

同步辐射与自由电子激光装置探测器的发展和应用

李爱国

上海光源科学中心 / 中科院上海高等研究院

1

同步辐射的光谱与探测器分类

2

能谱探测器

4

衍射探测器

5

成像探测器

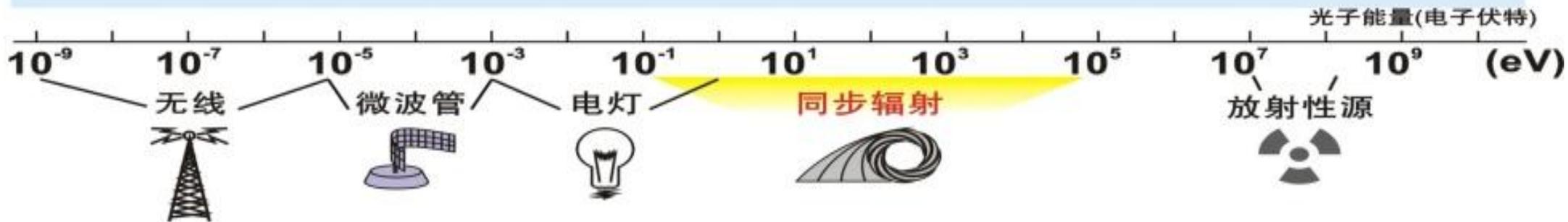
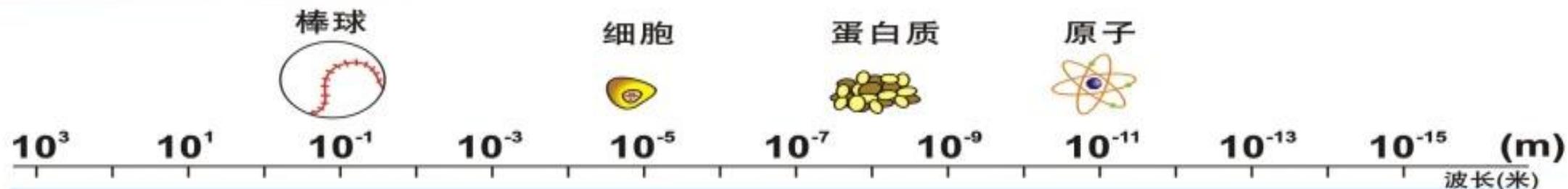
6

自由电子激光探测器进展

同步辐射光谱

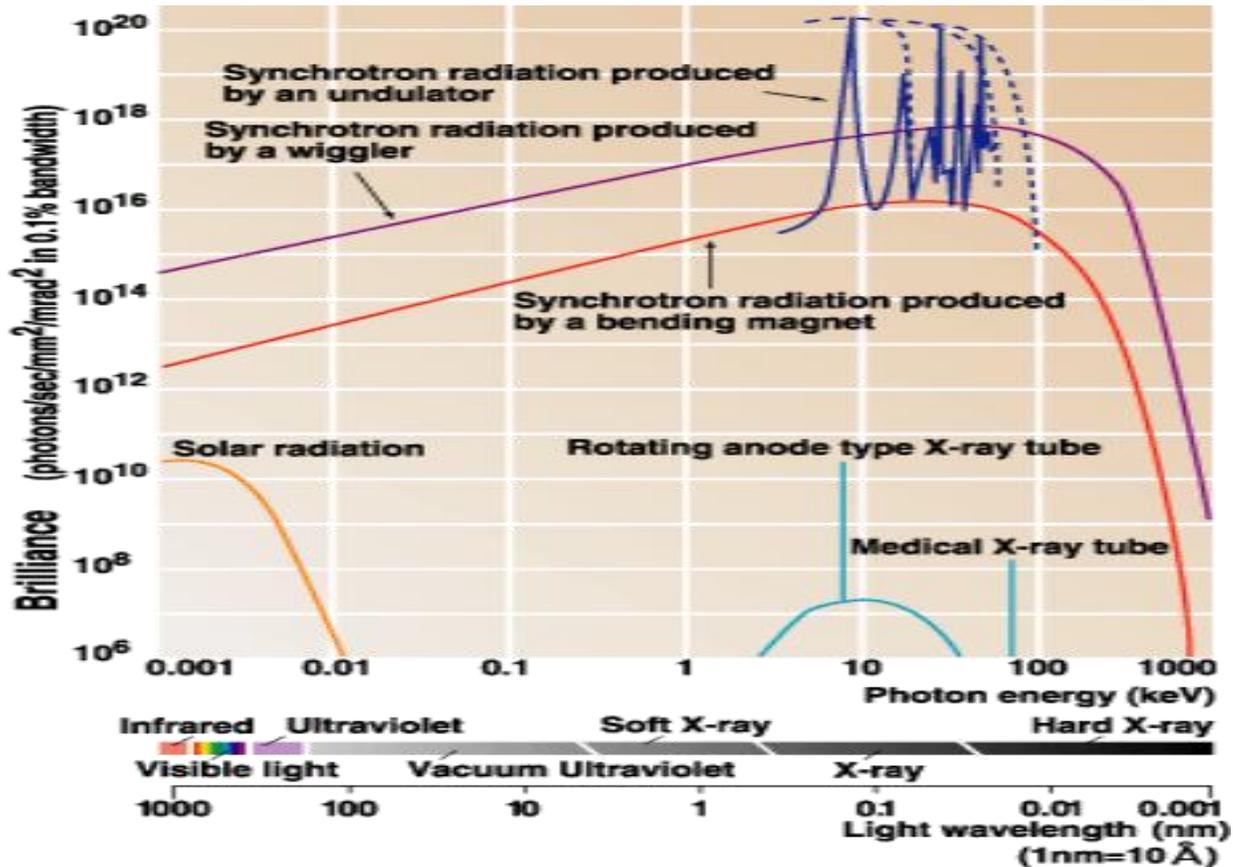
电磁波谱

物体大小



光源

同步辐射光谱特点



- **高亮度:** 常规光源 (如X光机) 上亿倍
- **宽能谱:** 从远红外到硬X射线光谱
- **高准直性:** 低发散度
- **时间结构:** 脉冲时间结构
- **偏振性:** 线偏振、圆/椭圆偏振光
- **相干性:** 具有相干性
- **高纯净:** 无污染、光谱可精确计算

对探测器的要求：高计数率、高能量分辨和方法针对性强

上海光源光束线能区分布

一期线站

- X射线成像及医学应用
- X射线小角散射
- 生物大分子晶体学
- XAFS
- XRD
- 硬X射线微聚焦
- 软X射线谱学显微

后续线站

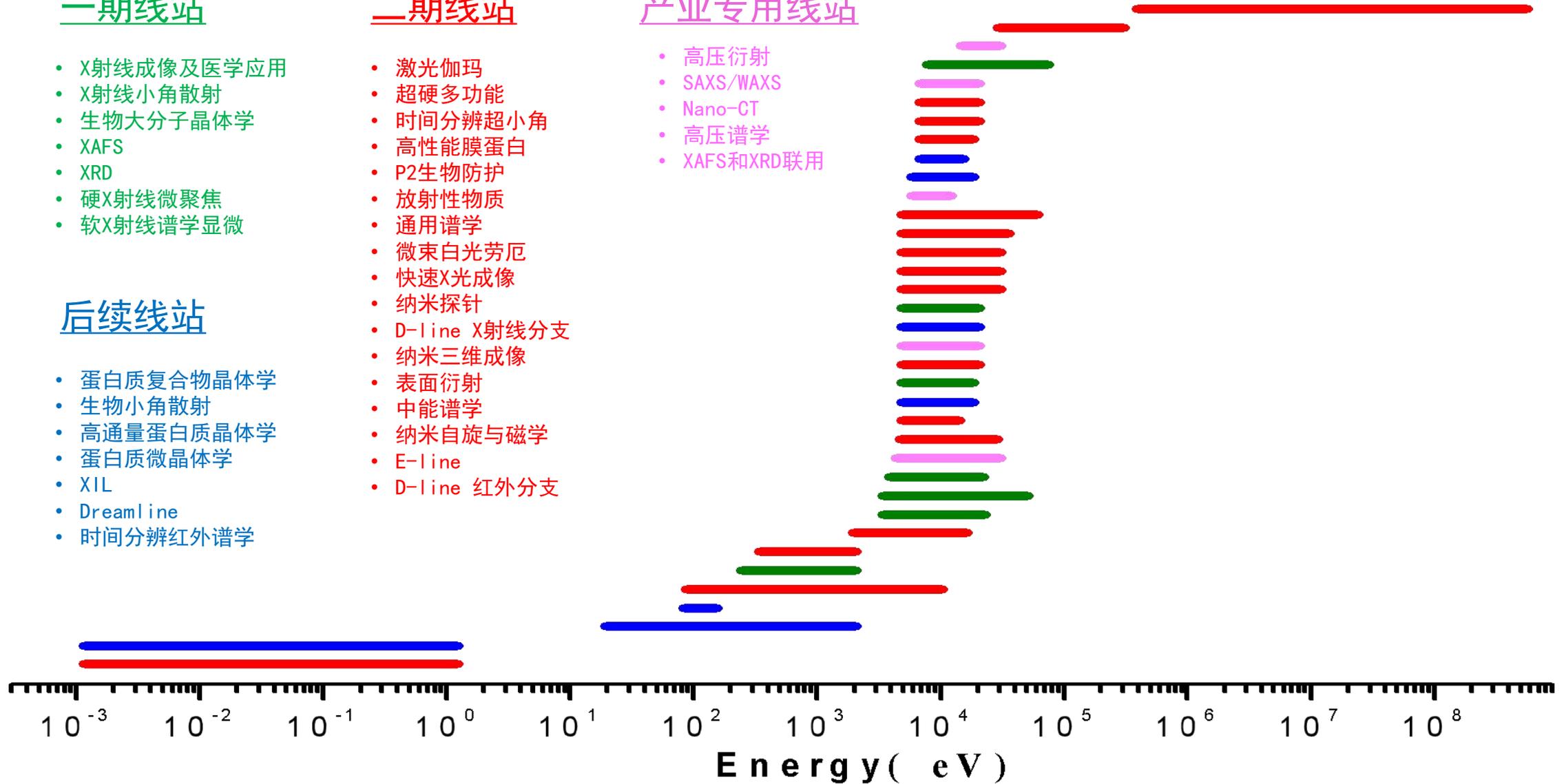
- 蛋白质复合物晶体学
- 生物小角散射
- 高通量蛋白质晶体学
- 蛋白质微晶体学
- XIL
- Dreamline
- 时间分辨红外谱学

二期线站

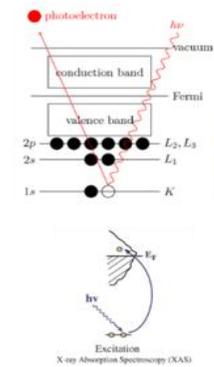
- 激光伽玛
- 超硬多功能
- 时间分辨超小角
- 高性能膜蛋白
- P2生物防护
- 放射性物质
- 通用谱学
- 微束白光劳厄
- 快速X光成像
- 纳米探针
- D-line X射线分支
- 纳米三维成像
- 表面衍射
- 中能谱学
- 纳米自旋与磁学
- E-line
- D-line 红外分支

产业专用线站

- 高压衍射
- SAXS/WAXS
- Nano-CT
- 高压谱学
- XAFS和XRD联用



同步辐射实验方法与探测器



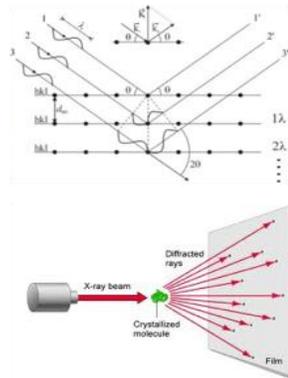
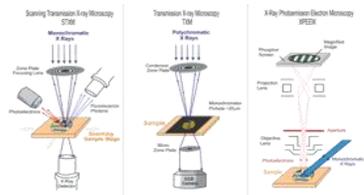
原子/电子/自旋
谱学
(能量分辨)

