

# 基于MEMS微镜的光谱仪技术

乔大勇

# 提纲

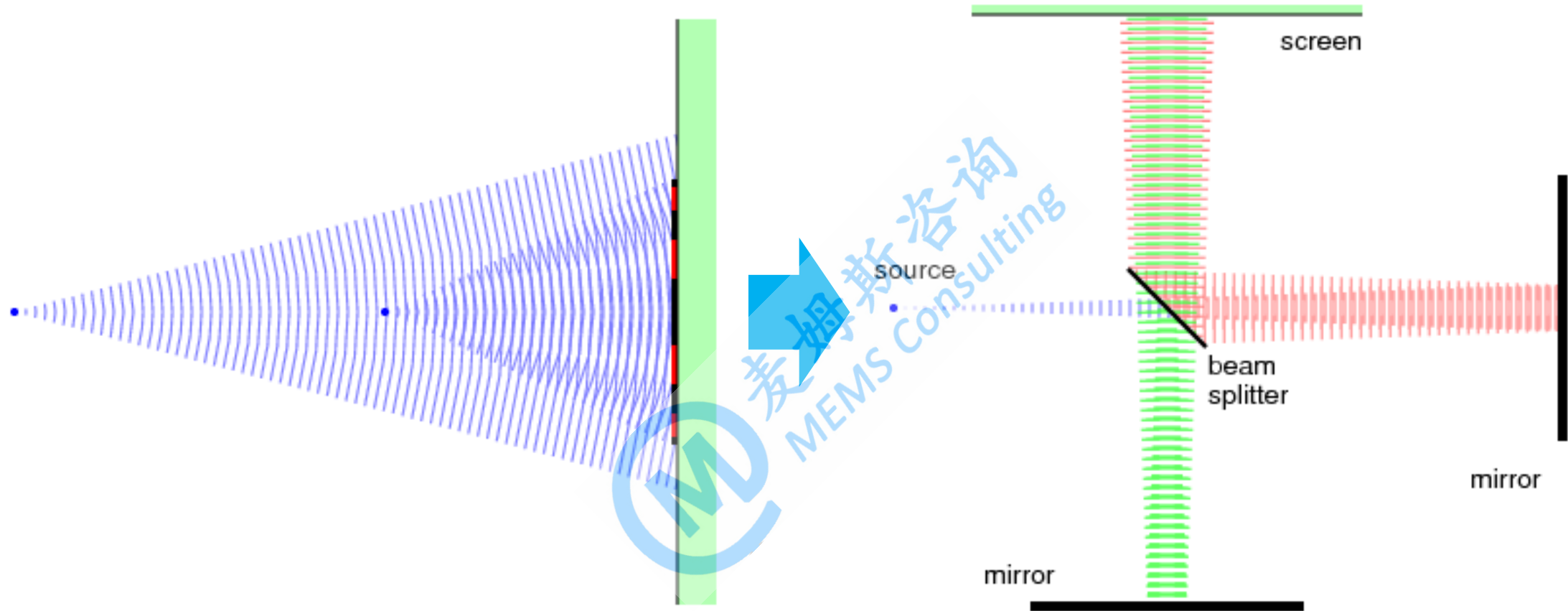
- 1、迈克尔逊干涉仪
- 2、傅里叶变换光谱仪
- 3、为什么MEMS+傅里叶变换光谱仪
- 4、MEMS动镜分类、原理、设计与制造

# 迈克尔逊干涉仪



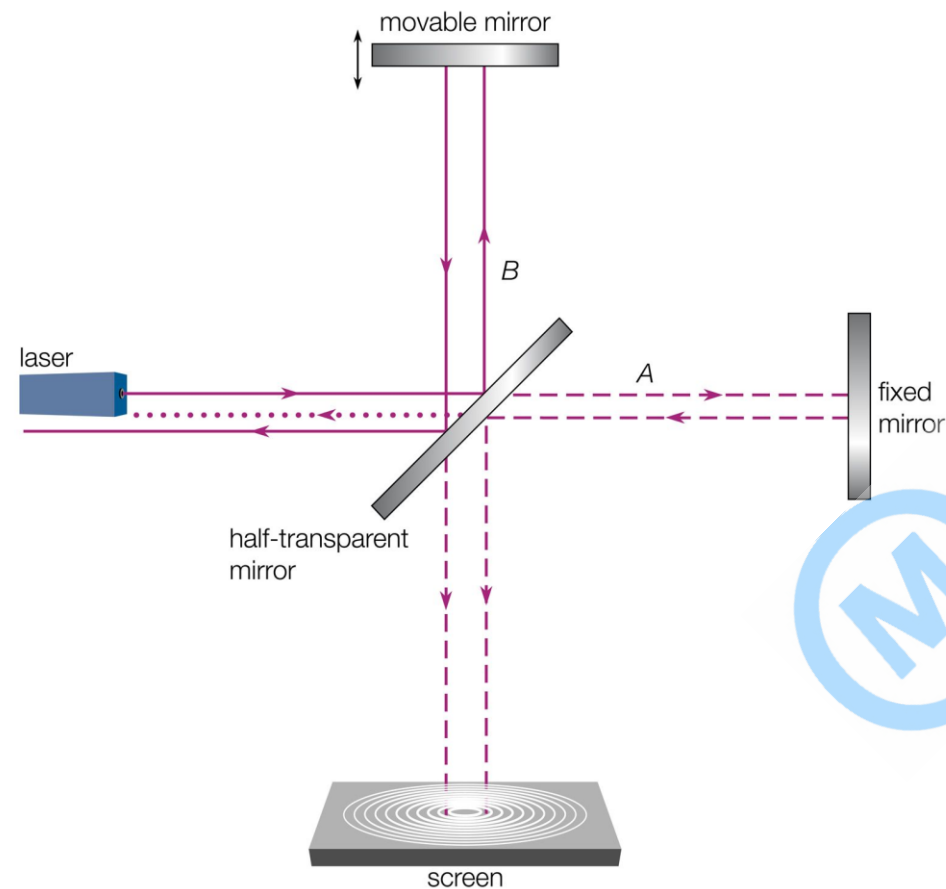
两列想干的波，会因干涉产生相长或者相消

# 迈克尔逊干涉仪



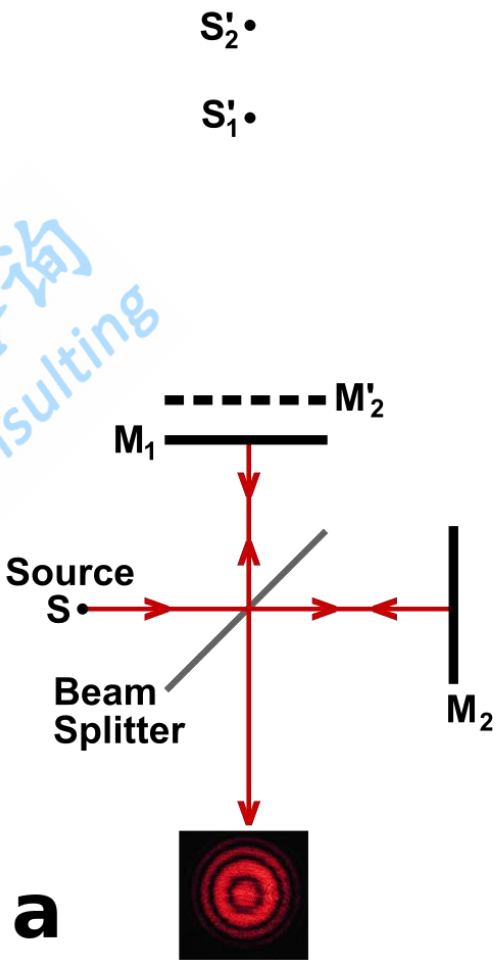
对于光波，我们可以用分光镜将同一光源发出的光分束以产生干涉

# 迈克尔逊干涉仪

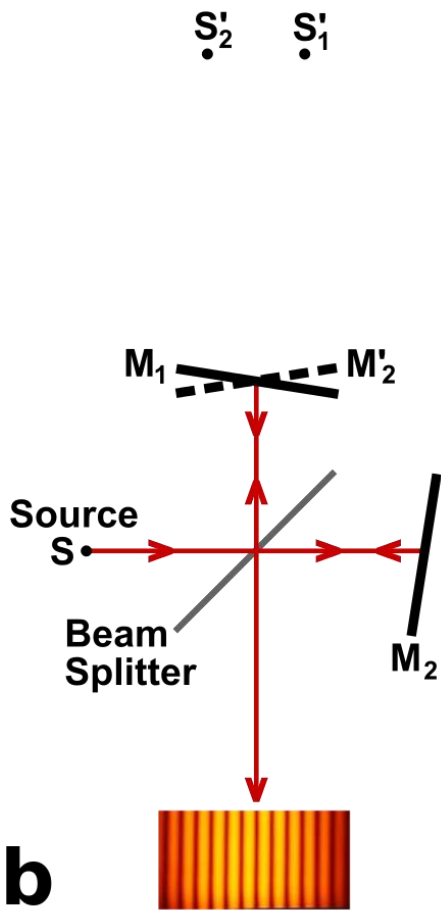


© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc.

理想的迈克尔逊干涉仪

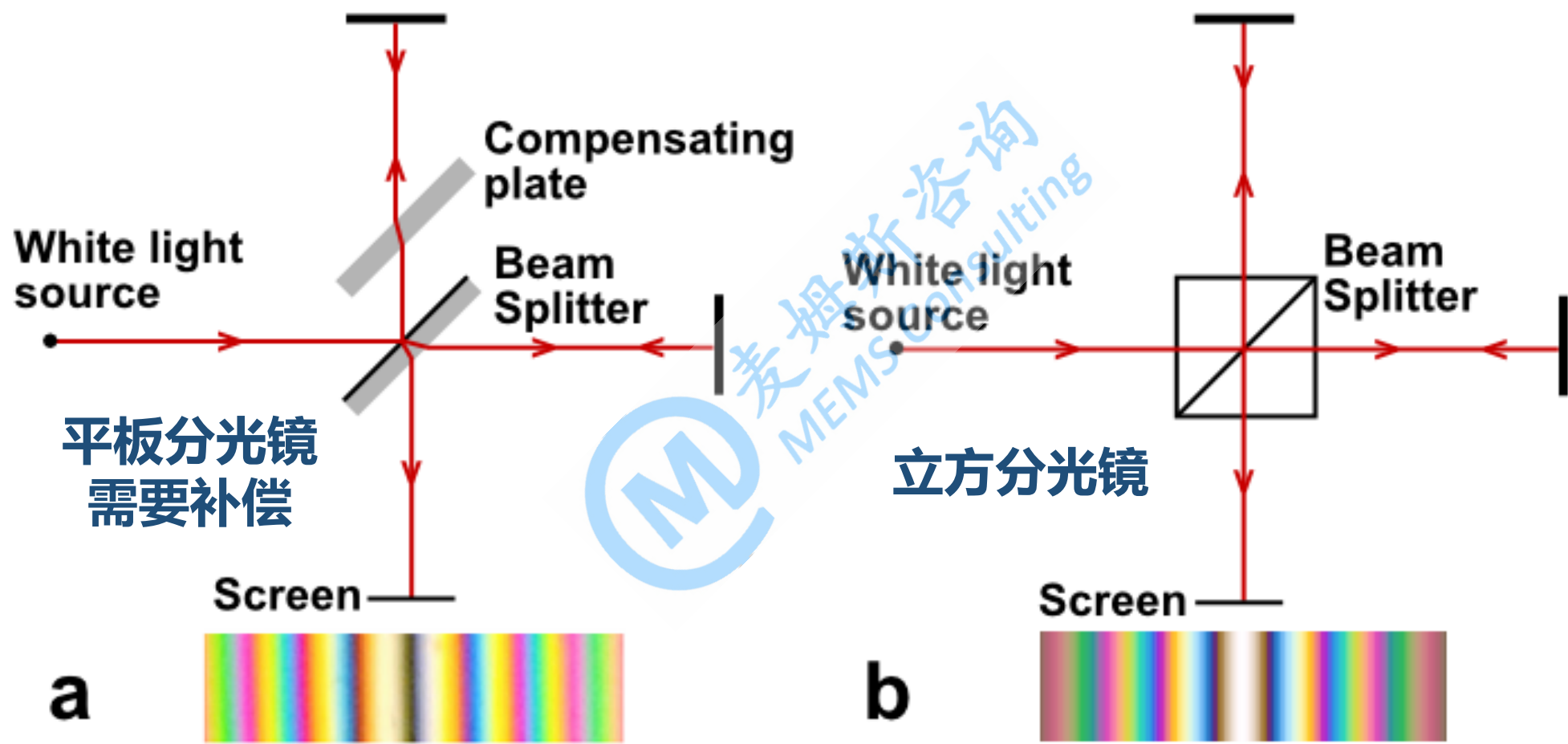


M<sub>1</sub>平行于M<sub>2</sub>'



M<sub>1</sub>不平行于M<sub>2</sub>'

