



南京理工大学

NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

计算光学成像与 光信息处理技术前沿

(第4讲)

左超

南京理工大学电光学院光电技术系

Ji angsu Key Labor atory of Spect ral I mægi ng & I nt el li gent Sense (S I I S)

Nanj i ng Uhi ver si ty of Sci ence and Technol ogy,

Nanj i ng, Ji angsu Pr ovi nce 210094, Chi na



电子工程与光电技术学院

School of Electronic and Optical Engineering



江苏省光谱成像与智能感知重点实验室

Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense



计算光学成像与光信息处理 技术前沿

Frontiers in computational imaging and optical
information processing

Lecture 4

光学成像基础科普



主要内容：

1. 光学成像系统概述
2. 光源概述
 - 激光
 - LED光源
3. 成像光路概述
 - 相机镜头
 - 投影光路
 - ...
4. 探测器及其工作原理



成像方法历史简述

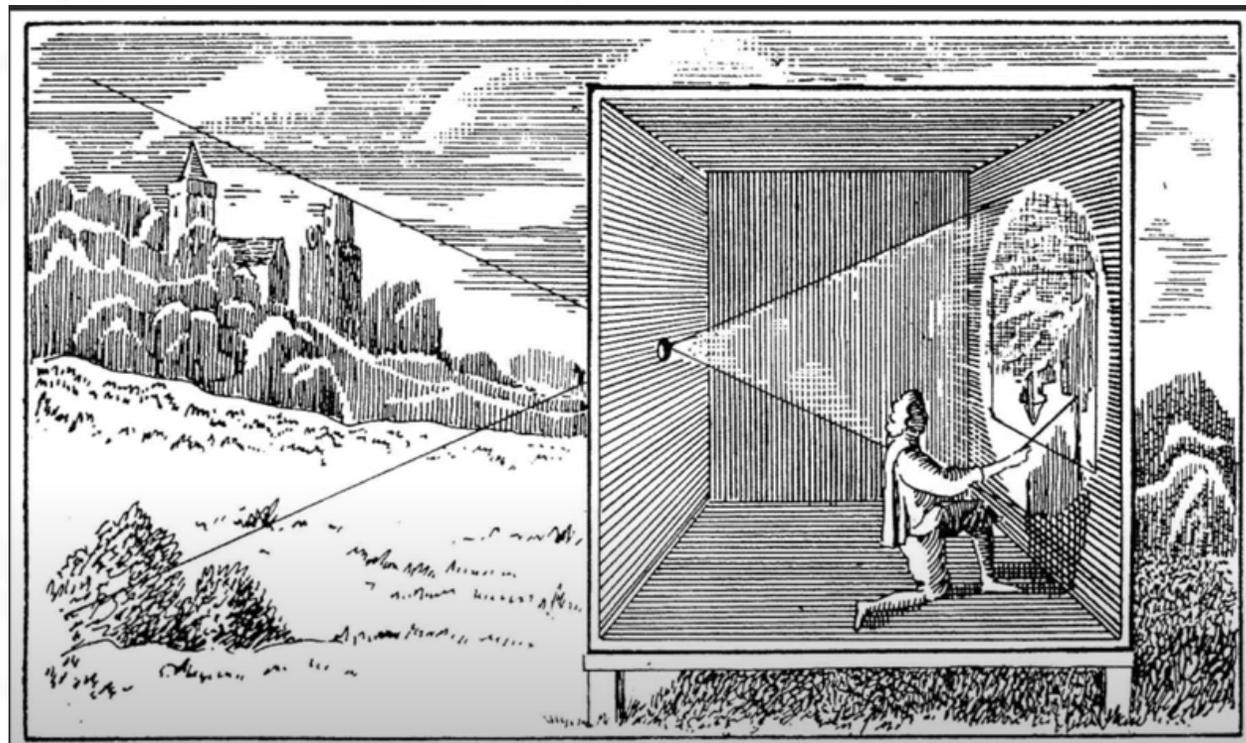
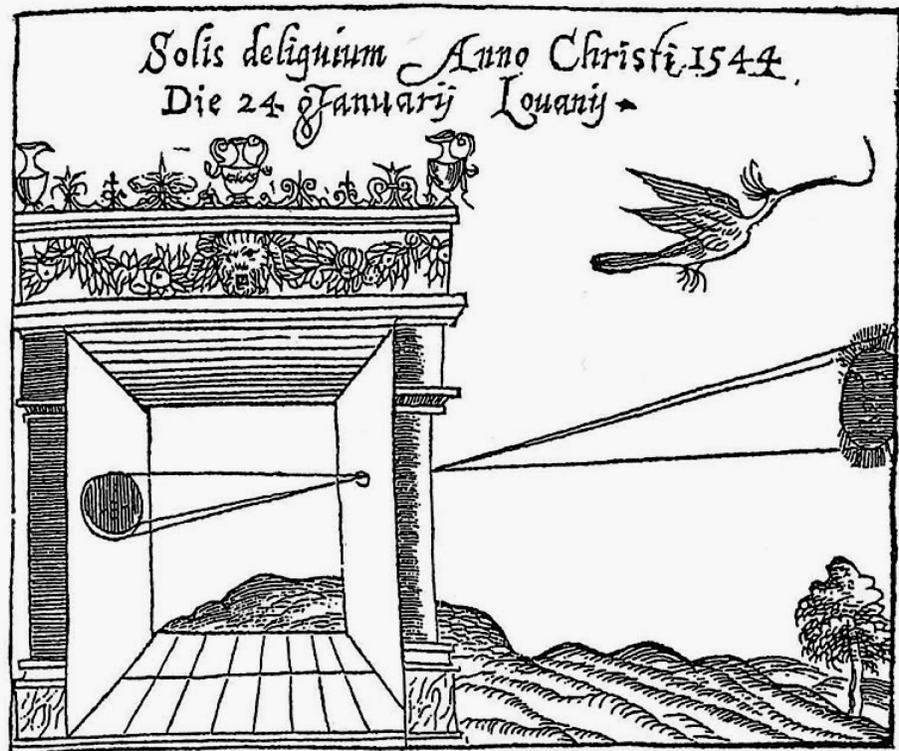


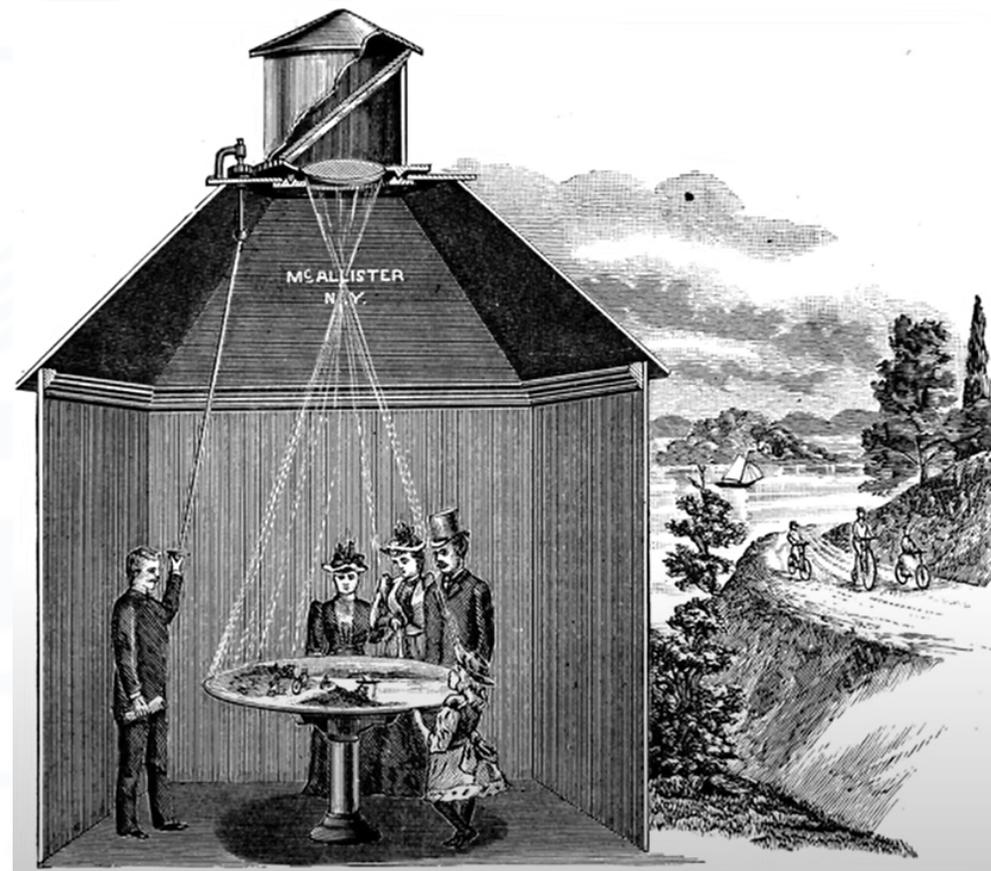
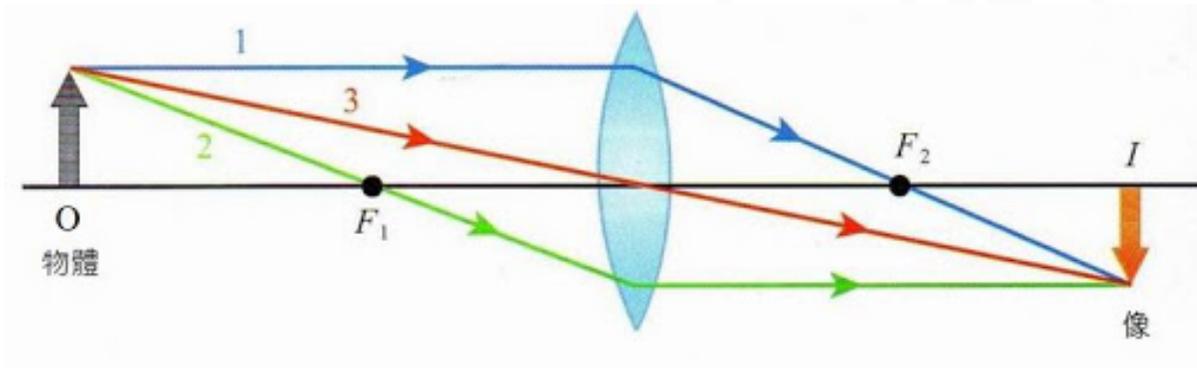
Photo-graph
光-图

暗箱倒影成像-1558





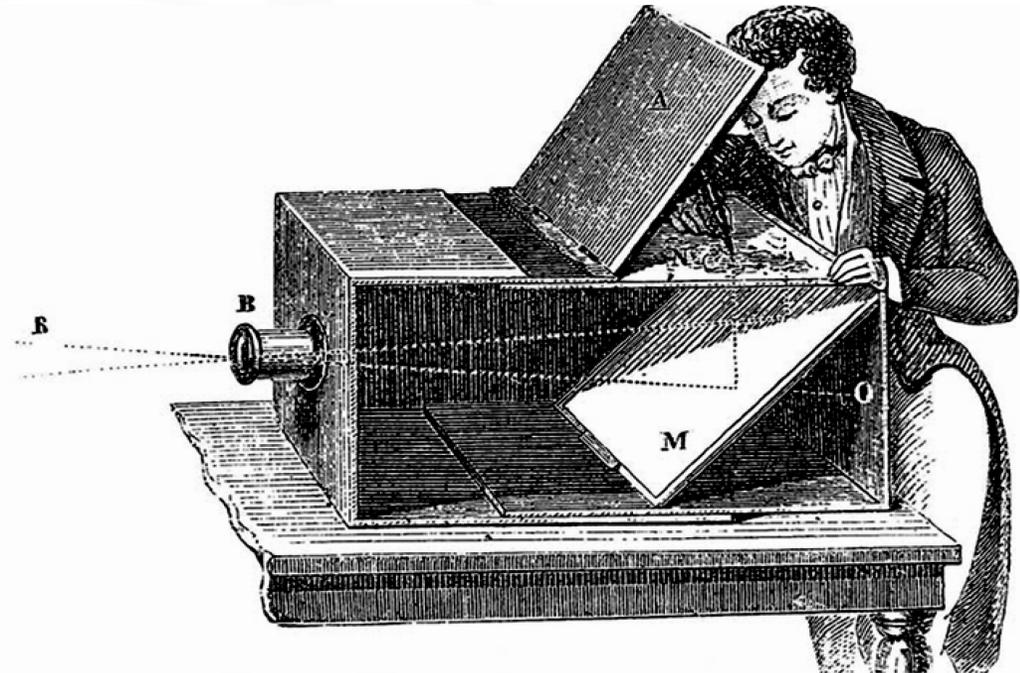
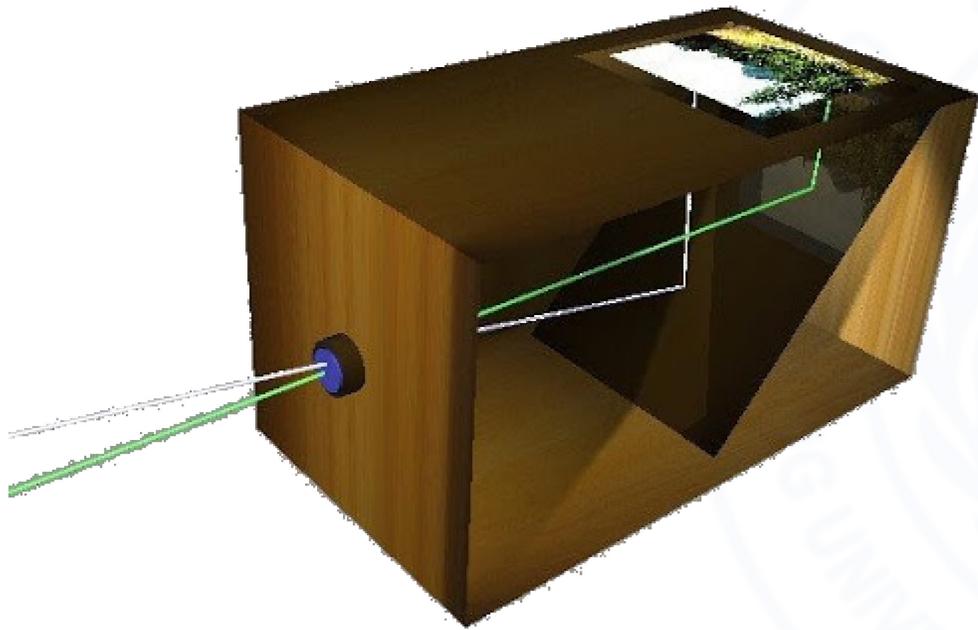
成像方法历史简述



利用透镜替代小孔聚焦成像：提升亮度/观察



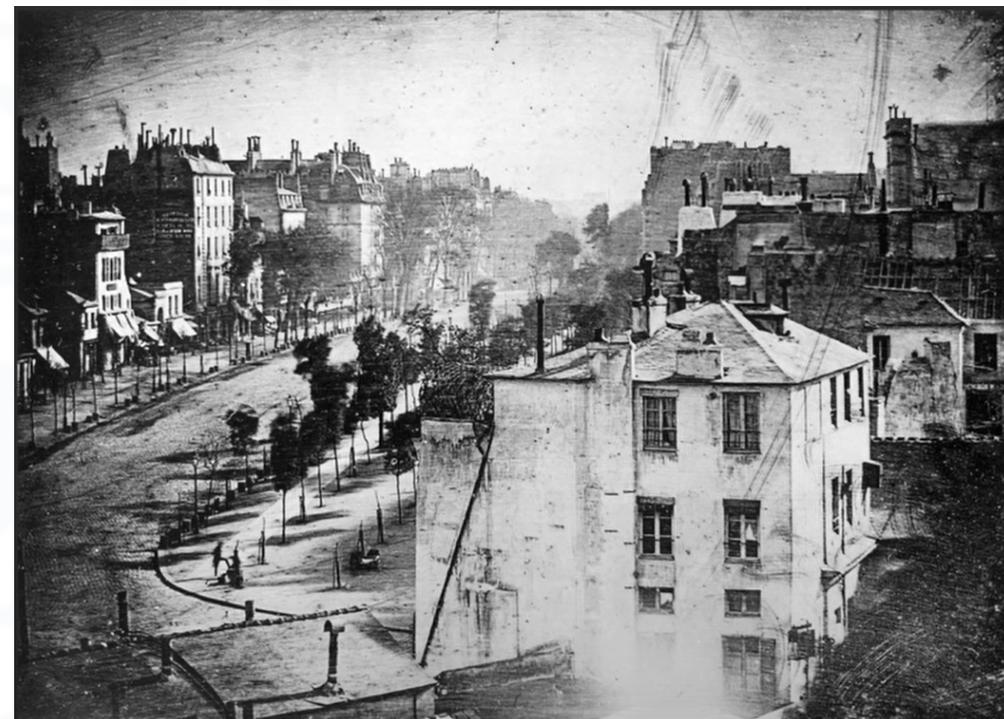
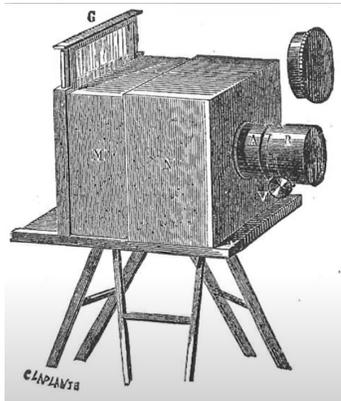
成像方法历史简述



反射后背投成像：暗箱临摹绘画



感光材料

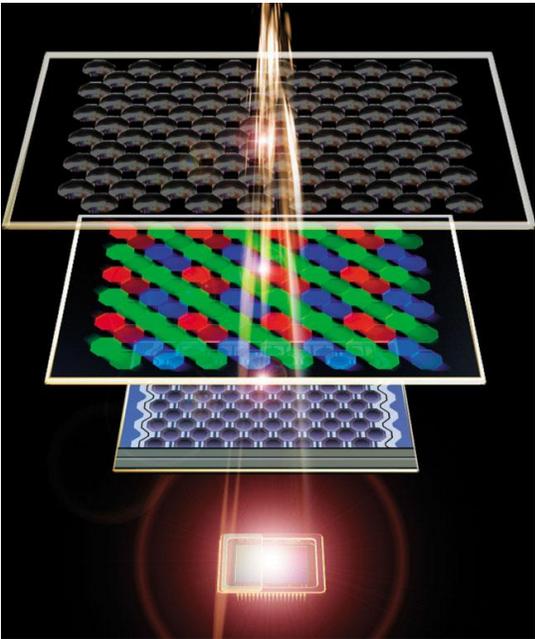
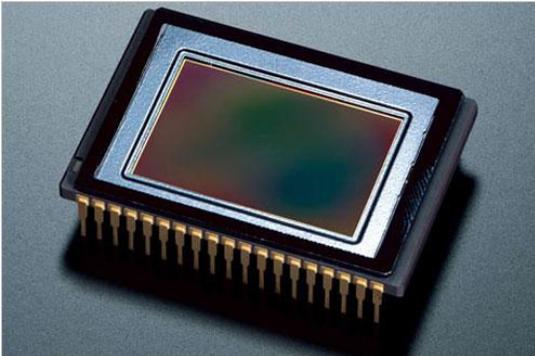


50 kg
银、汞

达盖尔，商业化设备-1837



数码相机



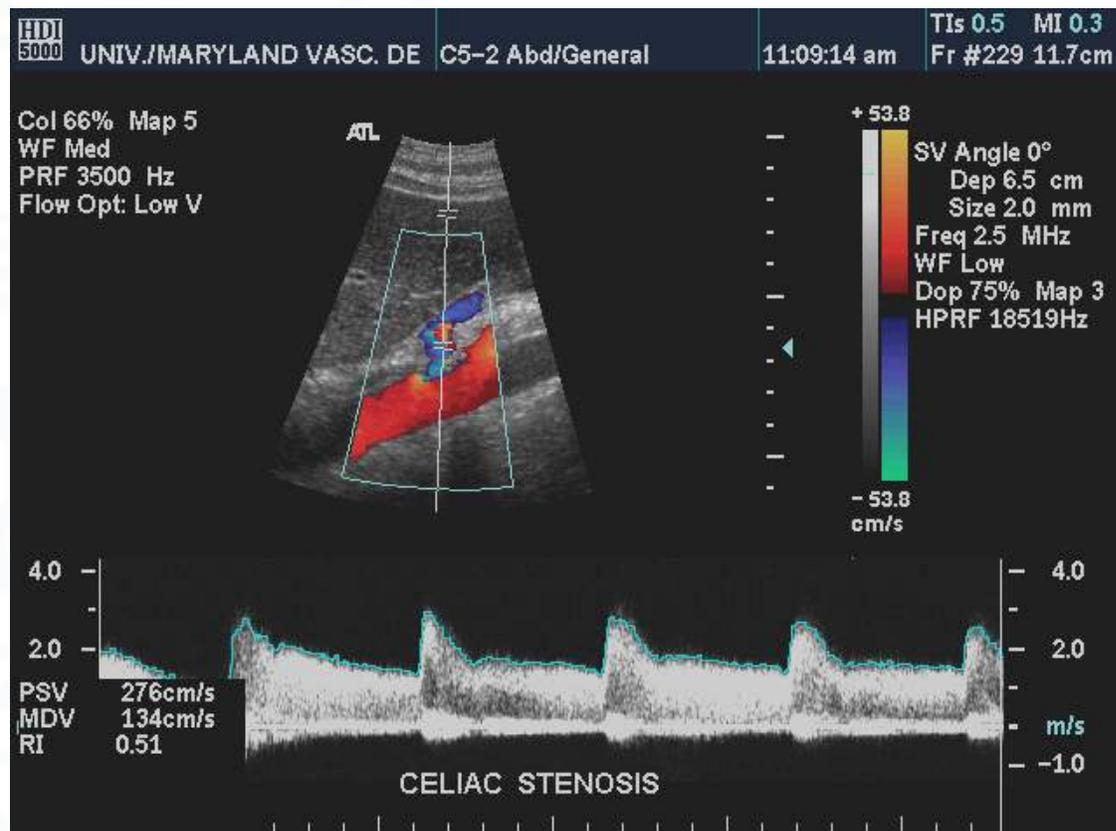
半导体感光材料（**数字化**），1970



(声波) 数字成像的应用



超声波

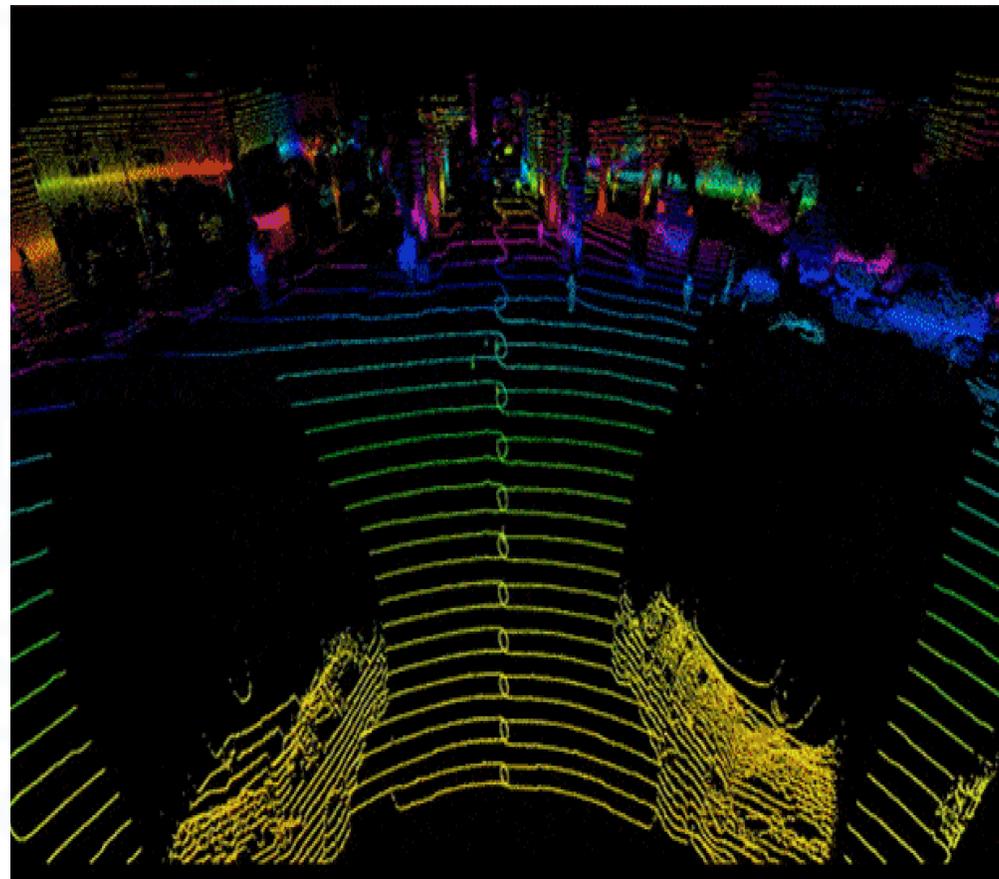
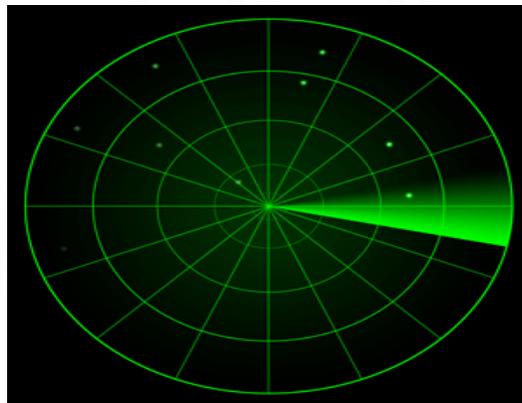


彩超

超声波-反射成像 (声波)



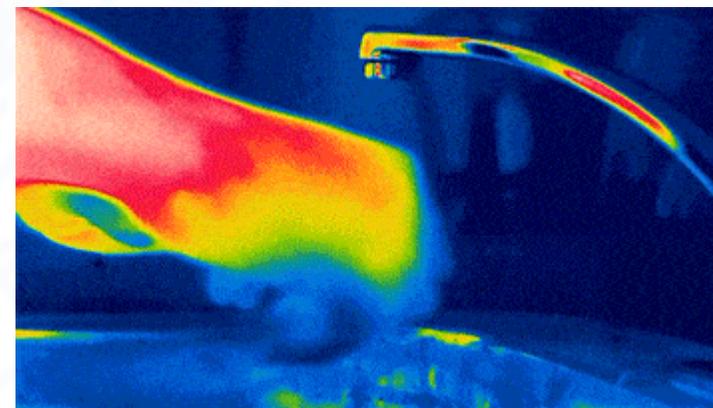
(电磁波) 数字成像的应用



雷达-反射成像 (微波/电磁波-毫米到千米)



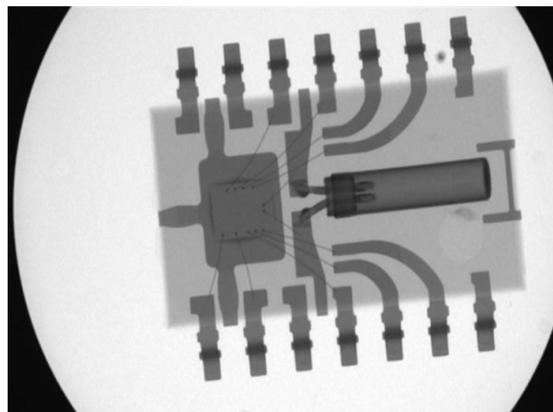
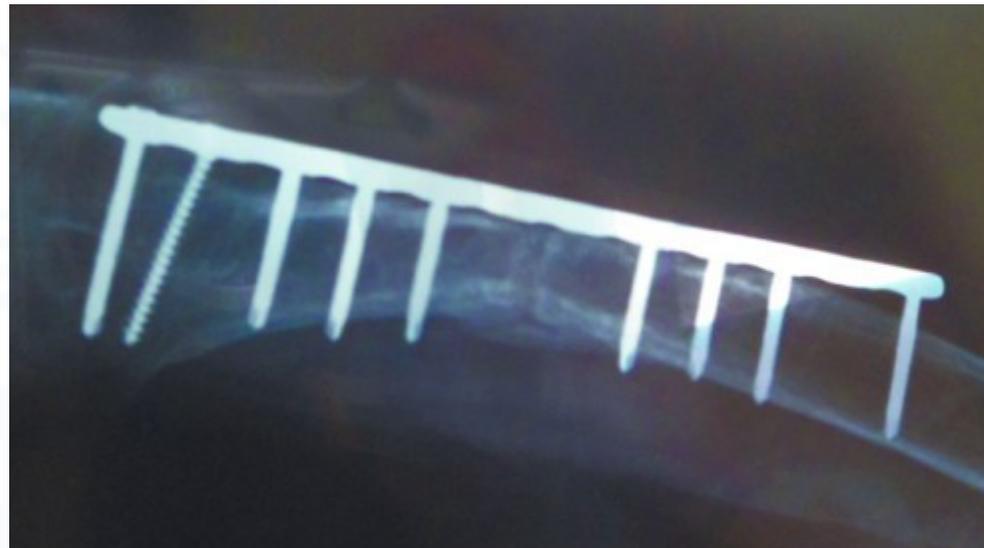
(不可见光) 数字成像的应用



红外光-夜视成像/热成像 (780nm到几毫米)



(不可见光) 数字成像的应用



X光-透视成像





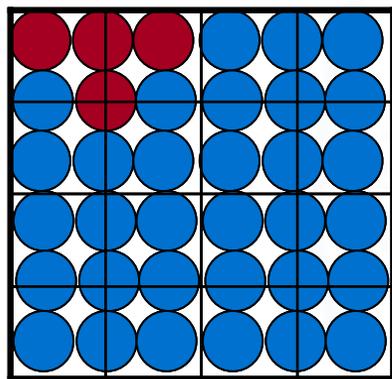
理解“数字图像”