晶格/缺陷/团簇
散射/衍射
(动量分辨)

时间
分辨

成像
(空间分辨)

形貌



原位、实时、动态

能谱探测器:

红外探测器、紫外可见荧光光谱仪、XPS能谱仪、
电离室、X射线荧光探测器

衍射/散射探测器:

闪烁体探测器、线型探测器、面型探测器

成像探测器:

1

同步辐射的光谱与探测器分类

2

能谱探测器

4

衍射探测器

5

成像探测器

6

自由电子激光探测器进展

上海光源配置的红外谱仪探测器

探测器	探测范围(cm^{-1})	灵敏度	运行温度
DTGS w/KBr window	10000-370	$D^* > 2 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$	室温
DTGS w/PE window	700-10	$D^* > 2 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$	室温
MCT Mid-Band	10000-600	$D^* > 2.5 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$	液氮冷却
MCT Wide-Band	10000-420	$D^* > 5 \times 10^9 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$	液氮冷却
Si bolometer	370-10	$\text{NEP} < 10^{-12} \text{WHz}^{-1/2}$	液氮冷却
InGaAs	5800-12500	$\text{NEP} < 2 \times 10^{-14} \text{WHz}^{-1/2}$	室温

- DTGS（氘化硫酸三甘氨酸）：灵敏度低，通常用于调试或预实验，谱仪标配；
- MCT（HgCdTe）光导探测器：灵敏度高，是目前实验最常用的探测器；
- Si bolometer：灵敏度高，用于远红外实验，需要液氮制冷。目前已有无需外部液氮制冷的同类探测器；
- InGaAs光电探测器：用于近红外，灵敏度高，目前不是很常用。
- 上述探测器价格大概在几千到几万美元的价位。
- 上述探测器由Bruker公司提供。其中MCT探测器来自**Infrared Associates(美国)**定制, Si bolometer来自于**Infrared Labs公司(美国)**定制。

X射线荧光光谱学探测器

- 高纯锗探测器

- 厂家：美国CANBERRA/MIRION, 美国Ortec
- 典型性能：
 - 单元HPGe探测器： $\Phi 10\text{mm} \times 6\text{mm}$, 1 kcps: $< 130\text{ eV}$ ($6\ \mu\text{s}$)
 - 多元阵列HPGe探测器： 25元, 单元 $8 \times 8\ \text{mm}^2$, $< 160\text{eV}$, 1kcps (最高已扩展至 10×10 阵列)



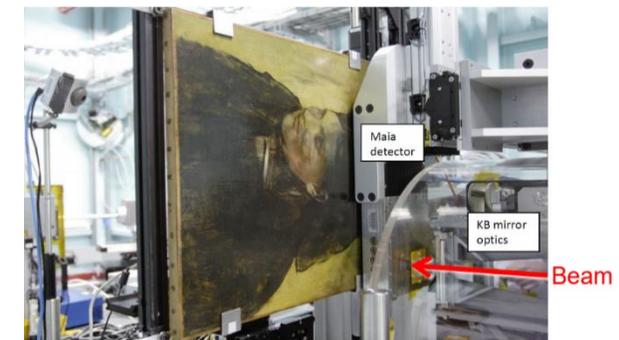
- 硅漂移探测器

- 厂家：日本Hitachi , 英国SGX Sorsortech , 德国Bruker , 德国PNDetector
- 典型性能： $200\ \text{mm}^2$ 有效探测面积, 100 kpcs: $< 137\ \text{eV}$, (with Xmap processor)



- Maia背散射荧光探测器

- 厂家：由美国BNL与澳大利亚CSIRO联合研制
- 典型性能： 384元, 大立体角背散射探测器



单元HPGe探测器

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
HPGe crystal	10mm diameter x 6mm thick Collimated to 8mm (optional)
Detector overall dimensions	377 x 145 x 460 mm ³
Detector weight	19 kg
Entrance window	50µm Beryllium
Cooling	Fully automatic electrical cryocooler (no LN2) Batteries can be provided on request Water chiller option available
Cooler MTF	> 11 years
Power consumption	250 W maximum
Time to reach temperature of operation	1,5 hour
Count rate capability	> 3 million count per second
Guaranteed energy resolutions	1 kcps: <130eV (6µs) 100 kcps: < 145eV (0.5µs) and < 170 eV (0,1µs) 1 Mcps: < 190 eV
Preamplifier	Transistor reset type included in the detector Gain 6 mV/keV (adjustable on request)
Alarm card	For automatic HV shutdown Included in the probe housing
Typical high voltage	-1000V
Connections	Cables supplied: - High voltage input (SHV) - Signal output (BNC) - Preamplifier power (DB9) - Cooler controller (DIN5) These connectors can be customized on request.
Cable length	3.5 (can be adjusted on request)

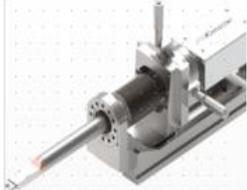
多元HPGe探测器主要性能

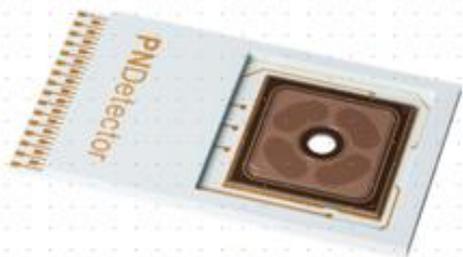
Table 2: Main Specifications of the detector

Parameters	Requirement
Optimized working energy range	3.5–45 keV
Crystals	Germanium
*Number of pixels	25
*Crystal Active Area (one pixel)	$\geq 8\text{mm} \times 8\text{mm}$
Detector sensitive thickness	0.2mm - 1mm
Window material	$>20\mu\text{m}$ thick beryllium
*Maximum input count rate	$>1\text{Mcps}$ for each pixel
*Energy resolution (FWHM) @ 5.9 keV	$< 230\text{eV}$, 100kcps; $< 160\text{eV}$, 1kcps, for at least 23 pixels
Peak to background ratio (at optimized resolution)	>1000 for each pixel
The cryostat	Low noise electrical cooling

SDD各厂家性能

制造商	国家	型号	有效探测面积 (mm ²)	能量分辨: MnKa- 100Kcps/1Mcps	报价
Bruker	德国	X-Flash@ 5040/6040	40	<123ev App.140ev	150,000美元
SGX	英国	SiriusSD [®] XRF400i	10 -170	<137ev <170ev	86,700英镑
Hitachi	美国	Vortex @ME4 (4元)	200	<140eV <230ev	129,000美元

	<p>Rococo1</p> <p>60mm² active area 127 eV FWHM @ Mn-Kα, -25 °C 49 eV FWHM @ C-K, -25 °C > 15 000 P/B ratio for all 4 elements</p> <p>Request Datasheet</p>		<p>Rococo2 Preamplifier Module</p> <p>for XRF & EDX</p> <p>Request Datasheet</p>		<p>The Rococo2 System</p> <p>for XRF & EDX</p> <p>Request Datasheet</p>
---	--	---	---	---	--



多通道 SDD 模块组

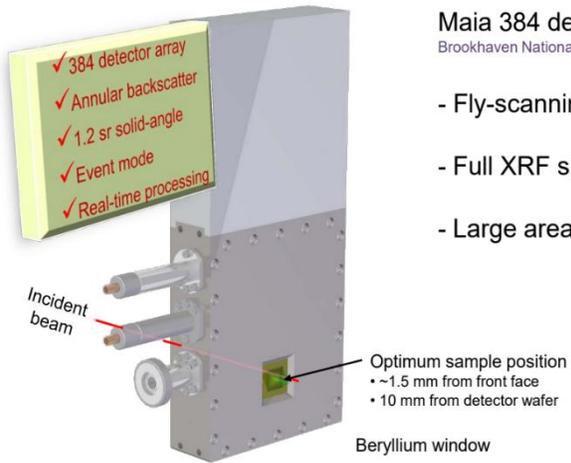
The Unique Rococo Detector

A monolithic annular 4-channel SDD

- ❖ 能量分辨率可低至 $125\text{eV} @ \text{Mn-K}\alpha$
- ❖ 单片环形4通道SDDs, 大立体角值(1.8sr), 大大减少测量时间
- ❖ 环形探测器的几何形状使样品的三维可视化成为可能
- ❖ 高达 4Mcps (ICR) 的高计数率能力
- ❖ 适用于快速分析敏感样品的XRF系统和同步辐射应用

Maia 背散射荧光探测器

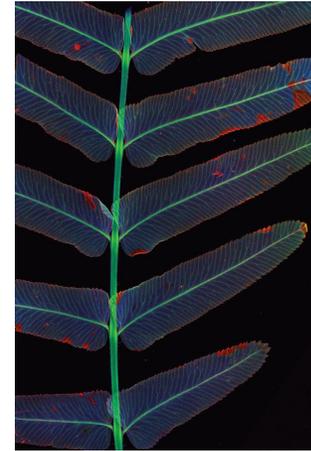
由BNL与澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 联合开发



Maia 384 de
Brookhaven Nationa

- Fly-scannir
- Full XRF s_i
- Large area

	Maia探测器
模式	背散射
最小能量	2.0 keV
探测单元数	384
接收角	1.2sr
计数率	>10M/s
能量分辨率	275 eV



Maia image 58 × 85 mm²,
2901 × 4251 pixels (12 M pixels, each 2 ms,
20 μm), acquired at 15.8 keV
incident energy on the XFM

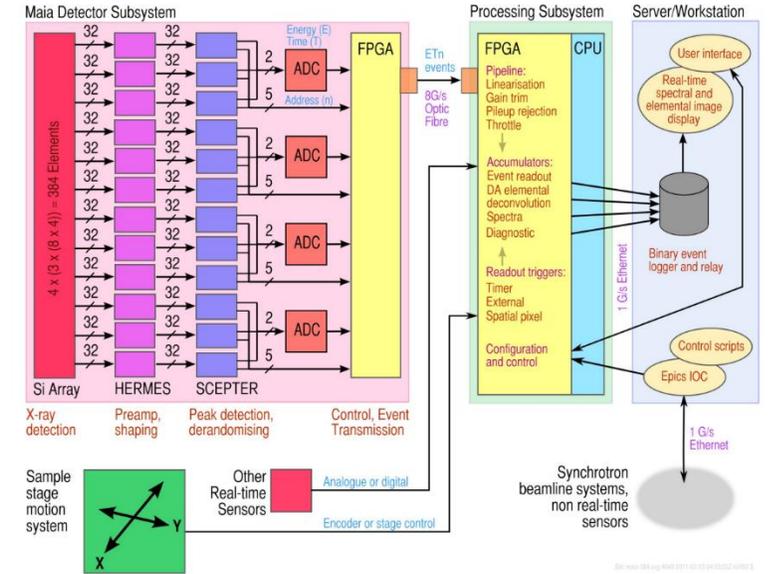
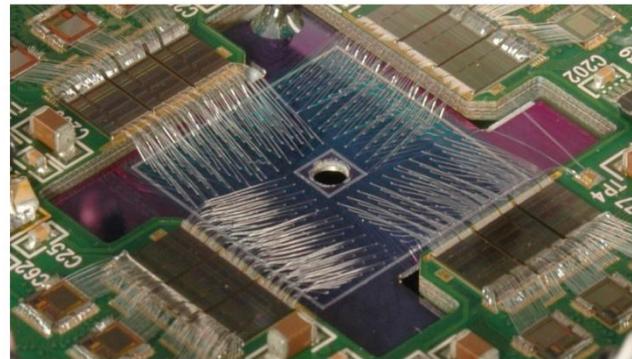
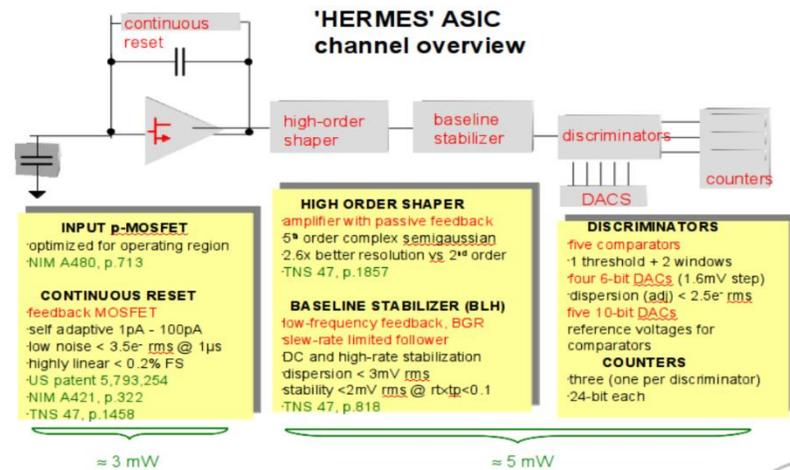


Figure 1. Functional block diagram of the Maia system.



