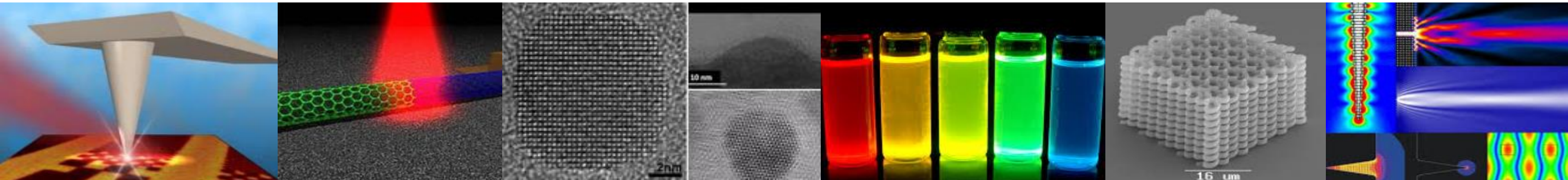
纳米光子学 Nanophotonics

第10讲：等离子体集成光路

兰长勇

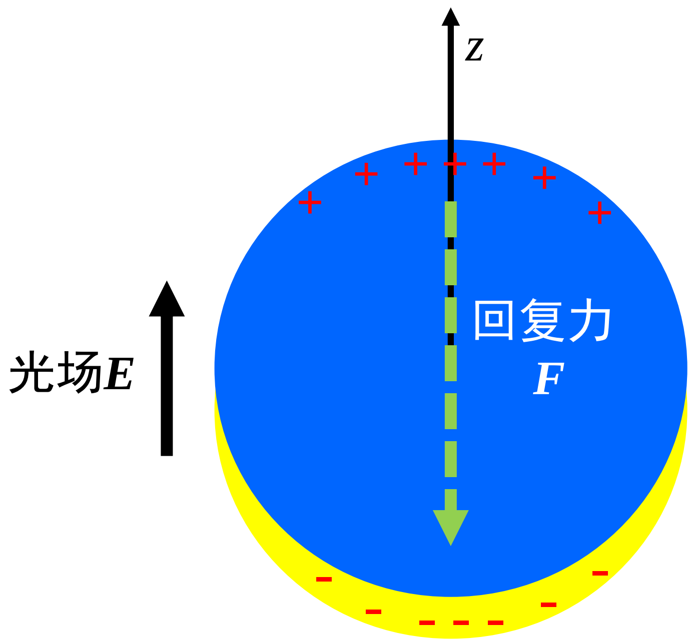
光电科学与工程学院



补充

LSP共振物理图像

- 电子云在光场作用下做集体振荡
- 正负电荷中心偏离产生回复力F



$$m\frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} - F = -qE$$

光场： $E = E_0 e^{-\mathrm{i}\omega t}$

回复力：$F = -az$

$$\frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} + \omega_0^2 z = -\frac{q}{m} E_0 e^{-\mathrm{i}\omega t}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{a}{m}}$$

$$z = \frac{q/m}{\omega^2 - \omega_0^2} E_0 e^{-\mathrm{i}\omega t}$$

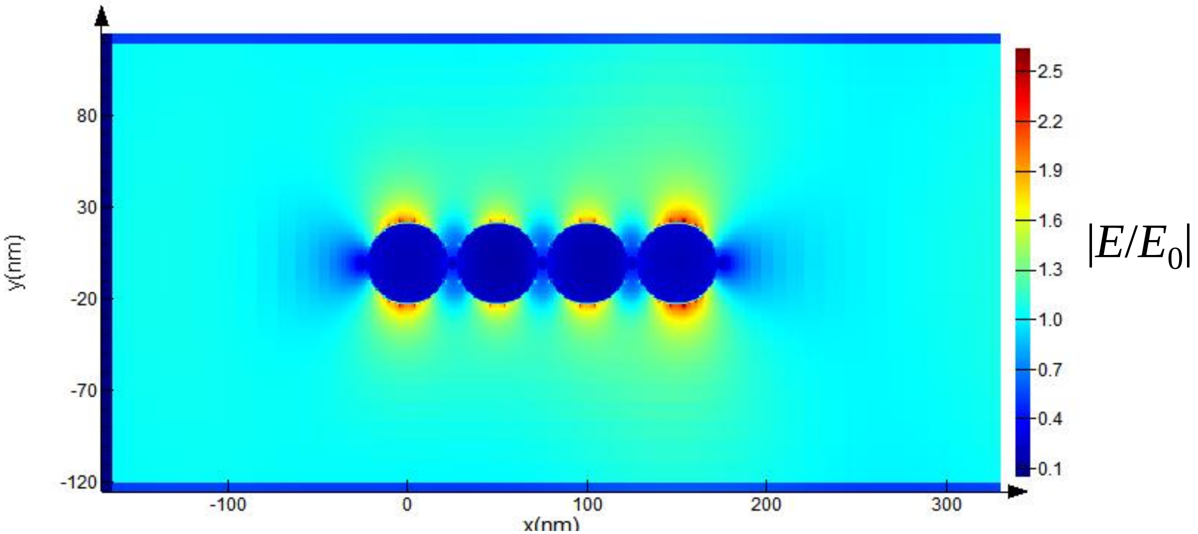
ω_0 ：LSP共振频率

采用此图像便于理解，但是系数 a, q 无法获得。

补充

横模

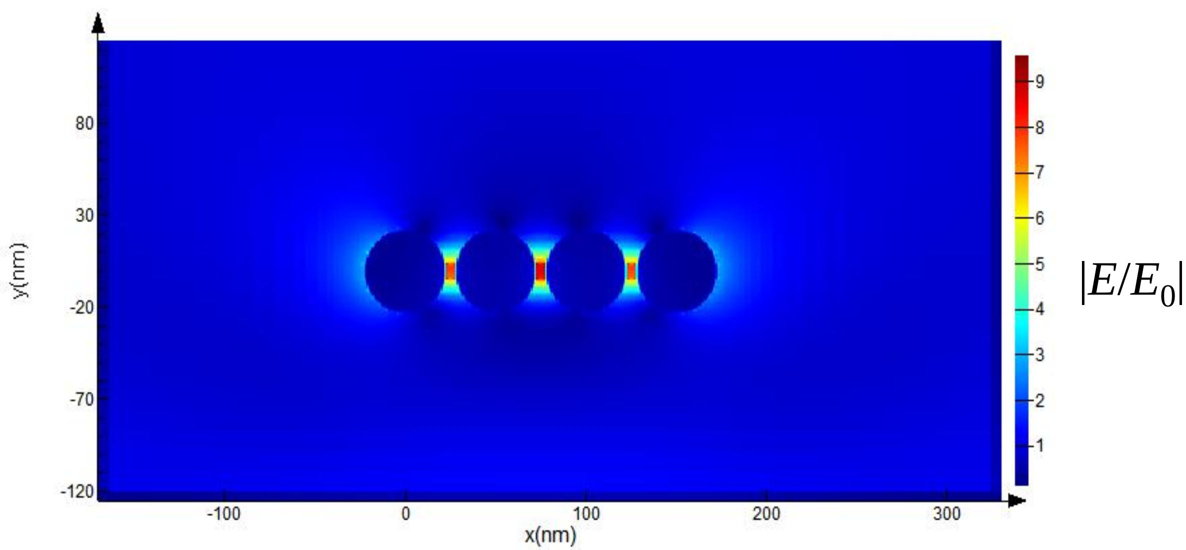
E



80
30
-20
-70
-120
y(nm)
-100
0
100
200
300
x(nm)
2.5
2.2
1.9
1.6
1.3
1.0
0.7
0.4
0.1
$|E/E_0|$

纵模

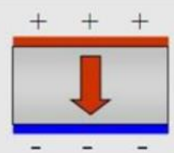
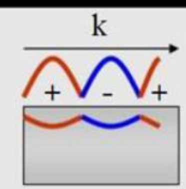
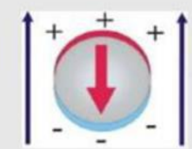
E



80
30
-20
-70
-120
y(nm)
-100
0
100
200
300
x(nm)
9
8
7
6
5
4
3
2
1
$|E/E_0|$

等离子体光学

- 金属光学与体积等离激元
- 表面等离子体激元
- 表面等离子体激元的激发与表征
- 局域表面等离子体
- 等离子体集成光路

	Volume plasmons	SPPs	LSPs (nanosphere)
原理图			
模式性质	金属体内的电荷的集体振荡	金属表面的传播模式	不传播束缚模式
波的性质	纵向	横向&纵向	—
特征频率	$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m}}$	$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1+\varepsilon_d}}$	$\omega_{lsp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1+2\varepsilon_d}}$
与光的相互作用	不相互作用 (non-EM wave)	与光子耦合 产生谐振	谐振消光 (散射+吸收)

本讲内容

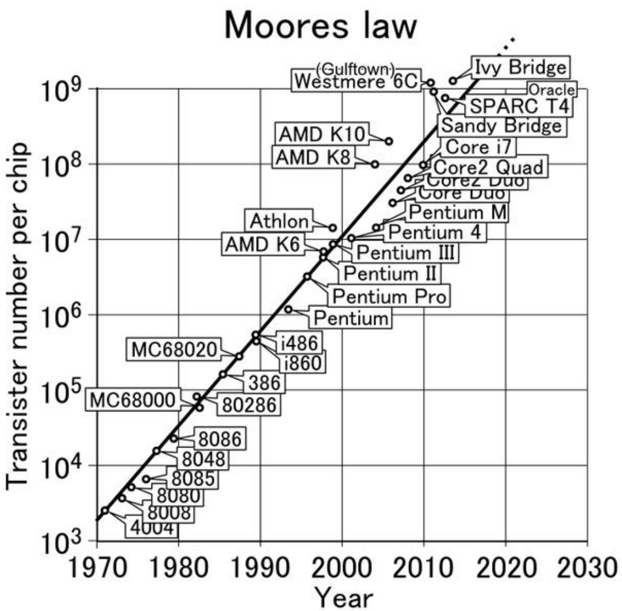
- 为什么研究等离子体集成光路？
- 等离子体集成光路
  - SPP源/发射器
  - SPP波导
  - SPP的导向
  - SPP的调制
  - SPP的放大
  - SPP的探测

等离子体光路的基本组件

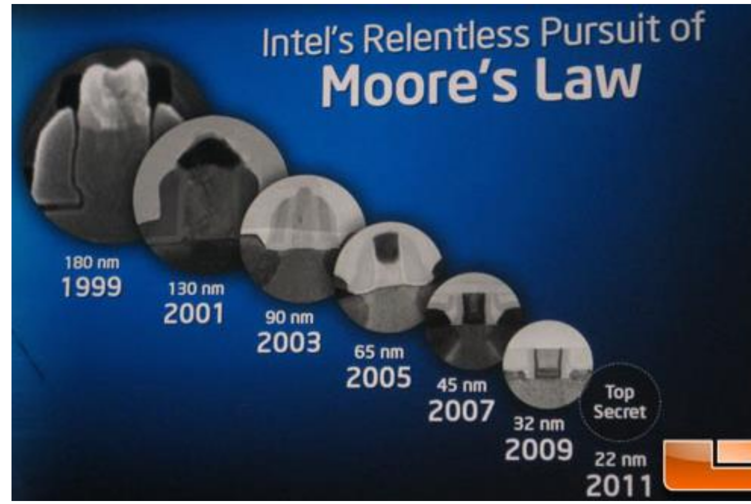
- 等离子体集成光路的展望

- Stefan Alexander Maier, Plasmonics—fundamentals and applications; Chapter 7
- D. K. Gramotnev, et al. “Plasmonics beyond the diffraction limit”, Nature Photonics, 2010
- V.J. Sorger, et al. “Toward integrated plasmonic circuits”, MRS bulletin, 2012

1. 为什么要研究等离子体集成光路？



2015年 莫尔定律问世50周年

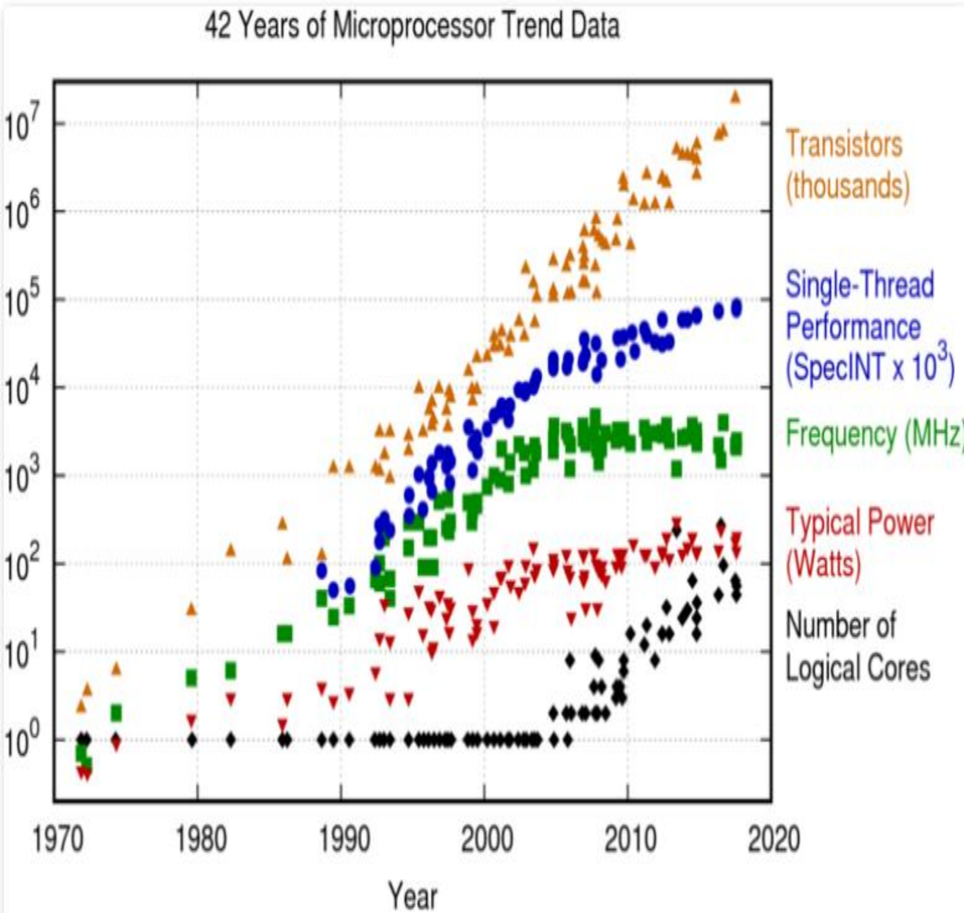


摩尔定律：单位面积上的晶体管数量每18-24个月增加一倍

3 nm process nodes [edit]

	Samsung[4][54]		TSMC[2][54]		Intel[7]
Process name	3GAE	3GAP	N3	N3E	3
Transistor type	MBCFET	MBCFET	FinFET	FinFET	FinFET
Transistor density (MTr/mm^2)	202.85	Unknown	314.73	Unknown	Unknown
SRAM bit-cell size (μm^2)	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown
Transistor gate pitch (nm)	40	Unknown	45	Unknown	Unknown
Interconnect pitch (nm)	32	Unknown	22	Unknown	Unknown
Release status	2022 risk production[4] 2022 production[44] 2022 shipping[55]	2023 production[4]	2021 risk production 2022 H2 volume production[2] 2023 H1 shipping for revenue[56]	2023 production[2]	2023 risk production[7] 2024 production[57]

硅基微电子发展极限



集成度 ～10^{10}

单线程性能

时钟频率，<10GHz限制

典型功率

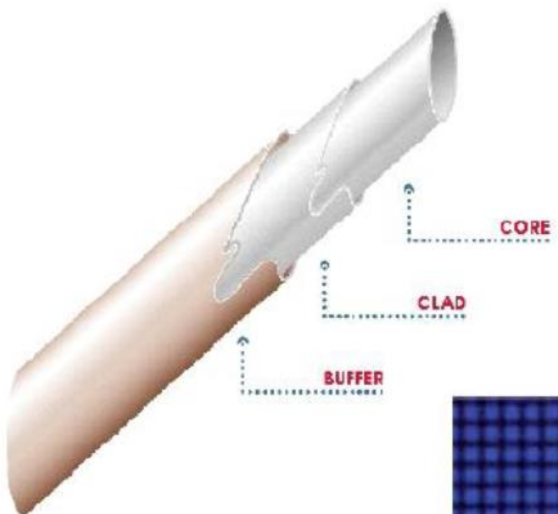
逻辑核心数

互联瓶颈

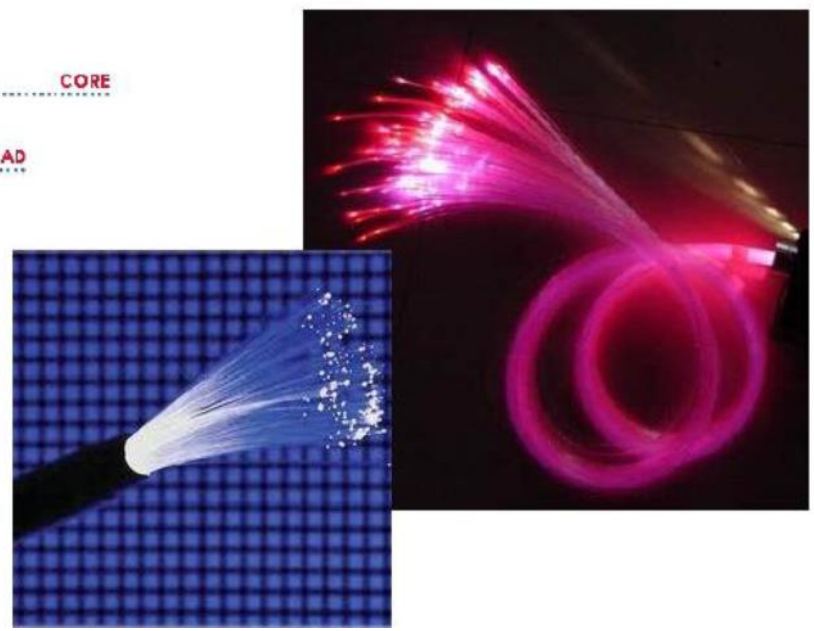
随着IC集成度的增加，排序做的更加紧凑，导致寄生电容大幅度增加，从而导致信号传输延迟大大增加。信号延迟限制了计算速度的提升！