- 图像由彩色的点组成
- 点的紧密排列产生了颜色连续的效果
- 随着细节不断放大，连续性遭到破坏



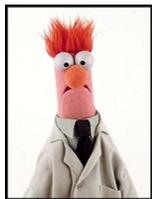
图像放大



=



图像放大

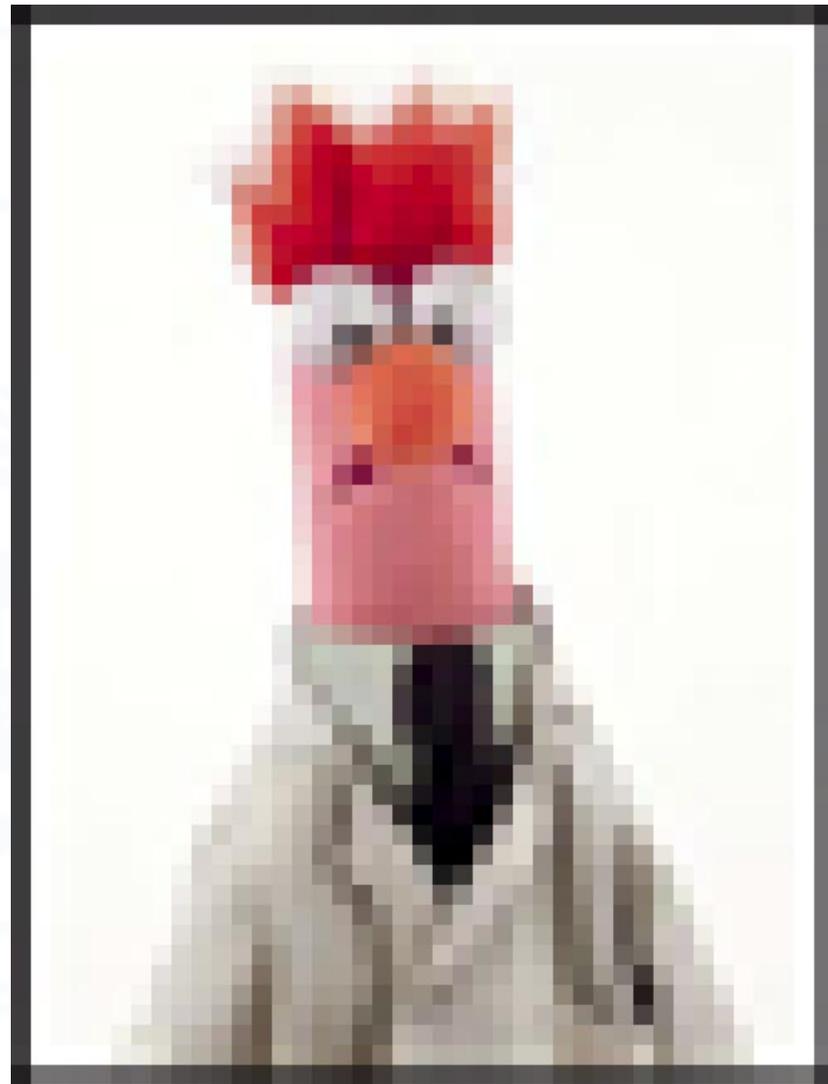


0.5 x 0.75 @ 72dpi;
6.5 kb

低采样率

观察像素化

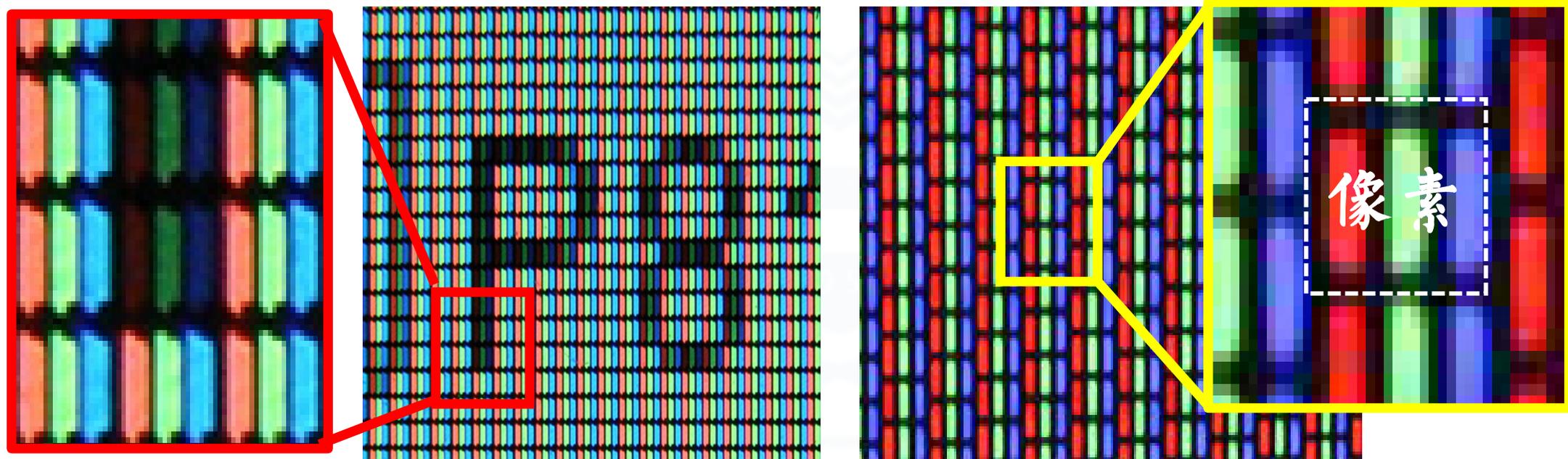
=



4 x 5 @ 10 dpi
6.5 kb

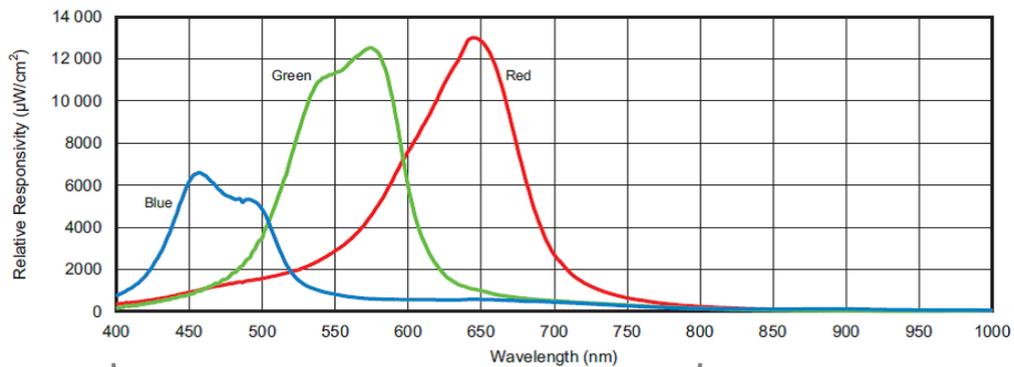
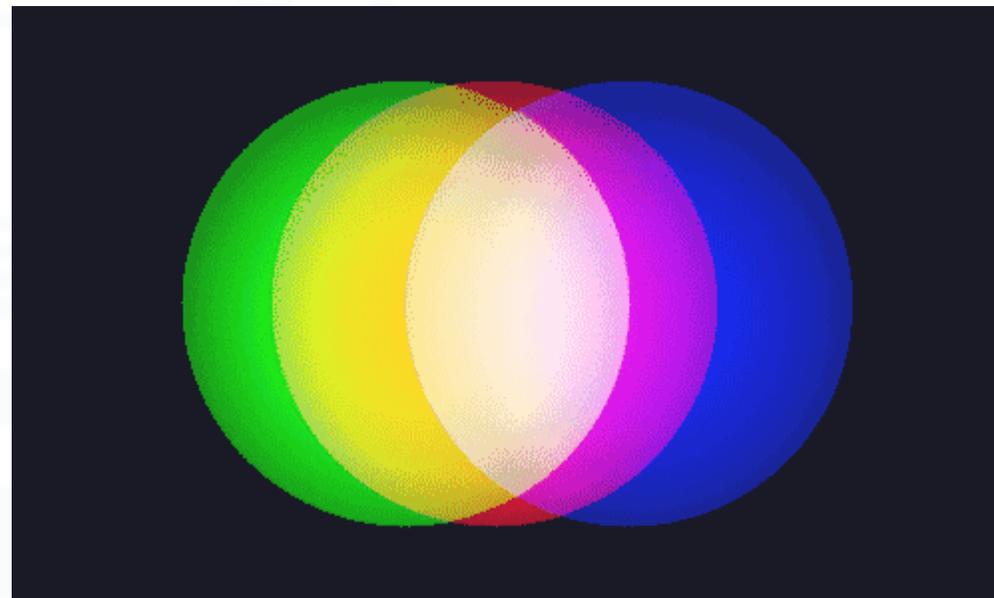
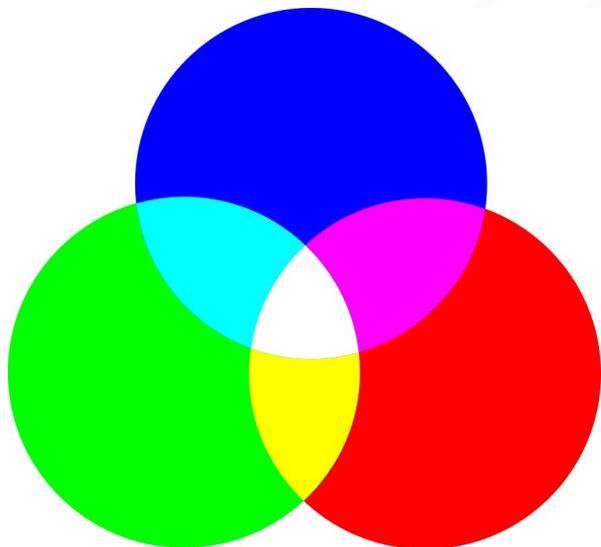


像素由什么组成？





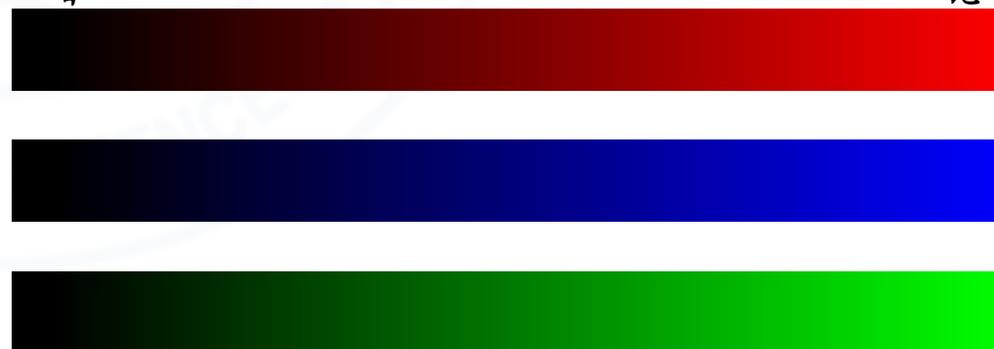
三原单色 (R/G/B) 合成彩色



可见光波段

暗

亮





像素位深对颜色的影响



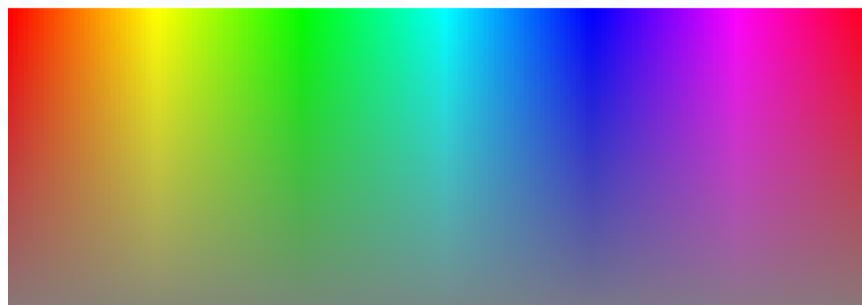
1-bit = 2 个颜色

2-bit = 4 个颜色

4-bit = 16 个颜色

8-bit = 256 个颜色

16-bit = 65,536 个颜色



色彩 + 透明度

颜色用的越多，画面越逼真，文件占用空间越大



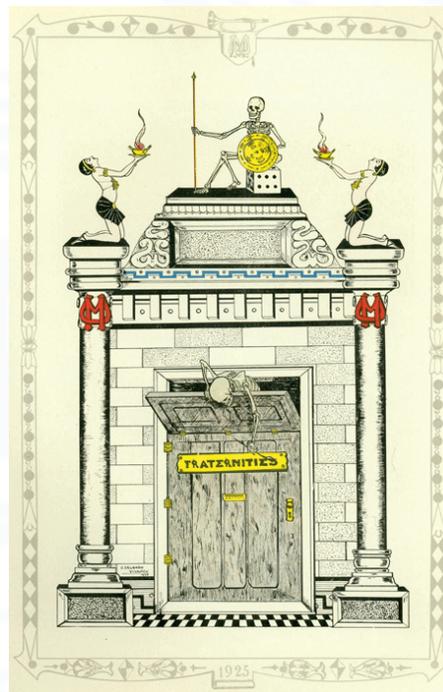
像素位深对颜色的影响

是不是位深多就一定好?

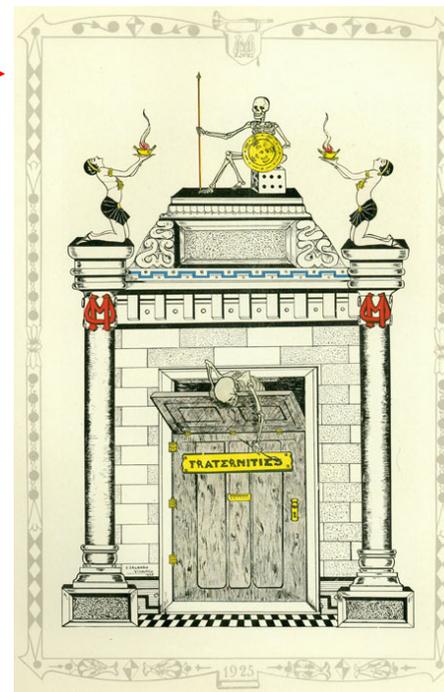
8-bit color



24-bit color



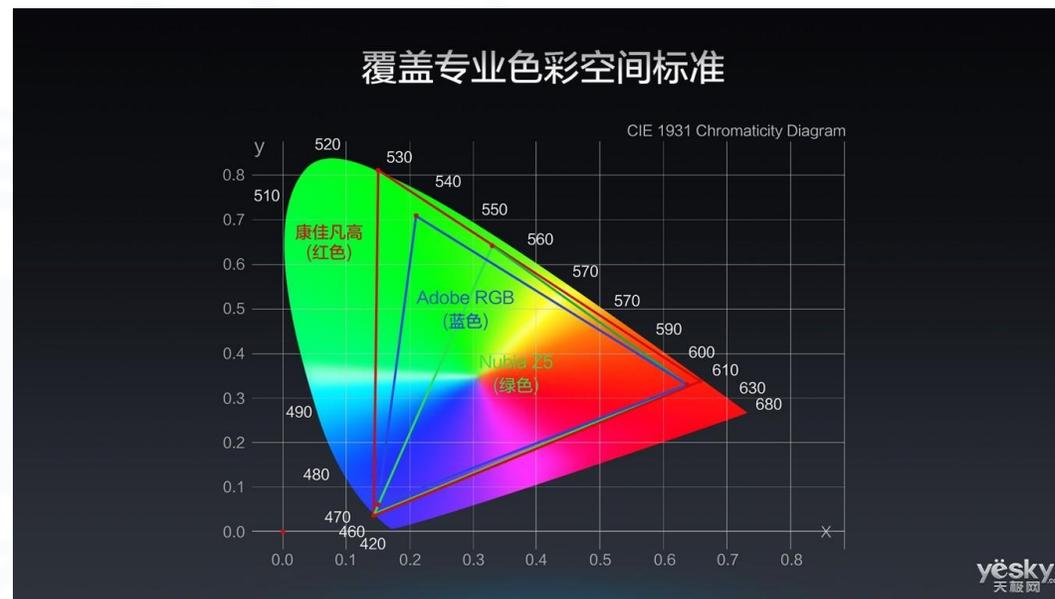
8-bit
or
24-
bit?





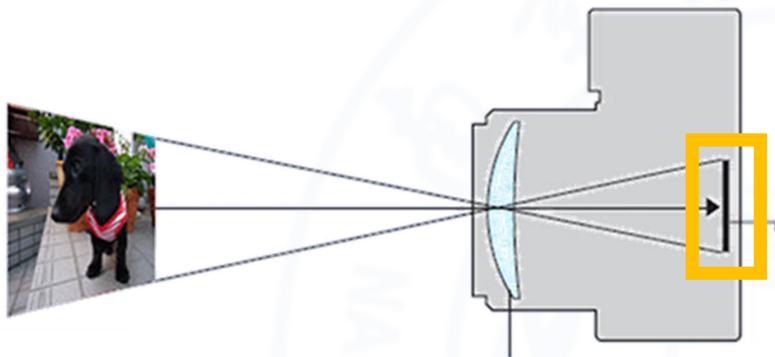
像素作图

- 多个颜色通道(RGB)
 - (R,G,B) @ 8-bit = 24 bits per pixel
 - 256 种红...
 - 256 种蓝...
 - 256 种绿...
 - 组合在一起，共上千万种色彩
- (R,G,B) @ 16-bit = 48 bits per pixel
 - 65536 种红...
 - 65536 种蓝...
 - 65536 种绿...
- 组合在一起，共数万亿种色彩





像素信息如何获取?

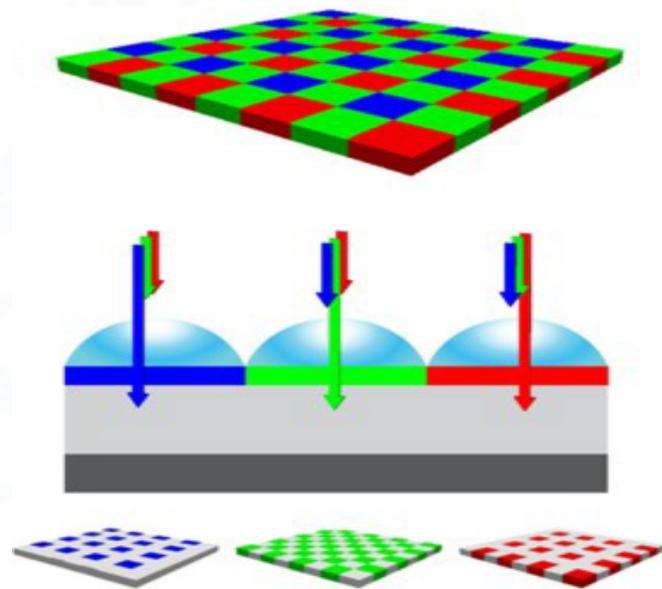
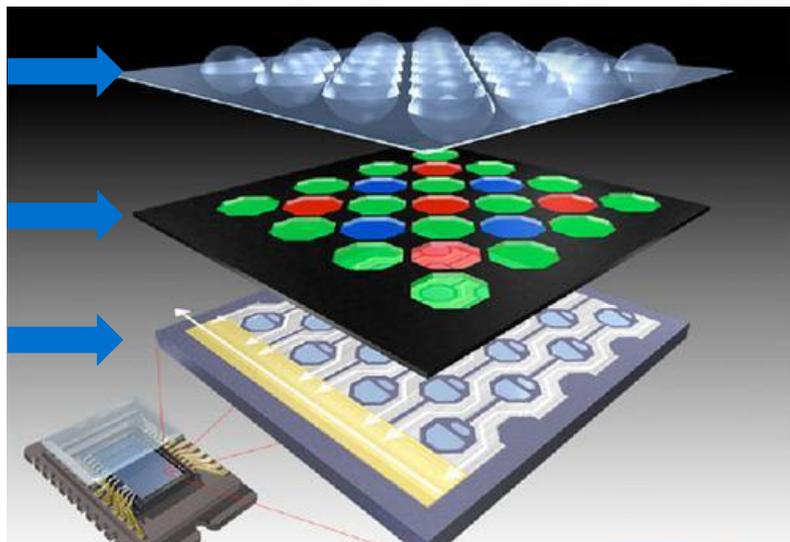


