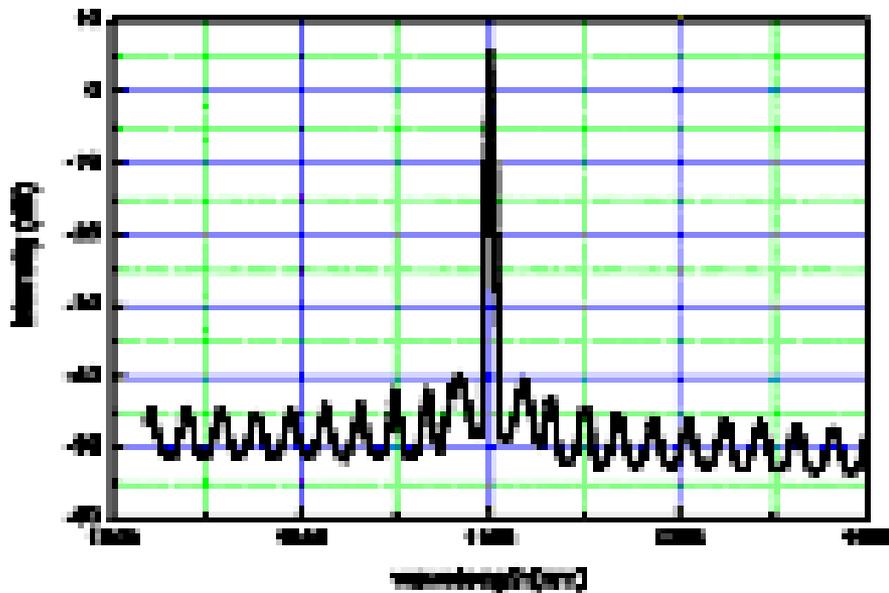
折射率耦合DFB-LD光谱曲线



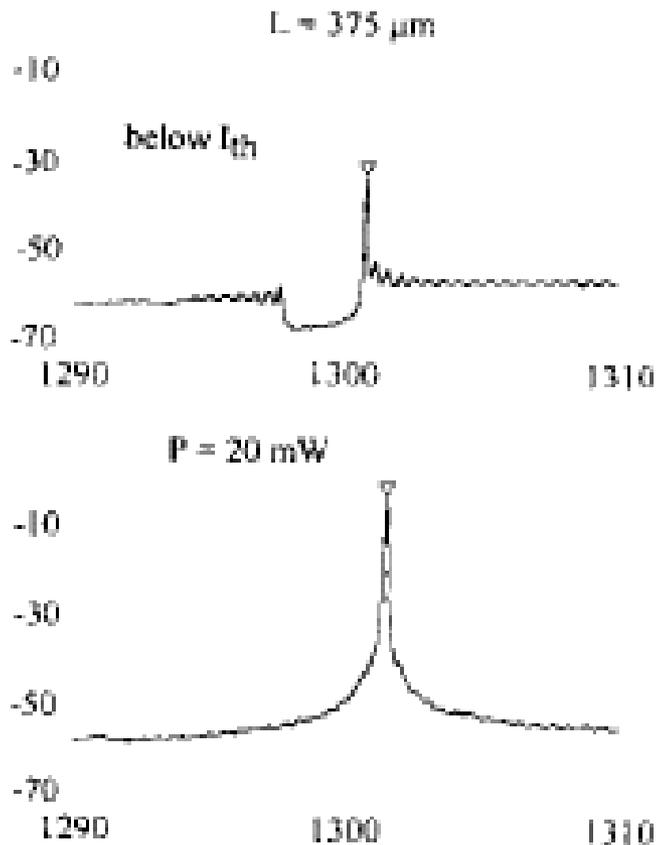


DFB激光器主要特性曲线

$\lambda/4$ 相移DFB激光器 光谱曲线



增益耦合DFB激光器光谱曲线





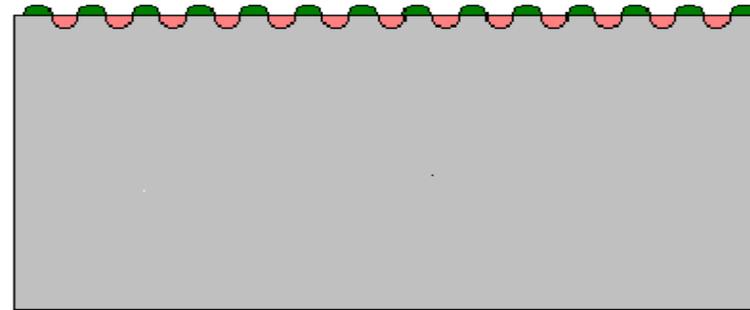
DFB-LD芯片制造

1. 一次外延生长
2. 光栅制作
3. 二次外延生长
4. 脊波导制作
5. 欧姆接触、减薄
6. 解理成条
7. 端面镀膜
8. 解理成管芯
9. **TO-CAN**



1.光栅制作

- 1.全息曝光
- 2.干法或湿法刻蚀



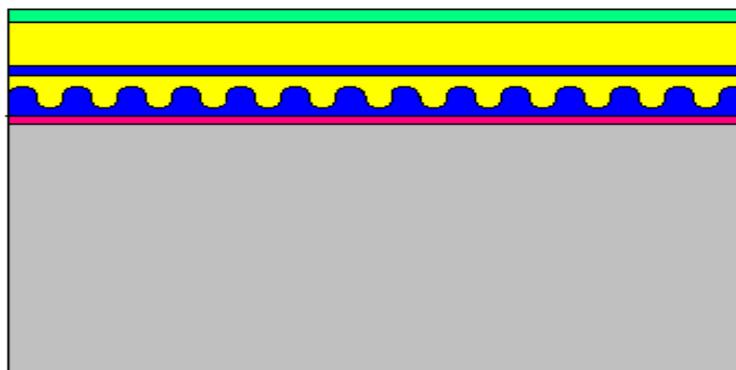
- Photoresist
- Etched
- Substrate



2.二次外延生长

生长:

- 1.低折射率层
- 2.腐蚀停止层
- 3.包层
- 4.帽层: 接触层

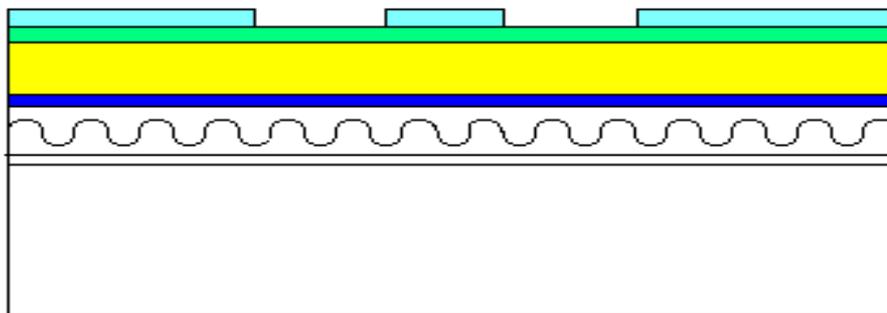


-  InGaAs
-  InP
-  InGaAsP
-  Active layer
-  Substrate



3.一次光刻

- 一次光刻出双沟图形

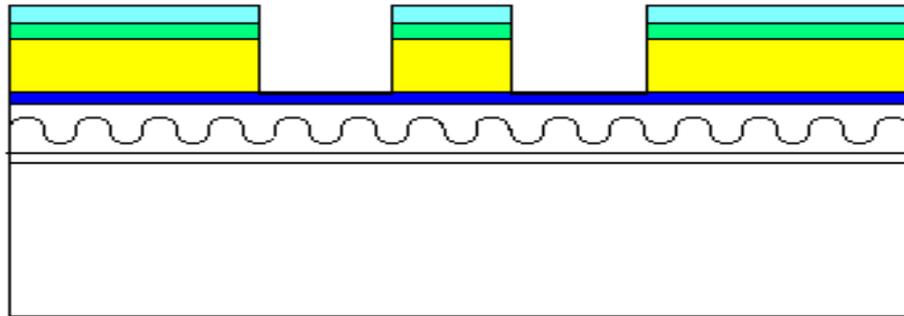


-  **SiO₂**
-  **InGaAs**
-  **InP**
-  **InGaAsP**



4.脊波导腐蚀

选择性腐蚀到四元
停止层

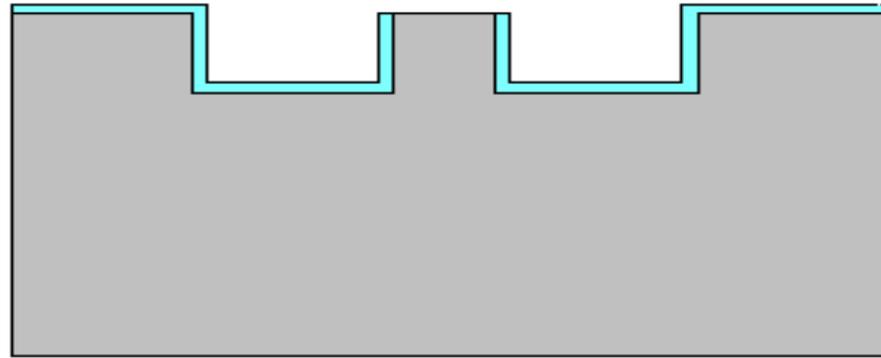


-  **SiO₂**
-  **InGaAs**
-  **InP**
-  **InGaAsP**



5.套刻

PECVD生长SiO₂
自对准光刻
SiO₂腐蚀

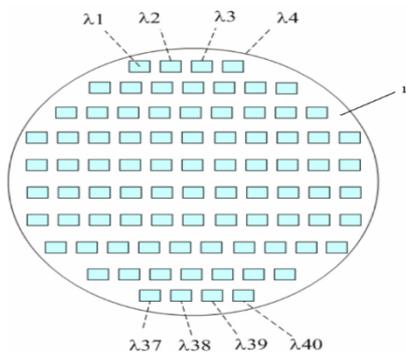


 Substrate
 SiO₂

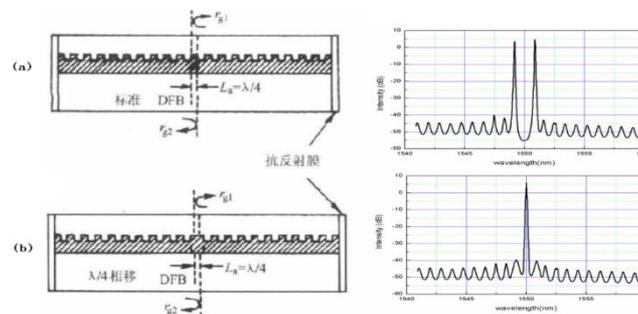


Nano-imprint Technique for DFB Laser

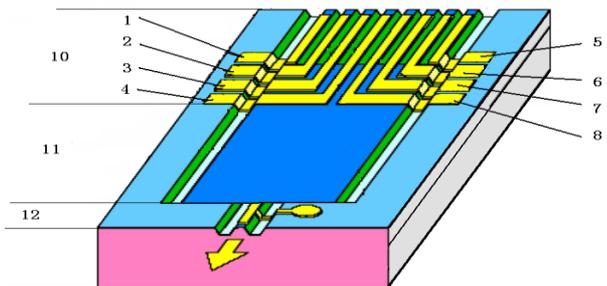
Nanoimprint Advantages for DFB LD



Multi wavelength chips can be done on a signal wafer



1/4λPhase shift grating



Multi-Channel DFB LD array



Multi-Channel DWDM LD Made on one Single Wafer

Bragg Grating Equation:

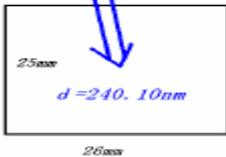
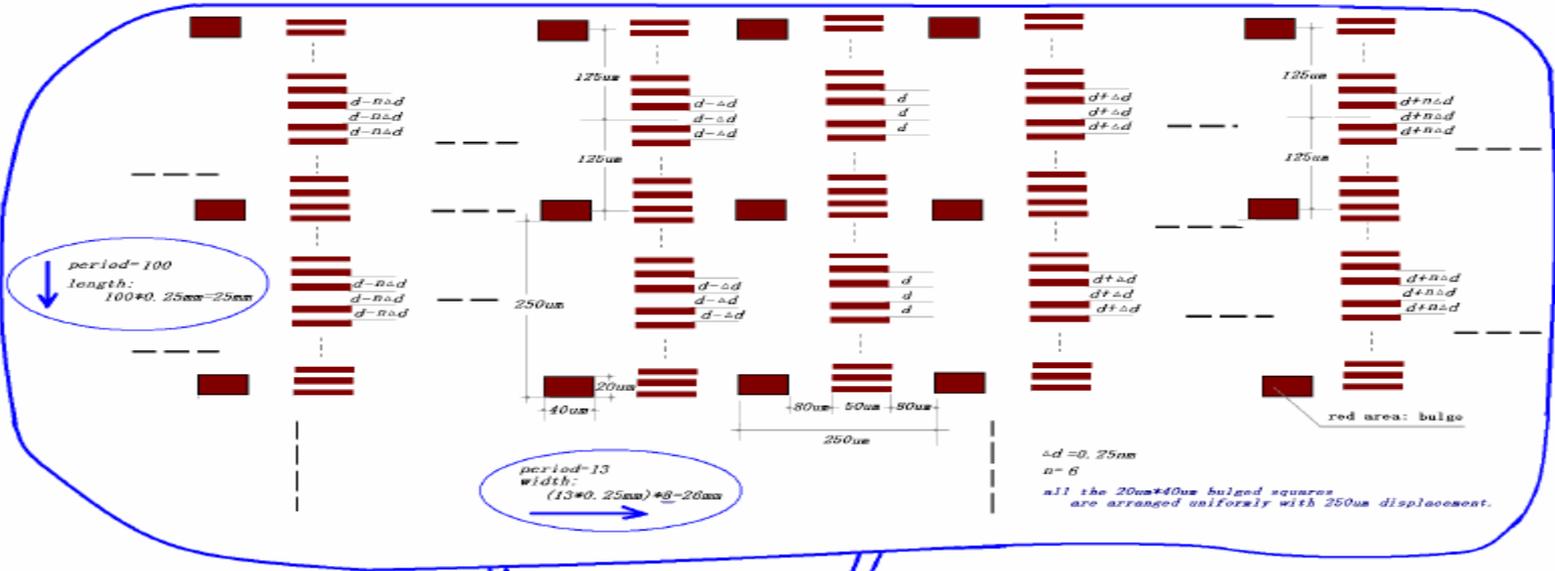
$$\Lambda = 2n\lambda$$

$$\Delta\lambda = 1.6nm$$

ITU Regulation of 200 GHz Channel Spacing means 1.6nm difference in wavelength, at wavelength of 1550nm, the grating period on InP is only about 240nm, thus the corresponding adjacent grating periodic difference is only 0.25nm