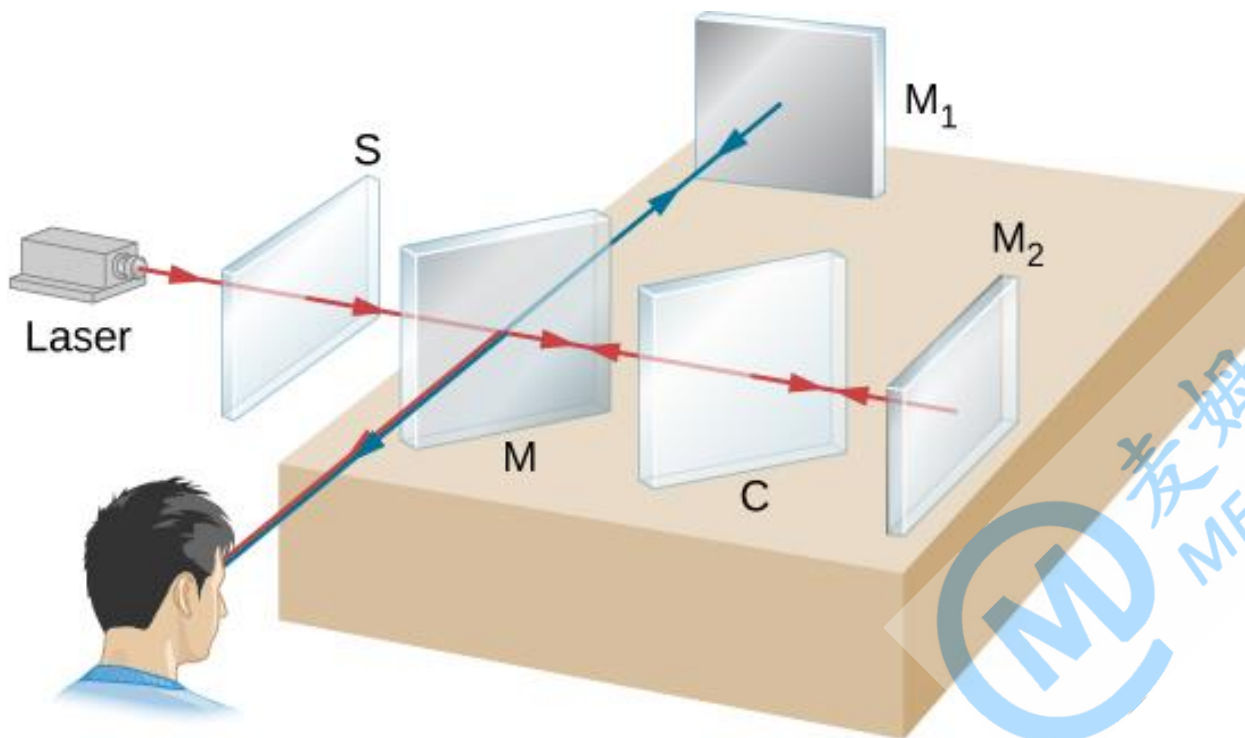
# 迈克尔逊干涉仪



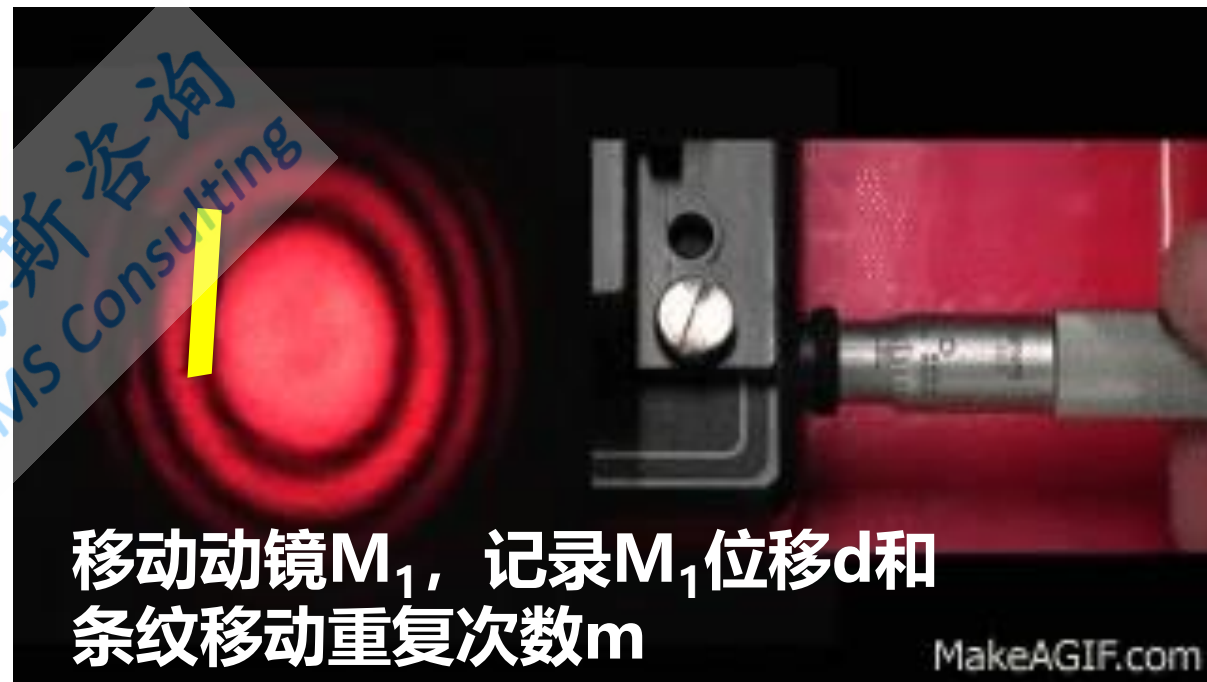
白光光源的迈克尔逊干涉仪



# 迈克尔逊干涉仪



(a)

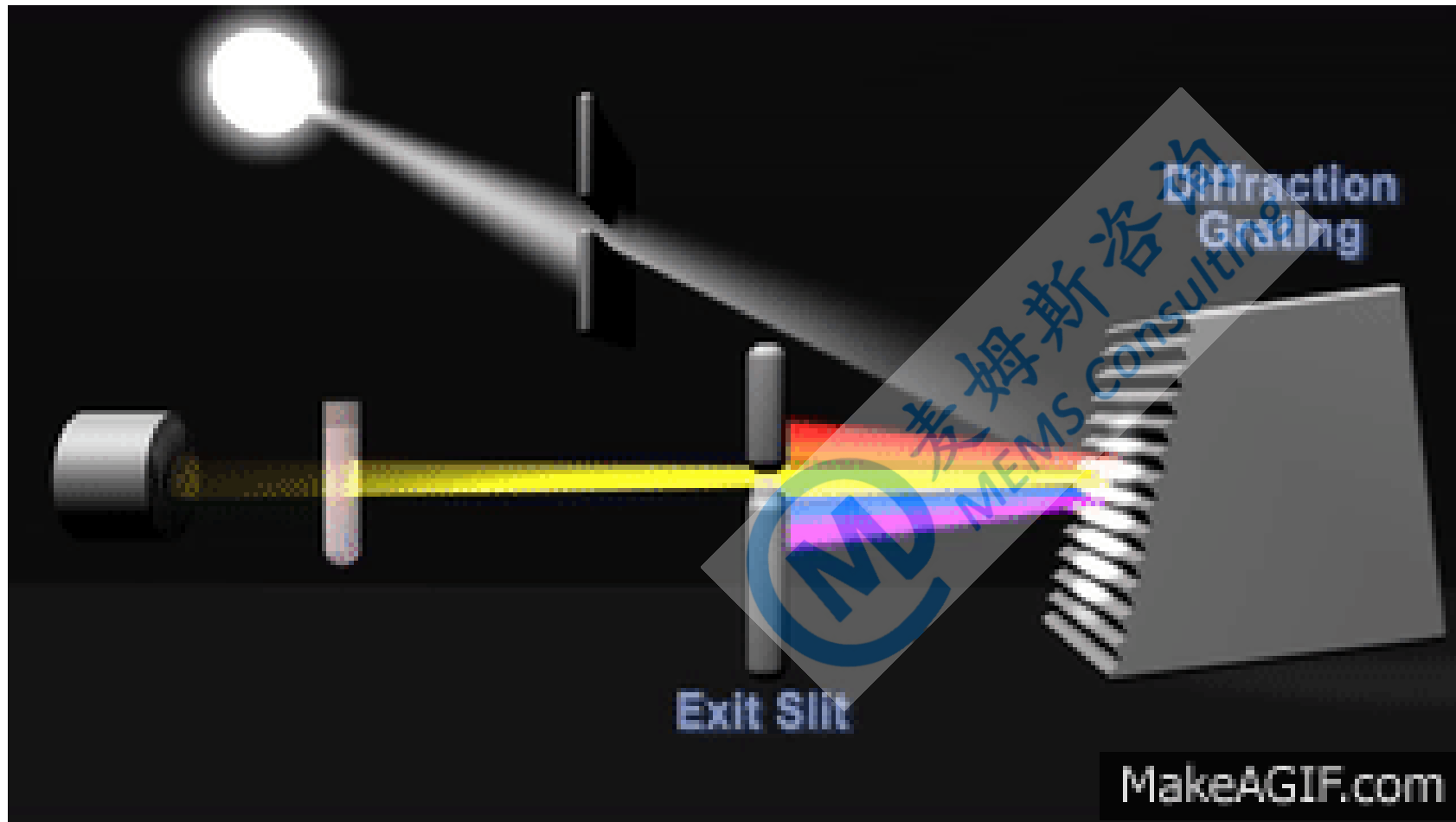


(b)