光互联取代电互联

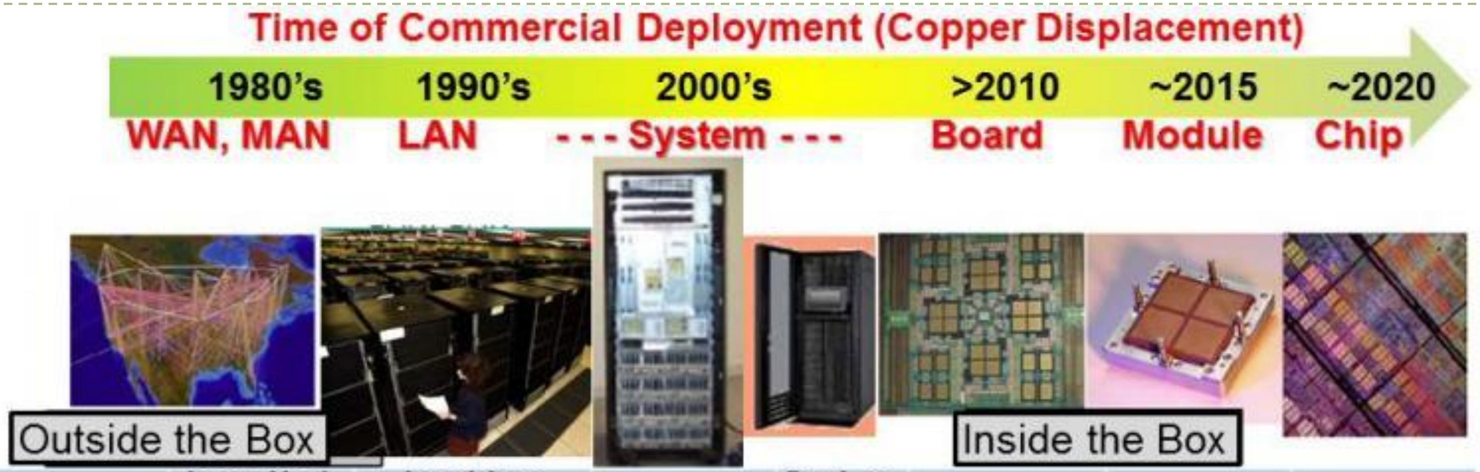
- 光互联的优点：
  - 大数字容量和带宽、快速信号处理



光纤:长距离通信

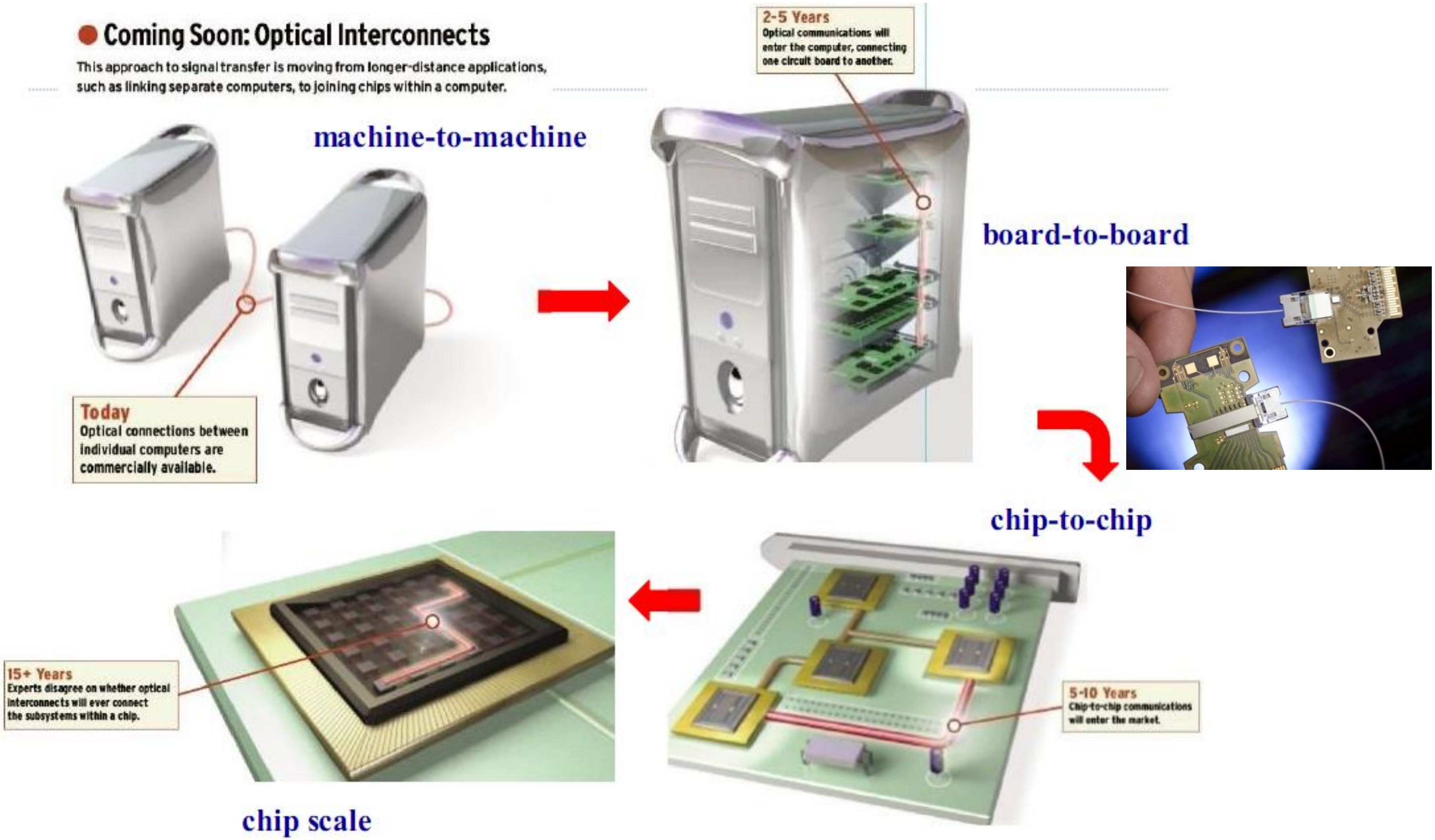


光互联取代电互联

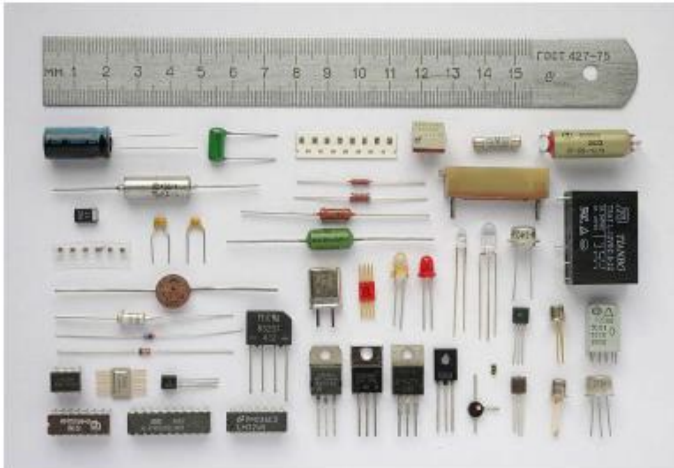


	Long-Haul, Metro	Local Area Networks	Rack-to-Rack	Card-to-Card	On-Card	On-Module	On-Chip
Distance	Multi – 100's km's	10 m – 2 km	<10 m intra- <100 m inter-	<1 m	0.1 – 0.3 m	0.5 -10 cm	< 20 mm
# of lines	single	tens	100's	100-1k's	1000,s	10,000's	100K-10M
Cost (\$/Gb/s)	1000	100	10	1	0.1	0.01	0.0001
Power (mW/Gb/s)	500	50	10	5	1	0.5	0.05
Density (Gb/s/mm²)	10^{-3}	10^{-2}	1	10	100	1000	10,000
Technologies	Internet Protocol, SONET, ATM	LAN/SAN Standard (Ethernet, InfiniBand, Fibre Channel)	Design-specific system buses, SAN standards (InfiniBand)		Design-specific. Some standards (PCI/PCI-X/3 GIO)	Standard and design specific components	IC design-specific
Optics or Copper	Optics ubiquitous since 80's or early '90s	Optics common since late 90's: Fiber standards in Enet, IB, FC	Optics coming in 2005-2010, with effort		Optics possible cost-effective vs. copper in 2010-2015	Standard components beyond 2012	Integrated optics beyond 2015

片上光互联 (On-chip Optical Interconnect)



传统的电子学器件与光学器件



电子学器件

光子学器件

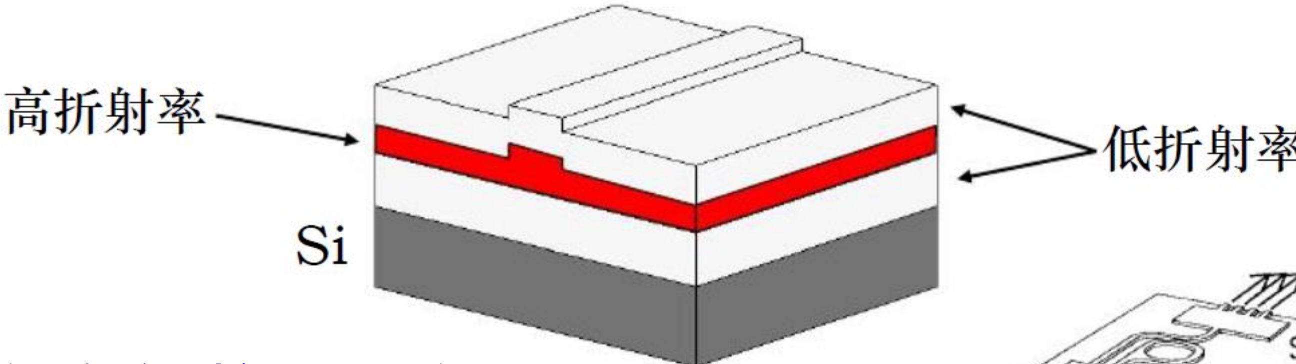
集成电路

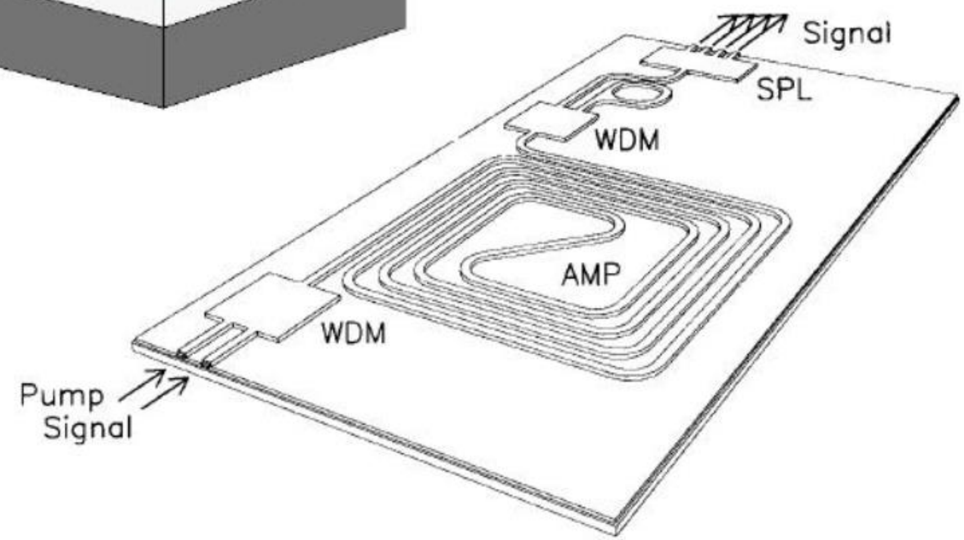
CPU：~GHz，Gbit /秒
~32 nm
散热大

光纤通信和光计算

光纤：~100Tbit/秒
~10 μm
基本无散热

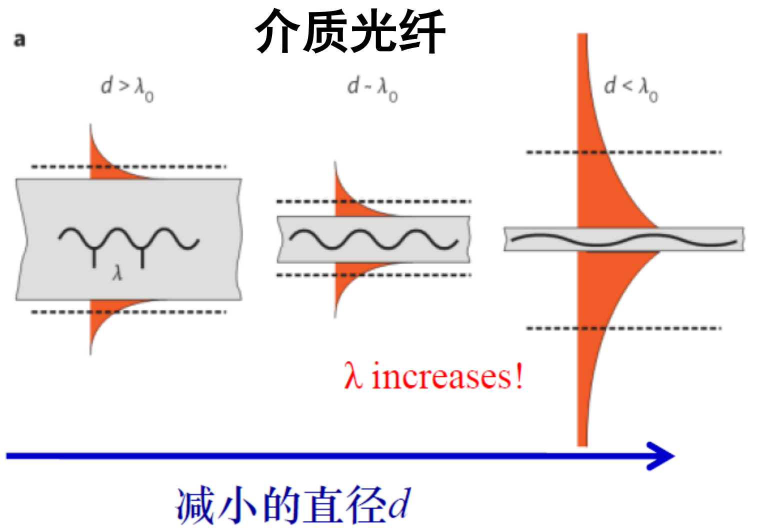
片上光互联优势

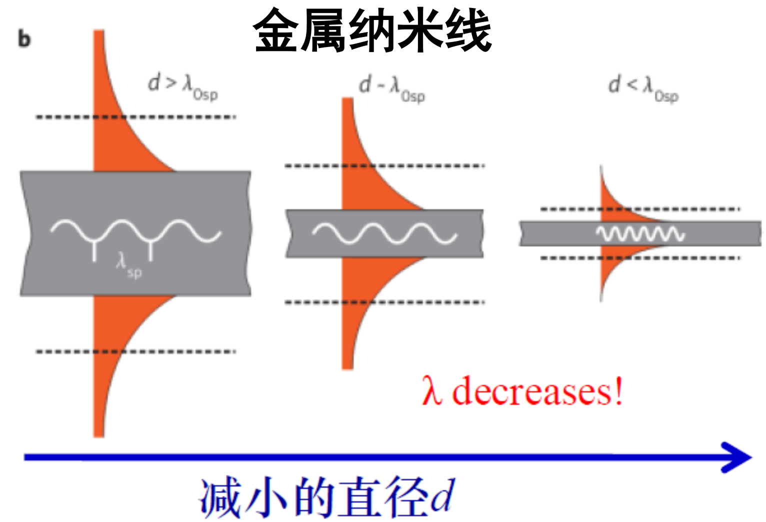




- 光开光器件响应时间最快达到10^{-15}s，即飞秒（fs）量级
- 利用多重波长和并行互联及处理可实现光互联。
- 由于光可以进行并行处理，可进行高速大容量信号处理

介质光纤 VS 金属纳米线





- 传导模式强烈渗透到周围介质，并最终成为平面波
- 模式尺寸减小到λ_0，再增加到无穷大
- 不可能亚波长局域

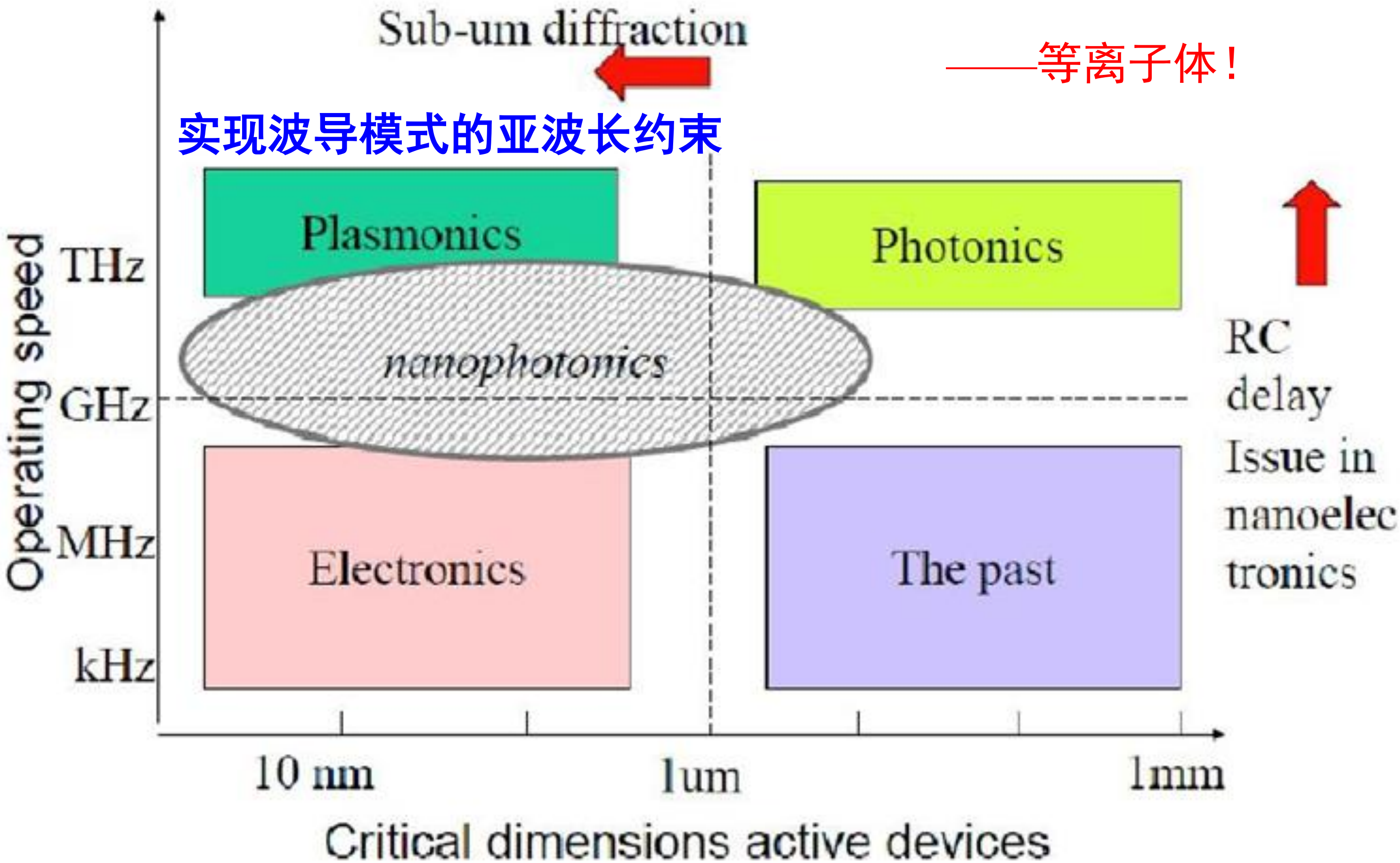
- 约束增加，传播常数增大，传播速度减小
- 模式大小可以减小到几nm
- 亚波长局域是可能的，可以实现纳米级光传输

Gramotnev and Bozhevolnyi, Nature Photon. **4**, 83 (2010).

光子学和电子学的融合需要纳米光子学

——等离子体！

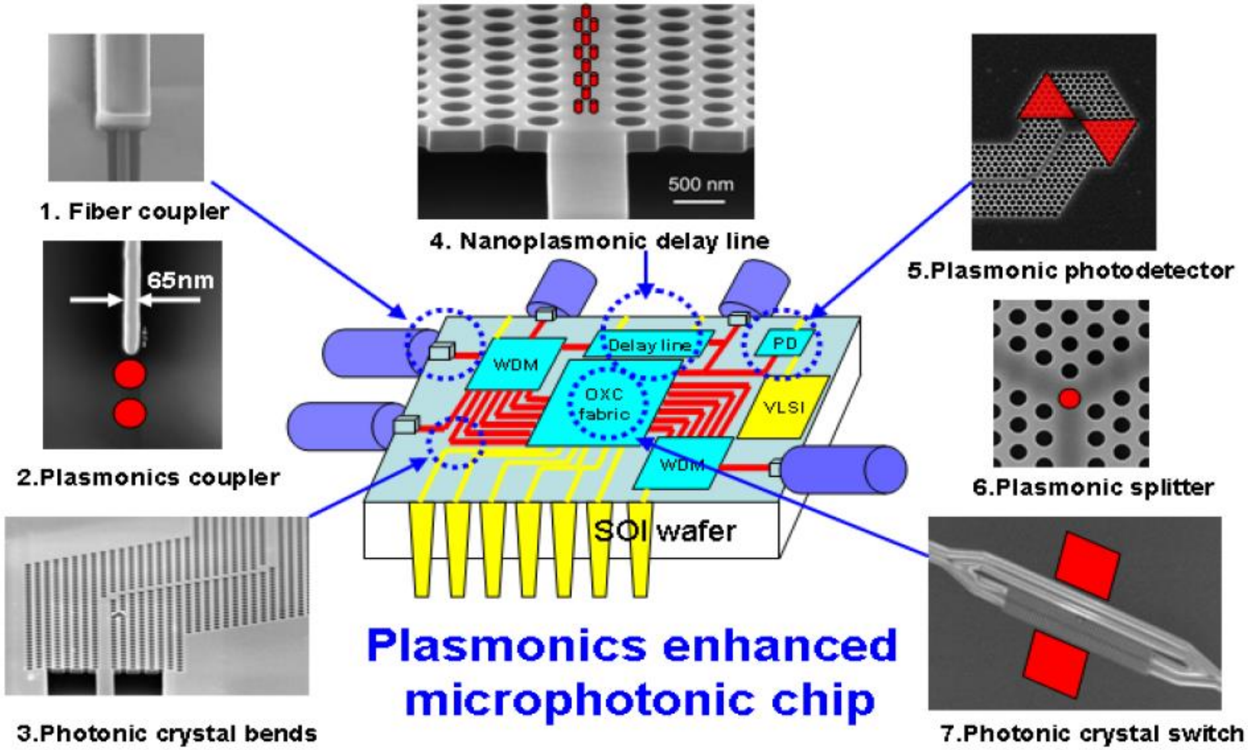
实现波导模式的亚波长约束



表面等离激元和光子的相互耦合
→ 纳米尺度光调控

→ 新原理、新方法

等离子体集成光路



片上的各种功能

- 激发方案（光学、电学）
- 波导
- 调制（对信息进行编码）
- 导向、滤波、、、
- 检测

关键：如何实现各个功能单元，即单个器件

本讲内容

- 为什么研究等离子体集成光路？
- 等离子体集成光路
  - SPP源/发射器
  - SPP波导
  - SPP的导向
  - SPP的调制
  - SPP的放大
  - SPP的探测

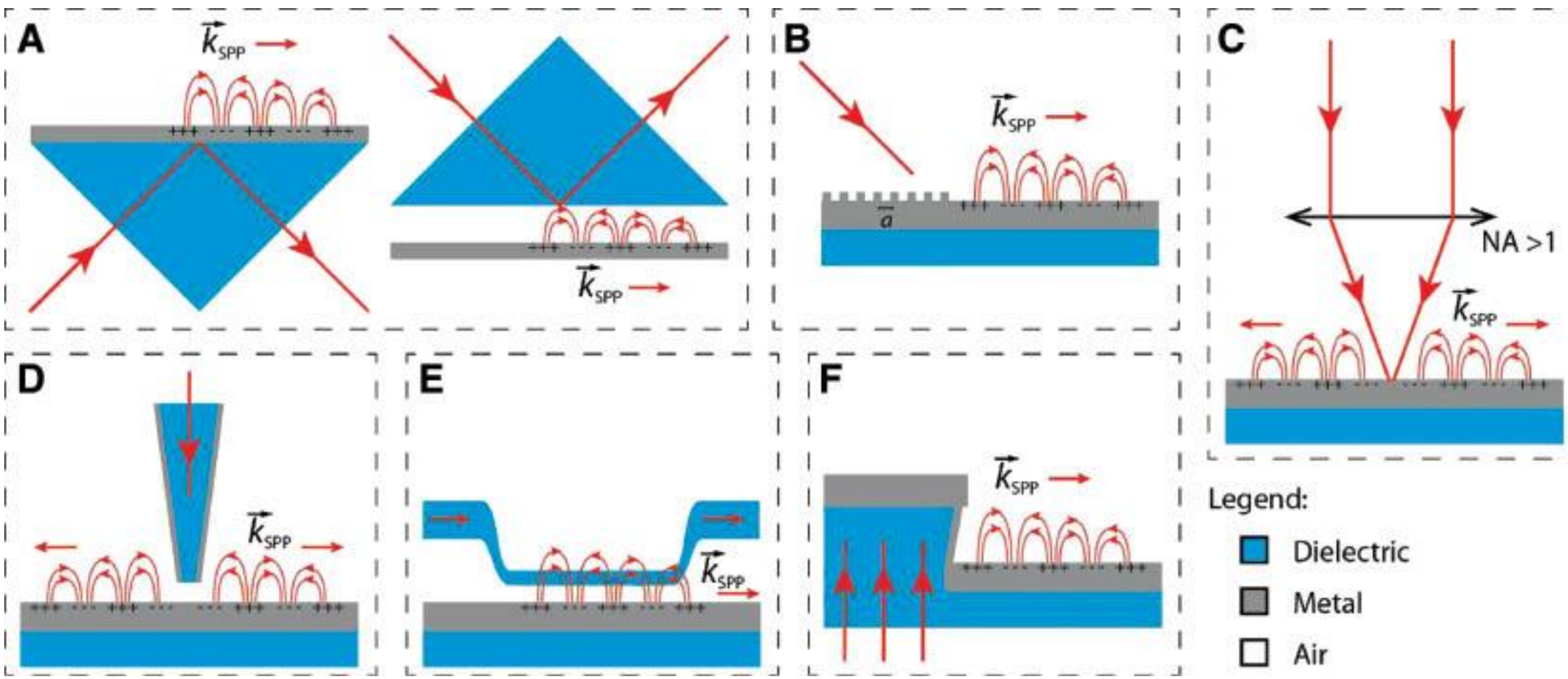
等离子体光路的基本组件

- 等离子体集成光路的展望

Stefan Alexander Maier, Plasmonics—fundamentals and applications; Chapter 7
D. K. Gramotnev, et al. "Plasmonics beyond the diffraction limit", Nature Photonics, 2010
V.J. Sorger, et al. "Toward integrated plasmonic circuits", MRS bulletin, 2012

