



北京大学
PEKING UNIVERSITY



2011年COMSOL中国区用户年会

非对称结构中表面等离子激元的 传输操控

指导老师：李智 龚旗煌

报告人：陈建军

2011年10月18日

北京大学物理学院

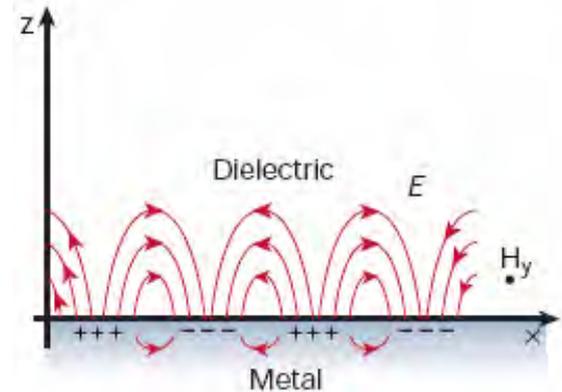
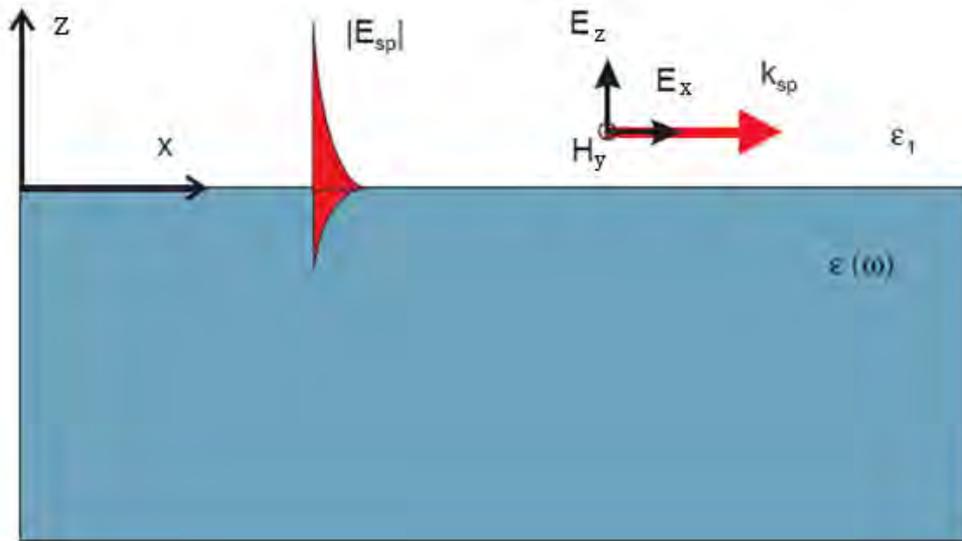
北京邮电大学理学院

主要内容

- 背景介绍
- 非对称单缝中SPP的全光调制
- 单向激发、分束及宽带单向激发
- 基于耦合腔效应高分辨的SPP器件
- 总结

一、背景介绍

表面等离子激元（**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。



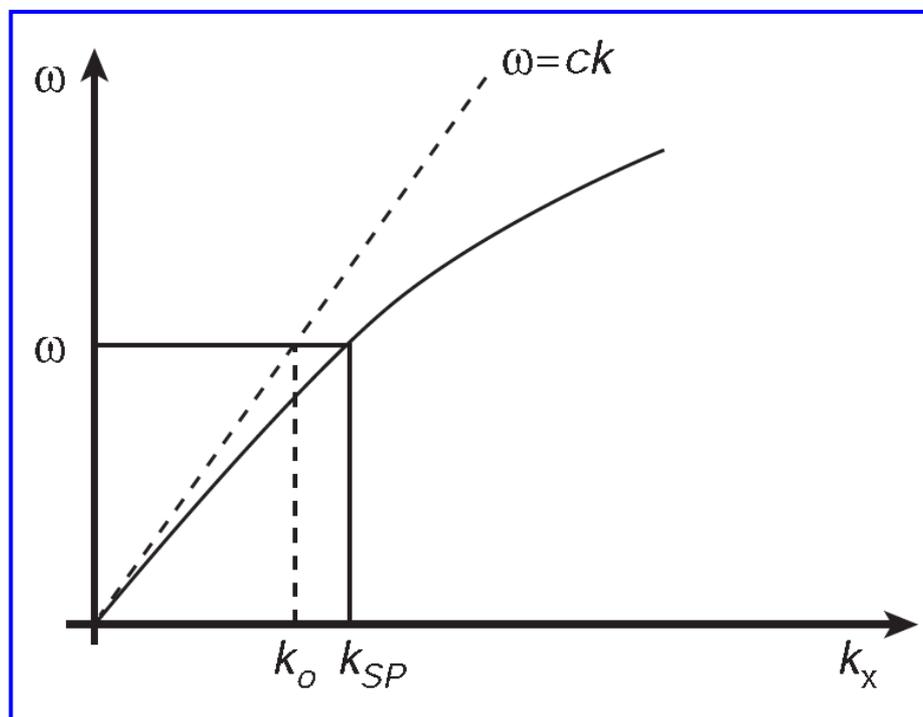
金属和介质里的磁场分布为：

$$\begin{cases} H_{y1} = A \exp(-k_{z1}z) \exp(i\beta x - i\omega t) \\ H_{y2} = B \exp(k_{z2}z) \exp(i\beta x - i\omega t) \end{cases}$$

其中
$$\begin{cases} k_{z1} = \sqrt{\beta^2 - \epsilon_1 \omega^2 / c^2} \\ k_{z2} = -\sqrt{\beta^2 - \epsilon(\omega) \omega^2 / c^2} \end{cases}$$

由Maxwell方程和边界条件可得SPPs的波矢：

$$k_{spp} = \beta = \frac{\omega}{c} \left[\frac{\epsilon_1 \epsilon(\omega)}{\epsilon_1 + \epsilon(\omega)} \right]^{1/2} = k_{spp}^R + i k_{spp}^I$$