$$\lambda = 2d/m$$

波长已知算距离，距离已知算波长

# 傅里叶变换光谱仪



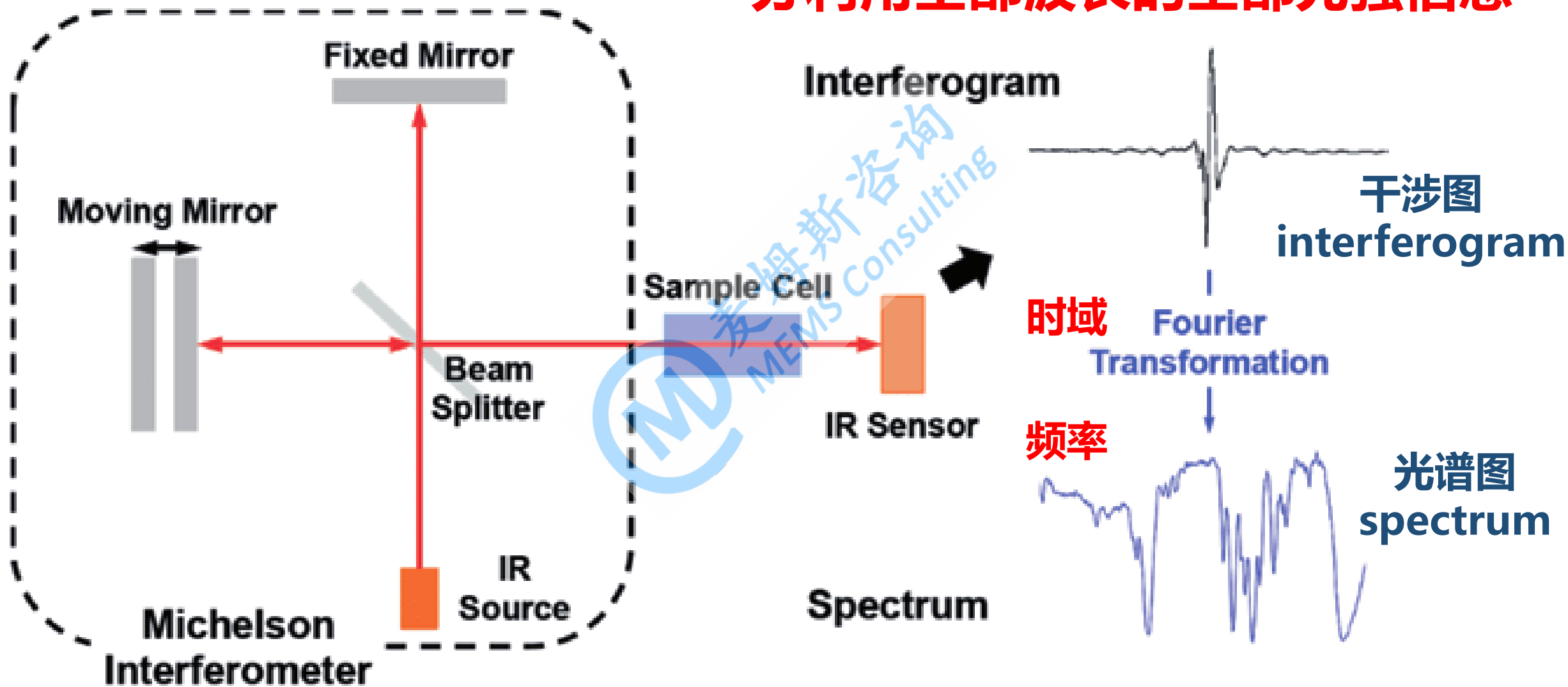
色散型光谱  
仪光能量输  
出小、光谱  
范围窄、测  
量时间长

色散型光谱仪原理

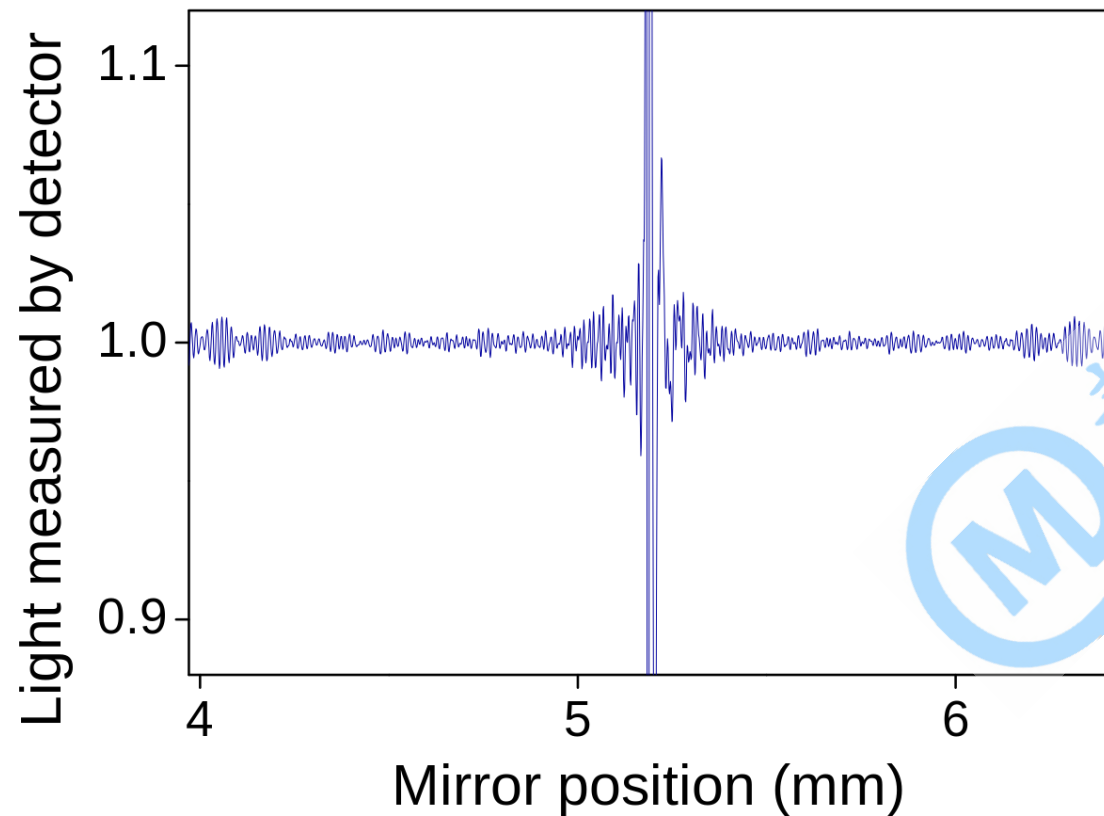


# 傅里叶变换光谱仪

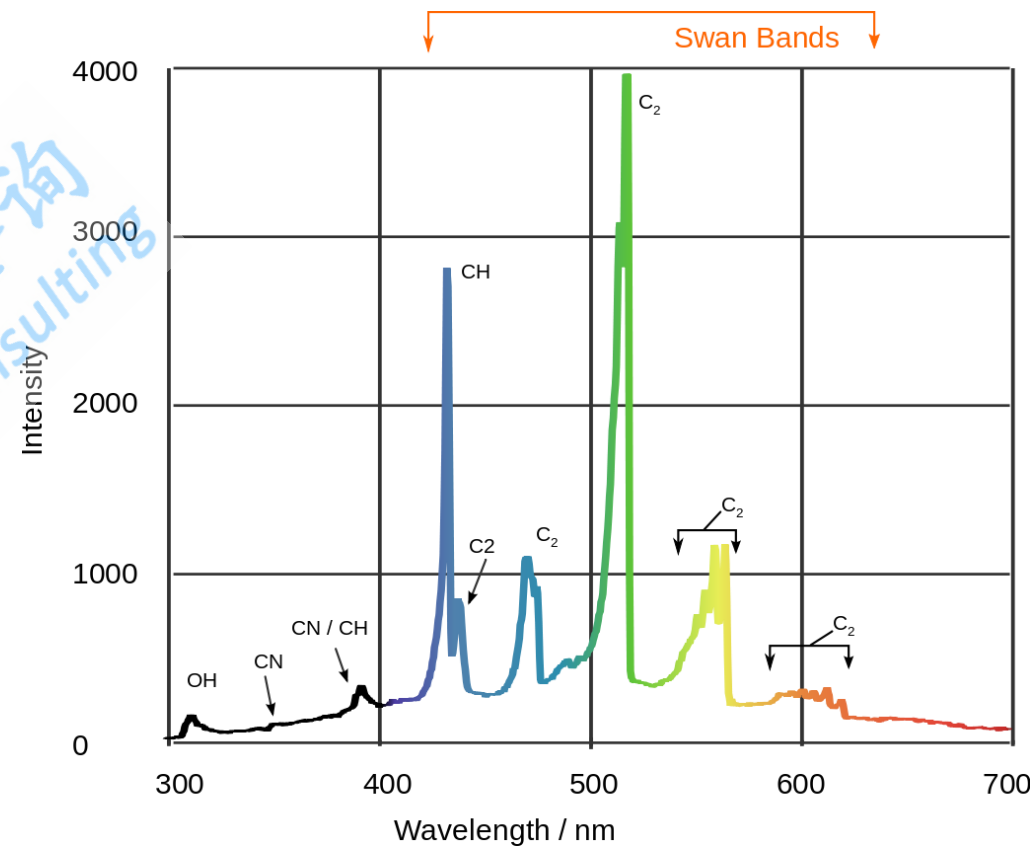
傅里叶变换光谱仪不需要分光，充分利用全部波长的全部光强信息



# 傅里叶变换光谱仪

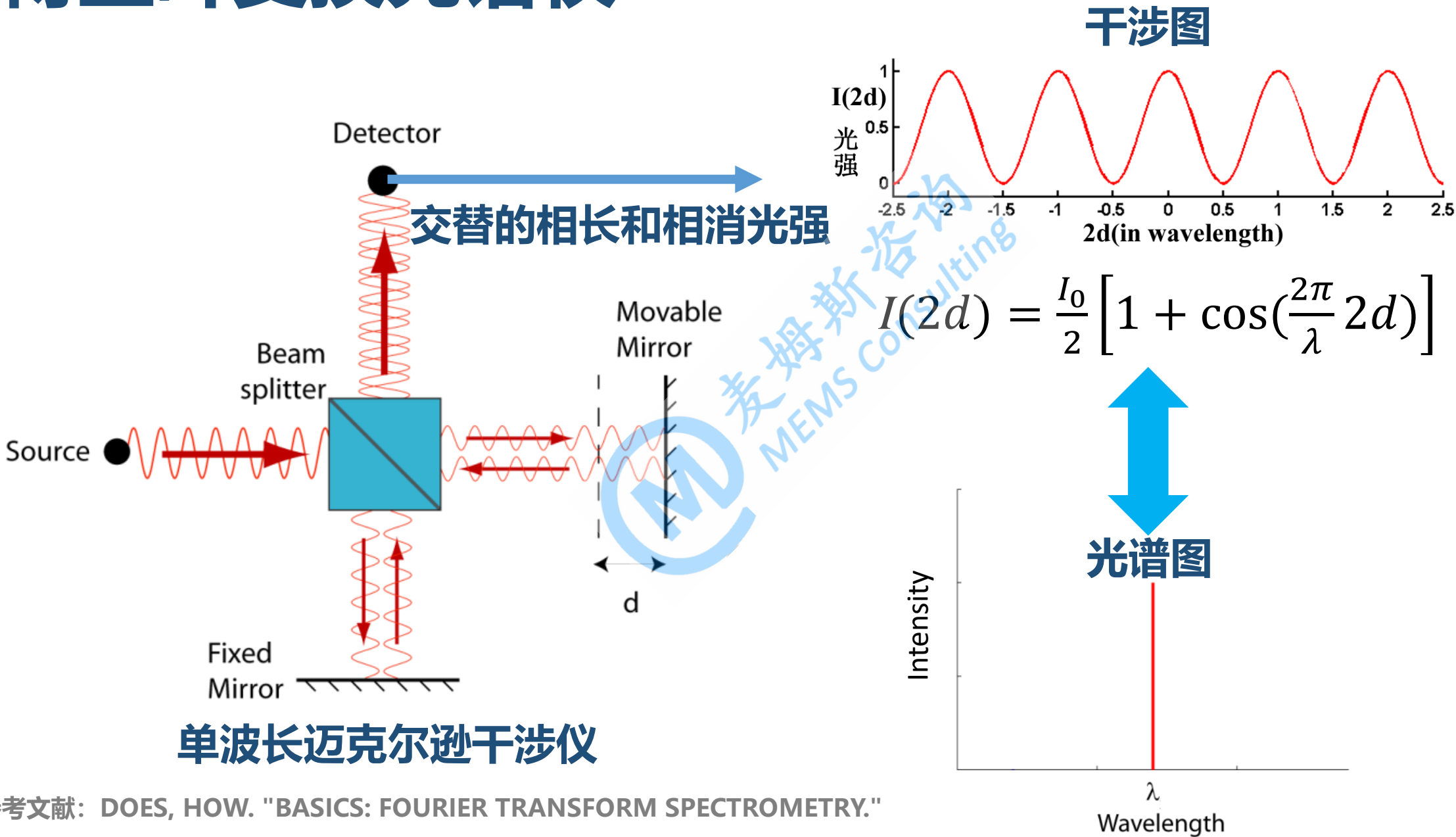


干涉图  
interferogram



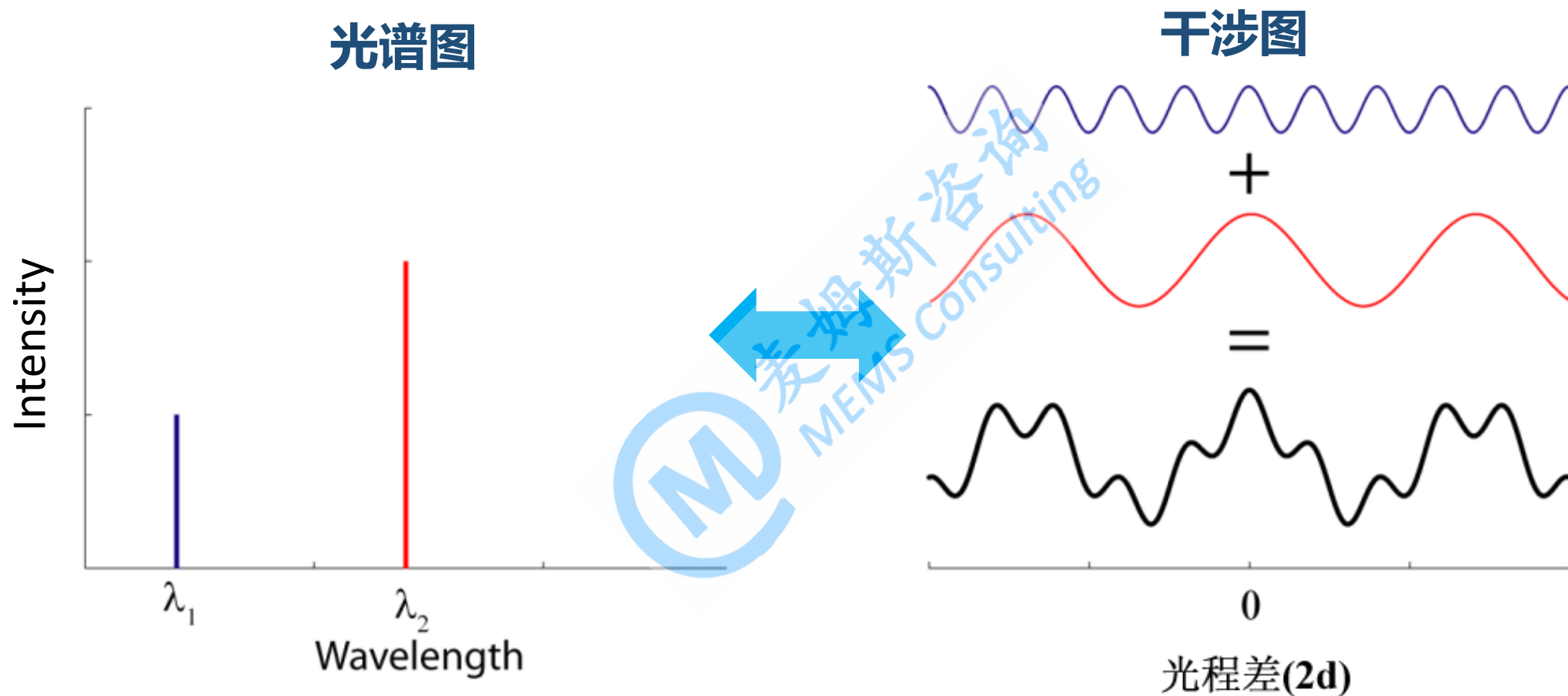
光谱图  
spectrum

# 傅里叶变换光谱仪



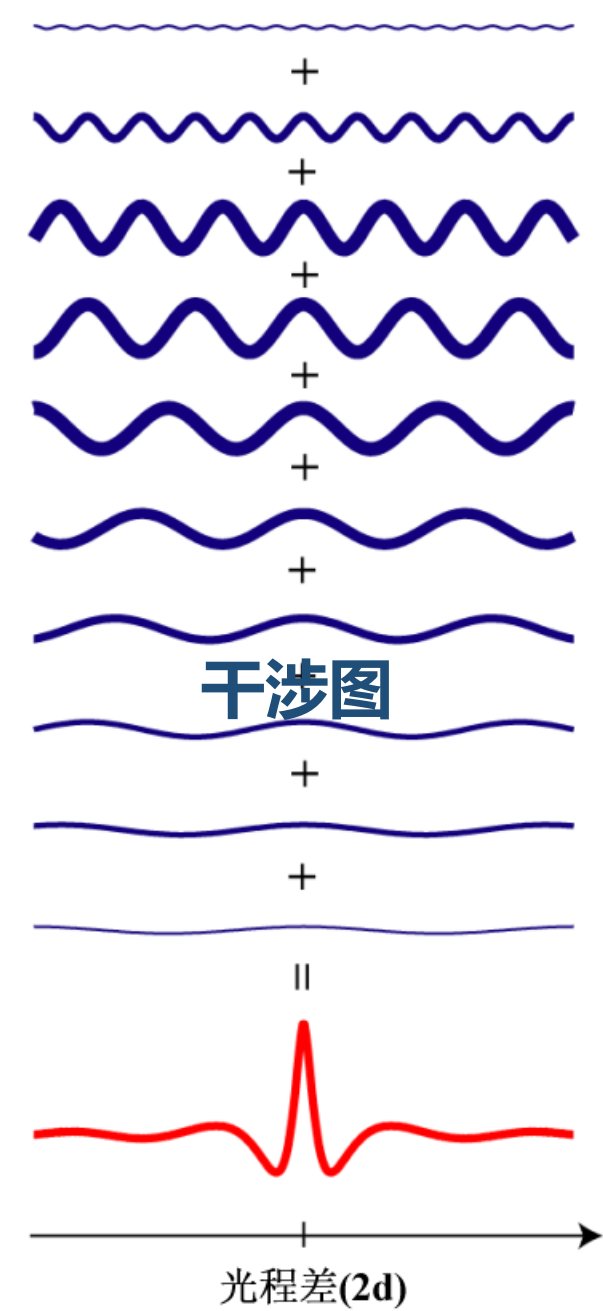
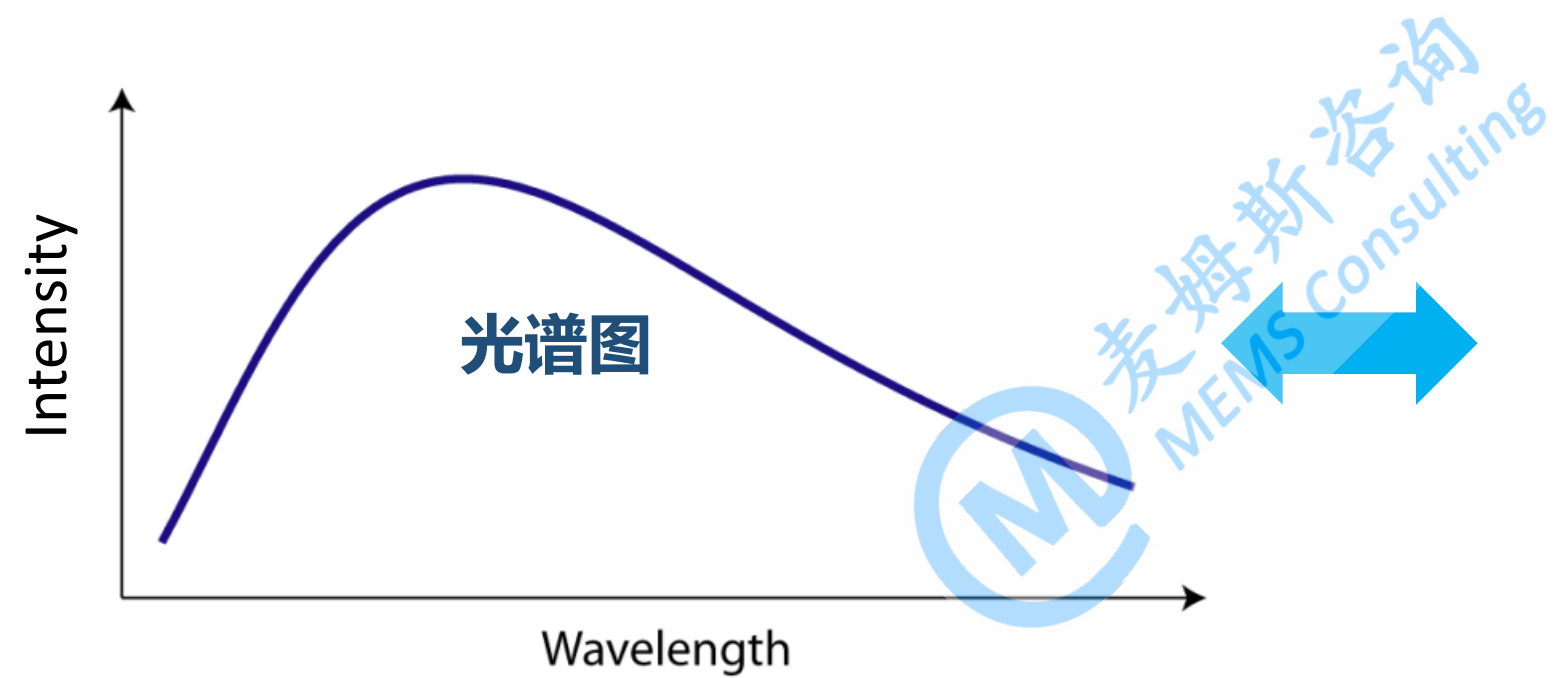
参考文献: DOES, HOW. "BASICS: FOURIER TRANSFORM SPECTROMETRY."