SPP源/发射器—回顾激发方式小结

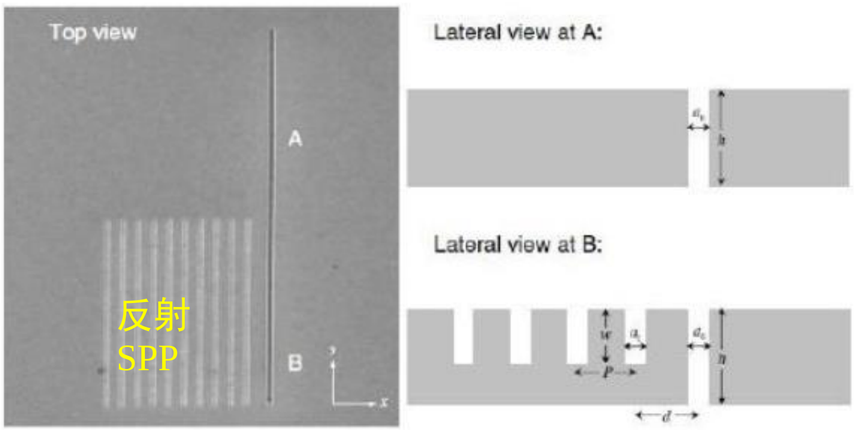
棱镜耦合激发 (Kretschmann)　棱镜耦合激发 (Otto)　栅结构耦合激发　高度集中光束激发

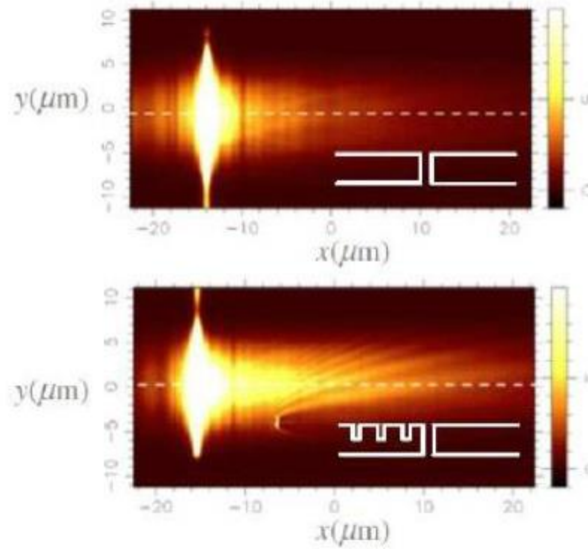


近场激发　泄漏模耦合　端射激发

SPP源/发射器—定向SPP发射

光栅 + 狭缝

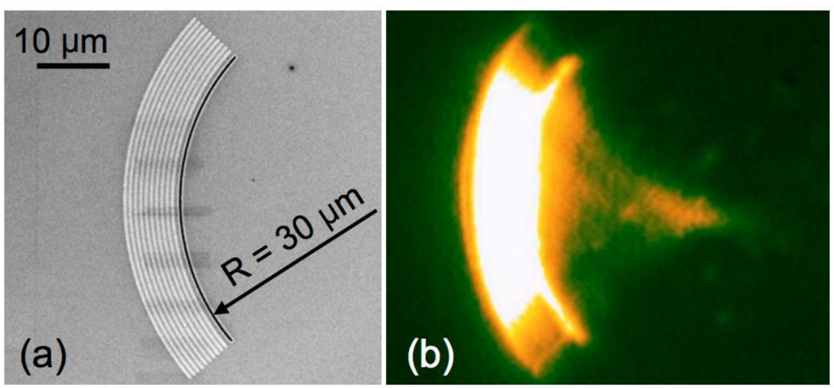


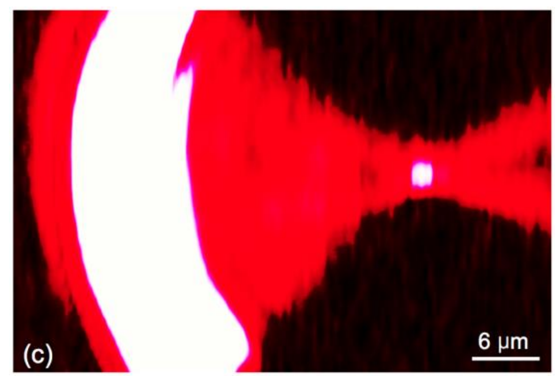


两侧传输

单侧传输

- 定向发生SPP





- SPP聚焦

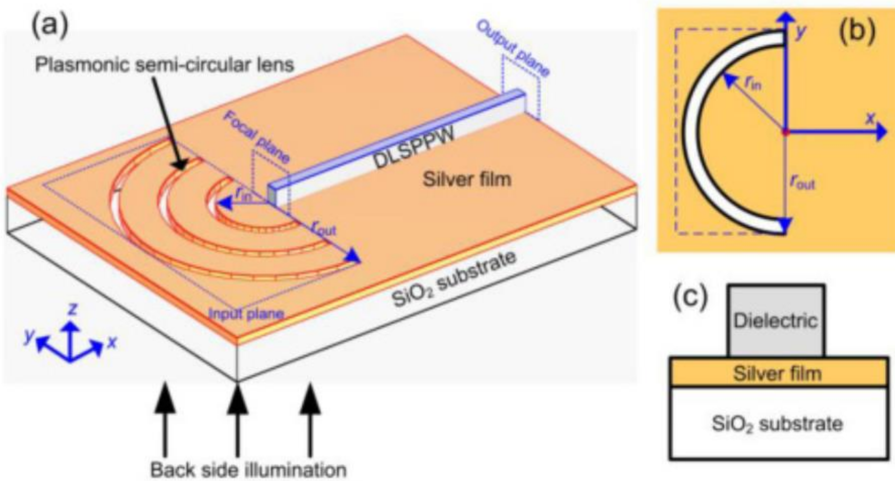
光学显微镜成像

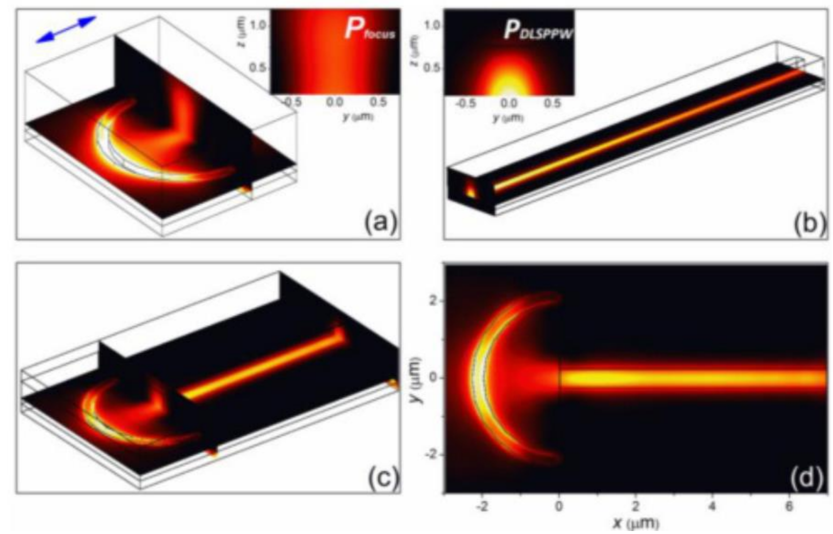
近场光学显微镜成像

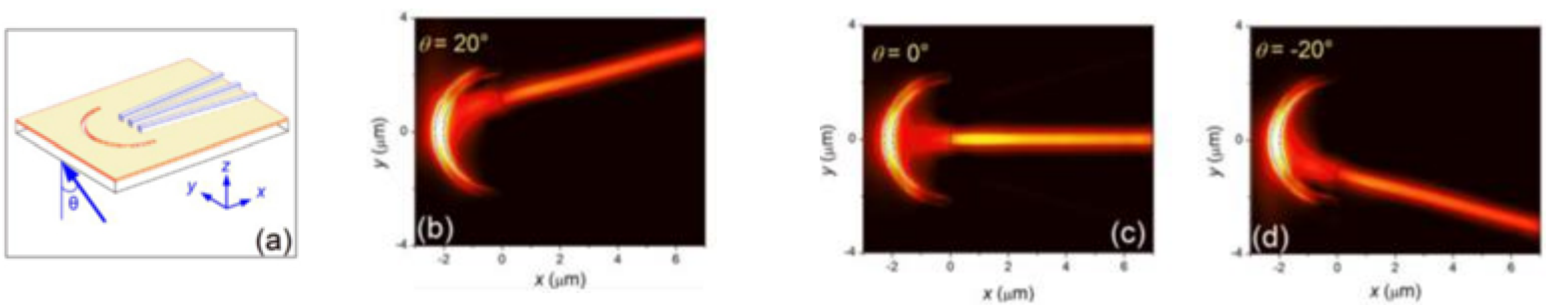
López-Tejeira et al., Nature Phys. **3**, 324 (2007)

SPP源/发射器—定向SPP发射

- SPP聚焦并导入SPP波导



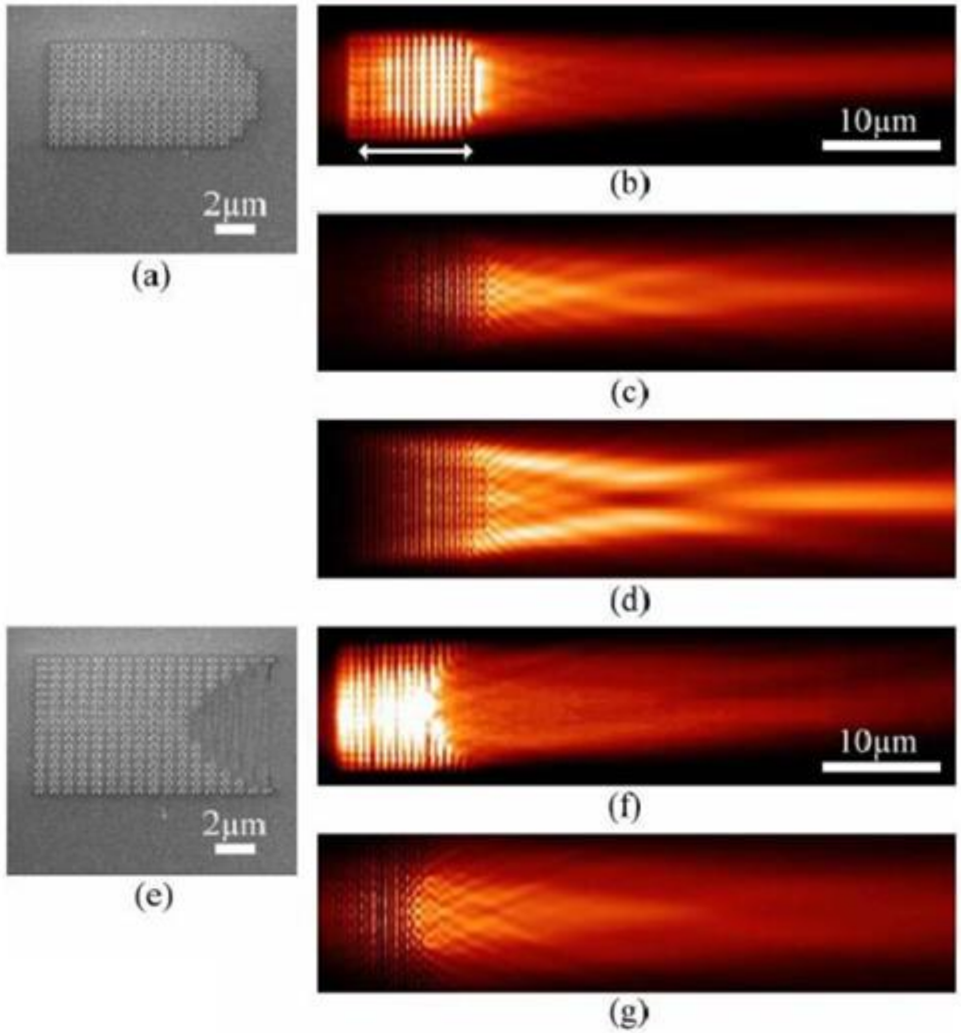




改变激发光入射角度可以将SPP聚焦在不同的波导上

 X. Li et al., OE **19**, 6541 (2011)

SPP源/发射器—发射与整形



近场光学显微图

仿真：非均匀光照

仿真：均匀光照

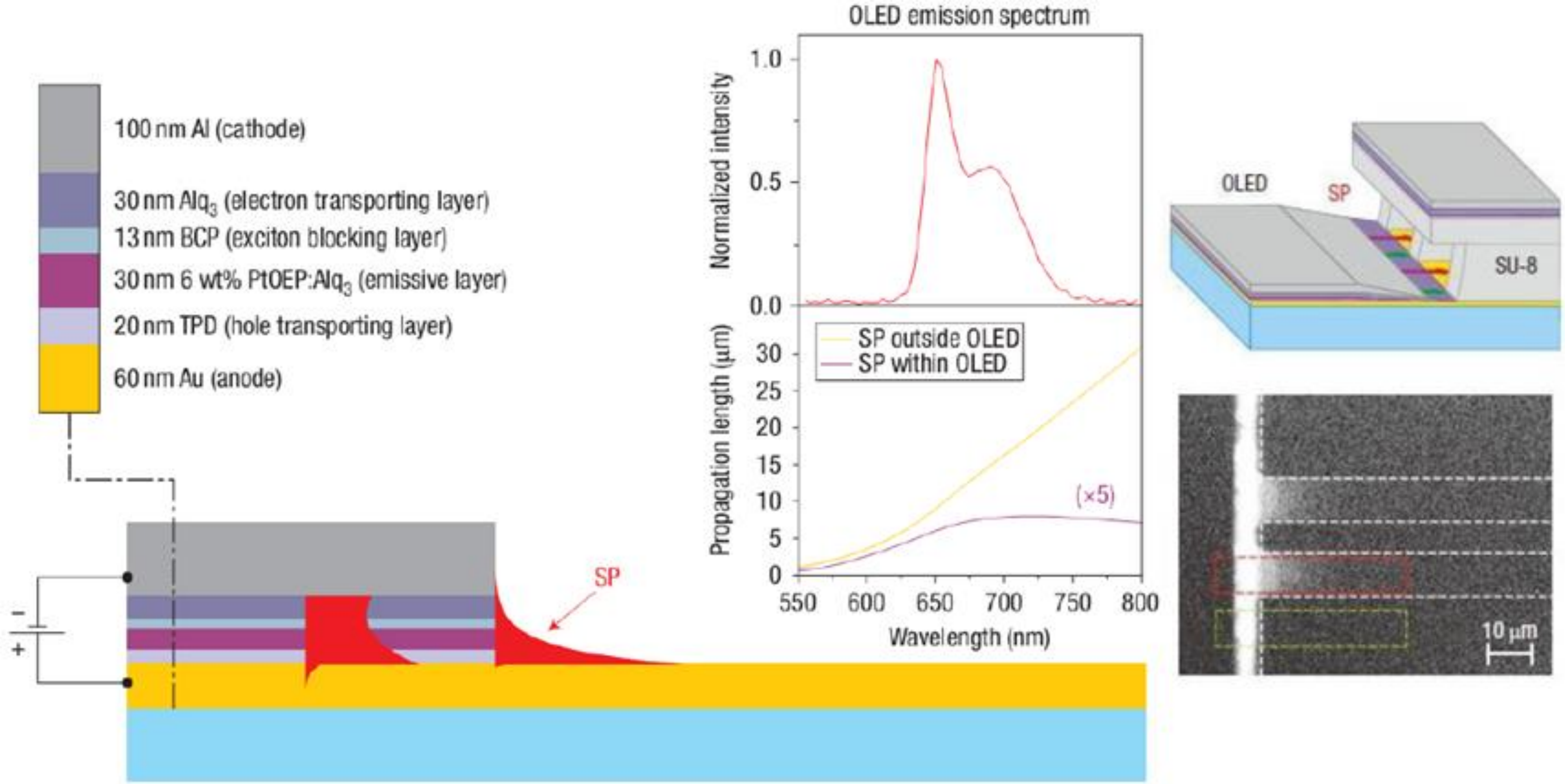
近场光学显微图

仿真：非均匀光照

Laluet et al., OE **15**, 3488 (2007)

SPP源/发射器—电注入

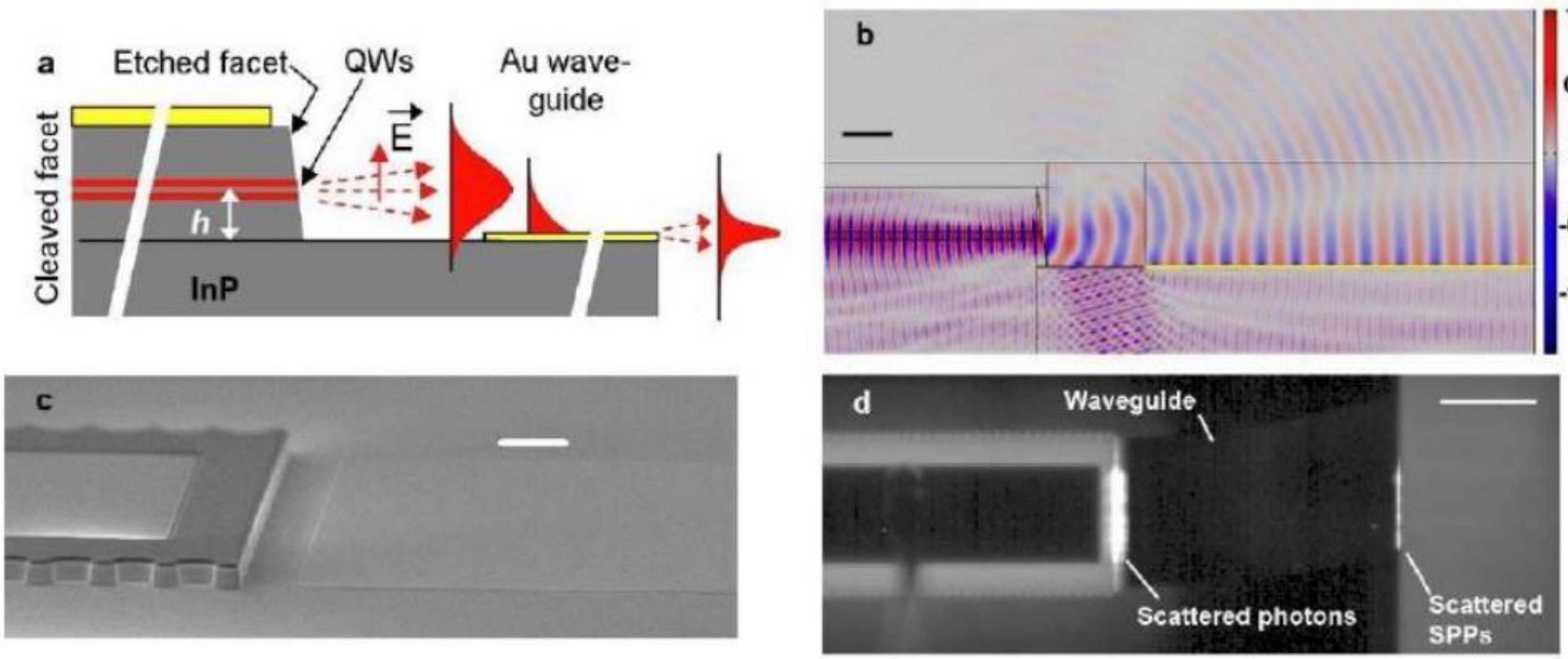
电注入：有机等离子体发光二极管



 Koller et al., Nature Photon. **2**, 684 (2008)

SPP源/发射器—电注入

电注入：激光二极管到等离子体波导——端面耦合



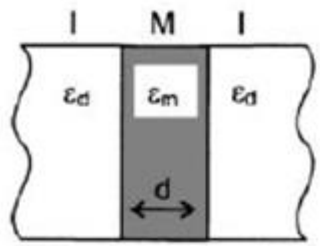
耦合效率：理论~60%，实验~36%

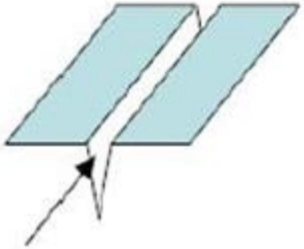
Kim et al, Opt. Express **18**,10609(2010)

SPP波导

- 典型的SPP波导的约束和损耗之间的折衷
- 举例：

1. 绝缘体/金属/绝缘体 (IMI) 异质结构红外范围的SPP（长程SPP：LRSPP）
    - 侧向约束：很弱（广泛）
    - 传播长度：几厘米（低损耗）
2. 金属纳米线波导或金属纳米粒子波导
    - 侧向约束：低于衍射极限
    - 传播长度：小于微米（高损耗）
3. 金属/绝缘体/金属 (MIM) 异质结构，特别是V型槽SPP波导
    - 约束性好
    - 可接受的传播长度

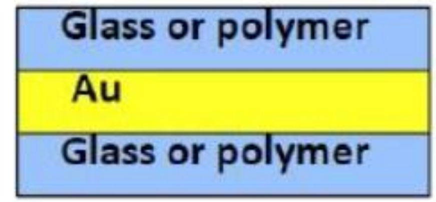




SPP波导

SPP

LR-SPP

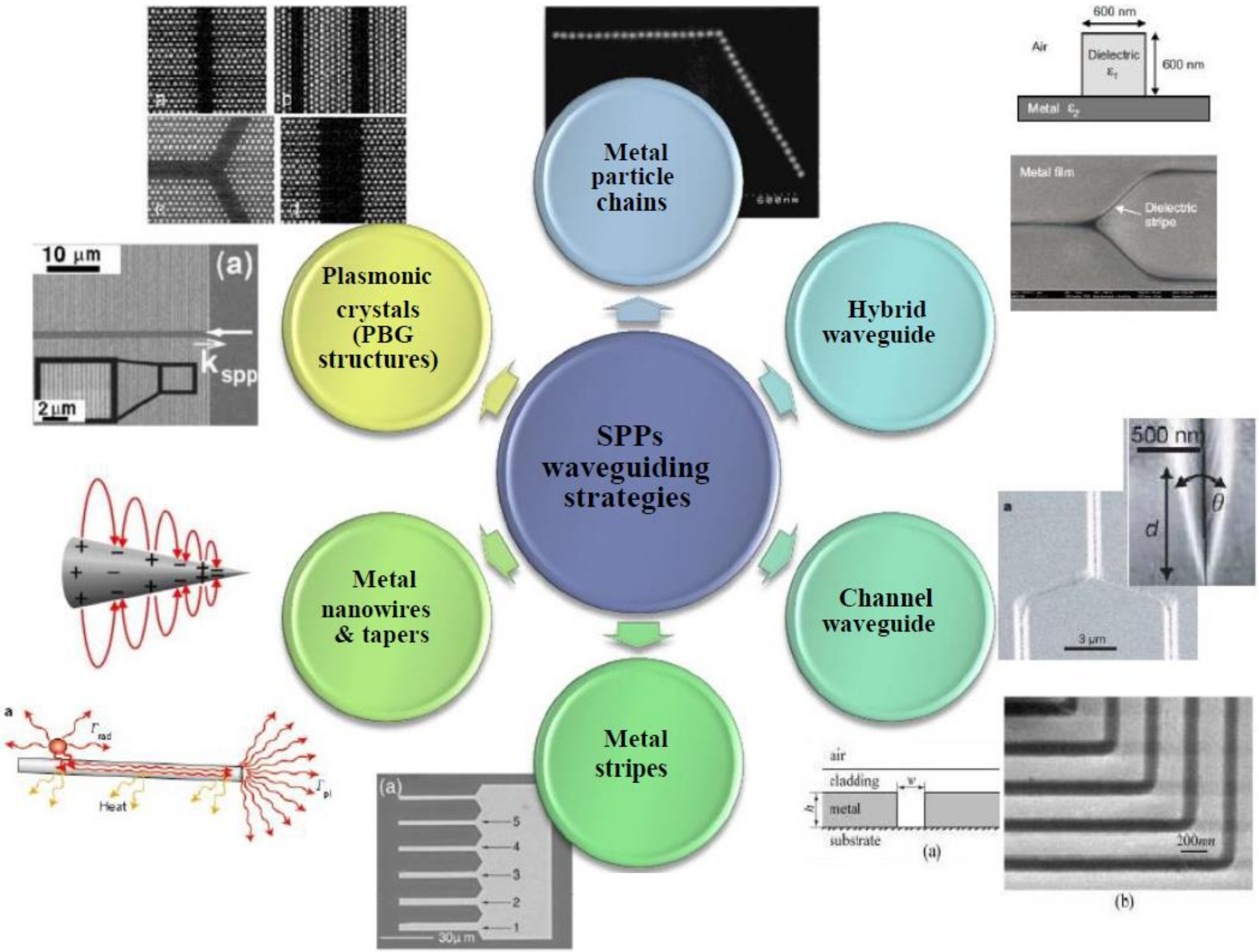


Wavelength (nm)	Au Index			SPP propagation length (μm)	LR-SPP propagation length (μm)
850	0.196+ i 5.590	Sapphire Index	1,75	7,5	122
		Glass index	1,50	7,6	220
1310	0.411+i 8.347	Sapphire Index	1,74	24,7	502
		Glass index	1,50	25,1	902
1550	0.559+i 9.810	Sapphire Index	1,73	40,0	811
		Glass index	1,50	40,6	1169

- The reference system is a 25 nm thick Au film.