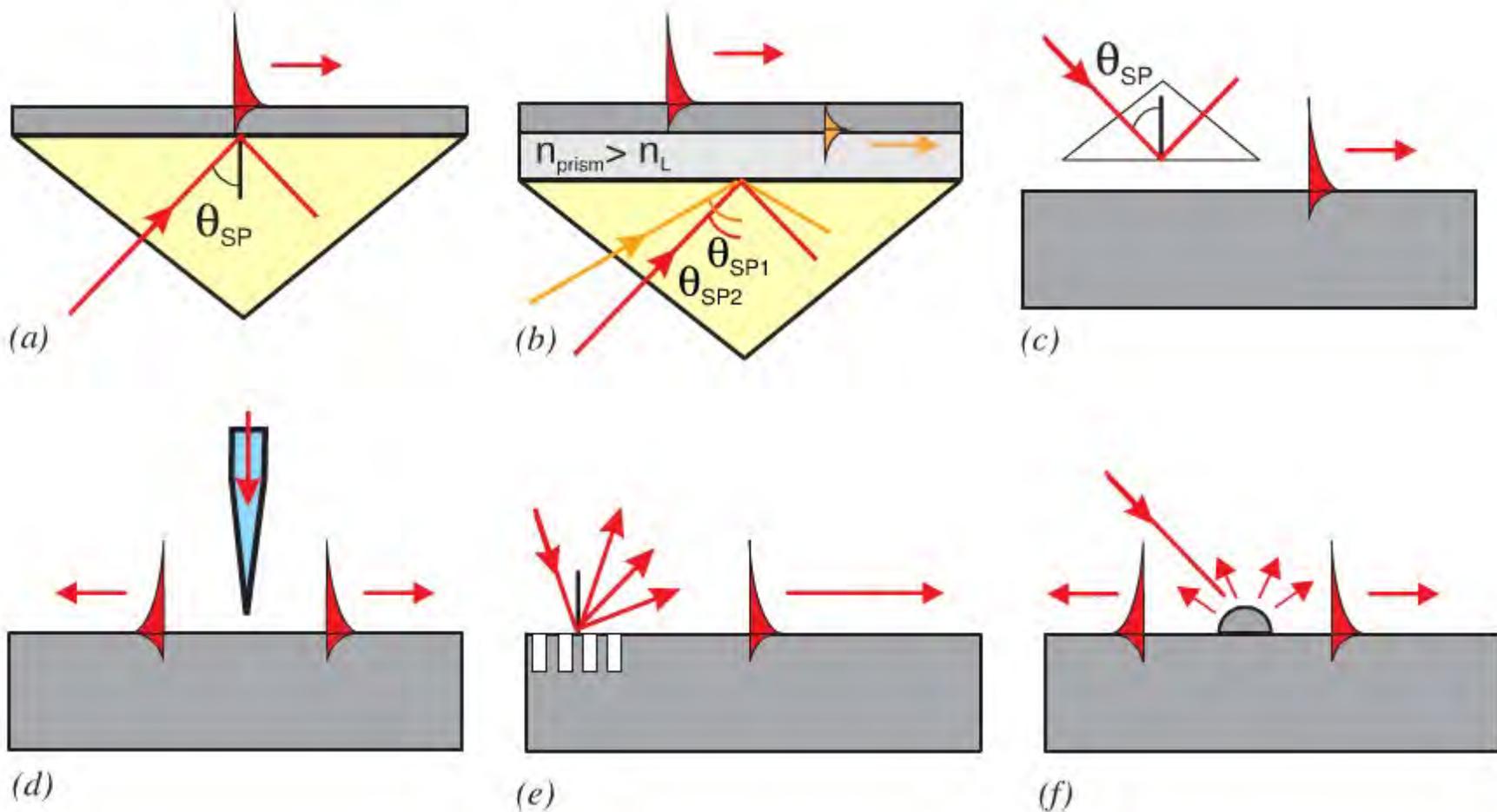


$$k_{spp} > k_0$$

动量不匹配

SPPs色散曲线

激发结构 → 动量匹配

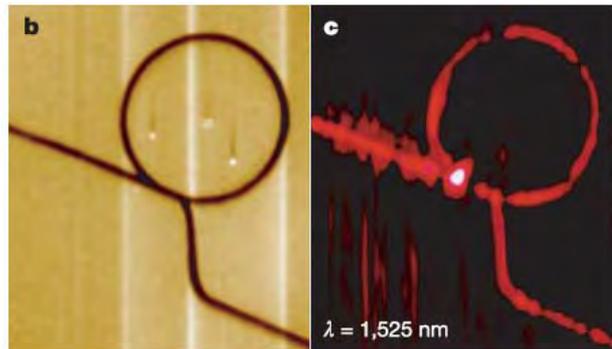


SPPs激发装置的示意图

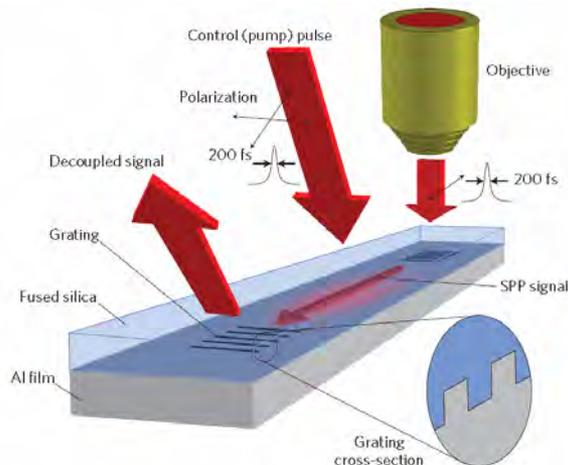
(a) Kretschmann 结构; (b) 双层Kretschmann结构; (c) Otto结构;
(d) 利用NSOM探针激发; (e) 光栅衍射激发; (f) 粗糙表面的激发

表面等离子激元 (SPP):

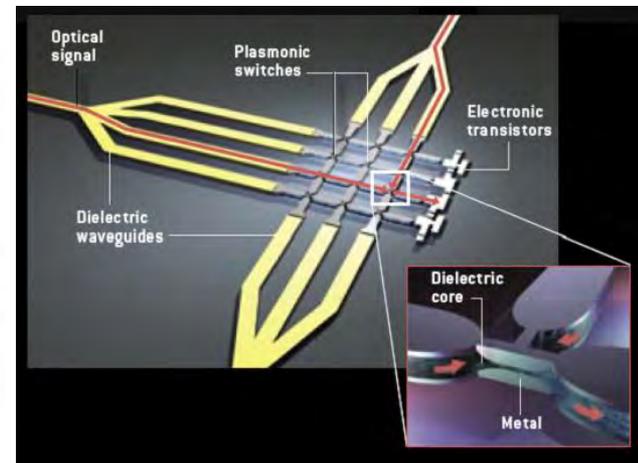
电磁场能量束缚很好，可突破衍射极限。因此在**纳米集成光学**中具有重要应用，是小尺度下电光器件结合的桥梁。



Subwavelength waveguide



SPP modulation



A FASTER CHIP

Nature **440**, 508 (2006) Nat. Photonics, **3**, 55 (2009)

Scientific American, **296**, 56-63 (2007)