# 傅里叶变换光谱仪



## 双波长迈克尔逊干涉仪

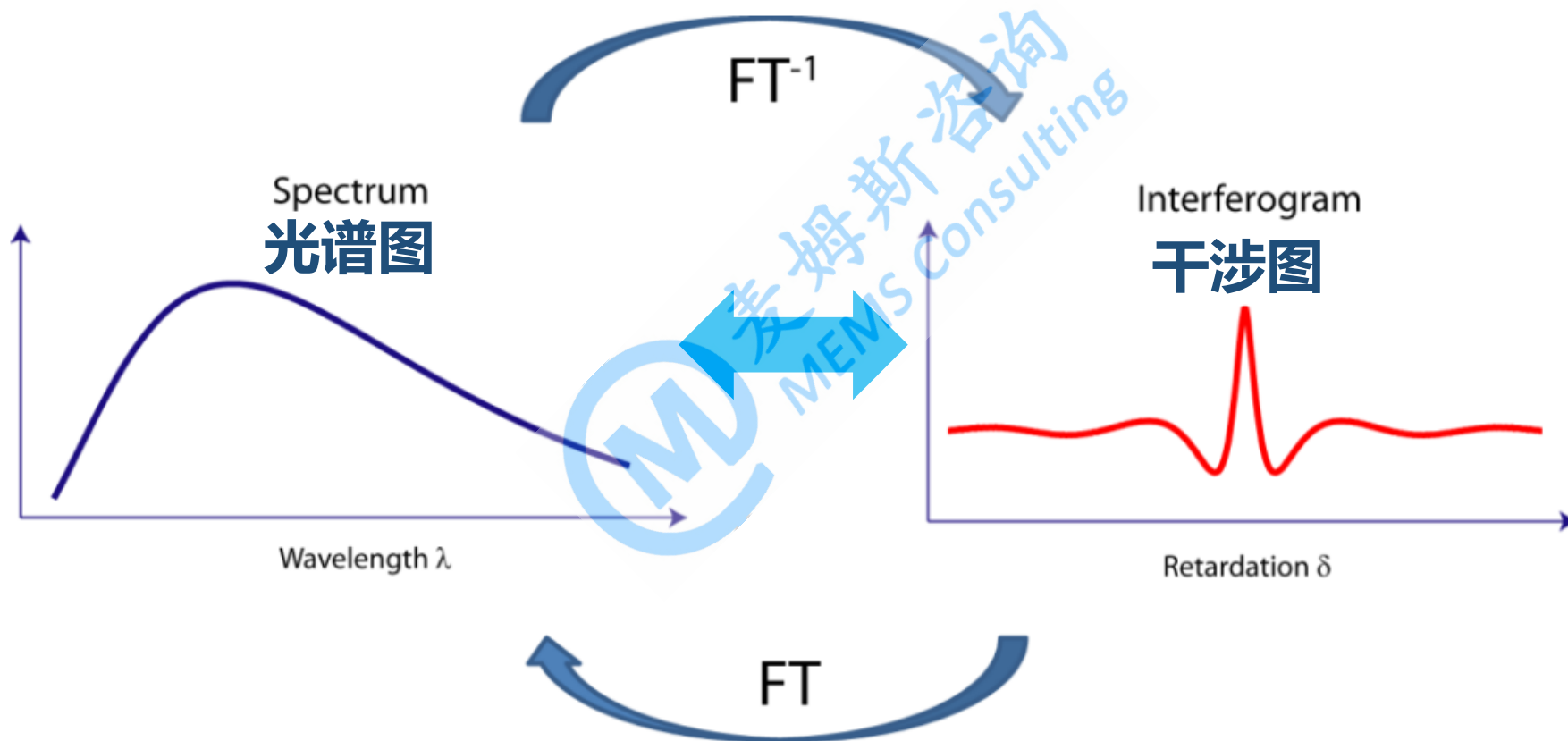
# 傅里叶变换光谱仪



多波长迈克尔逊干涉仪

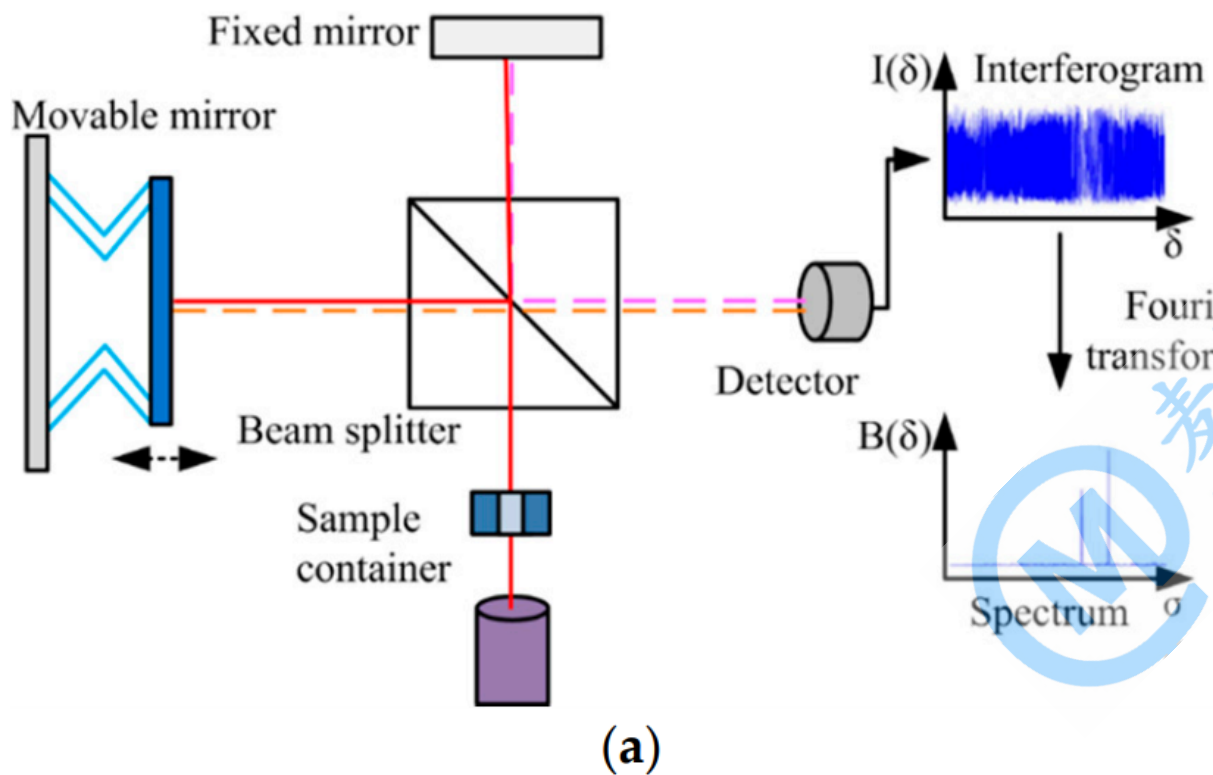
参考文献: DOES, HOW. "BASICS: FOURIER TRANSFORM SPECTROMETRY."

# 傅里叶变换光谱仪

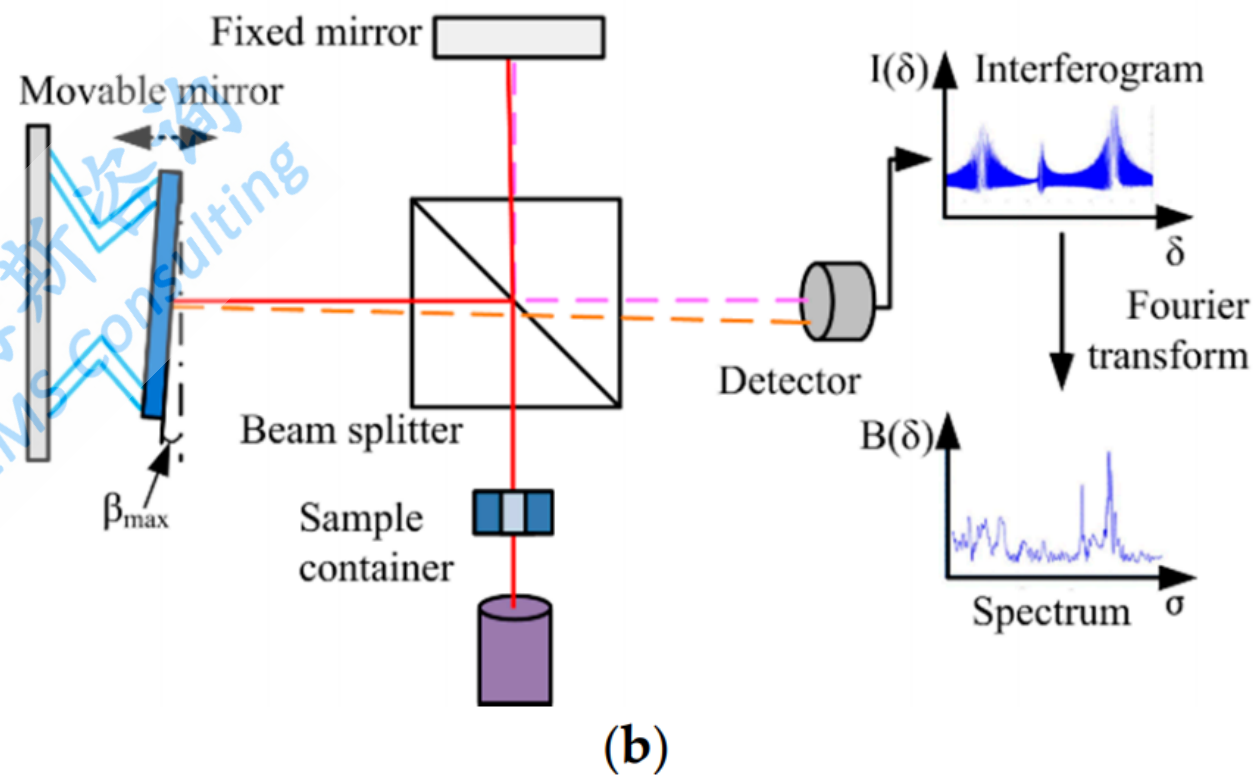


多波长迈克尔逊干涉仪

# 为什么MEMS+傅里叶变换光谱仪?



理想的傅里叶变换光谱仪



动镜偏斜的傅里叶变换光谱仪



# 为什么MEMS+傅里叶变换光谱仪?

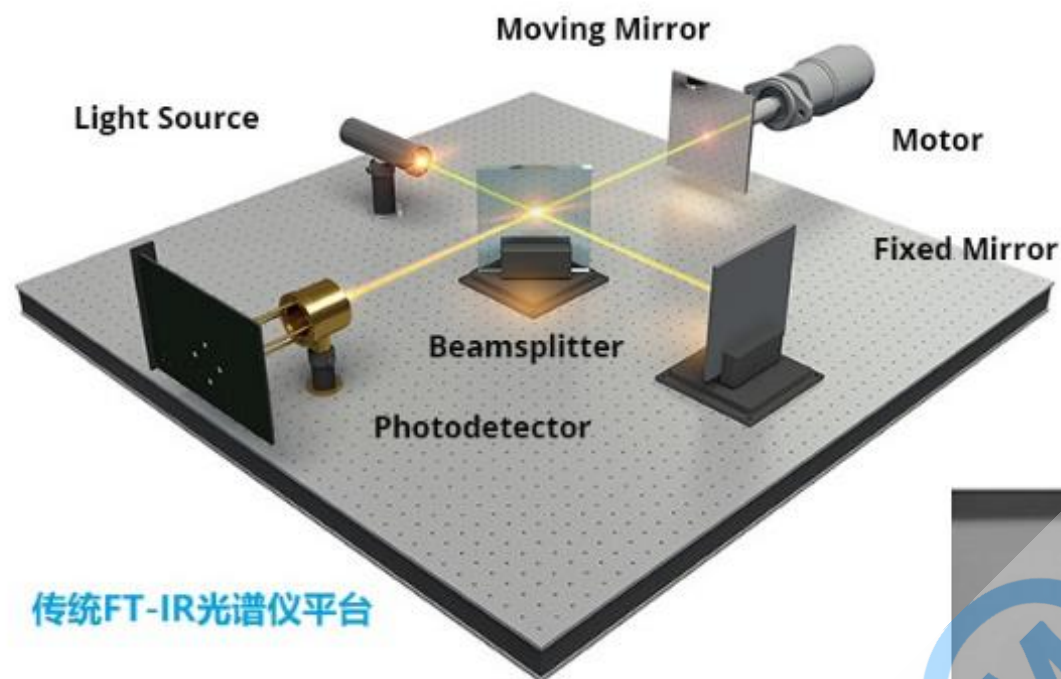
动镜的倾斜, 减少了动镜的有效行程, 也影响了光谱测量准确性

$$\beta_{max} < \frac{1}{20 \cdot D \cdot \nu_{max}}$$

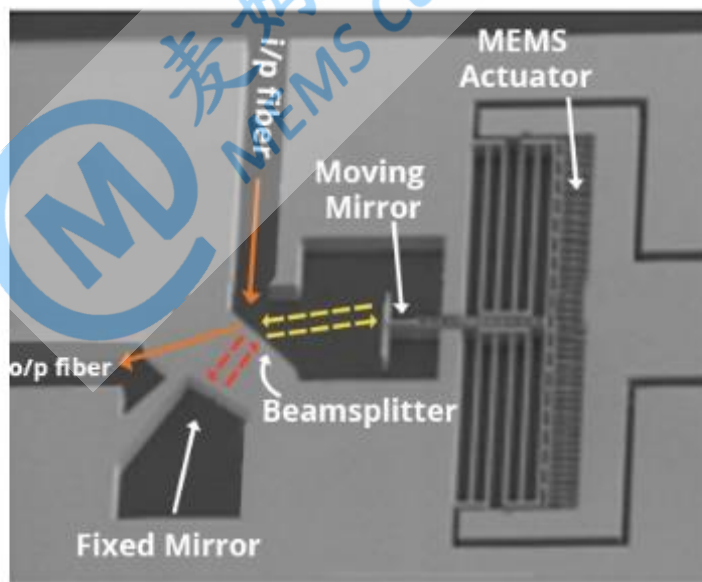
$\beta_{max}$ : 最大倾斜角度  
 $D$ : 光束直径  
 $\nu_{max}$ : 光源最短波长的波数

例如 $D=0.1\text{cm}$ ,  $\nu_{max}=15800\text{cm}^{-1}(\approx 633\text{nm})$ , 那么最大允许的 $\beta$ 是 $0.002^\circ$

# 为什么MEMS+傅里叶变换光谱仪？



引入MEMS技术，不仅仅解决了傅里叶变换光谱仪微型化的问题，同时通过**制造精度**取代**装配精度**来保证动镜的倾斜角度，降低光谱仪的装调成本



基于SiMOST的单片FT-IR光谱仪



# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 按驱动方式划分

静电驱动

电磁驱动

电热驱动

压电驱动

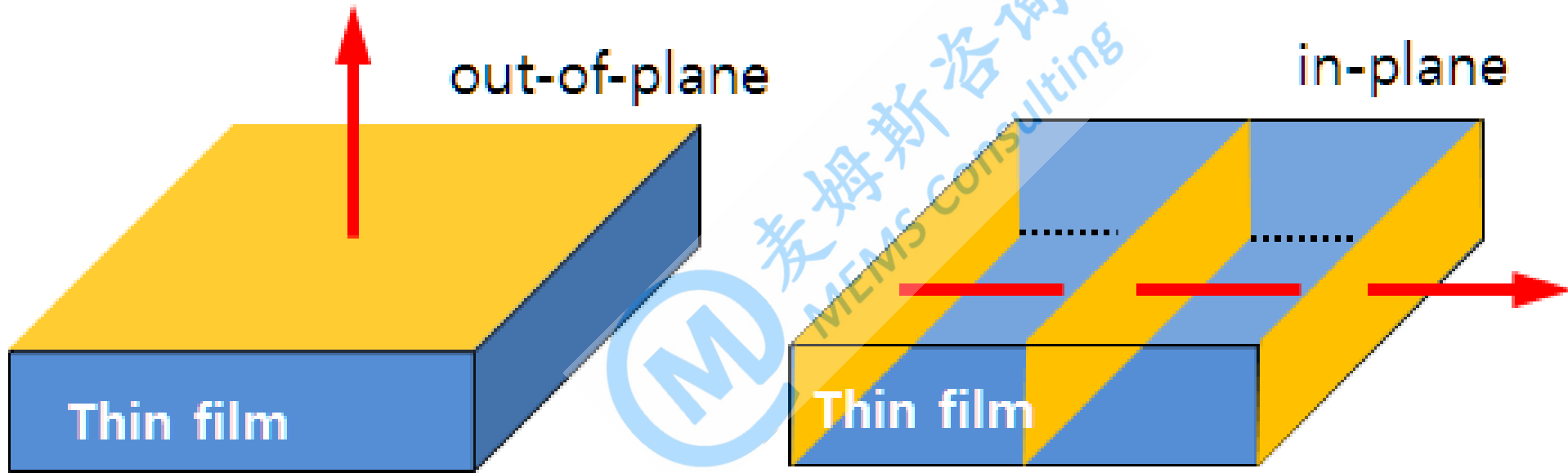
MEMS动镜

## 按运动方式划分

In plane运动

Out of plane运动

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造



# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

光谱分辨率 $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2 \times \Delta Z_{max}} = \frac{1}{\delta_{max}}$$

$\Delta\sigma$  : 光谱分辨率( $\text{cm}^{-1}$ )

$\Delta Z_{max}$  : 动镜最大位移

$\delta_{max}$  : 最大光程差(OPD)

100 $\text{cm}^{-1}$ 的光谱分辨率 $\rightarrow$ 100  
微米的动镜位移

动镜/静镜面积(光斑直径)

