

表面等离激元光子器件设计 及全光调制

报 告 人：陈建军

指导老师：李智 龚旗煌

2010年10月28日

北京大学物理学院



北京大学
PEKING UNIVERSITY

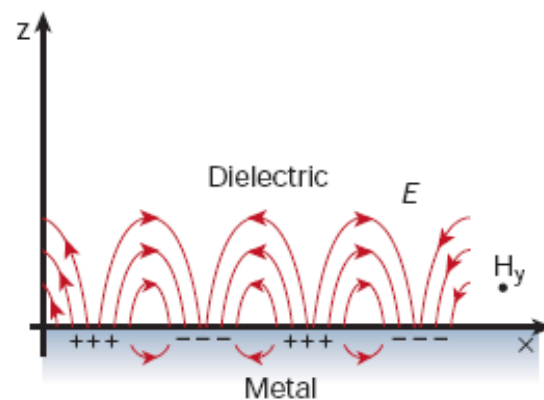
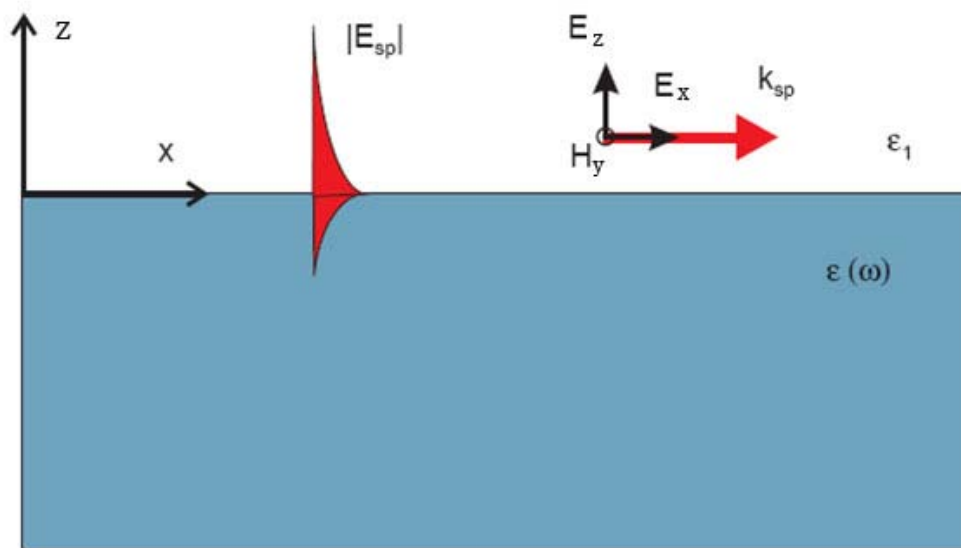
主要内容

- 背景介绍
- 表面等离激元光子器件的设计
- 表面等离激元全光调制
- 小结



背景介绍

表面等离激元（surface plasmon polaritons, SPPs）是光场和金属表面自由电子相互作用形成的一种光波模式，该模式的场强离开金属表面指数衰减。



传输特性

当 $\varepsilon(\omega) = \varepsilon^R(\omega) + i\varepsilon^I(\omega)$ 时 \longrightarrow

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \left[\frac{\varepsilon_1 \varepsilon(\omega)}{\varepsilon_1 + \varepsilon(\omega)} \right]^{1/2} = k_{sp}^R + ik_{sp}^I$$

Propagation length:

$$L = \frac{1}{2k_{sp}^I} \propto \frac{c}{\omega \varepsilon^I(\omega)} \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon^R(\omega))^3 \varepsilon^R(\omega)}{\varepsilon_1^3}}$$



Mode spot size:

$$W_{1/e} = \frac{1}{|k_{z1}^I|} + \frac{1}{|k_{z2}^I|}$$

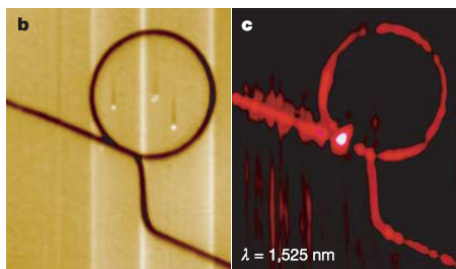
$$W_{1/e} \approx \frac{c\sqrt{-(\epsilon_1 + \epsilon^R(\omega))}}{\omega\epsilon_1} + \frac{c\sqrt{-(\epsilon_1 + \epsilon^R(\omega))}}{-\omega\epsilon^R(\omega)}$$

在介质中的尺度为~100 nm，在金属中尺度为~10 nm，传播长度L为~100 μm。



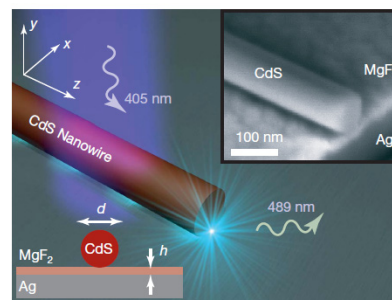
SPPs特点:

可以将电磁场能量束缚在很小的空间范围，突破衍射极限。而在纳米光子学领域显示出巨大的应用潜力，如**纳米集成光子器件**，纳米光学成像和纳米光刻。



Subwavelength waveguide

Nature **440**, 508 (2006)



Plasmon laser

Nature **461**, 629 (2009)

主要内容

- 背景介绍
- 表面等离激元光子器件的设计
- 表面等离激元全光调制
- 小结



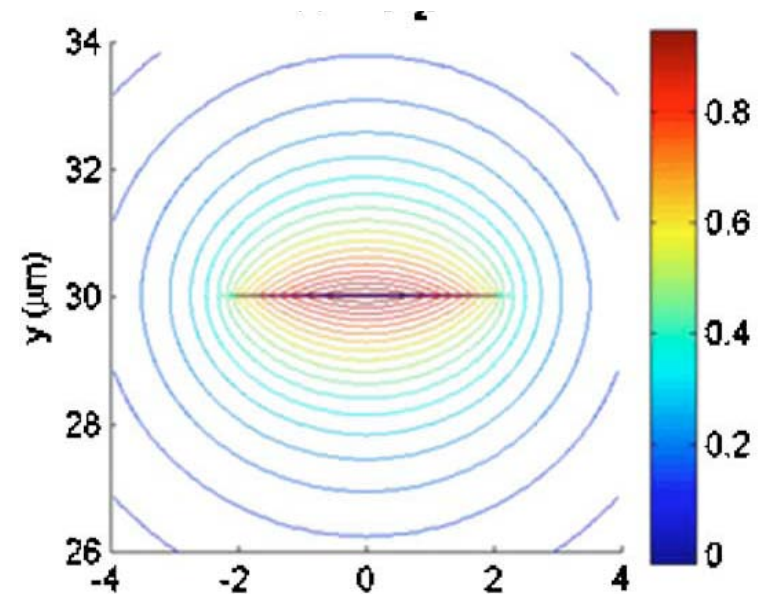
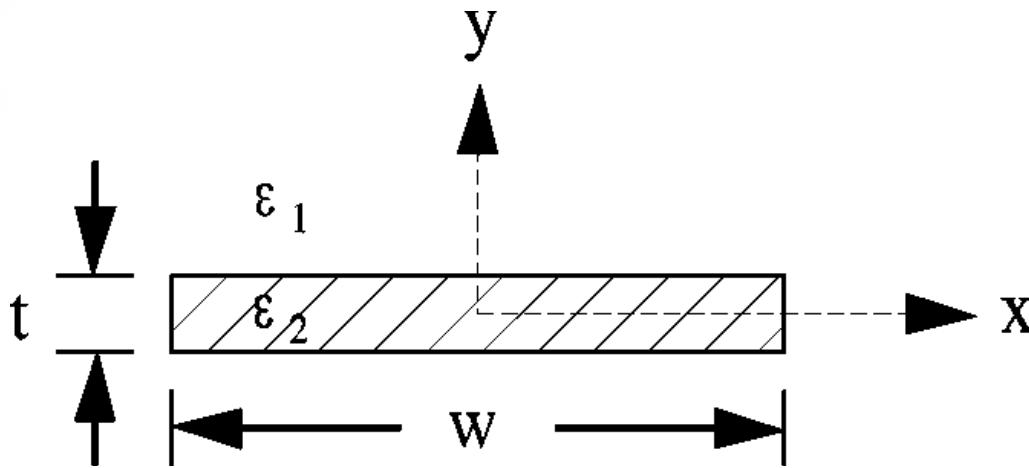
表面等离激元波导及光子器件设计

常见的表面等离激元波导：

1. Long-range surface plasmon-polariton (LRSPP)
2. Dielectric-loaded surface plasmon-plariton (DLSPP)
3. Channel surface plasmon-polariton (CPP)



LRSP



$$\epsilon_1 = 1.444^2, \quad \epsilon_2 = -131.95 + 12.65i$$

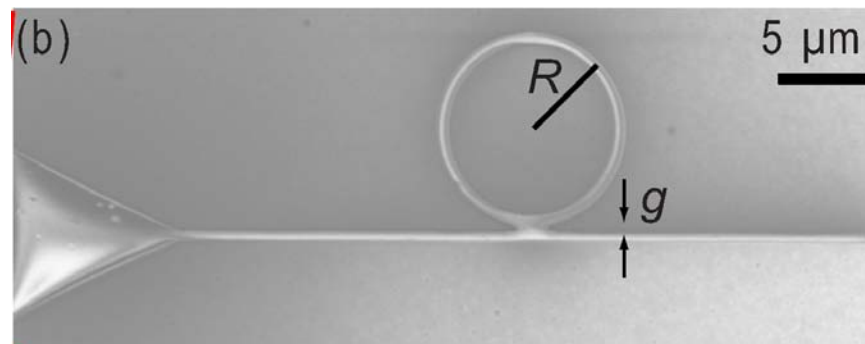
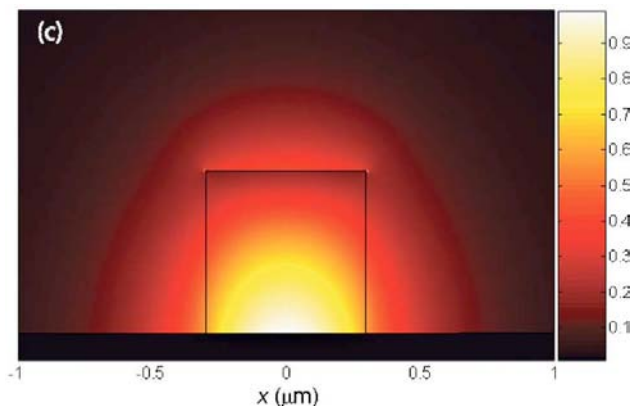
Mode size $\sim 10 \mu\text{m}$, $L \sim 10 \text{ mm}$, $r_{\text{opt}} = 20 \text{ mm}$