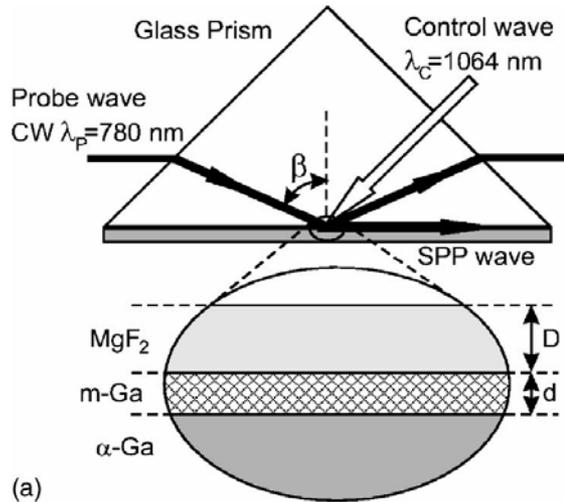
对称结构在一定程度上限制了SPP的性能和应用

非对称结构：实现对SPP传输的操控

主要内容

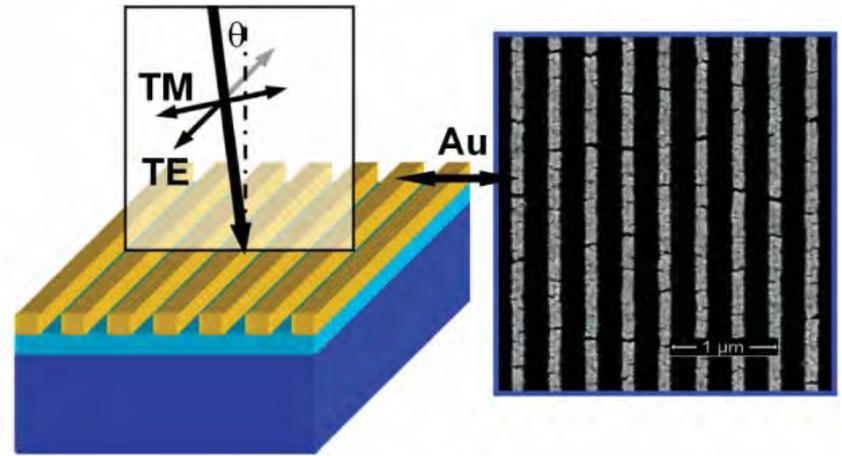
- 背景介绍
- 非对称单缝中SPP的全光调制
- 单向激发、分束及宽带单向激发
- 基于耦合腔效应高分辨的SPP器件
- 总结

二、SPP全光调制—背景



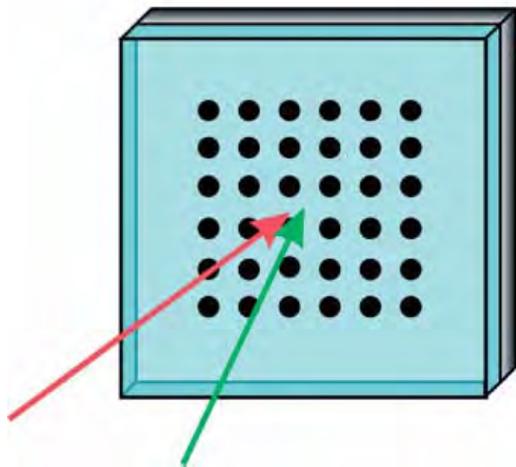
(a) Appl. Phys. Lett. **85**, 3369 (2004)

~30%



(a) Adv. Mater. **20**, 4455 (2008)

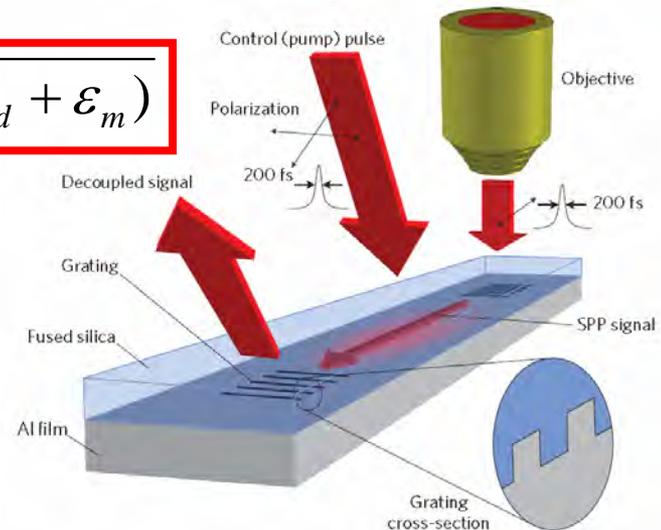
~5%



Adv. Mater., **18**, 1645 (2006)

<10%

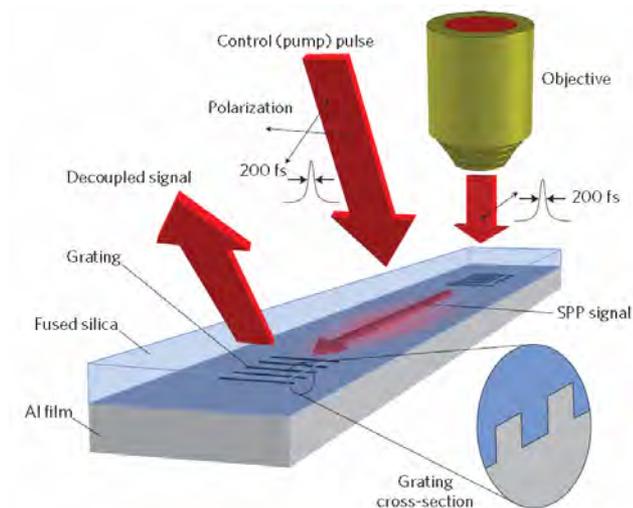
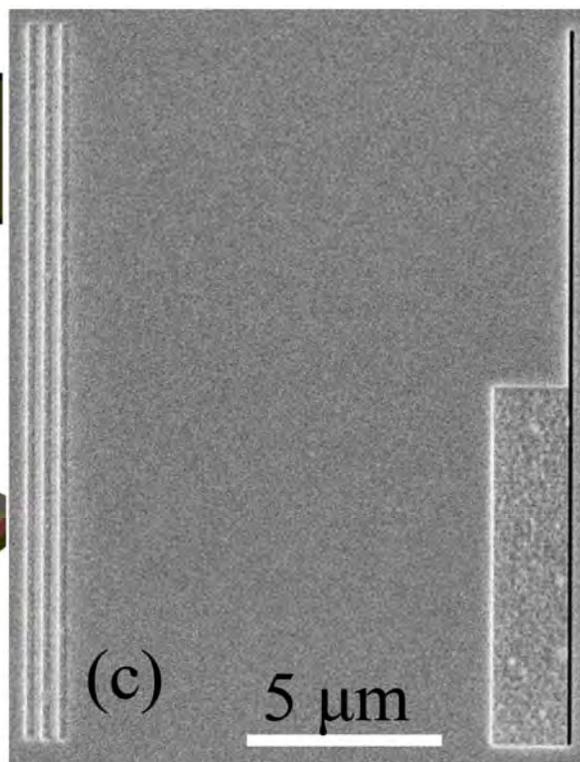
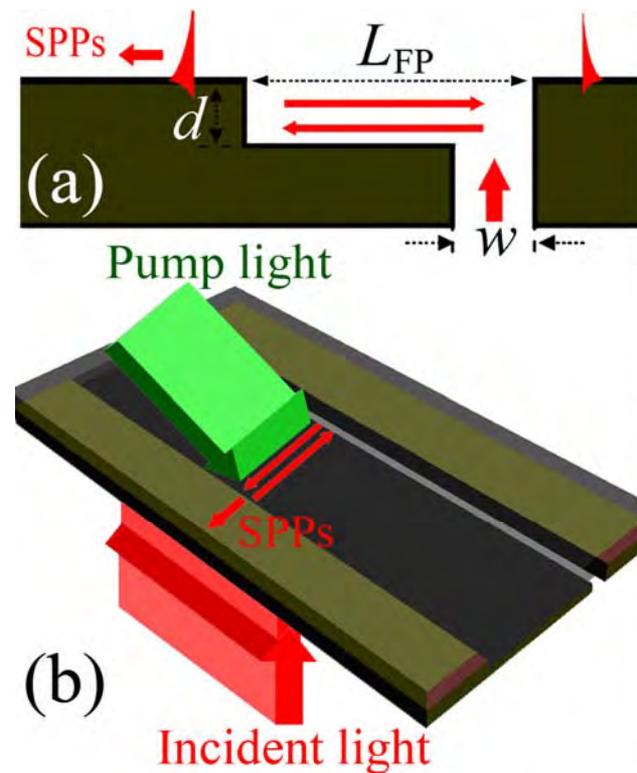
$$k_{spp} \sim \sqrt{\epsilon_d \epsilon_m / (\epsilon_d + \epsilon_m)}$$