- 384 个探测单元阵列，每个 1 mm × 1 mm，Si 层厚度 400um，中心开孔直径 2.4 mm；
- 每个单元都有一组低噪声电荷放大和脉冲整形器
- 峰值检测器和去随机化电路

1

同步辐射的光谱与探测器分类

2

能谱探测器

4

衍射探测器

5

成像探测器

6

自由电子激光探测器进展

点探测器 (闪烁体)

BEDE 点探测器

探测范围: 5 keV - 100 keV

计数速率: ~ 10 MHz

采集时间: 亚秒

探测元素: $\text{YAlO}_3(\text{Ce})$



HUBER Diffraktionstechnik
GmbH & Co. KG

NaI 点探测器

探测范围: 5 keV - 100 keV

计数速率: ~ 10 MHz

采集时间: 亚秒

探测元素: NaI (TI) 闪烁辐射探测器

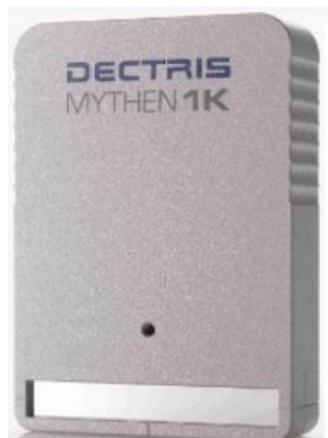


<https://www.mirion.com/products/scintillation-czt-detectors-options>

Mythen 线型探测器 (瑞士 Dectris)

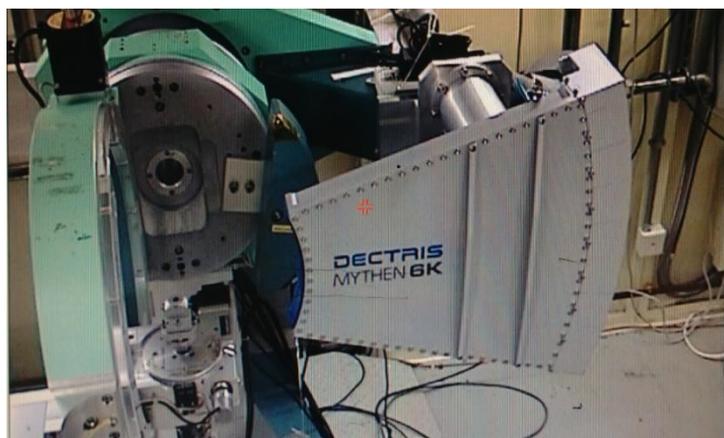
Mythen I

探测器元素: Si
读取时间: 0.3 ms
计数率: $> 1 \times 10^6$ X-rays/s
像素点尺寸: $50 \mu\text{m} \times 8000 \mu\text{m}$
重量: 280 g
动态范围: 24 bits

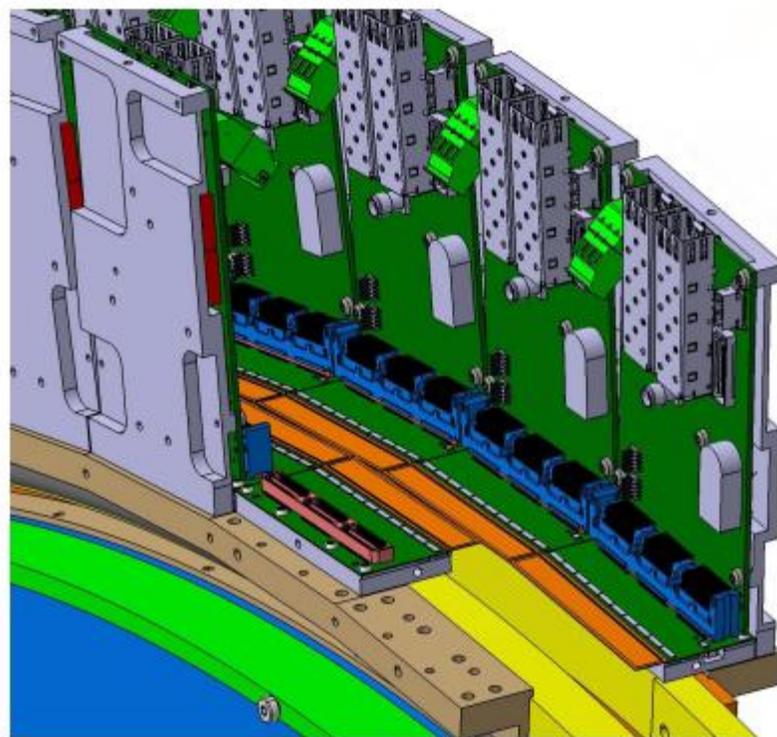


Mythen II

探测器元素: Si
探测范围: 4 to 40 keV
读取时间: 89 μs
计数率: $> 1 \times 10^7$ X-rays/s
像素点尺寸: $50 \mu\text{m} \times 8000 \mu\text{m}$
动态范围: 24 bits
帧频率: 1000 Hz



Mythen III 线型探测器



进一步扩展能量范围和较低的阈值，尚在MS - X04SA@PSI测试阶段

二维探测器

探测器类型	主要指标	供应商	备注
成像板 Image Plates	像素在100 μm 或以上 读出时间较长 (30s)	MAR345 Fuji	Photosensitive rigid or soft phosphor (e.g., BaFBr :Eu ³⁺)
CCD	像素在100 μm 以下 读出时间较快 (2.5s) 动态范围 16 bit	Rayonix Rigaku Princeton	Fiber-coupled phosphor (with demagnification) to Charge Coupled Device
平板探测器 Flat Panel	像素一般在100-200 μm 帧率高10fps 动态范围12-16 bit 面积大43cm	Perkin-Elmer (VAREX) THALES Canon KONICA MINOLTA Trixell (Pixium) Dexela 奕瑞 (iRay)	闪烁体 Amorphous Silicon – CsI:Tl
混合像素探测器 Hybrid Pixel	像素75、55 μm 读出时间<1ms或无 高帧率几百fps以上 高动态范围	DECTRIS (Pilatus3 X CdTe) X-SPECTRUM (LAAMBDA) Pixirad Quantum detectors (Medipix) ImXpad ADSC	单光子 无噪声

mar345S IP探测器

mar345S: <https://www.marxperts.com/products/x-ray-detectors/mar345s>

mar345S 超快成像板 (Image Plate) 探测器是一个在X射线衍射领域广泛应用的理想选择, 可应用于蛋白晶体、小分子晶体、粉末衍射、纹理分析、小角散射等等衍射数据采集。

mar345S主要参数

能量范围: 4-100 keV

探测器直径: 345mm

像素尺寸: a) 150 μm fine and 150 μm fast

b) 100 μm fine and 150 μm fast

c) 100 μm fine and 150 μm fine

动态范围: 17 bits

读出时间: 30s (345mm全扫)



CCD探测器

MX225 CCD 探测器(Rayonix)



主要参数

尺寸: 225 mm x 225 mm (MX 225)

像素尺寸: 73 μ m (3072 x 3072 pixels)

读取时间: 1.0 sec

能量范围: 4-20keV

动态范围: 16 bits

SX165 (Rayonix) :



主要参数

探测器直径: 165 mm

像素尺寸: 80 μ m

动态范围: 16 bits

读出时间: 2.5 s

平板探测器 (Flat Panel)

X 射线平板 (Flat Panel) 探测器在医疗和工业成像领域具有广泛的应用, 由于其成像面积大, 设备轻巧便携, 性价比高, 同步辐射线站也逐渐推广使用。目前国际上有多家X射线平板探测器供应商, 包括Perkin-Elmer(VAREX)、THALES、Canon、KONICA MINOLTA等, 国内奕瑞 (iRay) 也生产同类产品。

Flat Panel主要参数

闪烁体类型: 非晶硅 CsI

探测器面积: 430mm*430mm (17英寸)

像素尺寸: 通常100~200 μm

动态范围: 14~16 bits

最高帧率: ~10fps



混合像素探测器 (Hybrid Pixel)

瑞士DECTRIS开发的PILATUS、Eiger系列混合像素大面积探测器，目前在世界主要同步辐射光源占据着主导地位。



PILATUS3 X CdTe 2M

能量范围: 30-100 keV

探测器面积: $253.7 \times 288.8 \text{ mm}^2$

像素尺寸: $172 \mu\text{m}$

动态范围: 20 bits

最高帧率: 250 Hz

读出时间: 0.95 ms



EIGER2 X 1M

能量范围: 6-40 keV

探测器面积: $77.1 \times 79.7 \text{ mm}^2$

像素尺寸: $75 \mu\text{m}$

动态范围: 16 bits

最高帧率: 2000 Hz

读出时间: 连续读出



EIGER2 XE 16M

能量范围: 6-40 keV

探测器面积: $311.1 \times 327.2 \text{ mm}^2$

像素尺寸: $75 \mu\text{m}$

动态范围: 16 bits

最高帧率: 550 Hz

读出时间: 连续读出

德国X-SPECTRUM LAMBDA 探测器:

德国X-SPECTRUM公司开发了以CdTe为传感器材料的**LAMBDA**高能X光探测器，性能与DECTRIS的系列产品类似，像素相比更低至55 μm 。

LAMBDA系列主要参数

能量范围: 8-150 keV

探测器面积: 可选 (见右表)

像素尺寸: 55 μm

动态范围: max 24 bits

最高帧率: 2000 Hz或更高

读出时间: 1 ms或连续读出

<https://x-spectrum.de/>

SYSTEM	DETECTOR PIXELS	SENSOR AREA	WEIGHT
LAMBDA 60k	256 x 256	14 x 14 mm ²	1.25 kg
LAMBDA 250k	512 x 512	28 x 28 mm ²	1.25 kg
LAMBDA 350k	512 x 768	28 x 42 mm ²	2.3 kg
LAMBDA 750k	512 x 1536	28 x 85 mm ²	2.3 kg
LAMBDA 2M	1536 x 1536	85 x 85 mm ²	8 kg
LAMBDA 7.5M	3072 x 2560	170 x 170 mm ²	21 kg
LAMBDA 10M	4608 x 2560	260 x 175 mm ²	25 kg