J. Appl. Phys. **102**, 053105 (2007)

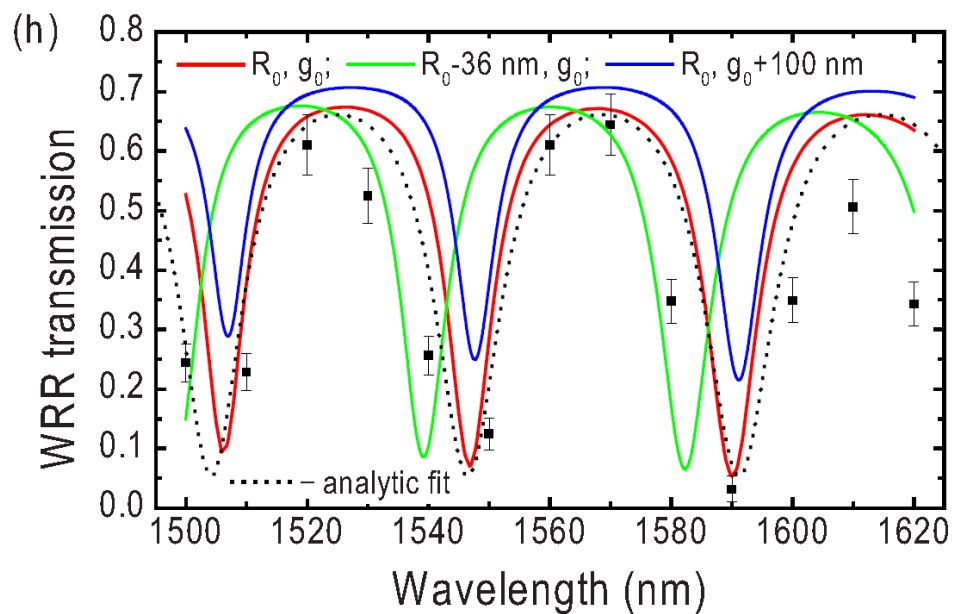


北京大学
PEKING UNIVERSITY

DLSP



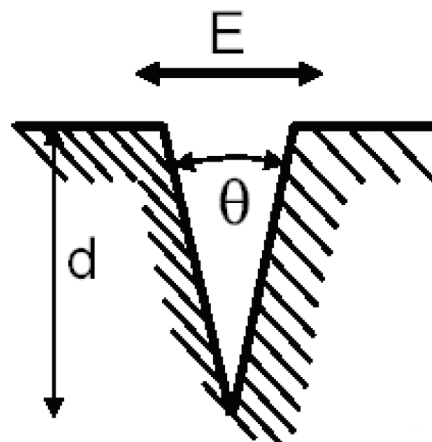
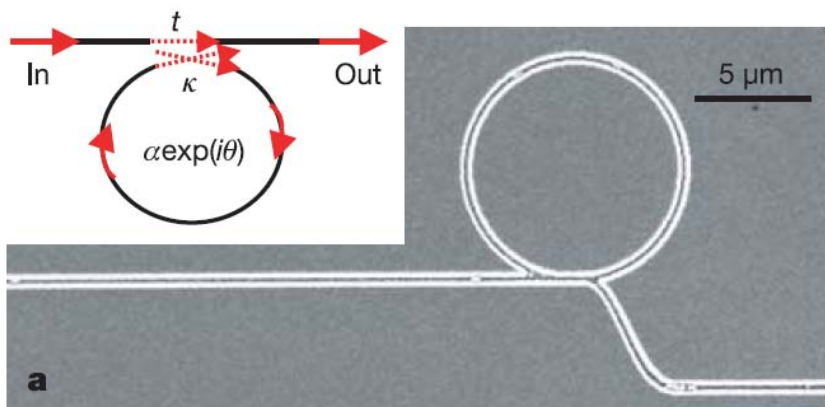
$w=500 \text{ nm}$
 $h=600 \text{ nm}$
 mode width= 915 nm
 $L=48 \text{ μm}$
 $n_{eff}=1.27$
 $r_{opt}=5 \text{ μm}$



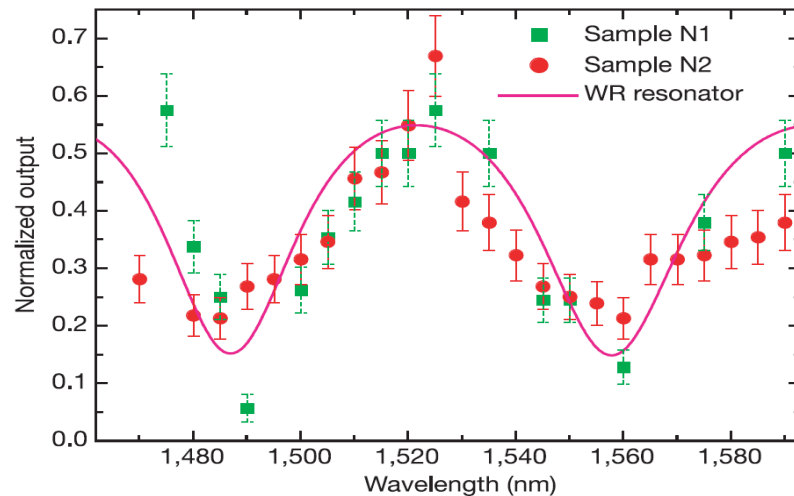
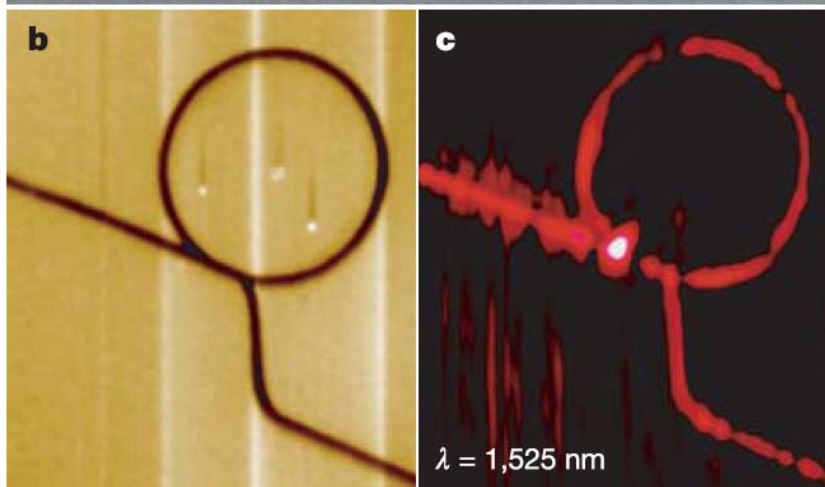
$$\Delta\lambda_{FWHM} = 20 \text{ nm}, \quad Q = \lambda / \Delta\lambda_{FWHM} = 77$$

Appl. Phys. Lett. 94, 051111 (2009)

CPP



$d=1000 \text{ nm}$,
 $w=600 \text{ nm}$,
mode width=1100 nm
 $L \sim 100 \mu\text{m}$



$$R=5 \mu\text{m}, d=1.25 \mu\text{m}, \theta=25^\circ$$

$$\Delta\lambda_{FWHM} \sim 40 \text{ nm}, \quad Q=\lambda / \Delta\lambda_{FWHM} = 37$$

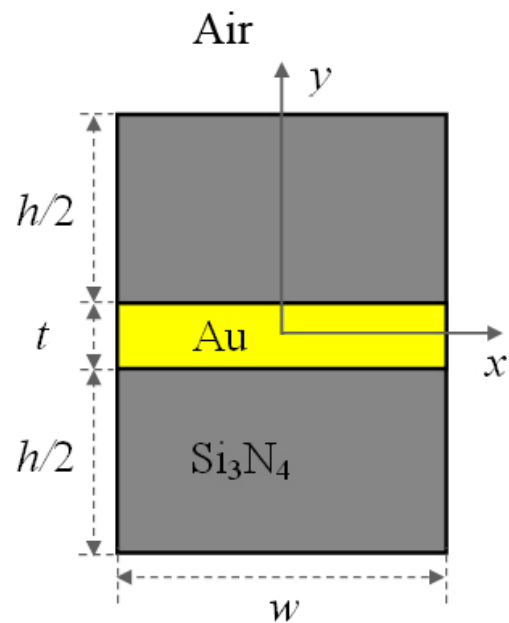
Nature 440, 508, (2006)

- **LRSPP**: 传输距离长 ($\sim mm$), 光斑大 ($\sim 10 \mu m$), 弯曲损耗大 ($r \sim mm$)
- **DLSPP**: 束缚好, 光斑小 ($\sim 1 \mu m$), 弯曲损耗小 ($r \sim 5 \mu m$), 传输距离短 ($\sim 40 \mu m$)
- **CPP**: 束缚好, 光斑小 ($\sim 1.1 \mu m$), 弯曲损耗小 ($r \sim 5 \mu m$), 传输距离短 ($\sim 100 \mu m$)