Nature Photonics, **3**, 55 (2009)

10%

在非对称单缝中利用光致双折射材料实现SPP调制

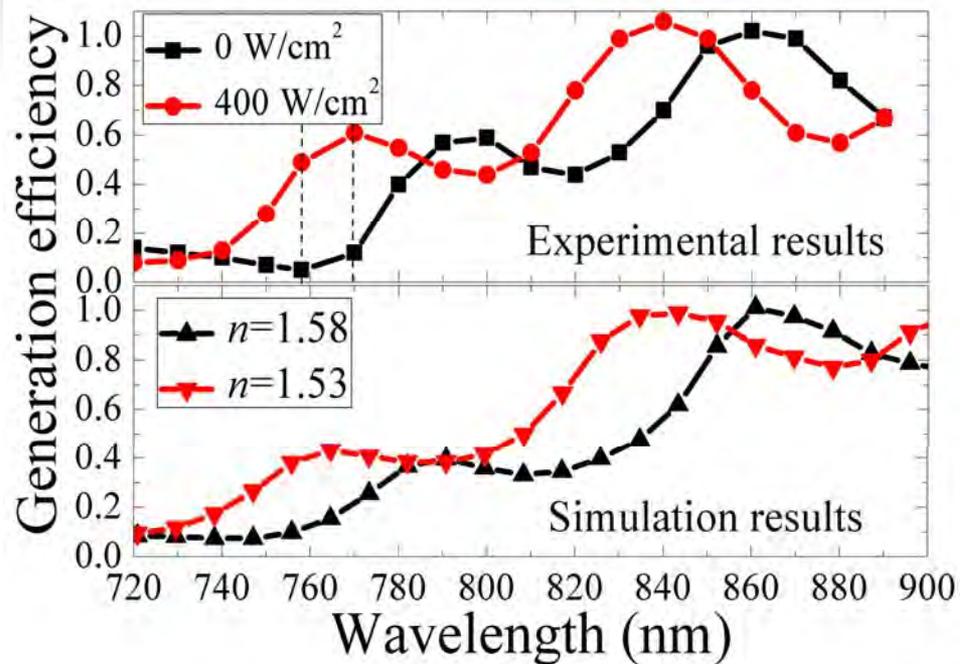


Nature Photonics, 3, 55 (2009)