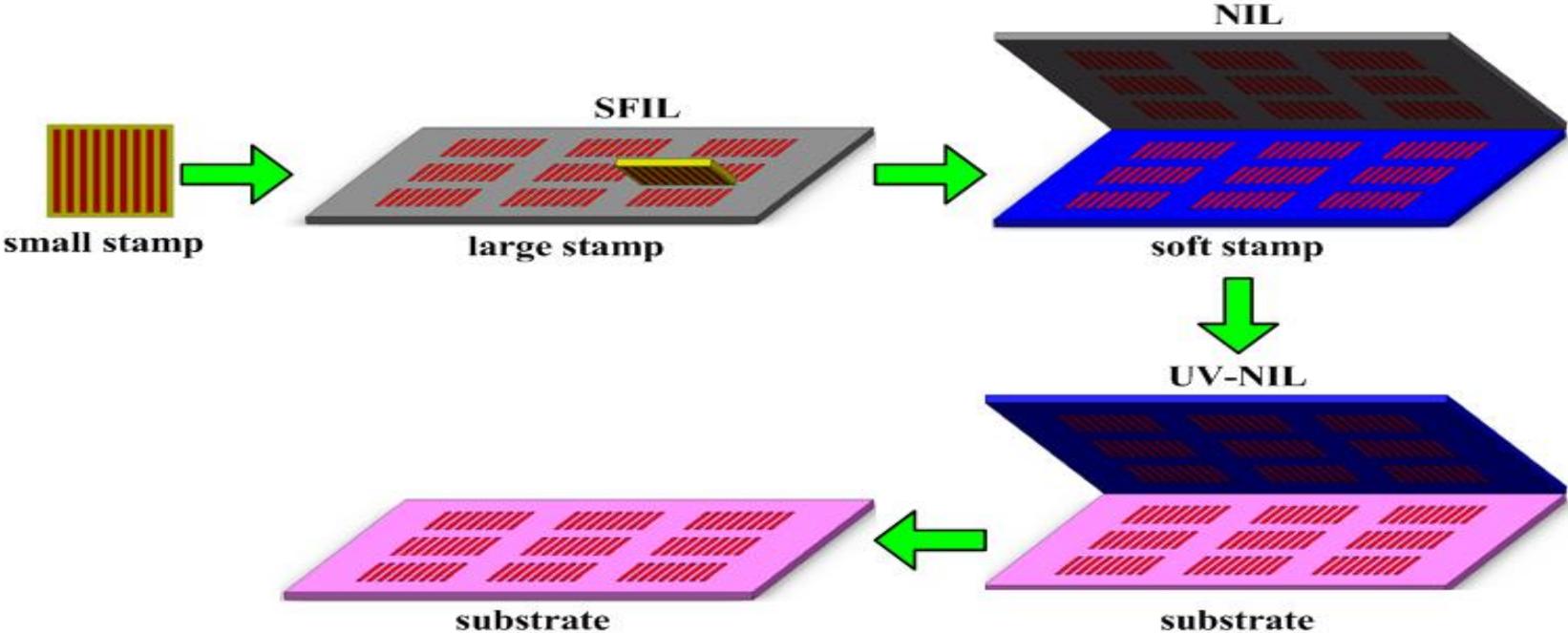


DWDM DFB Grating Design Pattern



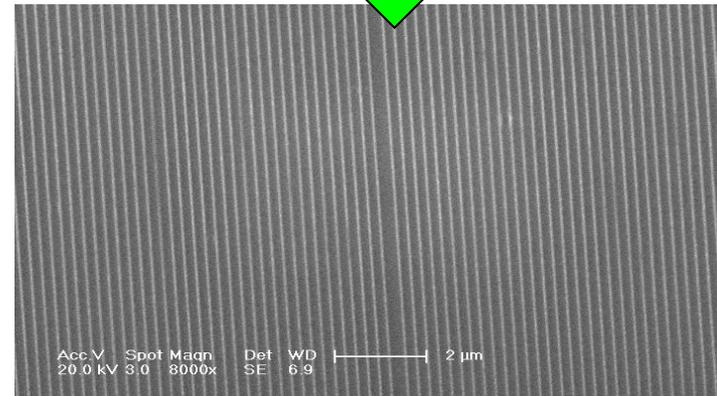
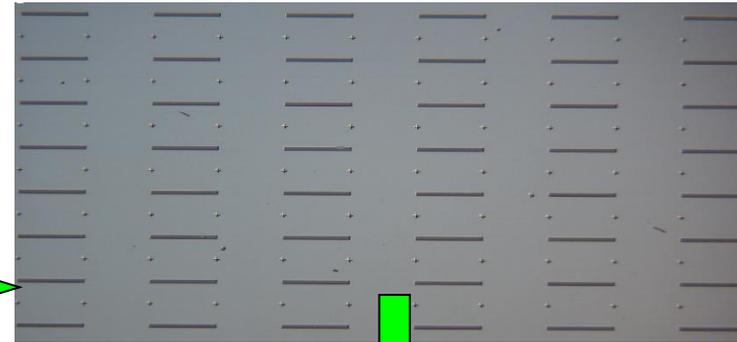
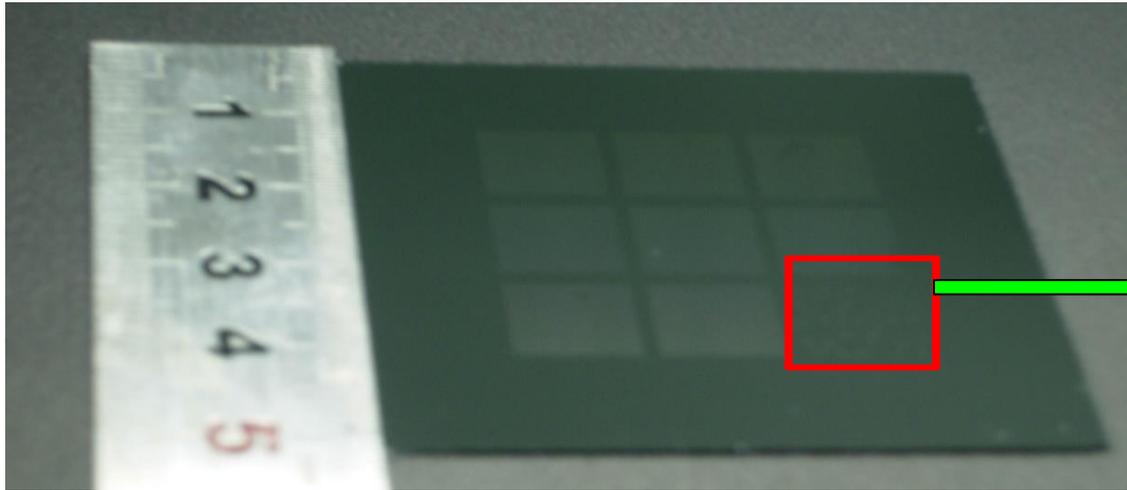


Second Mold by Duplication Process



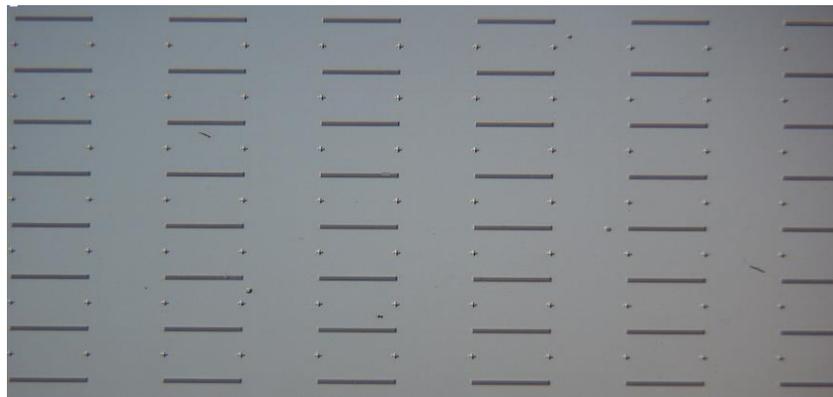
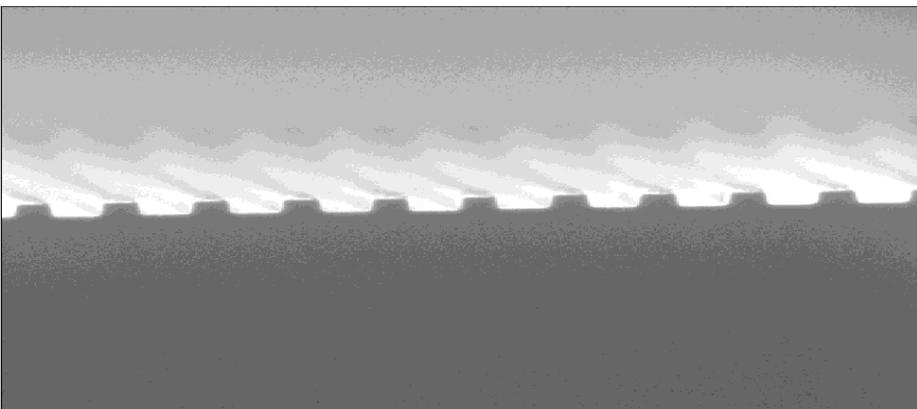
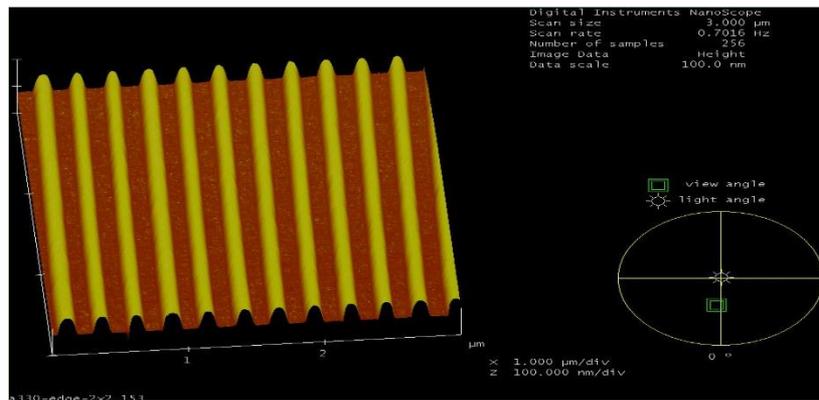
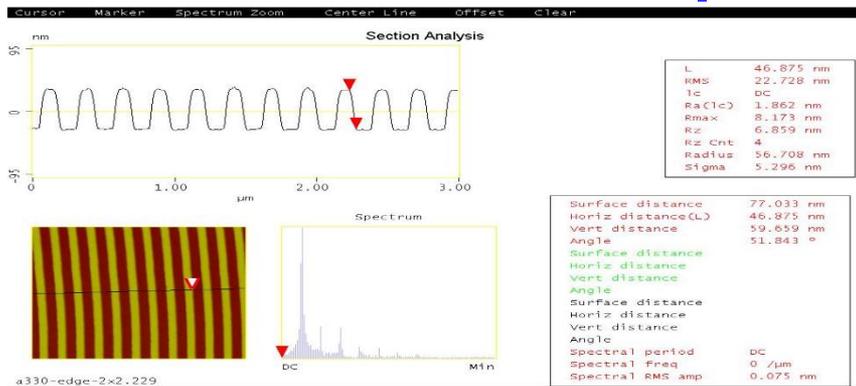