LAMBDA **2M**



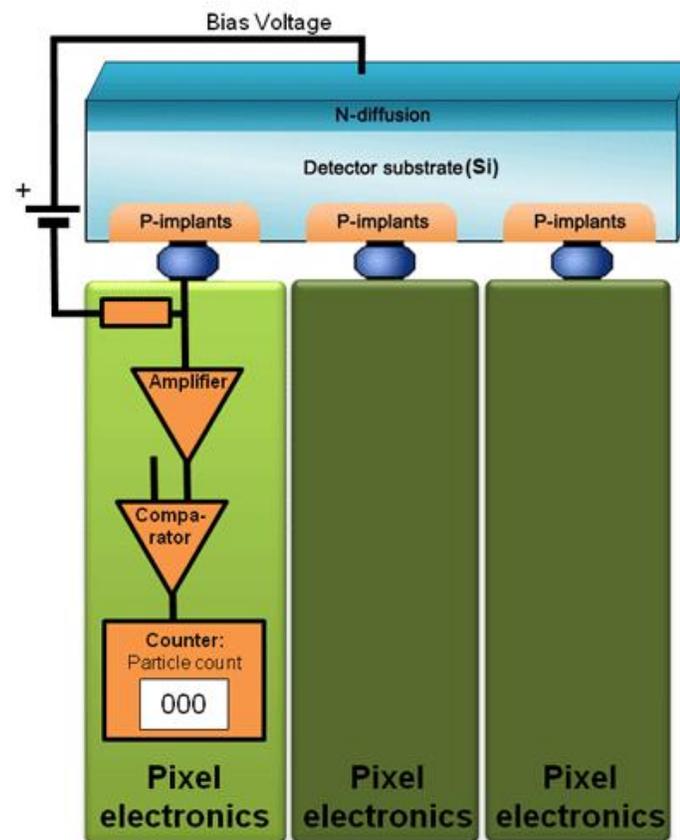
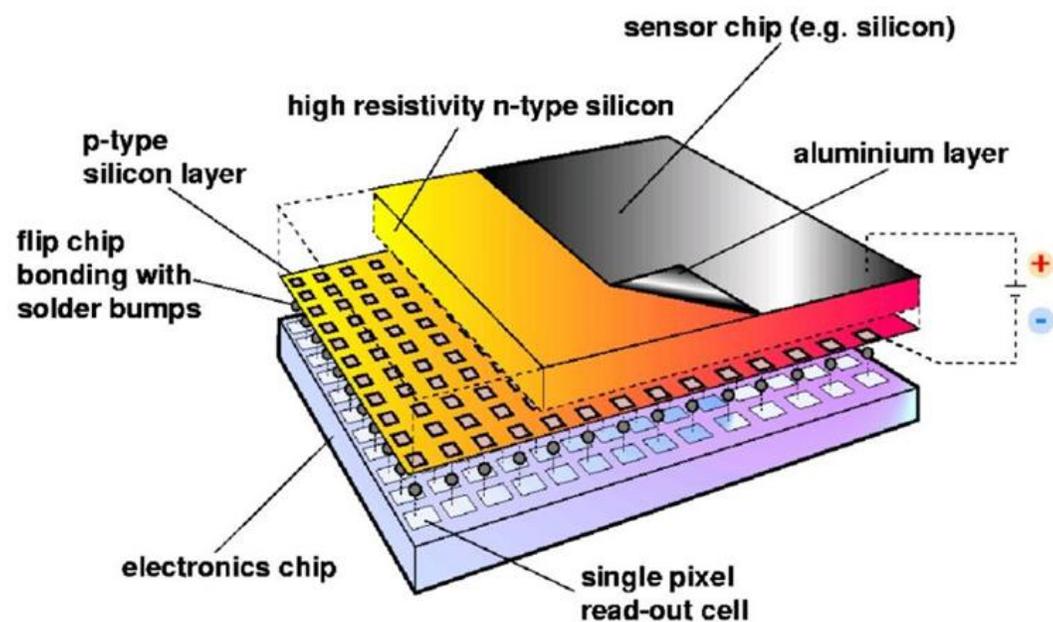
LAMBDA **10M**

混合像素探测器基本原理

总体上可分为2层：

- 传感器 (Pixelated sensor layer)
- 读出芯片 (Readout chip)

传感器和读出芯片采用倒装法，通过焊接金属球粘合在一起，一个焊接球对应一个像素，即通过焊接球实现像素化。每个像素对应读出芯片的一个处理单元。



1

同步辐射的光谱与探测器分类

2

能谱探测器

4

衍射探测器

5

成像探测器

6

自由电子激光探测器进展

X射线成像探测器分类

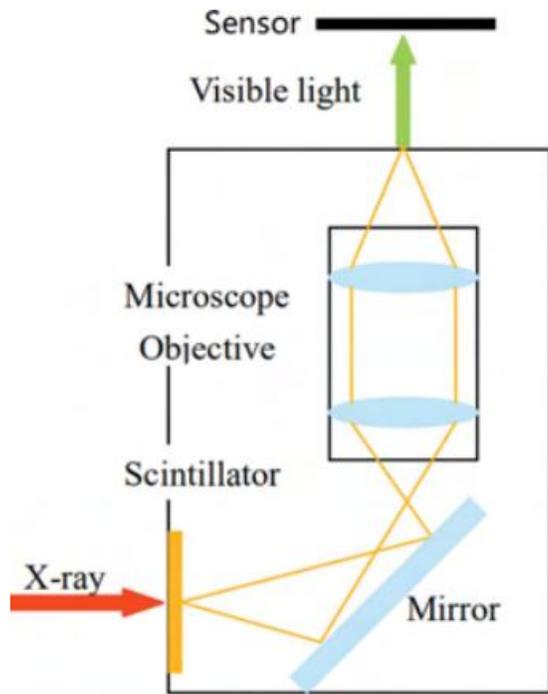
X射线转换类型	信号检测器类型	传感器类型	单像素尺寸(μm)	探测器技术	光组件耦合结构
间接转换探测器 (X射线-可见光)	图像传感器	CCD	5-15	闪烁体+CCD	直接耦合/间接耦合
		ICCD	15-100	闪烁体+MCP+CCD	间接耦合
		EMCCD	10-20	闪烁体+CCD+增益寄存器	直接耦合/间接耦合
		CMOS	5-15	闪烁体+CMOS	直接耦合/间接耦合
		sCMOS	5-15	闪烁体+sCMOS	直接耦合/间接耦合
	平板探测器 (FP)	非晶硅	100-200	闪烁体+非晶硅+TFT	直接耦合
		氧化物-IGZO	100-200	闪烁体+非晶硅+IGZO	直接耦合
直接转换探测器 (X射线-电信号)	图像传感器	半导体-光子计数 (混合像素探测器)	50-200	CdTe/CZT/CdSe/单晶硅+CMOS	/
	平板探测器 (FP)	非晶硒	100-200	非晶硒+TFT	/

间接转换探测器：通过闪烁体材料吸收X射线并转化为荧光信号，之后通过光电传感器将荧光信号转化为电信号。造价便宜、性能稳定且响应速度快，适用于动态扫描检测。光组件耦合结构分为直接耦合和间接耦合（光纤或光学系统）。

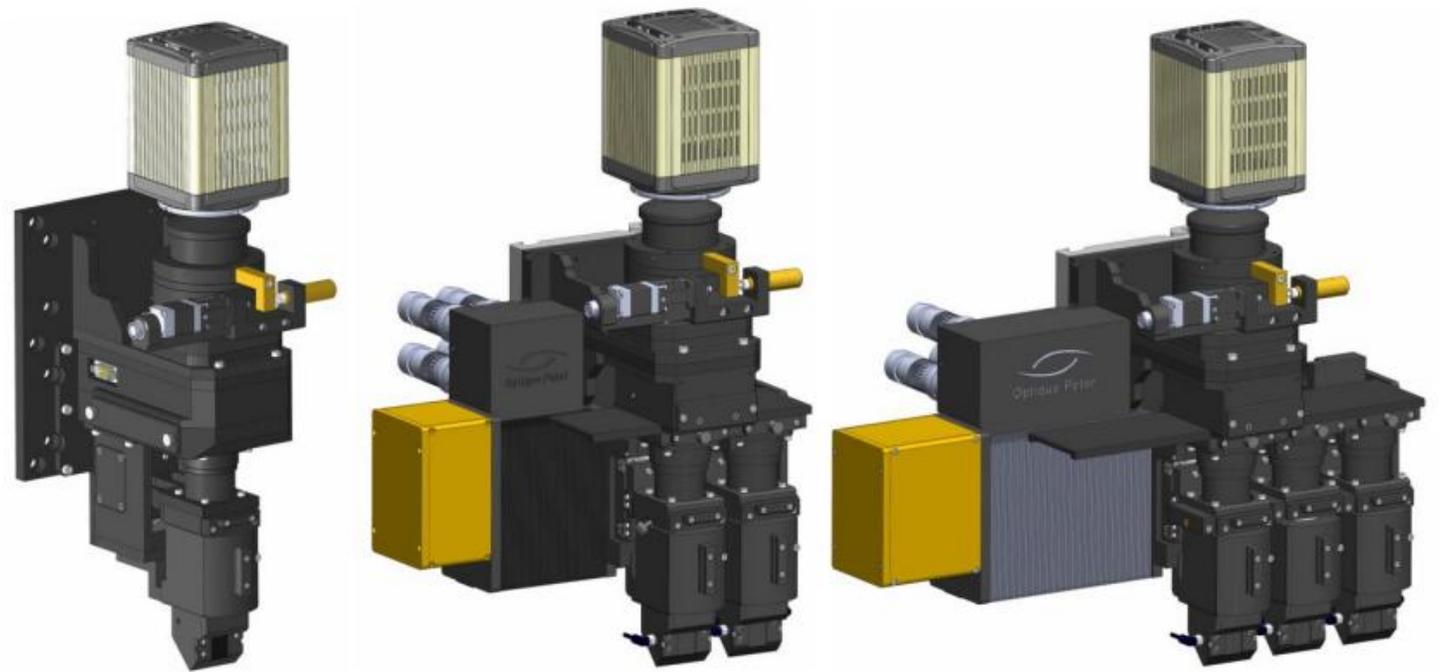
直接转换探测器：光电转换层直接将X射线转化为电信号，可以避免X射线转换成可见光过程中产生的散射和损失，同时可以降低X射线剂量辐射，减少图像清晰度损失，具有较高的空间分辨率，延迟或残影小，如非晶硒探测器具有最优的MTF值。

CCD：电荷耦合器件（Charge Coupled Device）；**ICCD：**增强型电荷耦合器件（Intensified Charge Coupled Device）；**EMCCD：**电子倍增型CCD；**CMOS：**互补金属氧化物半导体（Complementary Metal Oxide Semiconductor）；**sCMOS：**科学CMOS；**IGZO：**铟镓锌氧化物（indium gallium zinc oxide）；**TFT：**薄膜晶体管（Thin Film Transistor）；**CdTe：**碲化镉；**CZT：**碲锌镉；**DRF：**动态DR；**MTF：**调制传递函数（Modulation Transfer Function）；**MCP：**微通道板（像增强器）

透镜耦合原理与电动可变物镜光学转换系统



高能X光L型光学耦合系统



Optique Peter 光学转换系统：单物镜、双物镜、三物镜系统，使用滨松 Orca Flash 4.0 sCMOS相机。

Rigaku Xsight Micron LC透镜耦合探测器



Xsight™ Micron LC Camera and Lens Unit



典型应用：

- ◆ X射线微米/亚微米显微成像
- ◆ x射线断层扫描
- ◆ x射线计量
- ◆ x射线成像

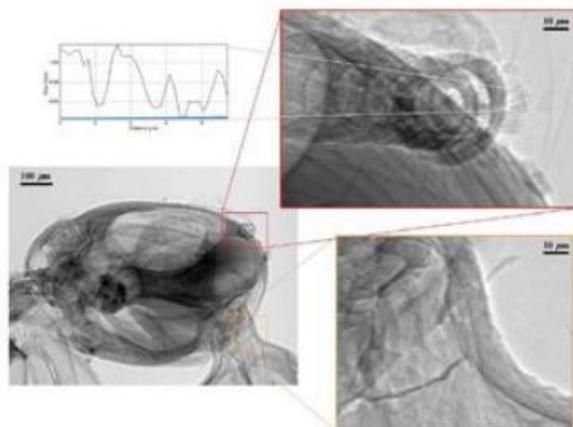


Image of ant head taken by 270 nm pixel array camera.