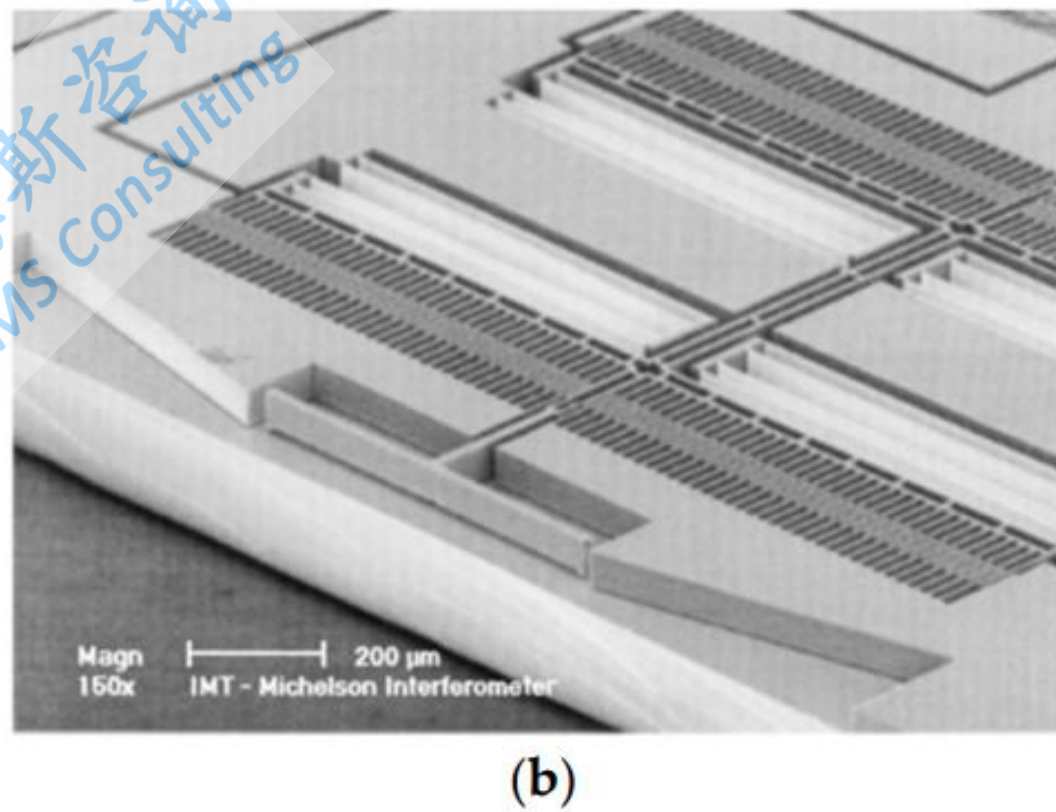
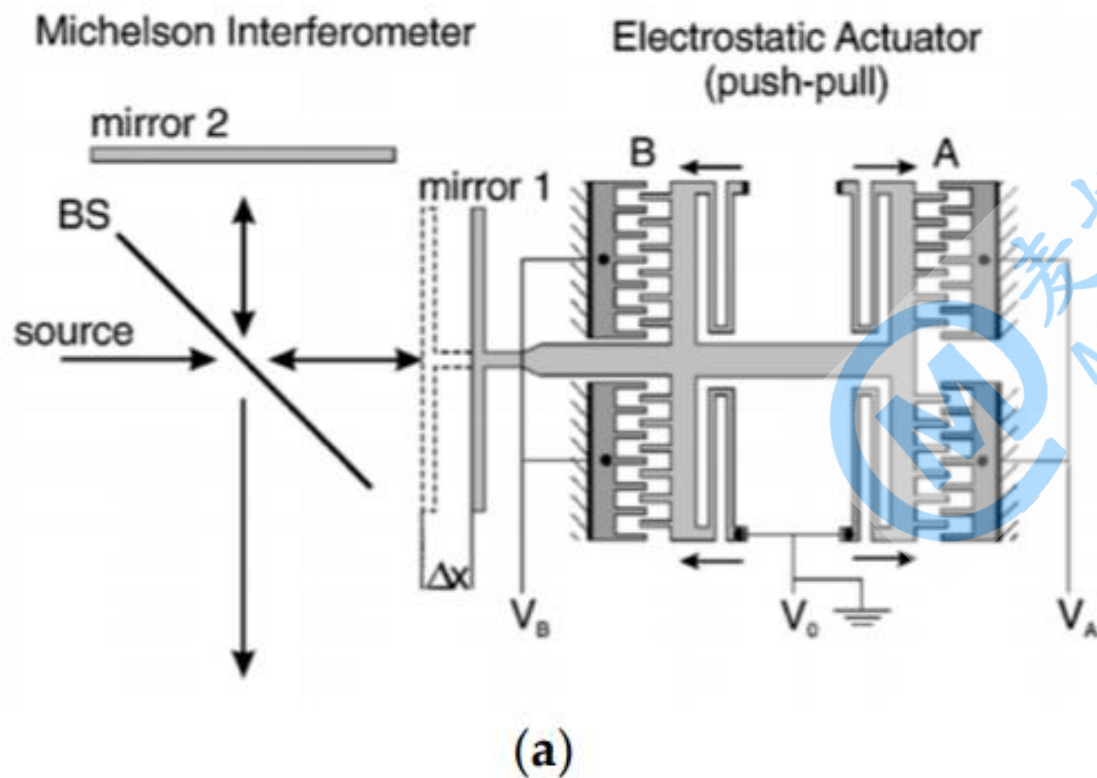
光学表面质量

3个对比MEMS动镜优劣的指标

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

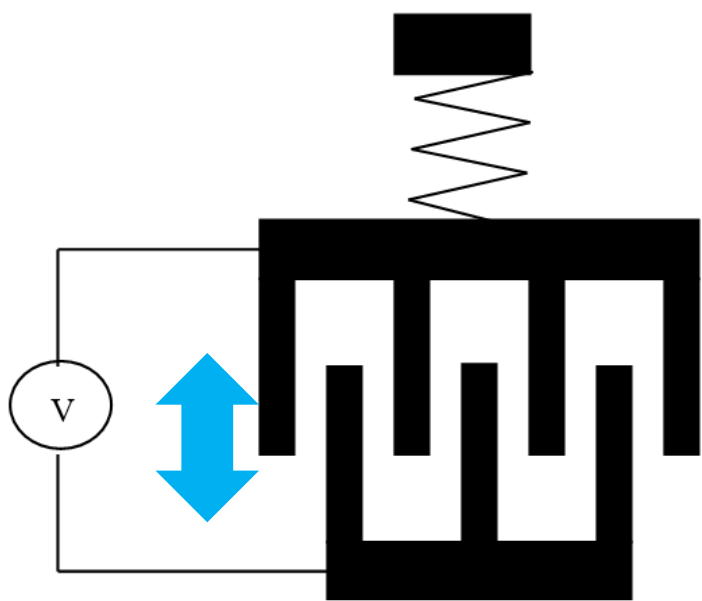
## 1) 静电驱动的In plane案例

## WHY静电梳齿驱动?



# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

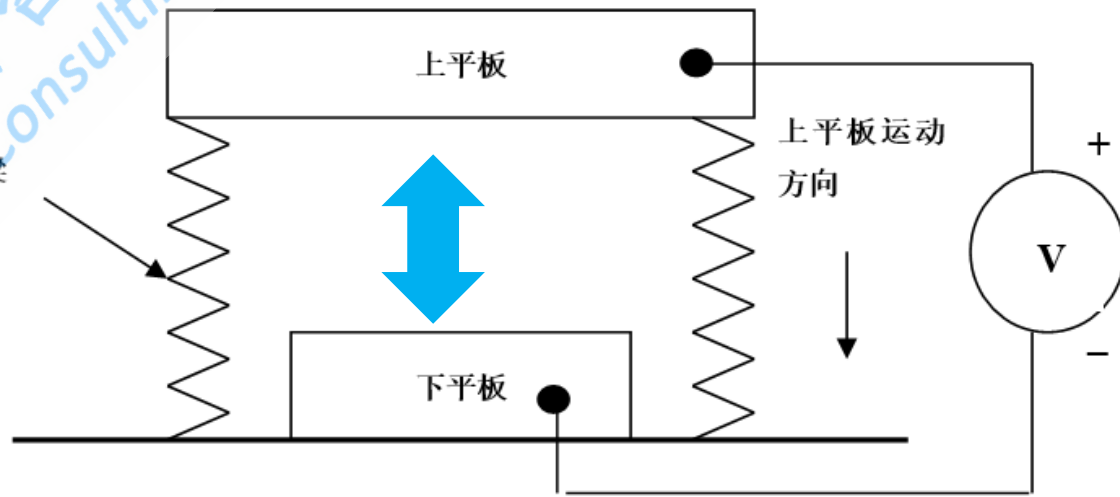
## 1) 静电驱动的In plane案例



活动电极

固定电极

静电梳齿驱动器

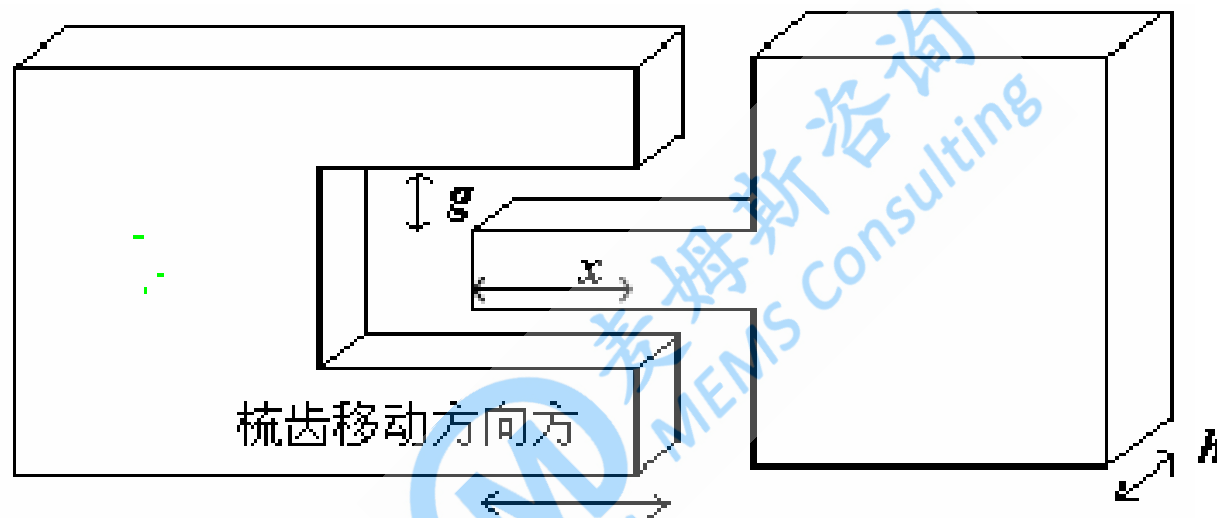


静电平板电容驱动器



# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 1) 静电驱动的In plane案例

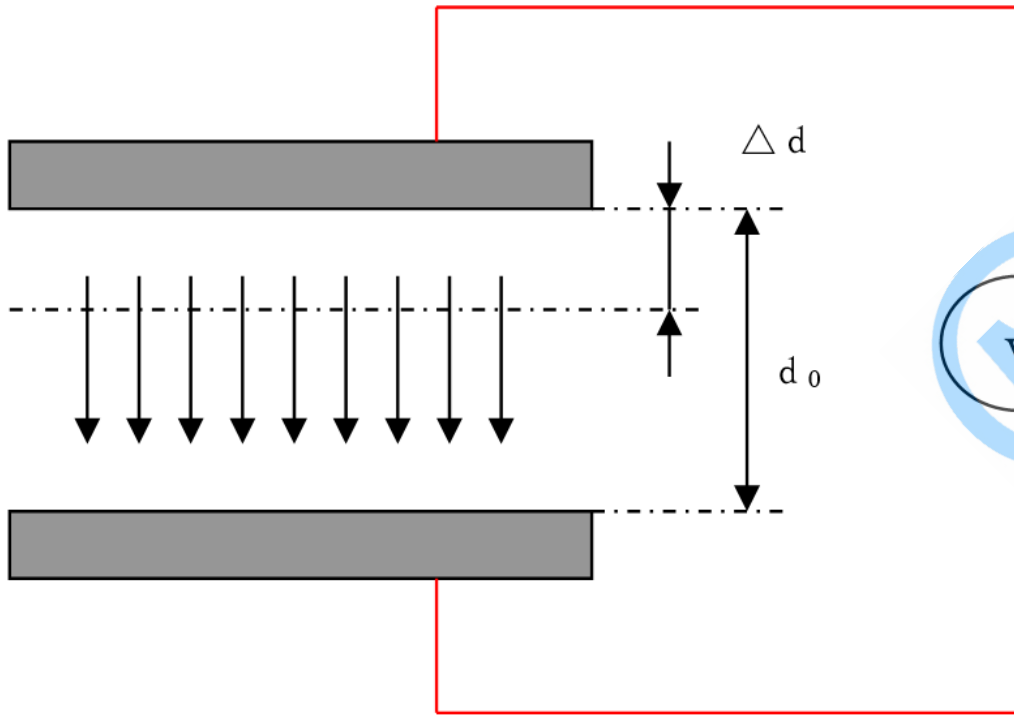


$$F = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} V^2 = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\epsilon_r \epsilon_0 x h}{g} \right) V^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 h}{g} V^2$$

在驱动电压确定的情况下，静电梳齿驱动器的静电力F与驱动位移x无关

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 1) 静电驱动的In plane案例



平板电容静电驱动器的静电力  
 $F_{pp}$  随驱动位移  $\delta d$  非线性增加

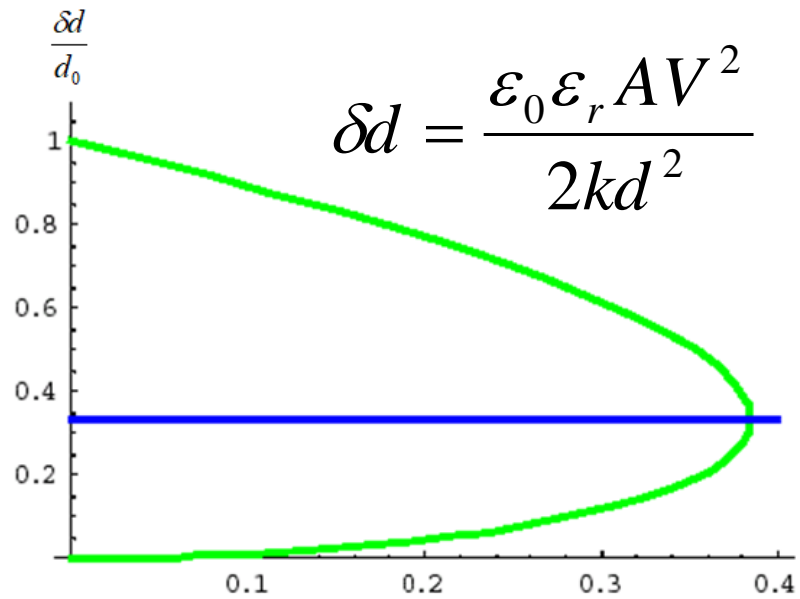
$$F_{PP} = \frac{\partial W}{\partial d} = \frac{\partial CV^2}{2\partial d} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r AV^2}{2d^2} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r AV^2}{2(d_0 - \delta d)^2}$$

而平衡静电力的弹性梁回复力  
 $F_r$  随驱动位移  $\delta d$  线性增加

$$F_r = k\delta d$$

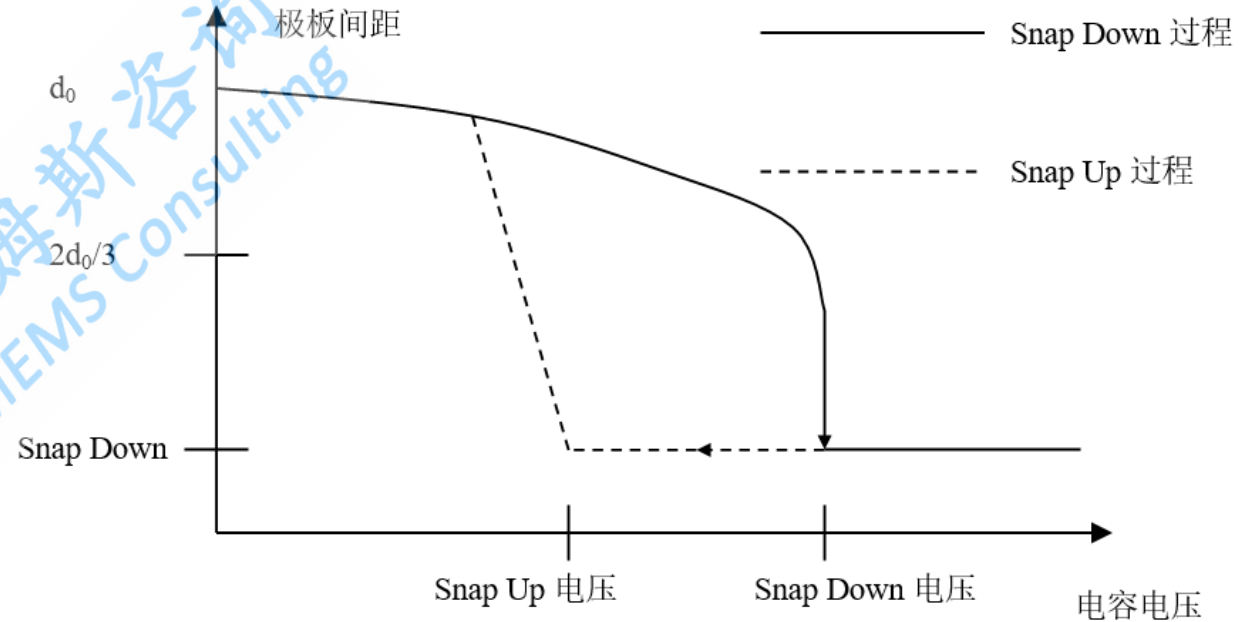
# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 1) 静电驱动的In plane案例