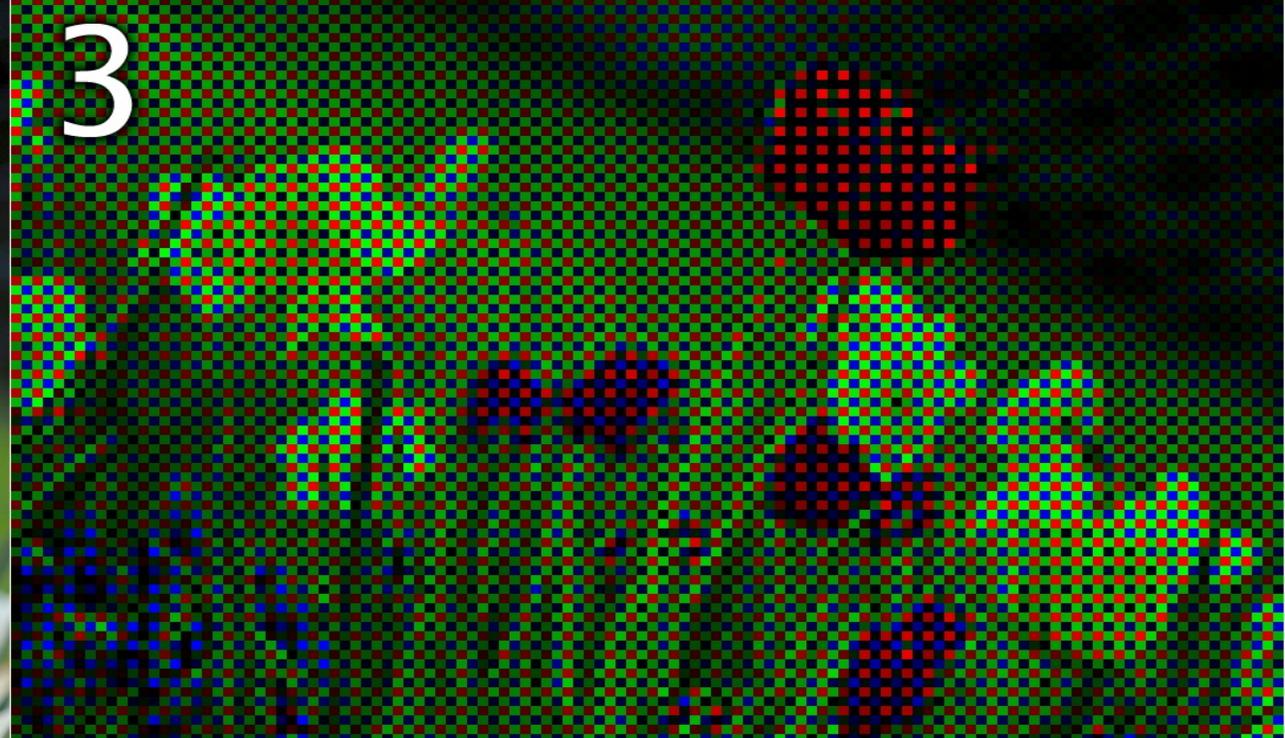
传感器: 将光信号转换为可记录的数字信号

透镜阵列

滤色片

感光材料





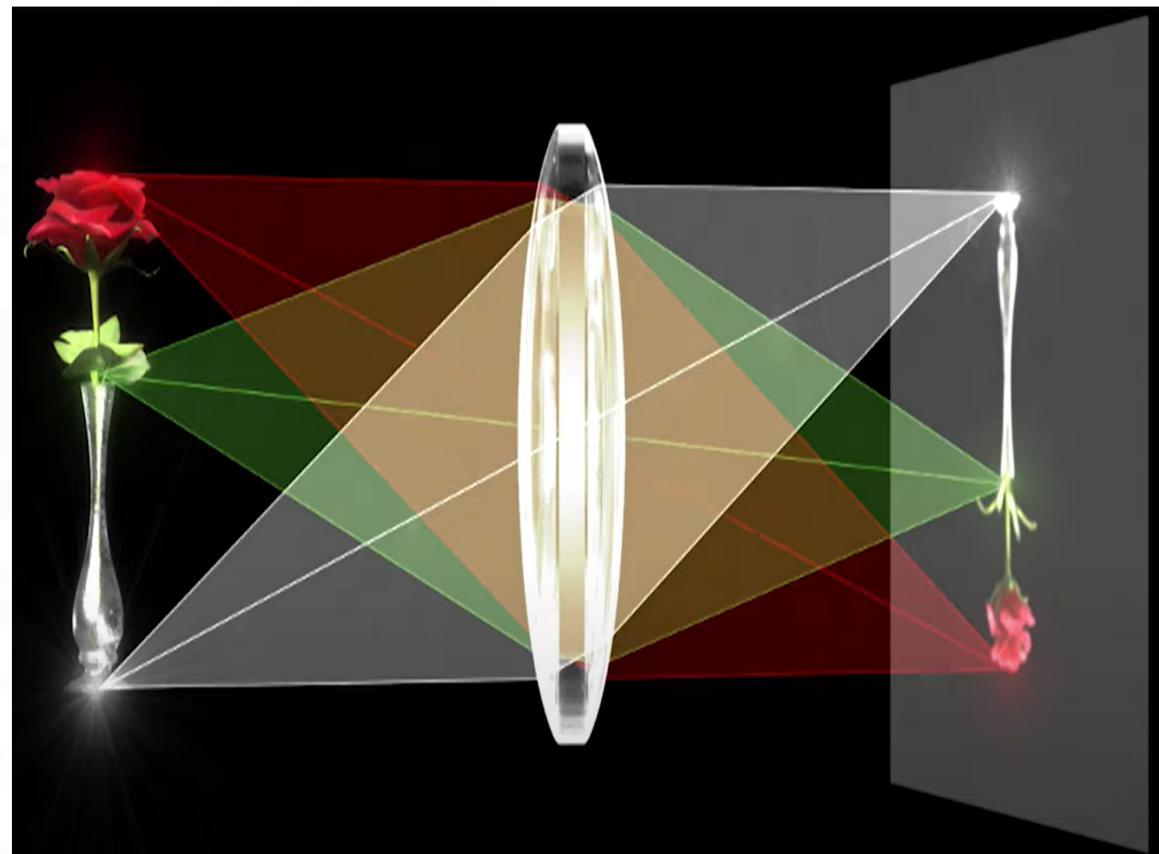


进一步拓展：经典/传统可见光成像系统

光学成像系统**基本组成**

- 光源—照亮物体，使物体“发光”
- 光路—“物体”到“像点”映射
- 光传感器—记录映射的像

理想情况下，物体上的每个点都映射到像面上的一个点

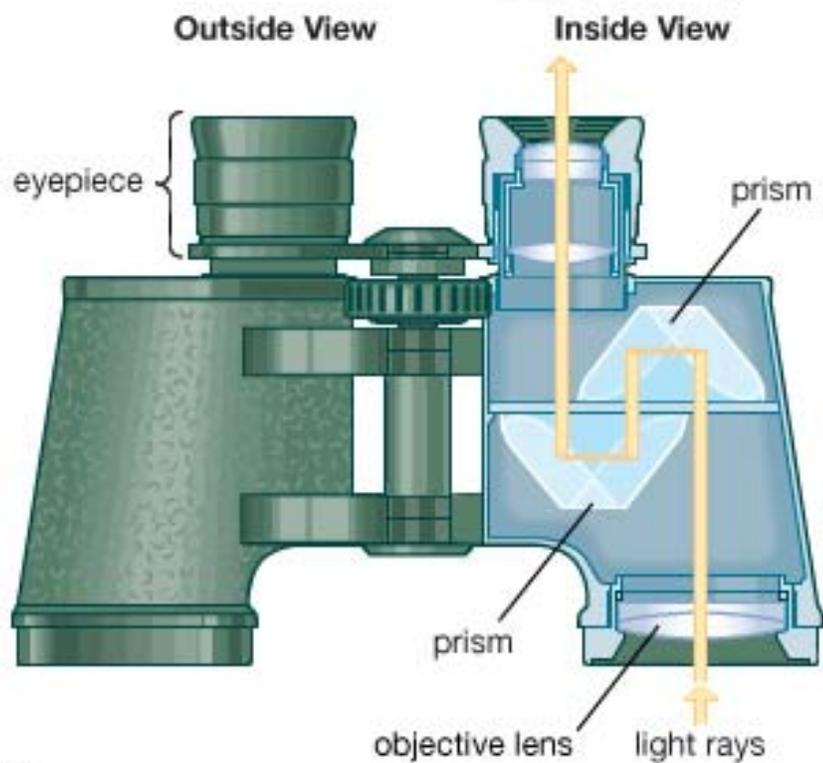


How Lenses Function



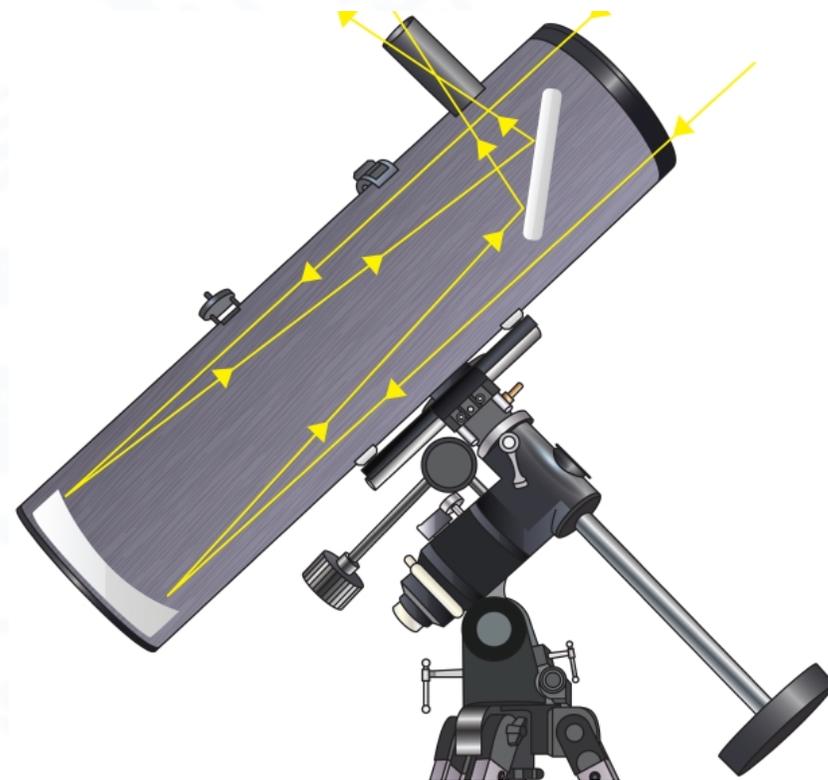
望远镜示意图

普通望远镜



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

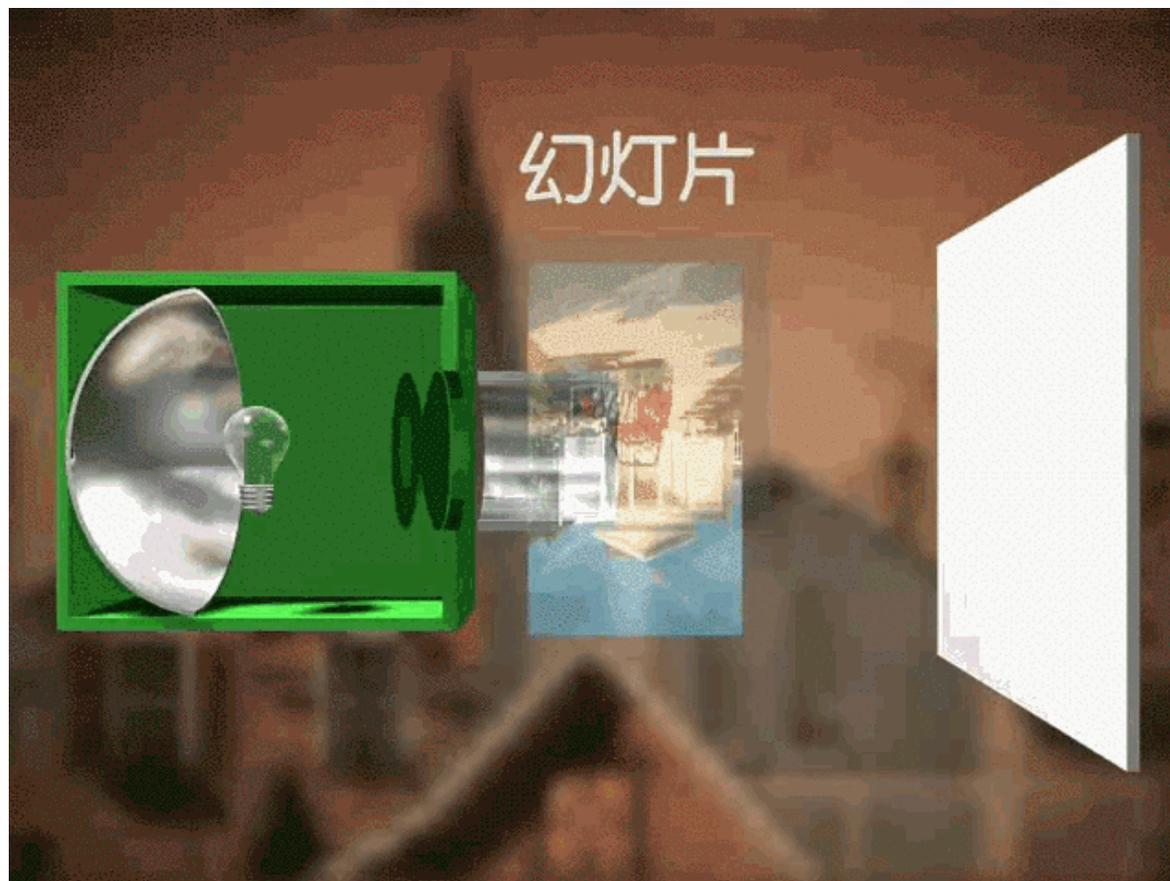
天文望远镜



小视场（大焦距）、长镜筒（炮筒）



投影示意图

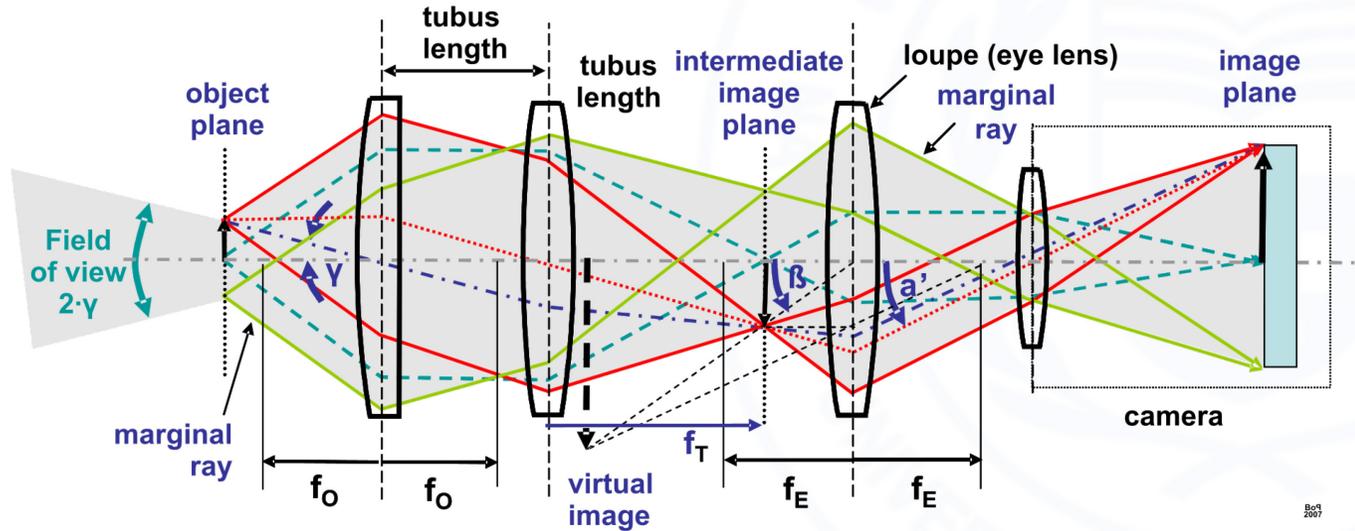


逆相机光路



显微镜

光路示意图



Modern Microscope Component Configuration

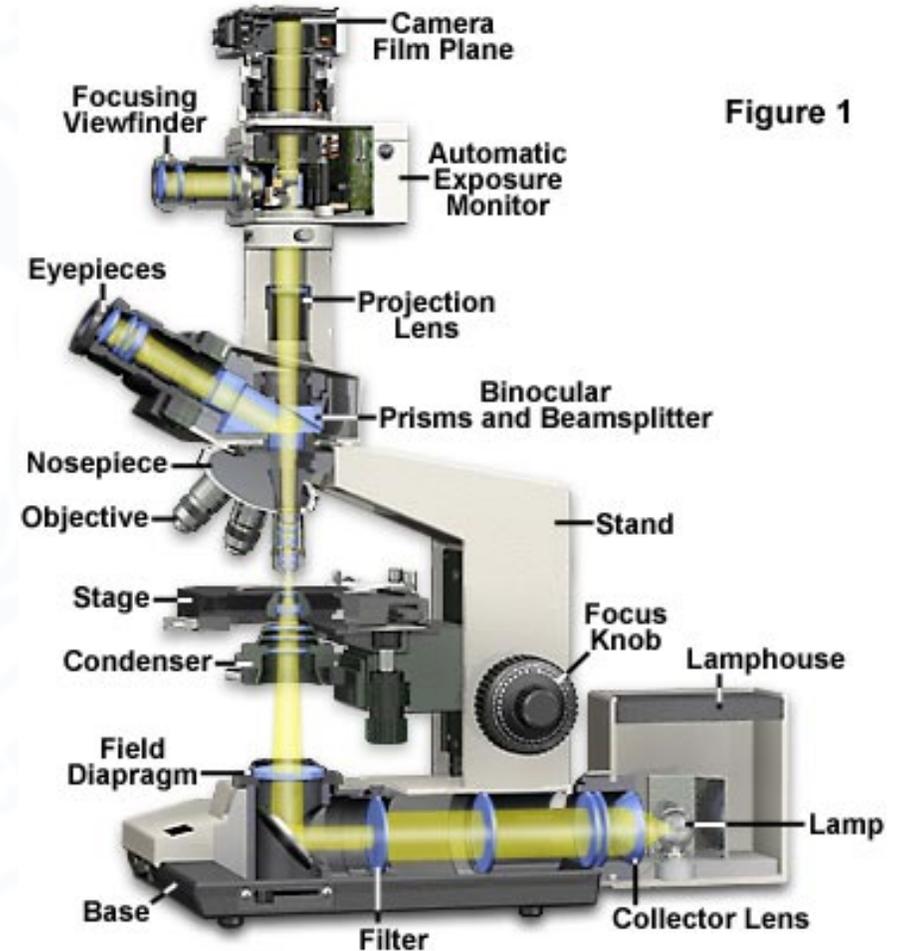
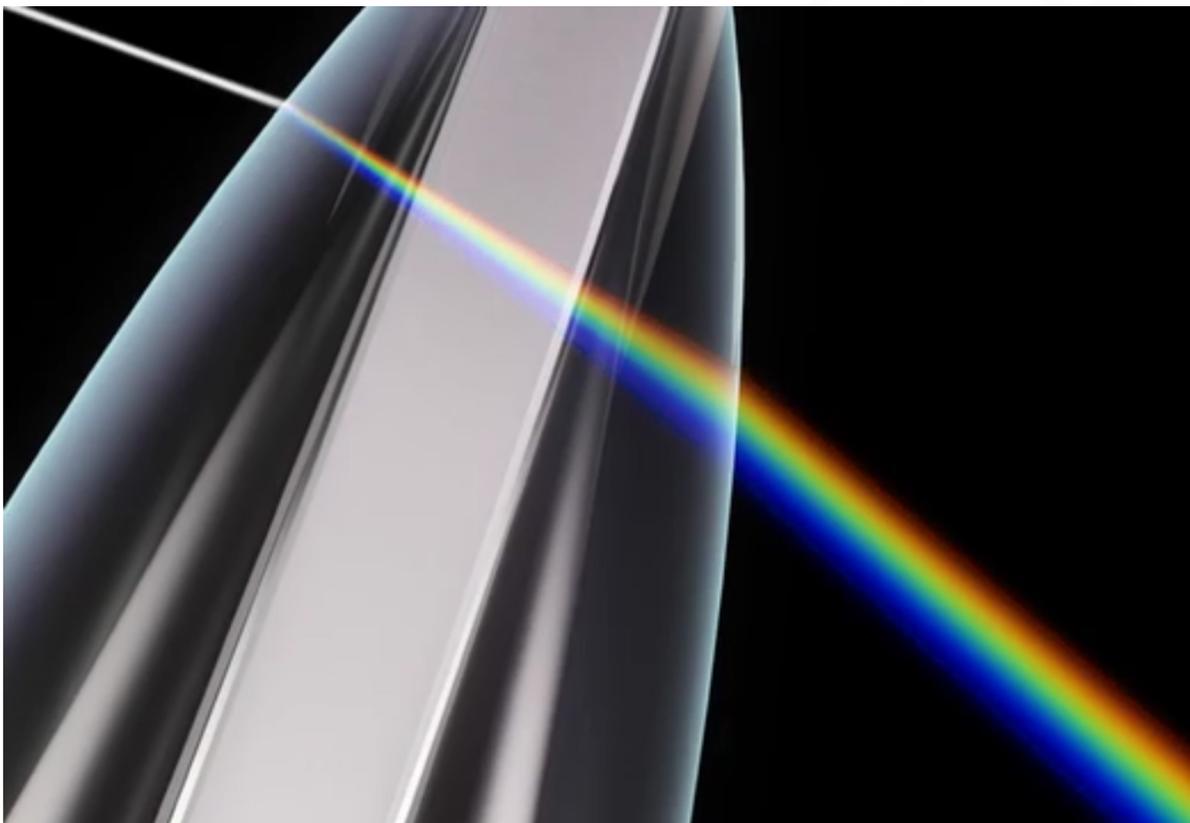


Figure 1

近距离小物体放大成像



固有的缺陷



不同波长折射率不同（色散）引起的色差



固有的缺陷



f/1.8



f/2.8



f/4.0



f/5.6



f/16

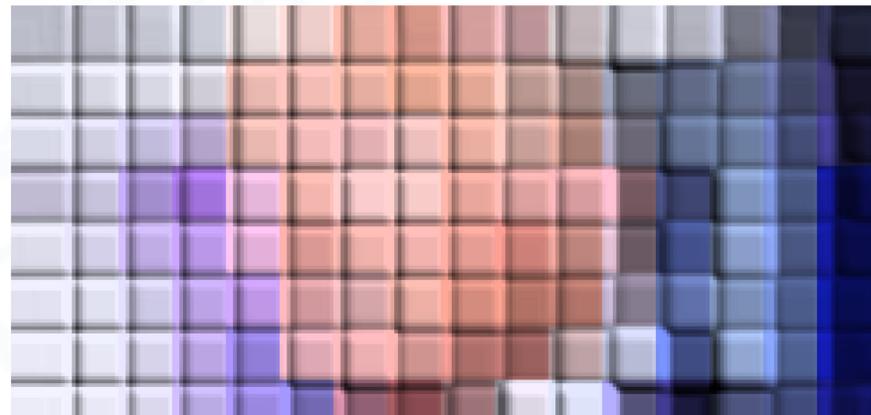
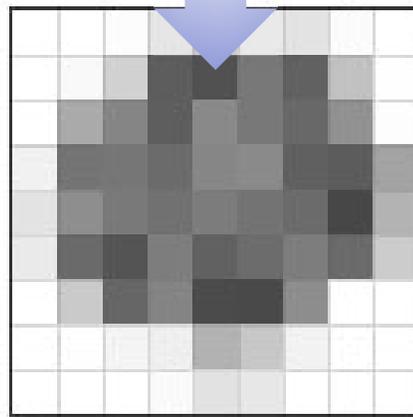
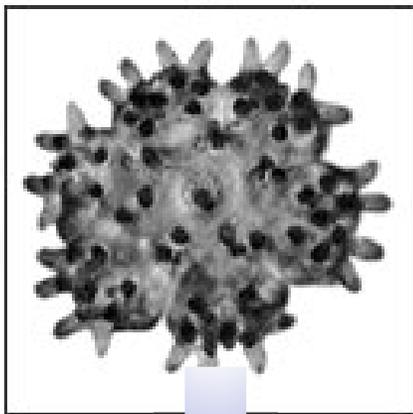
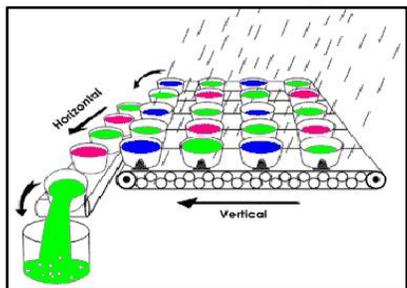
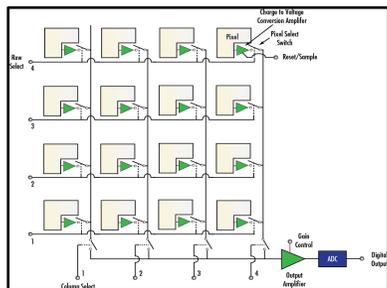
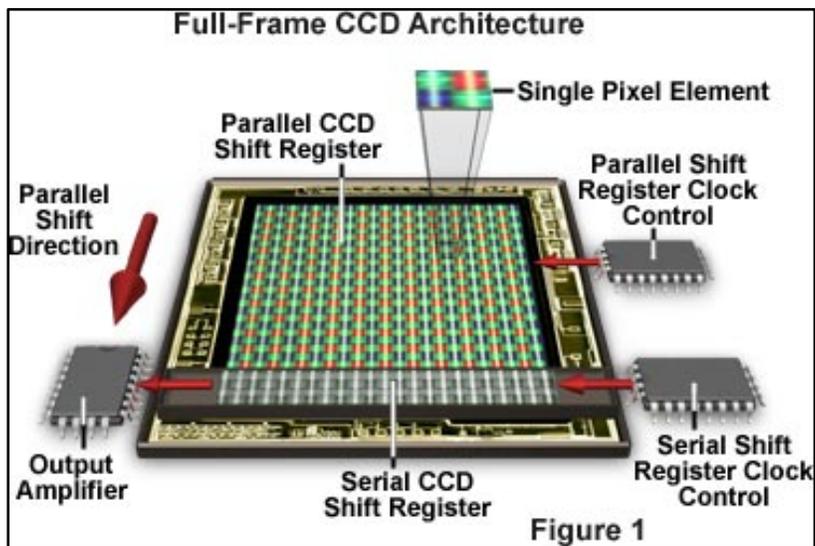


f/22

光圈大小引起清晰度与景深的矛盾



固有的缺陷



离散化采样引起的信息丢失



都是光学系统中要优化的问题



科研相关

基于上述各种光路/系统开展

- 远距离合成孔径超分辨成像（望远）
- 孔径编码像素超分辨成像（像素离散化）
- 智能计算光学显微成像（显微光路）
- 结构光投影快速三维成像（投影光路）
- 等等...

详见

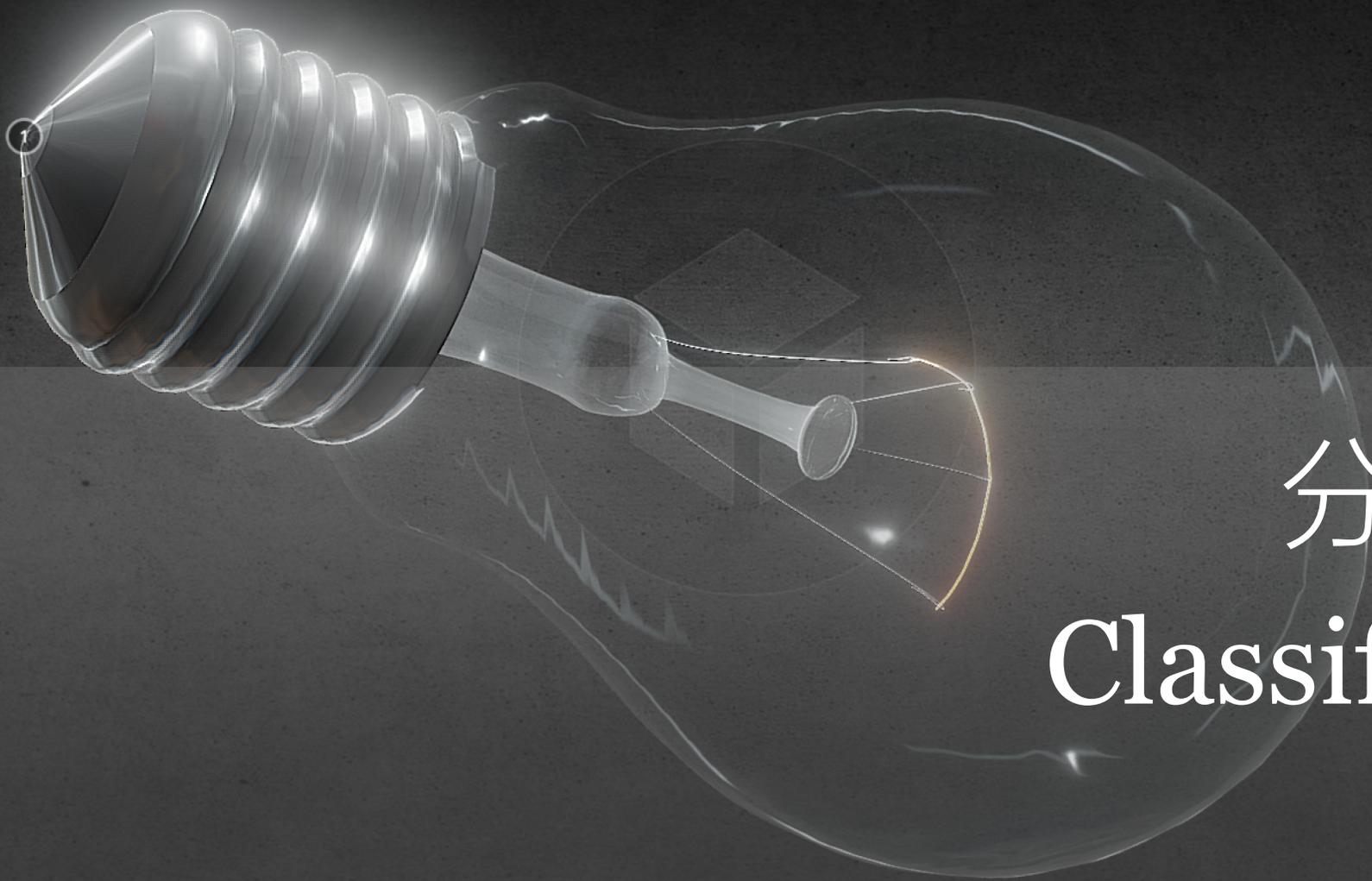
<https://scilaboratory.com/res.html>





主要内容：

1. 光学成像系统概述
2. 光源概述
 - 激光
 - LED光源
3. 成像光路概述
 - 相机镜头
 - 投影光路
4. 探测器及其工作原理



分类

Classification

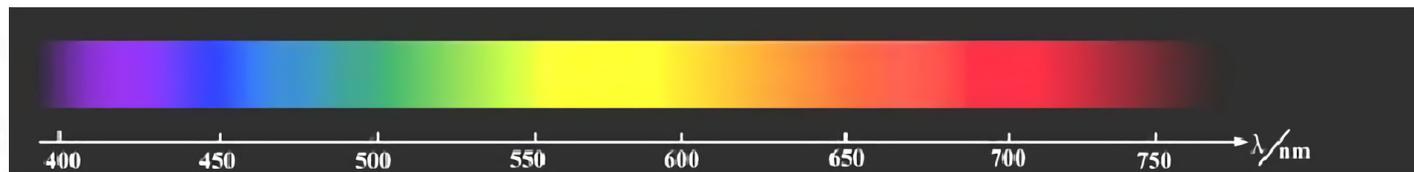
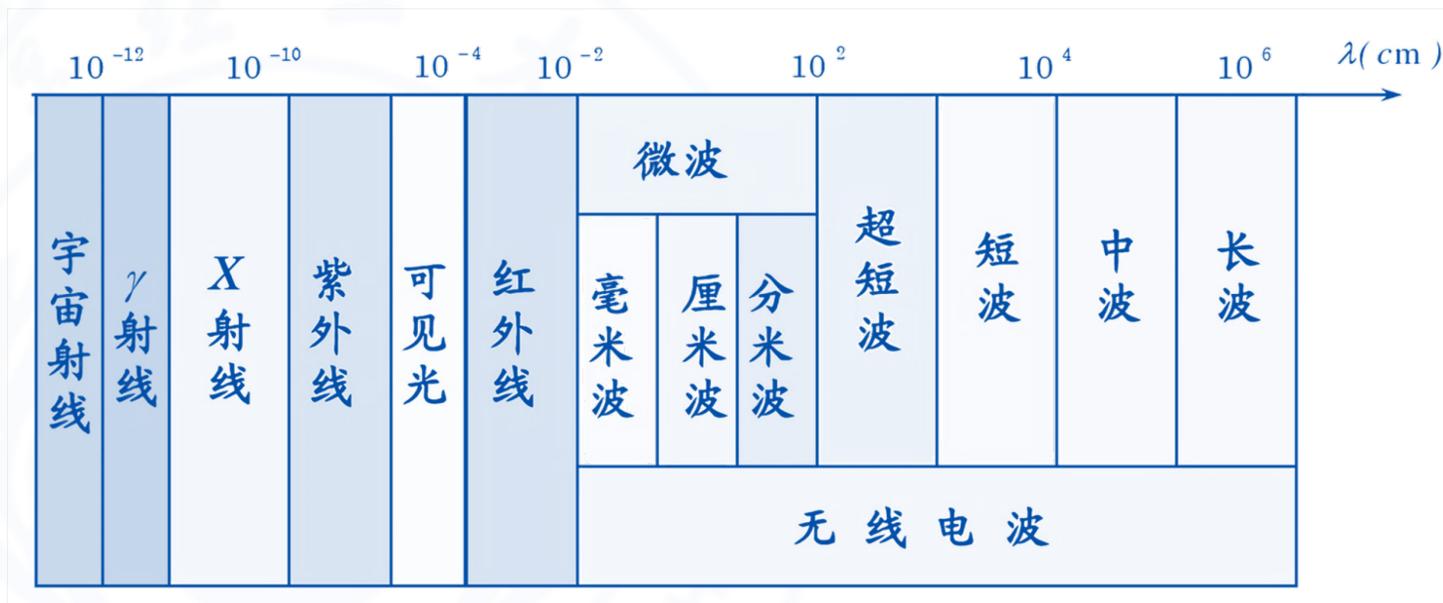


1. 分类 Classification

基于光学波段分类

- 可见光区 380~780 nm
- 红外光 >780 nm
- 紫外光 1~380 nm
- X射线 0.001~0.1 nm
- 其他波段

电磁波谱



可见光



1. 分类 Classification

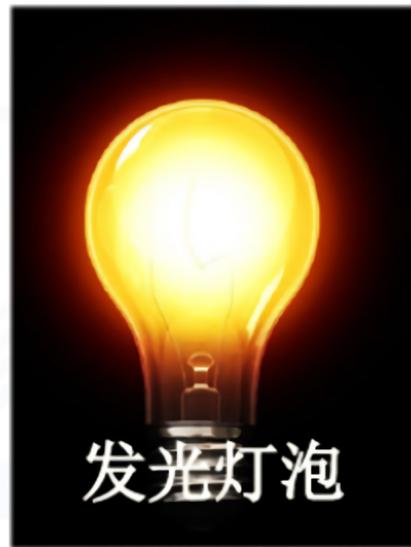
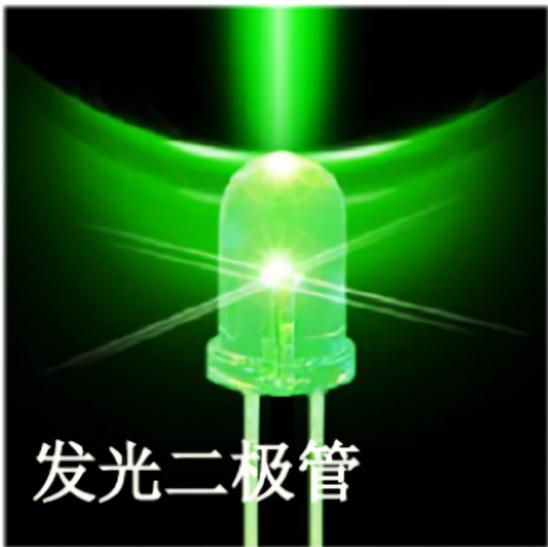
- 自然光源





1. 分类 Classification

- 人造光源





产生
Produce



2. 产生 Produce

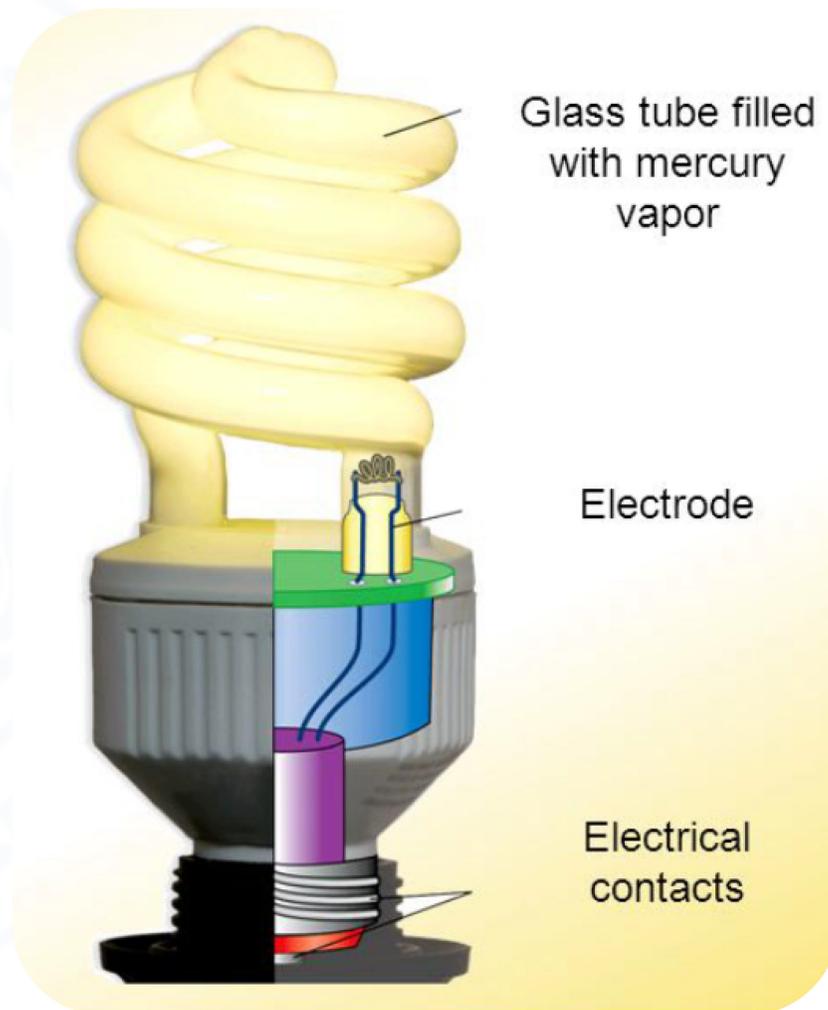
白炽灯（ Incandescent Lamp, Incandescent light bulb ）是将灯丝通电加热到白炽状态，利用热辐射发出可见光的电光源。





2. 产生 Produce

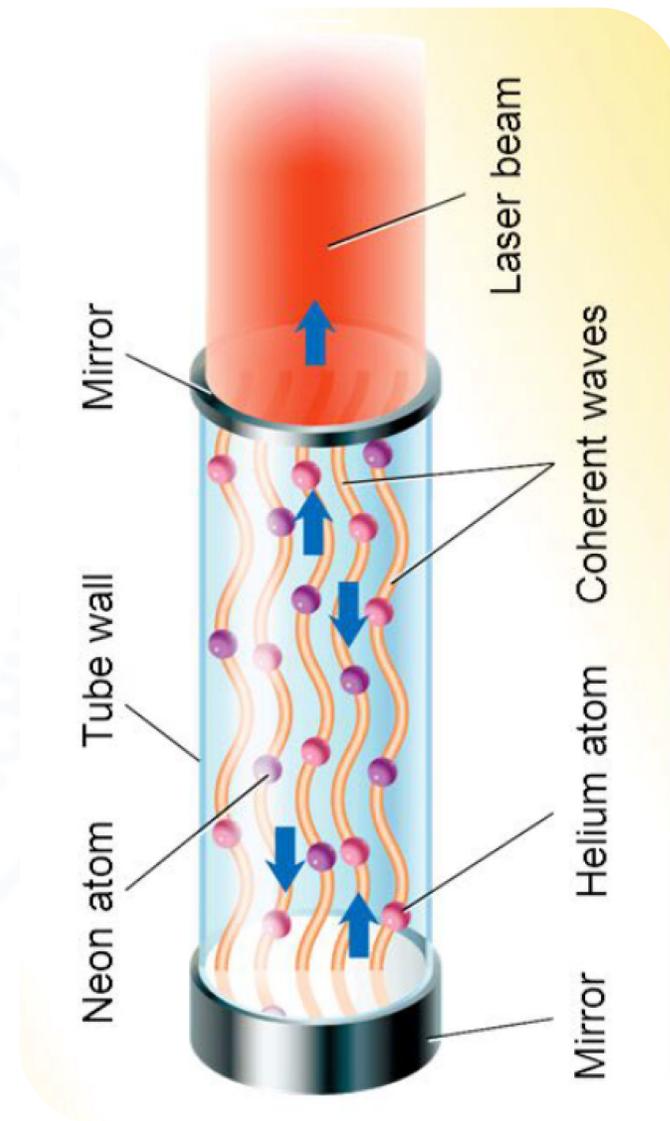
传统型荧光灯（Fluorescent lamp）即低压汞灯，是利用低气压的汞蒸气在通电后释放紫外线，从而使荧光粉发出可见光的原理发光，因此它属于低气压弧光放电光源。





2. 产生 Produce

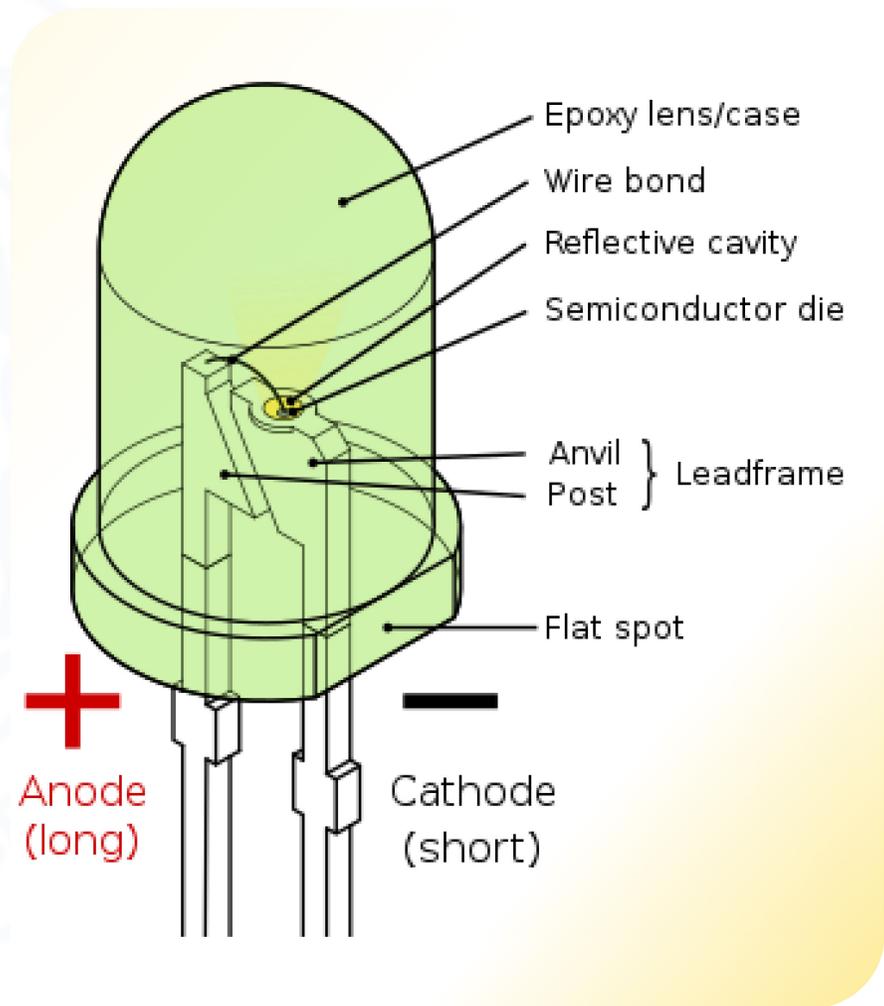
- 激光（Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER）是由于原子中的电子吸收能量后从低能级跃迁到高能级，再从高能级回落到低能级的时候，所释放的能量以光子的形式放出。被激发出的光子束光学特性高度一致。
- 激光相比普通光源单色性、方向性好，亮度更高。