参数	Xsight™ Micron LC X-ray CCD camera	Xsight™ Micron LC X-ray sCMOS camera
芯片类型	CCD	sCMOS
像素数	3300 x 2500	2048 x 2048
视场	Selectable: from 0.90 mm (H) x 0.68 mm (V) to 14.40 mm (H) x 10.80 mm (V)	Selectable: from 0.67 mm (H) x 0.67 mm (V) to 10.64 mm (H) x 10.64 mm (V)
空间分辨率	According to selected field of view: From 0.4 μm to 7 μm	According to selected field of view: From 0.5 μm to 7 μm
能量范围	5-30KeV	5-30KeV
读出噪声	7.5e- RMS	1.4e- RMS
暗电流	0.001 e-/pix/s @ -30°C	0.14 e-/pix/s @ 0°C (风冷) 0.04e-/pix/s @ -10°C (水冷)
帧率	~3 fps	~40 fps
动态范围	2800:1	21400:1

CCD探测器：闪烁体+CCD、直接耦合/间接耦合

	传感器像素结构	电子迁移率	空间分辨率	电子噪声	首帧延迟	量子探测效率 (DQE)	最大动态范围	有效成像面积
CCD	CCD+放大器	$\sim 7\text{cm}^2/\text{VS}$	优	优	中	良	优	良
ICCD	微光像增强器+CCD+放大器	$\sim 7\text{cm}^2/\text{VS}$	良	优	中	良	优	良
EMCCD	CCD+增益寄存器	$\sim 7\text{cm}^2/\text{VS}$	优	优	中	优	优	良

主要优劣势： CCD 与 CMOS 相比具有分辨率更高、灵敏度高、噪声小等优点，但成本高，而且集成度稍低； ICCD 和 EMCCD 具有更高的探测灵敏度； ICCD 具有纳秒级的门宽实现高时间分辨，可以做瞬态成像； EMCCD 只能实现毫秒级时间分辨。 ICCD 强光容易损伤像增强管，需要注意保护， EMCCD 尽量避免饱和即可。 ICCD 的微通道板和荧光屏会降低空间分辨率； EMCCD 空间分辨率只取决于像素大小，比 ICCD 分辨率高，适合于生命科学领域；

主要厂家： 富士公司、索尼、 ADSC (Area Detector systems Corporation) 公司、 PHTONIC SCIENCE 公司以及日本滨松

ICCD探测器：闪烁体+CCD、直接耦合/间接耦合



Photonic Science: X射线ICCD_18

Sensor Resolution	1360 x 1080 at 6.45 μ m pitch
Frame rate (fps)	7.5
Dynamic range	Intrascene 10 ⁸
Intensifier input size (mm)	18
Intensifier resolution (lp/mm)	60 single MCP, 30 dual MCP
Photocathodes	Bi-alkali, Multi-alkali (Gen 2) and GaAs (Gen 3) ¹⁰⁴
Intensifier gain (single MCP)	10 ⁴
Intensifier gain (dual MCP)	10 ⁶
Phosphor screen	P43 or P46
Minimum gate speed (ns)	3
Gate repetition rate (kHz)	300
In camera corrections	bright pixel, offset, flatfied
Camera interface	GigE, HD-SDI

非晶硅平板探测器 (FP) : 闪烁体+非晶硅+TFT、直接耦合

	传感器像素结构	电子迁移率	空间分辨率	电子噪声	首帧延迟	量子探测效率 (DQE)	最大动态范围	有效成像面积
非晶硅	非晶硅 PD+TFT开关	1cm ² /VS	中	中	中	中	优	优

主要优劣势: 非晶硅探测器TFT 阵列成像面积大，密度分辨率较高、技术成熟、环境适应性好、低成本。但动态成像差、噪声大、空间分辨较低。短时间内仍是静态平板探测器和大尺寸动态平板探测器的主流选择。

主要厂家: 厂家众多，如GE、泰雷兹(Thales)、西门子、飞利浦、Trixell、万睿视(Varex)、佳能(Canon)医疗、锐珂(Carestream)、富士(Fujifilm)、柯尼卡(Konica)、爱克发(Agfa)、韩国Viewworks、Rayence、、上海奕瑞、江苏康众

非晶硅平板探测器：闪烁体+非晶硅+TFT、直接耦合

VAREX万睿视：PaxScan 4336Wv4



Technical Specifications

Receptor Type Amorphous Silicon with TFT/PIN diode Technology
Conversion Screen CsI

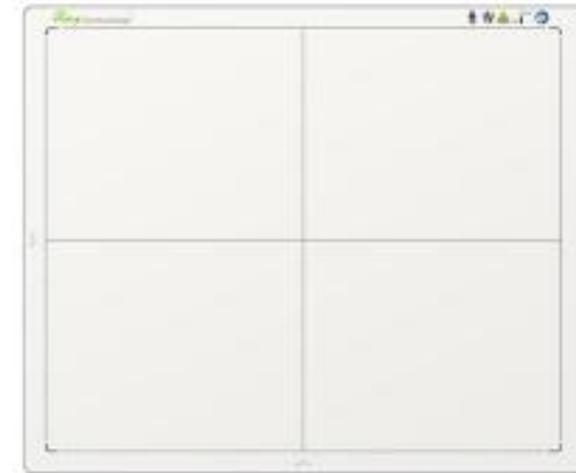
Pixel Area

Total 42.7 (v) x 34.4 (h) cm (16.8 x 13.5")
Active (CsI) 42.4 (v) x 33.9 (h) cm (16.6 x 13.3")

Pixel Matrix

Total 3,072 (v) x 2,476 (h)
Active (CsI) 3,032 (v) x 2,436 (h)
Pixel Pitch 139 μ m
Limiting Resolution 3.6 lp/mm
Automatic Exposure Detection (AED) via vTrigger

上海奕瑞：非晶硅平板探测器 Mars 1417V

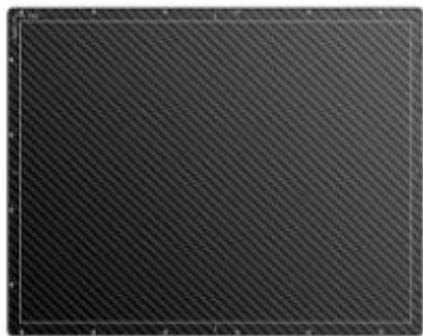


探测器类型	非晶硅
闪烁体类型	CsI
有效成像面积 (inch)	17 × 17
像素尺寸 (μ m)	139
空间分辨率 (lp/mm)	3.6
AD转换位数 (bit)	16

氧化物-IGZO平板探测器：闪烁体+ IGZO、直接耦合

	传感器像素结构	电子迁移率	空间分辨率	电子噪声	首帧延迟	量子探测效率 (DQE)	最大动态范围	有效成像面积
氧化物-IGZO	非晶硅 PD+IGZO 开关	20-50 cm^2/VS	优	良	良	良	优	优

主要优劣势：IGZO电子迁移率是非晶硅的20到50倍，可大大缩小晶体管尺寸，增加像素密度，改善低剂量DQE，因此有**更高空间分辨率和高扫描速率**，同时有**大尺寸、信噪比高、成本低**等特点，是理想的大尺寸高速动态平板探测器，主要应用于**高速、大尺寸动态平板探测器**，如DSA、动态DR等。



上海奕瑞：氧化物高速动态平板探测器



LG：氧化物TFT平板探测器14HQ901G

CMOS探测器：闪烁体+ CMOS、直接耦合/间接耦合

	传感器像素结构	电子迁移率	空间分辨率	电子噪声	首帧延迟	量子探测效率 (DQE)	最大动态范围	有效成像面积
CMOS	单晶硅 PD+CMOS放大器	1400cm ² /VS	良	中	优	优	良	良
sCMOS	单晶硅 PD+sCMOS放大器	1400cm ² /VS	优	优	优	优	优	良

主要优劣势： CMOS 则具有**更高读取速度**、集成度更高、功耗低、分辨率相对较高、低剂量等优点，但成本高，图像传感器面积小，图像传感器可通过透镜、光纤光锥等光学器件的耦合实现大面积闪烁层与小面积图像传感器的光学匹配。主要应用于**高帧速率、中小尺寸的动态平板探测器**；sCMOS规避了传统 CMOS 芯片高暗电流、高读出噪声、低填充因数和一致性差等缺点，继承了 CMOS 高速、低消耗等优点，同时，革命性的变化是动态范围方面更优，更适合用在需要**高时空分辨率下对动态事件捕获**的研究方面。

主要厂家： 日本滨松、OmniVision、Dalsa和万睿视是目前全球最大的CMOS探测器制造商，江苏康众、成都善思微和上海奕瑞也掌握该技术并具备量产能力。其中，成都善思微研制了第一款国产CMOS平板探测器并已实现量产，技术国内领先。随着图像传感器技术的发展CDD与CMOS之间的差异将逐渐减少。sCMOS 芯片是由德国 PCO、美国仙童、英国安道尔等公司联合开发的。加拿大 QImaging、美国 AOS、Vision Research、英国 ix cameras、日本滨松、合肥君达高科、常州达奇医疗也有相关产品。

闪烁体：可分为碘化铯(CsI)和硫氧化钆(GdOS)

- 1) 与CsI不同，GdOS不需要长时间蒸镀沉积过程，生产工艺简单，产品稳定可靠，成本较CsI低20%—30%；
- 2) 相较于GdOS，针状CsI晶体的X射线转换效率高30%—40%，横向光扩散也更小，具有更高的空间分辨率。因此，CsI平板的DQE更高，成像更清晰。
- 3) 在闪烁体材料方面，我国没有**GdOS**闪烁体材料，主要来自日本；江西东鹏新材料已经生产出纯度高达**99.999%**的碘化铯晶体粉末，实现了独立自主。
- 4) 在闪烁体制备方面，江苏康众是我国最早研制出碘化铯探测器的企业，上海奕瑞是我国最早开发出**GdOS**探测器的厂家，二者均掌握碘化铯直接生长技术，目前几乎接近国际先进水平。

在闪烁体领域，**CsI**凭优异的性能，将进一步挤占**GdOS**的市场份额。

CMOS探测器：闪烁体+ CMOS、直接耦合/间接耦合

日本滨松： sCMOS相机c15606



FEATURES

- Wide field of view: 25.344 mm × 14.256 mm
- Effective number of pixels: 4608(H) × 2592(V)
- Frame rate: 121 frames/s
(Standard Full Well Capacity mode, full resolution)

APPLICATIONS

- X-ray Micro CT
- High resolution X-ray imaging
- X-ray diffraction

Product number		C15606-101P	C15606-102P
Imaging device		Scientific CMOS image sensor	
Effective number of pixels		4608(H) × 2592(V)	
Pixel size		5.5 μm(H) × 5.5 μm(V)	
Effective area		25.344 mm(H) × 14.256 mm(V)	
Scintillator	Material	GOS(P43)	
	Thickness	10 μm	20 μm
FOP		1:1	
Cooling method		Air cooled (Peltier cooling + Forced-air cooled), Water cooled	
Cooling temperature	Air cooled (Ambient temperature: +25 °C)	+30 °C	
	Water cooled (Water temperature: +25 °C)	+30 °C	
Dark current (typ.)		20 electrons/pixel/s (air cooled, Cooling temperature: +30 °C)	
Binning		2×2, 4×4	

Photonic Science: X-ray sCMOS 37.7MP



Resolution	6144 x 6144
Input size (mm)	87 diameter 61.44 x 61.44
Input pixel size (μm)	10
Dynamic Range	30,000:1 in binning 1:1
Frame rate	11 fps at full resolution in binning 1x1
Full well capacity	>120,000 electrons in binning 1x1
Read Out Noise	<4 electrons in binning 1x1
Quantum Gain	21 electrons / 8keV X-ray photon
Dark current	<0.1 electron/pixel/second
Sensor Temp (deg °C)	Operating at -40°C with water cooling
Digitization	16-bit
Peak QE	72% at scintillator emission wavelength (without microlens)
Exposure	80 microseconds up to 600 seconds
Spacial Resolution (μm)	<30 μm FWHM with GdOS:Tb <70 μm FWHM with CsI:Tl
Detector Interface	10 Gigabit Ethernet Genicam compliant
Energy Range	1keV - 55keV with Gadox:Tb 20keV - 300keV with CsI