位移-电压关系曲线

$$V \frac{1}{d_0} \sqrt{\frac{A \epsilon_r \epsilon_0}{2k d_0}}$$



Snap down(Pull-in)吸合问题

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 1) 静电驱动的In plane案例

那么采用静电梳齿驱动而不是静电平板电容驱动的原因是什么？

光谱分辨率

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2 \times \Delta Z_{\max}} = \frac{1}{\delta_{\max}}$$

$\Delta\sigma$  : 光谱分辨率( $\text{cm}^{-1}$ )

$\Delta Z_{\max}$  : 动镜最大位移

$\delta_{\max}$  : 最大光程差(OPD)

$$F = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} V^2 = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\epsilon_r \epsilon_0 x h}{g} \right) V^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 h}{g} V^2$$

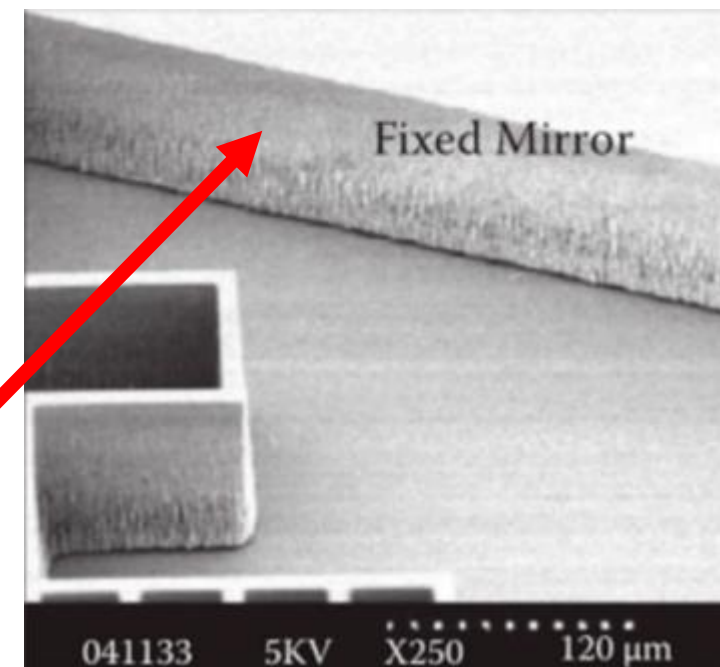
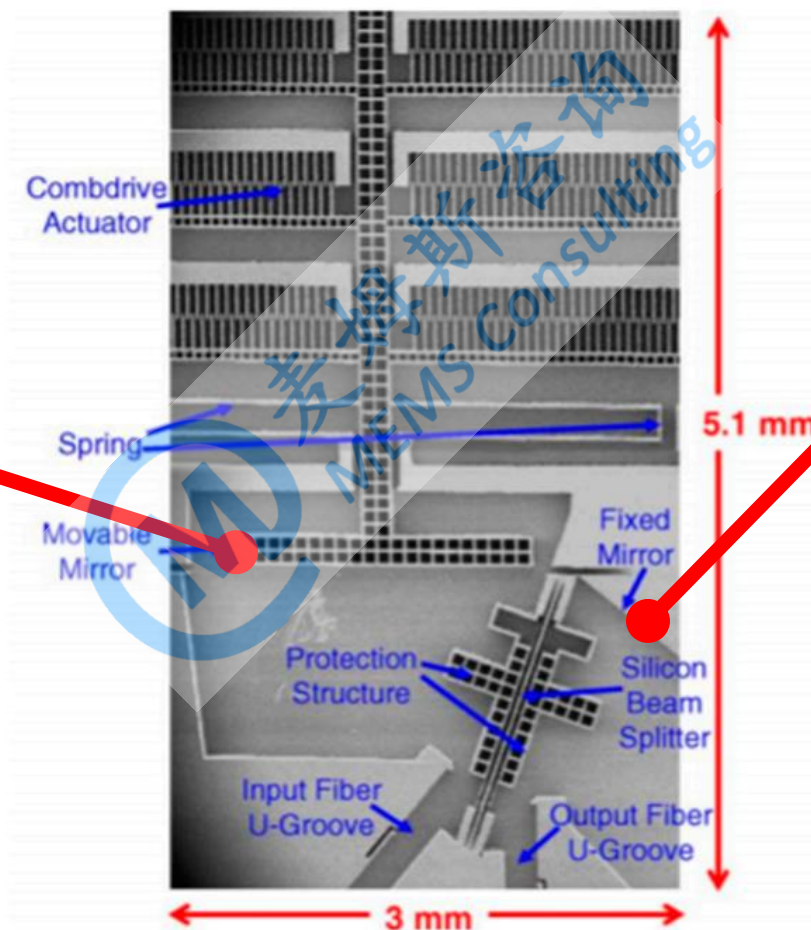
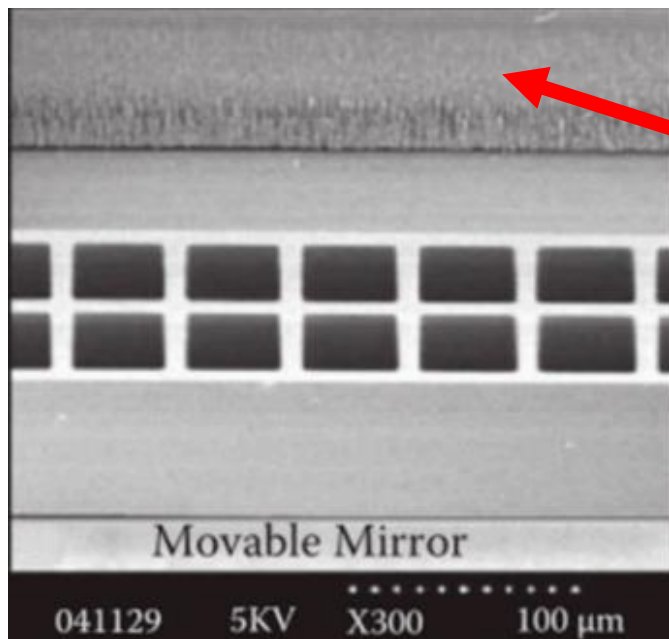
准静态驱动下、静电力几乎不受温度的影响，驱动精度高，甚至可以完全开环控制

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 1) 静电驱动的In plane案例

静镜表面质量

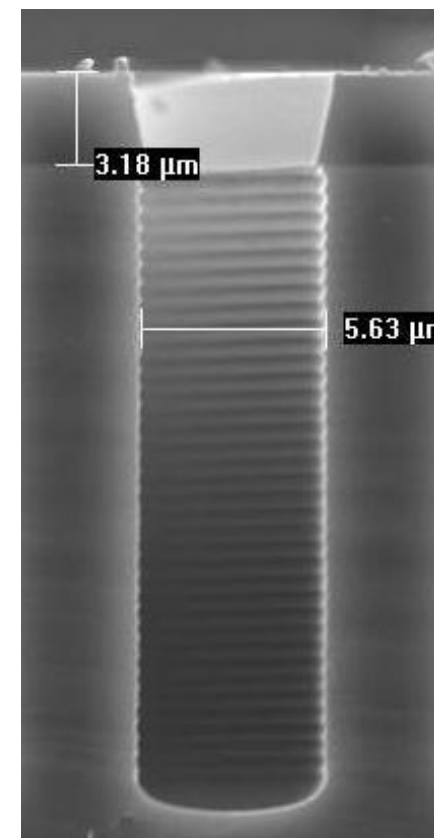
动镜表面质量



# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 1) 静电驱动的In plane案例

DRIE采用刻蚀和钝化交替的Bosch工艺, 侧壁形成特有的扇贝纹 (scalloping), 严重影响光学质量



# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 1) 静电驱动的In plane案例



**Etch Depth**  
决定了光斑直径  
(300 $\mu\text{m}$ )

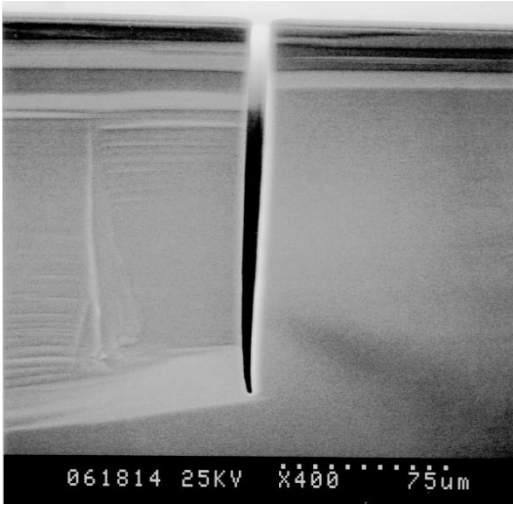
**Scalloping depth**  
影响光学损耗  
(60nm)

**侧壁倾斜角**  
影响光路对准  
(90° $\pm$ 0.1°)



# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

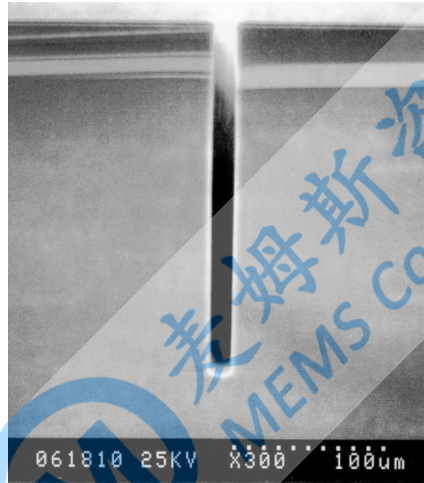
## 1) 静电驱动的In plane案例



**Positive**

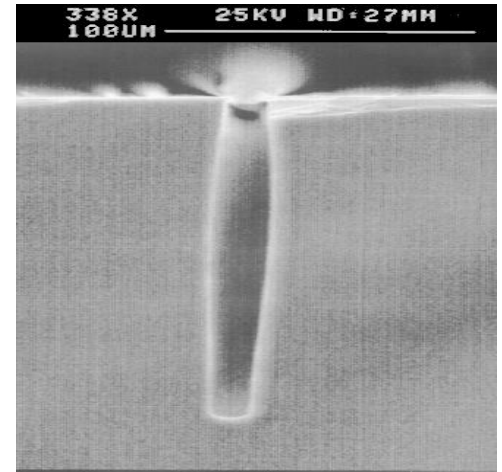
To optimise:

- Increase etch platen power
- Reduce pressure



**Perfect  
Side Wall**

**优化侧壁陡直度**



**Bowing**

To optimize:

- Reduce etch platen power
- Reduce pressure

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 1) 静电驱动的In plane案例

A=刻蚀时间

B=钝化时间

$R=A/B$

保持R不变

等比例减小A和B

可以减小scalloping

刻蚀完成后通过多次  
侧壁氧化+HF腐蚀抛  
光，可以减小  
scalloping

优化scalloping

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

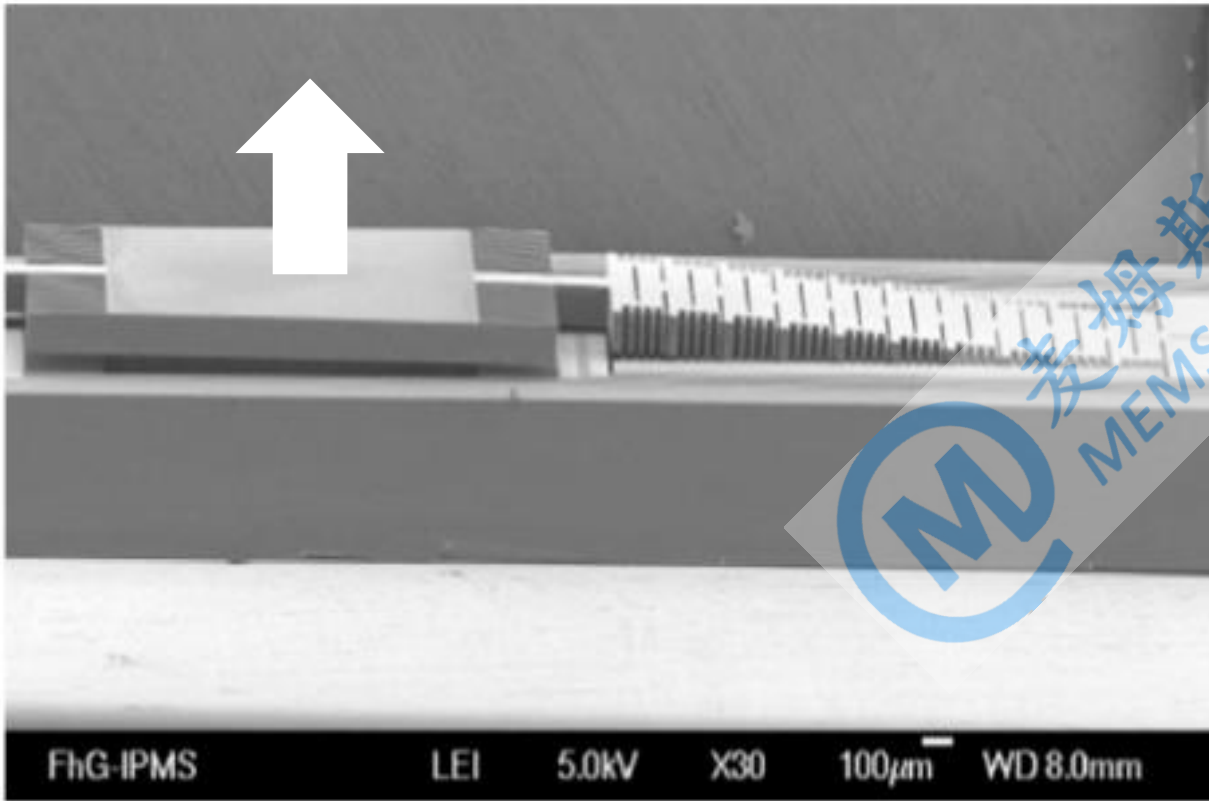
## 1) 静电驱动的In plane案例

Authors	Institution	Actuation Type	Core of FTS	Displacement	Work Condition	Device Size
Manzardo et al.	UniNE	In-plane	MI	77 $\mu\text{m}$	10 V-amplitude	MEMS chip: $5 \times 4 \text{ mm}^2$ (Mirror: $75 \times 500 \text{ }\mu\text{m}^2$ )
Manzardo et al.	UniNE	In-plane	LGI	145 $\mu\text{m}$	65 V	MEMS chip: $5 \times 5 \text{ mm}^2$
Merenda et al.	ARCOptix and EPFL	In-plane	LGI	>500 $\mu\text{m}$	—	Entire FTS: $10 \times 15 \times 7 \text{ cm}^3$
Yu et al	SNU, Stanford, and SNL	In-plane	MI	25 $\mu\text{m}$	150 V @ 5 Hz	Entire FTS: $4 \times 8 \times 0.6 \text{ mm}^3$
Khalil et al.	ASU and SWS	In-plane	MI	48 $\mu\text{m}$	@ resonance	-
Khalil et al.	ASU and SWS	In-plane	MZI	62.5 $\mu\text{m}$	70 V @ resonance	Entire FTS: $1 \times 2 \text{ mm}^2$
Mortada et al.	SWS, EP, and ASU	In-plane	MI	62.5 $\mu\text{m}$ or 200 $\mu\text{m}$	—	—
Eltagoury et al.	ASU and SWS	In-plane	FPI	—	—	—