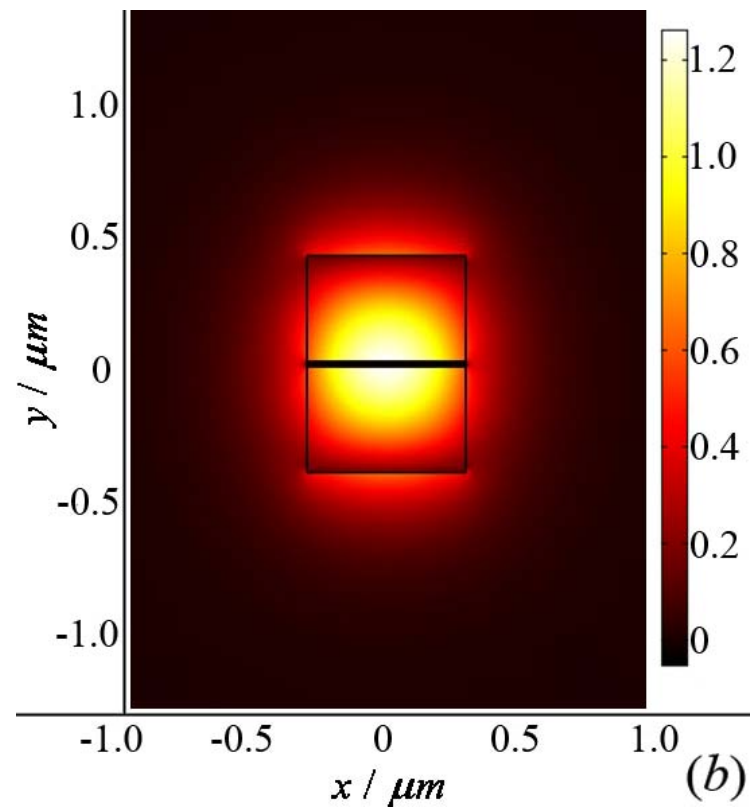
亚波长束缚 + 长传输距离???



(1) 二维非对称结构LRSPP及环形谐振腔



(a)



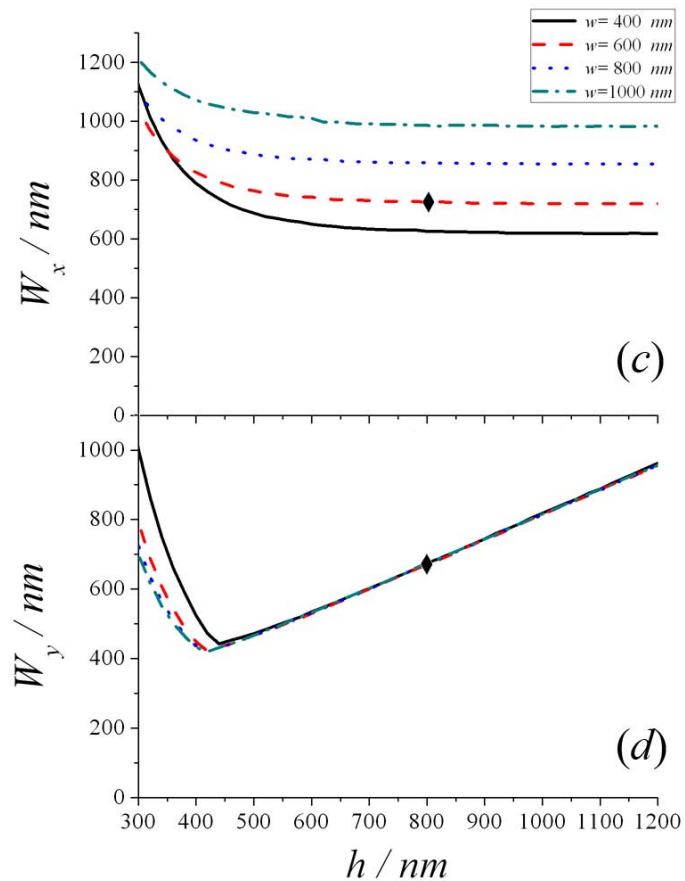
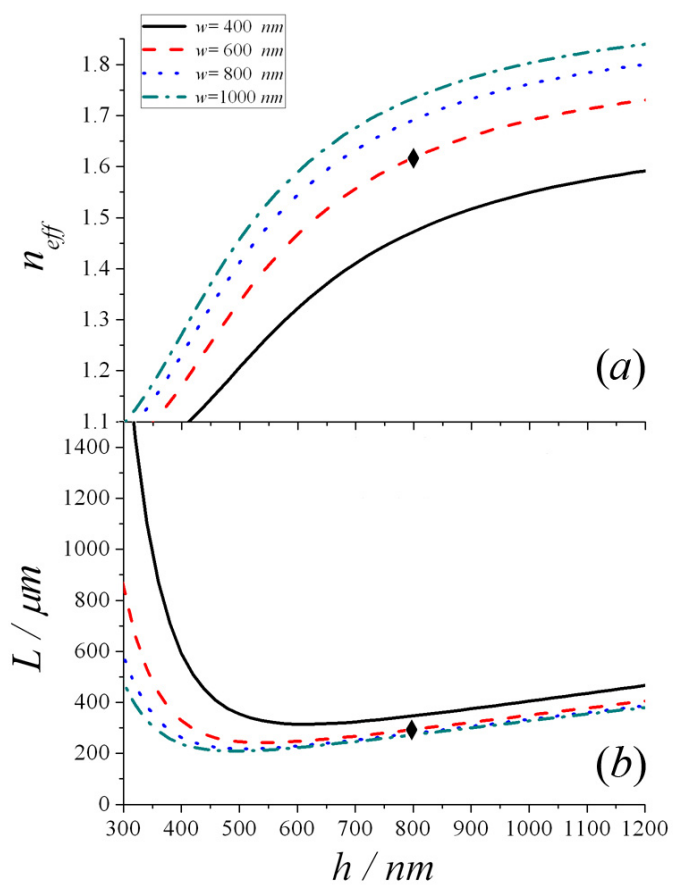
(b)

Schematic of the finite width symmetrical DMD waveguide without substrates (a), distribution of the electromagnetic field (E_y , $w=600\text{ nm}$, $h=800\text{ nm}$) (b) and light wave propagating along the z -axis.

Chen et al. Opt. Express **17**, 23603 (2009)



北京大学
PEKING UNIVERSITY

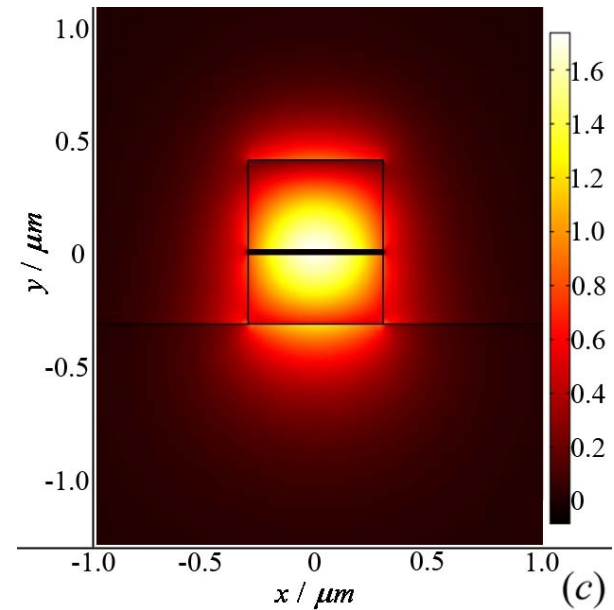
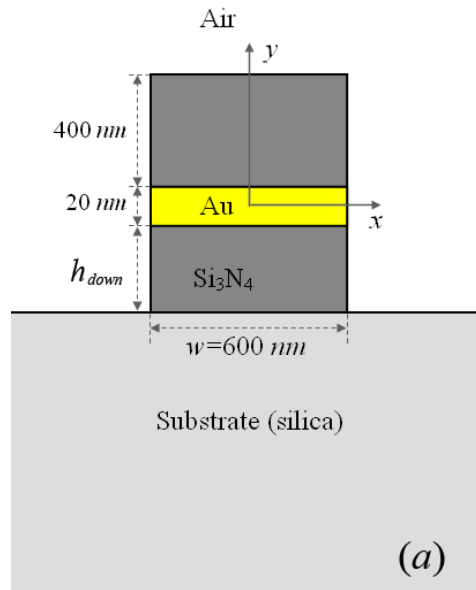


Hybrid LRSPP 色散曲线和光斑大小

工作点: $w=600$ nm, $h=800$ nm \rightarrow $W_x=726$ nm, $W_y=670$ nm, $L=300$ μm, $n_{eff}=1.63$