美国FLIR(原Point Grey): <https://www.flir.com/>

美国红外热成像巨头菲力尔公司（FLIR System,inc.），FLIR于2016年完成收购原Point Grey业务。

GS3-U3-23S6M主要参数（APS GSECARS）

传感器：CMOS

分辨率：1920*1200 pixel²

像素尺寸：5.86 μm

动态范围：12 bits

最高帧率：163fps

曝光时间：5μs to 31.9s



德国PCO公司: <https://ca.pco-tech.com/>

德国PCO公司pco.edge系列相机在同步辐射线站具有广泛应用。

Pco.edge 5.5 主要参数 (PETRA-III P61B)

传感器: sCMOS

分辨率: 2560*2160 pixel²

像素尺寸: 6.5 μm *6.5 μm

动态范围: 16 bits

最高帧率: 100fps

曝光时间: 10μs to 2s



3. 高能成像相机

日本Hamamatsu: <https://www.hamamatsu.com/>

日本Hamamatsu是世界上开发广泛的光传感器和光源的公司之一，制造的组件不仅可以测量并产生可见光，而且还可以测量并产生超低，紫外，红外和X射线光。Hamamatsu的光传感器和光源组件也可以作为带有专用电路的模块和单元使用。这些设备可以并入开发的系统中，例如光学测量系统，成像系统和图像分析系统。这些产品的用途广泛，从智能手机等日常技术到支持尖端学术研究的测量仪器。

C13440-20CU关键参数 (SPring-8)

传感器: sCMOS

分辨率: 2048*2048 pixel²

像素尺寸: 6.5 μm *6.5 μm

动态范围: 16 bits

最高帧率: 100 fps

曝光时间: 5μs to 31.9s



非晶硒探测器：非晶硒+TFT

	传感器像素结构	电子迁移率	空间分辨率	电子噪声	首帧延迟	量子探测效率 (DQE)	最大动态范围	有效成像面积
非晶硒	非晶硒 PD+TFT开关	7-10cm ² /VS	优	优	良	中	中	优

主要优劣势：直接转化、动态成像好、具有更好空间分辨率；但对X射线的吸收性能差，受热结晶会导致性能衰减，探测器启动偏压电场高达数千伏，使用寿命不长，维护成本高。对于温度非常敏感，非晶硒薄膜做不厚，不适合高能X射线的探测，多在乳腺X射线成像领域。

主要厂家：美国Hologic独有技术，还在专利保护期。



Analogic (ANRAD) : 非晶硒平板探测器 AXS-2430

光子计数探测器：CdTe/CZT/CdSe/单晶硅+CMOS

	传感器像素结构	电子迁移率	空间分辨率	电子噪声	首帧延迟	量子探测效率 (DQE)	最大动态范围	有效成像面积
光子计数	半导体 PD+CMOS放大器	1050cm ² /VS	中	优	中	中	优	中

主要优劣势：光子计数探测器基于半导体材料，能够实现射线多能谱采样成像，可以实现真正意义上的零噪声和更高的空间分辨率和密度分辨率。但成像面积小，价格过于昂贵。

主要厂家：DECTRIS、GPS、万睿视、佳能。

国内，深圳帧观德芯基于单晶硅实现面阵光子计数探测器量产，极大降低光子计数探测器成本，并应用在自家乳腺机。

半导体-光子计数探测器：CdTe/CZT/CdSe/单晶硅+CMOS



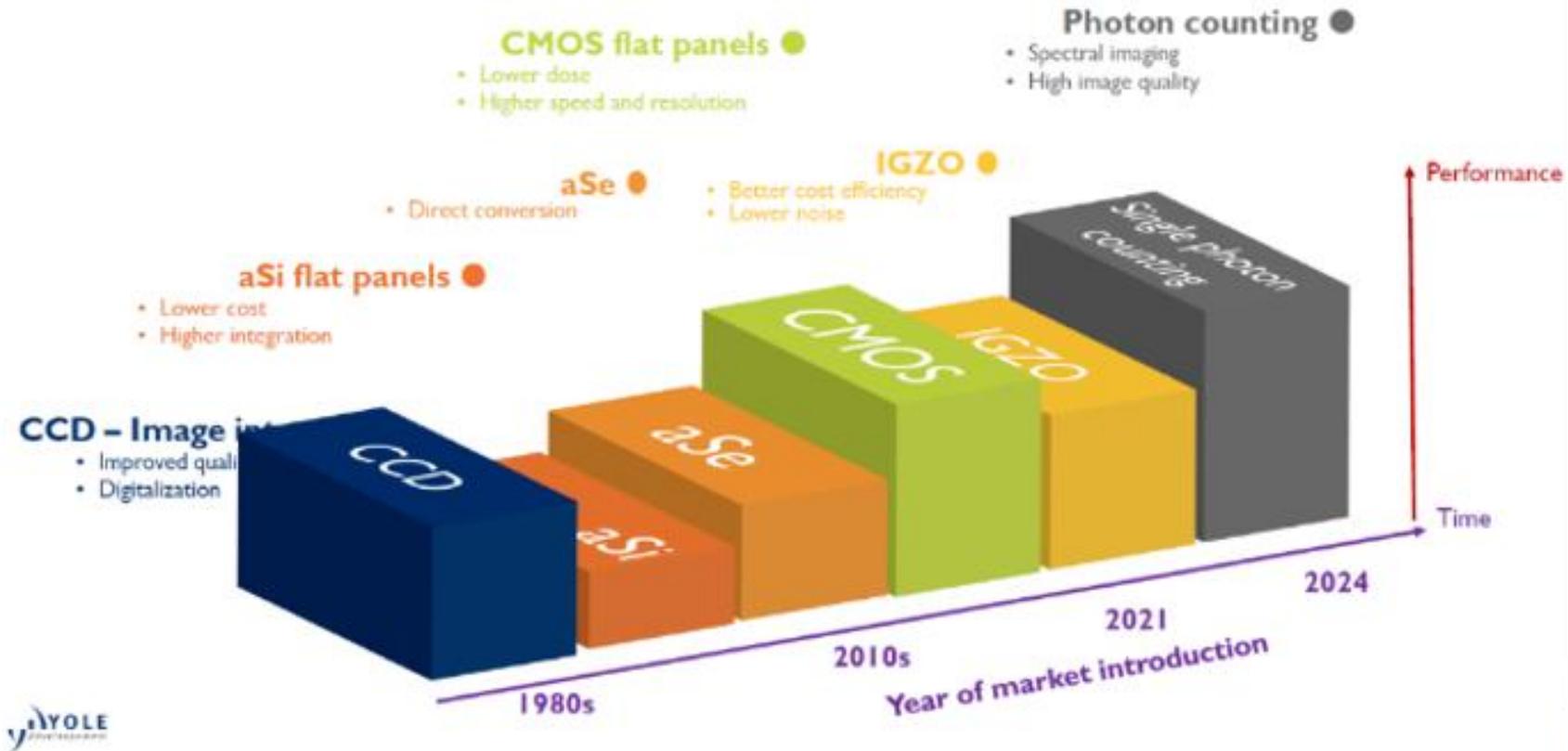
万睿视：CdTe光子计数探测器DC-TDIX



DECTRIS：CdTe光子计数探测器PILATUS3 R

X射线成像探测器发展历程

X-RAY TECHNOLOGY - COMMERCIAL ROADMAP



混合像素探测器具有非常大的应用潜力，国内外都在积极探索。

1

同步辐射的光谱与探测器分类

2

红外与X射线能谱探测器

4

衍射（散射）探测器

5

成像探测器

6

自由电子激光探测器进展

自由电子激光探测器需求

高重频面探测器: 美国DOE、德国DESY、瑞士PSI

低温超导探测器: 美国NIST/NASA、欧洲ESA-SRON

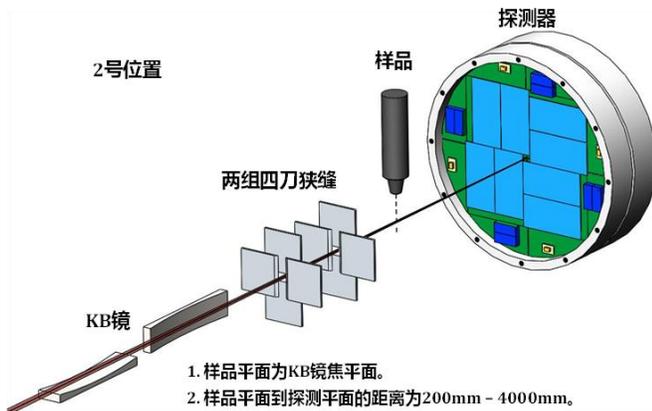
高帧频成像需求-面探测器

方法学:

- ✓ 相干衍射成像
- ✓ 串行晶体学
- ✓ 超快谱学

相关线站:

- ✓ CDE、CDS、SFX、HXS、HSS



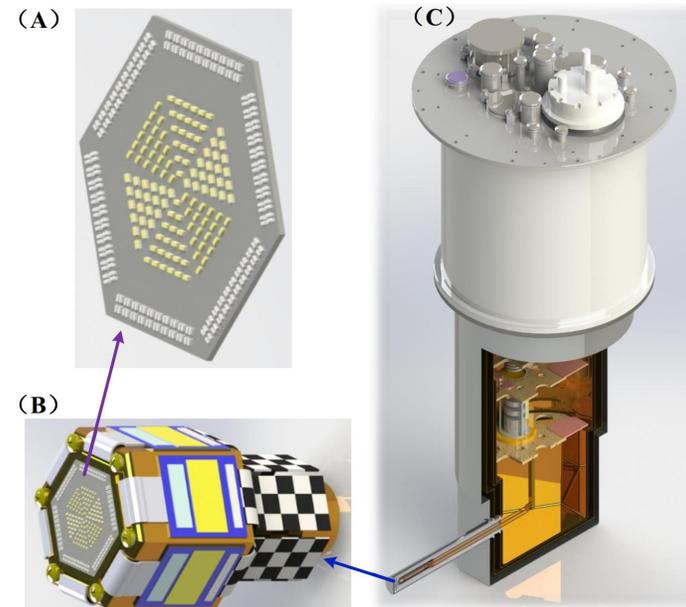
高能量分辨需求-低温探测器

方法学:

- ✓ 超快谱学

相关线站:

- ✓ HXS、HSS



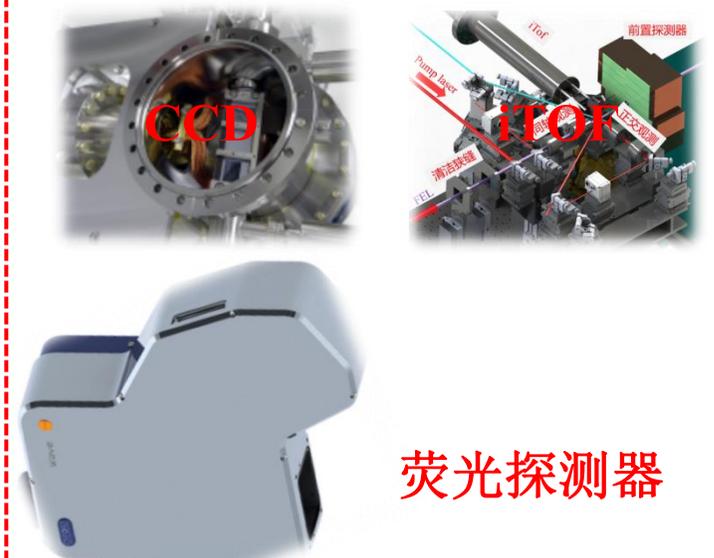
常规探测器需求-探测器应用

方法学:

- ✓ RIXS、相干衍射成像...