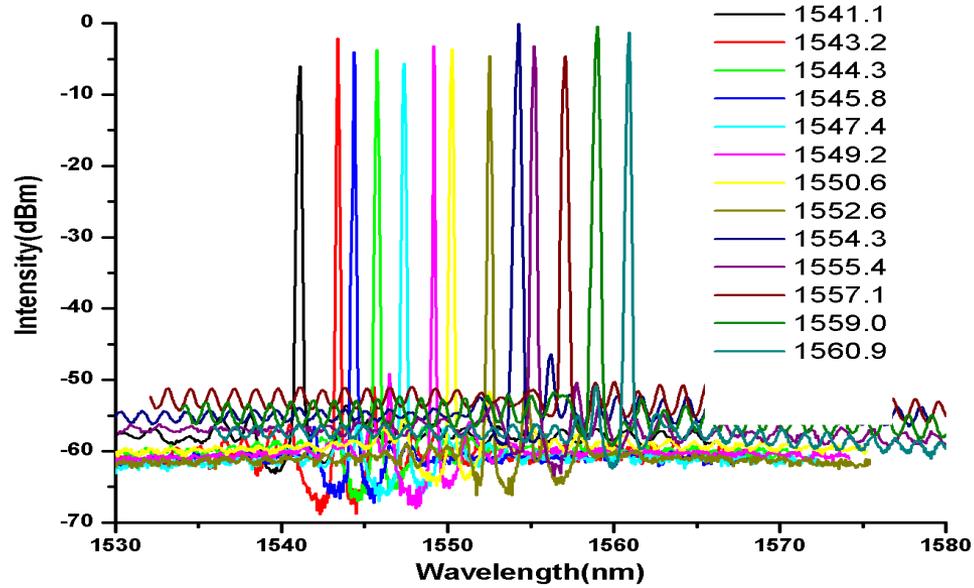
Second Mold by Duplication Process





Experiment results

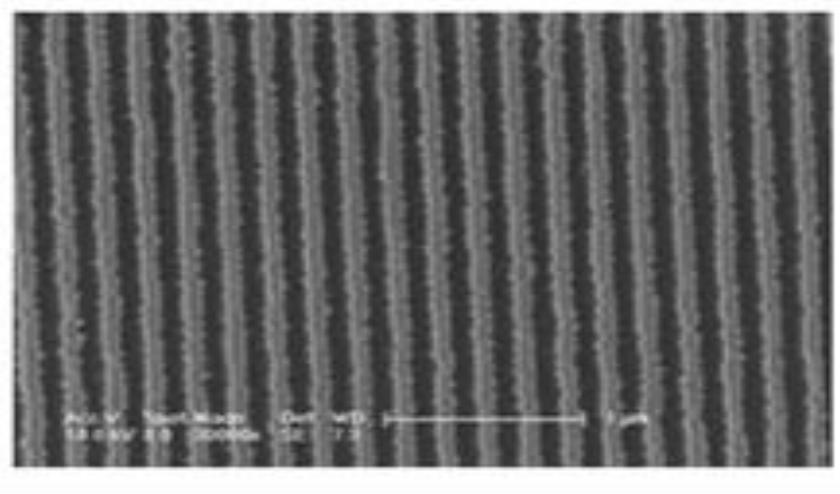
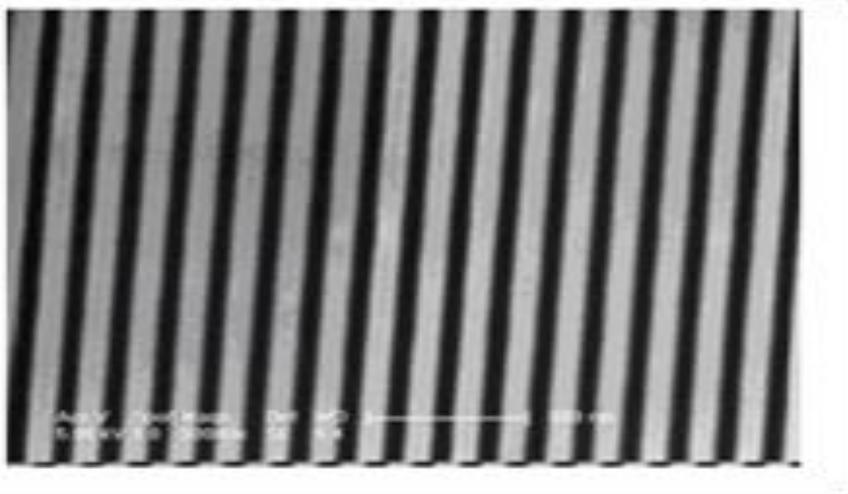




Channel Spacing Uniformity of manufactured DFB LDs.



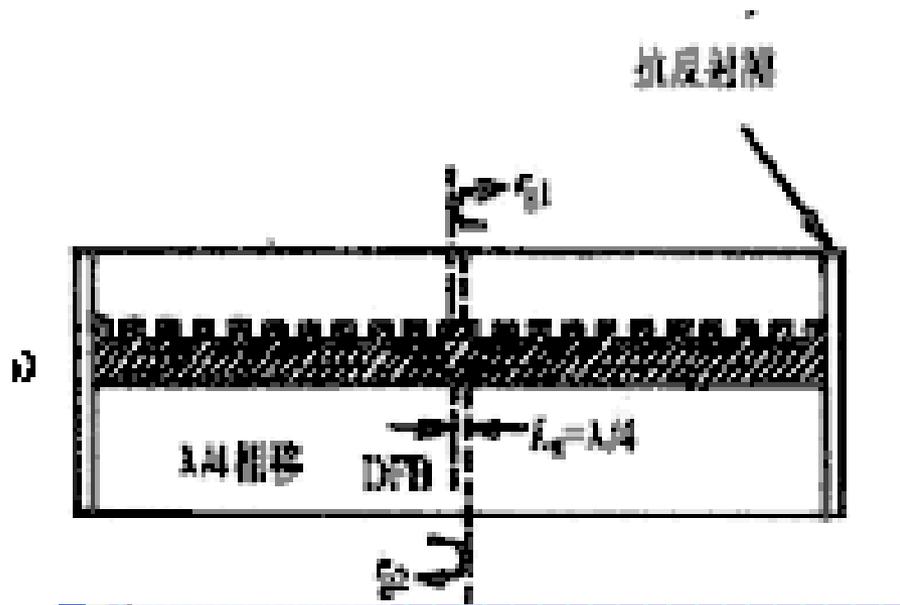
A comparison Between Holography and Nanoimprint Process





DFB激光器的改进

2. 光栅中心引入 $\pi/4$ 相移DFB激光器

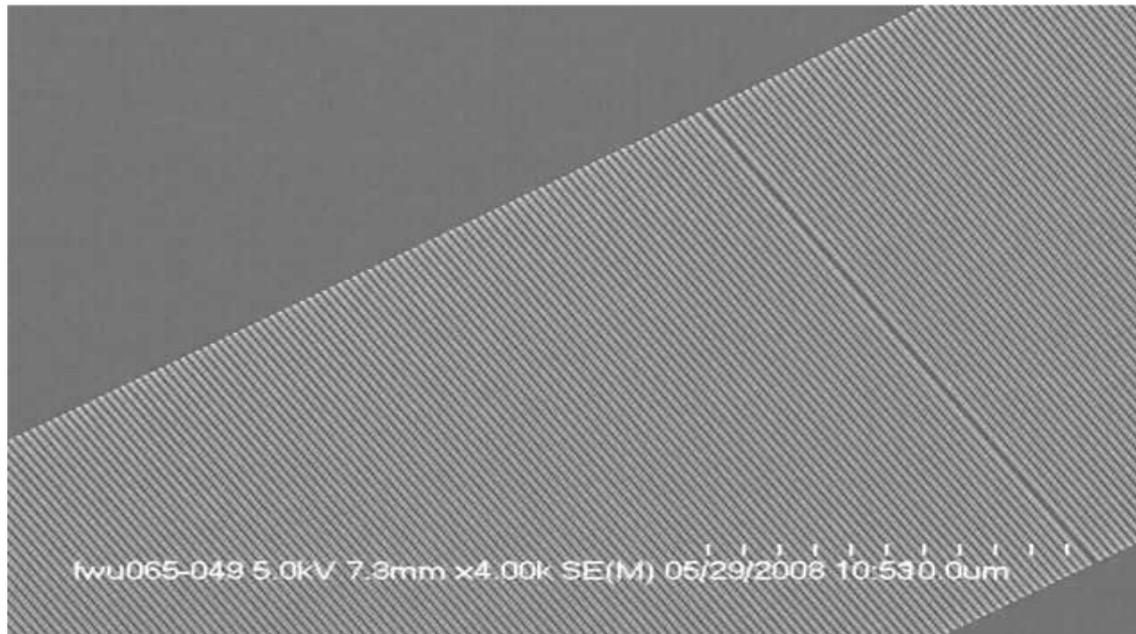


优点是：容易实现单纵模工作，消除模式兼并，单模成品率高。

缺点是：光栅制作工艺成本高，容易引起空间烧孔效应。二端面需要镀增透膜，后端面输出功率不能得到有效利用。



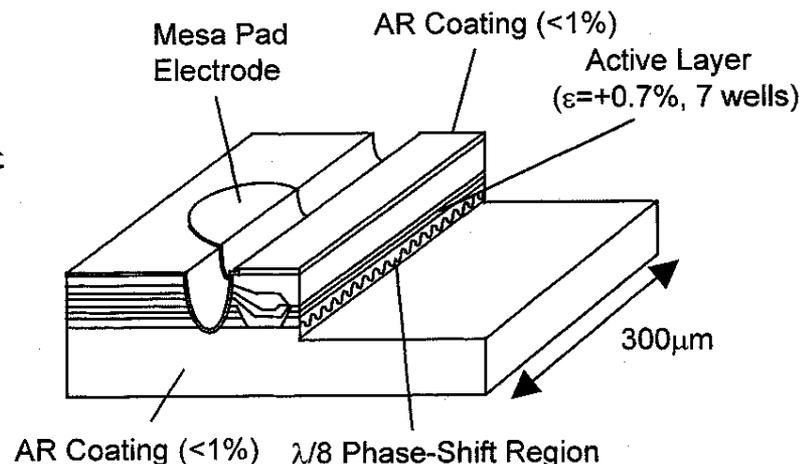
DFB Mold With $\frac{1}{4}$ Wavelength Phase Shift





DFB激光器的改进

3. 光栅中引入 $\lambda/8$ 相移DFB激光器



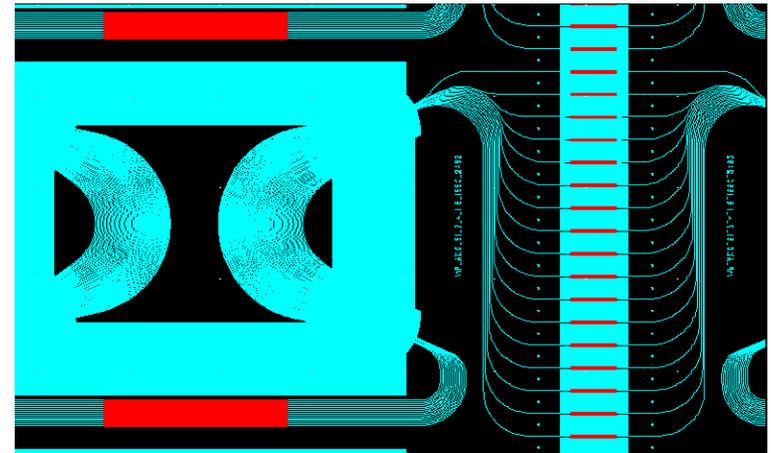
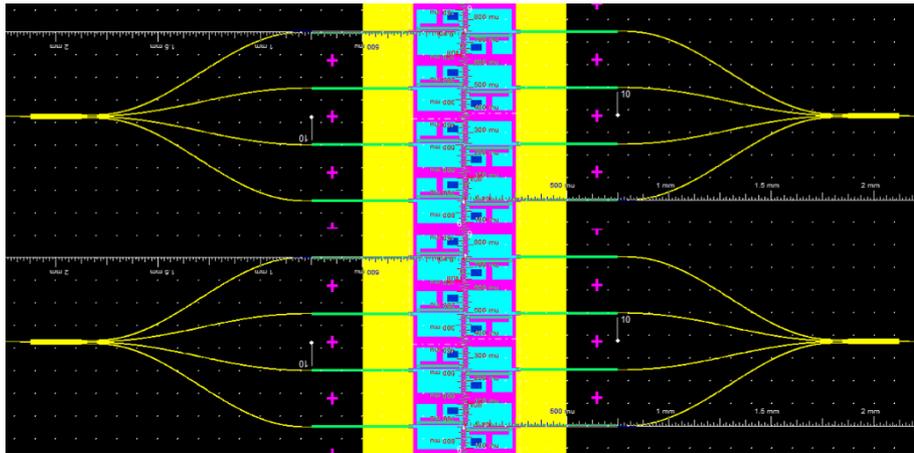
优点是：引入 $1/8$ 波长位移结构可以获得95%以上的右侧激射，单模成品率高，可减少空间烧孔效应获得低啁啾的芯片特性。

缺点是：光栅制作工艺成本高，二端面需要镀增透膜，后端面输出功率不能得到有效利用。

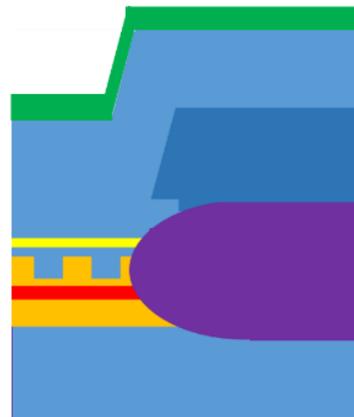


基于DFB阵列的集成器件制作

器件版图设计:



Layer	Material	Thick	Doping	Function
1	p-InGaAs	200 nm	1×10^{19}	Contact layer
2	P-InP	1600 nm	1×10^{18}	Cladding layer
3	p-InP	20 nm	1×10^{18}	Etching stop layer
4	p-InP	100nm	1×10^{18}	Spacer
5	1.2Q	100nm	1×10^{18}	Up cladding layer
6	MQW	100nm	1×10^{18}	PL:1540 nm
7	1.2Q	100nm	1×10^{18}	Down cladding layer
8	n-InP buffer	500nm	1×10^{18}	
9	Sub			