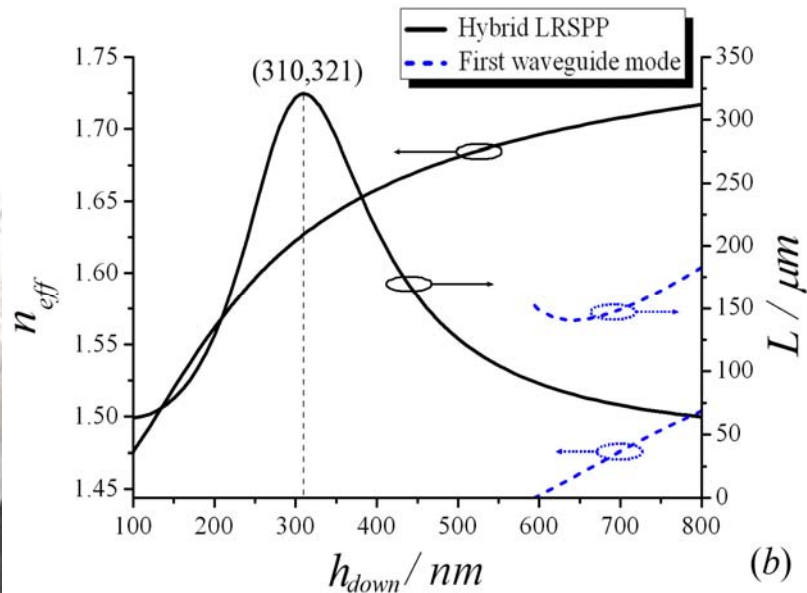


北京大学
PEKING UNIVERSITY



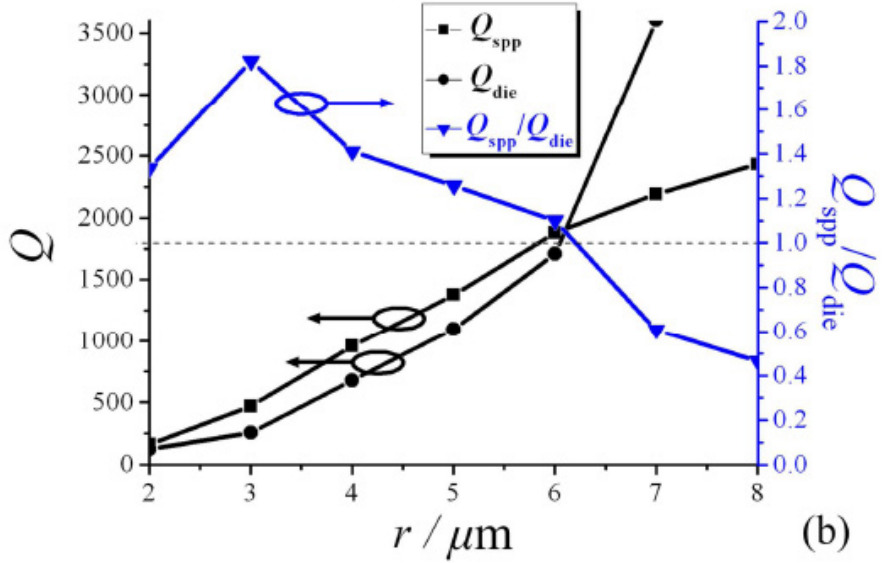
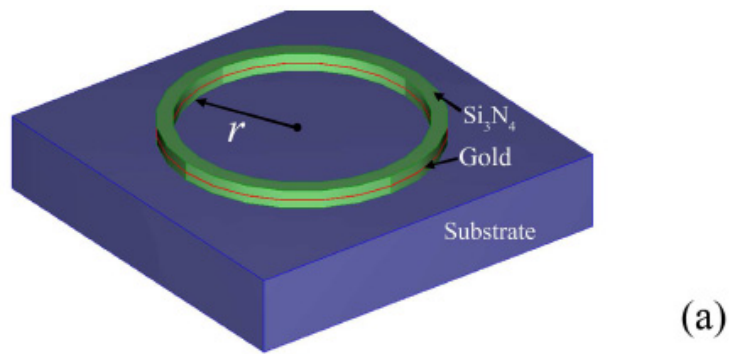
Hybrid LRSPP and first waveguide mode

$$h_{down} = 594 \text{ nm}$$



$$h_{down} = 310 \text{ nm} \rightarrow W_x = 726 \text{ nm}, W_y = 647 \text{ nm}, L = 321 \text{ } \mu\text{m}, n_{eff} = 1.63$$

WRRs of high performance based on the asymmetrical DMD waveguide



大尺度，传播损耗
小尺度，弯曲损耗

Fig. 3. (a) Schematic of the plasmonic WRR structure. (b) Q_{spp} of plasmonic WRR, Q_{die} of pure dielectric WRR, and $Q_{\text{spp}}/Q_{\text{die}}$ as a function of r .

$Q_{\text{SPP}} \sim 1400$, at $r = 5 \mu\text{m}$



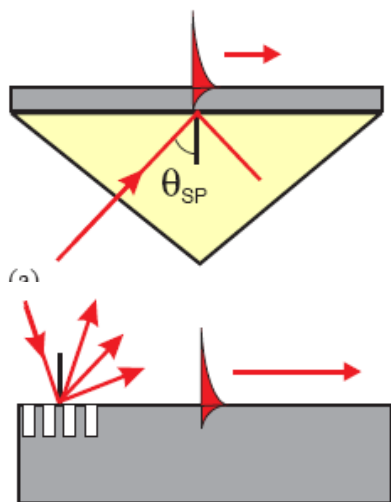
Performances of Hybrid LRSPP

- 1、 Subwavelength field confinement: **75%** of DLSPP
- 2、 Long propagation length: 321 μm , **11** times of DLSPP
- 3、 Waveguide-ring resonators: High Q, **>10** of DLSPP and CPP
- 4、 $r \geq 7\mu\text{m}$ 时, $Q_{\text{die}} > Q_{\text{spp}}$, $r < 7\mu\text{m}$ 时, $Q_{\text{die}} < Q_{\text{spp}}$

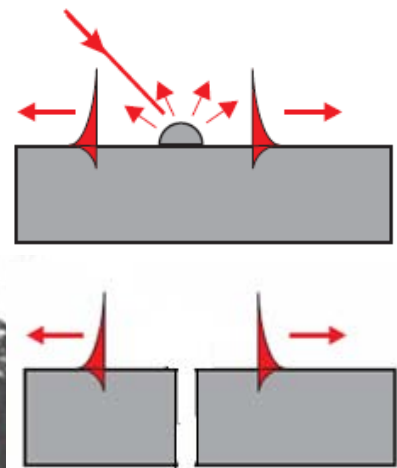


(2) SPP的单向发射

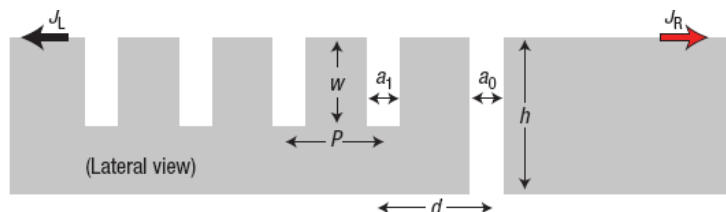
大结构



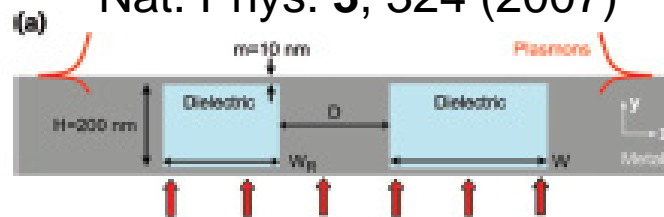
纳米结构



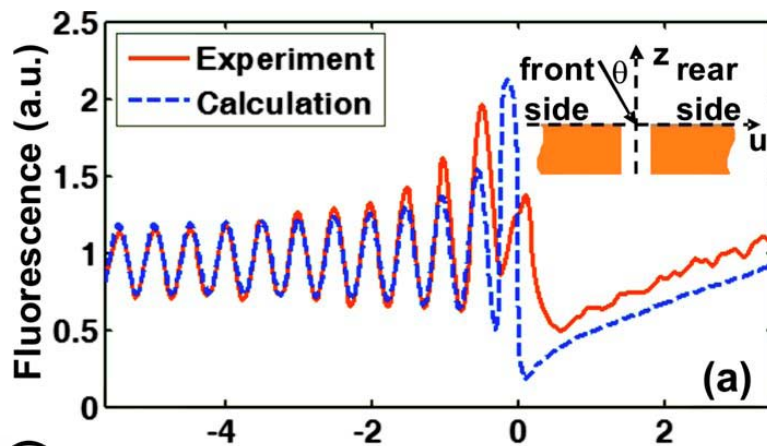
引入非对称系统



Nat. Phys. **3**, 324 (2007)

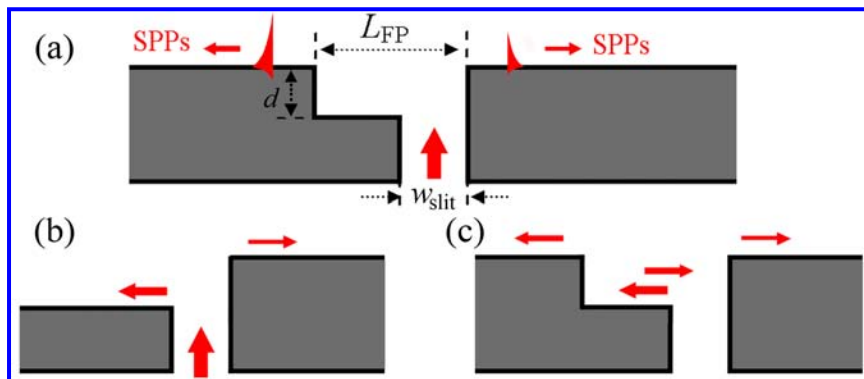


Nano Lett. **9**, 327 (2009)

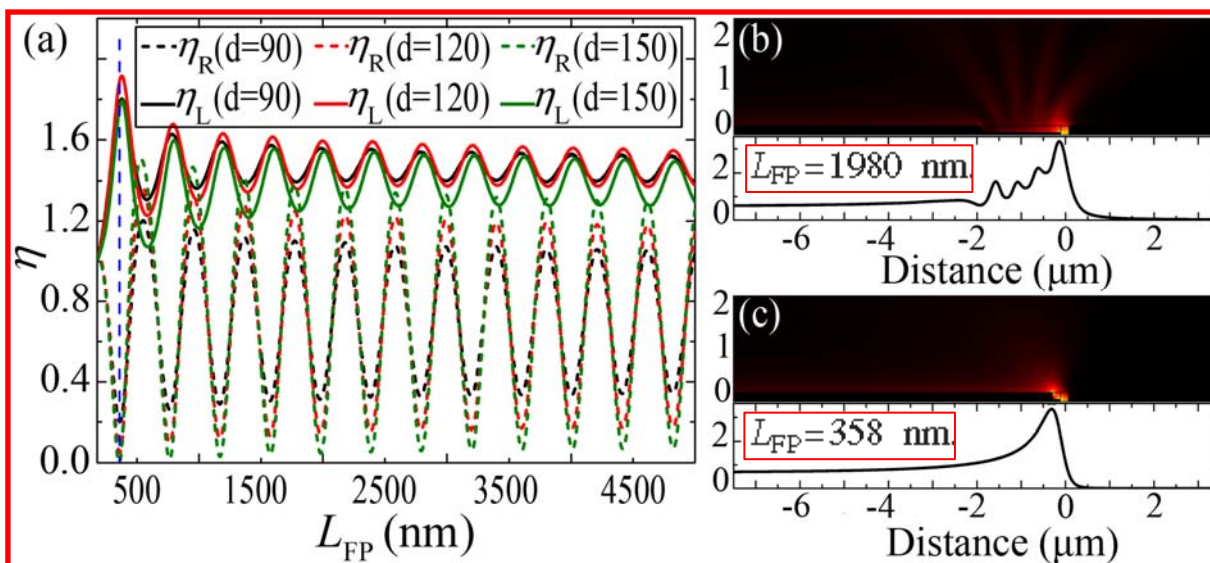


Appl. Phys. Lett. **94**, 011114 (2009)