相关线站:

- ✓ SSS、CDE、CDS、AMO



高重频FEL面探测器解决方案

国外自由电子激光研制

技术完备探测器：

- ✓ JUNGFRAU：SwissFEL、CW-2.4K帧频、>4M pixel
- ✓ AGIPD：European XFEL、Burst-4.5K帧频

性能待验证探测器：

- ✓ CITIUS：SACLA、CW-5.0K帧频

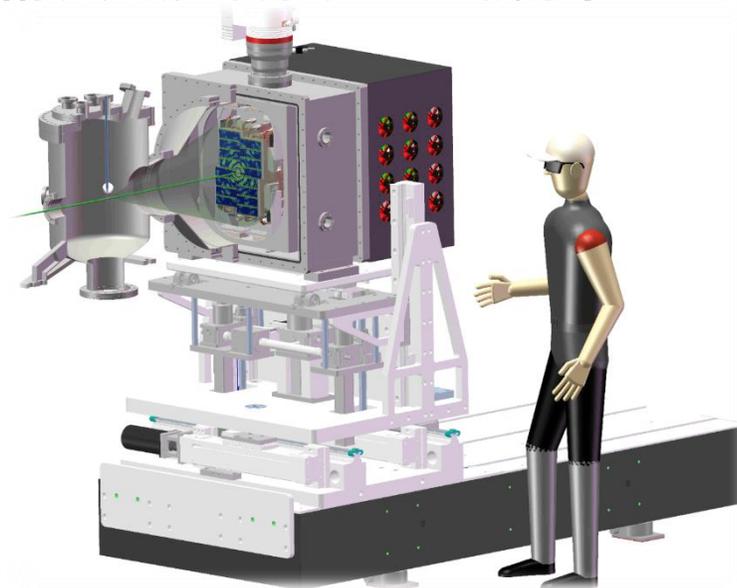


上海SHINE自主研发

市重大专项：

- ✓ 核心传感器芯片：于2021年11月完成验收
- ### 基金委项目

- ✓ 目标为完成整套系统建设：执行中。



低温探测器解-自主研发，工程实施阶段

低温探头：

- X射线传感器芯片
- 前级信号放大器
- 低温封装

制冷系统：

- 制冷机
- 温度控制系统
- 磁场屏蔽系统
- 防振平台
- 真空连接
- 红外滤波窗口

低温信号放大器：

- 4K制冷级的SQUID阵列
- 低温电缆
- 室温端的模拟放大反馈电路
- 数字控制模块

能谱采集和分析系统：

- 模数转换模块
- 触发及数据存储模块
- 信号幅度拟合模块
- 能谱分析模块

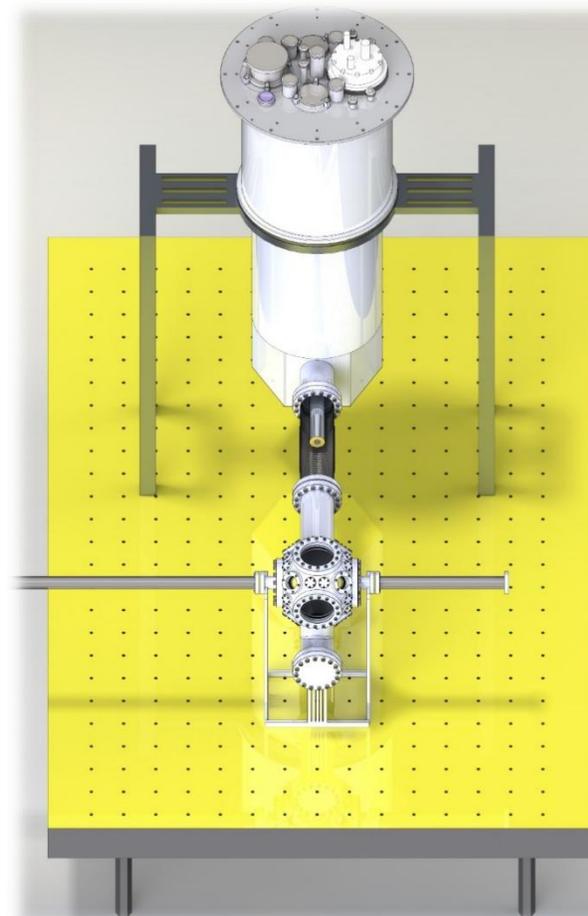
已部署

可部署的成熟商业产品

与实验站测量模式相关的结构

市重大专项：

- ✓ 核心传感器芯片：于2022年6月完成验收。

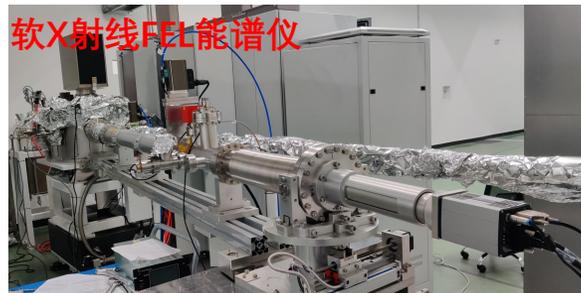
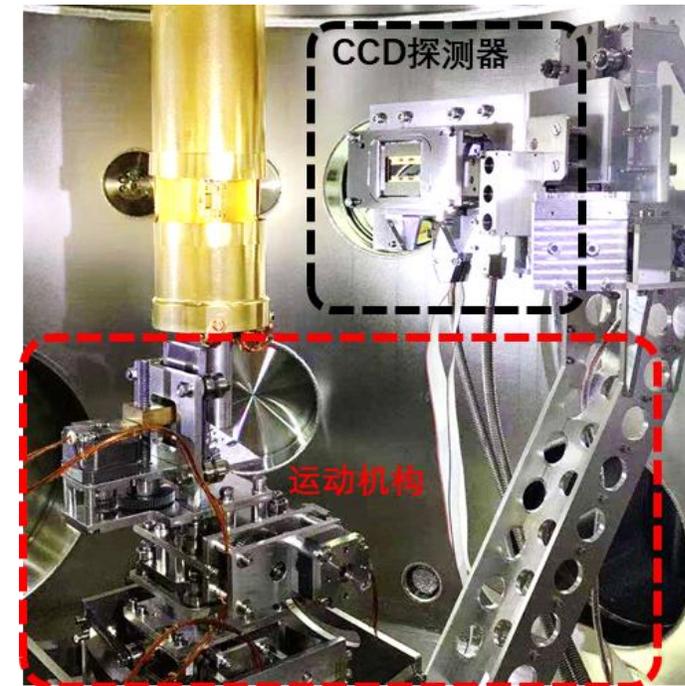


上海软X射线自由电子激光实验站应用的探测器

低重频 (<100Hz)软X射线CCD探测器: 低重频 (<100Hz)

制造商: Greateyes (德国)

型号: GE-VAC 1024 256 series

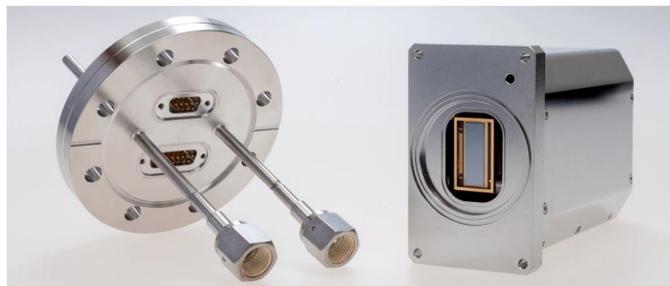


制造商: Andor (英国)

型号: ZYLA-4.2PCL10可见光CCD+闪烁体



型号: Greateye GE 2048 512 BI UV1定制



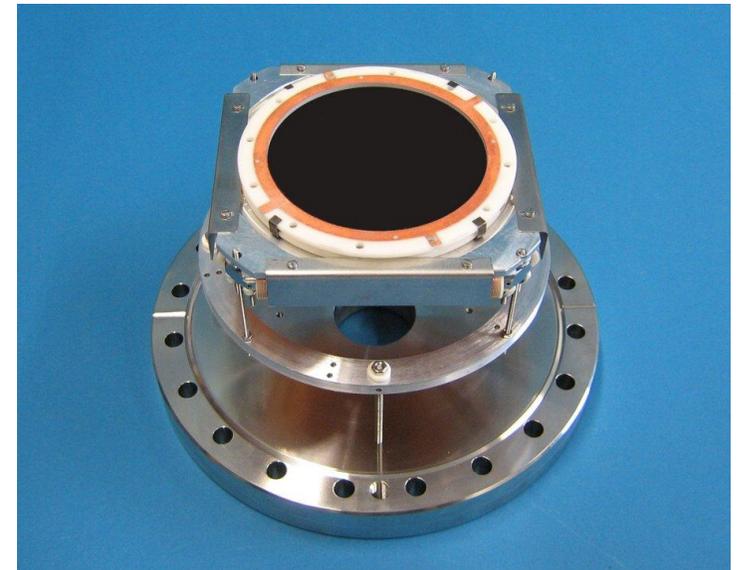
原子电离延迟线阳极探测器

基于MCP的延迟线阳极探测器

<http://www.roentdek.com/detectors/>

空间分辨: 17 μ m (RMS)

时间分辨: <100ps (RMS)



分子动态成像实验站,
离子、电子复合速度成像实验站

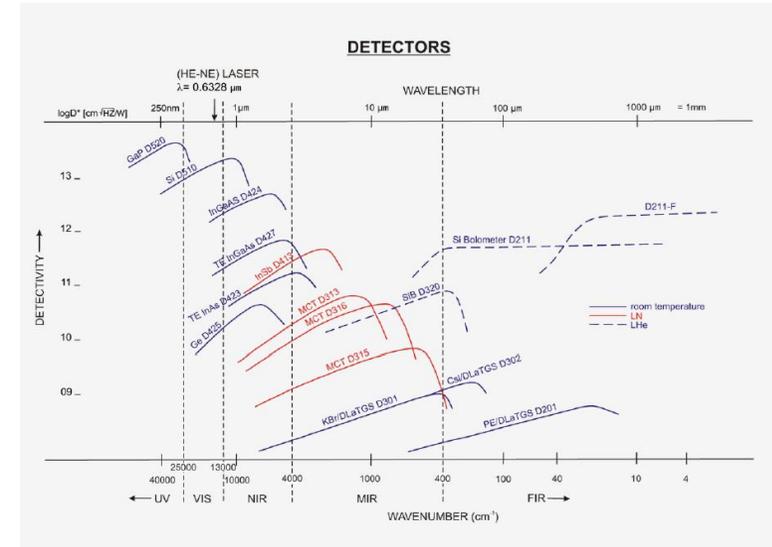
感谢上海光源同事：邓彪、宋龙龙、文闻、郭智、周春银、陈敏、何燕等同事提供资料，共同完成报告。

十分感谢！

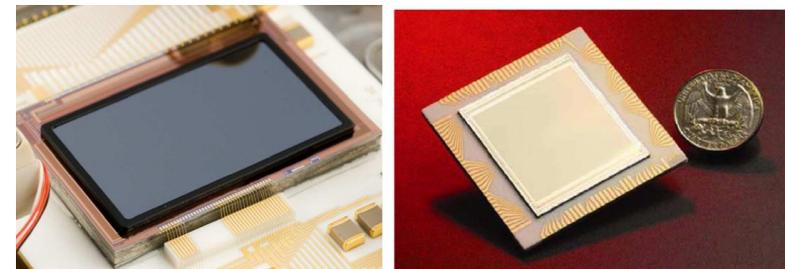
常用中红外高灵敏度探测器：

MCT探测器：是mercury cadmium telluride的英文缩写。采用Hg-Cd-Te半导体材料薄膜，又称光电导检测器。吸收红外辐射后非导电性的价电子跃迁至高能量的导电带，从而降低了半导体的电阻，产生信号。用于中红外及远红外区，需冷至液氮温度(77K)以降低噪声。广泛应用于傅立叶变换光谱仪中。

焦平面阵列探测器：焦平面上排列着感光元件阵列，从无限远处发射的红外线经过光学系统成像在系统焦平面的这些感光元件上，探测器将接受到光信号转换为电信号并进行积分放大、采样保持，通过输出缓冲和多路传输系统，最终送达监视系统形成图像。材料主要有碲镉汞HgCdTe、量子阱QWIP、新型二类超晶格、量子点QDIP等四个材料体系。