驱动方式普遍是静电梳齿驱动，动镜/静镜厚度受限于DRIE刻蚀深度，普遍小于1mm，采用准静态驱动最大位移普遍为100微米左右，但是准静态驱动不受温漂影响，可以开环控制

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 2) 静电驱动的Out of plane案例



### 优点

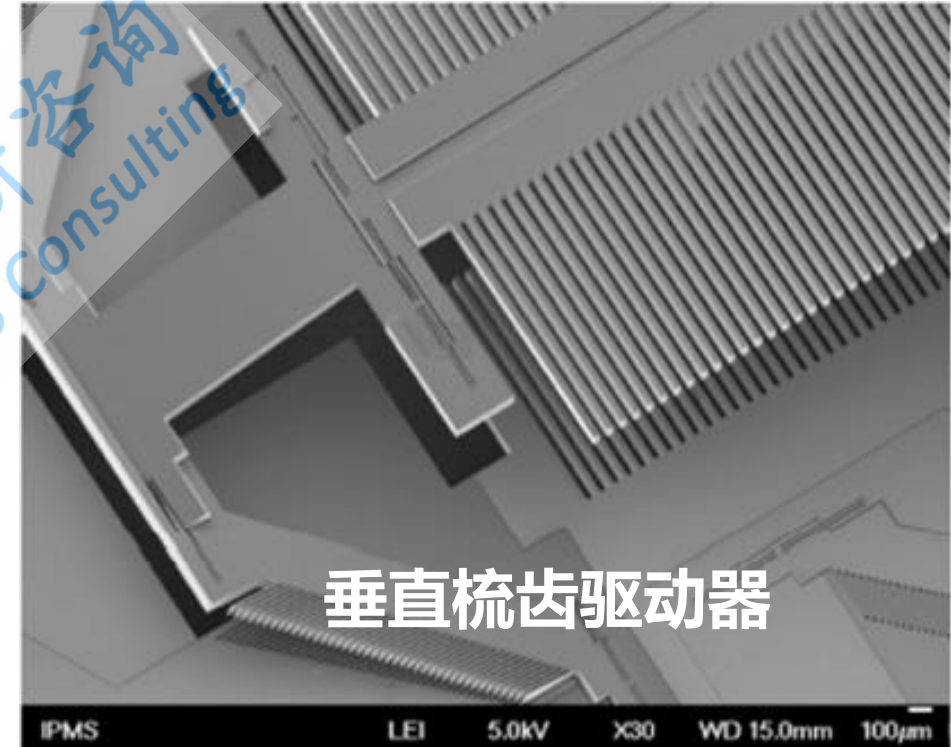
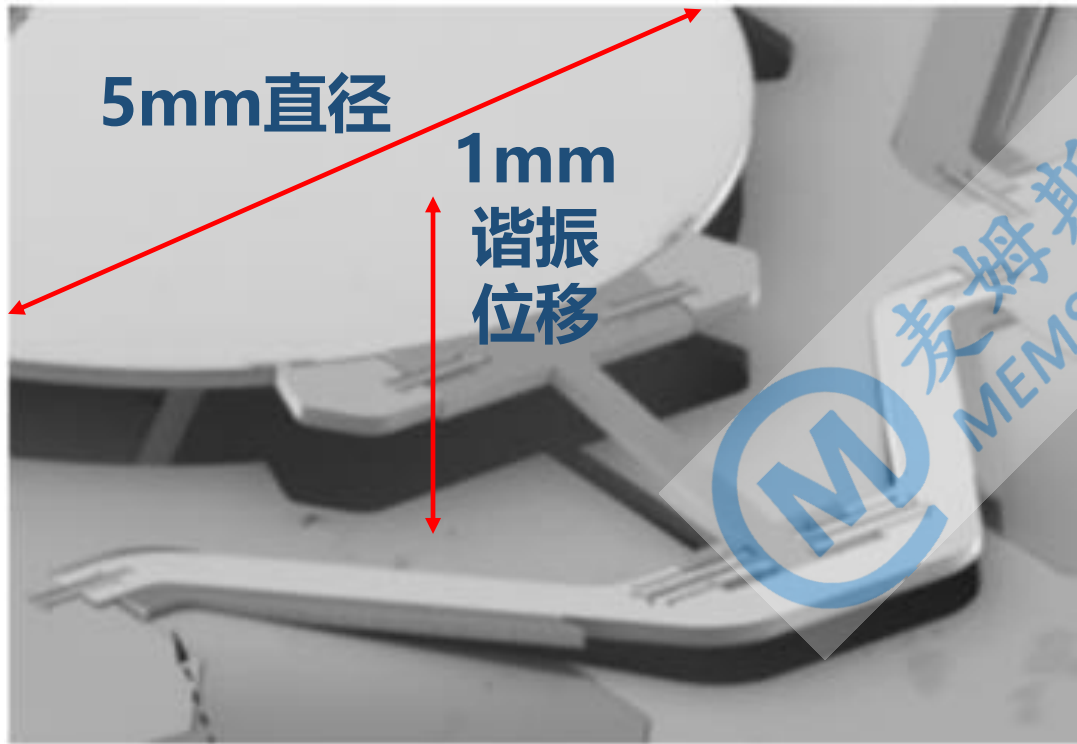
- 1、动镜尺寸不受限于DRIE刻蚀深度  
(1.5 mm × 1.1 mm)
- 2、光学表面质量可以通过CMP保证，不受刻蚀影响

### 缺点

- 1、out of plane变形不容易做大，通常需要在真空封装下谐振来放大位移  
(200微米@40V/5kHz谐振、100Pa真空)
- 2、动镜和静镜不方便集成在同一芯片上，需要通过装配精度保证光路对准精度

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 2) 静电驱动的Out of plane案例





# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

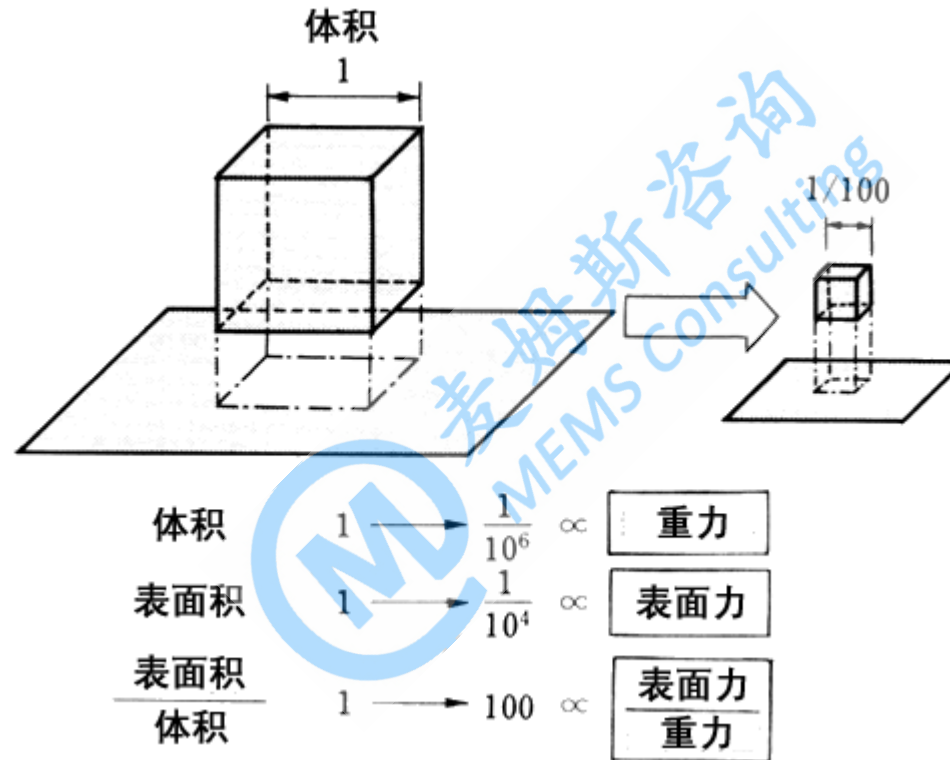
## 2) 静电驱动的Out of plane案例

Authors	Institution	Actuation Type	Core of FTS	Displacement	Work Condition	Device Size
Sandner et al.	IPMS	Out-of-plane	—	200 μm	40 V @ 100 Pa vacuum, 5 kHz	MEMS chip: 1.8 × 9 mm <sup>2</sup> (Mirror: 1.5 × 1.1 mm <sup>2</sup> )
Sandner et al.	IPMS	Out-of-plane	—	500 μm	500 Hz	Aperture: 3 mm in diameter
Sandner et al.	IPMS	Out-of-plane	—	1.2 mm	50 V @ 30 Pa vacuum, 500 Hz	Aperture: 5 mm in diameter
Ataman et al.	KU and IPMS	Out-of-plane	LGI	106 μm	28 V @ resonance	Aperture: 3 × 3 mm <sup>2</sup>
Seren et al.	KU and IPMS	Out-of-plane	LGI	355 μm	76 V @ 971 Hz	Aperture: 10 × 10 mm <sup>2</sup>

普遍是垂直梳齿驱动，动镜/静镜厚度不受DRIE刻蚀深度限制，普遍大于1mm，准静态驱动位移太小，只能谐振驱动，谐振振幅比较容易受到温漂影响，必须闭环控制

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

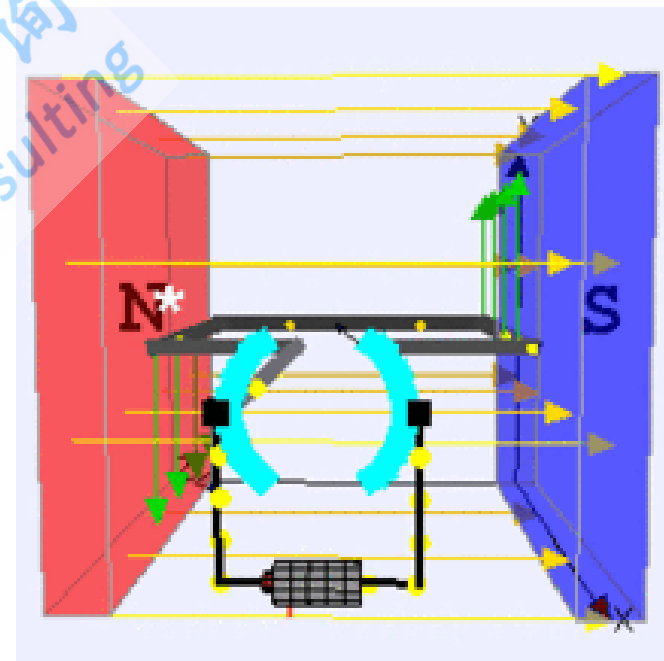
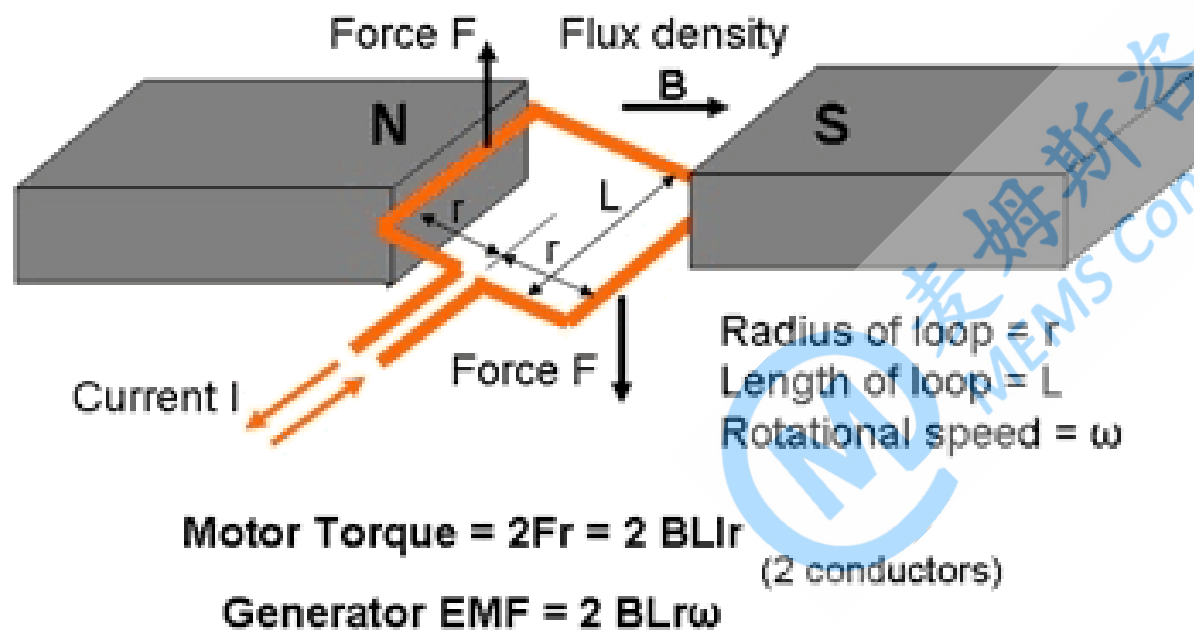
## 3) 电磁驱动的就in plane & out of plane案例



由于尺度效应，微观尺度下，和表面积相关的力(如静电力)相对增大，和体积相关的力(如电磁力)相对减小。但是，在亚毫米尺度，电磁力还是比静电力更大

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 3) 电磁驱动(in plane & out of plane)案例

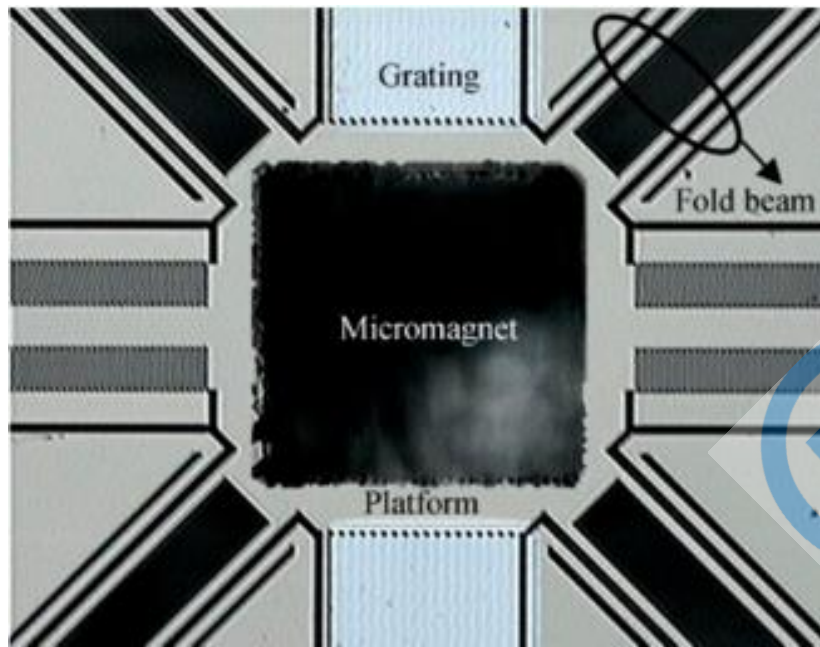


产生电磁力（洛伦兹力），需要磁场和通电线圈，磁场和通电线圈的布置方式决定了是out of plane还是in plane运动方式

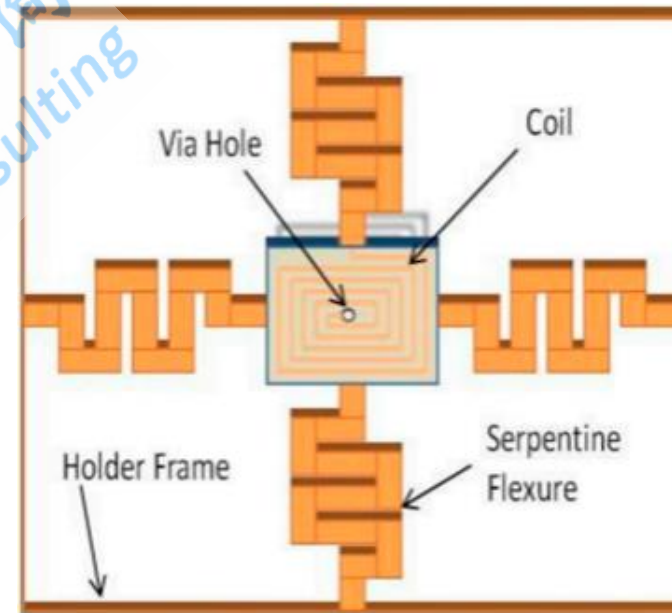


# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 3) 电磁驱动/in plane & out of plane案例