单个非对称纳米狭缝实现SPP的单向发射



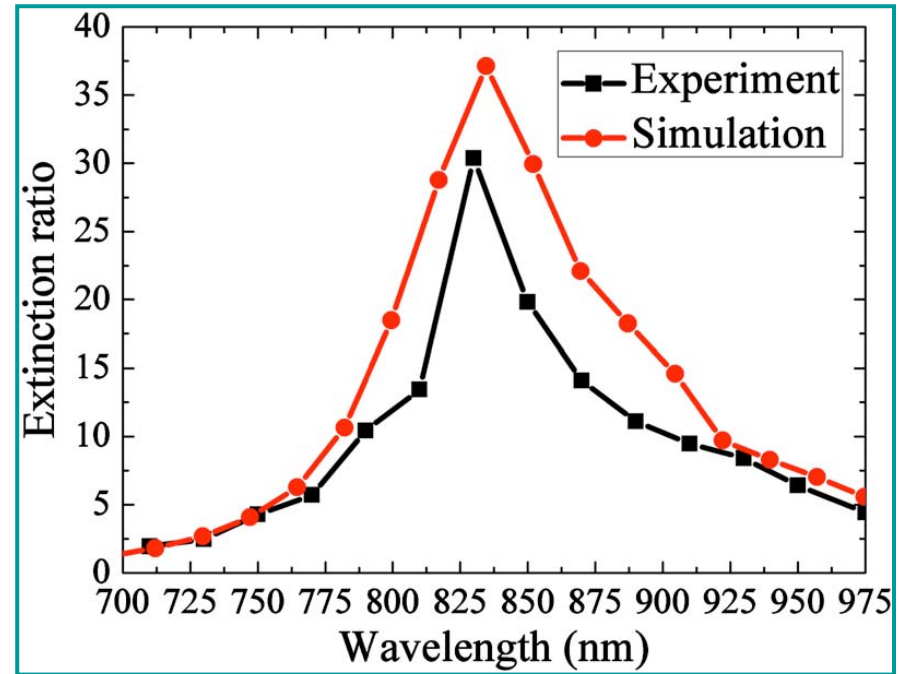
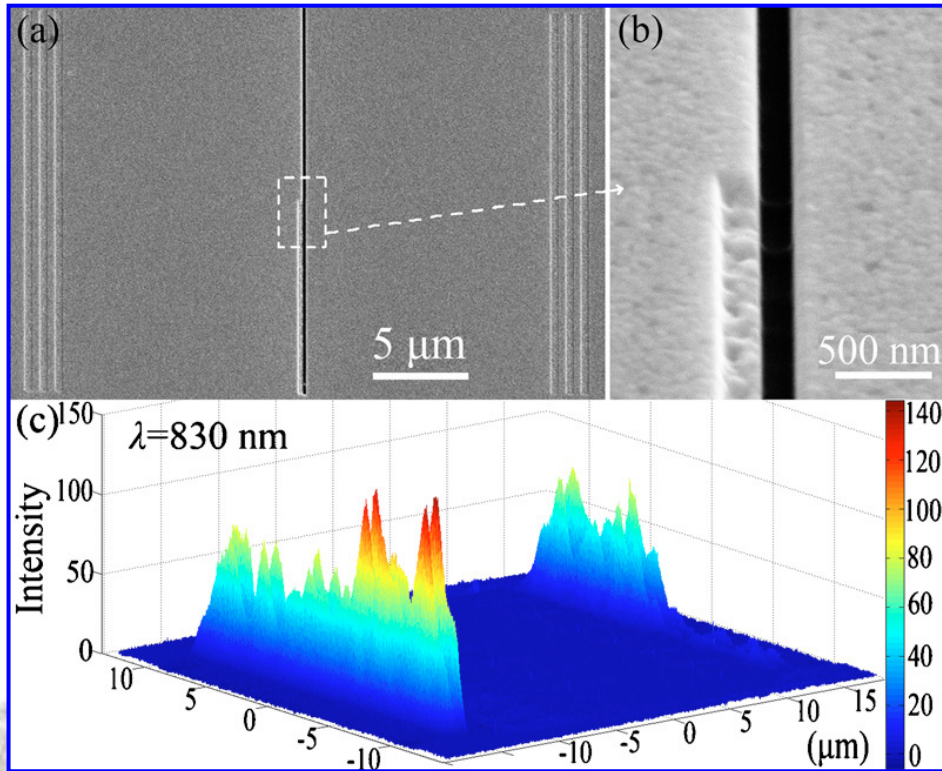
$$\Phi = 2k_{\text{spp}} L_{\text{FP}} + \varphi$$



SPP激发效率随腔长变化

典型腔长下能流分布

实验验证

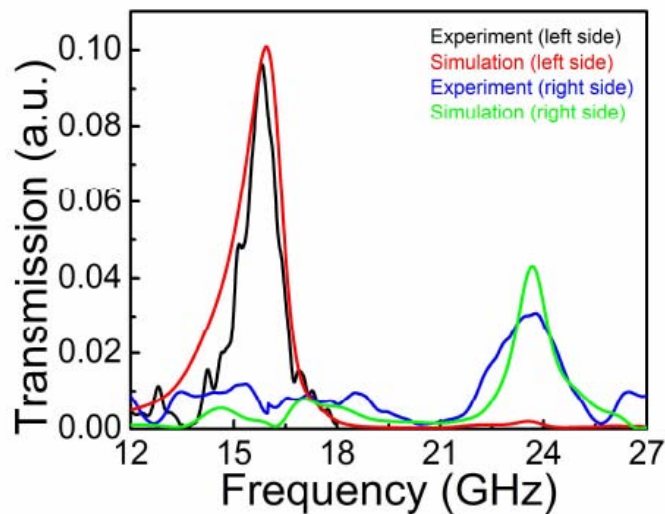
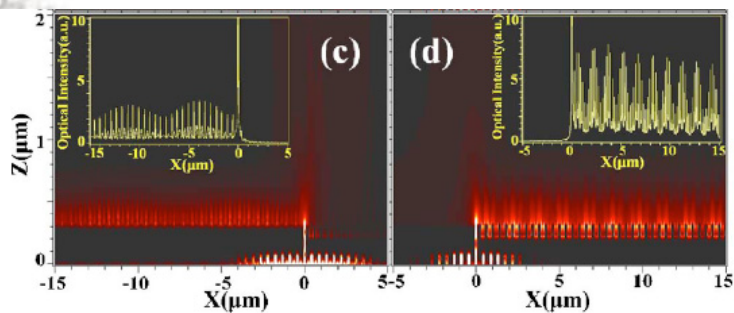
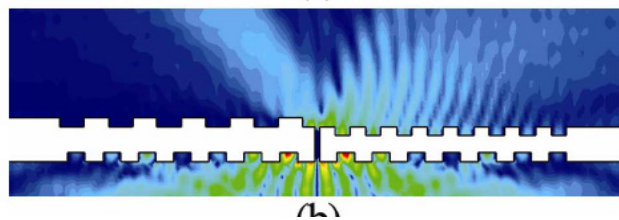
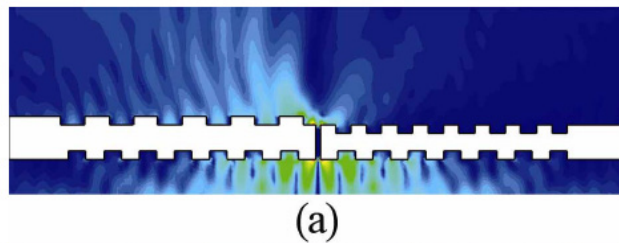
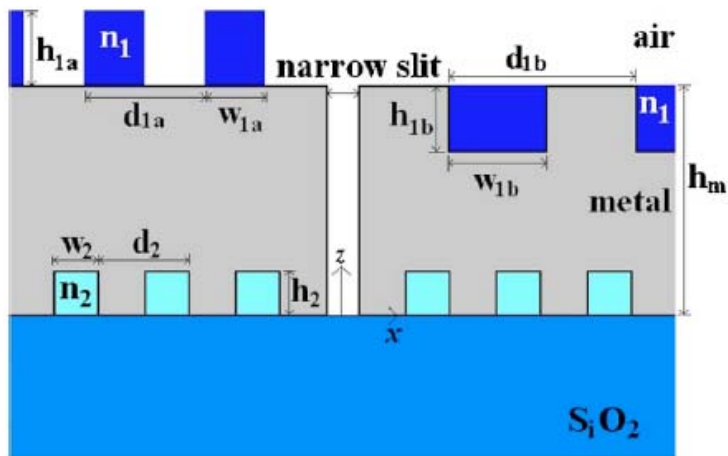