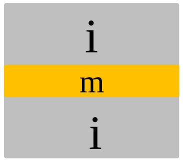
- 损耗是由材料性质和几何形状决定，可以由增益介质补偿
- 约束主要利用局部调整SPP色散来控制，通过适当的表面调制

SPP波导


SPPs waveguiding strategies
Metal particle chains
Hybrid waveguide
Channel waveguide
Metal stripes
Metal nanowires & tapers
Plasmonic crystals (PBG structures)
600 nm
Air
Dielectric
600 nm
Metal
Metal film
Dielectric stripe
500 nm
3 µm
air
cladding
metal
substrate
(a)
(b)
200nm
(a)
30µ m
10 µm
(a)
2 µm
Heat

常用缩写

(1) 长程表面等离极化激元：Long-range surface plasmon-polariton (LRSPP)



(2) 绝缘体-金属-绝缘体表面等离极化激元：Insulator-metal-insulator (IMI) SPP —— 对应 LRSPP

(3) 介质负载表面等离极化激元：Dielectric-loaded surface plasmon-polariton (DLSPP)

(4) 沟道表面等离极化激元：Channel surface plasmon-polariton (CPP)

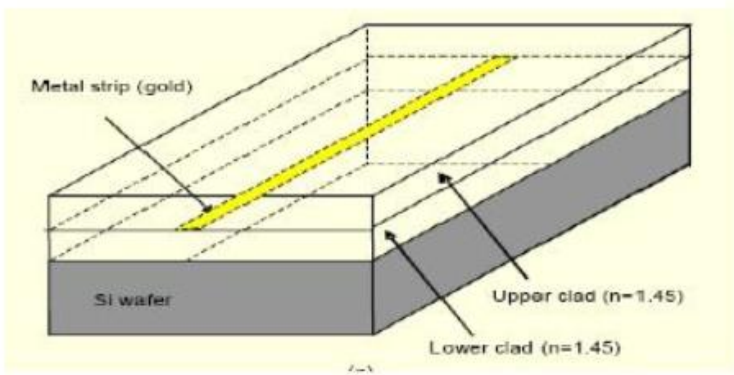
(5) 金属-绝缘体-金属波导：Metal-insulator-metal (MIM) waveguide

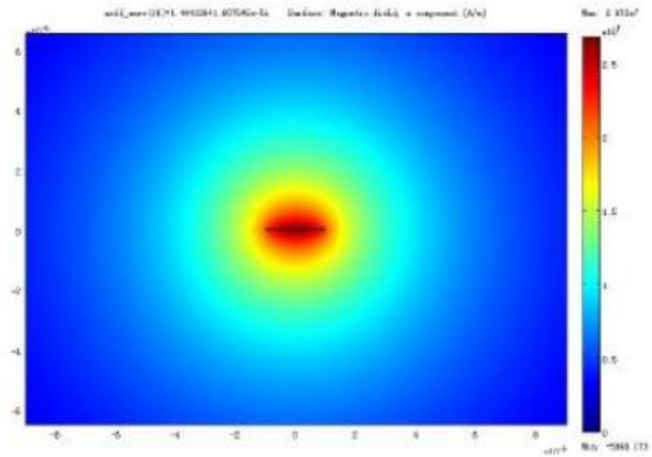
(6) 混合型SPP波导：Hybrid SPP waveguide

不同SPP波导的特性

- **LRSPP**：光斑大（~10μm），传输距离长（~mm），弯曲损耗大（r~10mm）
- **DLSPP**：束缚好，光斑小（~1μm），传输距离短（~40μm），弯曲损耗小（r~5μm）
- **CPP**：束缚好，光斑小（~1.1um），传输距离短（~100μm），弯曲损耗小（r～5μm）
- **MIM**：束缚很好，光斑小（<< λ ），传输距离短（~10μm），弯曲损耗很小（r→0）
- **Hybird SPP**：束缚好，光斑小（$\lambda^2/400$ to $\lambda^2/40$），传输距离长（~100μm），弯曲损耗小（r~5μm）

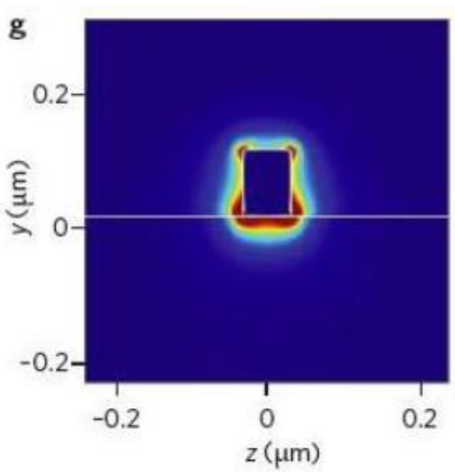
SPP波导—金属条状波导





短程SPP模式：SRSPP mode
金属条很厚

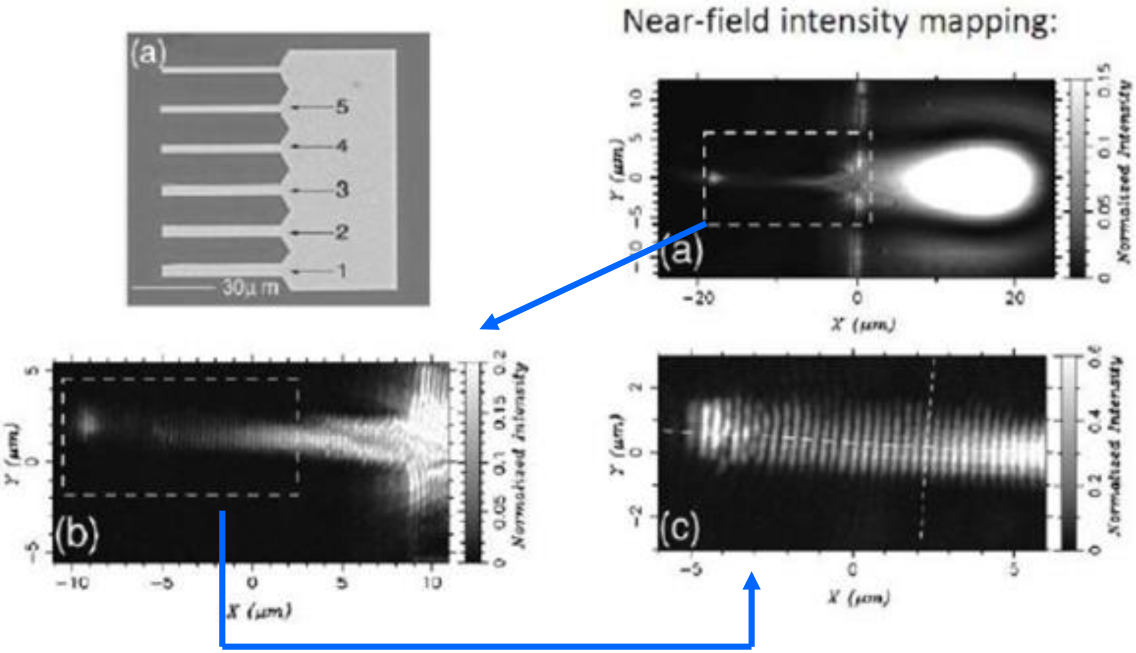
长程SPP模式：LRSPP mode 金属条很薄

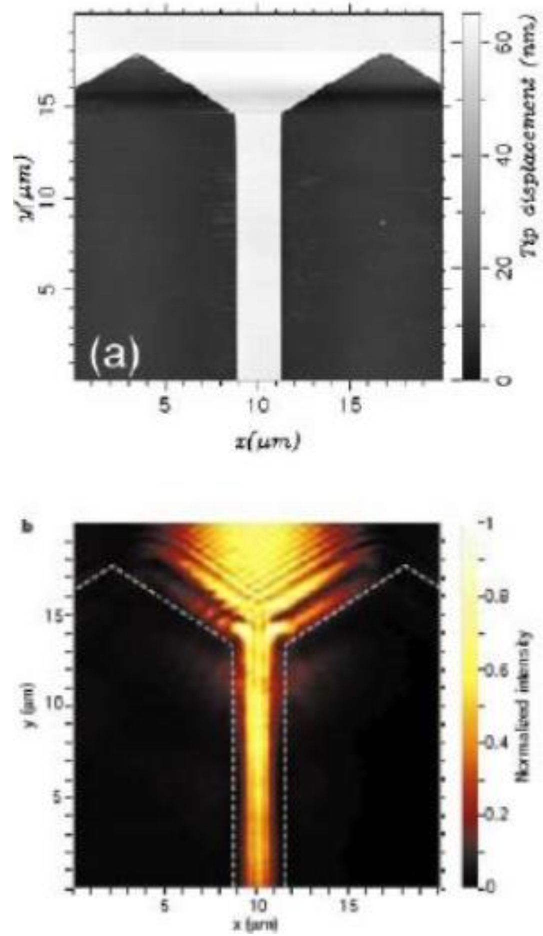


优点：
束缚能力很强
缺点：
传播距离短

优点：
低传播损耗(几个dB/cm)
缺点：
束缚能力小(很大的模区域)

SPP波导—金属条状(Strip)波导实验研究

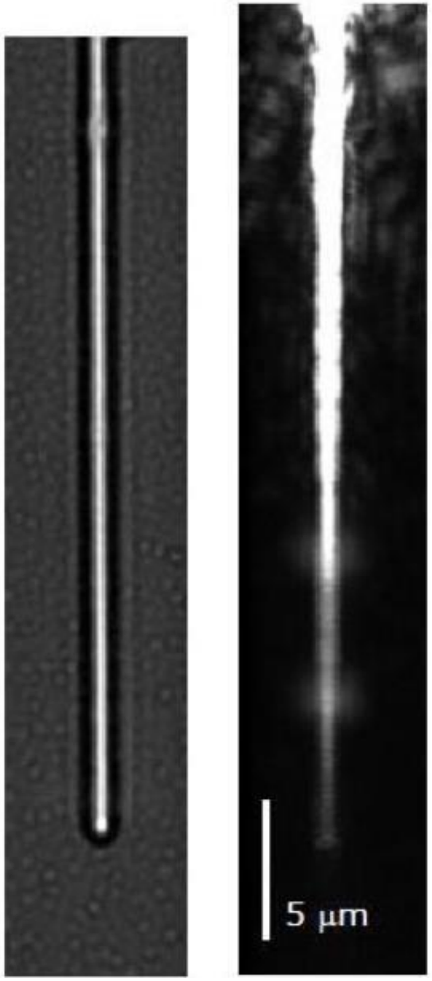


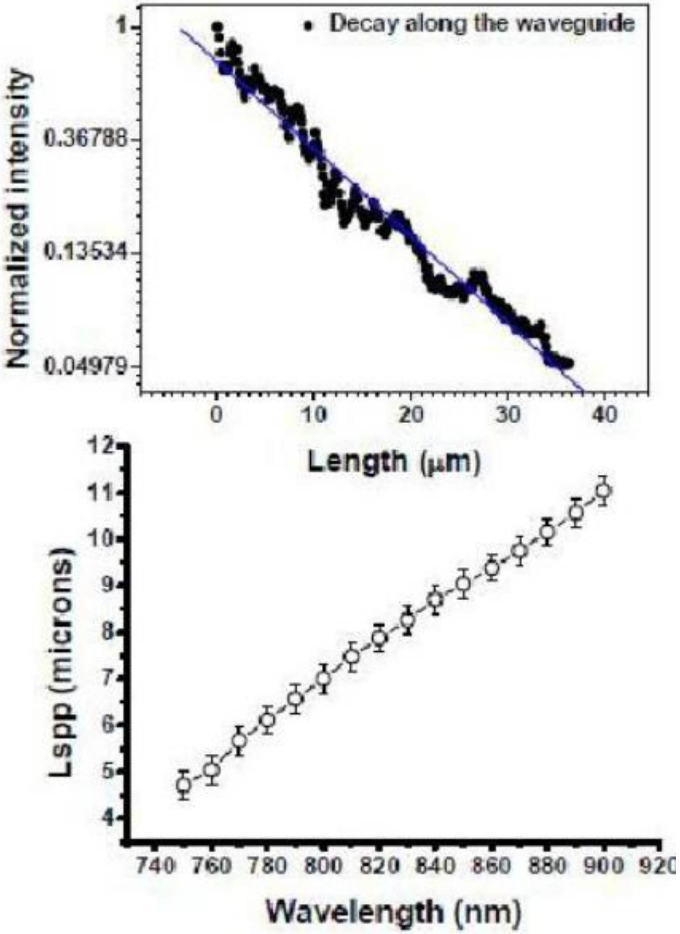


Charbonneau et al., OL **25**, 844 (2000)
Lamprecht et al., APL **79**, 51 (2001)
Weeber et al., PRB **68**, 115401 (2003)
Zia et al., PRB **74**, 165415 (2006)

金属条状SPP波导：金属厚度非常小时，β 虚部趋向零，表明有非常小的损耗和较长传播距离，称为LRSPP

SPP波导—金属条状波导—SPP传播长度

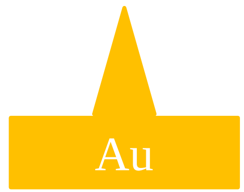


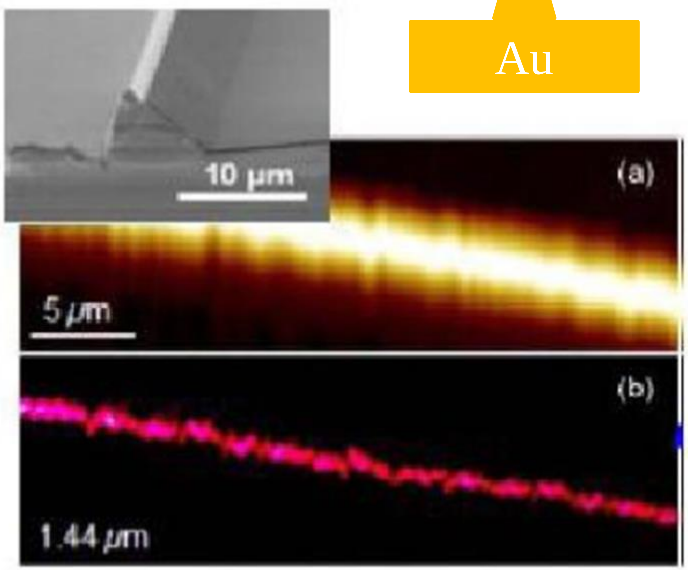


通常入射波长越长SPP传播长度越长

SPP波导—楔型(Wedge)

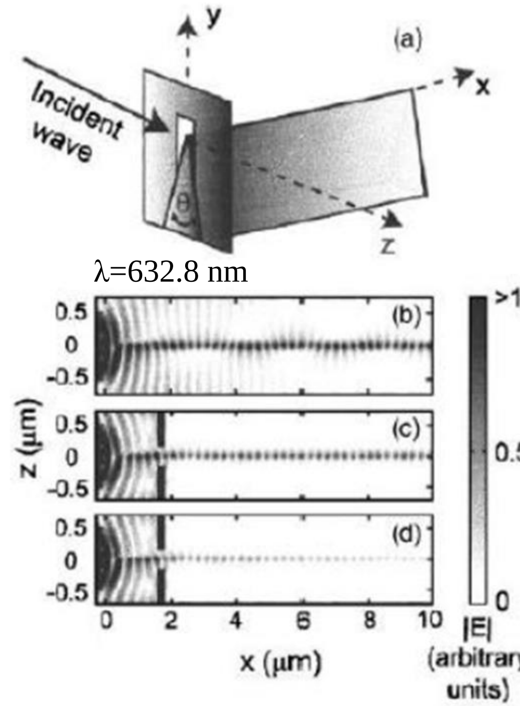
金属条的变异——楔形波导





形貌像

近场像

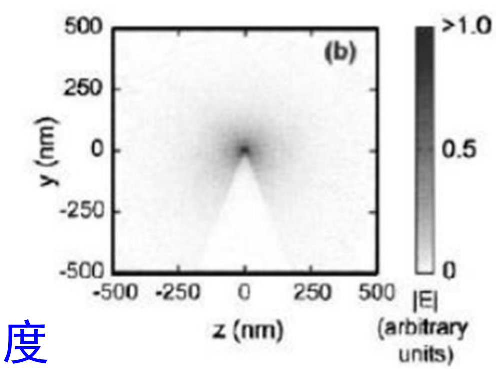


仿真结果

无光阑

有光阑

考虑金属损耗

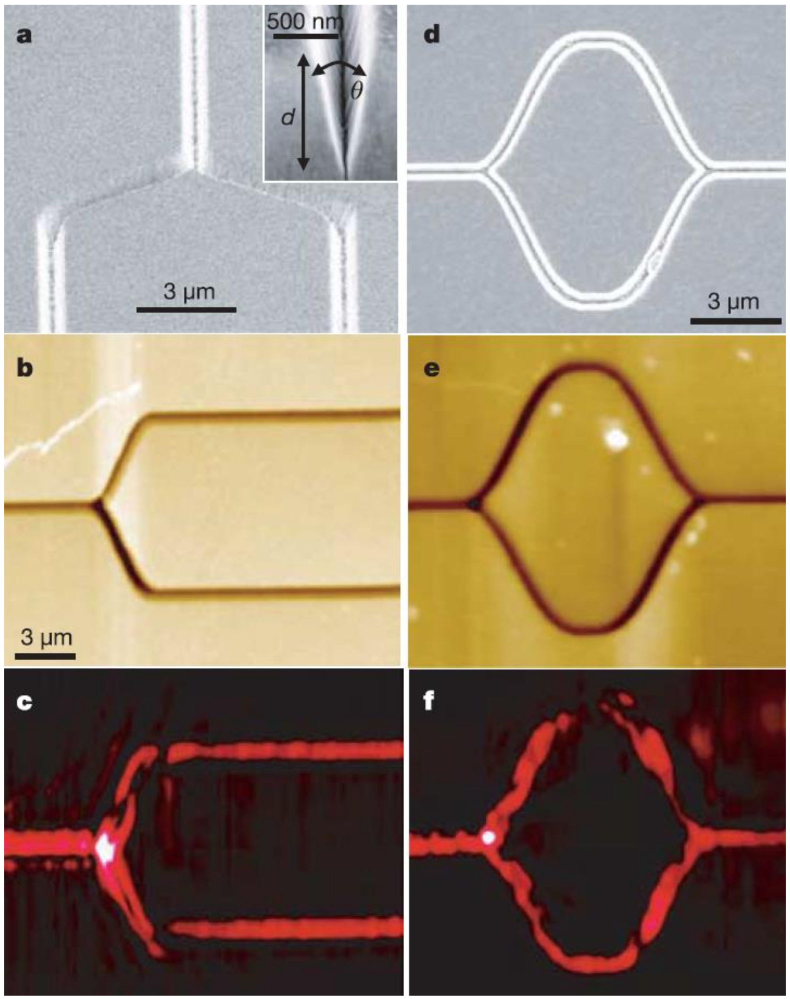


截面电场分布

Moreno et al. *Phys. Rev. Lett.*, 100, 023901 (2008)
Boltasseva et al. *Opt. Express*, 15, 5252 (2006)
Pile et al., *Appl. Phys. Lett.*, 87, 061106 (2005)