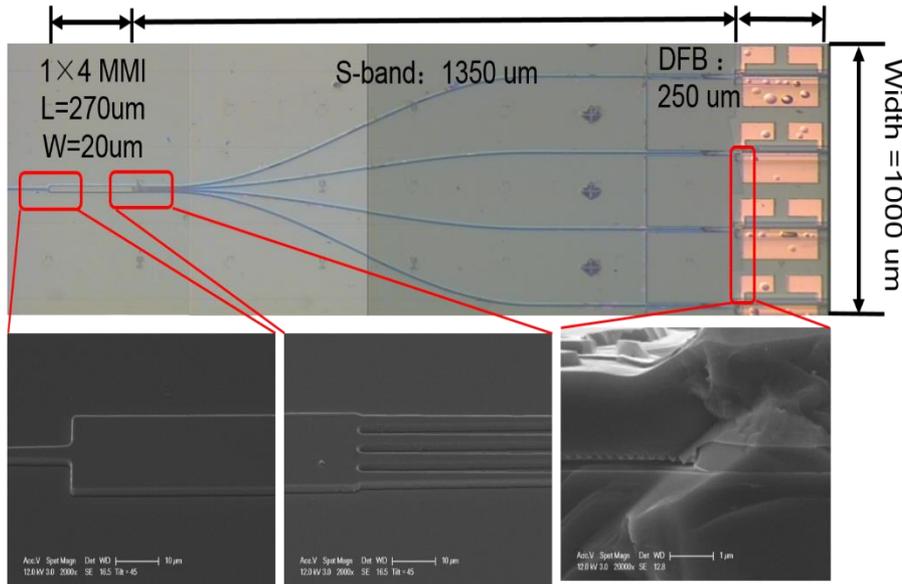


Layer	Material	Thick	Doping	Function
1	p-InGaAs	200 nm	1×10^{19}	Contact layer
2	P-InP	1600 nm	1×10^{18}	Cladding layer
3	u-InP	400 nm	Utd	Cladding layer
4	1.24Q	400nm	Utd	Waveguide layer
5	n-InP buffer	100nm	1×10^{18}	Down cladding layer
6	sub			

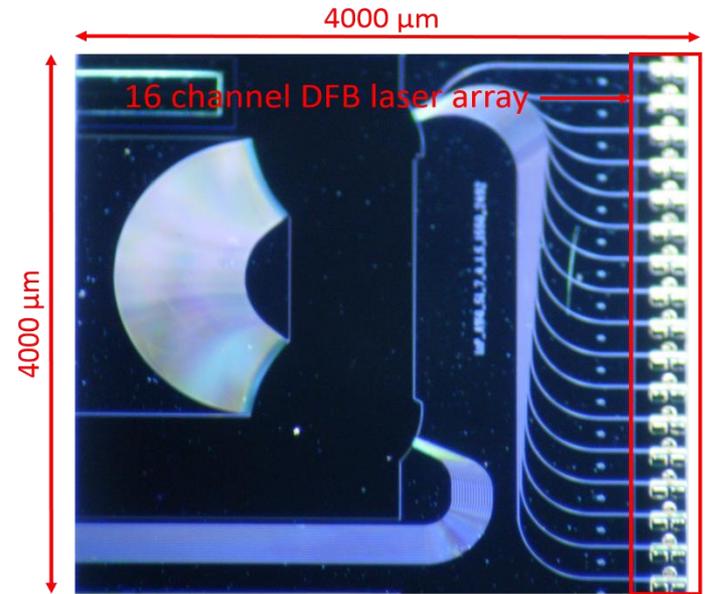


基于DFB阵列的集成器件制作

器件实物:



四通道MMI集成DFB激光器阵列

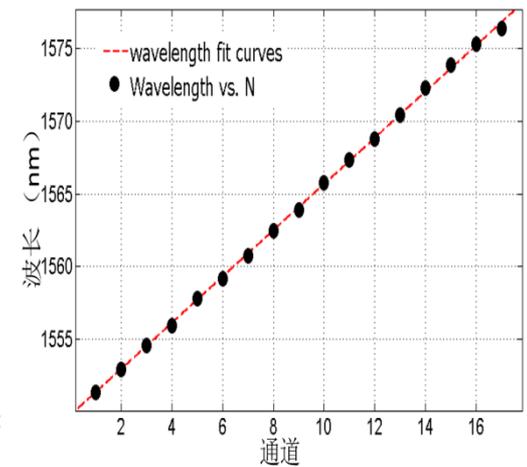
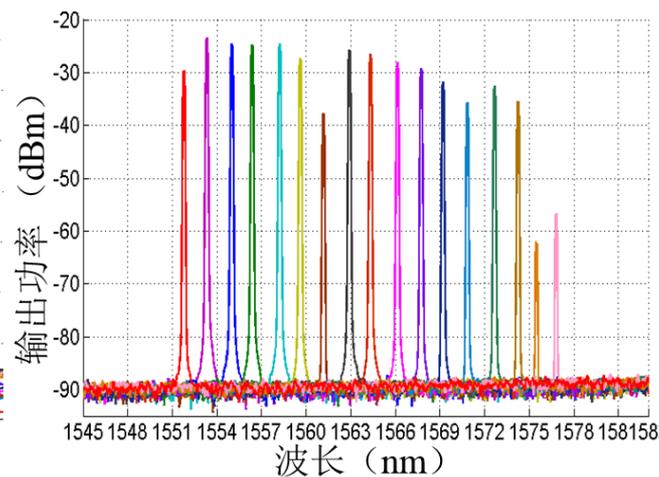
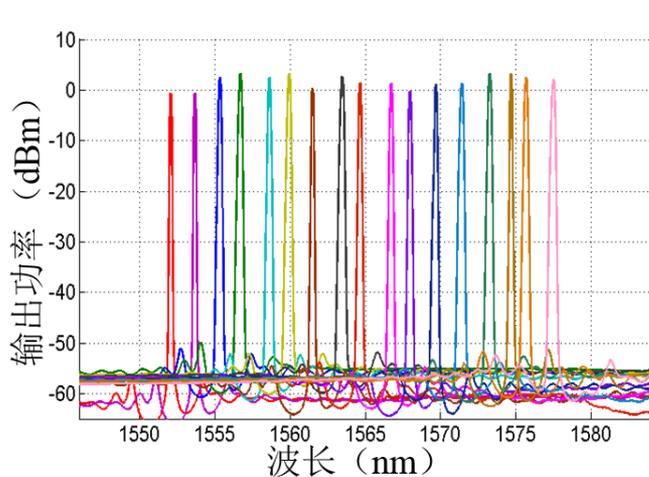
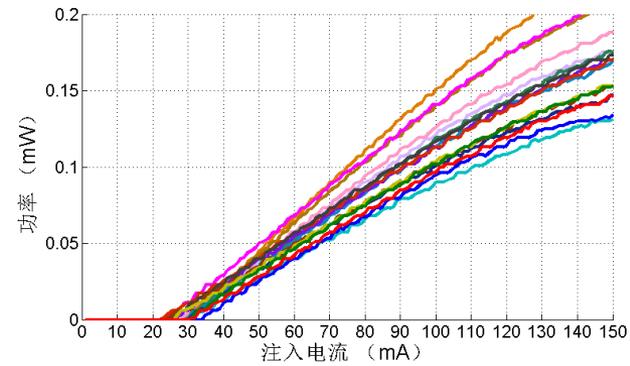
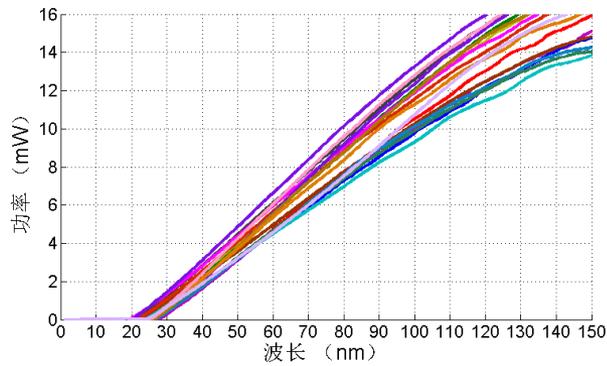


16通道AWG集成DFB激光器阵列



基于DFB阵列的集成器件制作

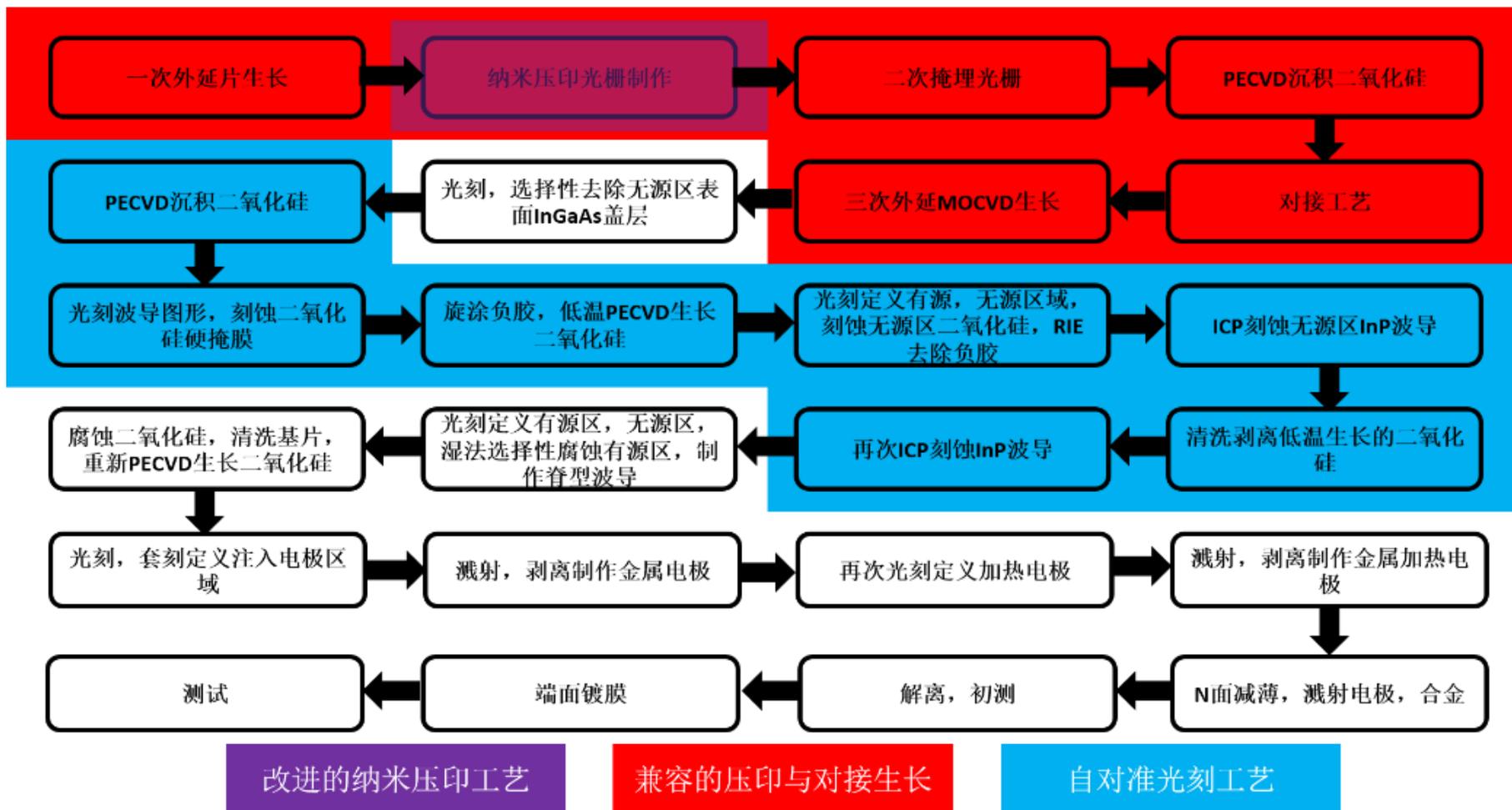
器件测试：DFB+AWG





基于DFB阵列的集成器件制作

工艺步骤:





面发射激光器

Vertical Cavity Surface Emitting Laser



VCSEL 的优点

- 易于实现二维平面和光电集成；
- 圆形光束易于实现与光纤的有效耦合；
- 有源区尺寸极小，可实现高封装密度和低阈值电流；
- 芯片生长后无须解理、封装即可进行在片实验；
- 在很宽的温度和电流范围内都以单纵模工作；
- 成品率高、价格低。



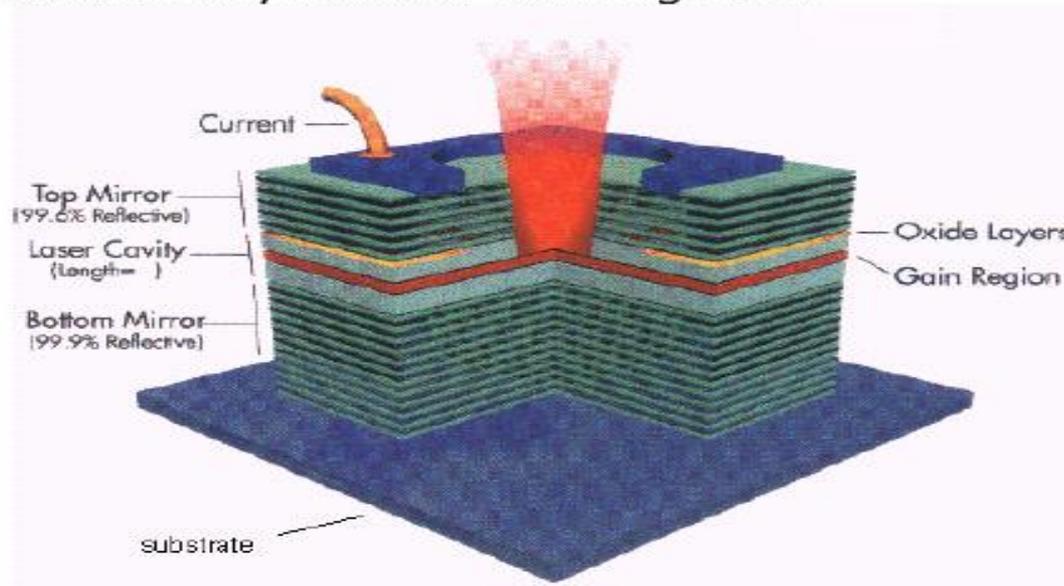
Outline

- What is VCSEL
- Different from Edge Emitting Laser
- Structure of VCSEL
- DBR
- Long Wavelength VCSEL
- Applications