样品SEM图和CCD采集到的两边光栅处的SPP散射强度

左右两边SPP强度比值随波长变化

非对称狭缝横向尺度370nm，左右两边SPP消光比约30，效率是对称单缝的1.8倍

(3) SPP分束：不同波长SPP向不同方向传播

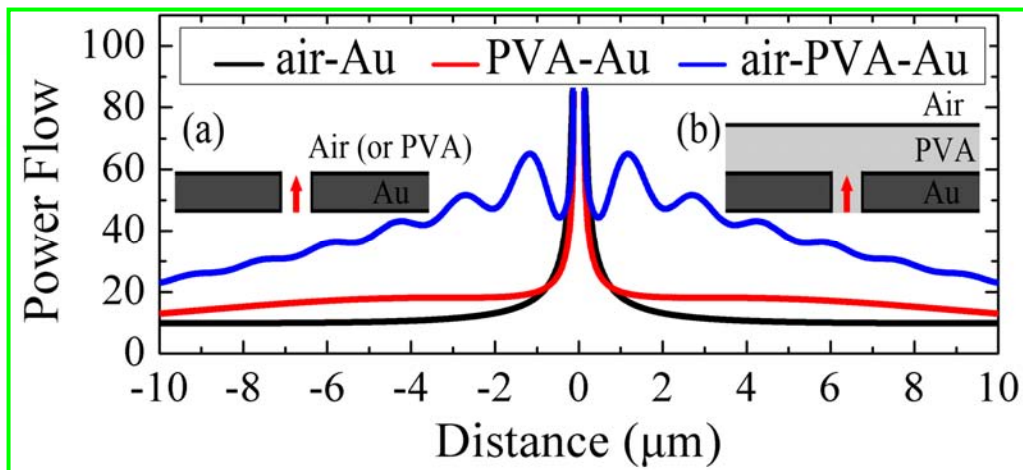


Appl. Phys. Lett. **90**, 161130 (2007)

Opt. Express **16**, 19091 (2008)



加介质薄膜利用准柱面波对总场的调制实现SPP splitter



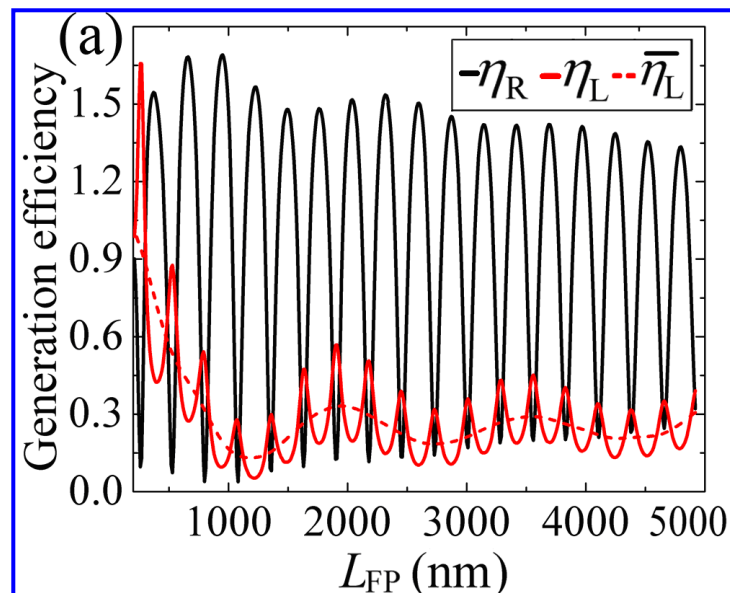
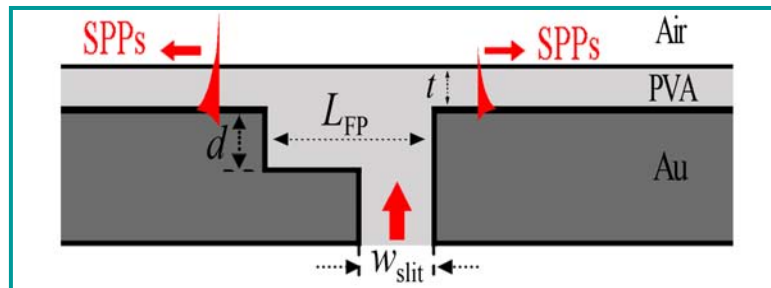
单缝附近能流分布图

$$H(x) = \beta_{\text{SPP}} H_0 \exp(ik_{\text{SPP}}x) + \beta_{\text{CW}} H_0 (x/\lambda)^{-m} \exp(ik_0x)$$

↑
SPPs项

↑
准柱面波项

$$P = k_0 \lambda / (k_{\text{SPP}} - k_0) = \lambda / (1.51 - 1) = 1620 \text{ nm}$$



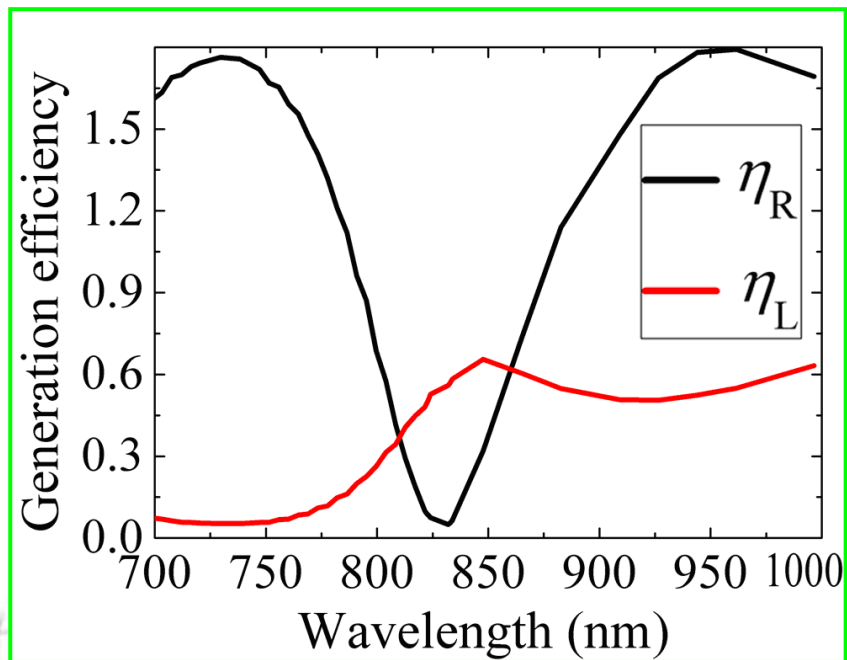
SPP激发效率随腔长变化

Chen et al. Appl. Phys. Lett. (submitted)

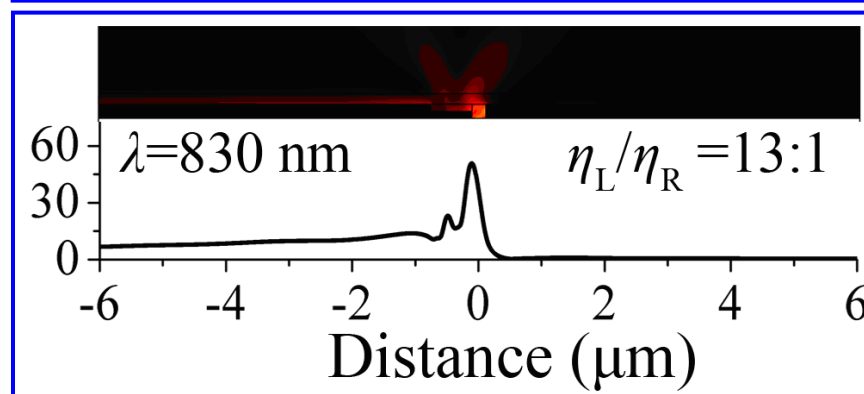
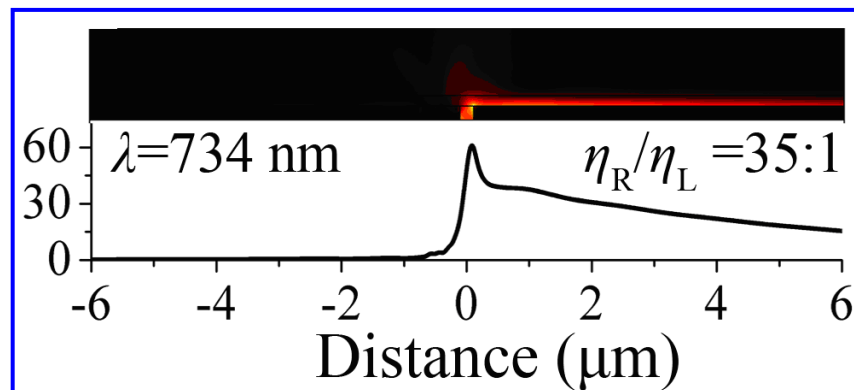