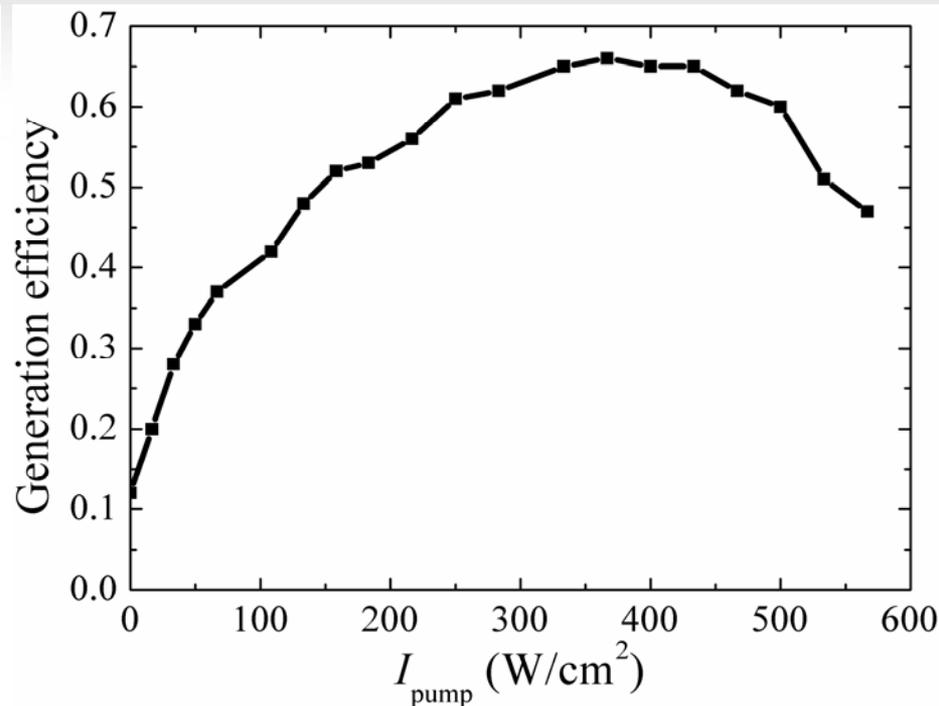
$$\Phi = 2k_{spp}L_{FP} + \varphi$$

1. 腔效应，对折射率改变更敏感
2. 激发和调制集成在一起
3. 易于在芯片上集成

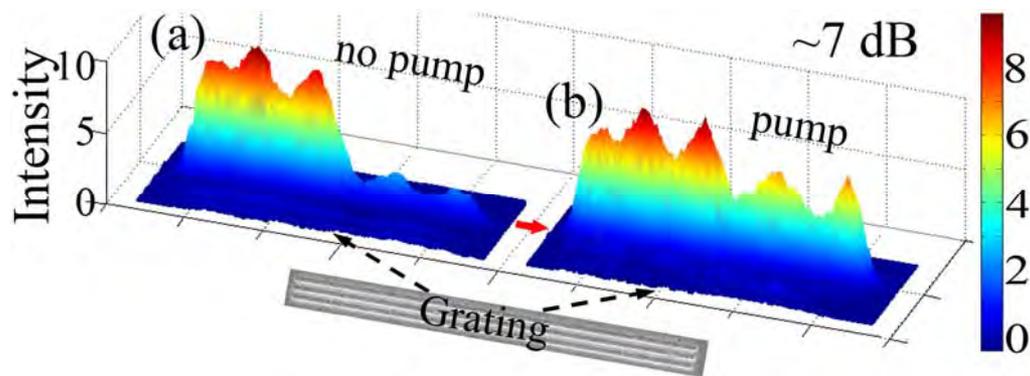
Chen et al. Nano Letters 11, 2933–2937 (2011).



激发效率随波长变化(实验和模拟曲线)



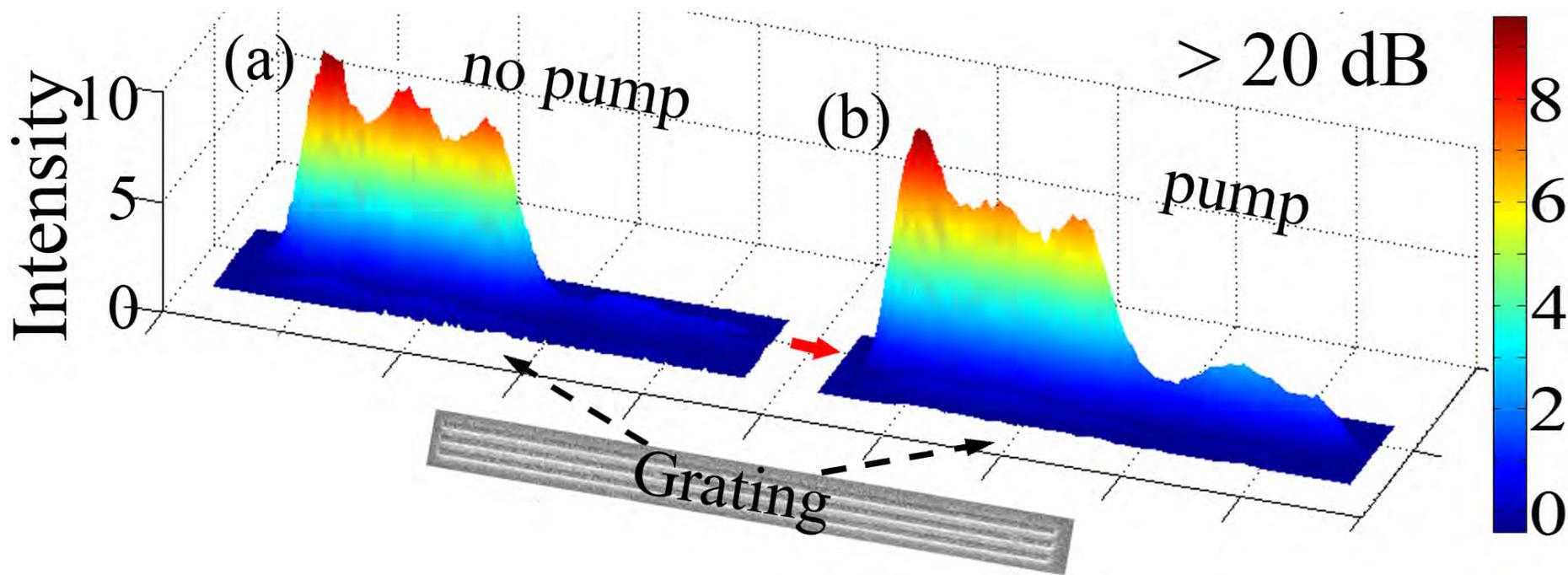
激发效率随泵浦光强变化曲线



$$\lambda = 770 \text{ nm}$$

光栅处SPPs的散射光强分布
调制深度为52%

上面的结构参数的设计是为了得到最大的绝对调制深度，为了得到更高的开关比，可使SPPs完全相干相消。



光栅处SPPs散射光强分布， $\lambda = 780 \text{ nm}$, > 20 dB

小 结

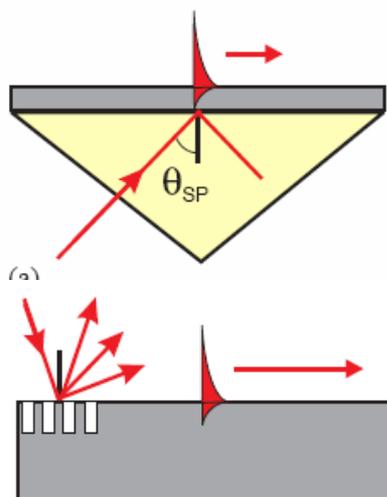
- 1、利用FP腔效应，SPPs对折射率的改变更敏感。
- 2、激发和调制集成到一起了，器件更紧凑。
- 3、在金属表面实现SPPs全光控制，易于和其他器件集成。
- 4、实验上，在器件横向尺寸为2 μm 时，实现了 >20 dB的开关比，相位调制 $> \pi$ 。

主要内容

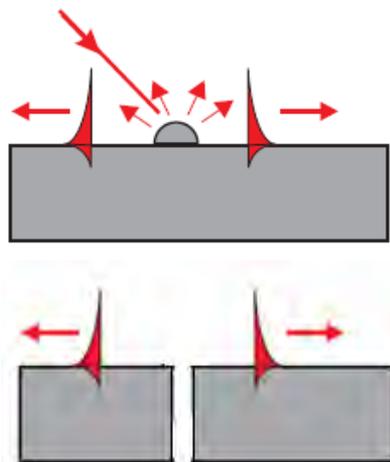
- 背景介绍
- 非对称单缝中SPP的全光调制
- 单向激发、分束及宽带单向激发
- 基于耦合腔效应高分辨的SPP器件
- 总结