磁铁在镜面上<sup>[1]</sup>



线圈在镜面上<sup>[2]</sup>

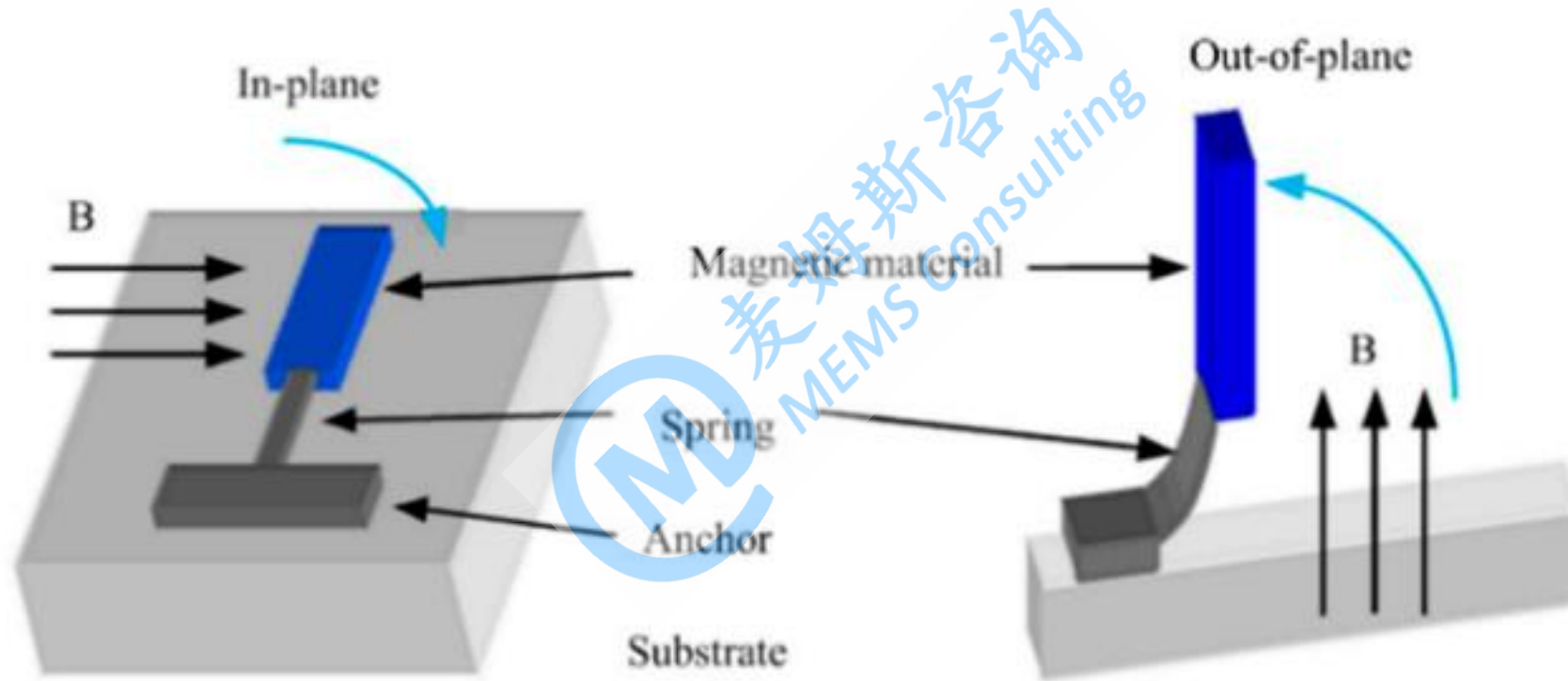
参考文献:

[1] An electromagnetically driven Lamellar grating based Fourier transform microspectrometer. J. Micromech. Microeng. 2008

[2] FR4 Electromagnetic Scanner Based Fourier Transform Spectrometer. In Proceedings of the Volume 2: 31st Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B; ASME International: New York, NY, USA, 2011

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 3) 电磁驱动(in plane & out of plane)案例



改变磁路布置，可以在in plane和out of plane之间变换

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 3) 电磁驱动(in plane & out of plane)案例

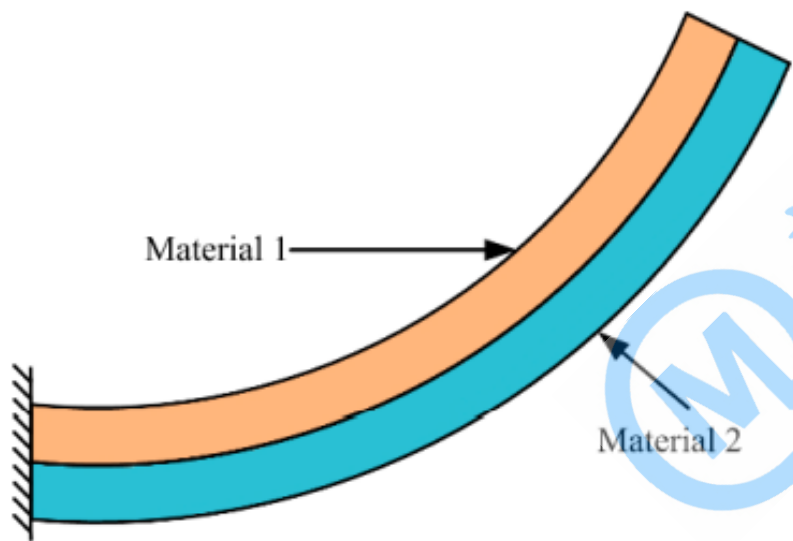
Authors	Institution	Actuation Type	Core of FTS	Displacement	Work Condition	Device Size
Wallrabe et al.	Uni Freiburg and FK	Lorentz-type	MI	110 $\mu\text{m}$	12 mW	Entire FTS: $11.5 \times 9.4 \text{ mm}^2$
Yu et al.	NUS and DSI	Lorentz-type	LGI	125 $\mu\text{m}$	129 mA-amplitude	—
Baran et al.	KU	Lorentz-type	MI	325.6 $\mu\text{m}$	120 mVpp @ 149 Hz	MEMS chip: $7 \times 8 \text{ cm}^2$ (Mirror: $1 \times 1 \text{ cm}^2$ )
Xue et al.	RU	Magnetic pole-type	—	123 $\mu\text{m}$	400 mA.	Mirror: $2 \times 2 \text{ mm}^2$
Xue et al.	RU	Magnetic pole-type	—	144 $\mu\text{m}$	140 mA	Mirror: $2 \times 2 \text{ mm}^2$

电磁驱动，力量大，位移大。但是磁路的存在，增大了体积，降低了集成度，同时磁路的装配引入了对准误差

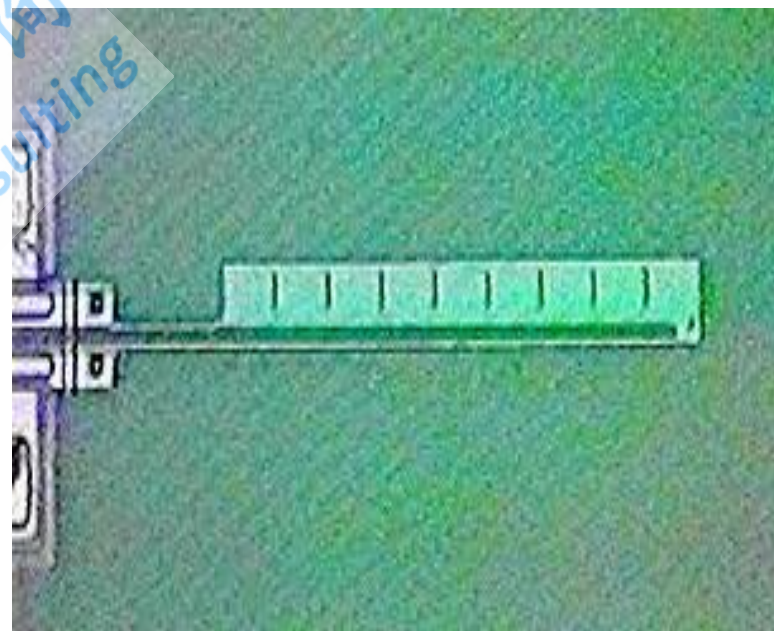
参考文献： Review of MEMS based Fourier transform spectrometers[J]. Micromachines, 2020

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 4) 热驱动/in plane & out of plane案例



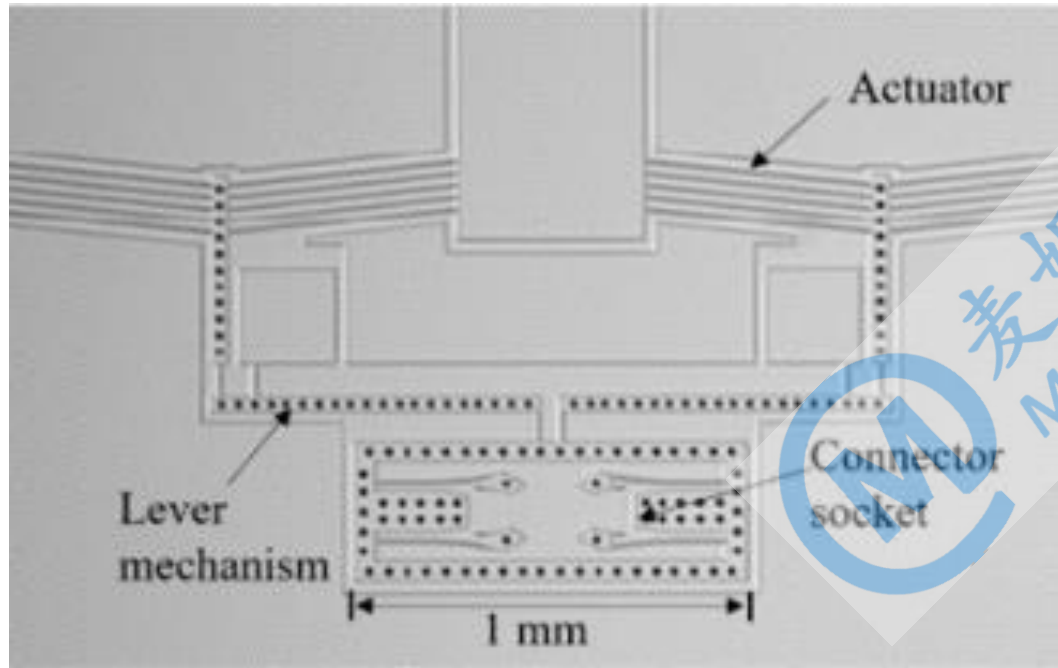
不同材料组成的热驱动器



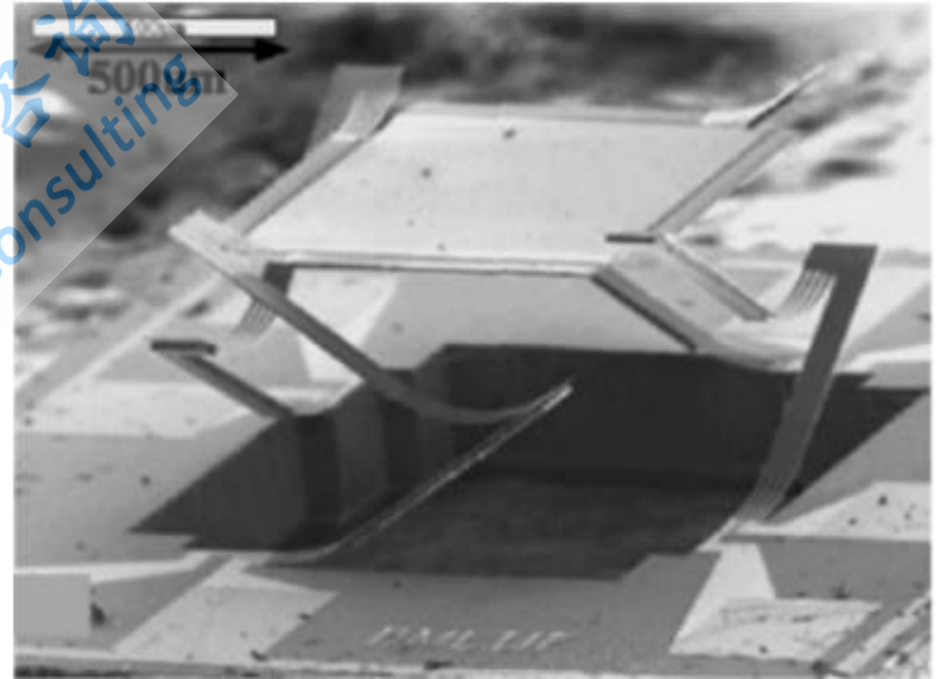
相同材料组成的热驱动器

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 4) 热驱动/in plane & out of plane案例



In plane运动的热驱动器<sup>[1]</sup>



Out of plane运动的热驱动器<sup>[2]</sup>

参考文献:

[1] Assembled Fourier transform micro-spectrometer. Proc. SPIE, 2006

[2] A large vertical displacement electrothermal bimorph microactuator with very small lateral shift. Sensors Actuators A Phys. 2008



# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 4) 热驱动的热驱动in plane & out of plane案例

Authors	Institution	Actuation Type	Core of FTS	Displacement	Work Condition	Device Size
Sin et al.	UTA	In-plane	MI	30 $\mu\text{m}$	22 V	Entire FTS: $10 \times 10 \text{ mm}^2$ (Mirror: $0.5 \times 0.45 \text{ mm}^2$ )
Das et al.	UTA	In-plane	MI	45 $\mu\text{m}$	45 V	Entire FTS: $10 \times 10 \text{ mm}^2$ (Mirror: $1 \times 0.8 \text{ mm}^2$ )
Reyes et al.	BML	In-plane	MI	600 nm	—	—
Wu et al.	UF	Out-of-plane	—	620 $\mu\text{m}$	5.3 V.	—
Wu et al.	UF	Out-of-plane	MI	131 $\mu\text{m}$ and 308 $\mu\text{m}$	—	Entire FTS: $12 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$
Wang et al.	SJTU and UF	Out-of-plane	MI	550 $\mu\text{m}$	7 V DC	MEMS chip: $4.3 \times 3.1 \text{ mm}^2$ (Mirror: $1.1 \times 1.1 \text{ mm}^2$ )
Samuelson et al.	UF	Out-of-plane	—	90 $\mu\text{m}$	1.2 V DC	MEMS chip: $1.9 \times 1.9 \text{ mm}^2$ (Mirror Aperture: 1mm)
Chai et al.	USST, WiO Tech, and UF	Out-of-plane	MI	200 $\mu\text{m}$	5 V <sub>pp</sub> @ 5 Hz	MEMS chip: $3.65 \times 11.4 \text{ mm}^2$ (Mirror: $1.4 \times 1.2 \text{ mm}^2$ )

热驱动，力量大，位移大（比电磁驱动和静电驱动都大）。但是因为加热和散热的延时，热驱动的反应速度慢，容易受到环境温度的影响

# MEMS动镜的分类、原理、设计与制造

## 不同驱动方式MEMS动镜的综合比较

Various Actuators	Advantages	Disadvantages
Electrostatic actuators	Fast response	Vacuum package and resonance operation
	Low power consumption	Limited displacement Pull-in behavior
Electromagnetic actuators	Moderately large displacement	External magnetic field needed Large size
Electrothermal actuators	Large displacement	Large power consumption
	Moderately fast response	Sensitivity to environmental temperature changes

# 总结

- 1、In plane运动的MEMS动镜更好的把整个迈克尔逊干涉仪一次性制备到单芯片上，减少装配引起的光路偏差；**
- 2、静电梳齿驱动的MEMS动镜能易于准静态控制，受温度影响小，不需要外加任何驱动辅助元件，基本上是全硅工艺，工艺集成度高，和半导体工艺兼容性好**



感谢大家  
的聆听