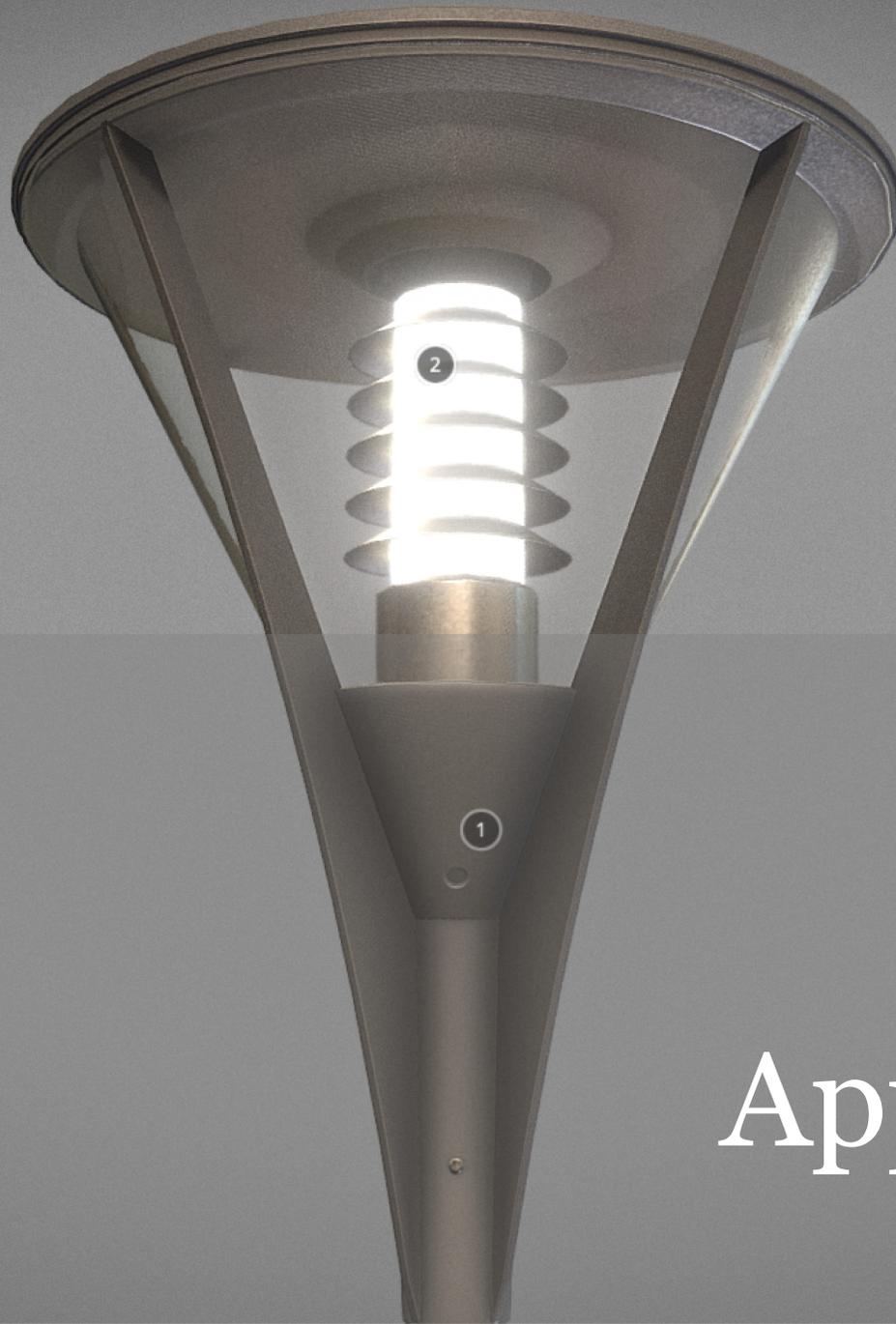




2. 产生 Produce

- **LED** (Light-Emitting Diode) 是基于当电子与空穴复合时能辐射出可见光的原理。砷化镓二极管发红光，磷化镓二极管发绿光，碳化硅二极管发黄光，氮化镓二极管发蓝光。
- 基于化学性质分类：有机发光二极管OLED，无机发光二极管LED。

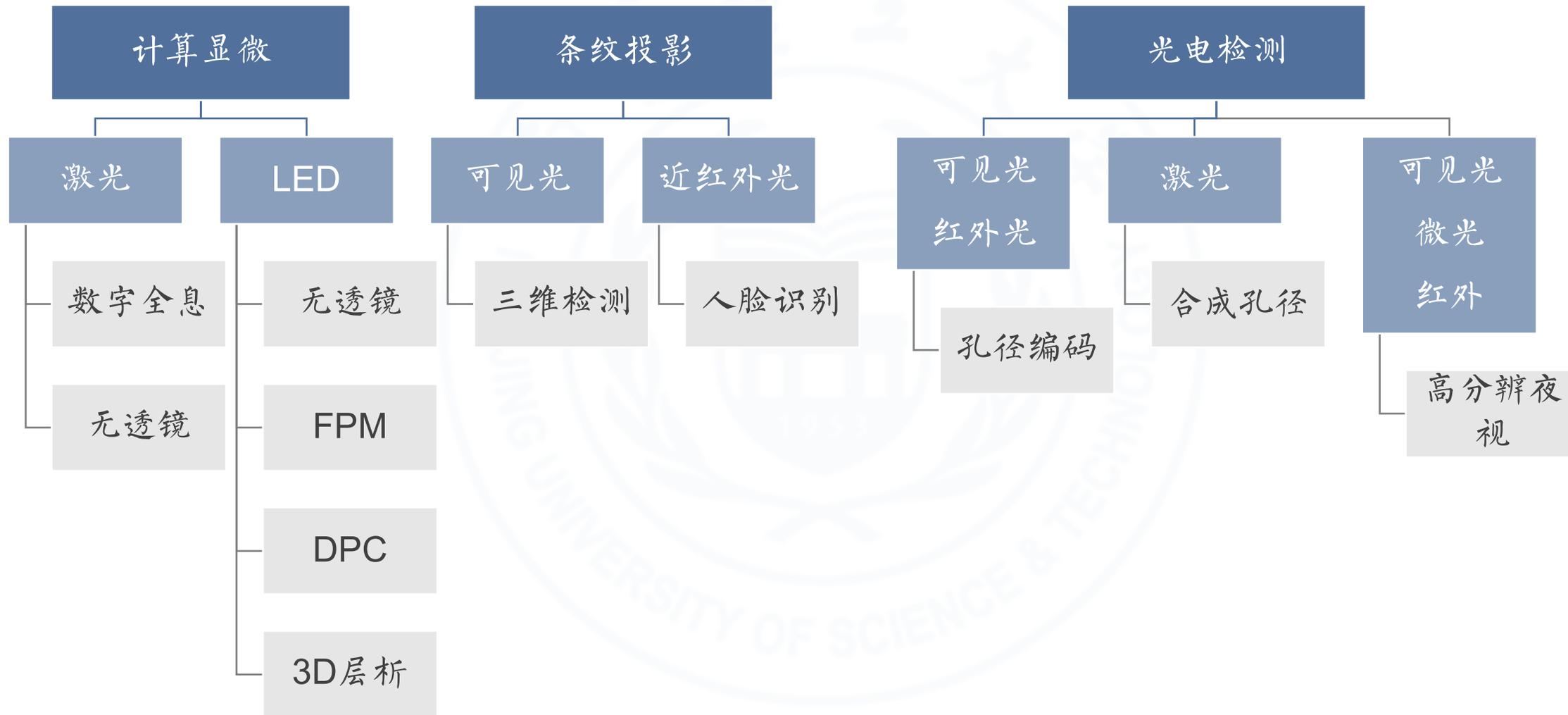




应用
Application

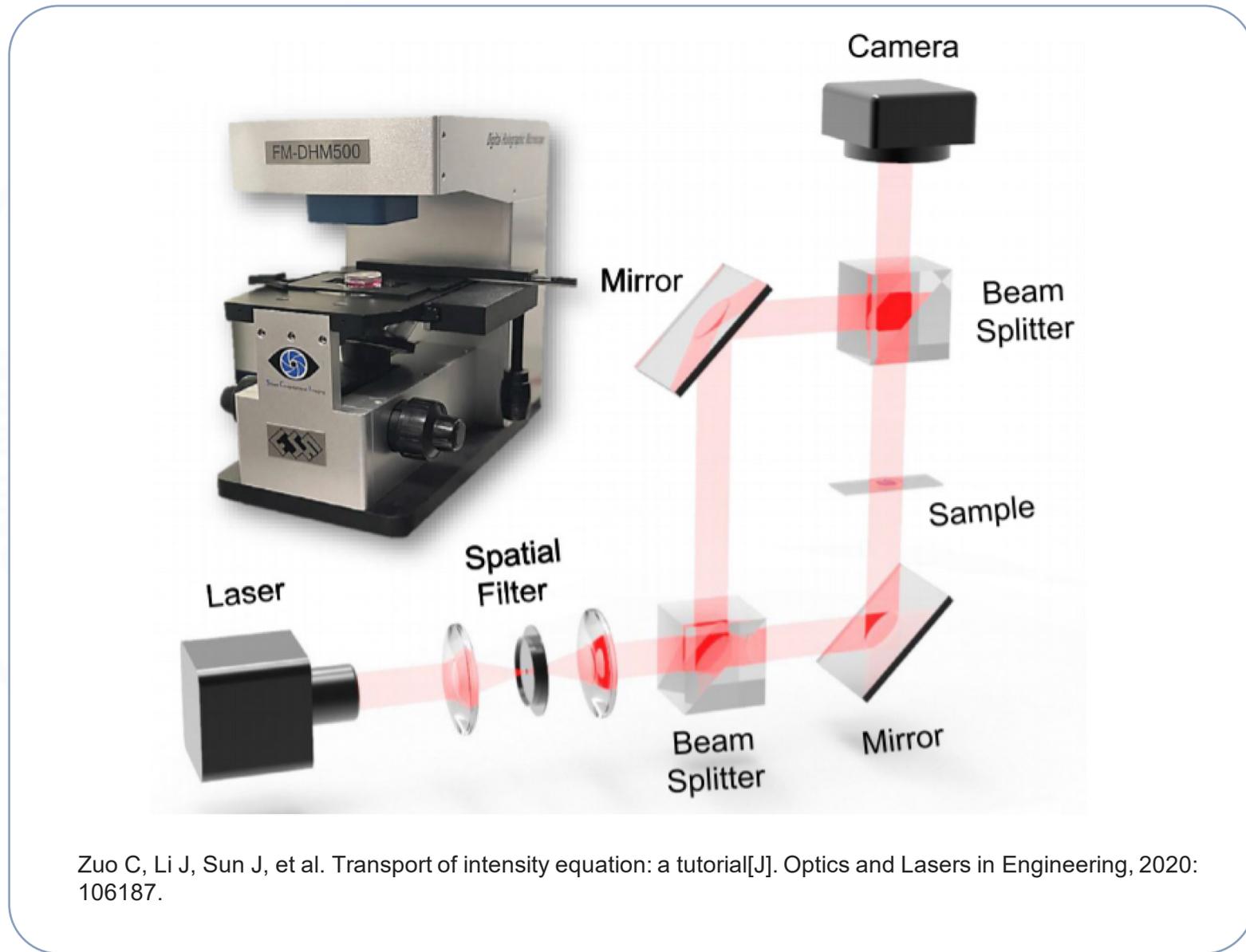
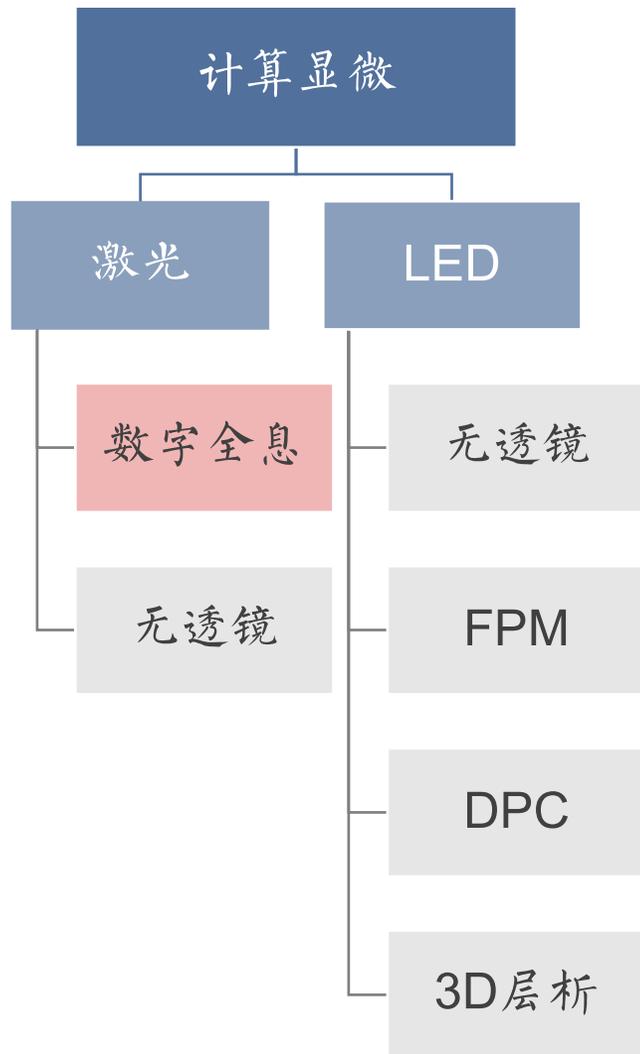


3. 应用 Application





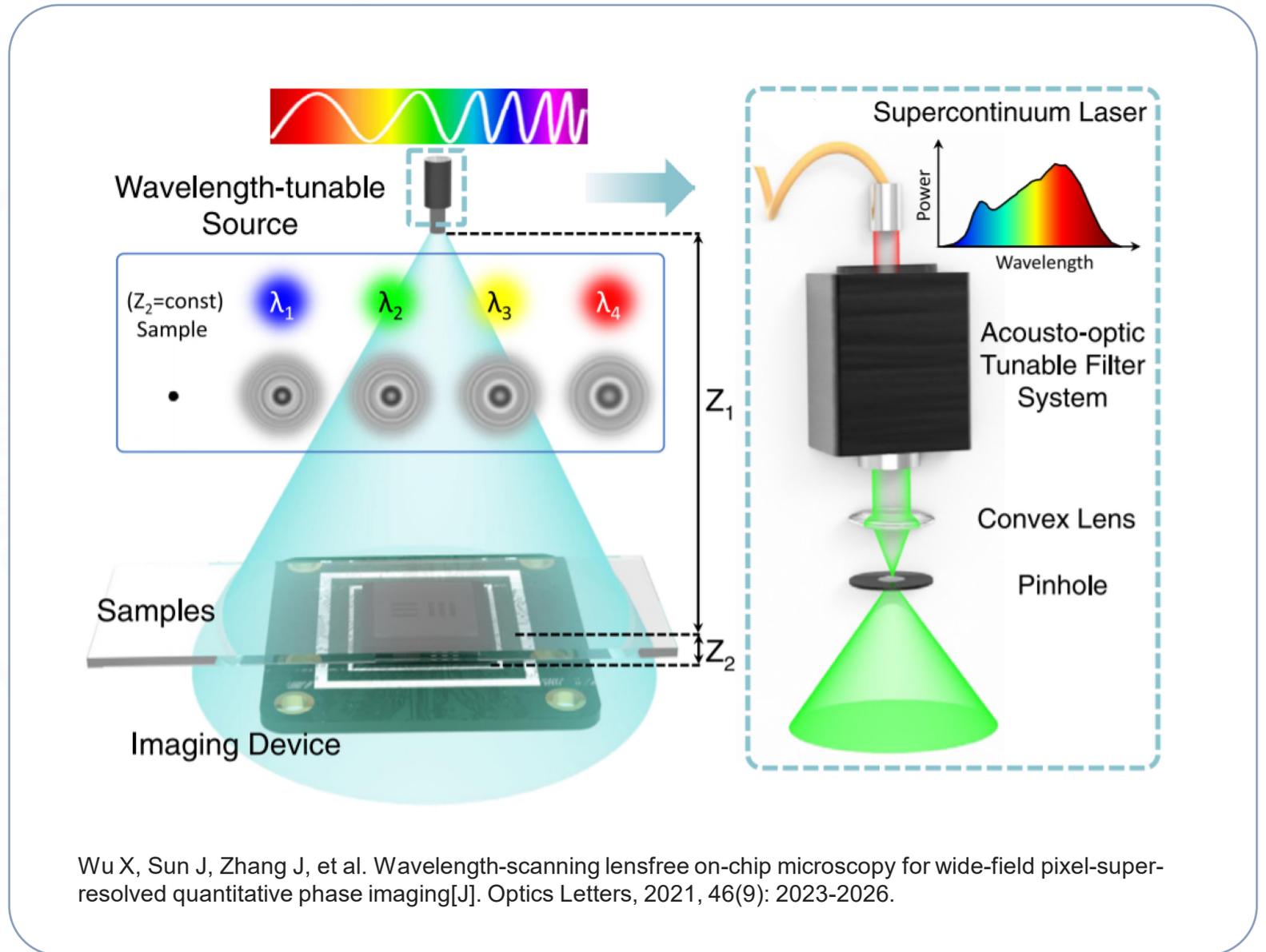
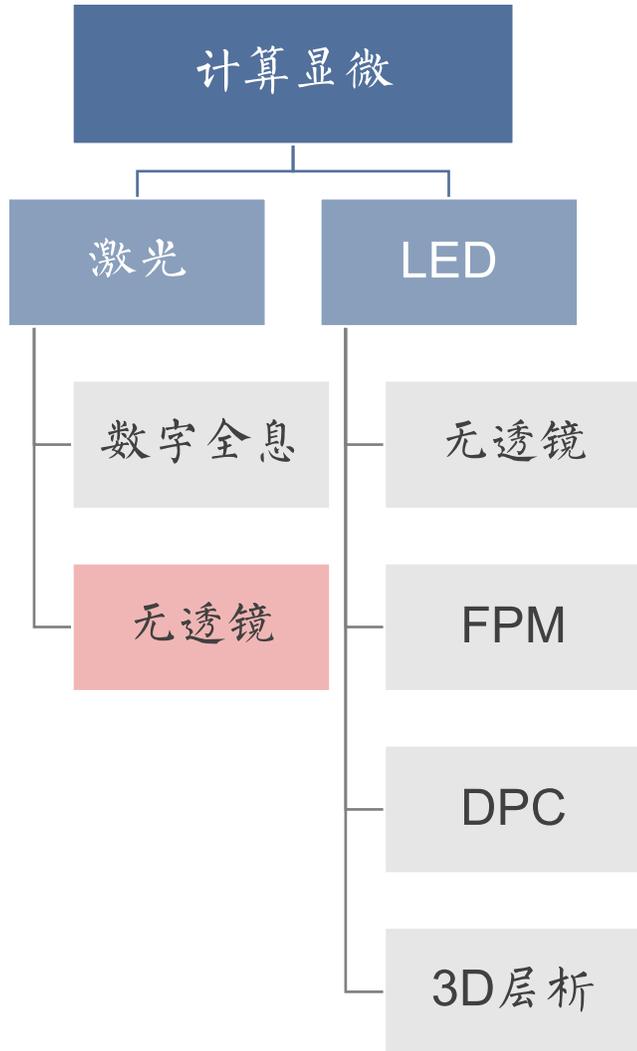
3. 应用 Application



Zuo C, Li J, Sun J, et al. Transport of intensity equation: a tutorial[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020: 106187.

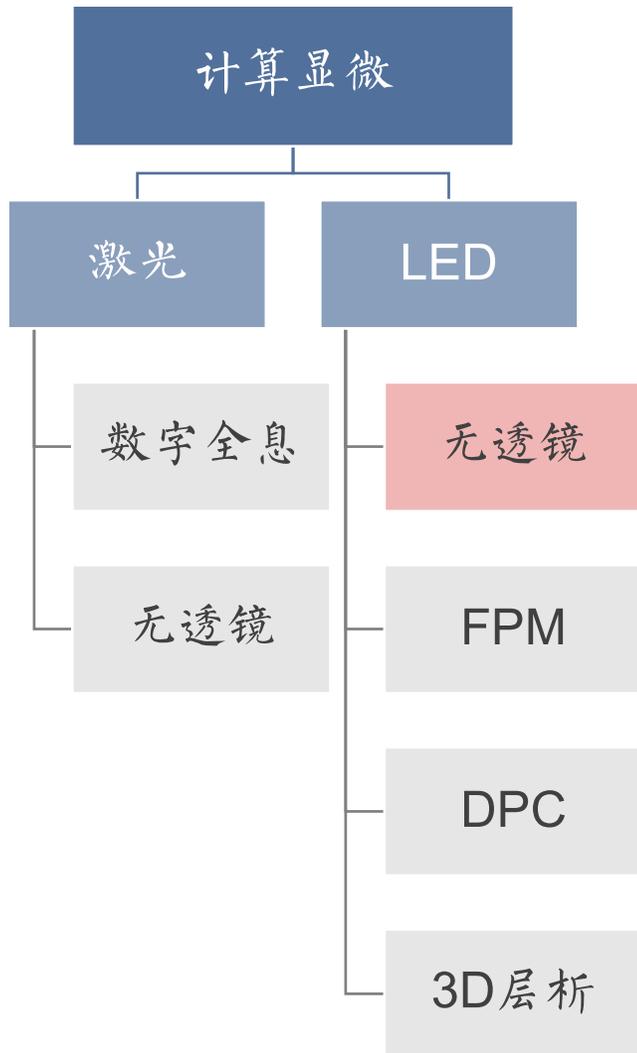


3. 应用 Application





3. 应用 Application

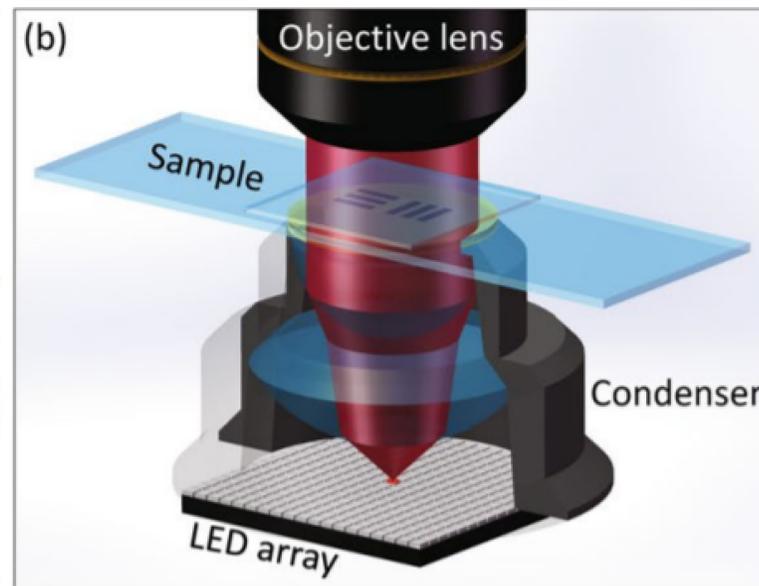
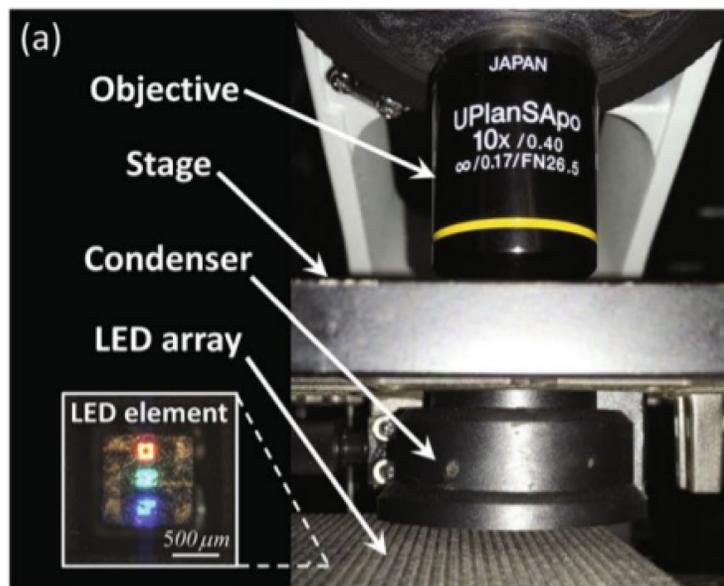
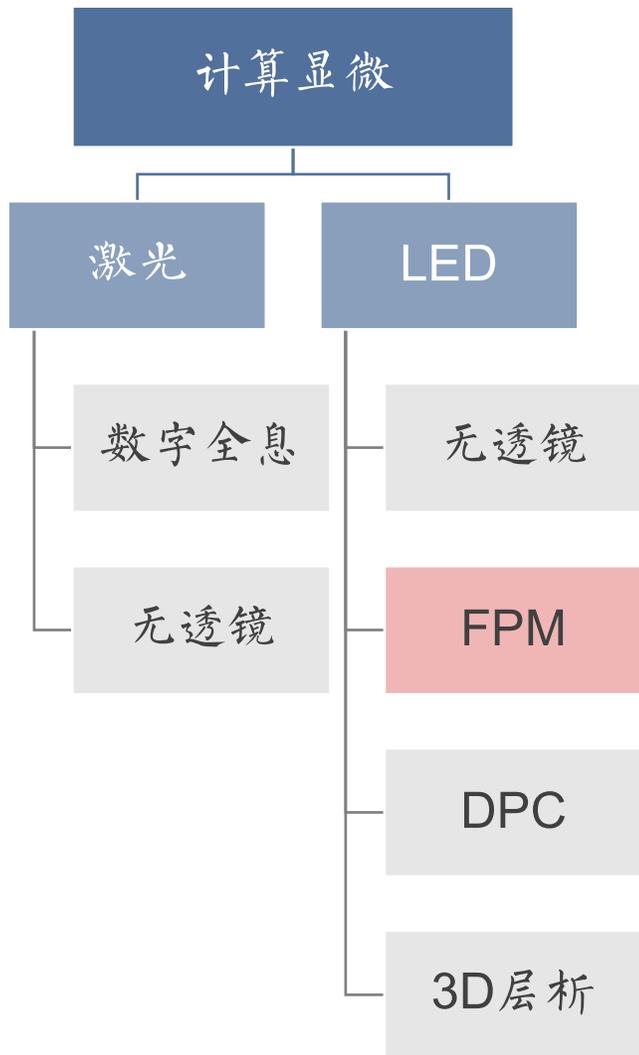


The diagram illustrates the optical setup for lensless phase microscopy. It shows a **CMOS Sensor** positioned at a distance L from an **RGB LED Matrix**. A **Sample** is placed between them at a distance dz from the LED matrix. The condition $L \gg dz$ is noted. A **Common Anode RGB LED** sub-diagram shows red, green, and blue LEDs with current directions I_r , I_g , and I_b . A photograph of the **Packaged system** includes labels for the **CMOS Sensor**, **USB cable**, **RGB LED Matrix**, **Micro-controller**, and **Sample Tray**. A coin is shown for scale.

Zuo C, Sun J, Zhang J, et al. Lensless phase microscopy and diffraction tomography with multi-angle and multi-wavelength illuminations using a LED matrix[J]. Optics express, 2015, 23(11): 14314-14328.



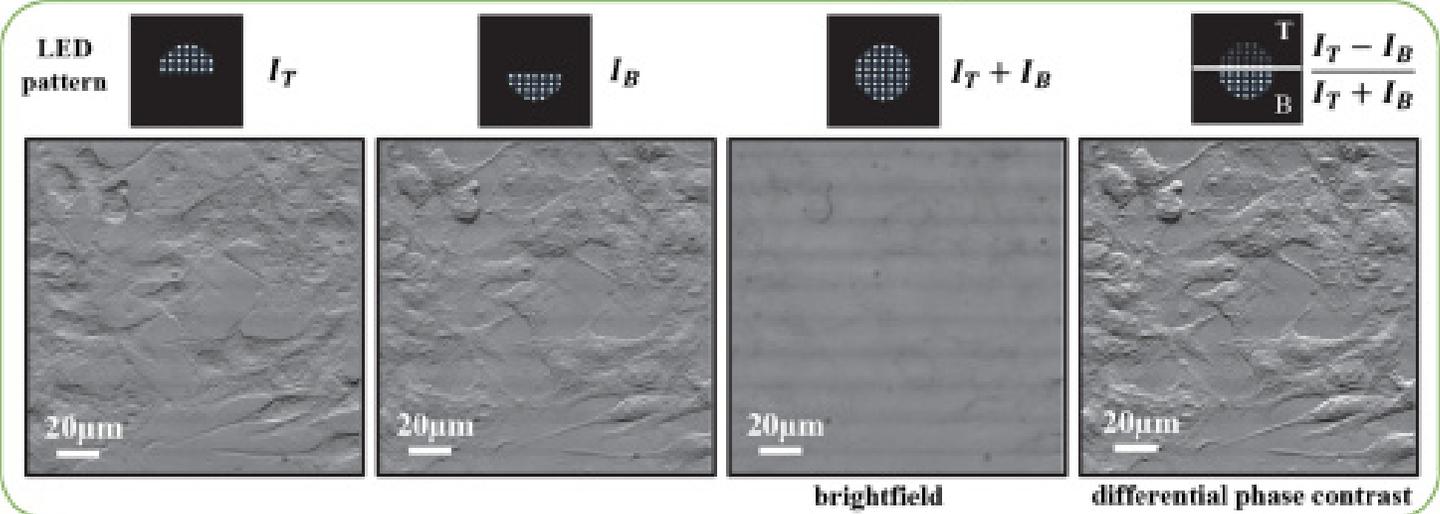
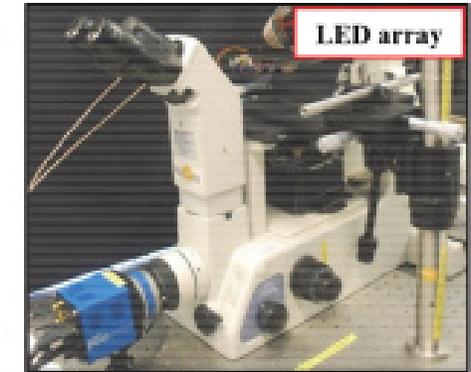
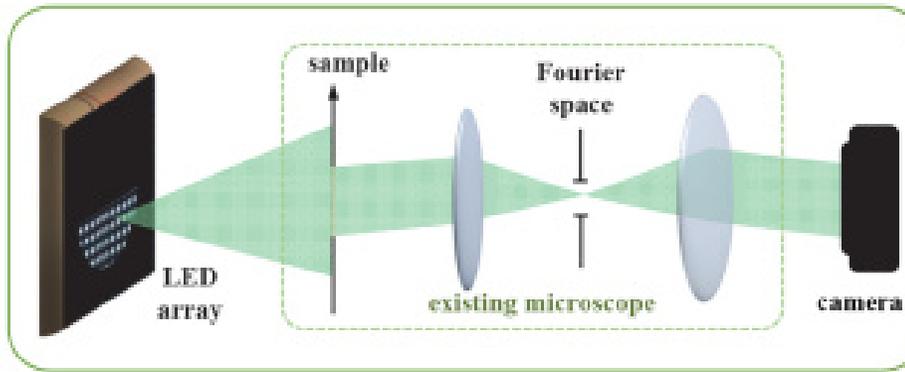
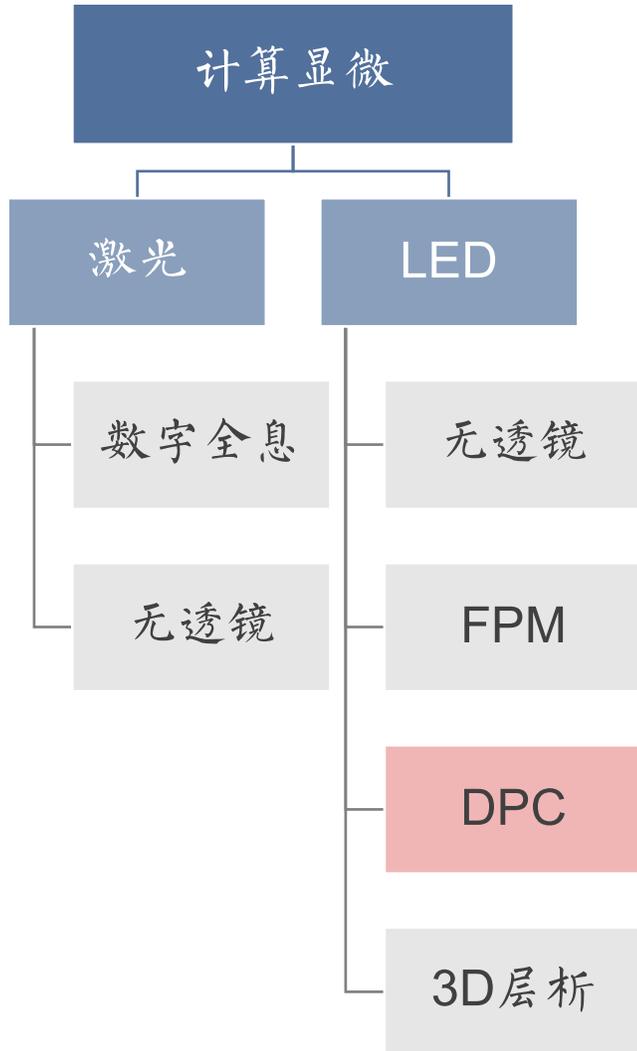
3. 应用 Application



Sun J, Zuo C, Zhang L, et al. Resolution-enhanced Fourier ptychographic microscopy based on high-numerical-aperture illuminations[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 1-11.