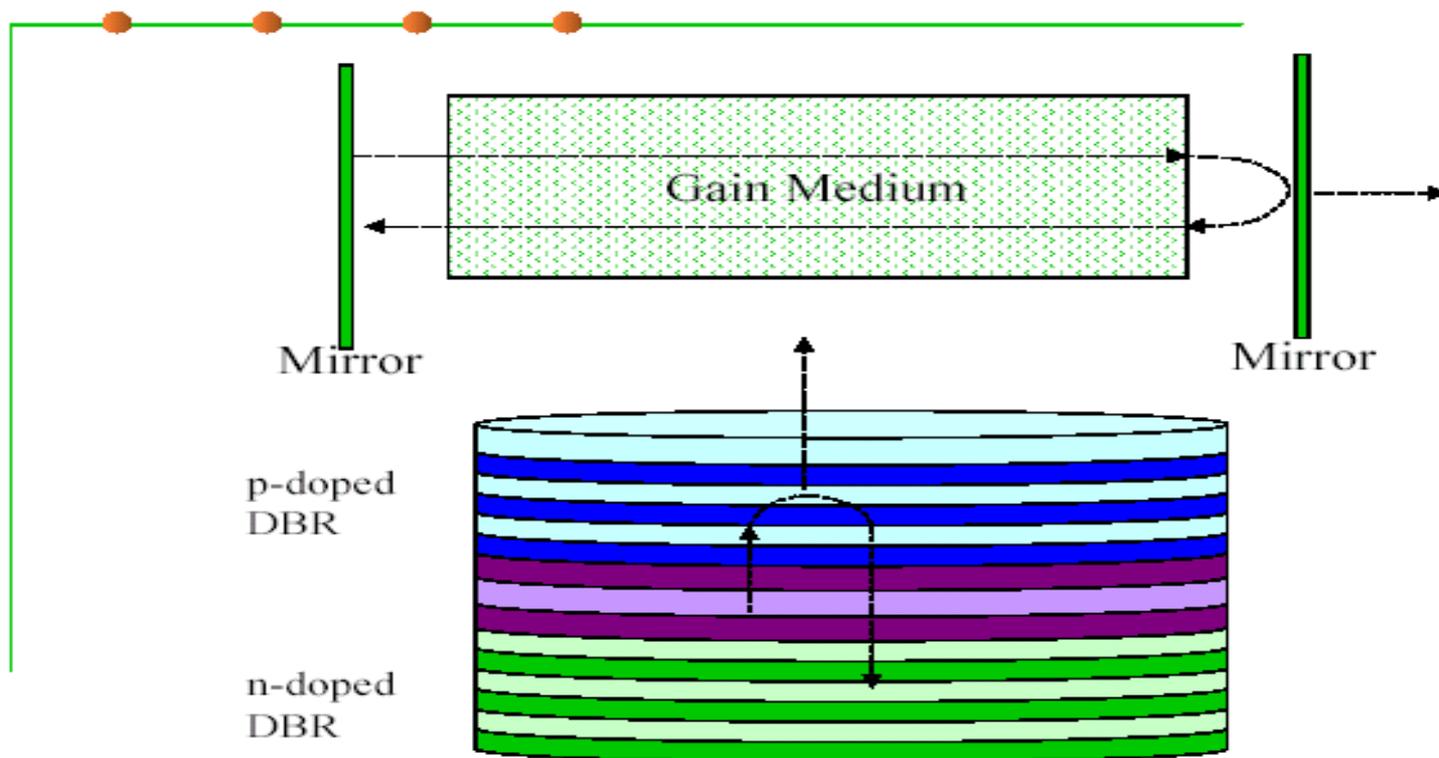
VCSEL

- What does VCSEL stand for?
 - Vertical Cavity Surface Emitting Laser



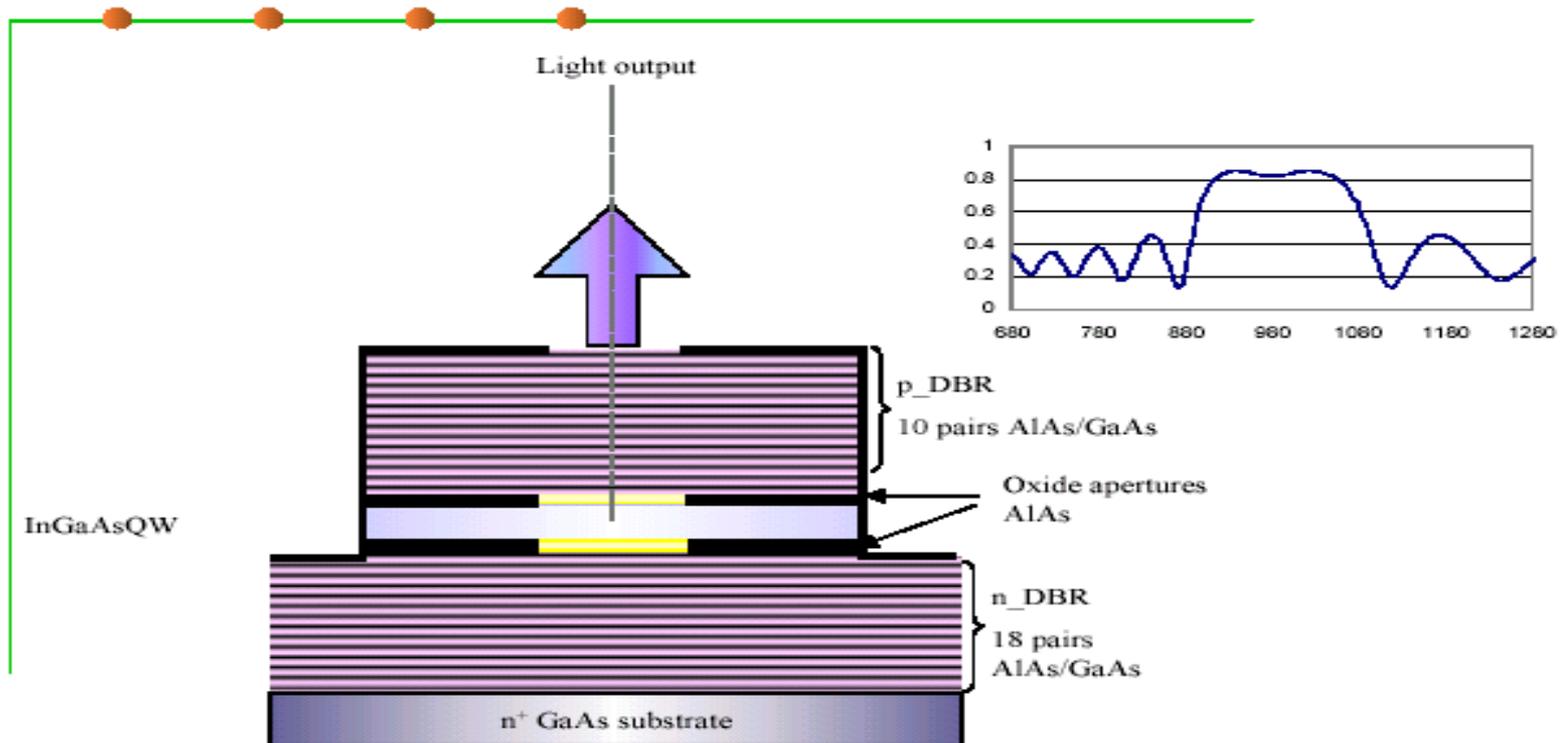


How does it work?