北京大学
PEKING UNIVERSITY

不同波长SPP的分束



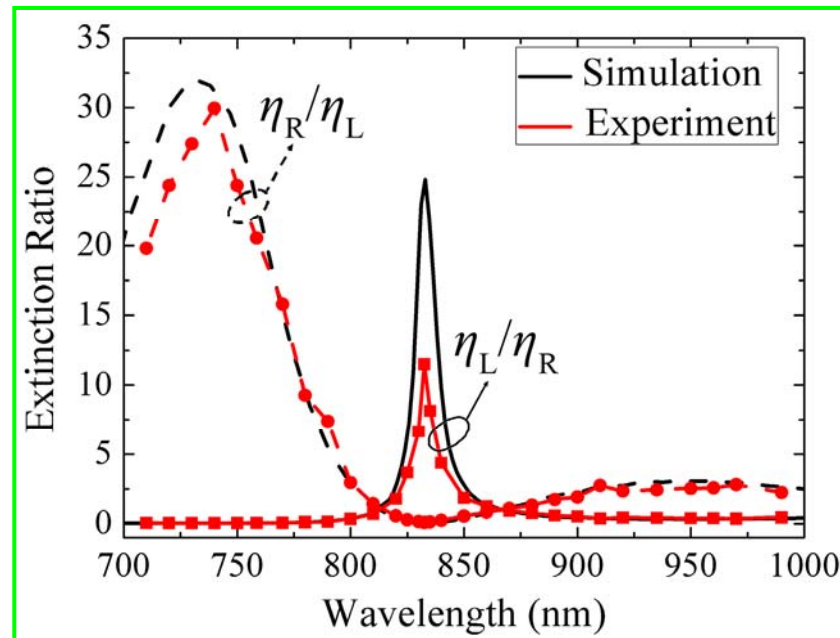
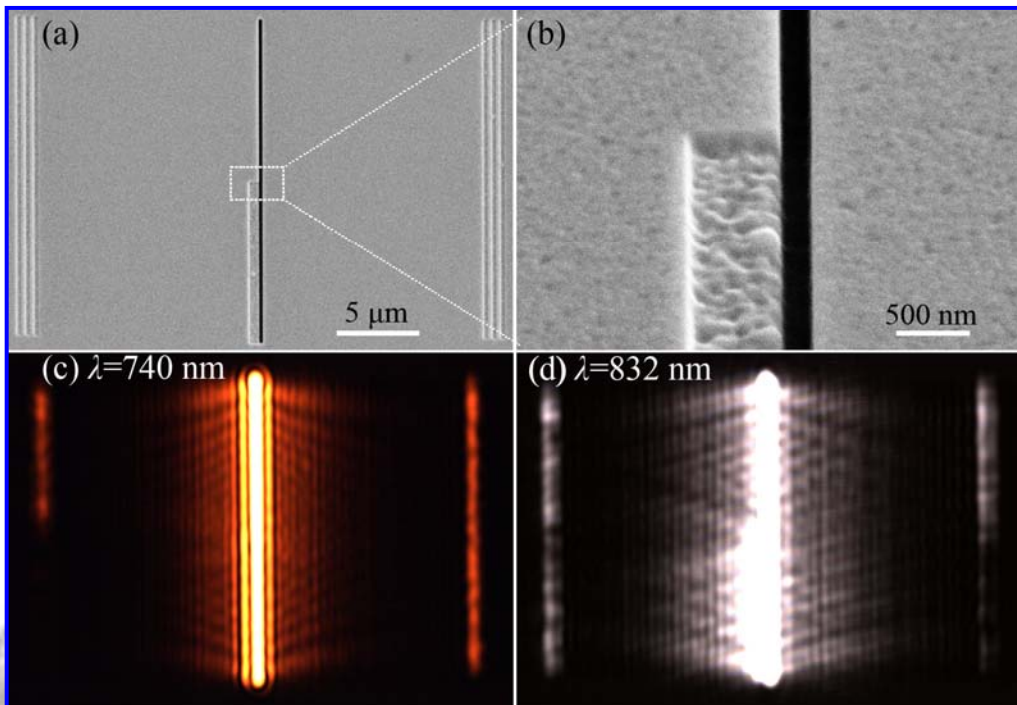
SPP激发效率随波长变化



典型波长下能流分布

几何参数：腔长800nm，深100nm，狭缝宽200nm，聚合物膜厚150nm

实验验证



样品SEM图和实验采集的CCD图

两边SPP强度比值随波长变化

非对称狭缝横向尺度800nm，波长740nm和830nm分束，消光比分别为30和12。



1、利用CWs对总场的调制实现了一种超紧凑的SPP splitter.

2、 CWs对总场的调制为SPP器件的设计提供了更多的机会和可能性.



北京大学
PEKING UNIVERSITY

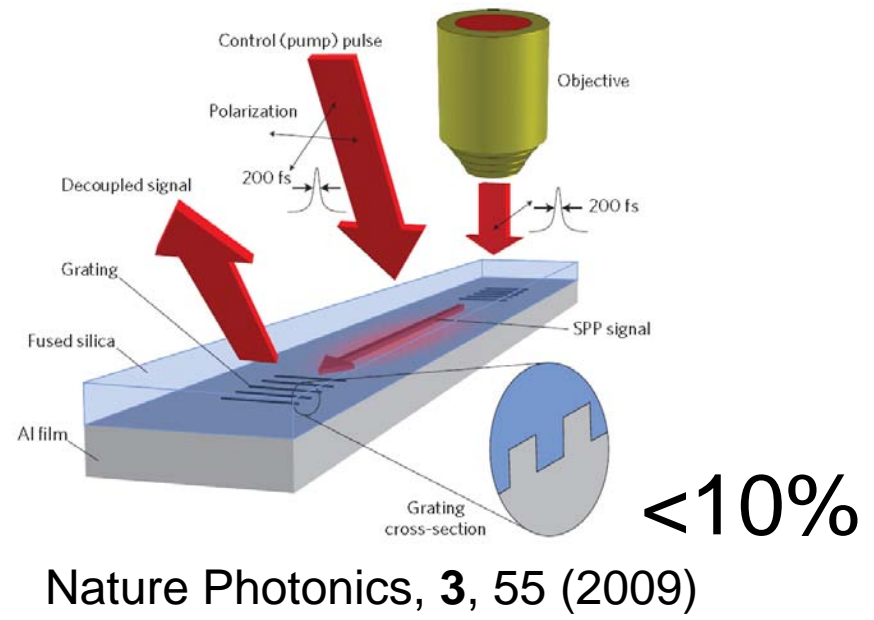
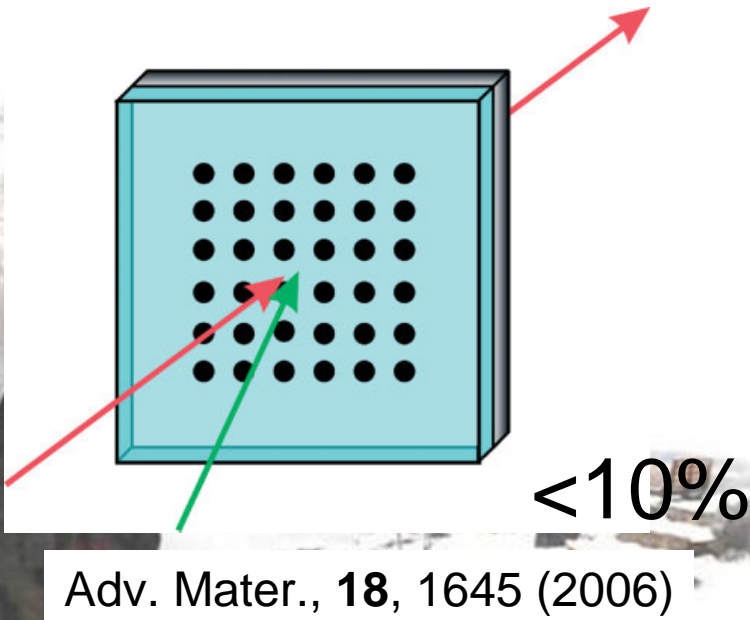
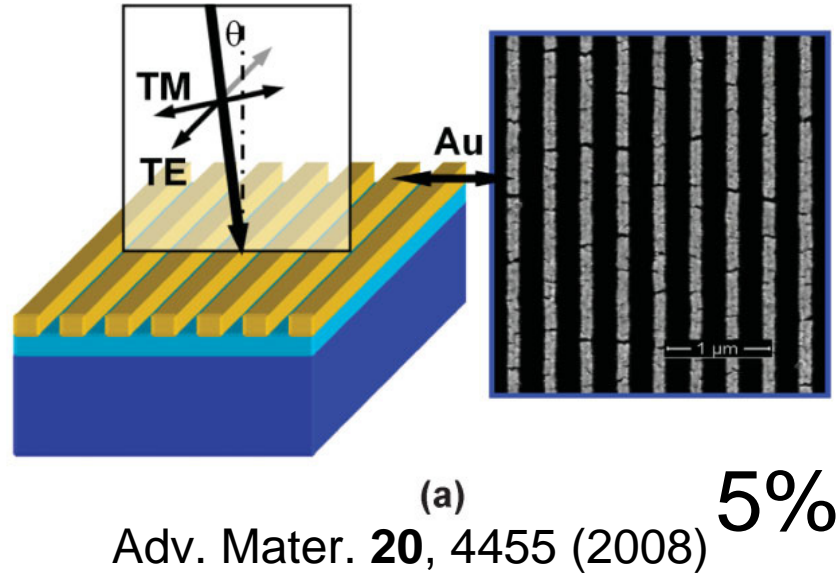
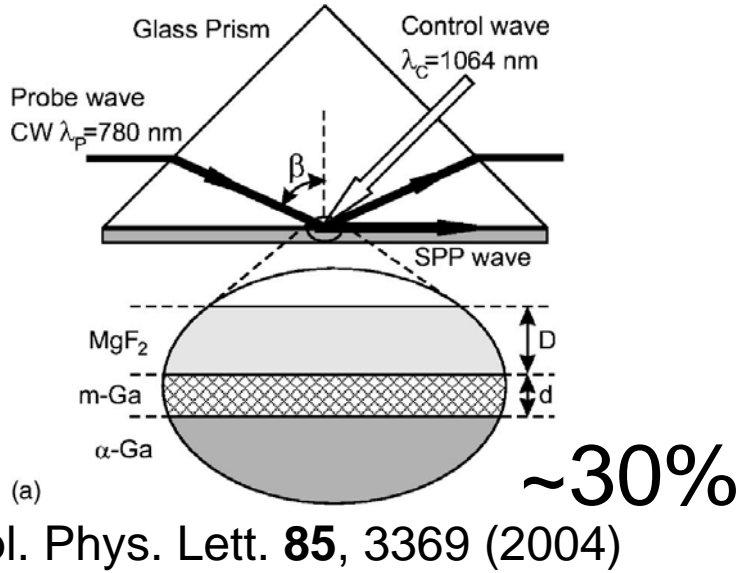
主要内容