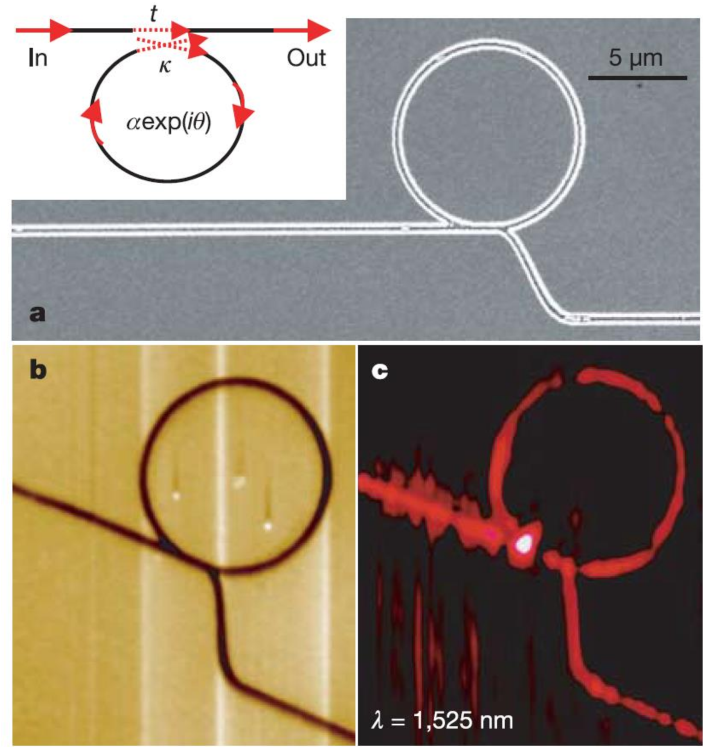
更强的场约束+合理的SPP传播长度

SPP波导—V型槽(V-gloove)



Y分束器

Mach-Zender
干涉仪



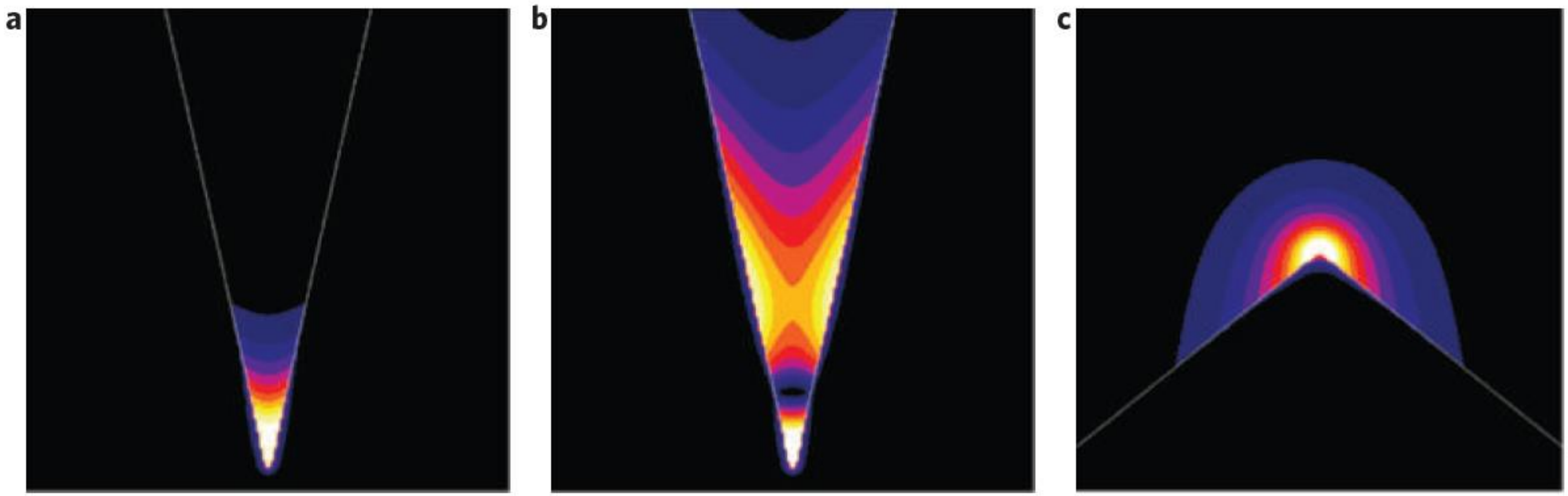
环形谐振器

Novikov et al., PRB **66**, 035403(2002)
Pile et al., OL **29**,1069(2004)

Bozhevolnyi et al., PRL **95**, 046802(2005)
Bozhevolnyi et al., Nature **440**, 508(2006)

Mach-Zender interferometer, ring resonator

SPP波导—楔型(Wedge) *vs* V型槽(V-groove)



基模　　　　　　高阶模　　　　　　基模

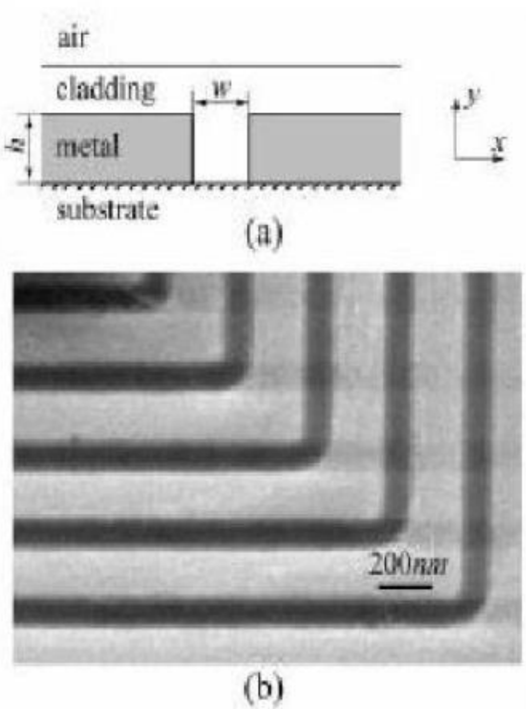
V型槽波导　　　　　　楔型波导

通讯频率（~1300-1550 nm）：楔型波导优于V型槽波导，强约束，相对低损耗，远距离 (几百微米)

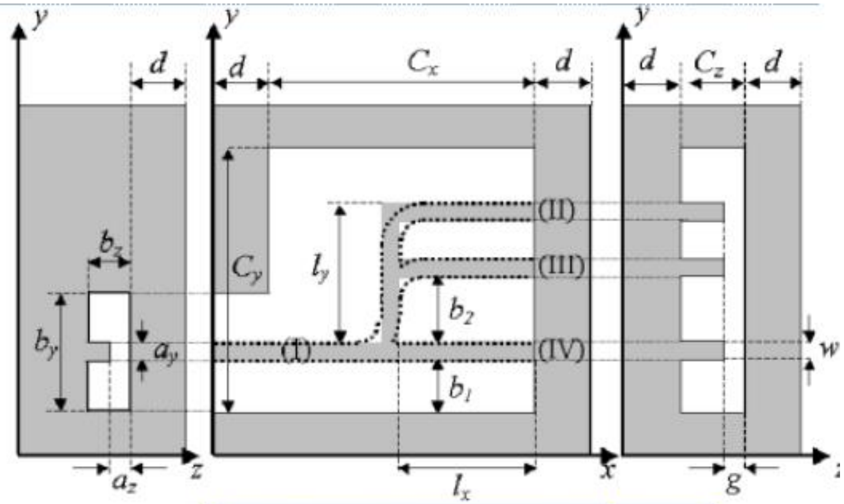
光频： V型槽优于楔型波导

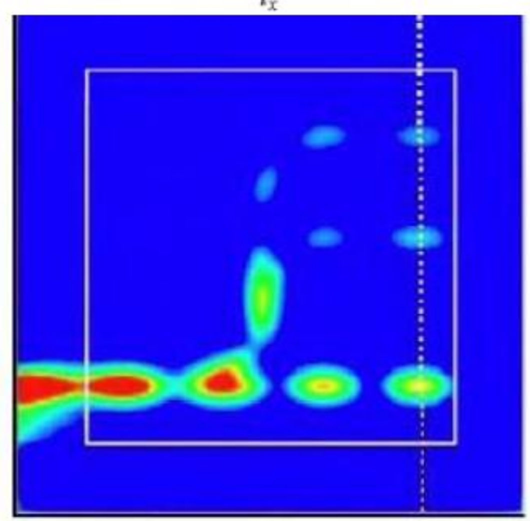
Gramotnev and Bozhevolnyi, Nature Photon. **4**, 83 (2010)

SPP波导—狭缝(Slot)



Tanaka et al., APL **82**, 1158 (2003)
Wang et al., Opt. Lett. **29**, 1992 (2004)
Tanaka et al., Opt. Exp **13**, 256 (2005)
Dionne et al., Nano. Lett. **6**, 1928 (2006)





分束器

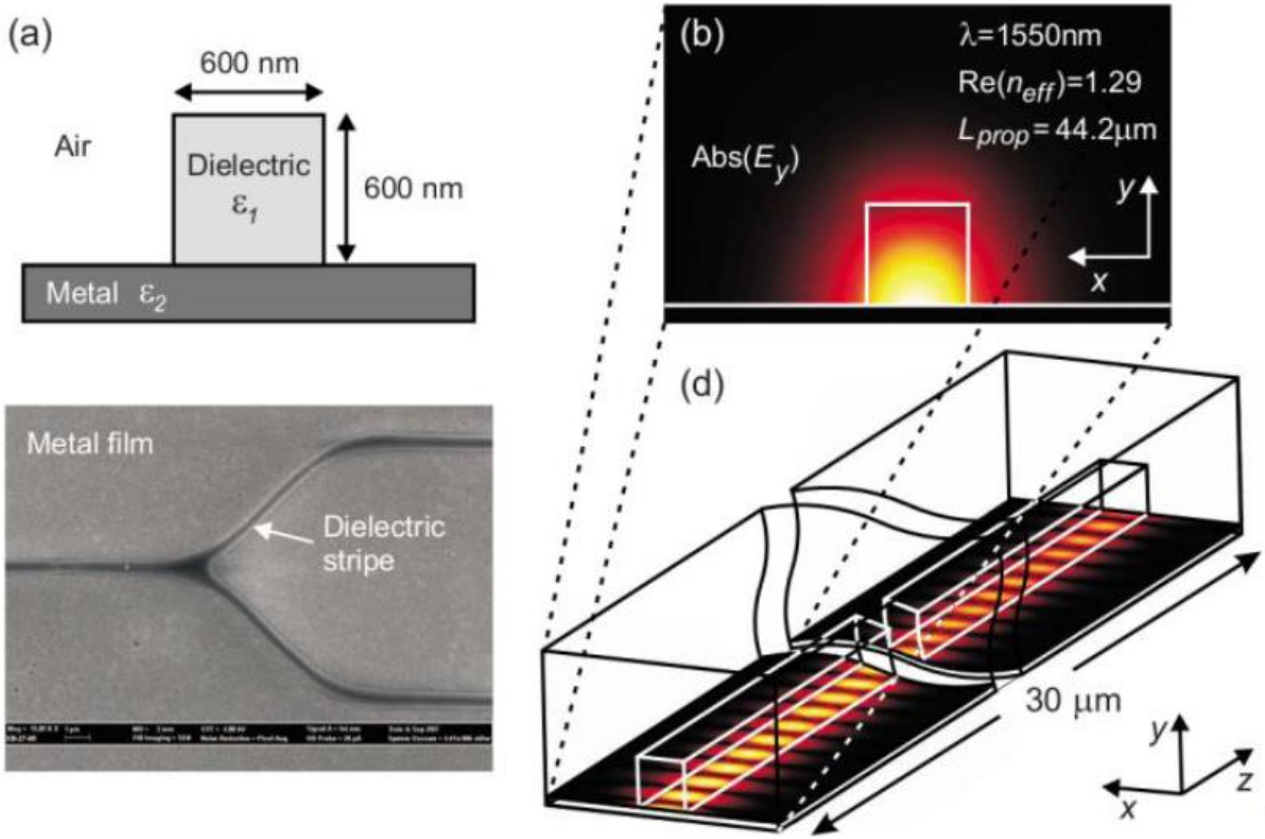
SPP波导—混合波导(DLSPPW&Hybrid)

• 结合两种波导的优点：

损耗低的介质波导 + 强约束金属波导

DLSPPW: dielectric-loaded SPP waveguides

- 介质负载波导
- 混合波导



SPP波导—混合波导(Hybrid&DLSPPW)

- 减少损耗

  →到cm尺度传播

- 强的侧向场约束

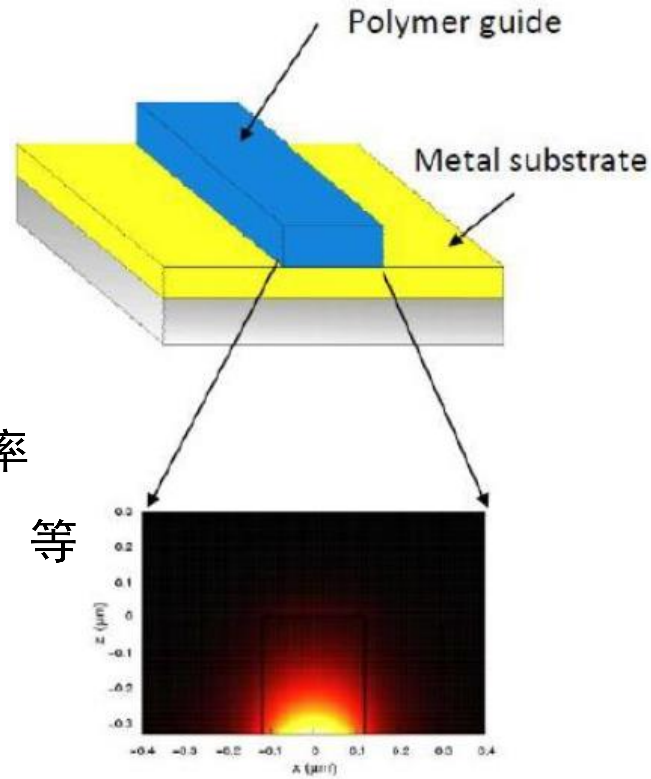
  →高密度光路

- 场主要定位在介质中

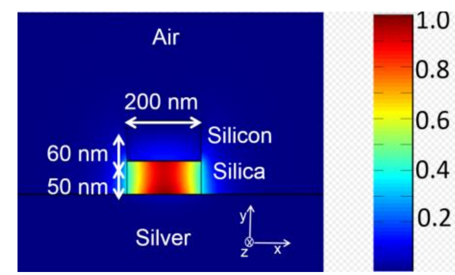
  →介质可以掺杂改变折射率

  →主动调制，非线性效应，等

DLSPP

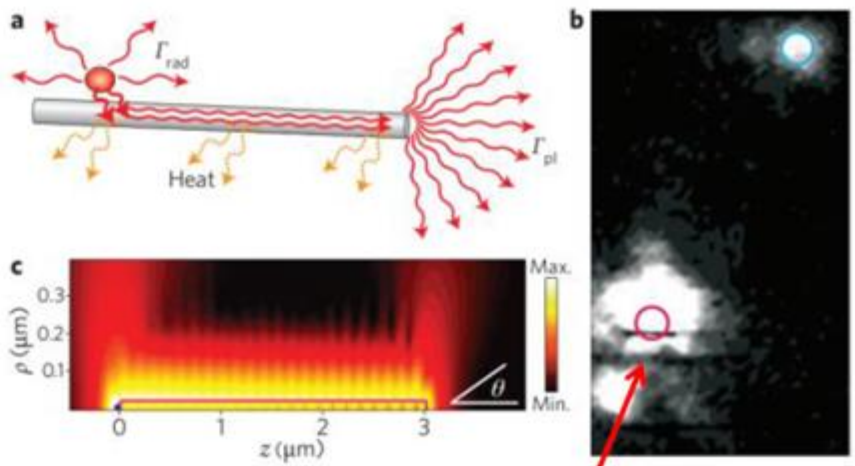


HPP



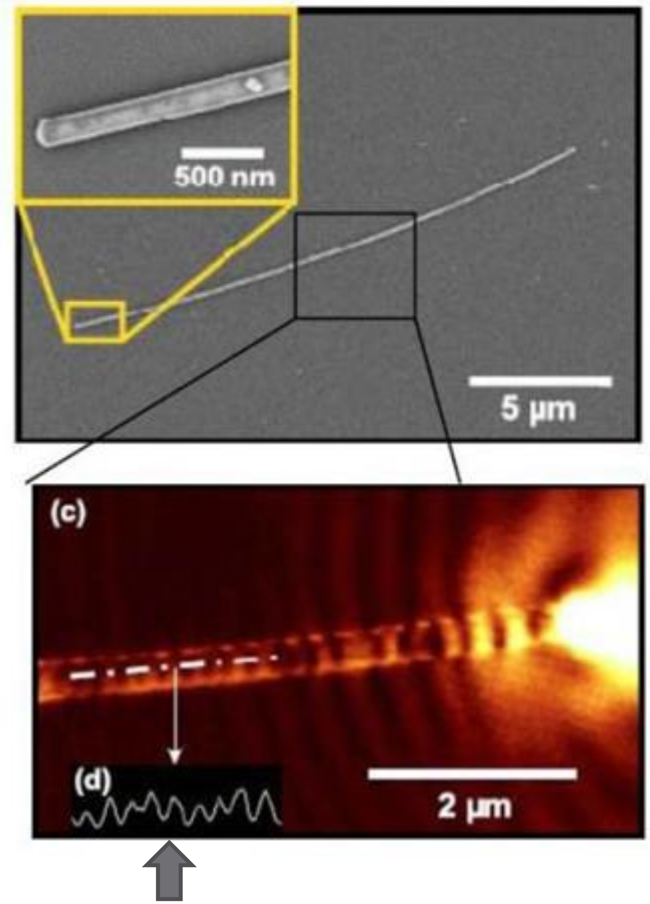
Krasavin and Zayats, PRB **78**,045425(2008)
Holmgaard and Bozhevolnyi, PRB **75**,245405(2007)
Grandidier et al., APL **96**,063105(2010)
Chu et al., APL **96**,221103(2010)

SPP波导—金属纳米线



50nm×3μm

使用靠近银纳米线放置的量子点生成SPP

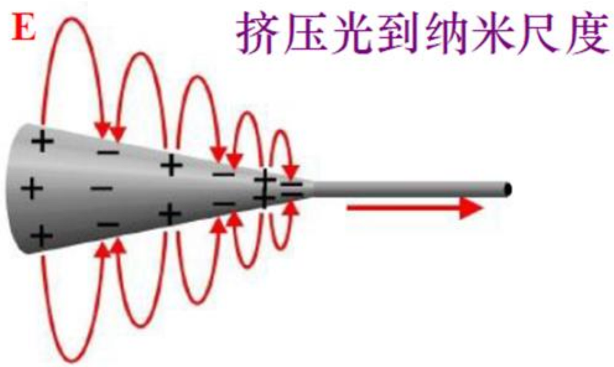


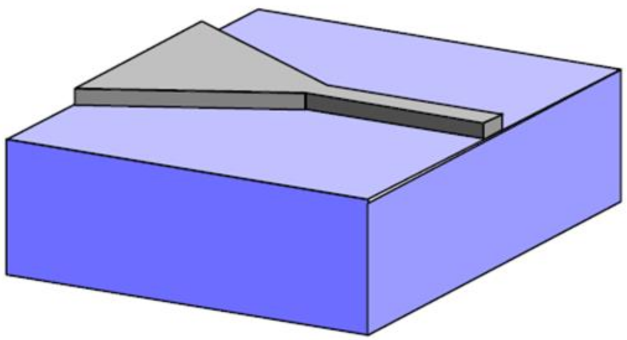
纳米线端面反射形成驻波

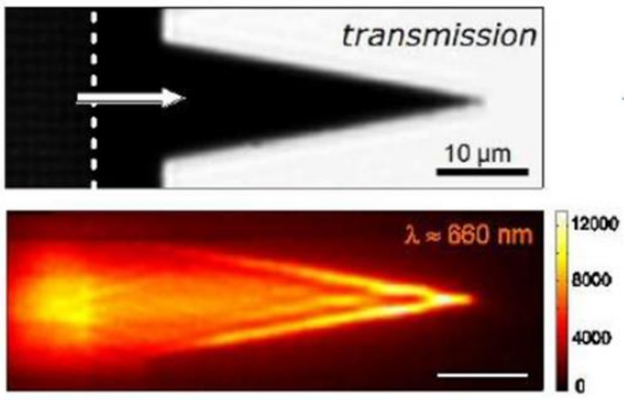
Weeber et al. Phys. Rev. B **60**, 9061 (2000)
Dickson et al. J. Phys. Chem. B **104**, 6095 (2000)
Ditlbacher et al. Phys. Rev. Lett. **95**, 257403 (2005)
Gunn et al. Nano. Lett, **6**, 2804 (2006)
Gramotnev and Bozhevolnyi, Nature Photon. **4**, 83 (2010).