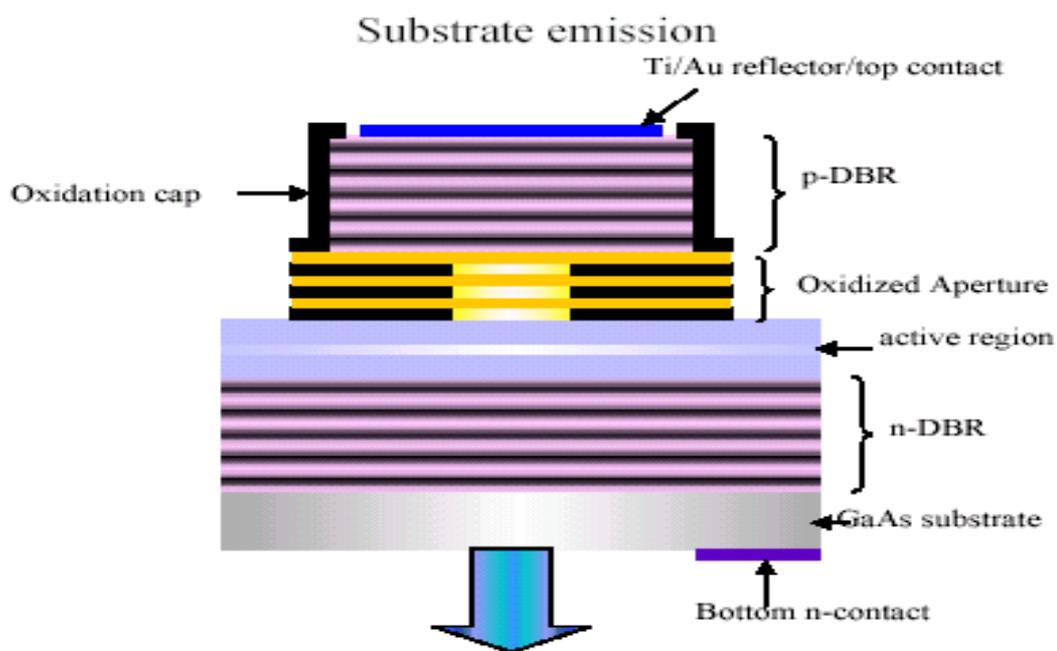


The structure of VCSEL





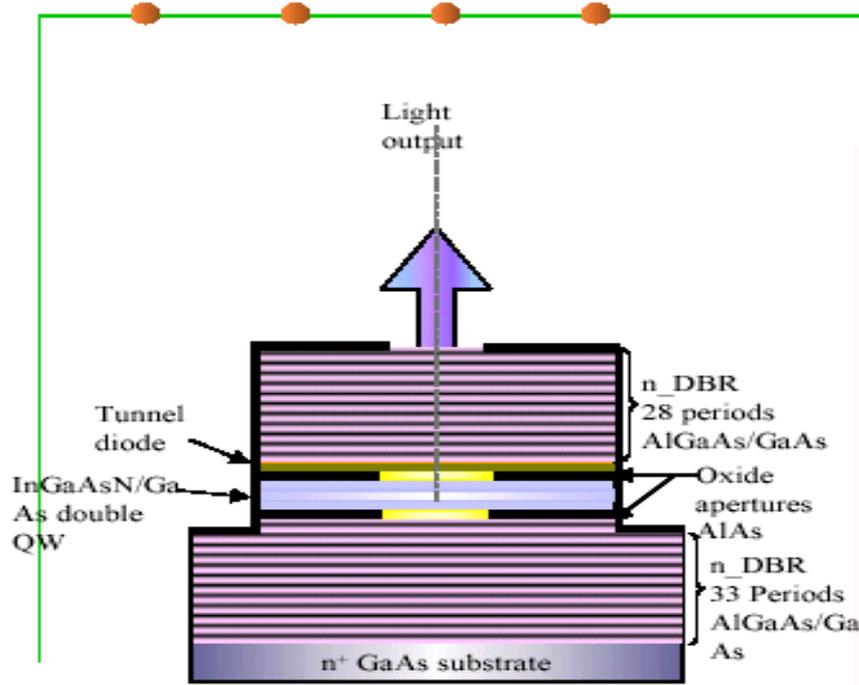
Structure of VCSEL



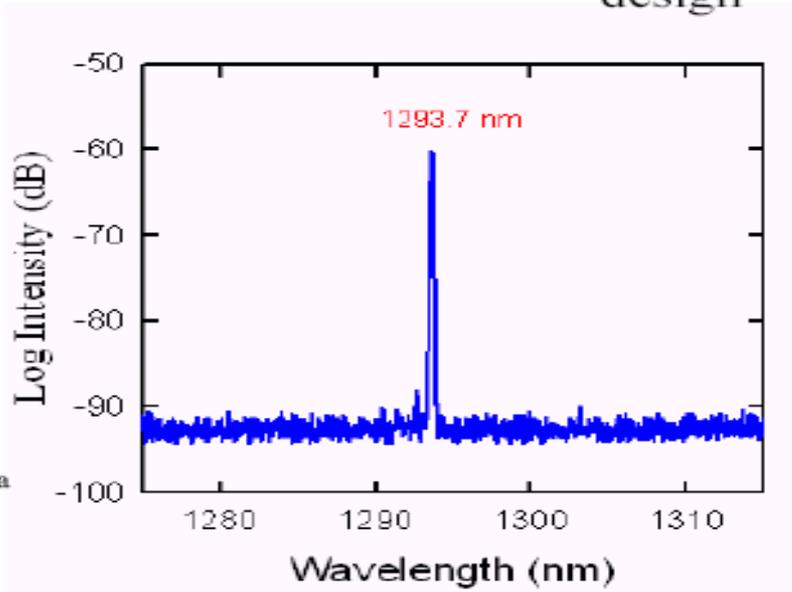
Stanford
design



The structure of VCSEL



Cielo design



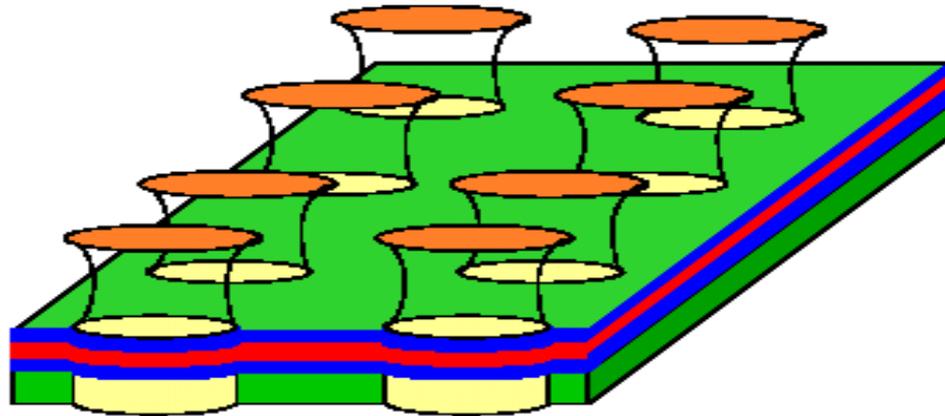


Approaches for long wavelength VCSEL

Wavelength	Active/DBR Materials	Comment
1310 nm	GaInAsP/AlGaInAsP on InP	Monolithic DBR have low index contrast—need may periods Low modal gain from quantum well
	GaInAsP/AlGaAs (wafer bond)	Excess voltage?
	GaInAsN/AlGaAs	Material gain : As N increases, radiative efficiency decreases
	InAs quantum dots	Sufficient material gain?
1550nm	GaInAsP/AlGaInAsP on InP	Monolithic DBR have low index contrast—need may periods Low modal gain from quantum well
	GaInAsP/AlGaAsSb on InP	Extremely reactive Sb-containing DBRs.
	InGaAsN/AlGaAs	Sufficient gain at long wavelength?
	InAs quantum dots	Sufficient gain at long wavelength?



VCSEL arrays



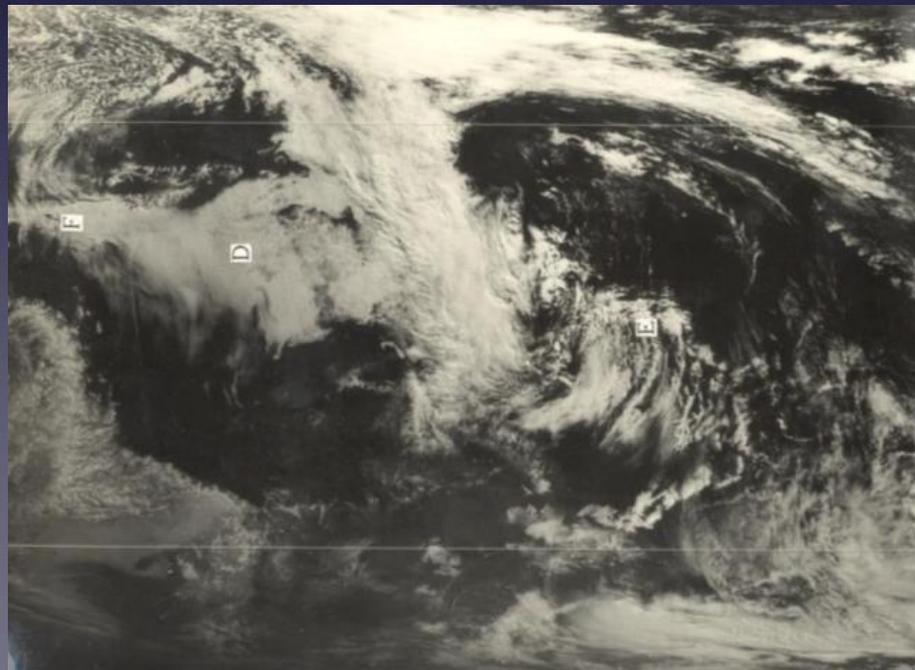
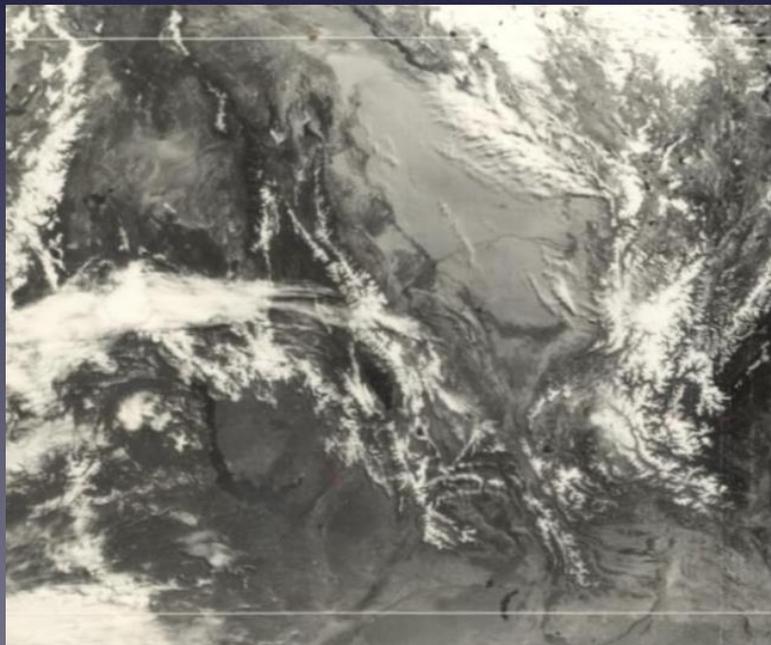


红外探测、传感

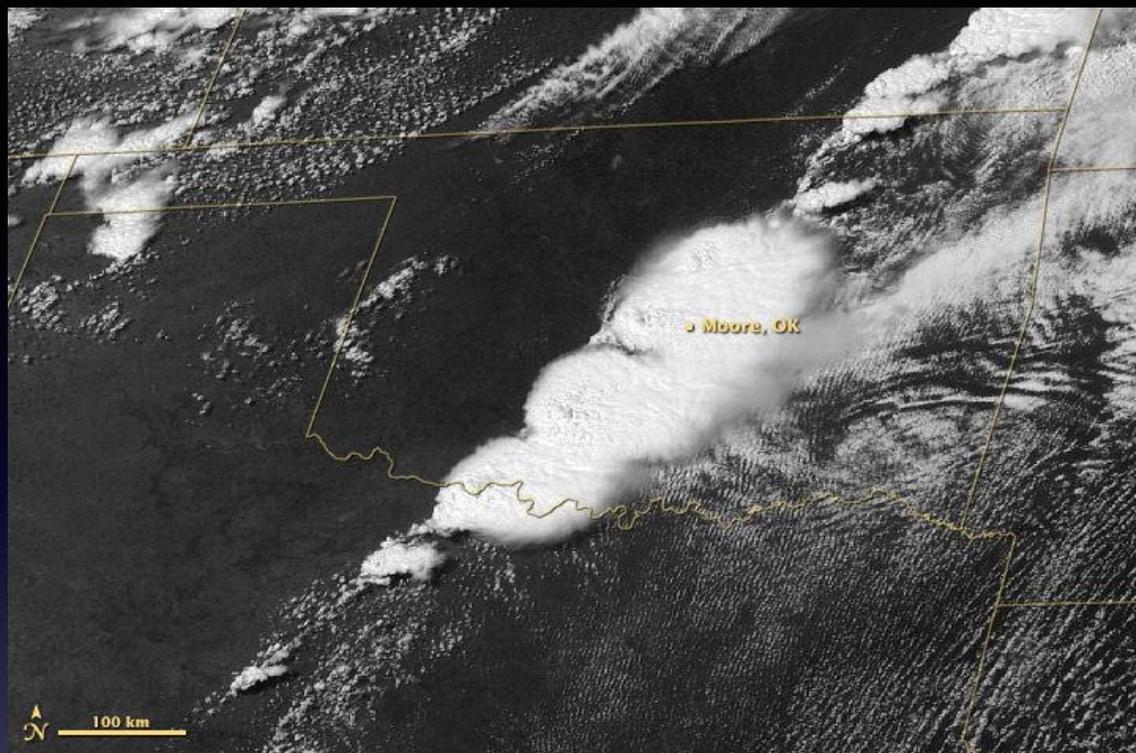
Infrared detector and Sensors

如何识别天气状况

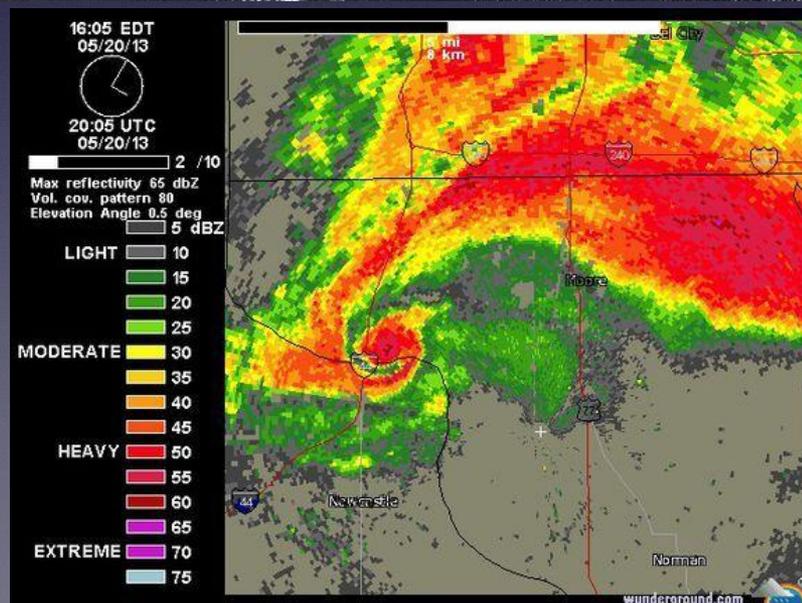
- 卫星在红外波段主要选用 $3.5-3.9\mu\text{m}$, $10.5-12.6\mu\text{m}$, 两个窗口, 依赖于这两个窗口辐射对温度的敏感性, 卫星将接收到的辐射转化为温度图, 辐射大温度高 (黑色), 辐射小温度低 (白色)。由于已知大气温度随高度变化情况, 可根据温度图推算出云层高度。



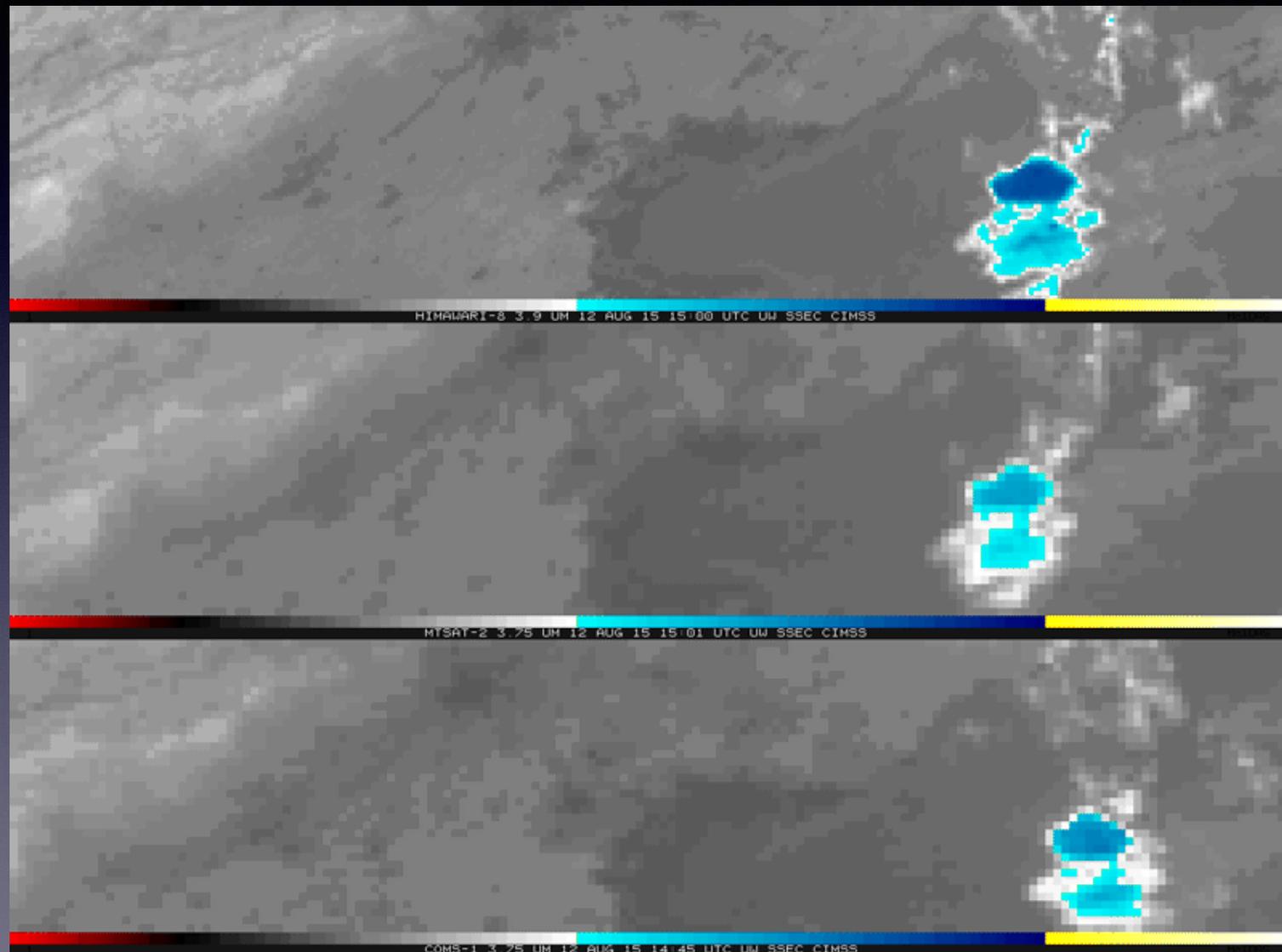
气象卫星图



气象雷达图



2.8 气象卫星侦测的动态图：天津港爆炸 日本14年发射的向日葵8号



军用红外传感器

军用红外传感器多为用于探测军用装备外界信息的外部传感器，用于目标探测，精确打击，姿态控制，快速发现与精确测定并打击敌方目标.其突出优点是被动方式工作，有利于抗干扰和隐蔽。