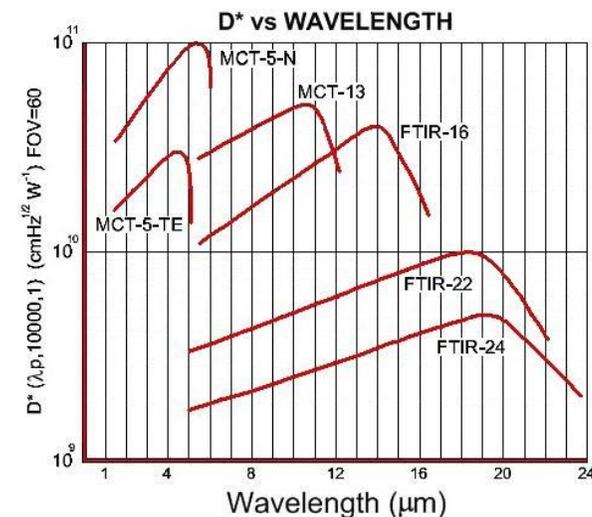
常用红外探测器响应波长范围



(a) (b)
MW(中波)/LW(长波) FPA

主要中红外探测器

- 美国InfraRed Associates提供高质量的液氮冷却碲镉汞探测器，灵敏度最高，每个探测器都针对特定的波长进行了优化，波长响应范围最宽达 $2\mu\text{m}\sim 24\mu\text{m}$ ，截止波长范围为 750 至 400 cm^{-1} 。
- 探测器光敏面积有多种选择，适用于红外谱学和显微红外谱学的多种应用场景。
- 杜瓦瓶有多种设计可供选择，均配有楔形窗口，以消除干扰效应。除了列出的标准尺寸外，还可根据要求提供定制配置。
- 提供前置放大器、阀门操作器和方形底座适配器等附件。
- 目前最主要的中红外探测器提供商。

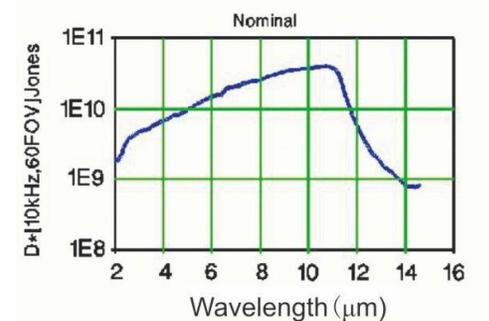


MCT中红外探测器及响应范围

其它液氮制冷型红外探测器

美国

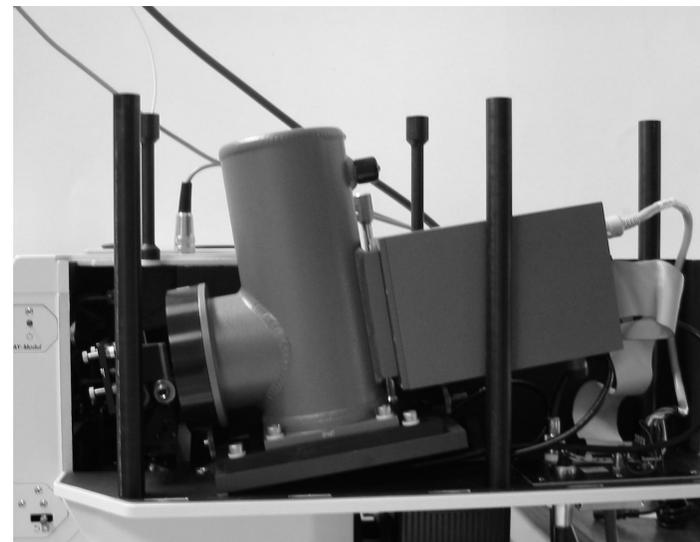
- 美国Kolmar Technologies自1991年公司开始生产标准红外探测器产品——碲镉汞光电二极管和光电导体。
- 用于研究和工业应用的红外探测器产品，通常安装在光谱仪或激光系统等仪器中，标准产品可以满足大多数应用需求。
- 可以设计定制的探测器/放大器配置，以满足独特的要求。
- 截止波长：11.5, 8, 4.5 μm
- 线性响应



Kolmar MCT探测器及响应范围

焦平面阵列探测器FPA-面成像

- 用于Bruker HYPERION 3000型红外显微镜
- 集成液氮制冷杜瓦, 维持时间8 -20h
- 4,096 像素 (64x64), 光谱范围 4,000-900 cm^{-1} 。Bruker 还提供128x128像素的FPA
- 量子效率 $\text{QE} > 60\%$, 集成相关电子学, 帧频率: $> 1\text{kHz}$



FPA探测器安装在Bruker显微镜上

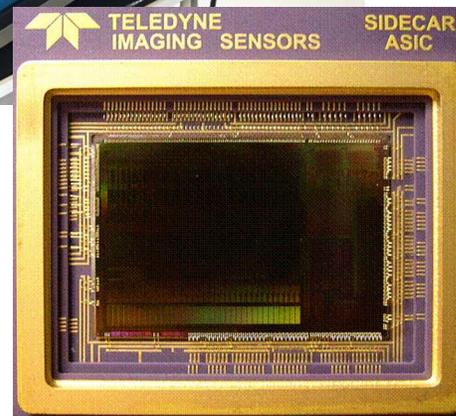
Bruker公司提供集成于红外显微镜的FPA(Teledyne Imaging定制, 美国), 目前国际上同步辐射红外光束线站实验的基本都是Bruker公司的红外显微镜和FPA探测器。

焦平面阵列探测器



TELEDYNE
SCIENTIFIC & IMAGING
Everywhere you look™

- Teledyne Imaging(美国)提供最深入、最全面的成像和相关技术产品组合，从航空航天到工业检查、放射线照相和放射治疗、地理空间测量、先进的MEMS和半导体解决方案。
- 焦平面阵列探测器(PFA) 覆盖可见光($0.35-1.05\mu$), 近红外($0.9-1.8\mu$), 中红外($0.9-5.0\mu$), 以及远红外($0.9-16\mu$)波段。



FPA焦平面阵列探测器

国产面阵探测器：

- 我们希望能获得国产的红外FPA探测器，应用于同步辐射红外谱学显微成像中。光谱范围 $4,000-900\text{cm}^{-1}$ ，灵敏度达到 $10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，像素数目达到或优于 $128*128$ 。帧频率 $>1\text{kHz}$ 。

高芯科技（高德红外）MCT探测器

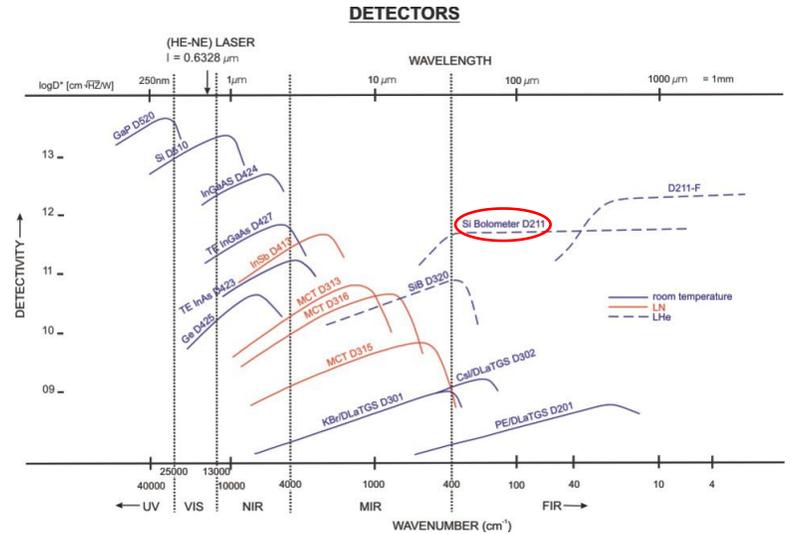
国产高德红外的红外FPA探测器，光谱范围较窄，无法覆盖 $2.5\sim 15$ 微米 $4000\text{cm}^{-1}\sim 650\text{cm}^{-1}$ 。

探测器型号	C1212M中波	C615M中波	C330M中波
波段	$3.7\mu\text{m}\sim 4.8\mu\text{m}$	$3.7\mu\text{m}\sim 4.8\mu\text{m}$	$3.7\mu\text{m}\sim 4.8\mu\text{m}$
阵列规格	1280x1024	640x512	320x256
像元大小	12微米	15微米	30微米
制冷方式	制冷机	制冷机	制冷机

常用远红外高灵敏度探测器：

Bolometer探测器： 测量入射红外线辐射的探测器，对热辐射非常敏感，主要探测波长范围在从10 μm 到5000 μm 的红外光谱。探测器基本单元是具有超高灵敏度的热敏电阻，将该热敏电阻冷却到液氮温度从而减小背景热噪声，任何热辐射照射到探测器上都会导致探测器温度上升，从而引起热敏电阻阻值发生改变，通过放大电路放大后测量电压的变化。

无液氮Bolometer探测器： 由于全球氮资源的短缺，传统消耗液氮的Bolometer经常面临无法购买到液氮的情况，液氮价格的不断上涨造成使用费用过高也大大限制液氮型Bolometer的使用，故最新推出了无液氮Bolometer探测器。



常用远红外Bolometer探测器响应波长范围



闭循环Bolometer远红外探测器

常用远红外探测器

- **Infrared Laboratories**（简称IRLabs, 美国）公司是由著名的红外天文学之父 Dr. Frank Low于1967年创立，经过近半个世纪的发展，IRLabs成为世界上最主要的Bolometer生产商，其产品遍布全球各天文台、大学和研究所。
- **标准液氮型Bolometer**：通用型4.2K，由一个4.2K bolometer探测器元件绑定在一个2.5mm的金刚石吸收器上，最优工作波长范围是15~2000 μm （即20THz ~ 150GHz），调制频率在200 ~ 400赫兹范围。
- **无液氮型Bolometer**：无液氮Bolometer使用减振的4K GM制冷机，这种4K制冷机二级冷头通过氦气将冷量传递给冷板，无其它机械性连接，彻底消除制冷机的振动，同时也消除压缩机和冷头与冷板的电连接，优化的设计使得无需使用加热器即可将Bolometer的温度调整到4.2 K。
- 目前同步辐射红外线站上基本都使用该公司提供的远红外探测器。



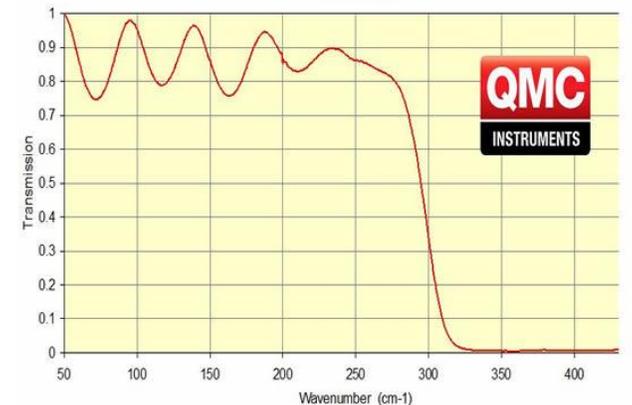
Bolometer远红外探测器

其它远红外探测器

- 英国QMC仪器在低温太赫兹探测器的设计和制造方面拥有近四十年的经验。早年的核心业务是设计和制造用作远红外天文的外差接收器的液氦冷却InSb热电子测辐射热计系统。
- 提供一系列低温探测器，低温是指它们工作在4K及以下的温度，使用液氦或机械冷却器，机械冷却系统操作简便。
- 这些探测器可以作为独立元件出售，或作为与低温恒温器、光学元件、滤波器和放大器一起包装的系统出售。
- 超导Bolometer探测器带宽范围从3毫米 (3.3cm^{-1}) 到15微米 (600cm^{-1}) 。



Standard 10THz Low-pass Filter
Linear In-band Plot



超导Bolometer探测器