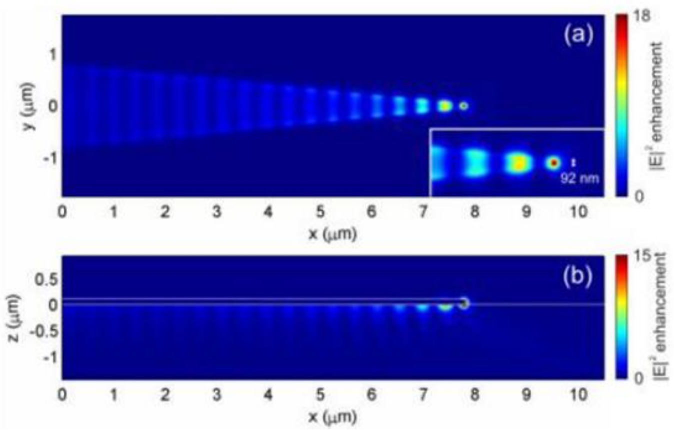
SPP波导—等离子体聚焦

利用锥形金属棒/条带实现等离子体的聚焦





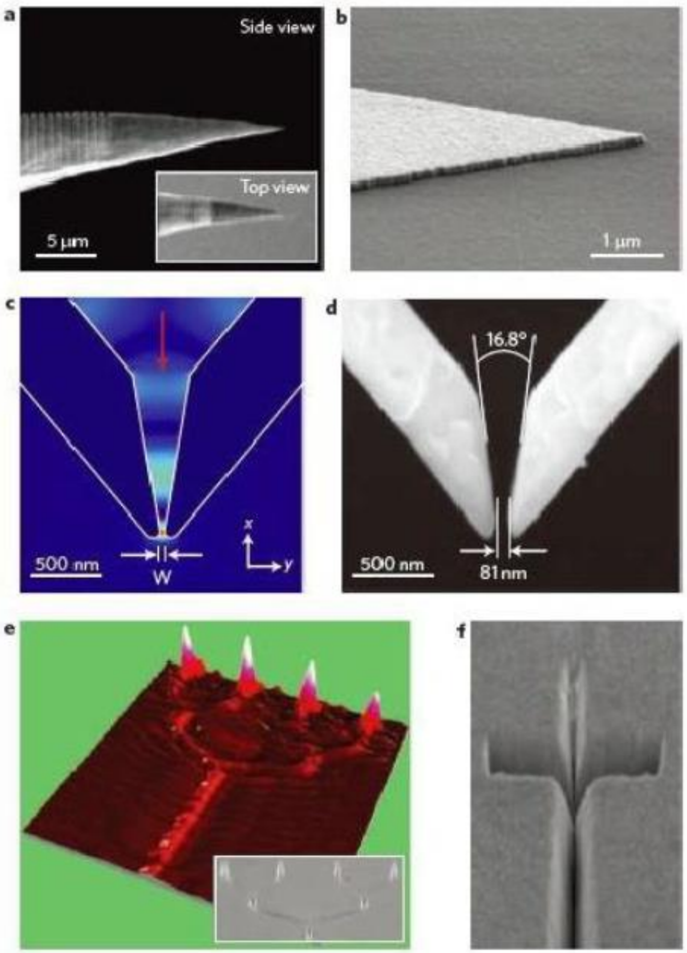


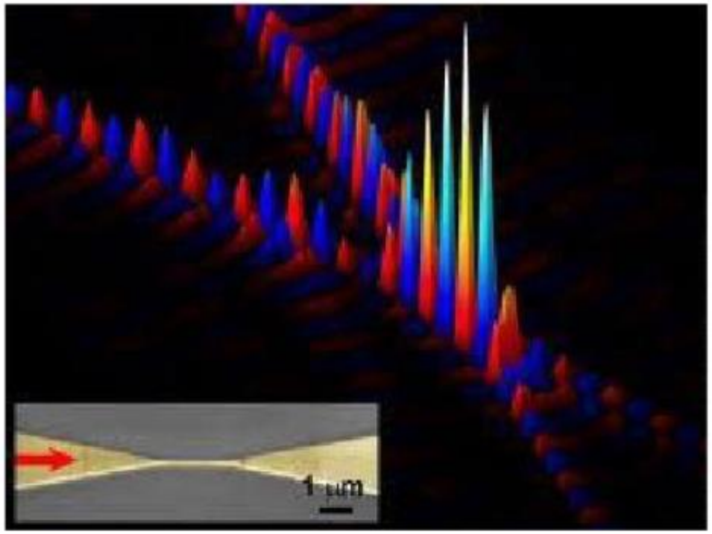


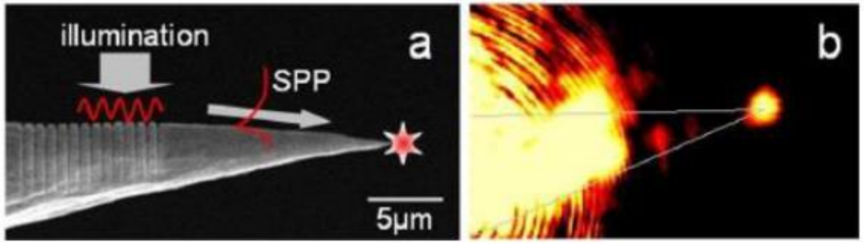
Verhagen, et al., *Nano Lett.*, 7, 334 (2007)
Verhagen & Kuipers, *OE*, 16, 45 (2008)

SPP波导—等离子体聚焦

各种SPP聚焦方案



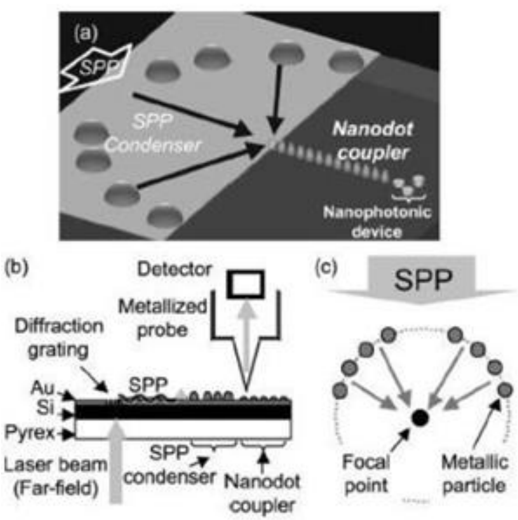


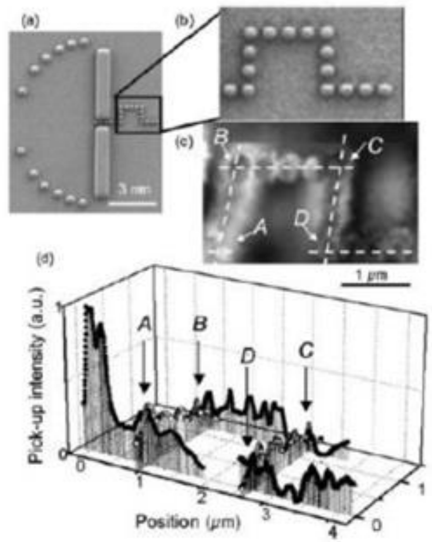


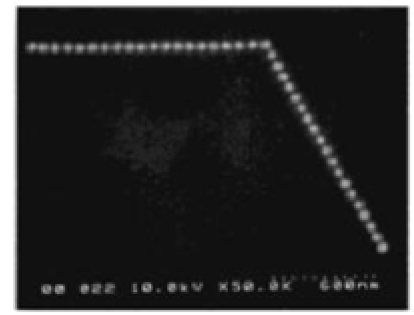
Ropers et al., Nano Lett. **7**, 2784 (2007).

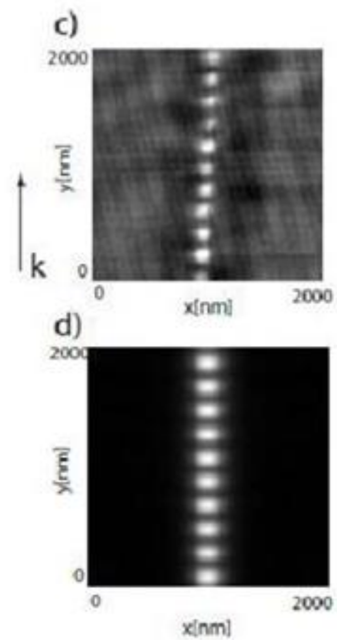
SPP波导—链状波导

- 弧形排布金属球将SPP聚焦于圆心
- 金属球链构成SPP波导









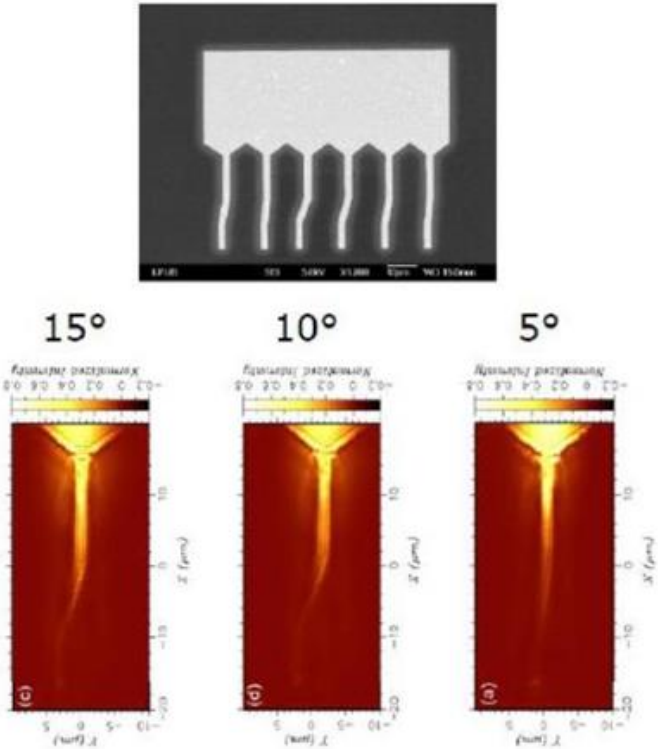
近场显微图

仿真结果

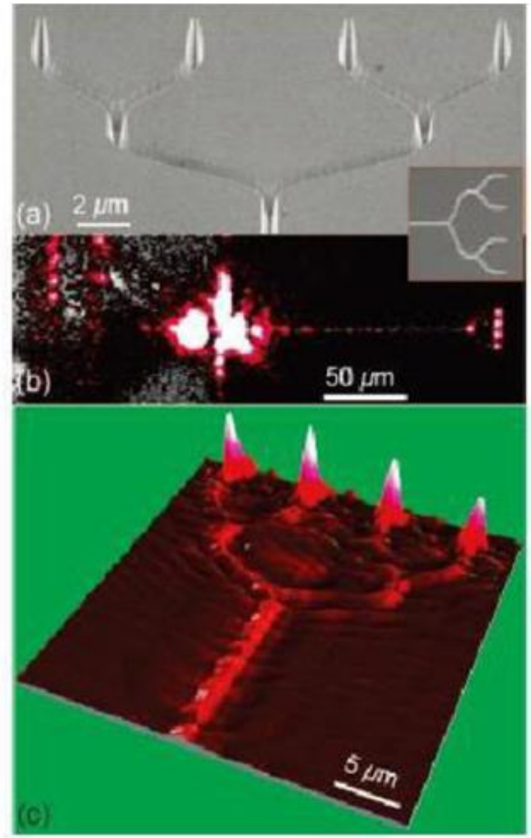
Nomura et al., APL **86**, 181108 (2005)
Maier et al., Adv. Mater.**13**, 1501 (2001)
Maier and Atwater, JAP **98**, 011101 (2005)

亮点位于球之间的间隙

SPP导向—弯曲导向



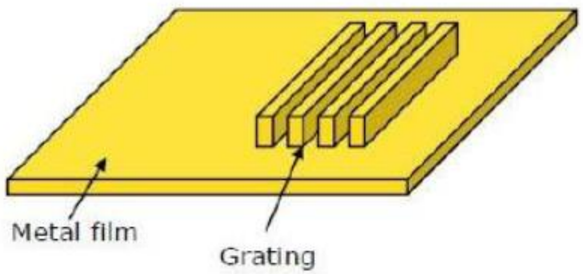
- 弯曲角度增加，损耗增大

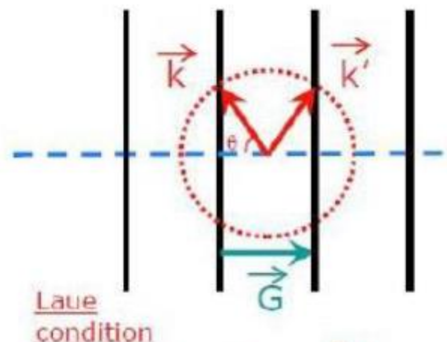


- 弯曲对应V形槽而言损耗小

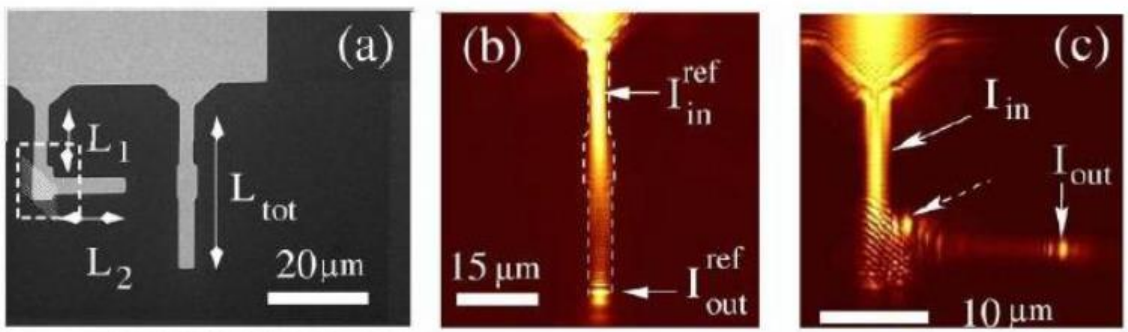
SPP导向—布拉格反射

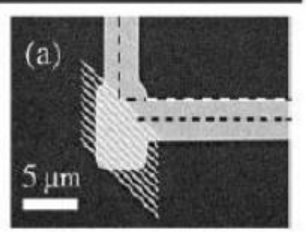
- 布拉格光栅反射实现高效率的SPP传播方向改变





$$\vec{k}-\vec{k}'=\vec{G}=n\frac{2\pi}{d}$$



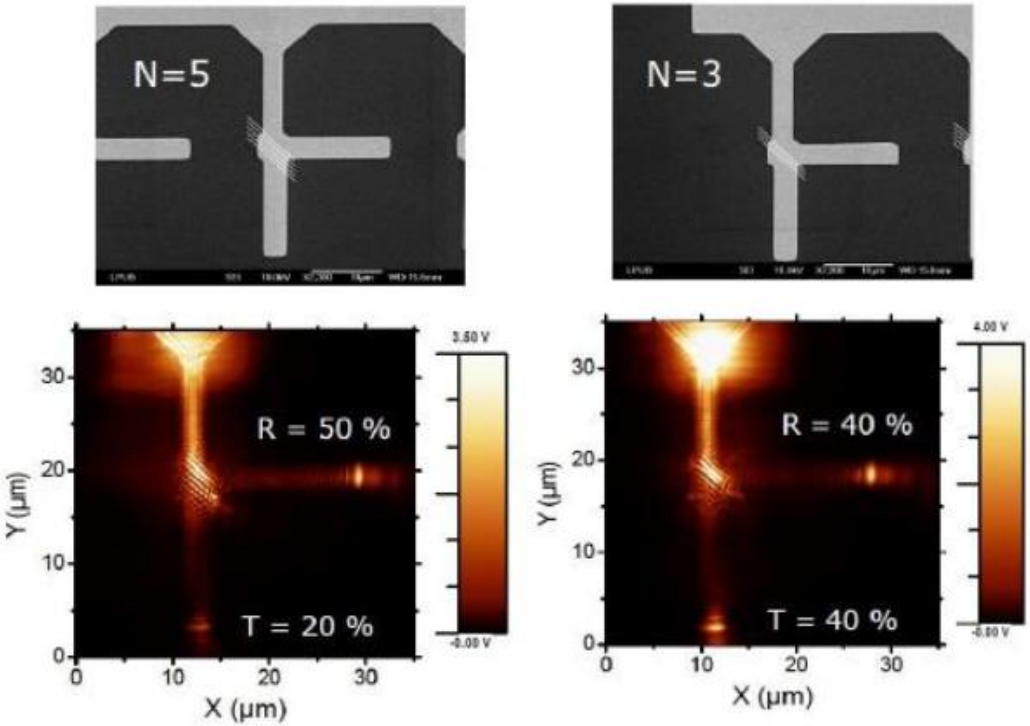


Reflectivity=65%
Bend loss<2dB for 90° bends

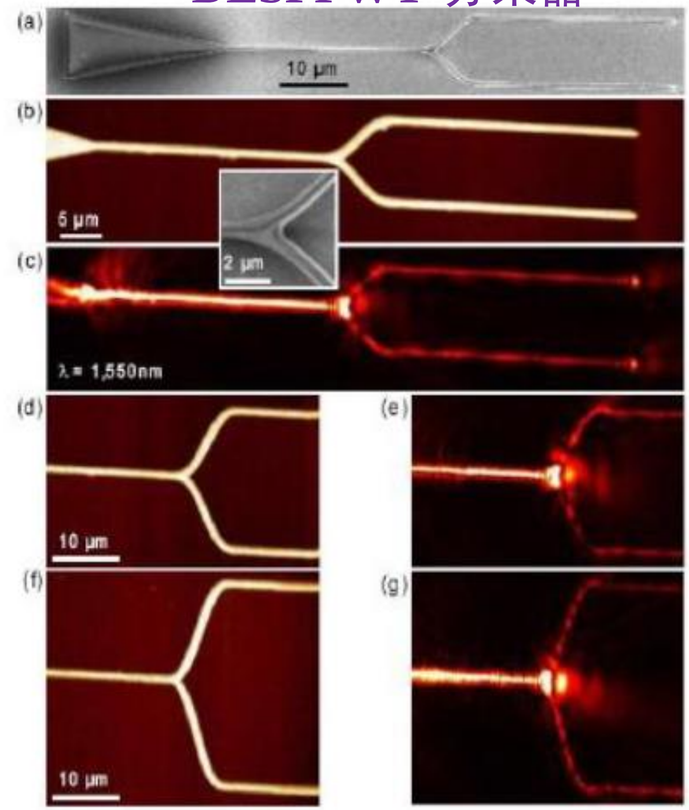
Weeber et al., APL **87**, 221101 (2005)
González et al., PRB **73**, 155416 (2006)

SPP导向—分束器

- 反射率取决于布拉格光栅的行数——分束器

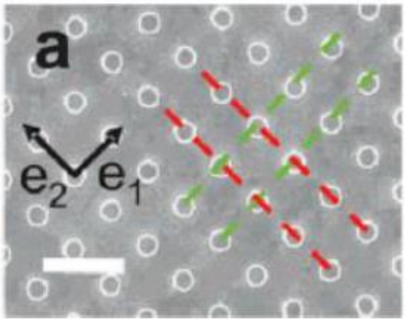


DLSPPWY-分束器

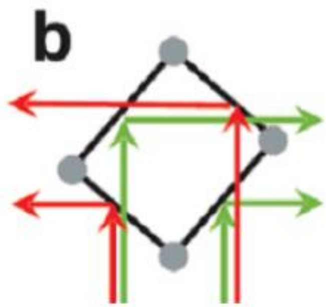


- Y形分束器中间电存在辐射泄漏损耗
- 张开角度越大，损耗越大

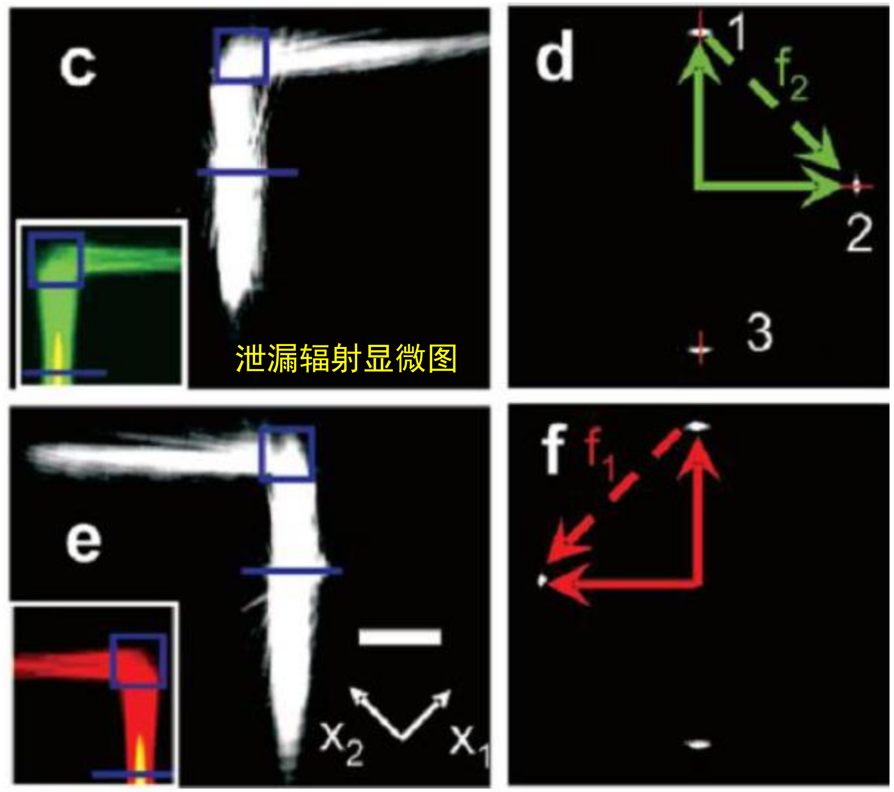
SPP导向—波分复用



$$k_{m,x} = k_{\mathrm{inc},x} + mK$$



λ=784 nm和730nm

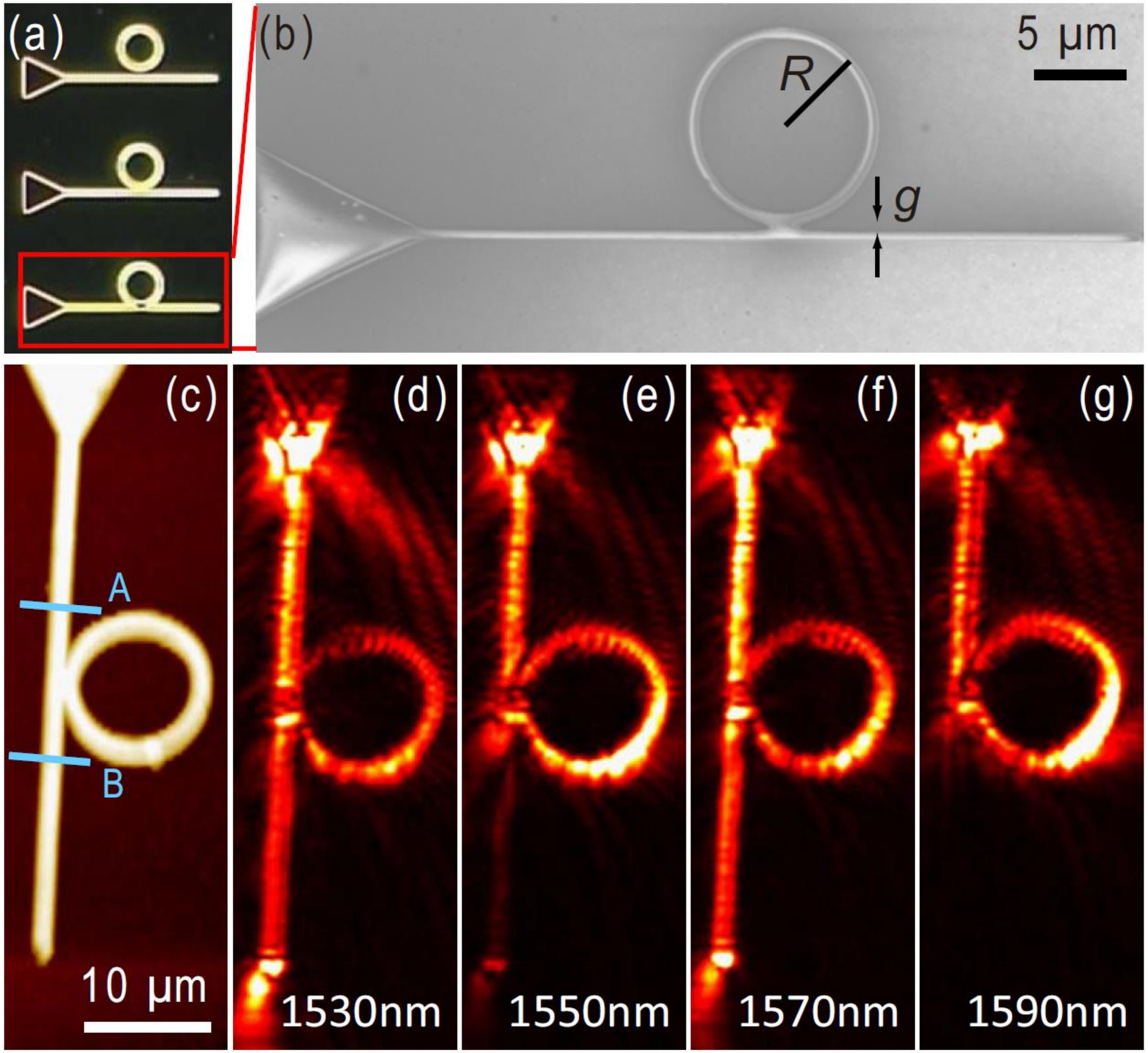


LRM图像

Drezet et al., Nano Lett. 7, 1697 (2007)