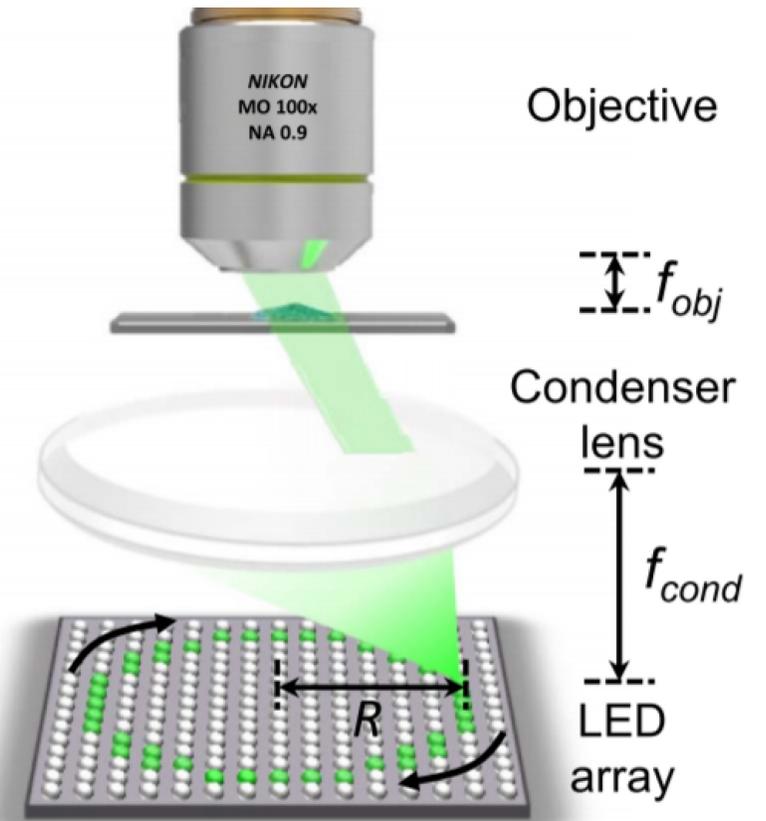
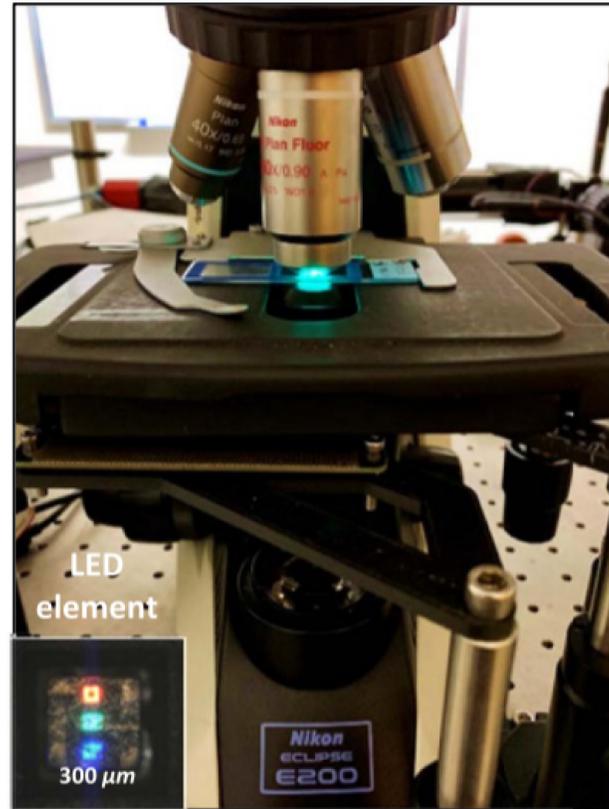
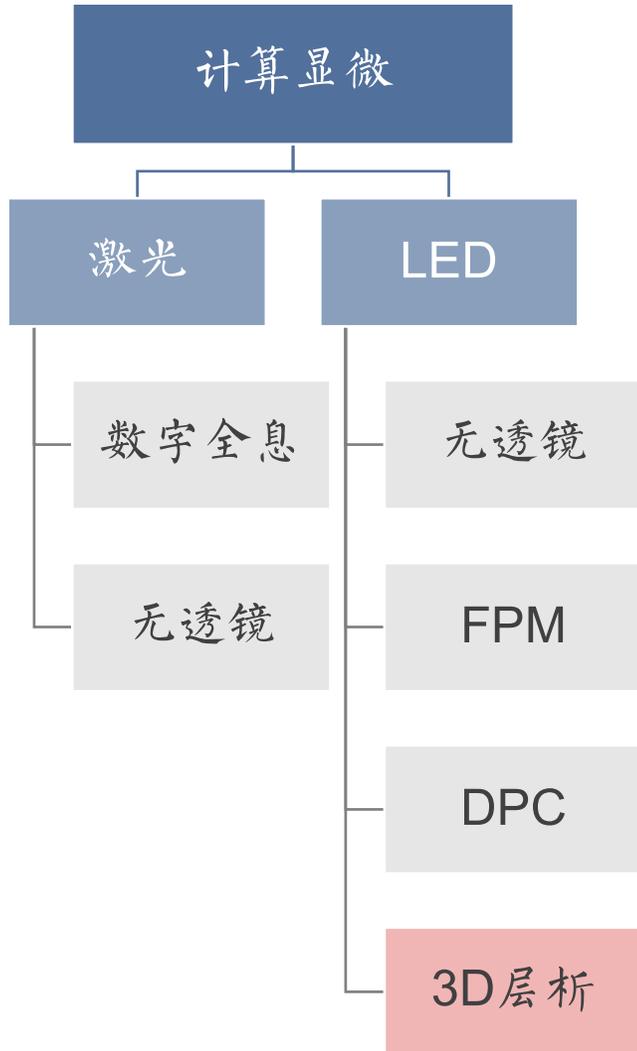
3. 应用 Application



Tian L, Waller L. Quantitative differential phase contrast imaging in an LED array microscope[J]. Optics express, 2015, 23(9): 11394-11403.



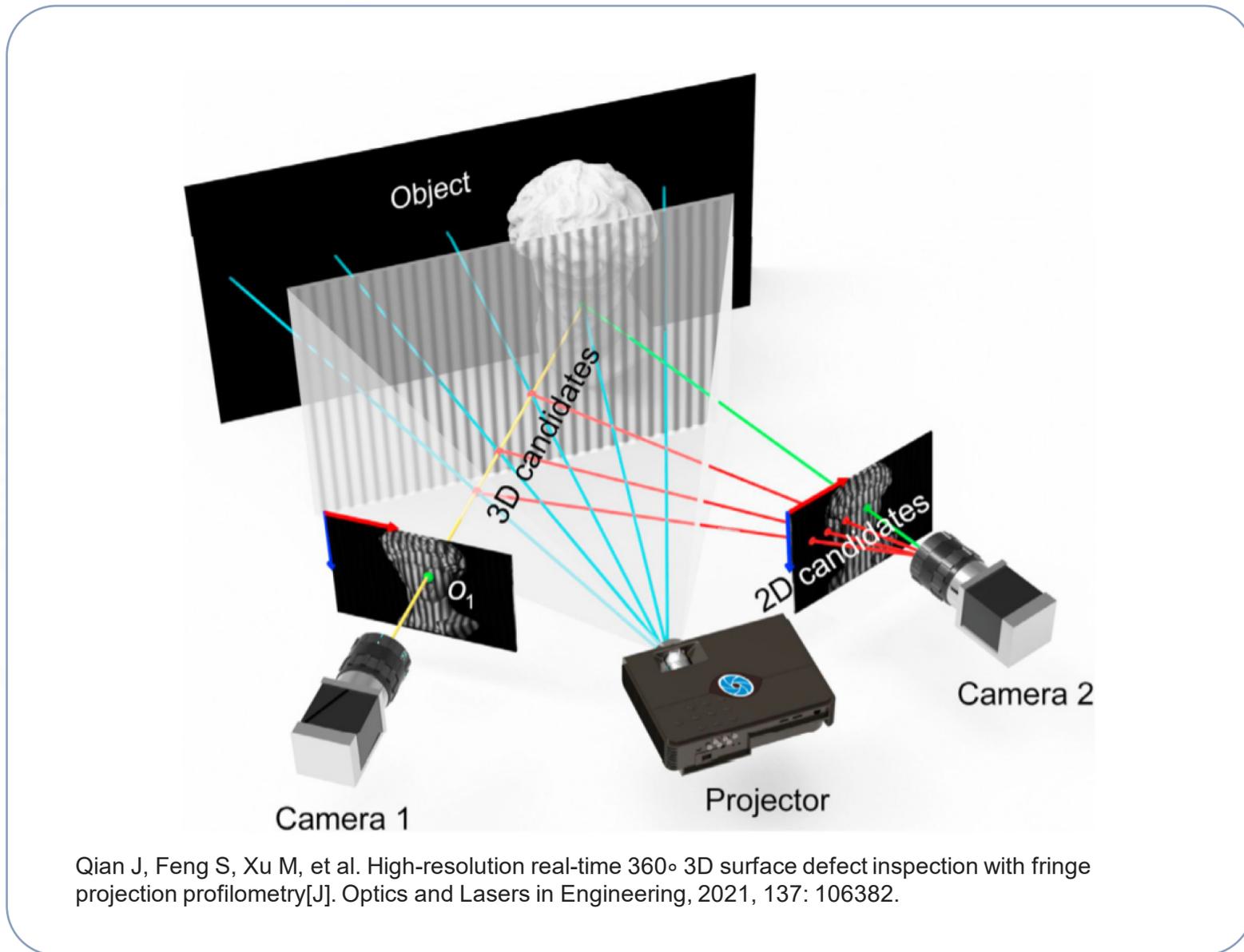
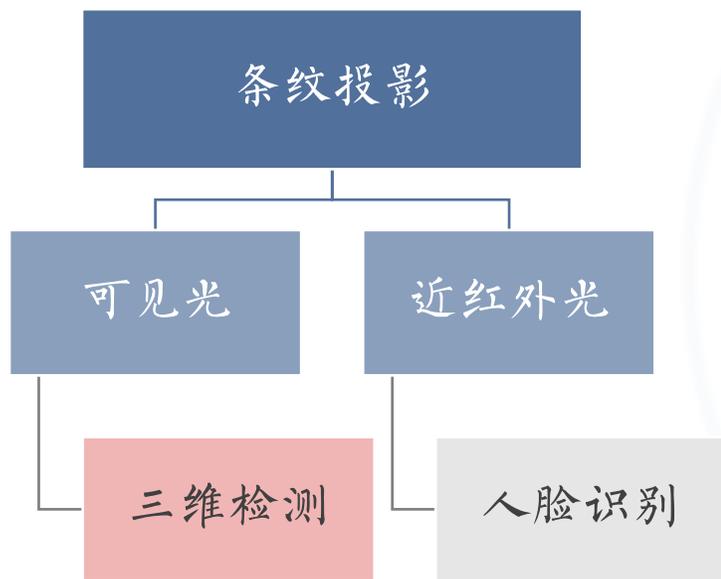
3. 应用 Application



Li J, Matlock A, Li Y, et al. Resolution-enhanced intensity diffraction tomography in high numerical aperture label-free microscopy[J]. Photonics Research, 2020, 8(12): 1818-1826.



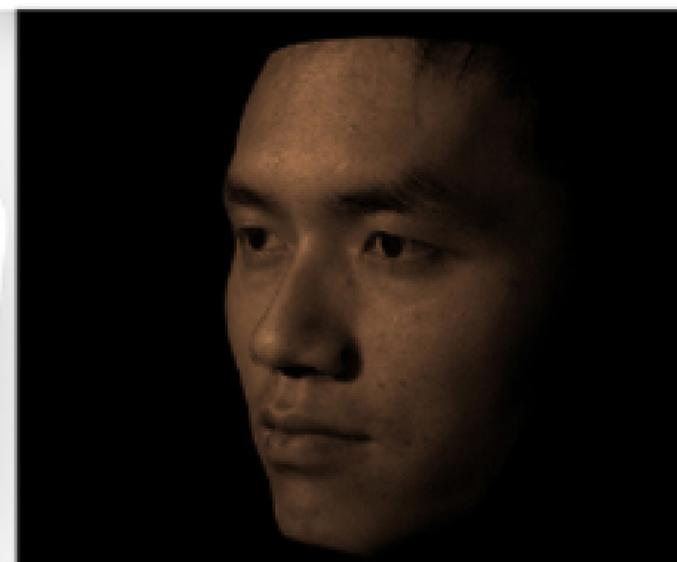
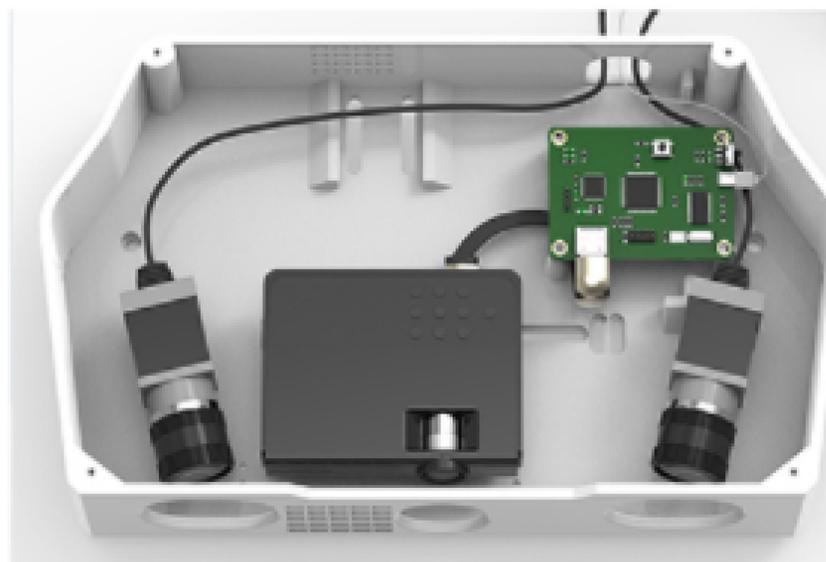
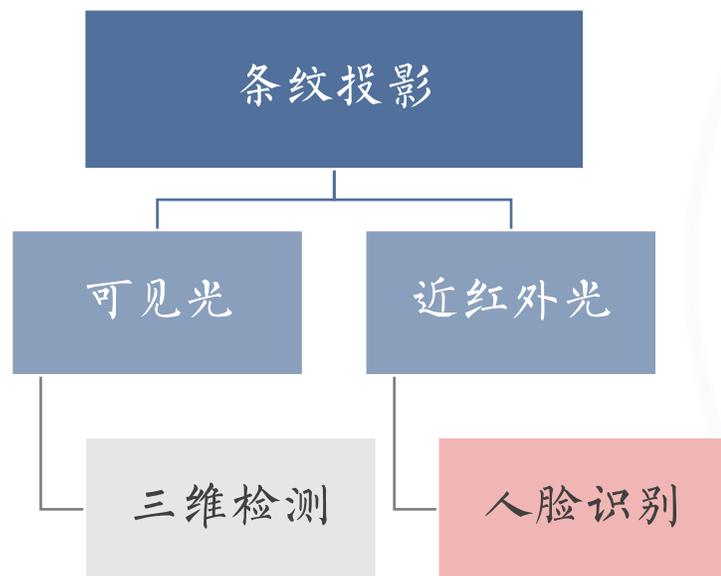
3. 应用 Application



Qian J, Feng S, Xu M, et al. High-resolution real-time 360° 3D surface defect inspection with fringe projection profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 137: 106382.



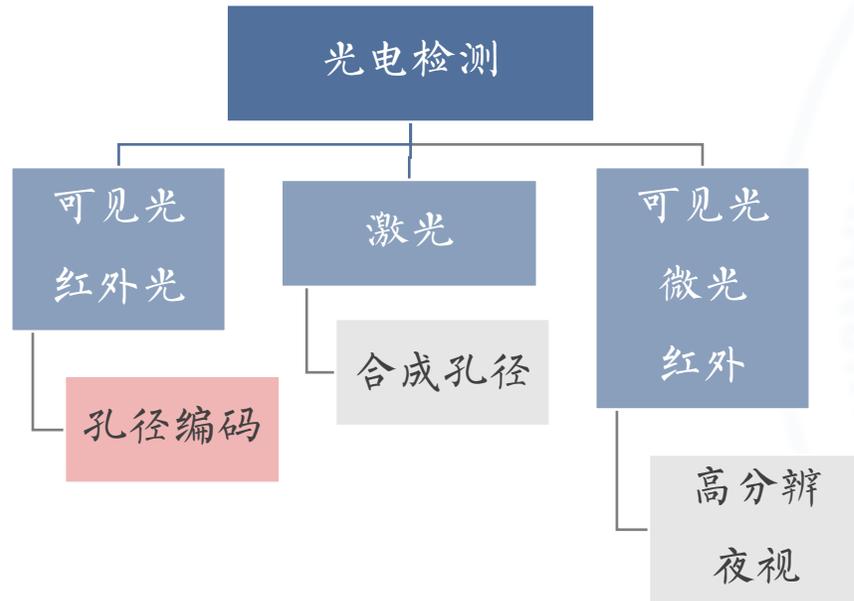
3. 应用 Application



<https://scilaboratory.com/res.html>



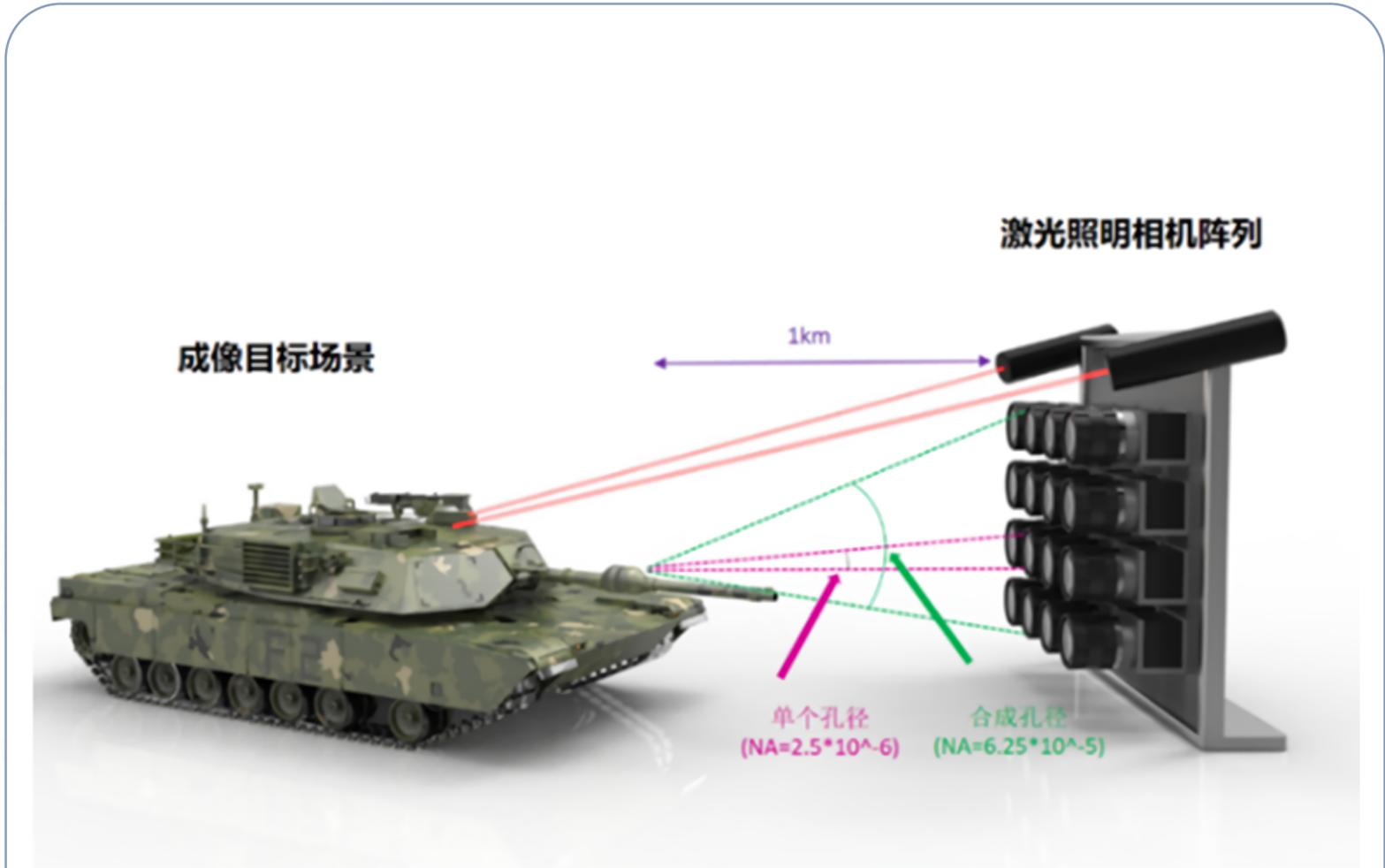
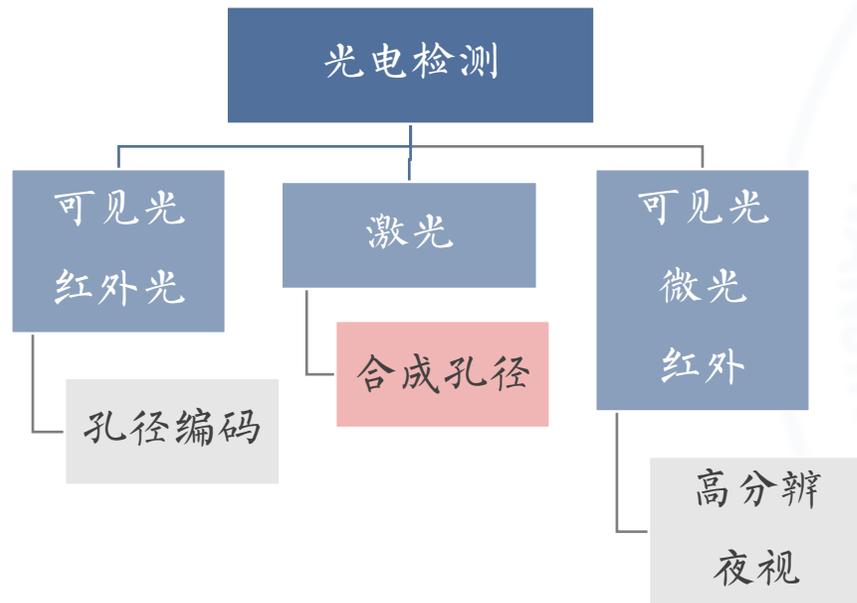
3. 应用 Application



<https://scilaboratory.com/res.html>



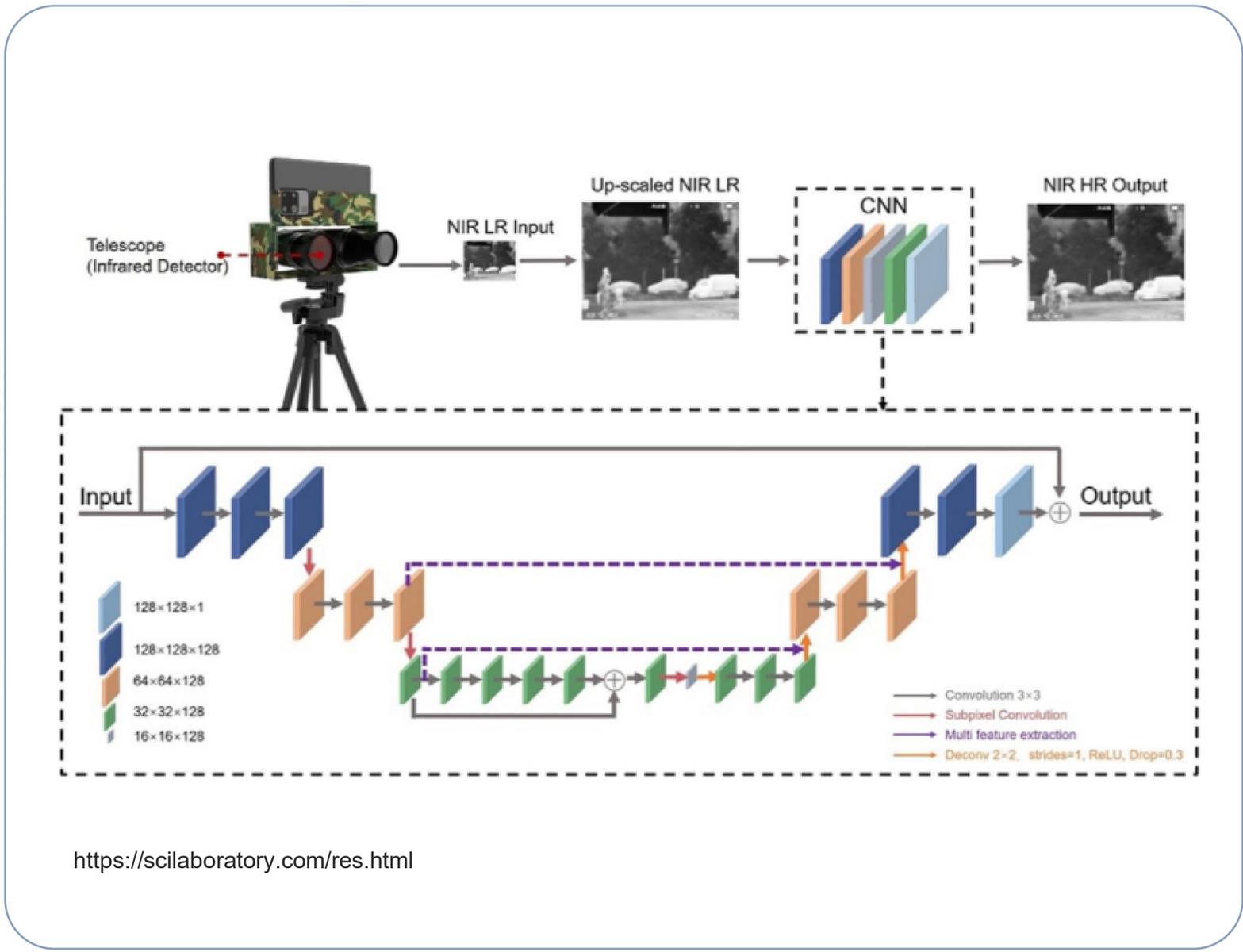
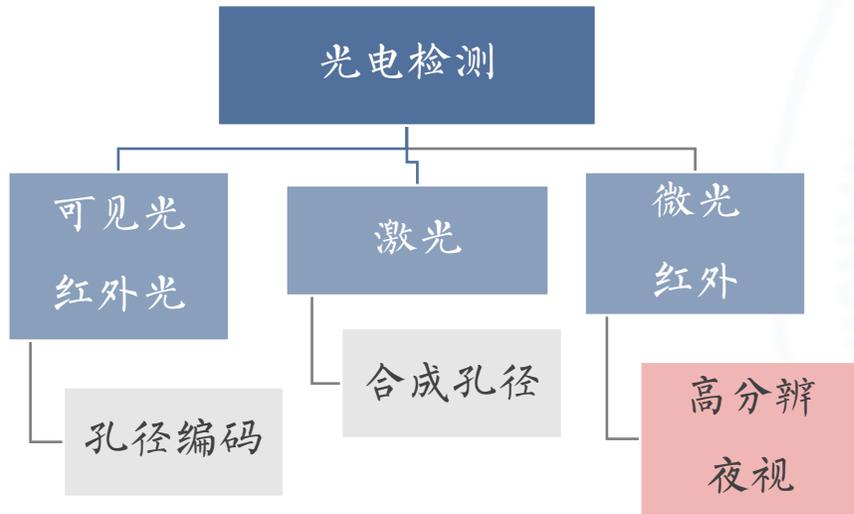
3. 应用 Application