- 背景介绍
- 表面等离激元光子器件的设计
- 表面等离激元全光调制
- 小结

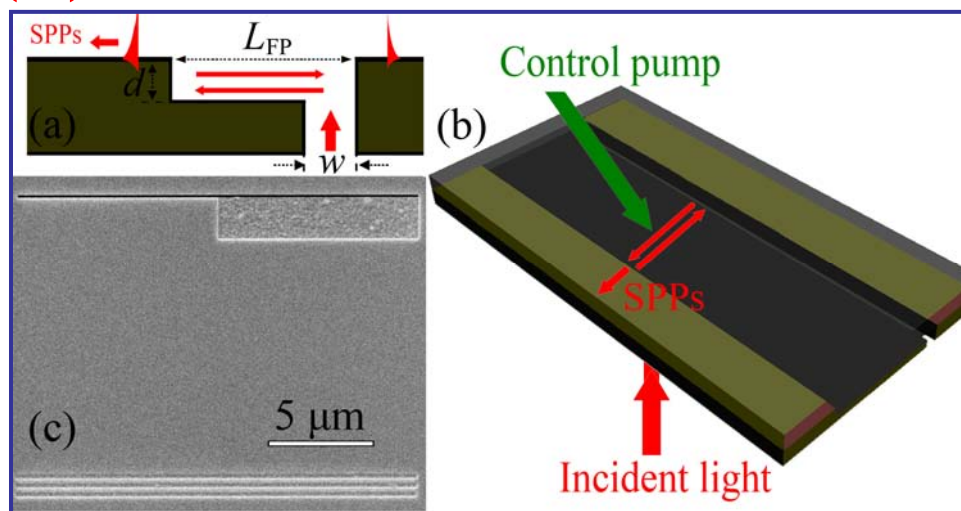


表面等离子激元全光调制

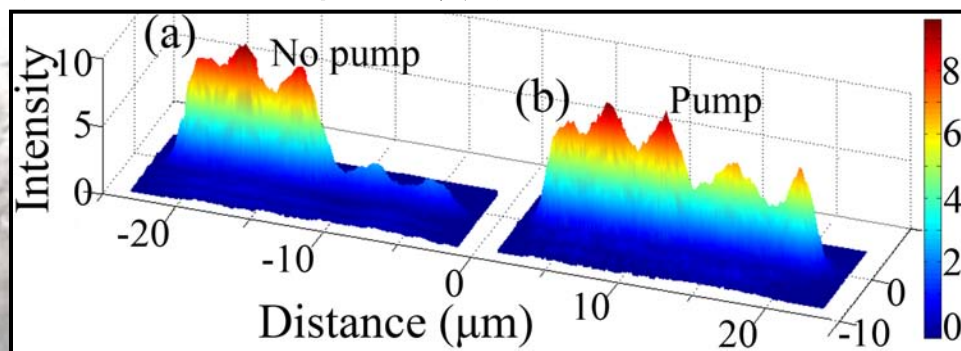
$$k_{spp} \sim \sqrt{\epsilon_d \epsilon_m / (\epsilon_d + \epsilon_m)}$$



(4) 利用光致双折射材料实现SPP 调制

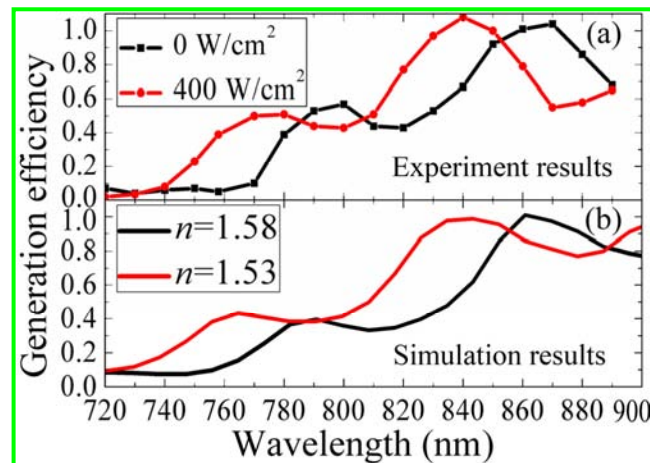


几何参数：腔长2060nm，深80nm，狭缝宽100nm，聚合物膜厚200nm

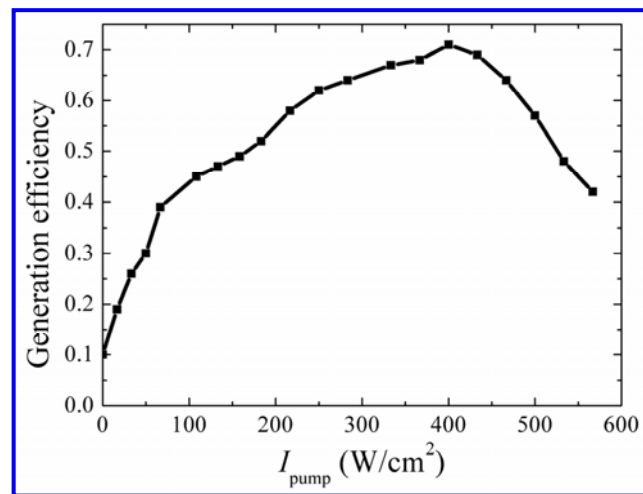


光栅处的SPP散射强度分布 $\lambda = 770 \text{ nm}$

目前尺寸最小，调制度最大



激发效率随波长变化



激发效率泵浦光强变化 $\lambda = 770 \text{ nm}$

Chen et al. (to be submitted)

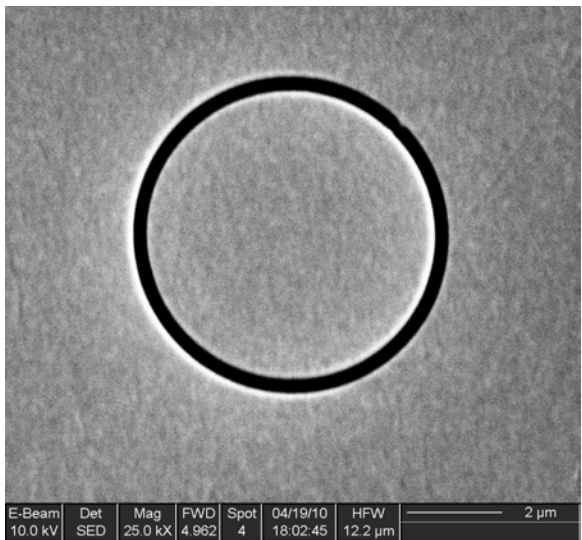
1、利用**FP**腔效应，作用距离为两倍腔长，比同尺寸下的其他结构具有更高的灵敏度。另外，激发和调制集成到一起。

2、器件横向尺寸 $2\mu\text{m}$ ，调制度 $\sim 60\%$ ；相位调制 1.4π 。

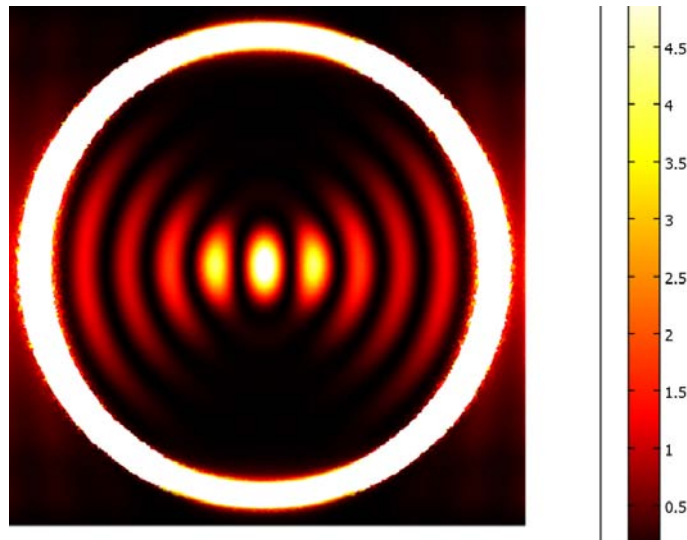


北京大学
PEKING UNIVERSITY

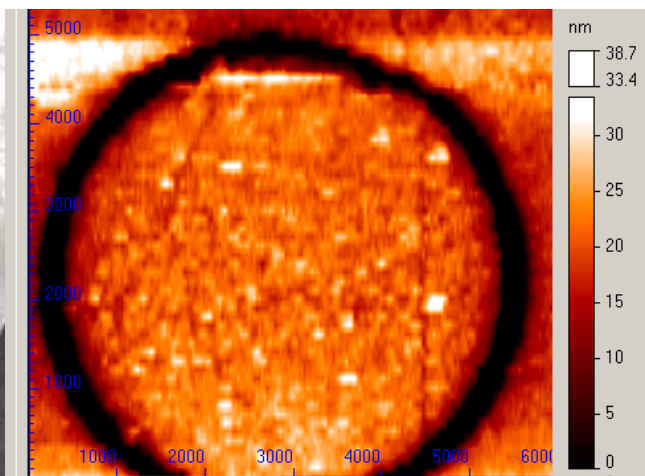
(5) SPP聚焦 (三维模型)



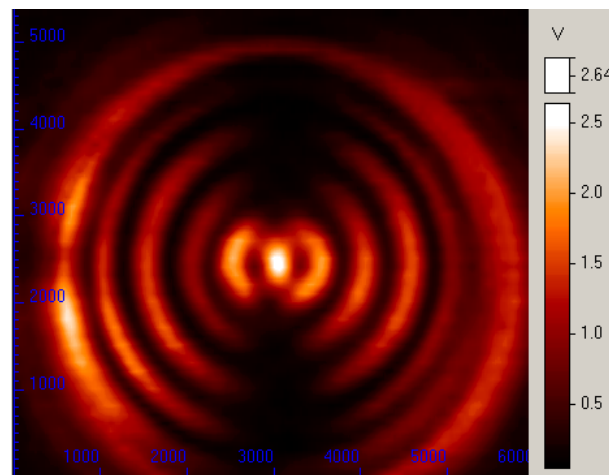
圆环SEM 图



模拟结果



近场形貌图



电场水平分量实验结果

主要内容

- 背景介绍
- 表面等离激元光子器件的设计
- 表面等离激元全光调制
- 小结



小 结

- 非对称结构LRSPS同时具有亚波长束缚和长的传播距离，比基于其他波导的环形谐振腔具有更好的性能
- 利用370nm宽的非对称纳米单缝在830nm波长处实现了高效率的SPP的单向发射
- 利用CWs对总场的调制，基于对称纳米狭缝实现了不同波长SPP的分束
- 基于非对称单缝，利用偶氮实现了对SPP激发的全光控制，目前尺寸最小，调制度最大



请批评指正，谢谢！



北京大学
PEKING UNIVERSITY