- 二维光栅，两个方向周期不同，对应倒格矢不同
- 不同波长满足的衍射条件不同，实现对复色光的解离

SPP导向—环形振荡滤波

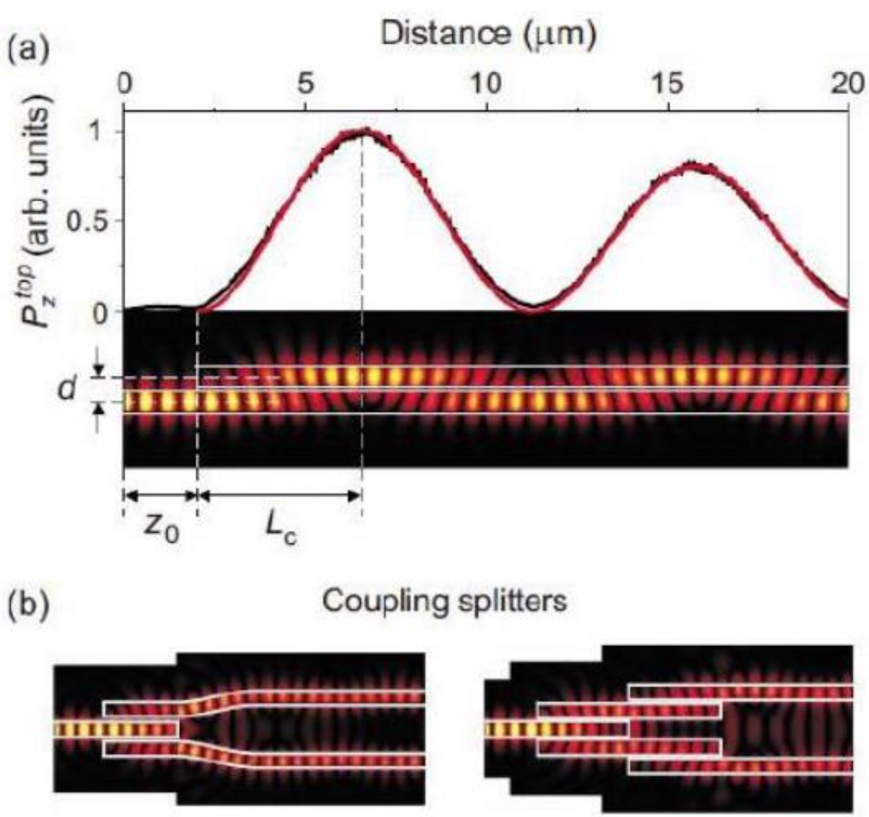


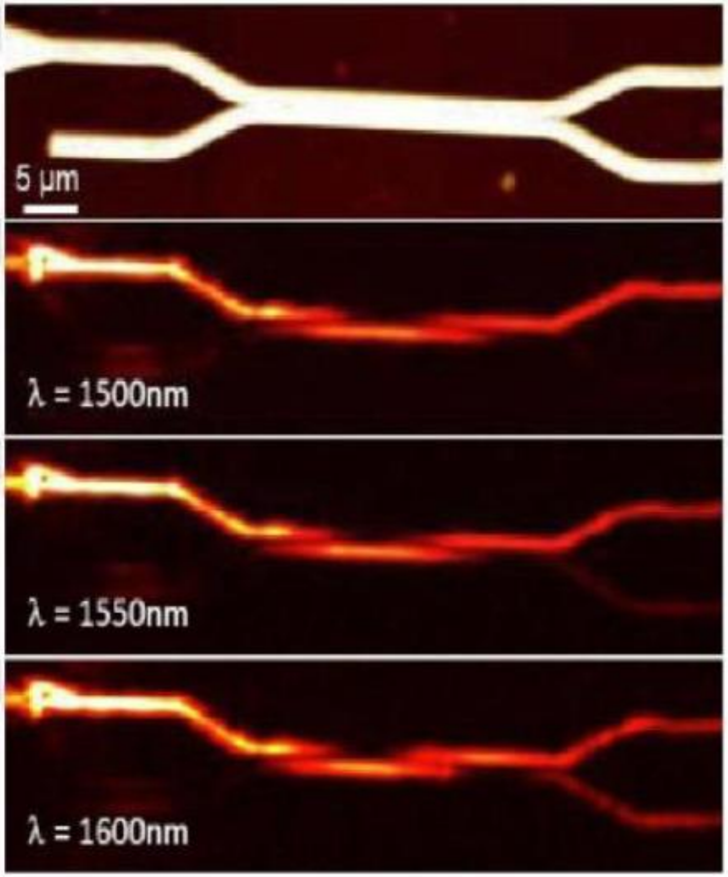
- 介 质 负 载 SPP波导
- 改变环形振荡器的半径或者同直波导间的间距，可以改变输出端的输出强度
- 固定的结构，不 同 波 长 SPP 的 共 振 条件不一样，输 出 SPP 的 强度也不一致

APL, *94* , 051111 (2009)

SPP导向—耦合器

DLSPPW 耦合器





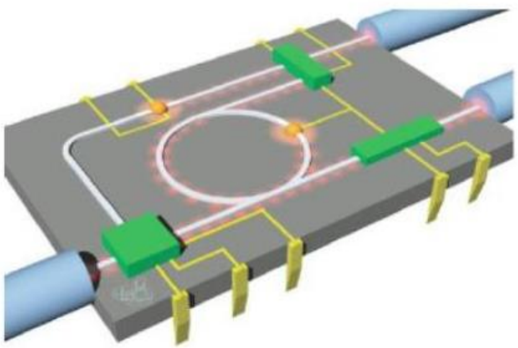
Krasavin and Zayats, PRB **78**, 045425 (2008)

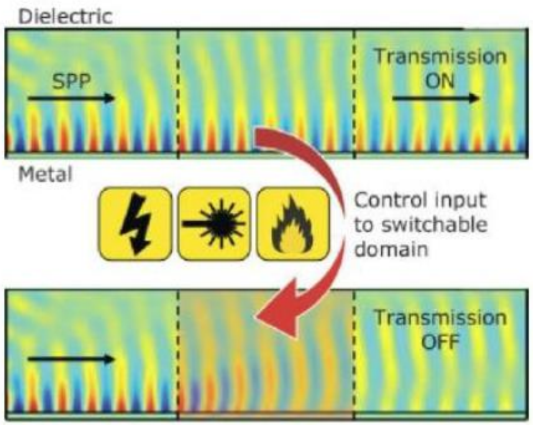
主动调制SPP—概念

“当主动调制表面等离子体激元（SPP）信号的有效技术被确认时，我们就可以像谈论“光子”一样来谈论说“等离子体”了。”

— Krasavin and Zheludev, APL **84**,1416(2004)

主动调制等离子体：一种瞬间开关或调节光频SPP信号传播的技术。

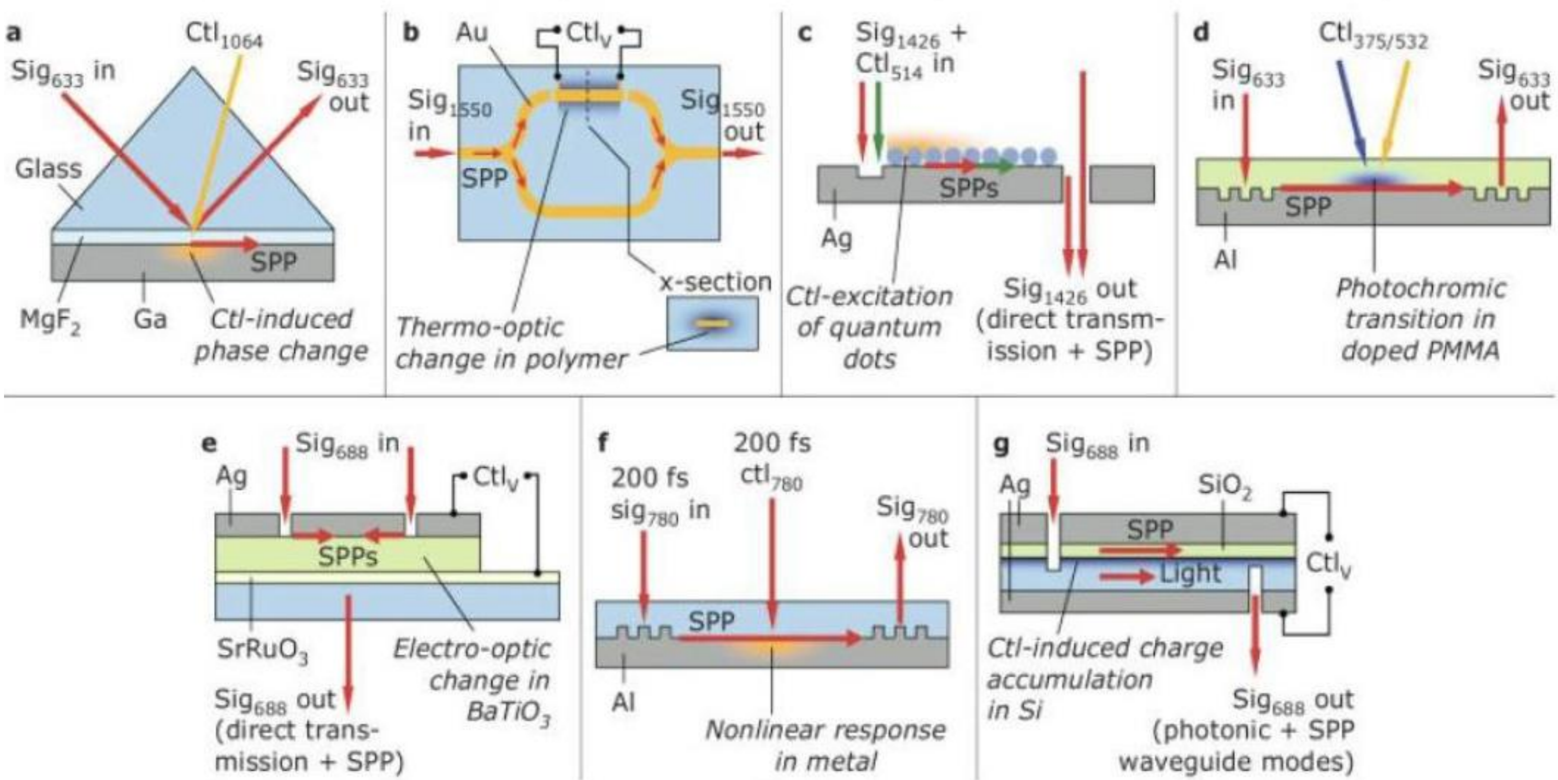




- 外界刺激，改变输出端SPP的信号强度
- 实现信号上载到SPP
- 实现信号操控或者运算

SPP的主动调制—方法

光诱导固-液相变　　热光调制　　CdSe量子点中的吸收激活　　光致变色分子的光致吸收-透明态转换

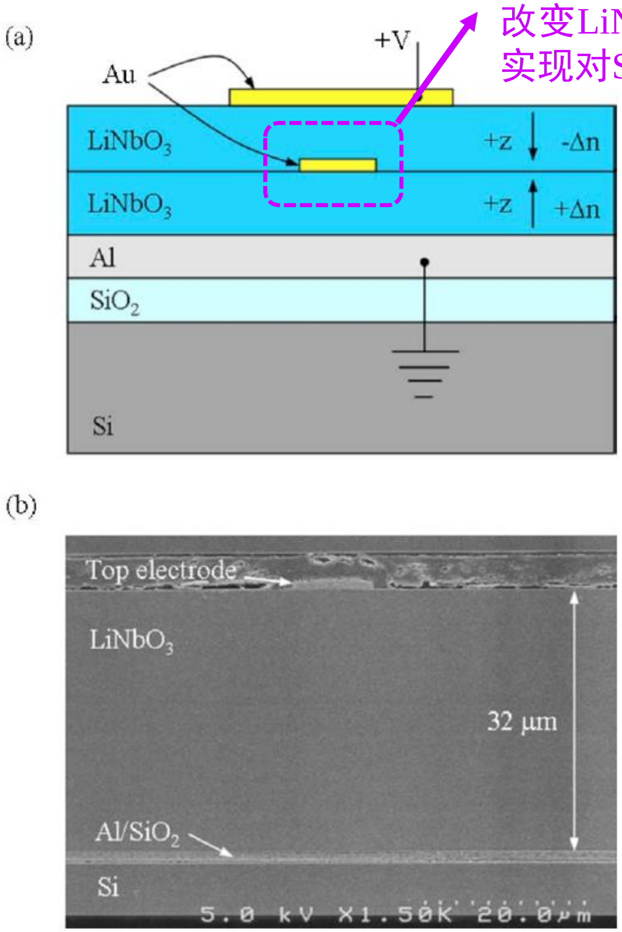


电光调制　　非线性调制　　MOS 场效应调制 (plasmostor)

MacDonald and Zheludev, Laser & Photon. Rev. **4**, 562 (2010)

SPP的主动调制—开关

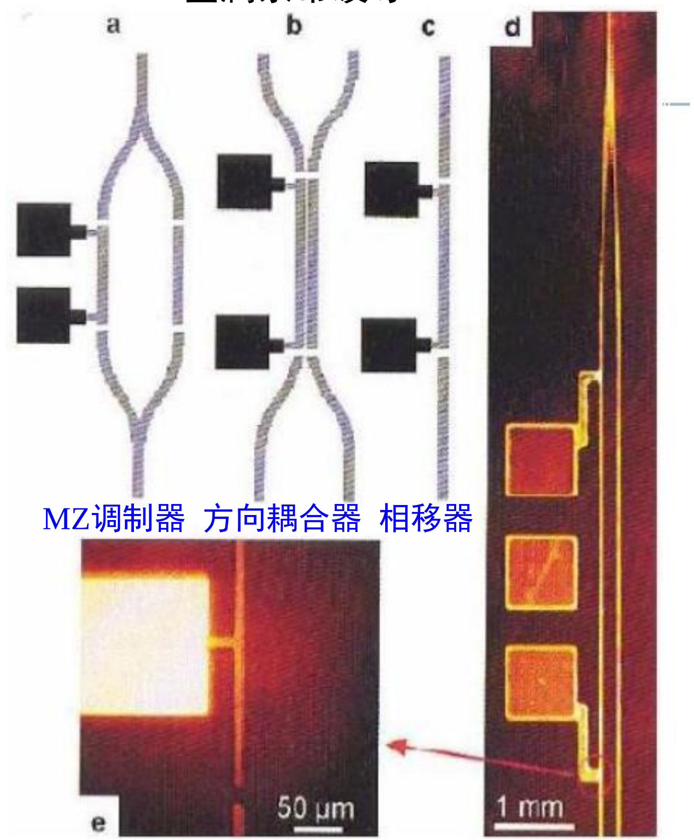
IMI波导
改变$LiNbO_3$的折射率，
实现对SPP的调控



电光调制器

Berini et al. APL, 90, 061108 (2007)

金属条带波导



电极上施加电压，在金属条带上产生焦耳热，改变其下介质折射率，进而改变传播常数，使相位改变

Nikolasjen et al., APL, 85, 5833 (2004)

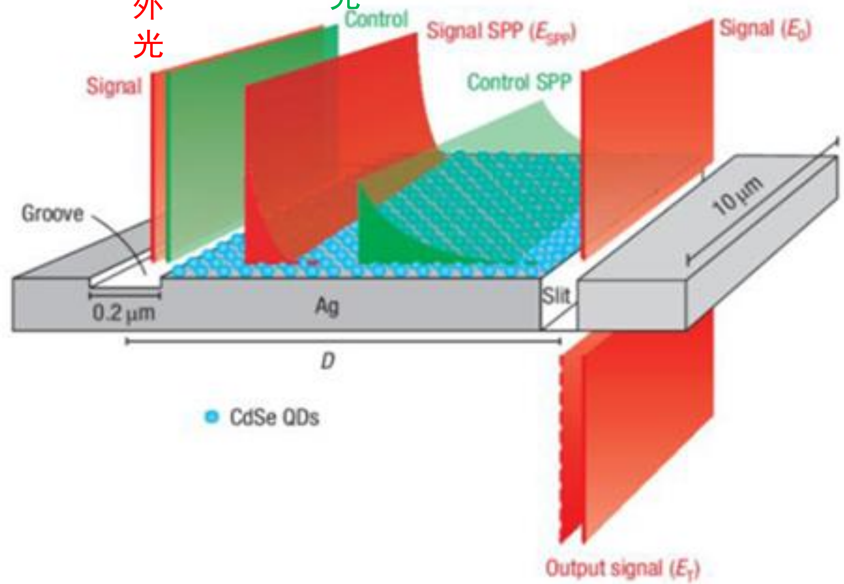
SPP的主动调制—光调制

全光调制器：调制的是辐射光

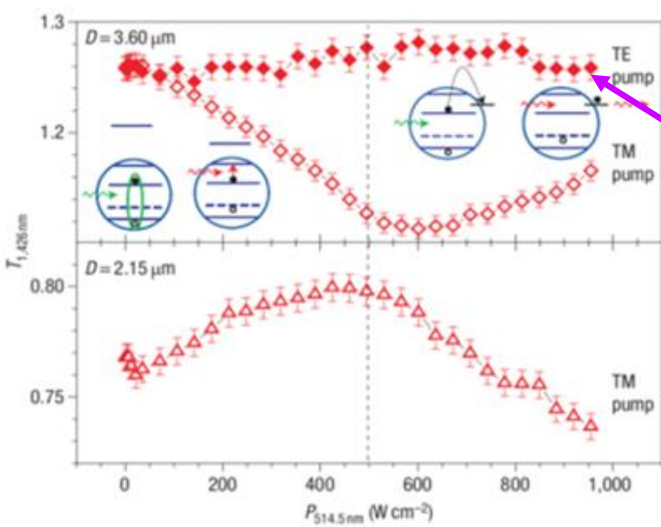
- Ag膜上存在一个狭缝和沟槽，二者平行
- 沟槽与狭缝间Ag膜上铺满一层CdSe量子点
- 信号光在沟槽处激发SPP，传播到狭缝处与狭缝处信号光干涉
- 没有泵补光，SPP不被量子点吸收
- 泵补光在狭缝处激发SPP，SPP被量子点吸收，电子跃迁到高能级；高能级之上存在带内跃迁，可以吸收红外光SPP，改变狭缝处的干涉效果，出射信号改变

可见光

红外光



透过率（1426 nm）



泵补光功率（514.5 nm）

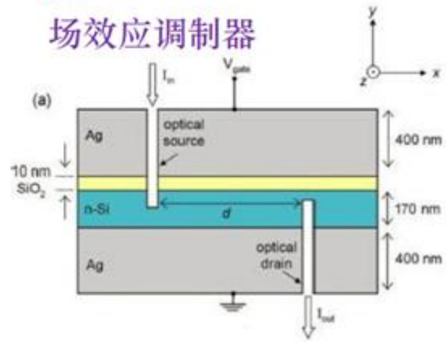
信号光为TE模式不激发SPP，泵补光对其无影响

Pacifici et al., Nature Photon. **1**, 402 (2007)

SPP的主动调制—电场调制

plasMOStor:

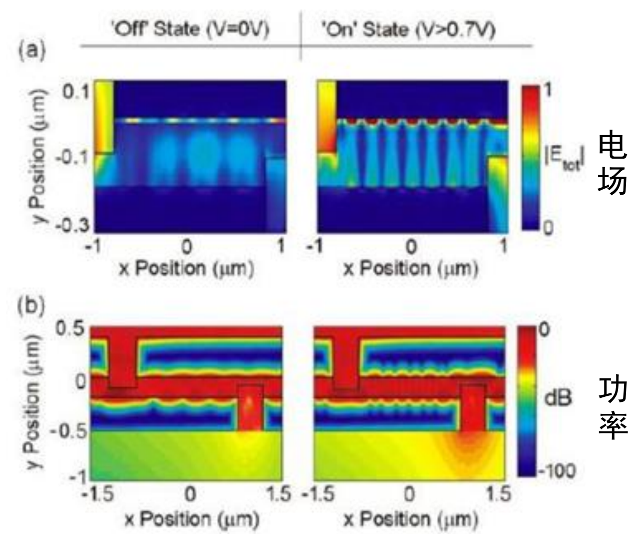
场效应调制器



λ=1.55μm	|E| mode profile	Mode Index	Loss (dB/μm)
Off state (V=0) *depletion*	Ag, SiO_2, Si, Ag	3.641	0.207
		0.375	2.37
On state (V>0.7V) *accumulation*	Ag, SiO_2, Si, Ag	3.649	0.228
		0.033	28.14