军用红外探测器的应用

对战略弹道导弹的预警 - 天基红外系统

为了适应未来战争的需要，美军1994年提出建立探测与跟踪导弹发射的新一代卫星监视系统，以取代目前的DSP计划，该计划称为SBIRS计划(天基红外系统)。由高轨与低轨卫星系统组成。‘高轨’由四颗静止轨道卫星，二颗大椭圆轨道卫星组成，主要用于探测与跟踪处于助推段的弹道导弹。星载传感器作为次要有效载荷安装在两颗位于大椭圆轨道上的机密的NRO卫星上。低轨系统计划用24颗卫星组成，用于捕获与跟踪中段飞行的导弹。

发展趋势

红外传感器的红外探测是在1-3微米，3-5微米，和8-14微米三个红外辐射窗口进行的，当然红外探测器如非本征锗和硅以及热释电探测等工艺成熟，早已商品化，且已在军事装备中得到应用，多元线列探测器已商品化。今后十几年，红外焦平面阵列技术还会得到大力发展，其阵列规模将越来越大，最终将成为智能化红外焦平面器件，同时，非制冷红外焦平面阵列（如辐射热计，电子探测器阵列等）以及以半导体超晶格量子阱材料的多种新型红外探测器将进一步发展。

红外天文观测

在地面上进行红外天文观测，受地球大气的限制很大。大气中的水汽、二氧化碳、臭氧等分子，吸收了红外波段大部分的天体辐射，只有几个透明的大气窗口可供地面观测使用，在这些窗口中被指定的红外测光系统为J（1.2微米）、H（1.6微米）、K（2.2微米）、L（3.6微米）、M（5.0微米）、N（10.6微米）和Q（21微米）。如要在这些窗口以外的波段进行天体红外观测，就必须到高空和大气外进行。地球大气不但吸收天体的红外辐射，而且由于它具有一定的温度（约300K），其自身的热辐射对探测工作、特别是对波长大于5微米的观测，会造成极强的背景噪声。为了摆脱大气的这种影响，必须到高空和大气以外去进行中、远红外探测。



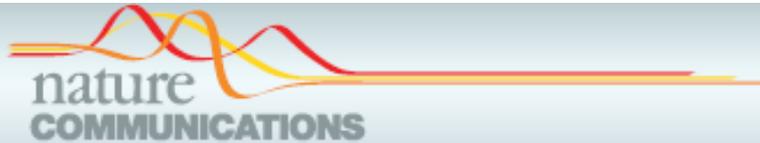




中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

辐射冷却原理及应用材料



ARTICLE

Received 9 Jun 2016 | Accepted 28 Oct 2016 | Published 13 Dec 2016

DOI: 10.1038/ncomms13729

OPEN

Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day-night cycle

Zhen Chen^{1*}, Linxiao Zhu^{2*}, Aaswath Raman¹ & Shanhui Fan¹

Radiative cooling technology utilizes the atmospheric transparency window (8–13 μm) to passively dissipate heat from Earth into outer space (3 K). This technology has attracted broad interests from both fundamental sciences and real world applications, ranging from passive building cooling, renewable energy harvesting and passive refrigeration in arid regions. However, the temperature reduction experimentally demonstrated, thus far, has been relatively modest. Here we theoretically show that ultra-large temperature reduction for as much as 60 °C from ambient is achievable by using a selective thermal emitter and by eliminating parasitic thermal load, and experimentally demonstrate a temperature reduction that far exceeds previous works. In a populous area at sea level, we have achieved an average temperature reduction of 37 °C from the ambient air temperature through a 24-h day-night cycle, with a maximal reduction of 42 °C that occurs when the experimental set-up enclosing the emitter is exposed to peak solar irradiance.

Cite as: Y. Zhai *et al.*, *Science*
10.1126/science.aai7899 (2017).

Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling

Yao Zhai,^{1*} Yaoguang Ma,^{1*} Sabrina N. David,² Dongliang Zhao,¹ Runnan Lou,³ Gang Tan,⁴ Ronggui Yang,^{1†} Xiaobo Yin^{1,2†}

¹Department of Mechanical Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA. ²Materials Science and Engineering Program, University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA. ³Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA. ⁴Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming, Laramie, WY 82071, USA.

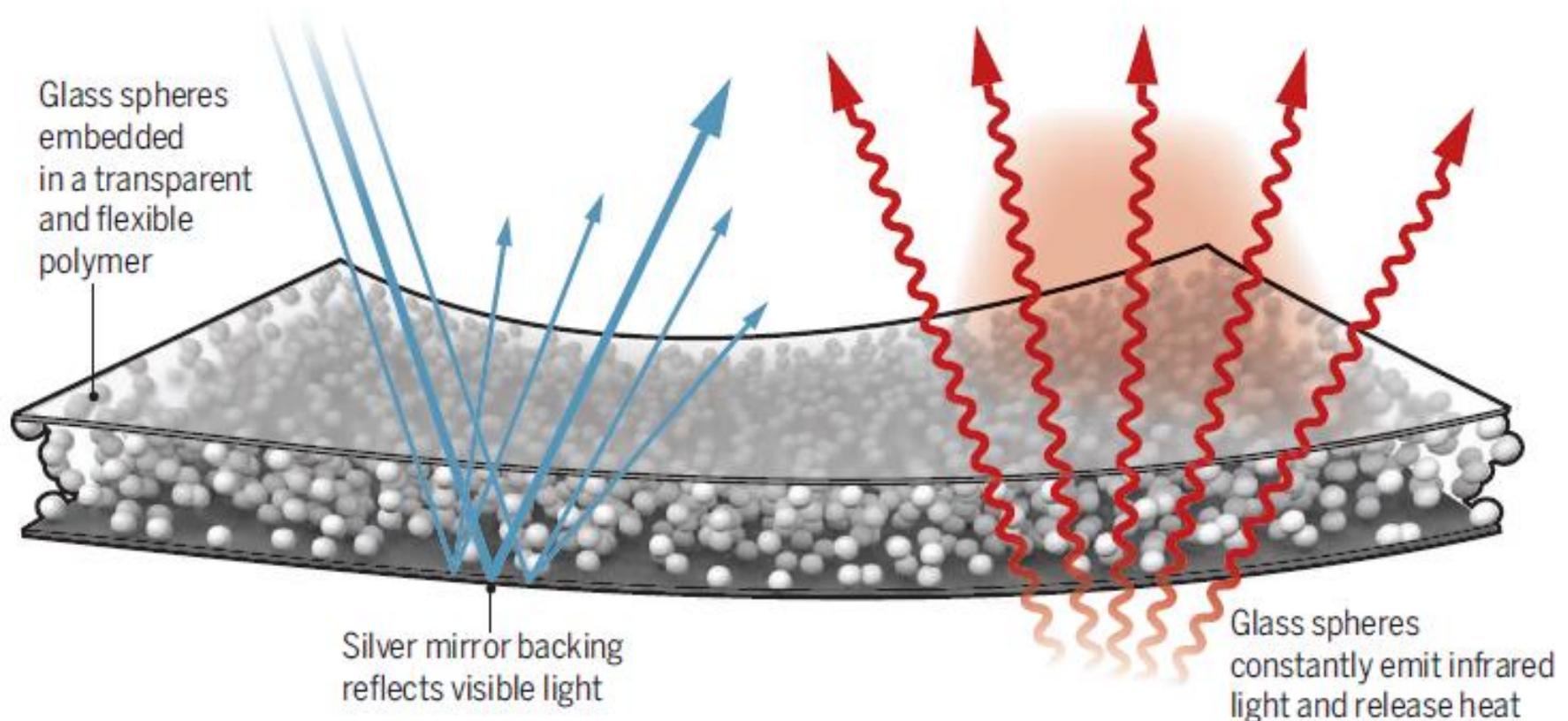
*These authors contributed equally to this work.

†Corresponding author. Email: xiaobo.yin@colorado.edu (X.Y); ronggui.yang@colorado.edu (R.Y.)

Passive radiative cooling draws heat from surfaces and radiates it into space as infrared radiation to which the atmosphere is transparent. However, the energy density mismatch between solar irradiance and the low infrared radiation flux from a near-ambient-temperature surface require materials that strongly emit thermal energy and barely absorb sunlight. We embedded resonant polar dielectric microspheres randomly in a polymeric matrix, resulting in a metamaterial that is fully transparent to the solar spectrum while having an infrared emissivity greater than 0.93 across the atmospheric window. When backed with silver coating, the metamaterial shows a noon-time radiative cooling power of 93 W/m² under direct sunshine. More critically, we demonstrated high-throughput, economical roll-to-roll manufacturing of the metamaterial, vital for promoting radiative cooling as a viable energy technology.

A flexible route to coolness

In previous approaches, intricate crystalline nanostructures emitted thermal infrared light. Zhai *et al.* use larger glass spheres ($\sim 10\ \mu\text{m}$ diameter) in a flexible polymer to create a scalable, thin-film cooling material.





中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

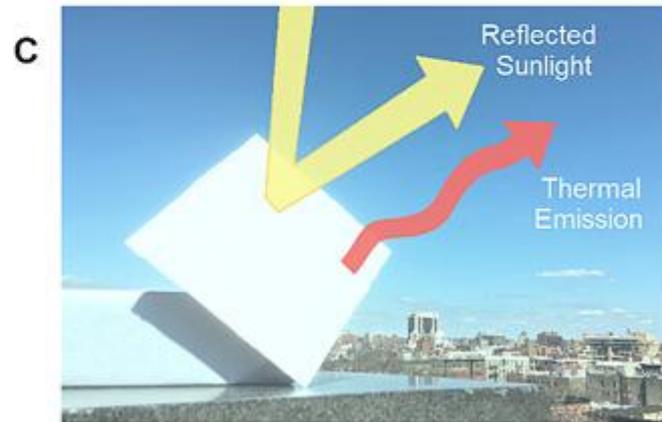
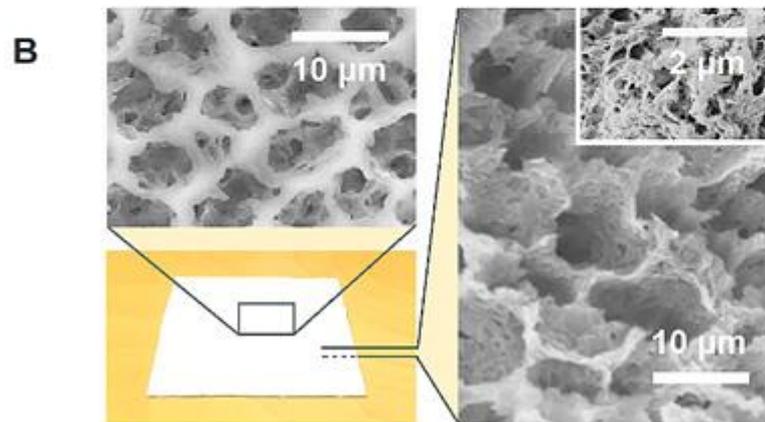
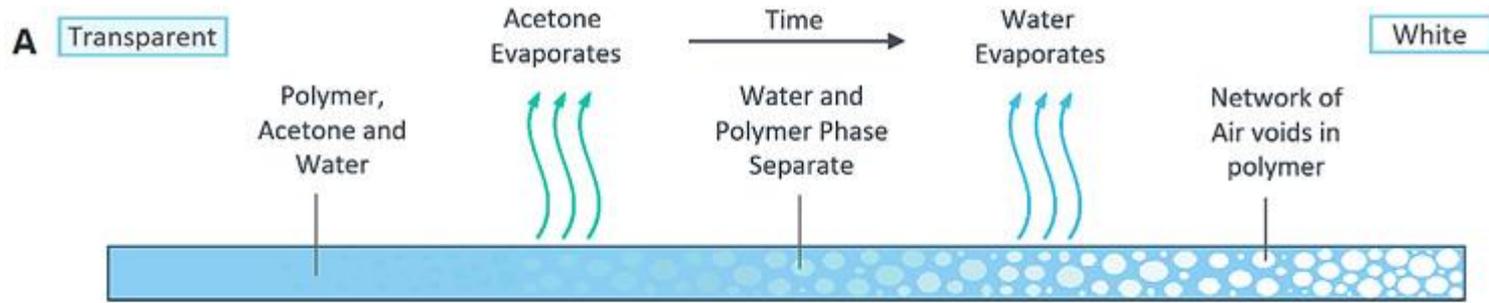