<https://scilaboratory.com/res.html>



3. 应用 Application



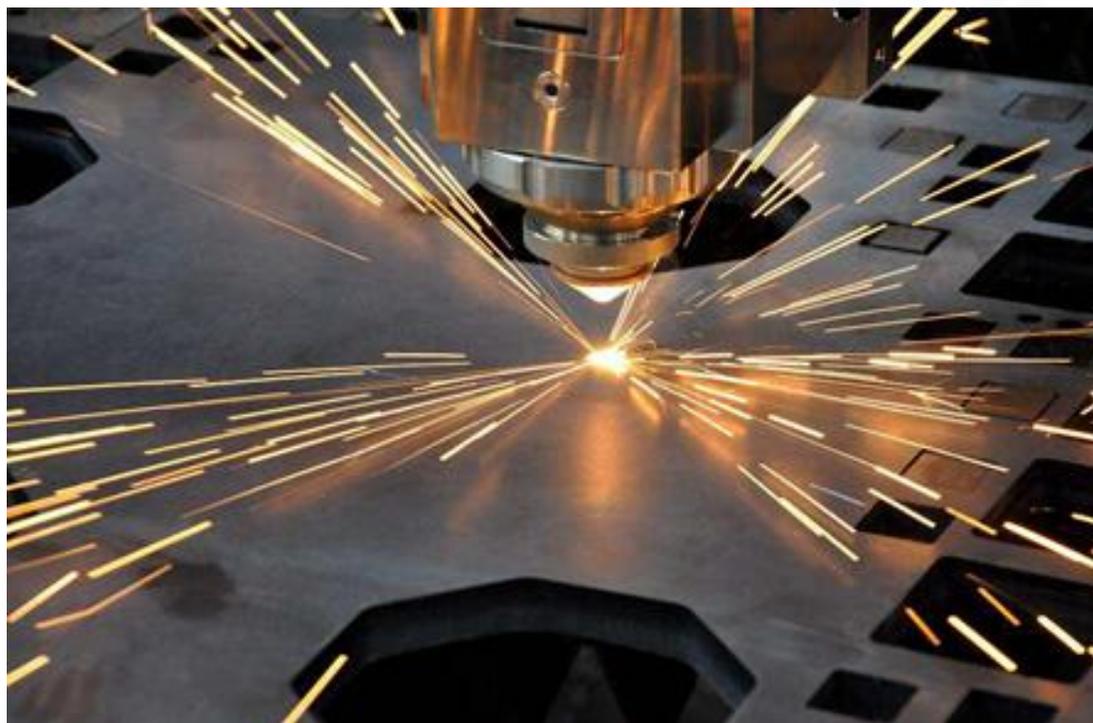


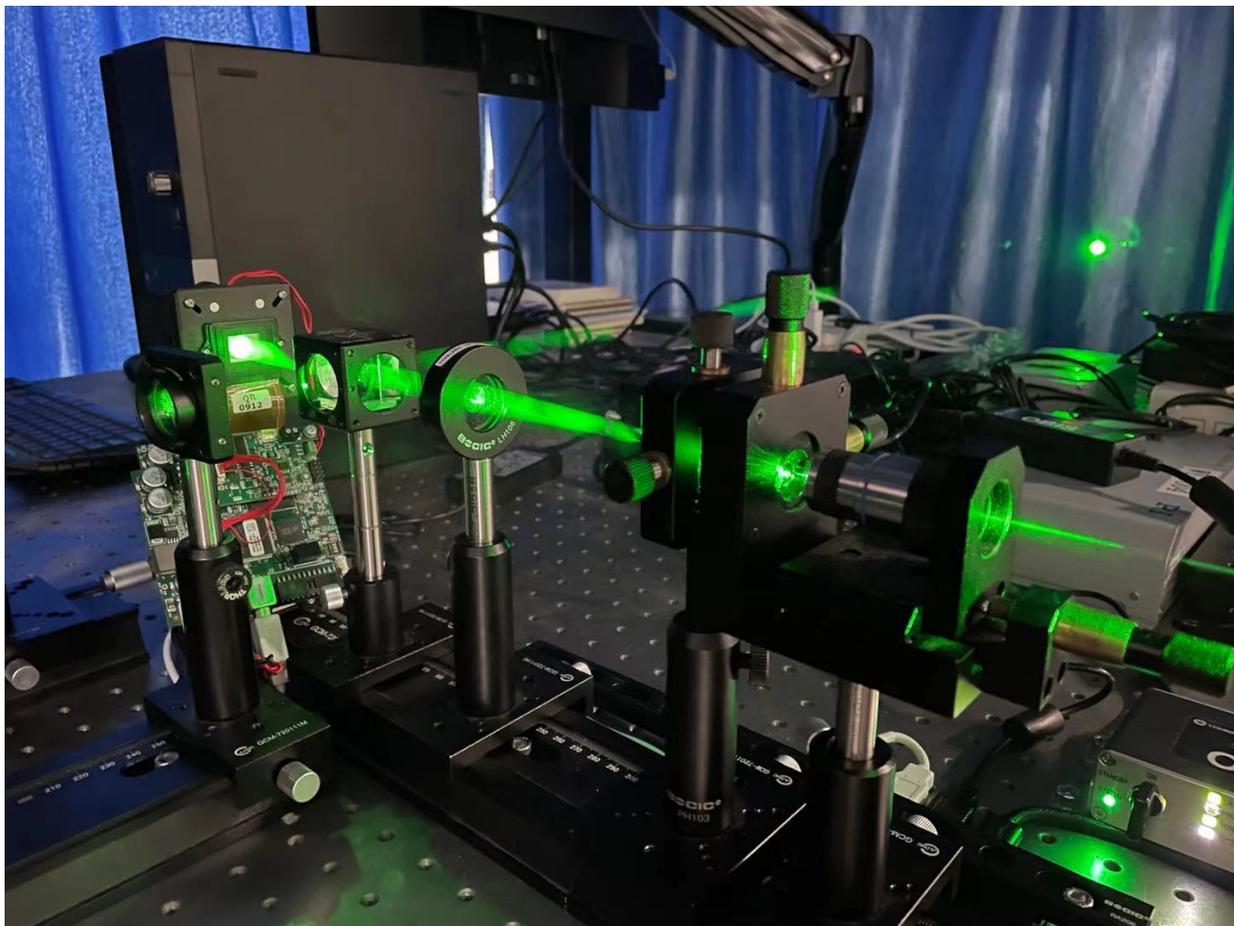
主要内容：

1. 光学成像系统概述
2. 光源概述
 - 激光
 - LED光源
3. 成像光路概述
 - 相机镜头
 - 投影光路
4. 探测器及其工作原理

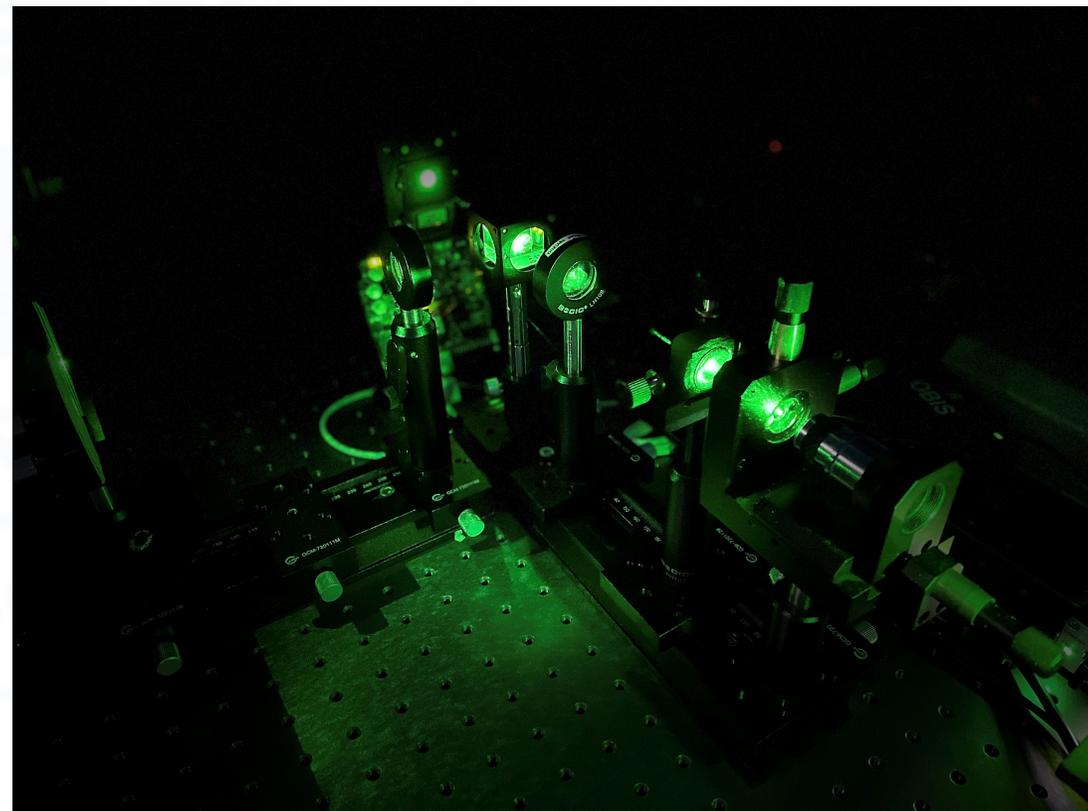


工业





科 研





教 学

医 美

舞 台 效 果



为什么激光能做到这些呢？

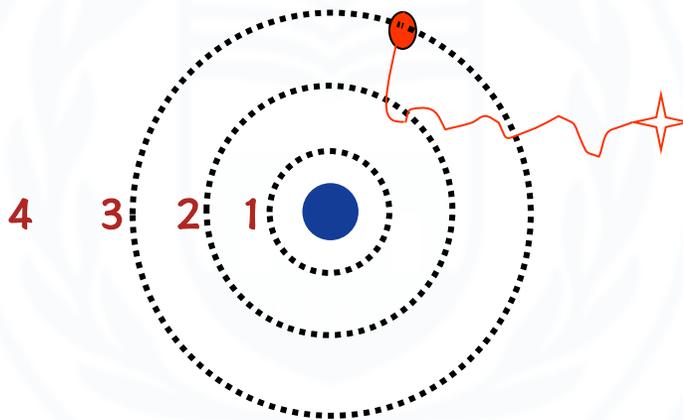


• 激光的产生

激光的英文名称——Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

受激辐射的光放大



基态：正常状态下，原子处于最低能级，这时电子在离核最近的轨道上运动。

激发态：除基态以外的能量较高的其他能级，叫做激发态。

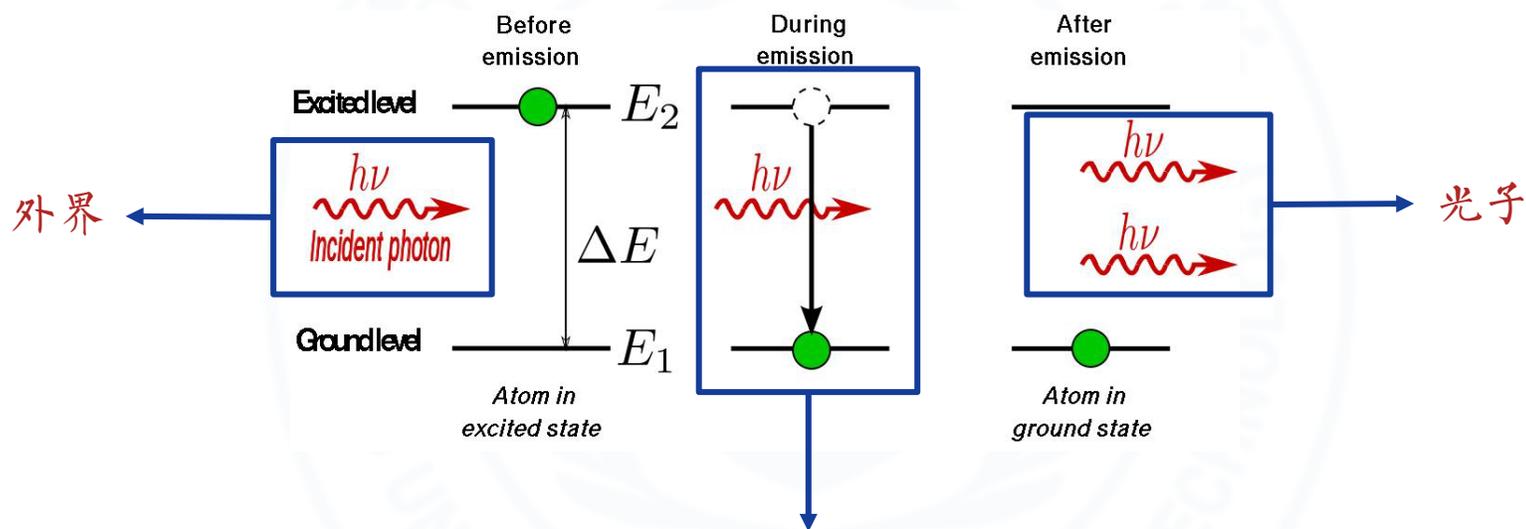
原子发光现象：原子从较高能级向较低能级跃迁时，能量以光子的形式辐射出去。



• 激光的产生

这种在受激辐射过程中产生并被放大的光就是激光。

受激辐射：处于高能级 E_2 的粒子在外界辐射场作用下，向低能级 E_1 跃迁，发射与外来光子能量相同的光子。



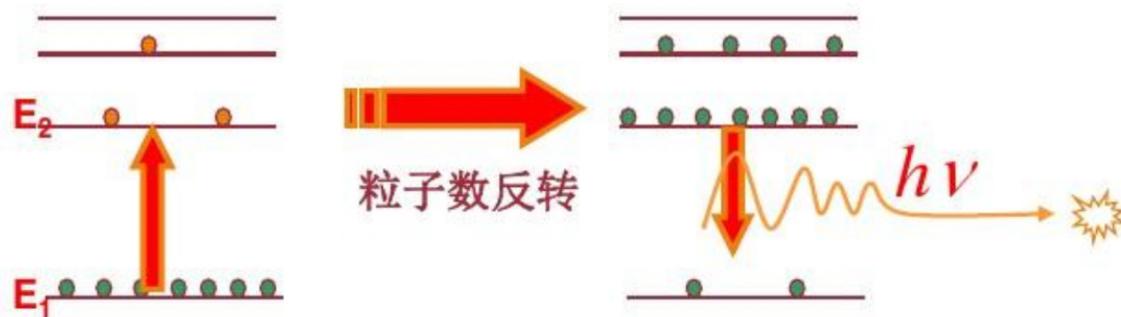
电子从一个能级到另一个能级

光放大：大量粒子处在高能级 E_2 。当一个光子入射，激励 E_2 上的粒子产生受激辐射，得到两个光子。这两个光子再激励 E_2 能级上粒子，又使其产生受激辐射，得到四个光子。这时原来的光就被放大了。



• 激光的产生

- 泵浦源：提供初始能量
- 工作物质：将初始能量变成激光



- 谐振腔：将激光放大并且输出

THE LASER

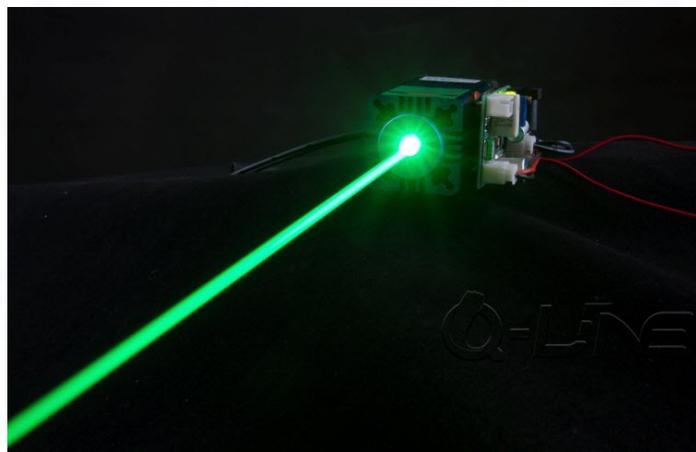
激光的产生



- 激光的性质

- 方向性

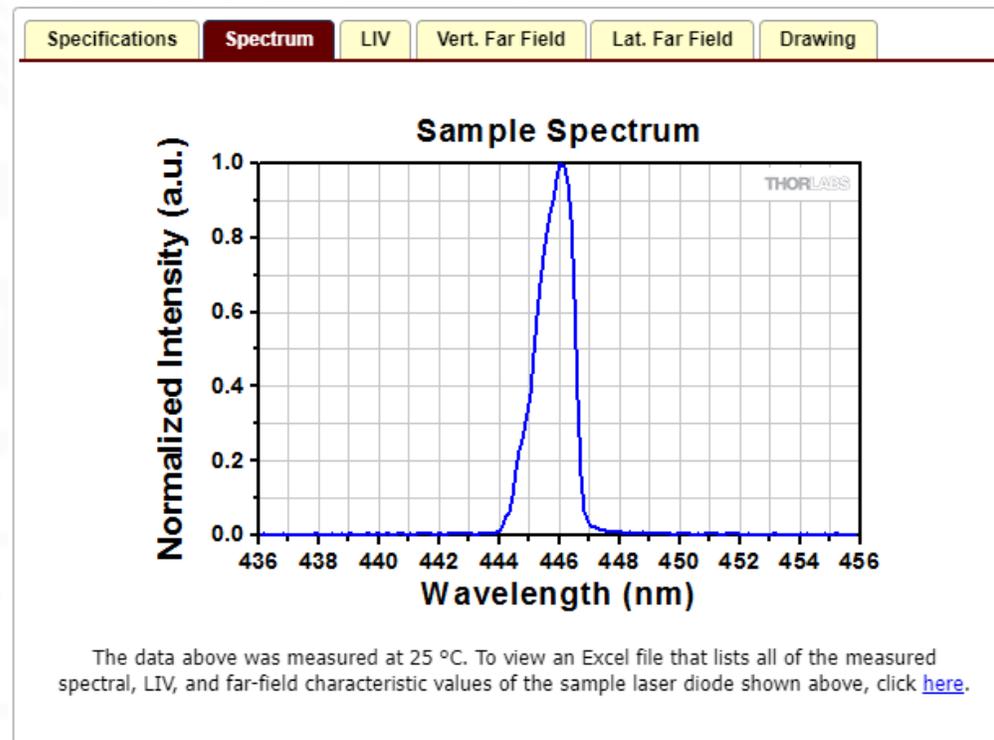
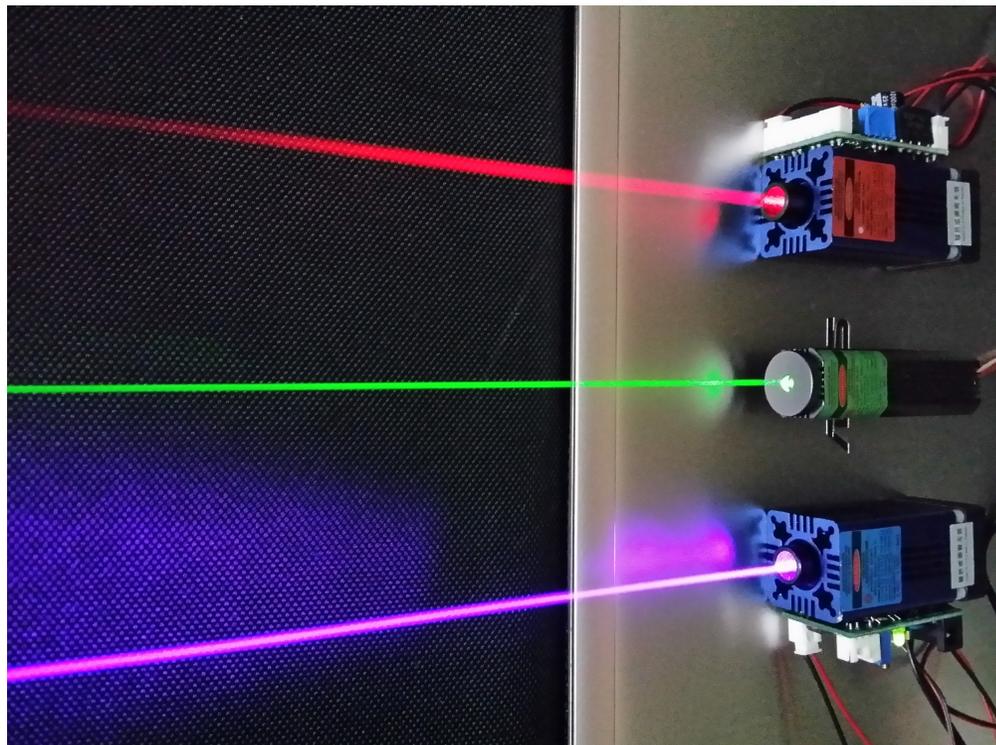
激光的方向性，我们一般用光束发散角来定义，而激光的空间相干性和方向性是紧密关联的。当光束发散角小于一定的程度，光束才会具有一定的空间相干性。





- 激光的性质
 - 单色性

光子能量公式
 $E=hf=h/\lambda$



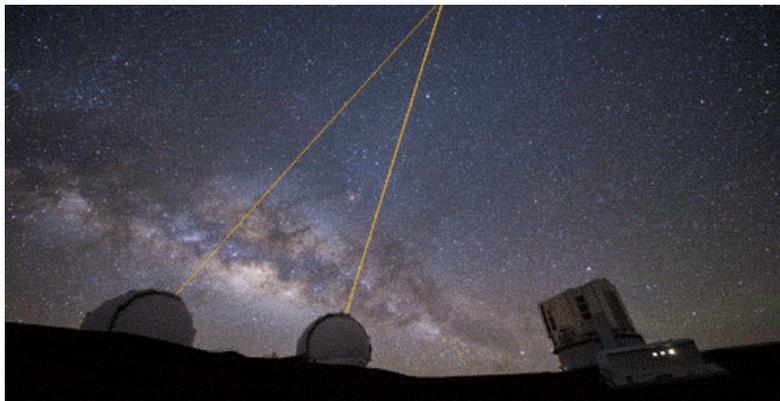


• 激光的性质

• 高亮度（能量集中）

激光的方向性、单色性好等特点，决定了它具有极高的单色定向亮度。

一支功率仅为1毫瓦的氦氖激光器的亮度，比太阳约高100倍；一台巨型脉冲的固体激光器的亮度可以比太阳表面亮度高 10^{10} 倍，即100亿倍。





• 激光的应用

• 缺点

1. 激光的多模式结构的特性使得激光器不同模式间的能量不均匀，光束质量低；
2. 激光在传播过程中，其沿光束截面的能量并不是均匀分布的而是成高斯分布，这使得照明并不均匀，使得被照明物体图像曝光不均匀，导致图像边界难以分辨；
3. 当用激光照射一般物体时，经物体表面向空间散射出的光束之间存在光程差而发生干涉，产生呈颗粒状无规则分布的噪声，该噪声称为散斑噪声。
4. 成本高昂。



主要内容：

1. 光学成像系统概述
2. 光源概述
 - 激光
 - **LED光源**
3. 成像光路概述
 - 相机镜头
 - 投影光路
4. 探测器及其工作原理

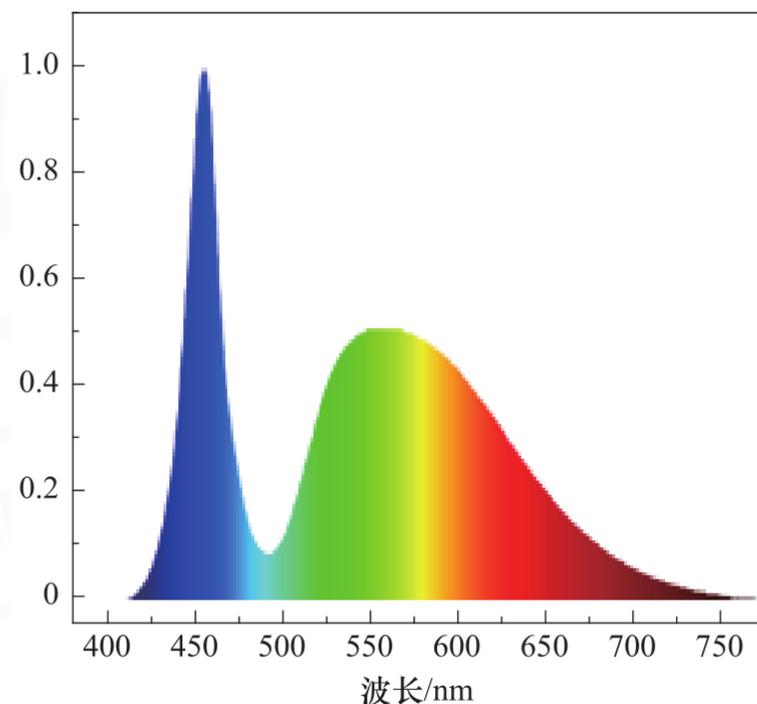
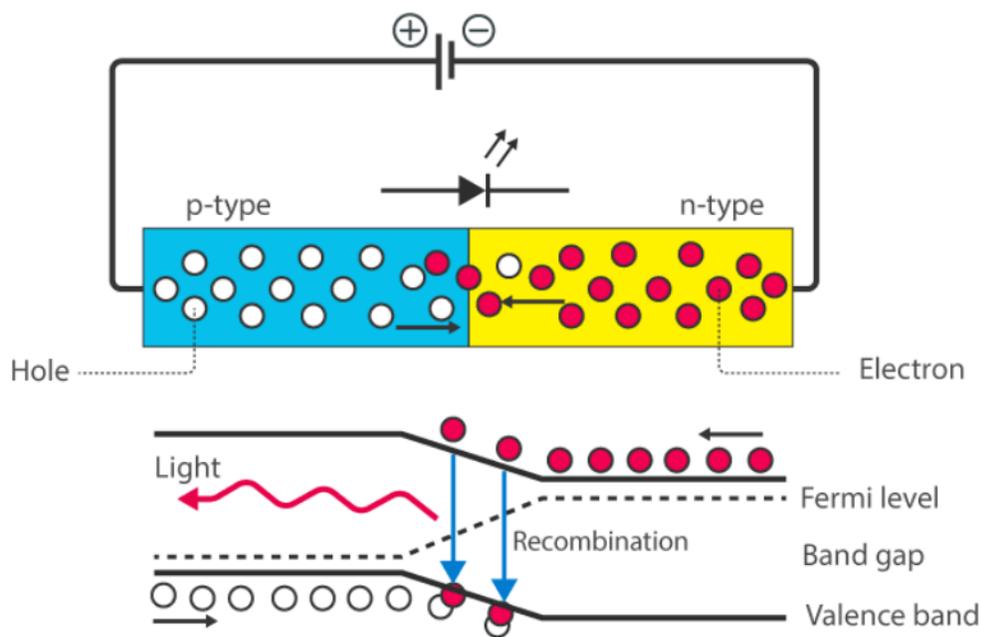




1. LED发光原理

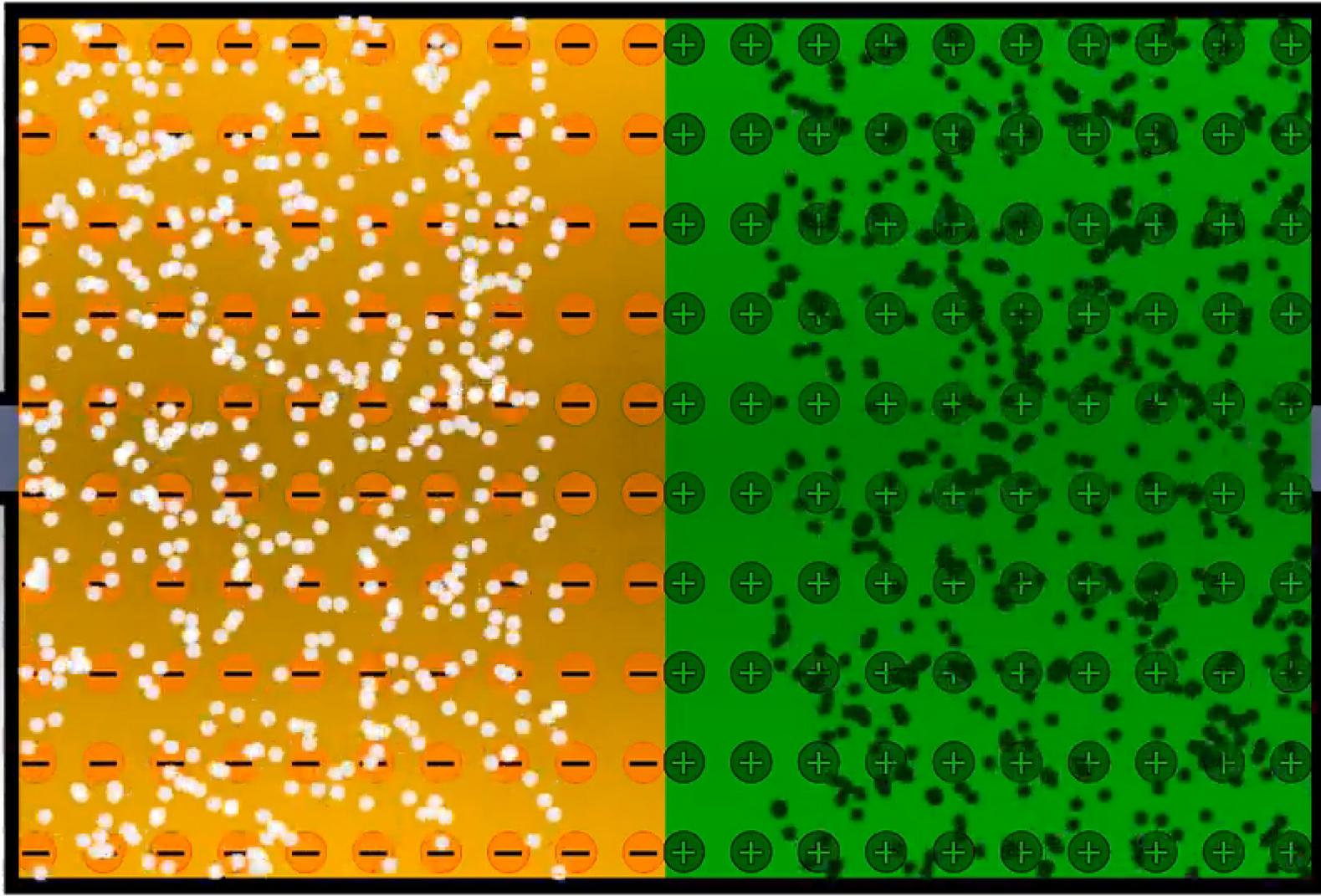
LED(Light Emitting Diode) 发光二极管

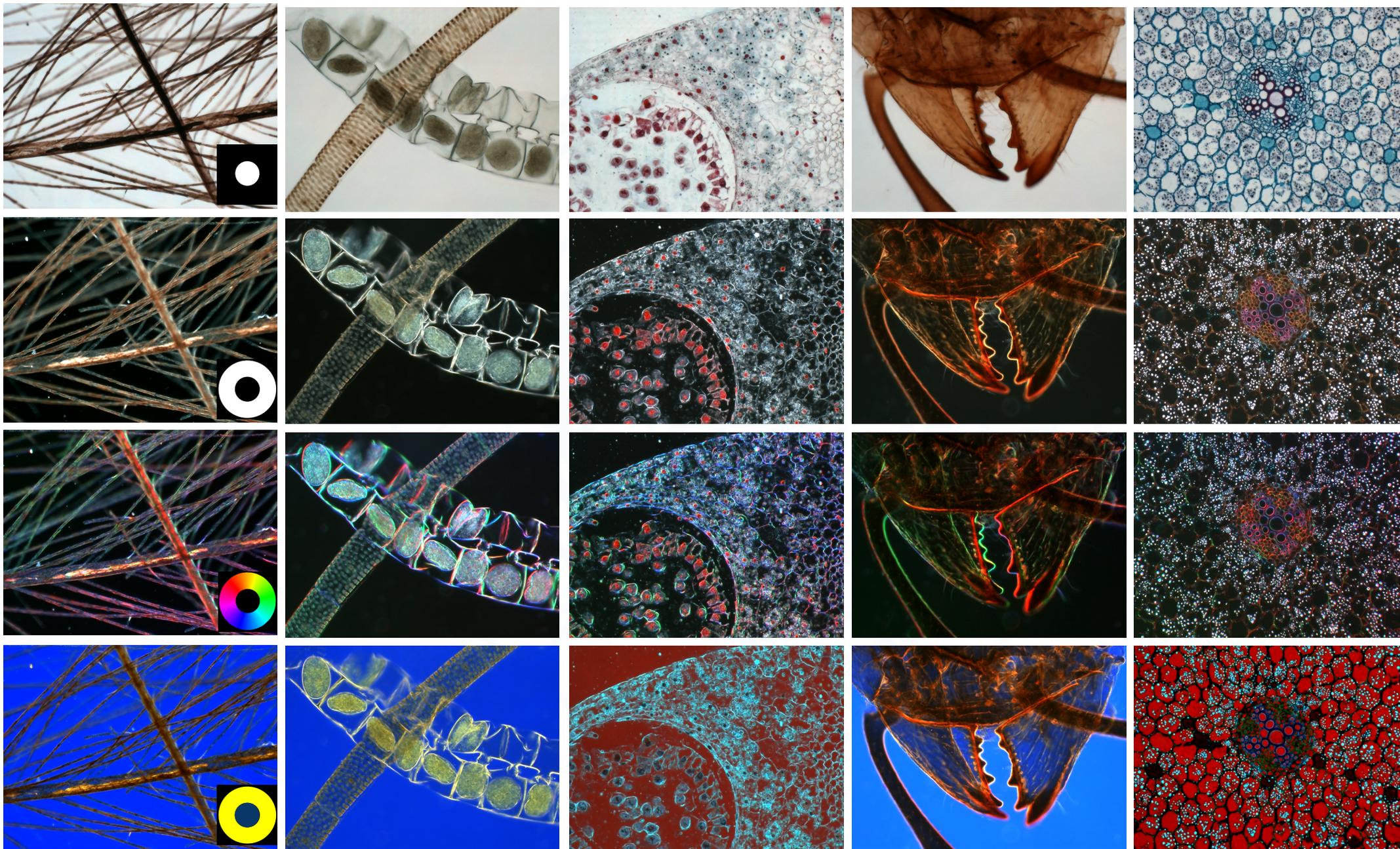
电致发光原理，当电子与空穴复合时能辐射出可见光，因而可以用来制成发光二极管。



P

N







Redmi

adidas
SNEAKER
COLLECT

02



SING





2. LED的性质

电压：LED使用**低压电源**，单颗电压在1.9-4V之间，比使用高压电源**更安全的电源**。

效能：光效高，目前实验室最高光效已达到161lm/w（cree），是目前**光效最高的照明产品**。

抗震性：LED是**固态光源**，由于它的特殊性，具有其他光源产品不能比拟的抗震性。

稳定性：10万小时，**光衰**为初始的70%

响应时间：LED灯的响应时间为纳秒级，是目前所有光源中**响应时间最快**的产品。

环保：无金属汞等对身体有害物质。

颜色：LED的带快相当窄，所**发光颜色纯**，无杂色光，覆盖整个可见光的全部波段，且可由R\G\B组合成任何想要可见光。

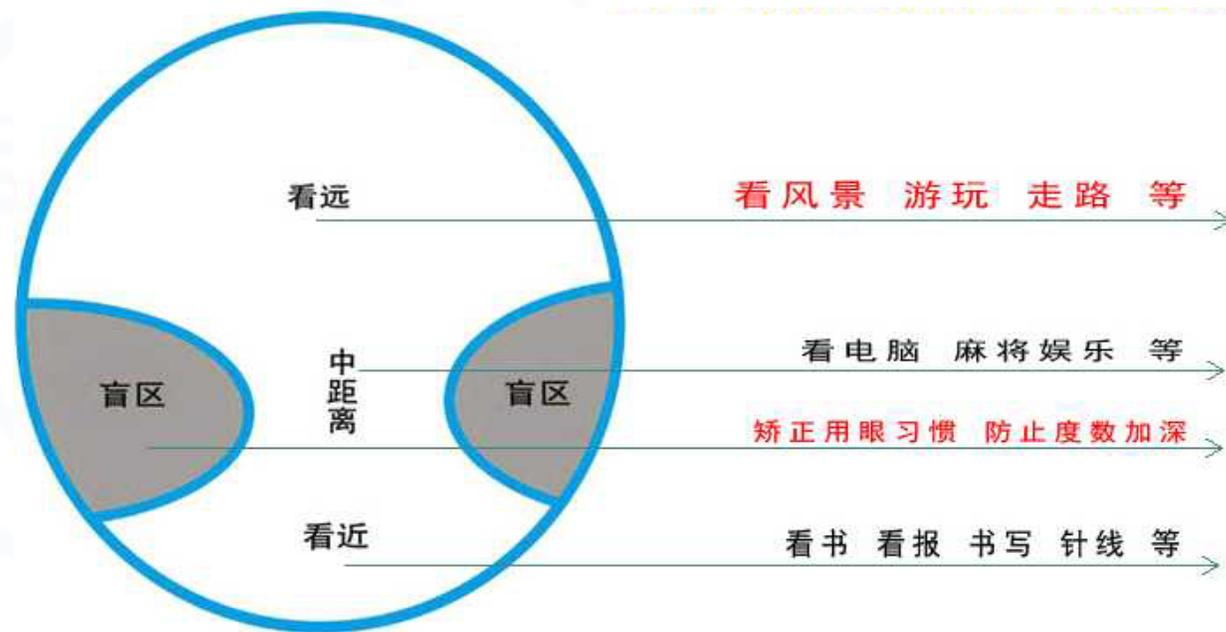
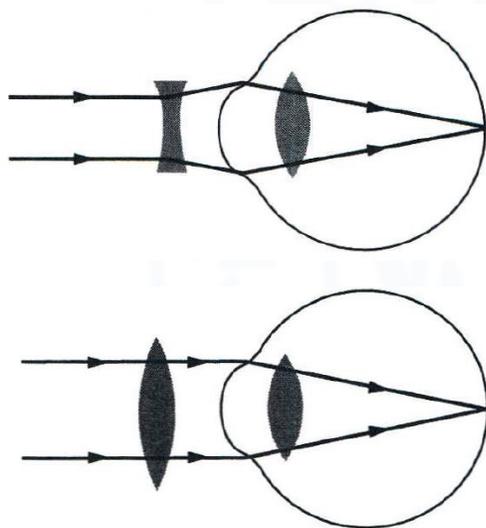
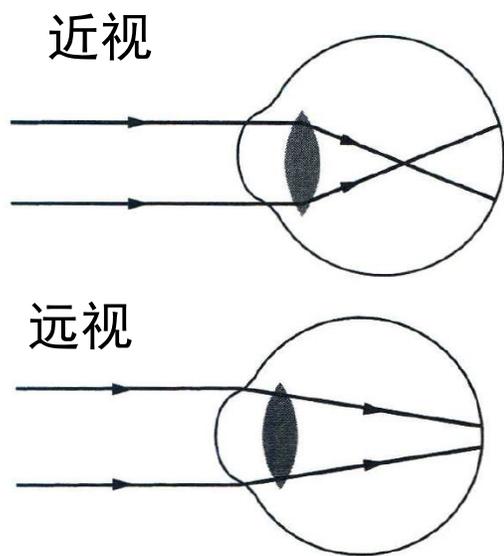