三、单向激发、分束及宽带单向激发—背景

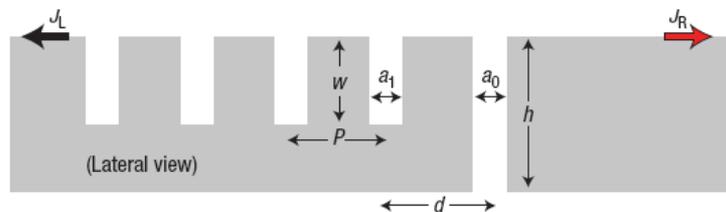
大结构



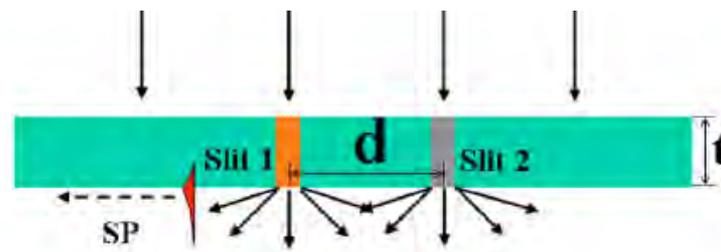
纳米结构



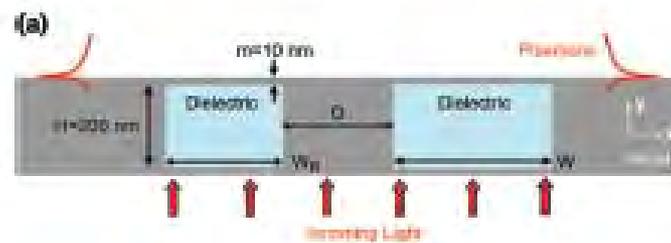
引入非对称系统



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

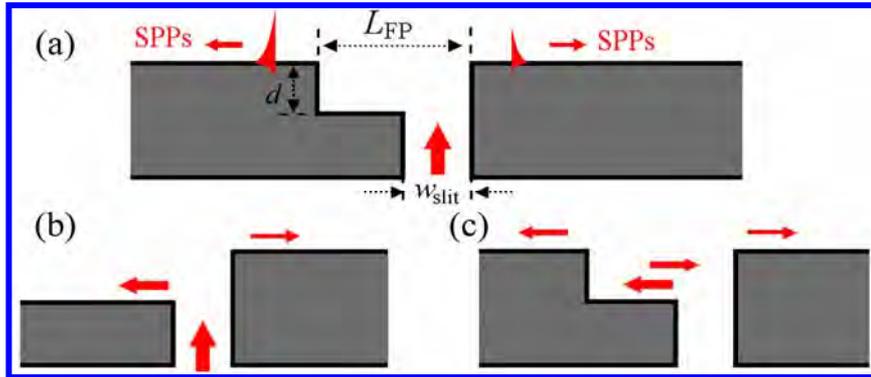


Appl. Phys. Lett. **92**, 101501 (2008)

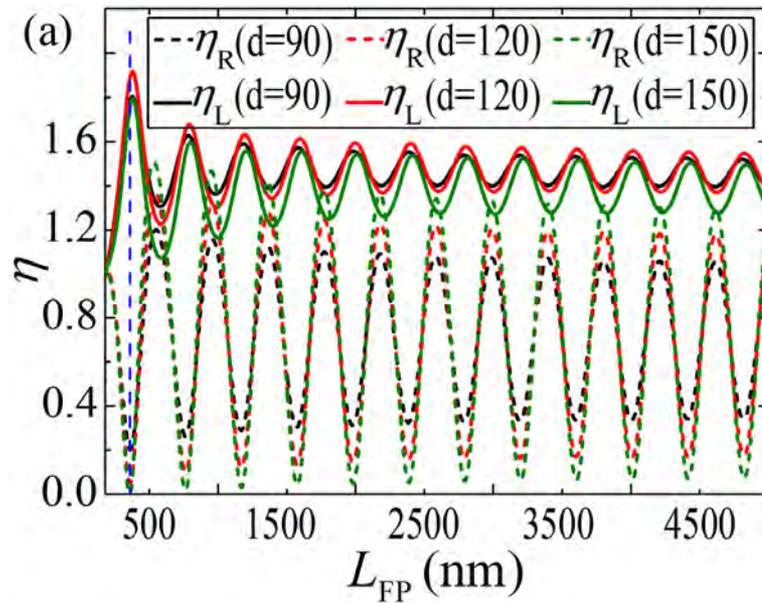


Nano Lett. **9**, 327 (2009)

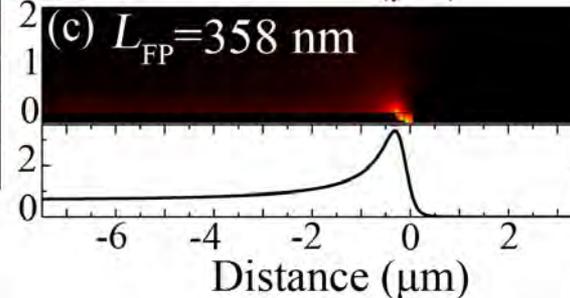
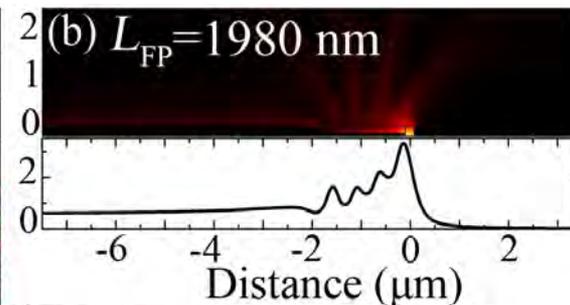
3.1 利用单个非对称纳米狭缝实现SPP单向激发