(red:photonic mode, blue: plasmonic mode)

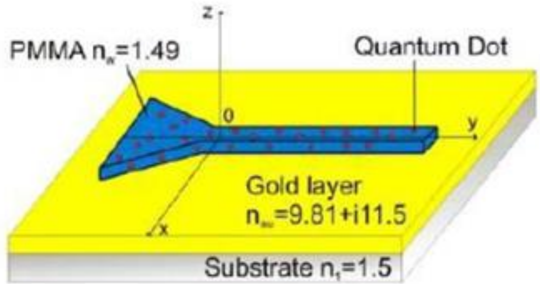
- 信号光从上方狭缝入射，在中间激发SPP
- SPP在狭缝狭缝处转变为辐射光输出
- 原理：栅电场改变Si中载流子浓度，从而改变其折射率，进而改变SPP的传播特性
- 中间层光传输存在两种模式：光子模式和等离子体模式
- 光子模式对Si的折射率敏感，施加偏压后迅速衰减
- 等离子体模式对Si折射率改变不敏感
- 零偏压下，两种模式干涉导致输出光弱
- 偏压下，光子模式被抑制，没有干涉，输出光强



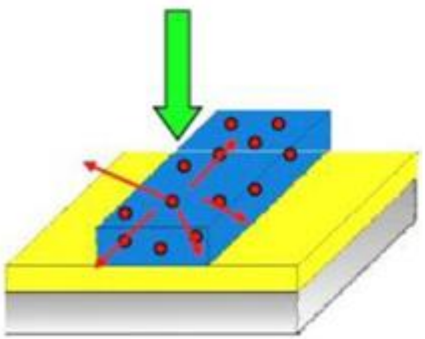
Dionne et al., Nano Lett. **9**, 897 (2009)

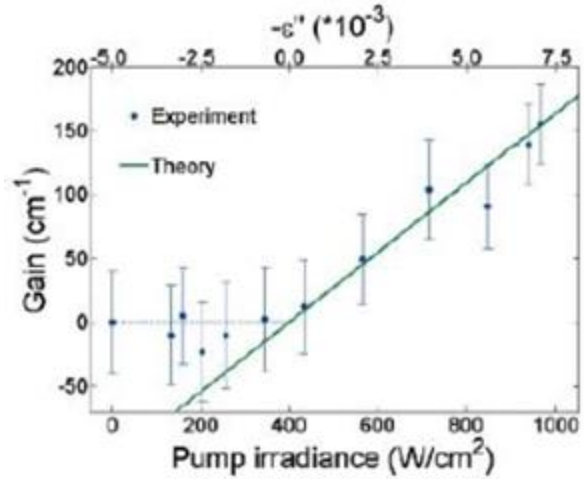
SPP的主动调制—放大器

DLSPPW掺杂增益介质

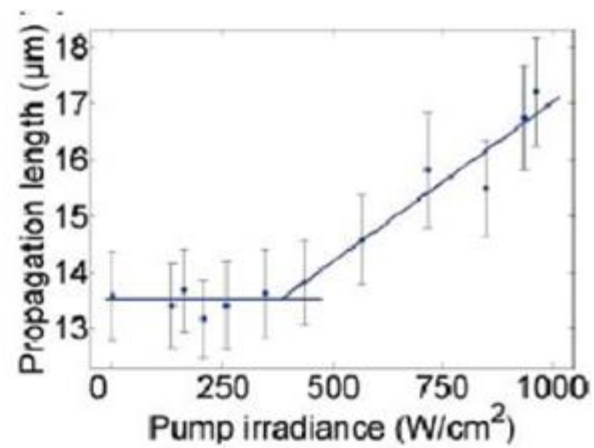


- 原理：受激辐射光放大——同激光类似
- 介质中含有PbS量子点
- 在DLSPPW中激发SPP（λ_0 = 1525 nm）
- 用532 nm的泵补光照射DLSPPW，PbS量子点发生跃迁
- SPP诱导量子点发光（受激辐射）





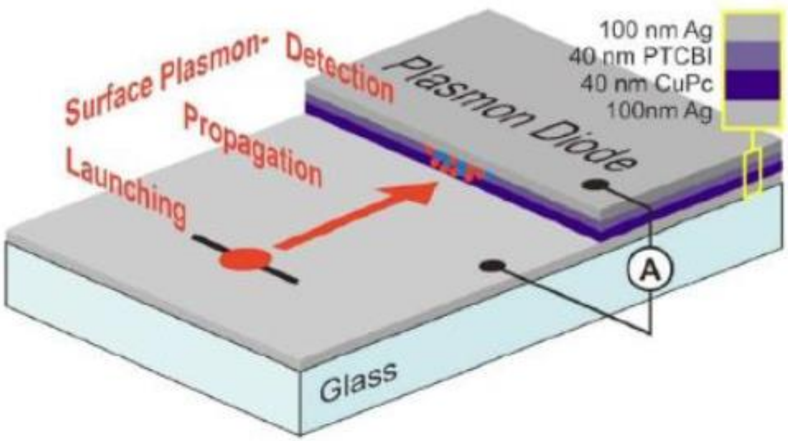
随泵补强度的增加，出现激射



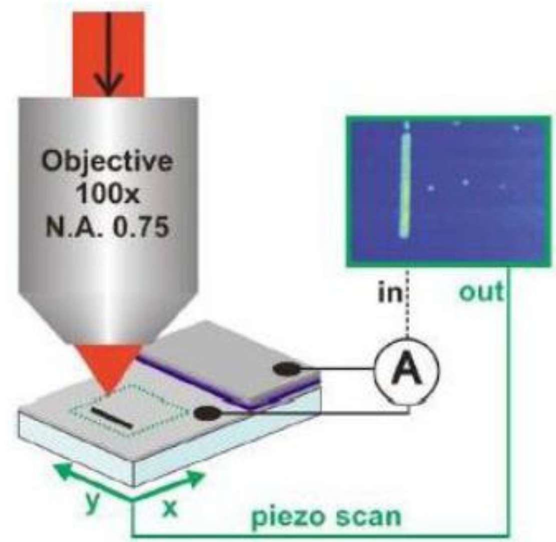
出现激射需要一定的长度

Grandidier et al., Nano Lett. **9**, 2935 (2009)

SPP的探测—通过有机二极管检测



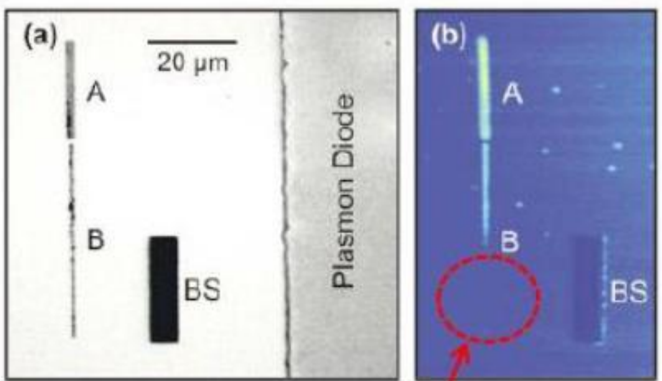
光电流扫描



SPP传播到等离子体二极管，产生

电荷载体像直流电一样可以被检测

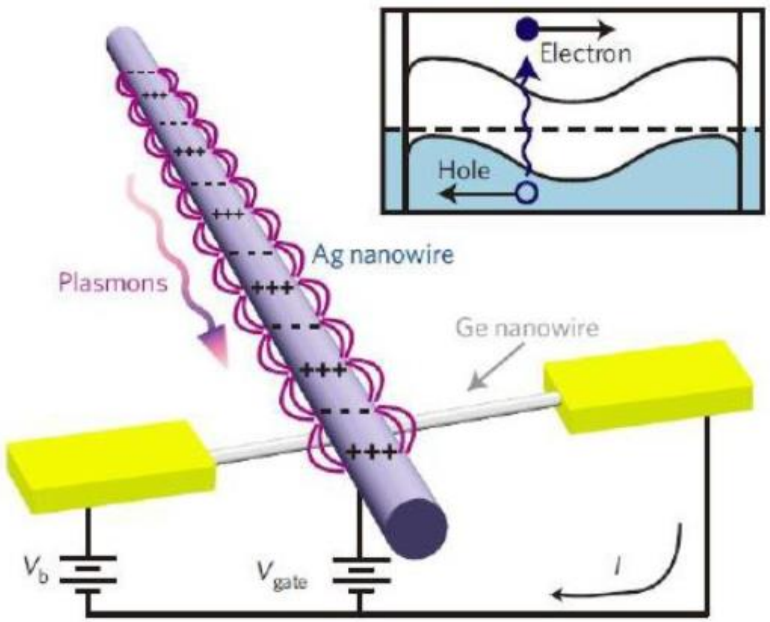
- 物镜将入射光聚焦在金属膜表面
- 金属膜样品在水平方向做扫描运动
- 每扫描一个点记录一下光电二极管中的电流，构成位置-电流一一对应关系
- 在狭缝A、B处可以激发SPP，有光电流
- 存在BS孔洞处，阻碍SPP传播，所以被BS阻挡的狭缝B无光电流

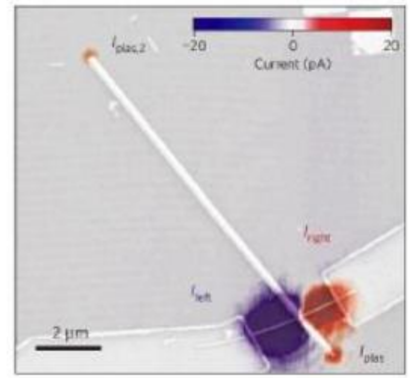


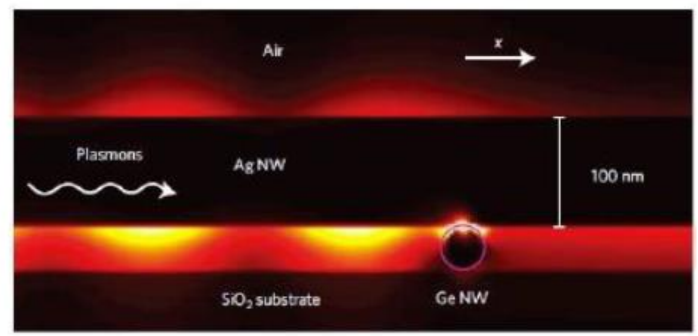
SPPs受阻

Ditlbacher et al., APL **89**,161101(2006)

SPP的探测—通过纳米线场效应晶体管检测



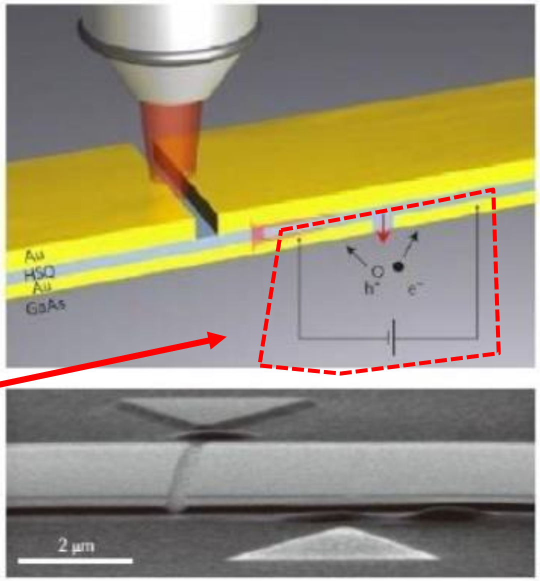




Ag纳米线传导的SPPs在Ag-Ge交界处强烈耦合进Ge纳米线，并被转换为电子空穴对，有电流通过Ge纳米线晶体管而被检测到。

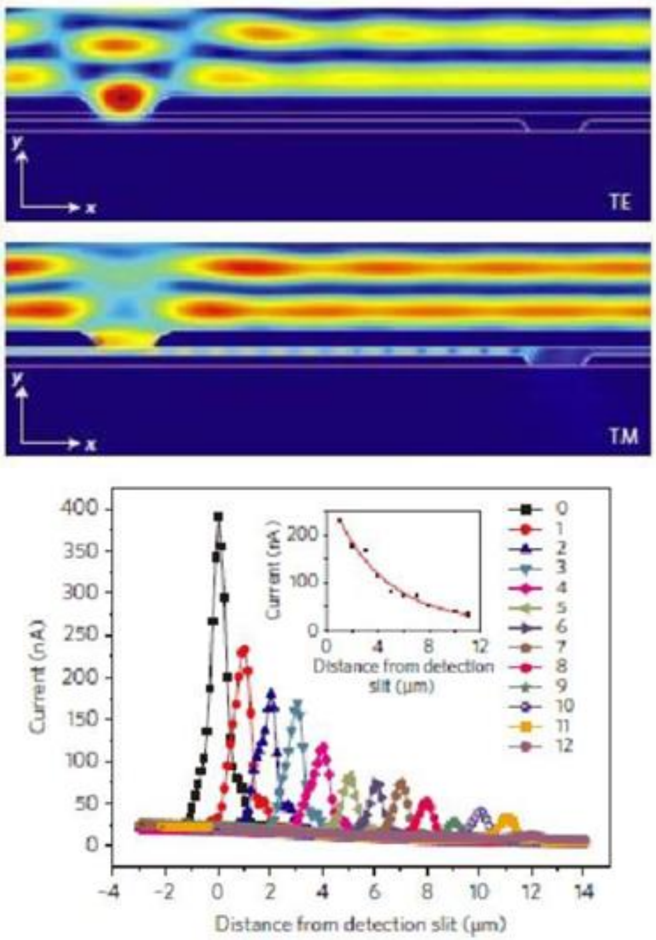
Falk et al, Nature Phys. **5**, 475(2009)

SPP的探测—通过纳米缝MSM光探测器检测



MSM器件

被纳米缝激发的SPP，在MIM波导的传播，并通过(金属-半导体-金属)MSM光探测器检测



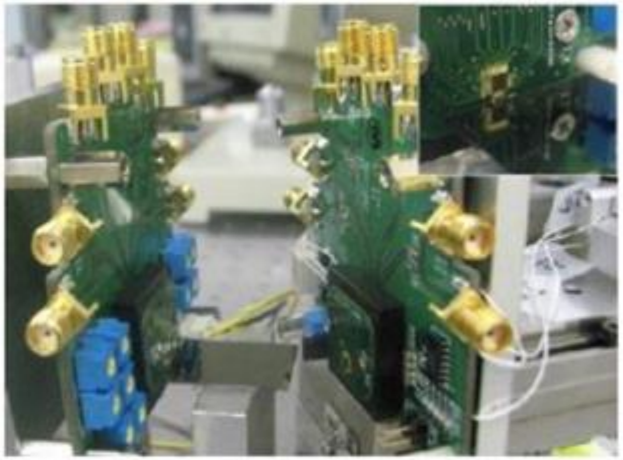
MSM探测器位于 x = 0 处，激发光沿x方向做扫描

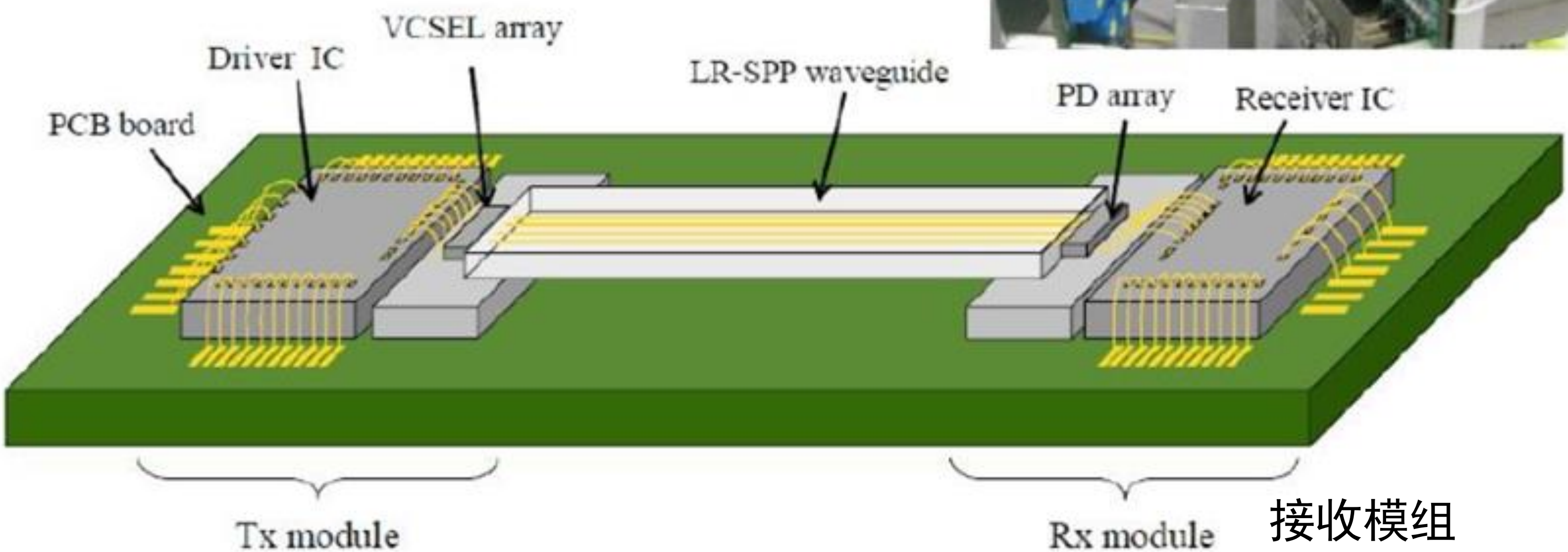
Neutens et al., Nature Photon. 3, 283(2009)

等离子体光路展望

主板上利用基于金LRSPP波导的
聚合物实现芯片间光互连

10 Gbps的数据传输



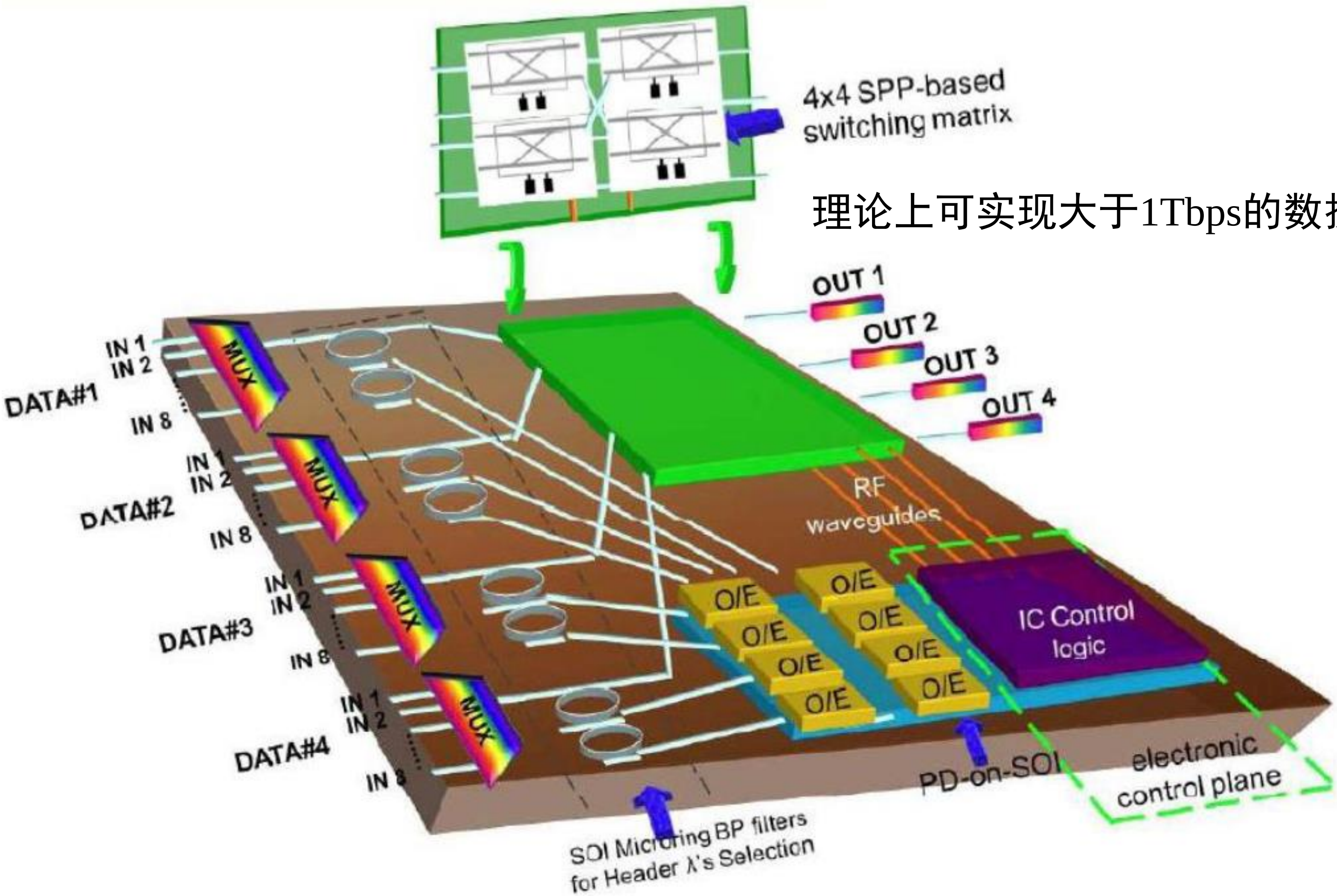


接收模组

发射模组

Kim et al., Opt. Express **16**, 13133 (2008)

等离子体光路展望



理论上可实现大于1Tbps的数据传输

小结

- 等离子体光路：未来信息技术的潜在解决方案（等离子体互联）

- SPP波导、反射镜、分束器、波分复用器和解波分复用器、耦合器、滤波器、SPP源和发射器、开光和调制器、放大器、探测器，、、、