主要内容：

1. 光学成像系统概述
2. 光源概述
 - 激光
 - LED光源
3. 成像光路概述
 - 相机镜头
 - 投影光路
4. 探测器及其工作原理

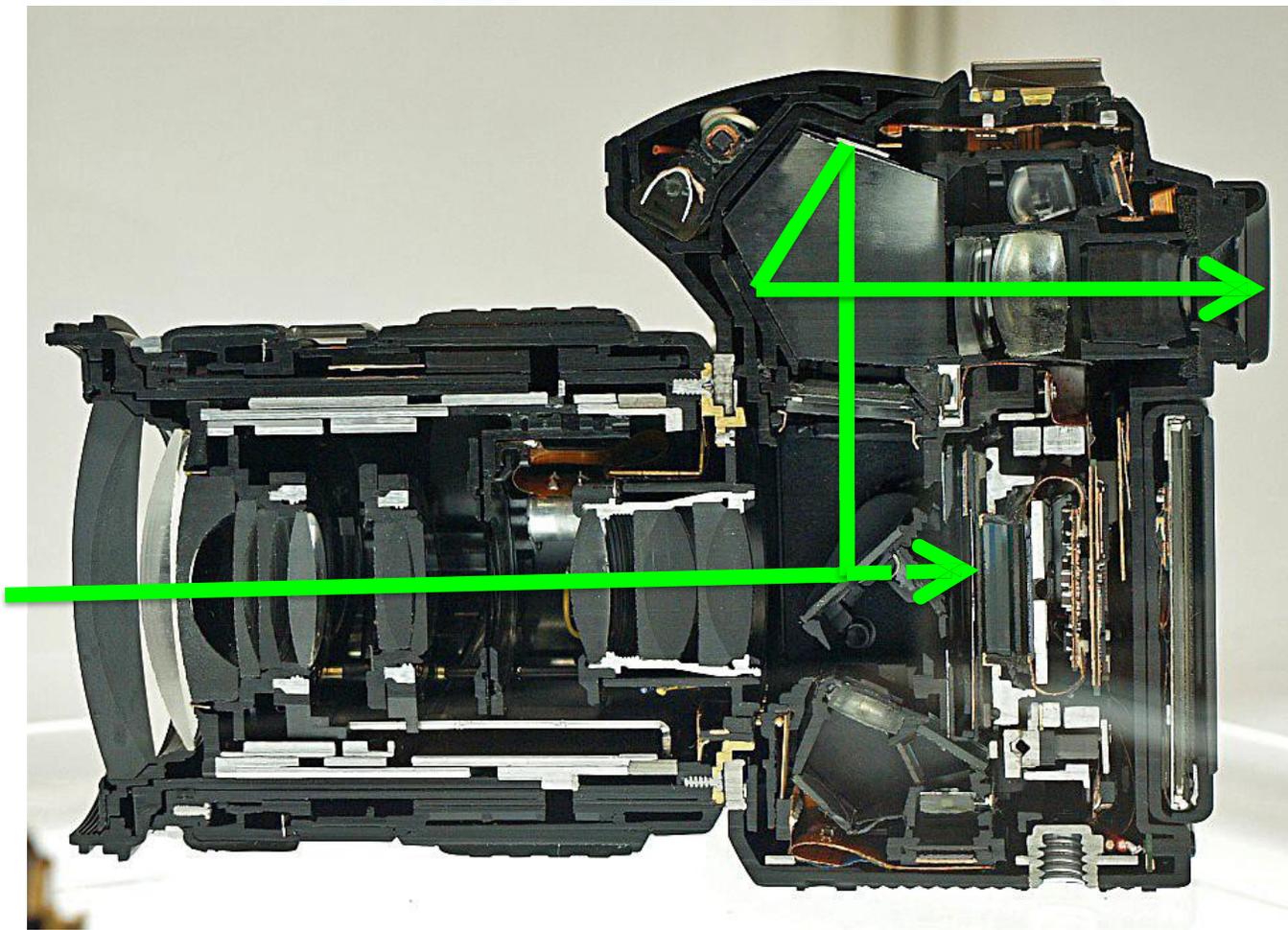


人眼 (+眼睛)





单眼反射式相机（单反 SLR, single-lens reflex）



From: Hanabi123

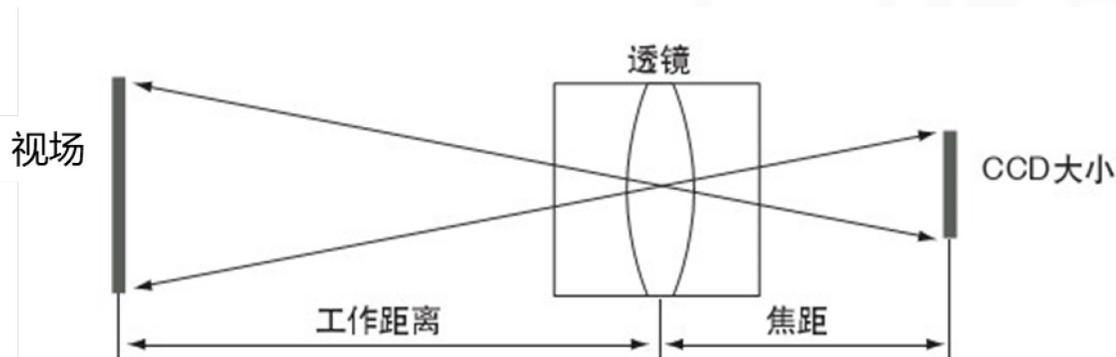
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:E-30-Cutmodel.jpg>



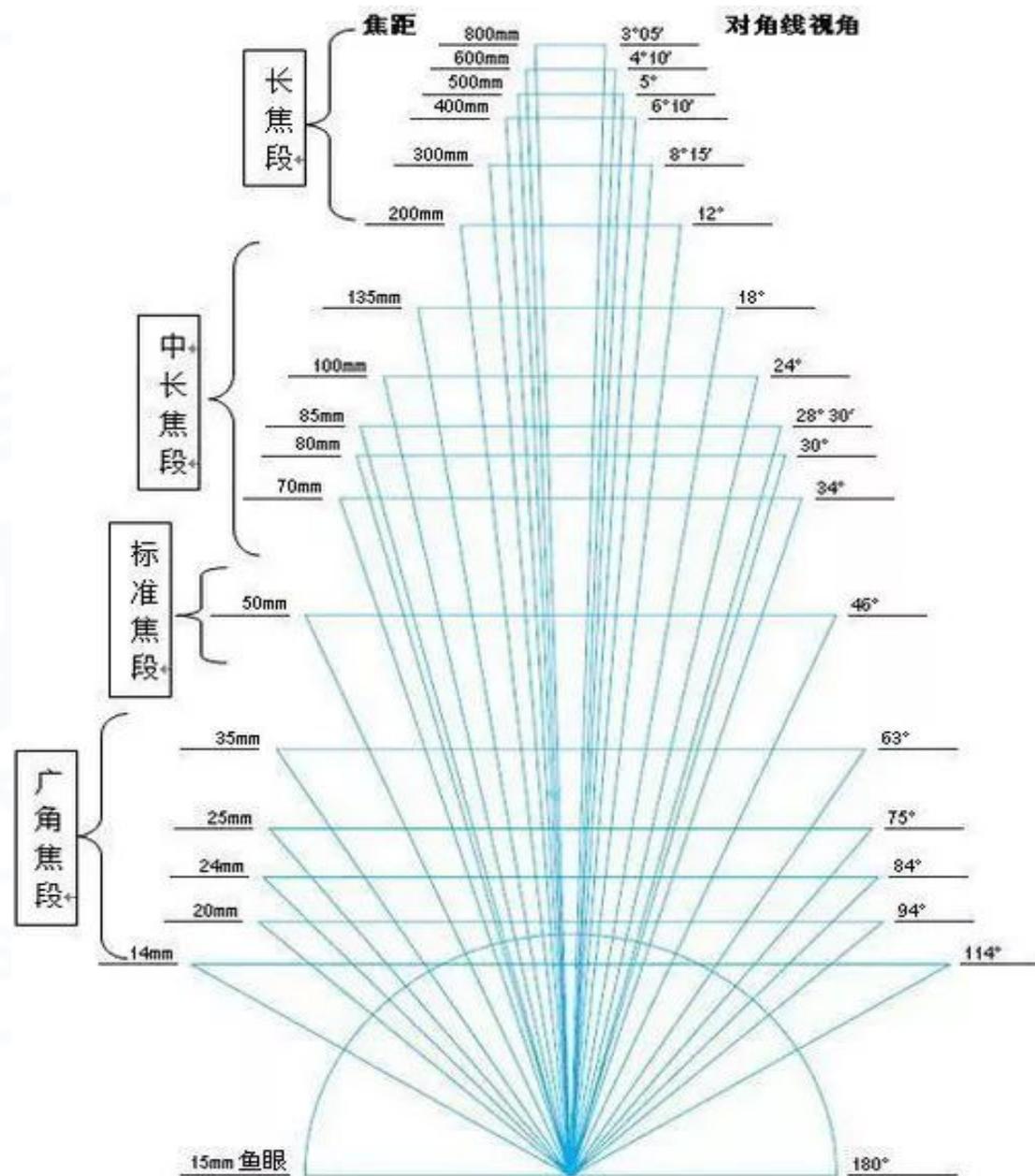
1、相机镜头的成像原理与基本参数

焦距

镜头的成像原理——凸透镜成像



焦距越大，视场越小，起到放大效果
 焦距越小，视场越大，起到缩小效果





2、相机镜头的分类

相机种类划分：单反相机镜头、工业相机镜头和手机相机镜头。

焦距：单反相机镜头 > 工业相机镜头 > 手机相机镜头

- **LONGER FOCAL LENGTH**
= TELEPHOTO LENS
- **MEDIUM FOCAL LENGTH**
= NORMAL LENS
- **SHORTER FOCAL LENGTH**
= WIDEANGLE LENS



单反相机镜头
焦距为15~100mm
以上



工业相机镜头
焦距为5~35mm



手机相机镜头
焦距为5mm以下

4K单反级
独立三镜头+补光灯

1. 独立广角:135°
2. 独立鱼眼:180°
3. 独立微距:20X
4. 补光灯:冷暖3色

ULTRA WIDE-ANGLE



16mm
~11mm on APS-C

PHOTOX.COM
UNDERSTANDING PHOTOGRAPHY

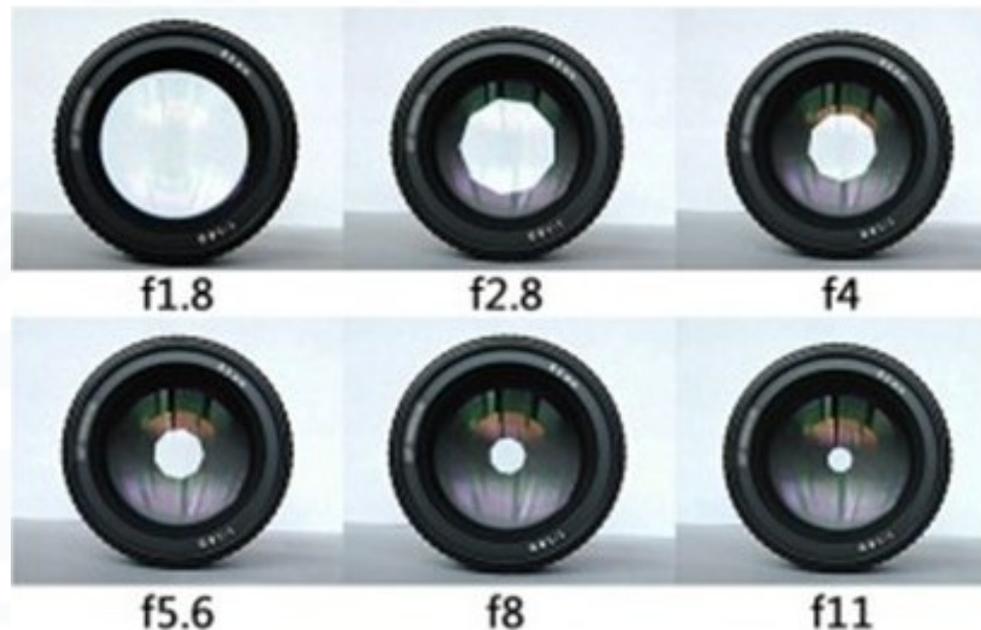
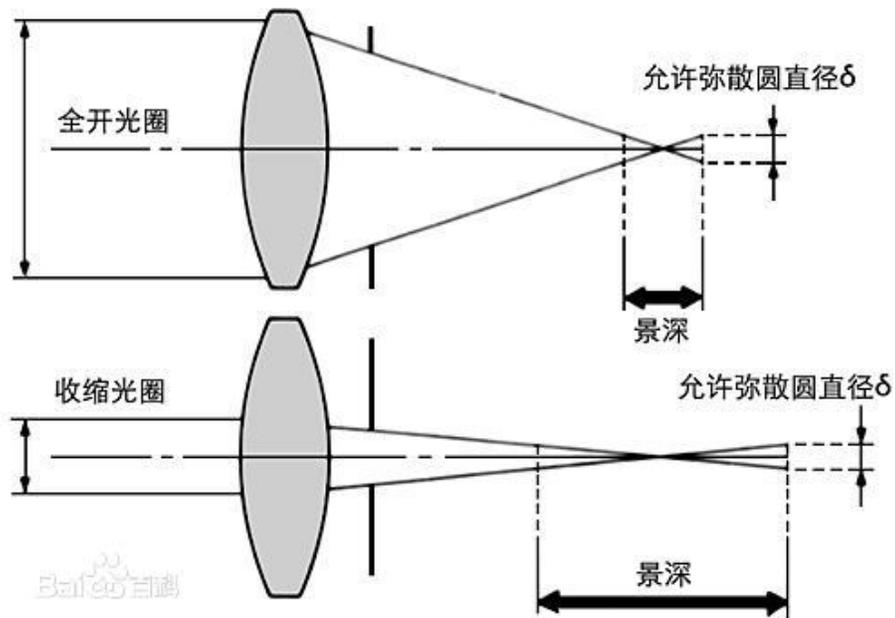
7 LENSES

7.0 overview and focal lengths



1、相机镜头的成像原理与基本参数

光圈



光圈的f数 = 镜头的焦距与光圈口径的比值

光圈的f数值越大，光圈越小，进光量越少，景深大。

光圈的f数值越小，光圈越大，进光量越大，景深小。



PHOTO[X].COM
UNDERSTANDING PHOTOGRAPHY

7 LENSES

7:1 aperture comparison



3、相机镜头的应用——单反相机+**变焦镜头**

焦距越大，视场越小，起到放大效果

焦距越小，视场越大，起到缩小效果

变焦镜头的优势：

取景视场可变，特别适用于活动场景的快速抓拍，在不更换镜头的情况下拍摄**不同远近的场景**的照片。

另外，如果是外出远行拍摄，同时又需要不同焦距的镜头，那么带上一支变焦镜头还是比**多支定焦镜头**来得方便。

变焦镜头的缺点：

由于变焦镜头的结构更加复杂，光路设计也更加困难，所以，相对于定焦镜头来说，变焦镜头的**价格更高、图像质量更差、光圈也 smaller**。



索尼16-35mm f/2.8 变焦镜头



3、相机镜头的应用——单反相机+广角镜头

焦距越大，视场越小，起到放大效果

焦距越小，视场越大，起到缩小效果

广角镜头、超广角镜头、短焦镜头

普通广角镜头的焦距一般在24mm-35mm；

超广角镜头的焦距在12mm-24mm之间。

更广的镜头能够拍摄更宽阔的画面，因而特别适合大场景的风景摄影。

从镜头的特性上来说，镜头越广（焦距越短），视野就越开阔（视角越大），景深也越大（容易前后景物都清楚）。



24mm焦距拍摄场景



3、相机镜头的应用——单反相机+标准镜头

焦距越大，视场越小，起到放大效果

焦距越小，视场越大，起到缩小效果

标准焦距镜头，焦距为50mm的镜头。

它提供与人眼类似的50度左右的视野，近大远小的透视感也最**接近人眼**。

标准镜头的光圈大，有利于暗光下拍摄和营造虚化效果。



尼康50mm f/1.8 镜头



3、相机镜头的应用——单反相机+中焦镜头

焦距越大，视场越小，起到放大效果

焦距越小，视场越大，起到缩小效果

中焦镜头，焦距为85mm-135mm的镜头。

这个焦段镜头拍摄的照片变形小，最能正确体现被摄体的形状，而且设计成大光圈也相对容易。

大光圈中焦镜头在人像摄影当中使用较多。





3、相机镜头的应用——单反相机+长焦镜头

焦距越大，视场越小，起到放大效果

焦距越小，视场越大，起到缩小效果

长焦镜头，焦距超过135mm的镜头。

超长焦镜头，焦距超过500mm的镜头。

这类镜头，是装在**相机上的望远镜**。

长焦距镜头的景深更浅，并且由于视角窄，拍摄人或物时，带入的环境也很少，所以很容易**突出主体**。

由于长焦镜头的放大倍率过高，长焦距镜头必须具备防抖功能，不然很容易发生**抖动模糊**。



100-400mm长焦镜头



3、相机镜头的应用——单反相机+鱼眼镜头

焦距越大，视场越小，起到放大效果

焦距越小，视场越大，起到缩小效果

鱼眼镜头：焦距为16mm或更短，视角接近或等于 180° 的镜头。为使镜头达到最大的摄影视角，这种摄影镜头的前镜片呈抛物状向前方凸出，与鱼的眼睛很像，所以被称作“鱼眼镜头”。

鱼镜头与人们眼中的真实世界的景象存在很大的差别。

鱼镜头在接近被摄物拍摄时能造成**非常强烈的透视效果**，强调被摄物近大远小的对比。

鱼镜头具有很大的景深，**有利于拍摄全景深图像**。



知乎 @苏州章鱼哥

Canon



知乎 @苏州章鱼哥

佳能的8-15mm鱼眼镜头



3、相机镜头的应用——单反相机+微距镜头

焦距越大，视场越小，起到放大效果

焦距越小，视场越大，起到缩小效果

微距镜头：是一种用作微距摄影的特殊镜头，主要用于拍摄十分细微的物体，如花卉及昆虫等。

微距镜头的镜片组设计会**扩大近距离对焦范围**，具有超级近的对焦距离。大多数微距镜头的焦长都大于标准镜头（透视畸变小），配有光学防抖功能，并非完全适用于一般的摄影。

微距镜头也是可以对焦到无穷远的。



佳能100mm微距镜头

相机镜头总结



主要内容：

1. 光学成像系统概述
2. 光源概述
 - 激光
 - LED光源
3. 成像光路概述
 - 相机镜头
 - 投影光路
4. 探测器及其工作原理



Cinema Paradiso

The 1990 Theatrical Version

- Play
- Scene Selection
- Set Up
- Special Feature





IMAX
— IS BELIEVING™ —

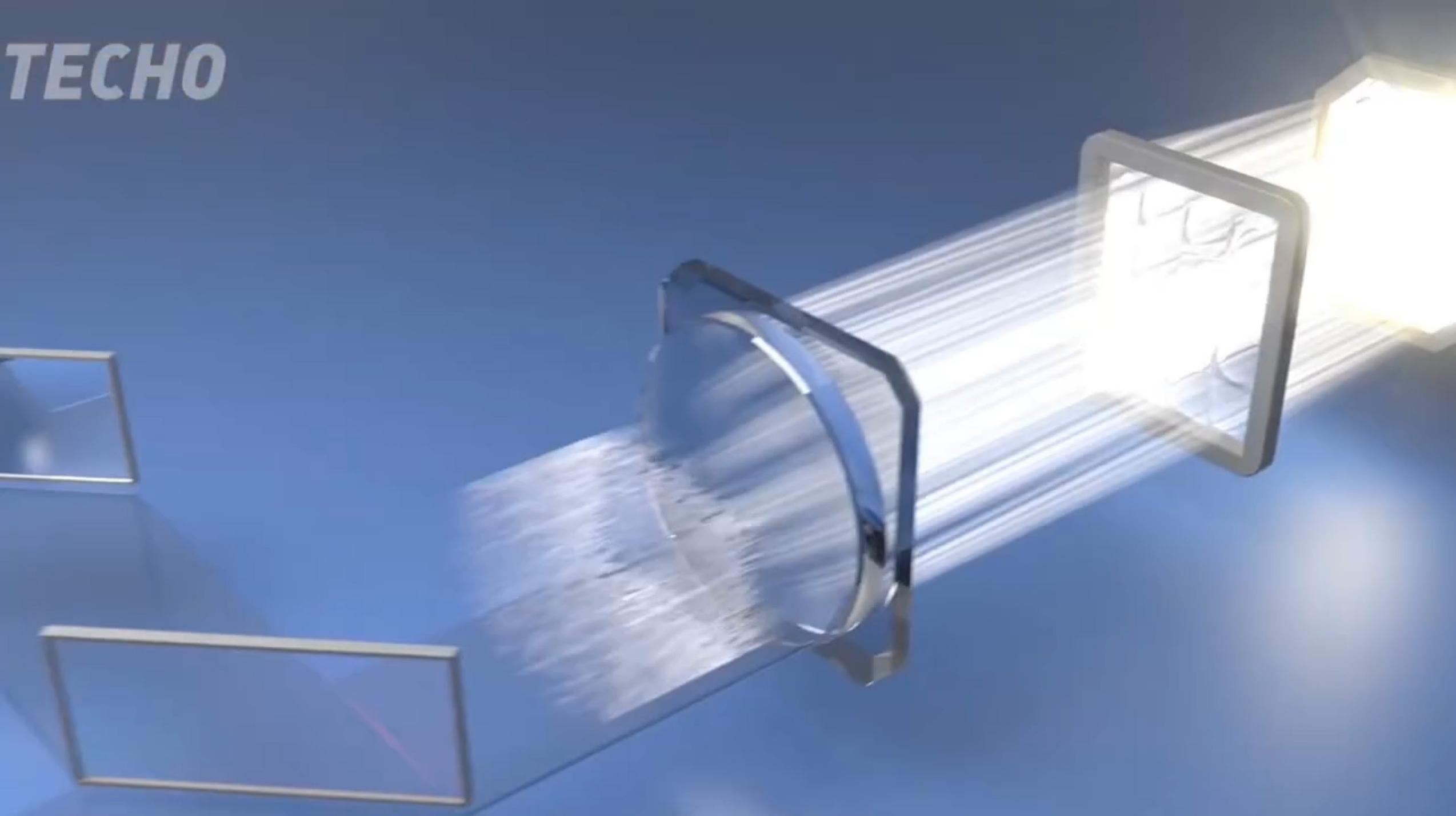
The image shows the interior of an IMAX theater. The room is dimly lit, with the primary light source being the large screen at the front. The screen displays the IMAX logo in a metallic, 3D font, with the slogan "— IS BELIEVING™ —" below it. The background of the screen is a vibrant blue, abstract, crystalline structure set against a starry space background. The theater seats are black, leather-like, and arranged in a curved pattern. Each seat has a circular cup holder on the armrest. The floor is covered in a dark, textured carpet. The overall atmosphere is one of high-tech and cinematic immersion.