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

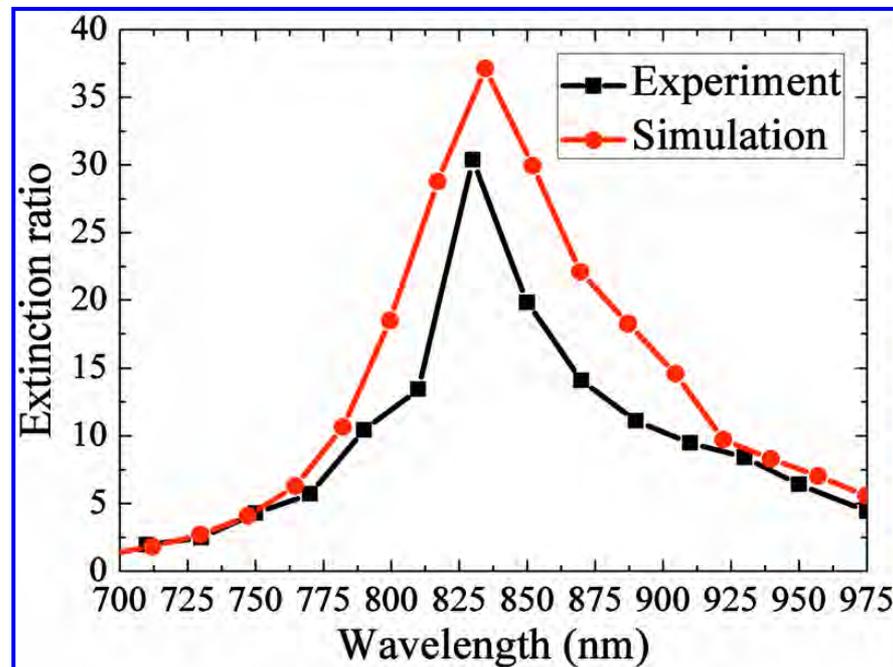
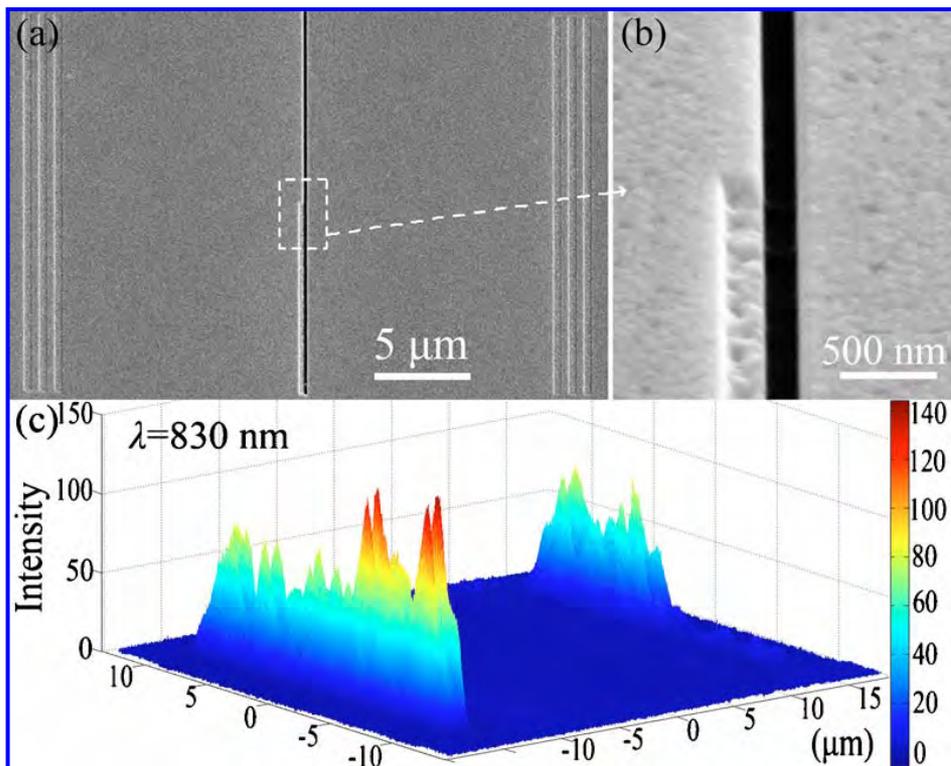


SPP激发效率随腔长变化



典型腔长下能流分布

实验验证

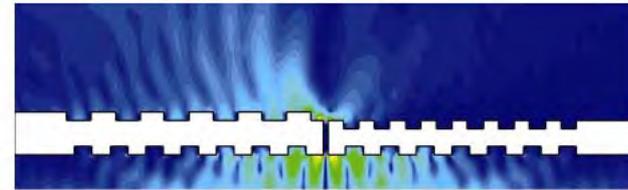
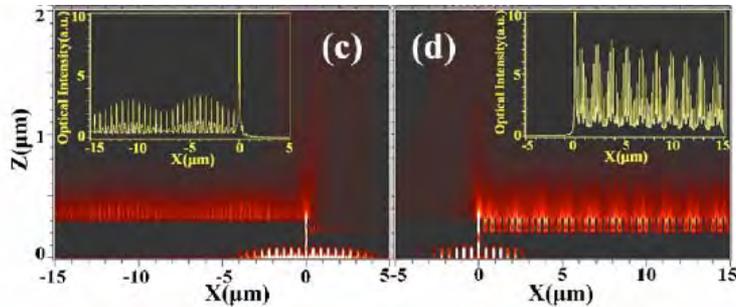
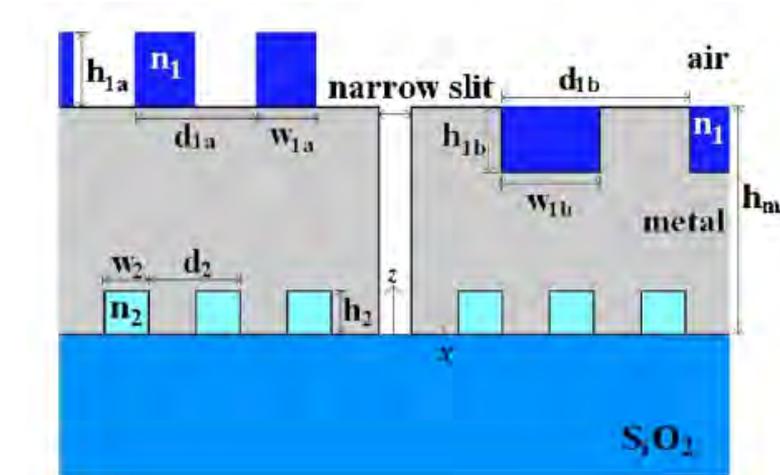


样品SEM图和CCD采集到的两边光栅处的SPP散射强度

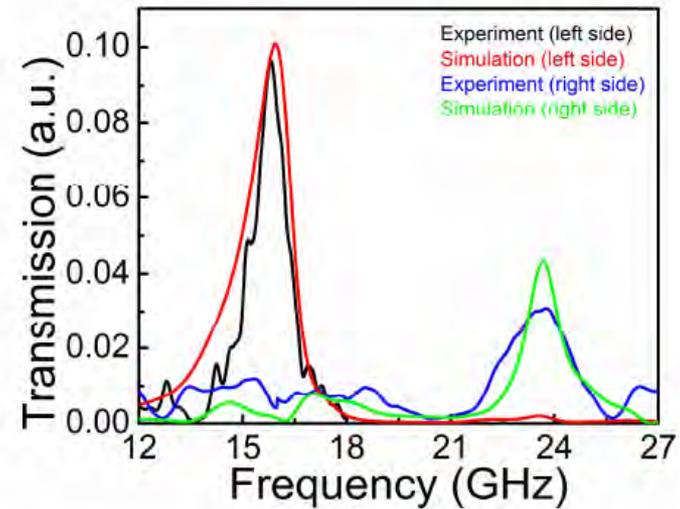
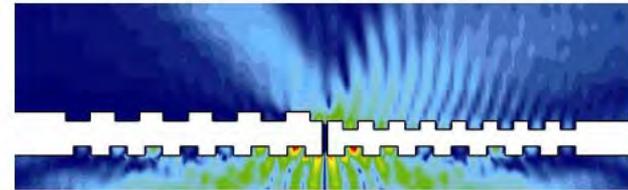
左右两边SPPs强度比值随波长变化关系