Glenn Asakawa/University of Colorado Boulder

玻璃聚合物特异材料



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



辐射冷却：大气在8~13 μm 波段（大气透明窗口）高透射，该波段与陆地温度（约为300K）黑体辐射谱峰值一致，使得地球向外太空（温度约为3K）辐射散热，即辐射冷却。

应用领域：建筑的被动冷却式、从宇宙中获取可再生能源，干旱地区的制冷设施。

组成：透明聚合物中随机分布 SiO_2 颗粒。

光谱响应范围： $0.3\sim 25\mu\text{m}$ ，在大气窗口发射率极高。

厚度为 $50\mu\text{m}$ ， SiO_2 颗粒体积占6%时，红外发射率大于0.93；背面涂上200nm厚银层时，对太阳辐射反射率约为96%。

制冷功率：午间 $93\text{W}/\text{m}^2$ ；全天平均值大于 $110\text{W}/\text{m}^2$

制造尺寸：300mm宽。

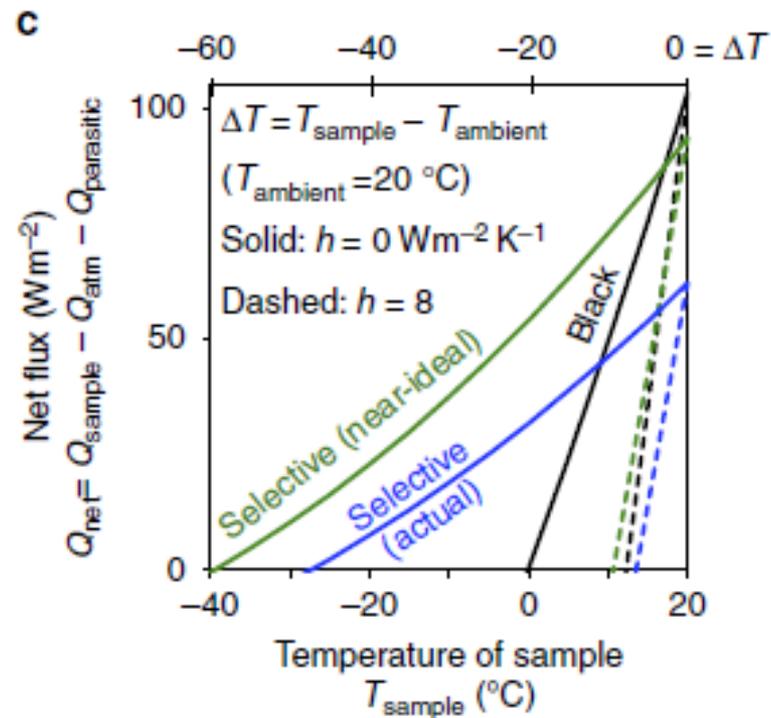
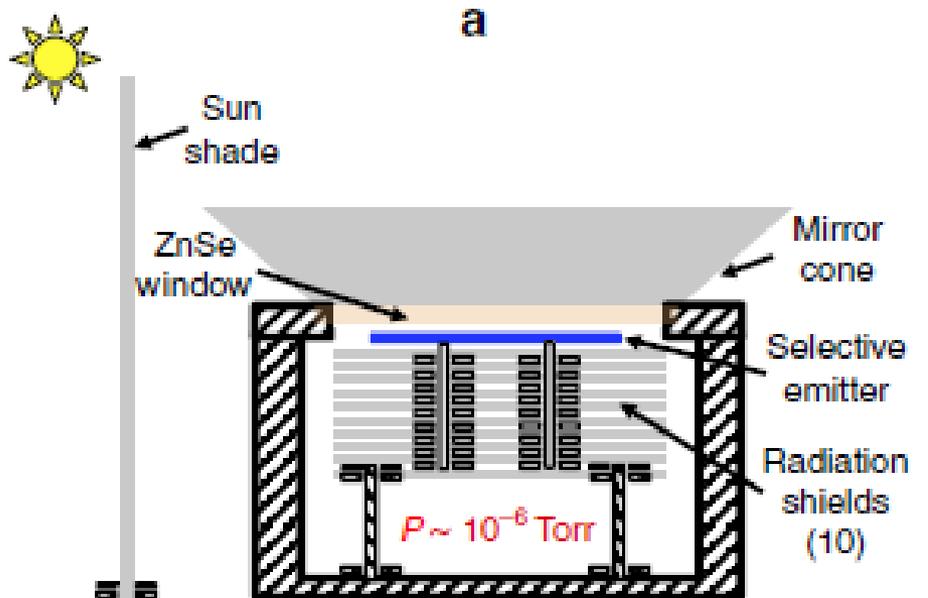
制造速度：5m/min。

基体材料：TPX，也可采用MMA或PE（吸收更多辐射），制造成本低，适合大量生产应用

消光截面 (σ_{ext}/a^2) 是 SiO_2 颗粒尺寸参数 $k_0 a$ 的函数, k_0 为自由空间波矢 (入射波长 $10\mu\text{m}$), a 为颗粒半径。
 $a=4\mu\text{m}$ 时, 消光截面最大。对于小颗粒, $a=0.5\mu\text{m}$ 时, 仅有电偶极共振出现, 其线宽较窄, 导致红外辐射区带宽较窄, 且会导致强反射减小总体辐射; 对于大颗粒, $a=4\mu\text{m}$ 时, 高阶的电磁振荡模式被激发, 可以得到覆盖大气窗口的带宽, 且在红外区色散小。

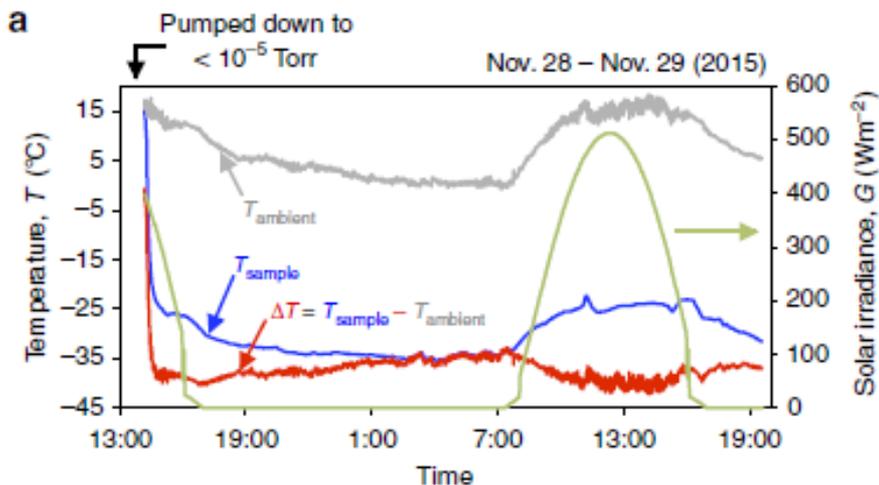
- 理想状态：大气在大气波段100%透明，辐射体在该波段内辐射不为零，在该波段外辐射为零，且其辐射到外太空无寄生热损。
- 实际情况：大气并非100%透明，有寄生热损。
- 辐射体稳态温度取决于以下三个因素的平衡：样本的热辐射 Q_{sample} 、大气热辐射 Q_{atm} 、寄生热损 $Q_{parasitic}$ （取决于热传输系数 h ）。无绝热， $h = 8Wm^2K^{-1}$ ；理想绝热， $h = 0Wm^2K^{-1}$ 。
- 辐射冷却两大要点：1）使用选择性辐射体（匹配大气透明窗口）；2）尽量低的寄生热损（良好的绝热）。

实验装置和结果分析

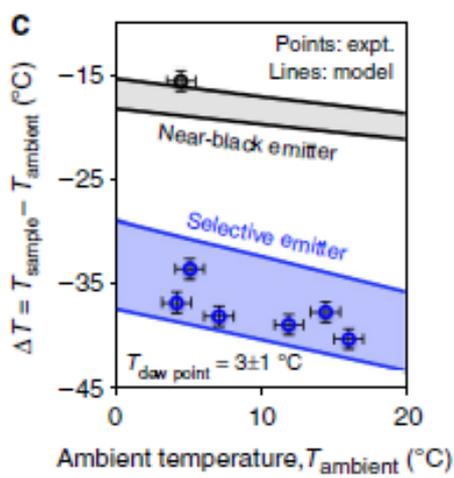
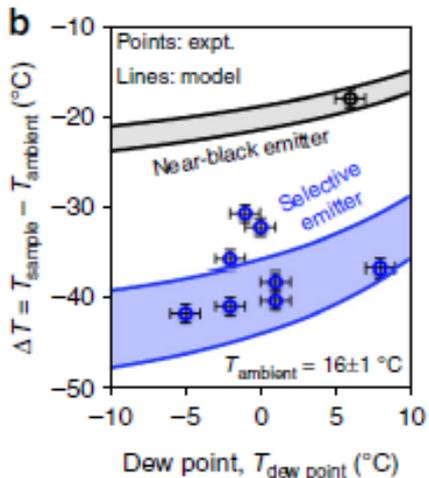


$h=8$ 时，黑体和选择性辐射体平衡温度差别不大；
 $h=0$ 时，平衡温度差别很大。

结果分析



1. 露点低且环境温度高时温度下降最多，此时太阳辐射最强。
2. 选择性辐射体比黑体降温更明显，且对寄生热损的变化响应更加敏感。



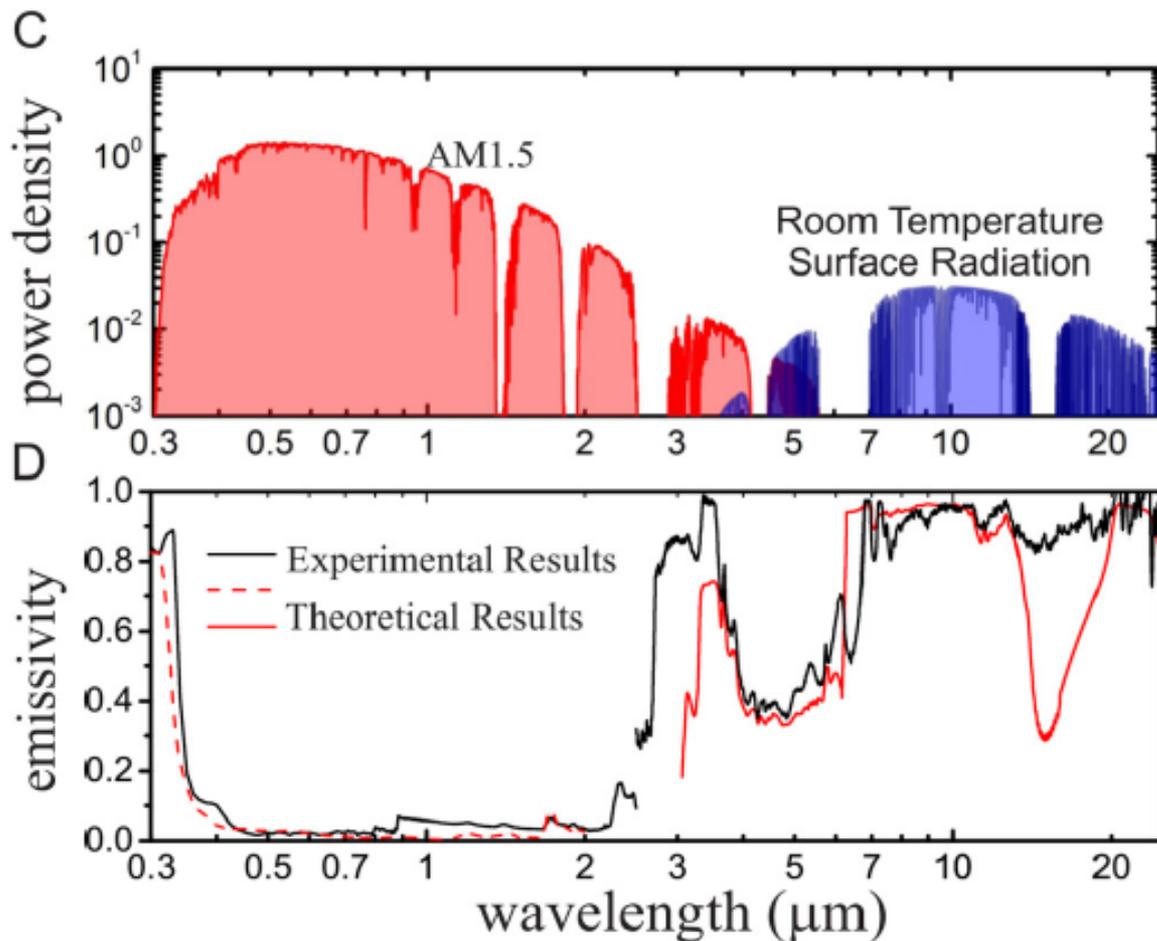
Zhen Chen, Linxiao Zhu, Aaswath Raman & Shanhui Fan. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day-night cycle. *Nat. Commun.*(2016)

不同露点和环境温度时的温度差

玻璃聚合物特异材料



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



C. 太阳辐射和黑体辐射功率密度图。
D. 特异材料发射率光谱图，在 8~13 μm 区间发射率接近饱和，16~25 μm 的第二大气窗口也可加以利用



谢谢大家，欢迎提问题讨论！

Email : wenliu@ustc.edu.cn,
QQ/微信号: 1214740116