IMAX

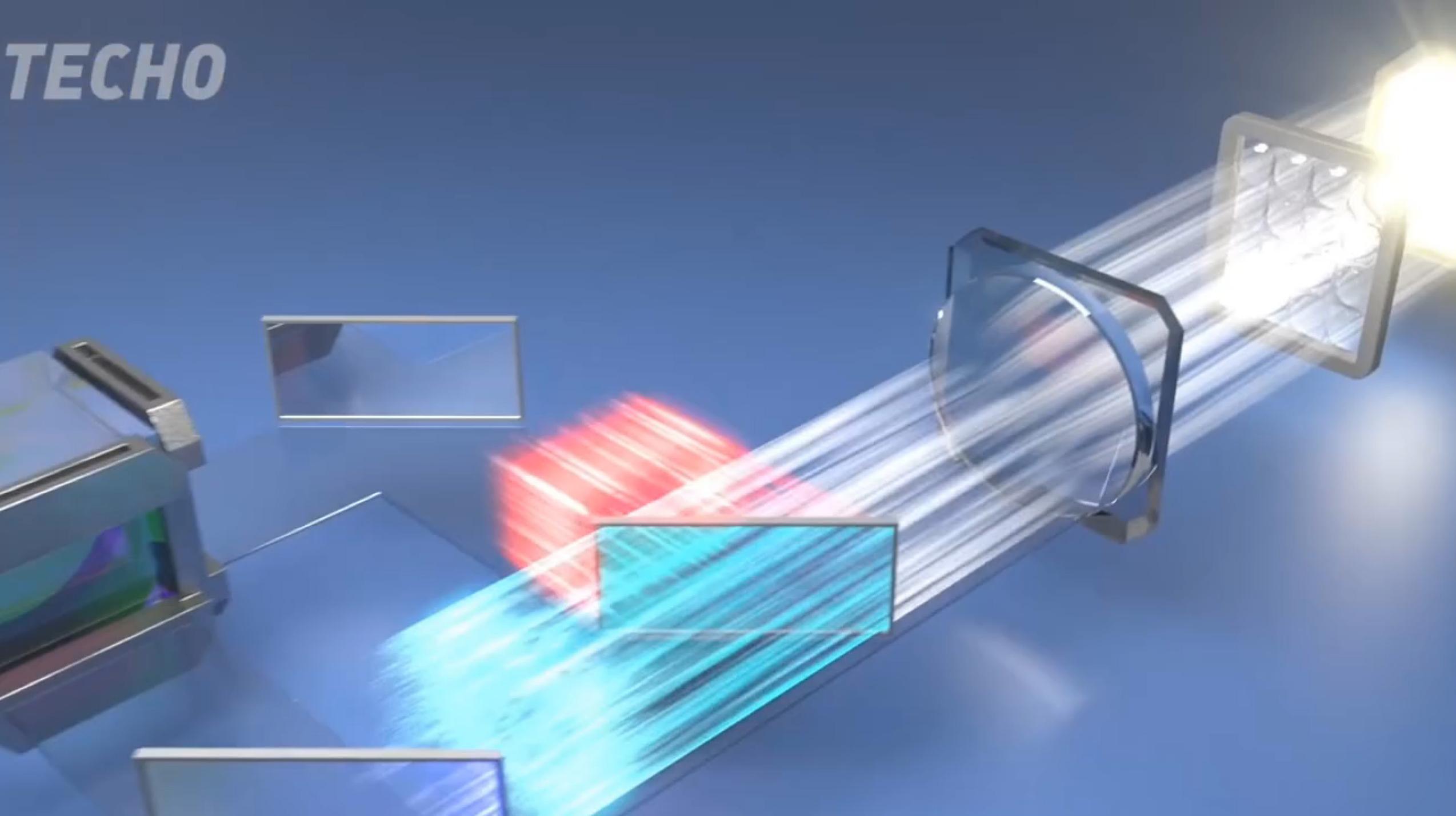
TECHO



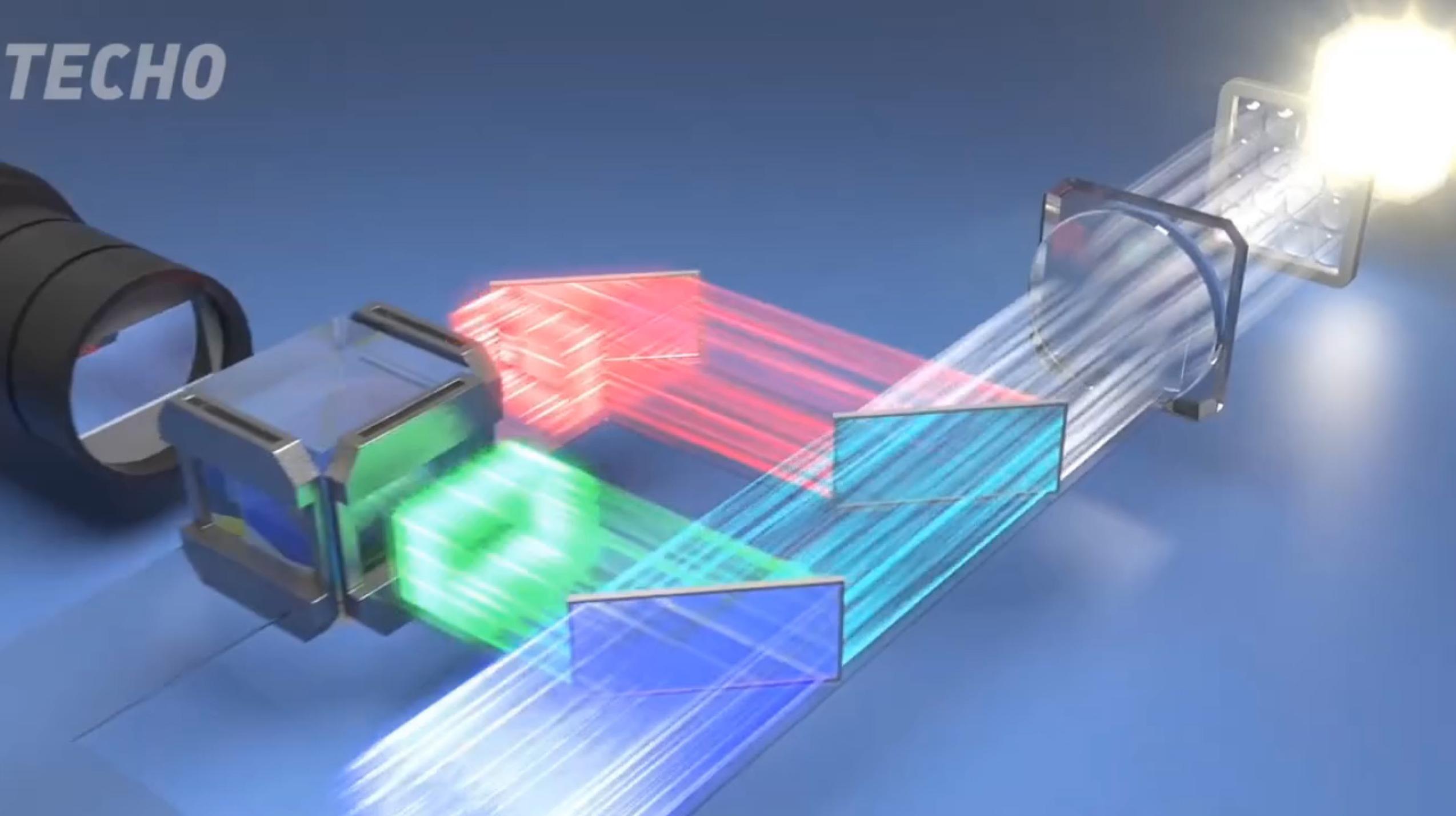
TECHO

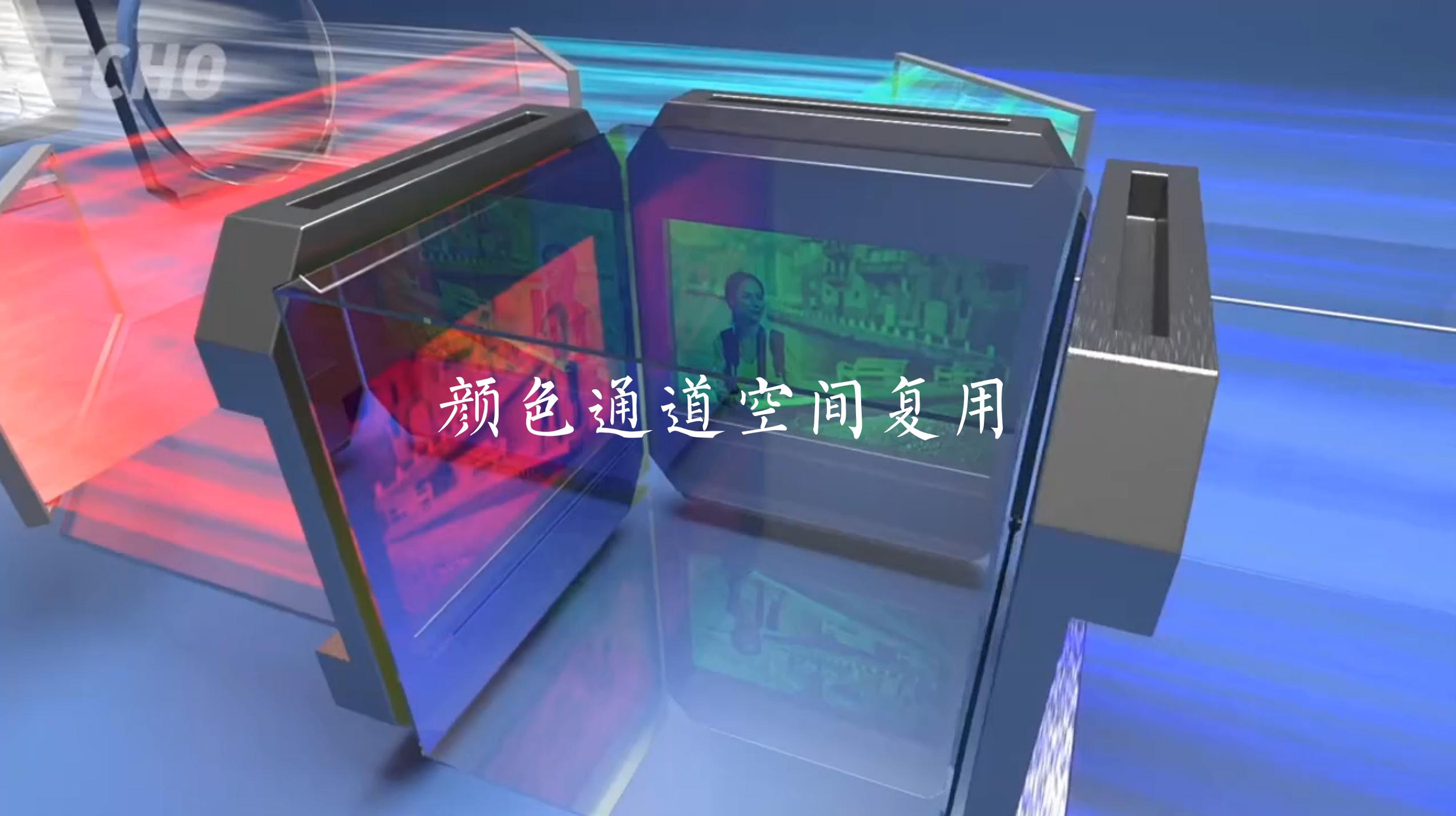


TECHO



TECHO





颜色通道空间复用

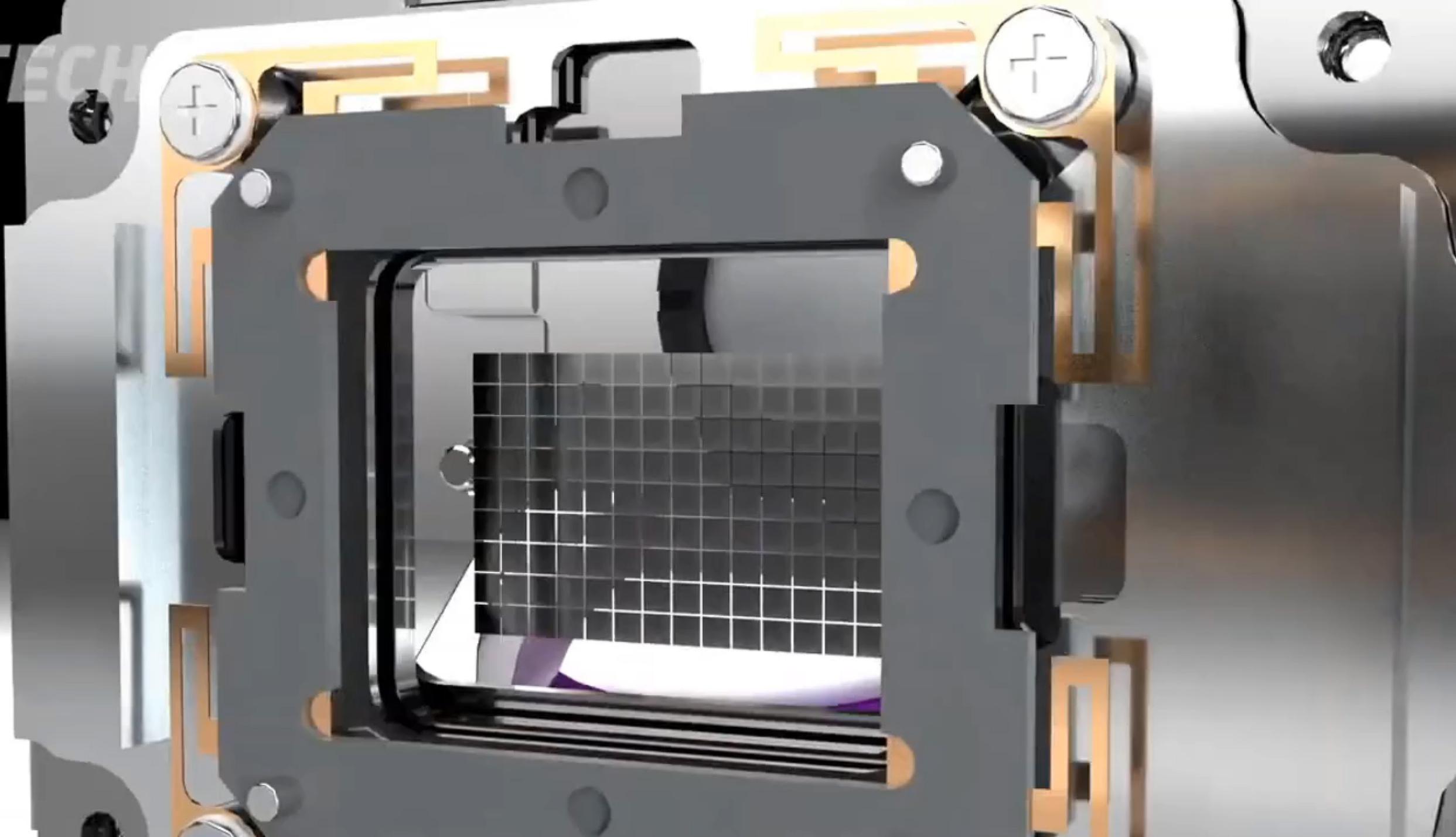
TECHO



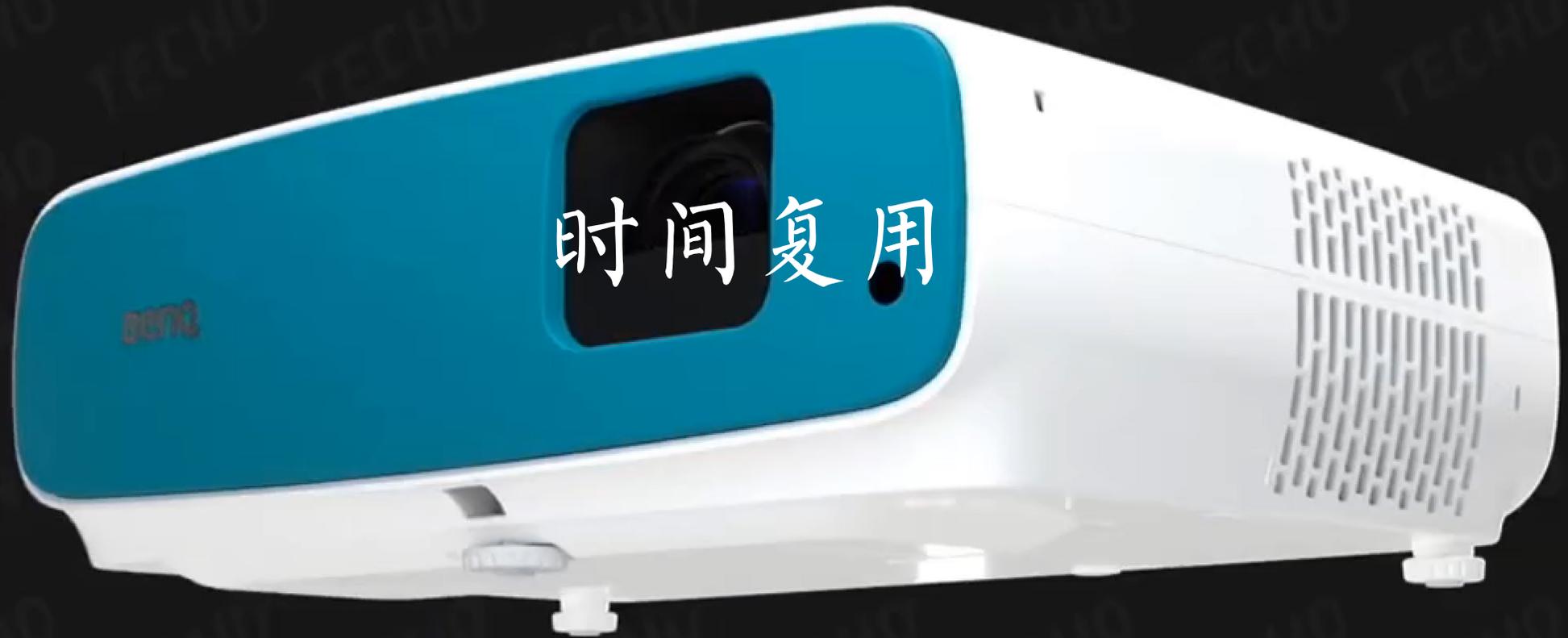
← **DLP投影仪** →



TECH



TECHO



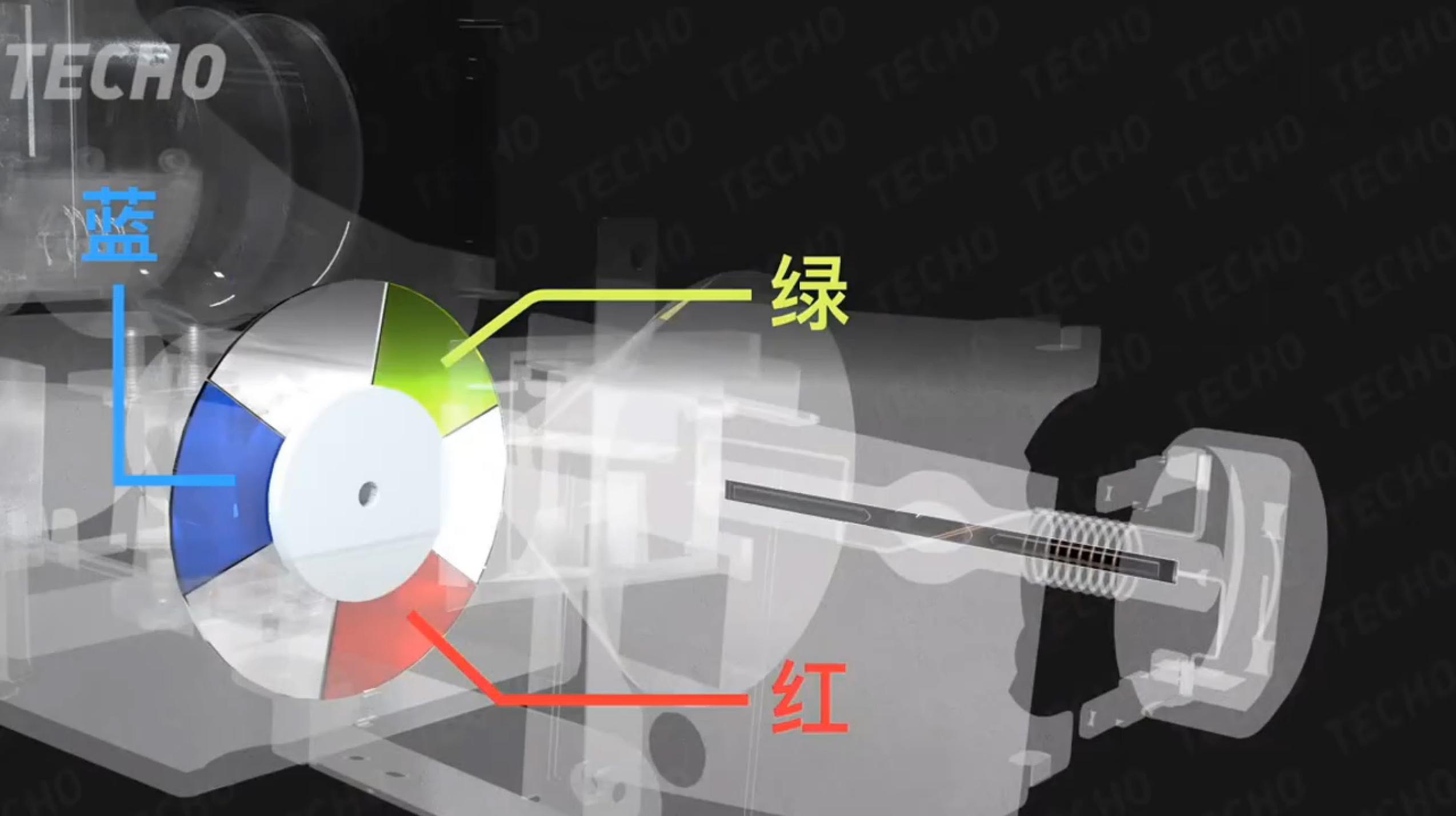
时间复用

TECHO

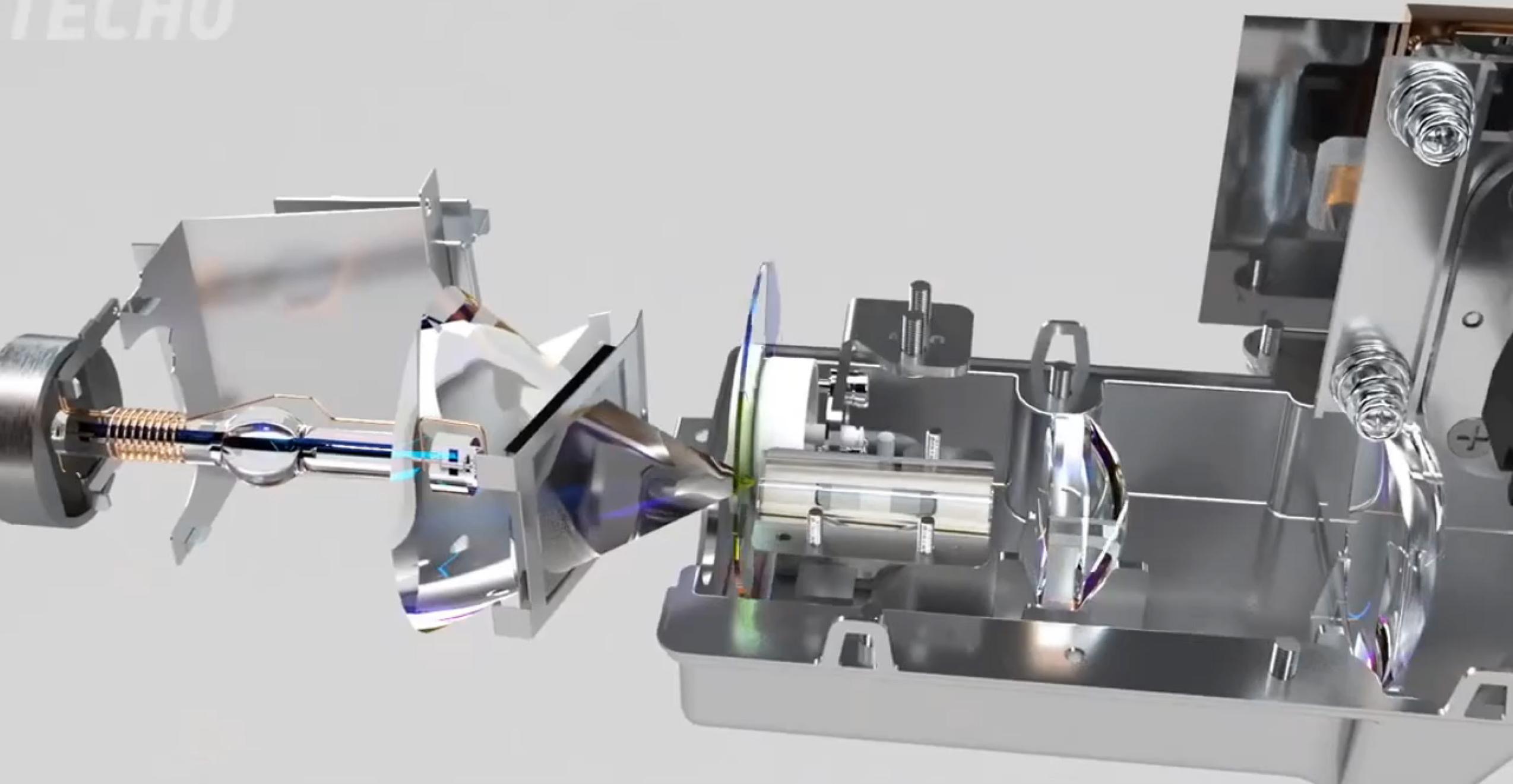
蓝

绿

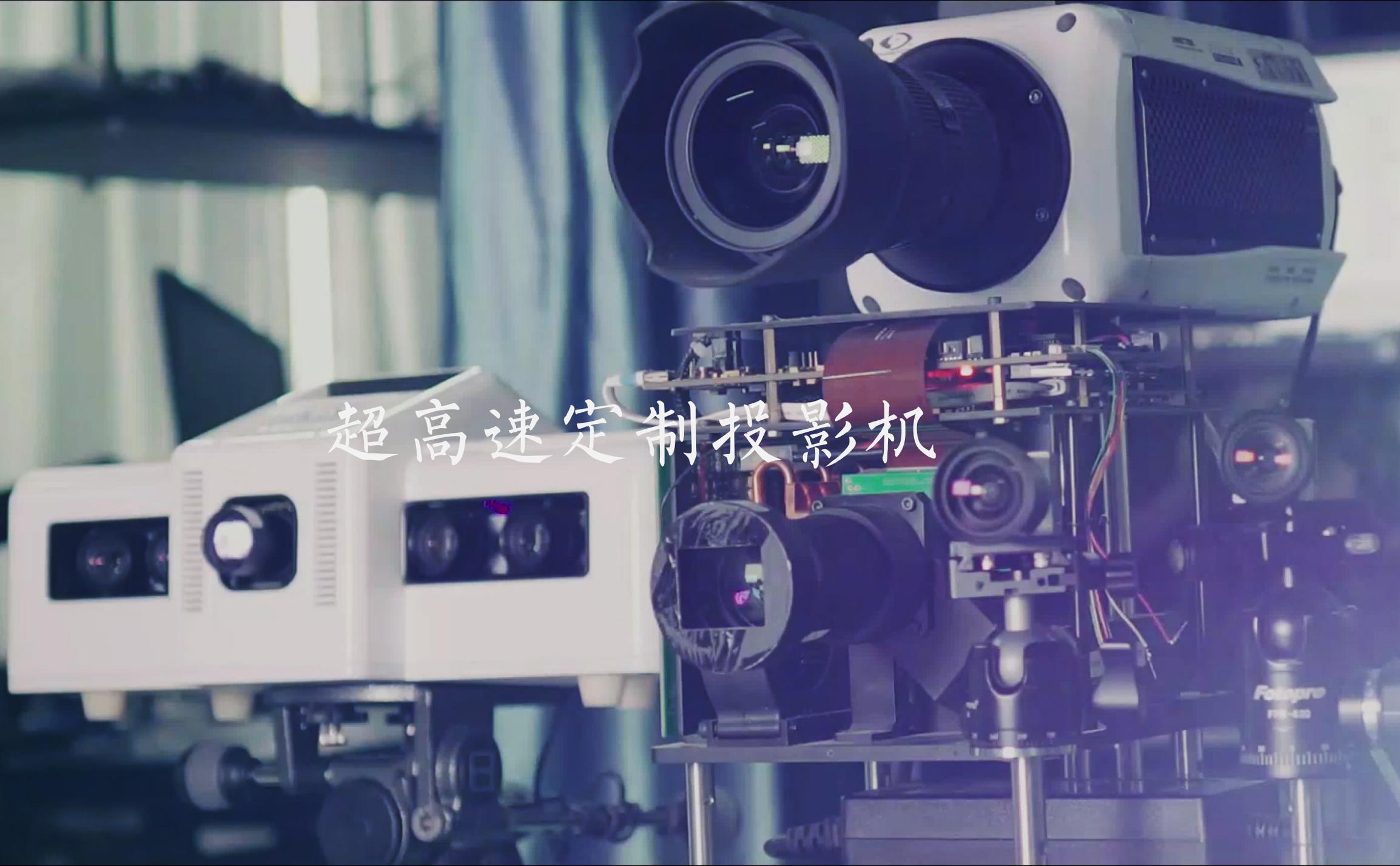
红



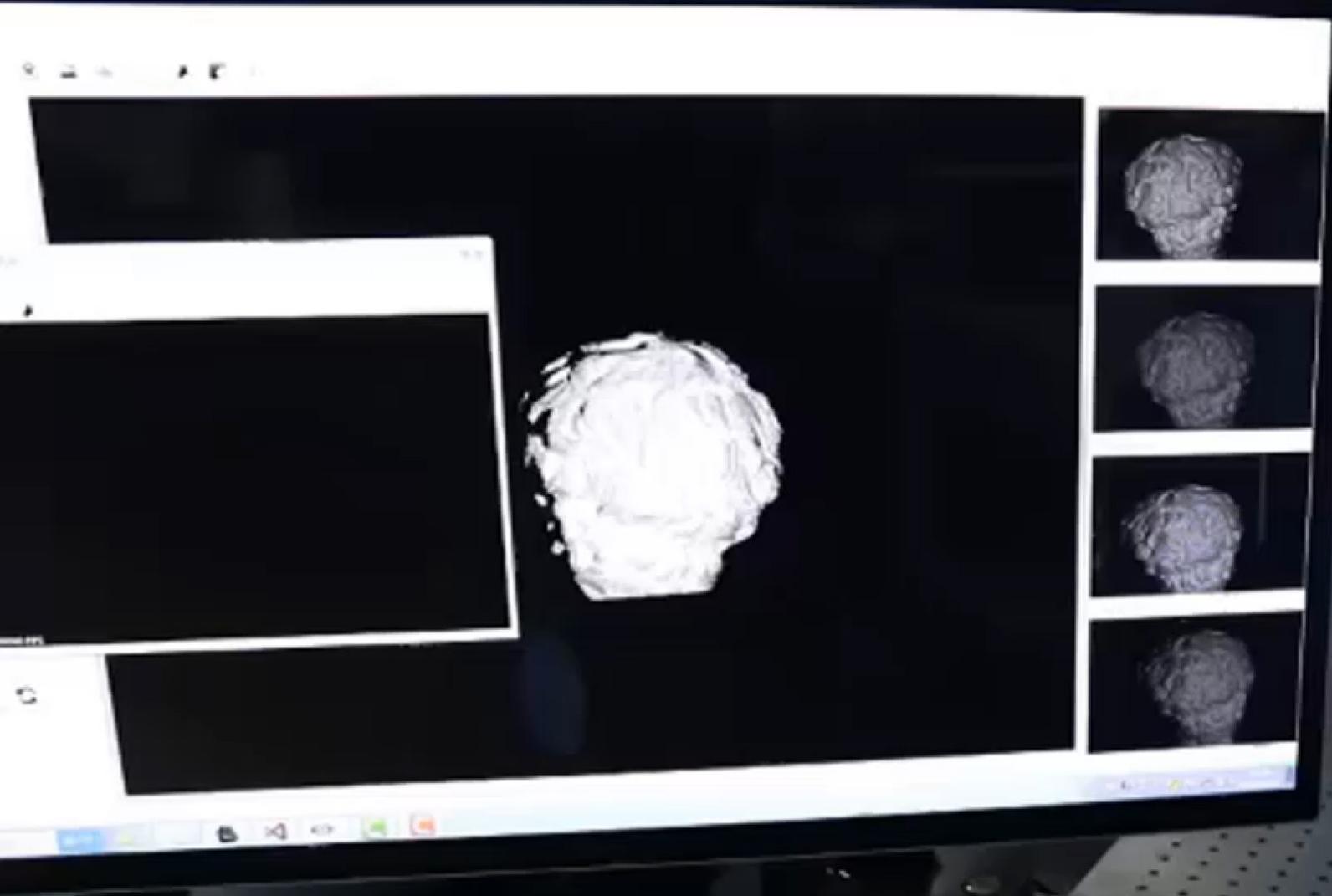
TECHO



超高速定制投影机







Letter Vol. 44, No. 23 / 1 December 2019 / Optics Letters 5751

Optics Letters

High-resolution real-time 360° 3D model reconstruction of a handheld object with fringe projection profilometry

JIAMING QIAN,^{1,2,3} SHUIE FENG,^{1,2,3} TIANYANG TAO,^{1,2,3} YAN HU,^{1,2,3} KAI LIU,^{1,2,3} SHUAIJIE WU,^{1,2,3} QIAN CHEN,^{1,2,4} AND CHAO ZUO^{1,2,3,*}



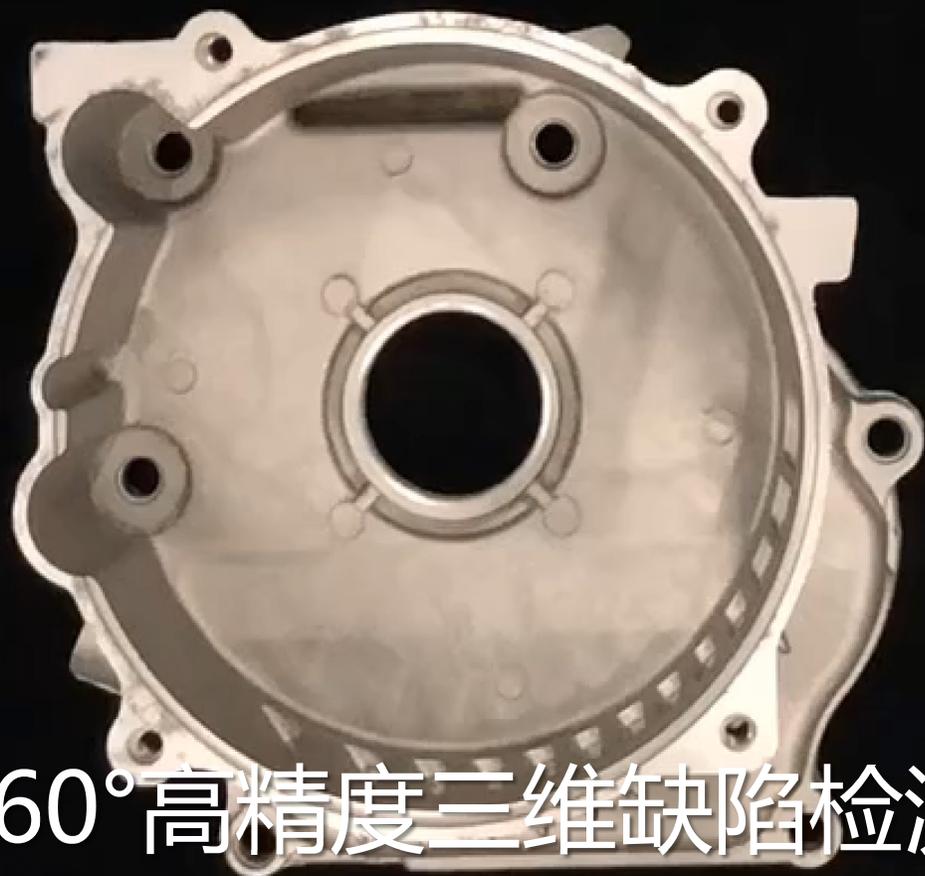
全球首台实时高精度全方位三维成像仪[2019]

The world's first real-time high-precision omnidirectional 3D scanner



360°高精度三维数字化模型

360° High-precision 3D Digital Model



360°高精度三维缺陷检测

360° High-precision 3D defect detecting



主要内容：

1. 光学成像系统概述
2. 光源概述
 - 激光
 - LED光源
3. 成像光路概述
 - 相机镜头
 - 投影光路
4. 探测器及其工作原理





主要内容：

1. 光学成像系统概述
2. 光源概述
 - 激光
 - LED光源
3. 成像光路概述
 - 相机镜头
 - 投影光路
 - ...
4. 探测器及其工作原理



本讲结束