非对称单缝横向尺度**370nm**，SPP消光比约30，效率是对称单缝的1.8倍，是目前**最小的单向SPP源**。

3. 2 SPP分束



(a)

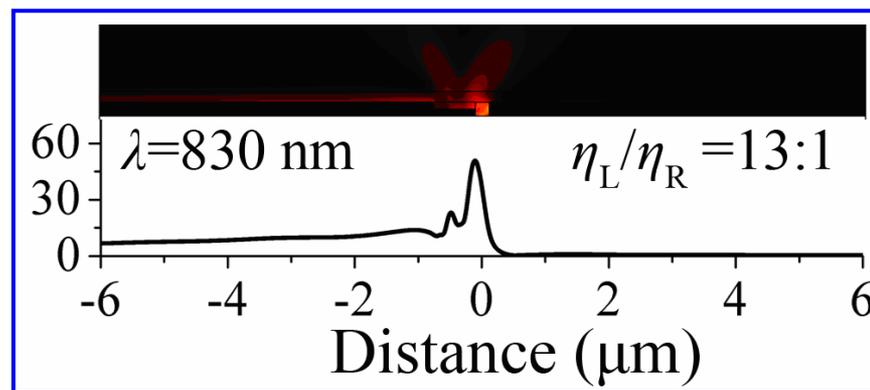
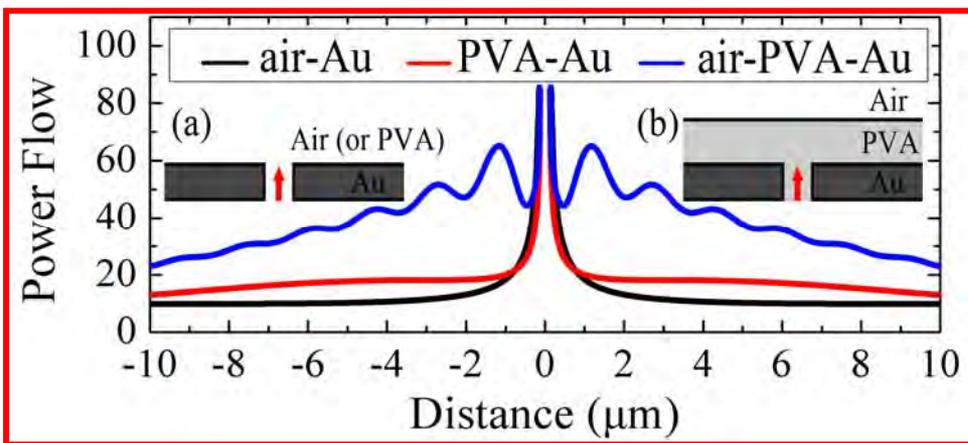
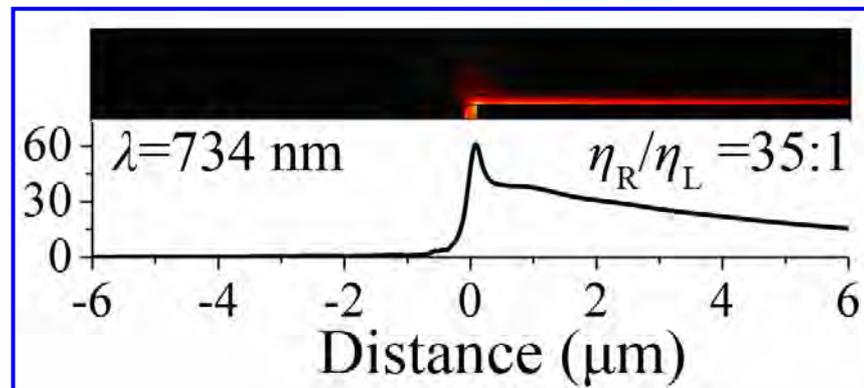
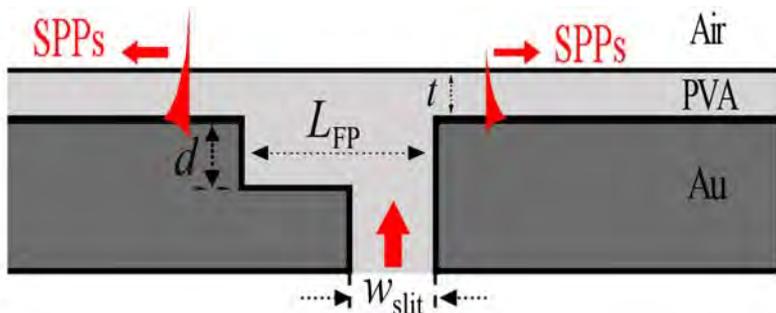


微波波段

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

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

利用准柱面波对总场的调制实现SPP分束



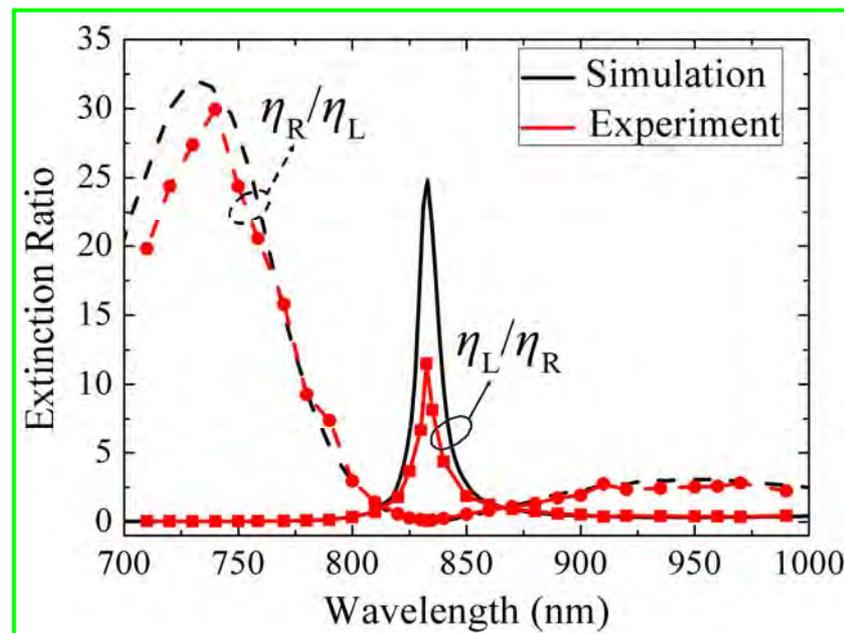
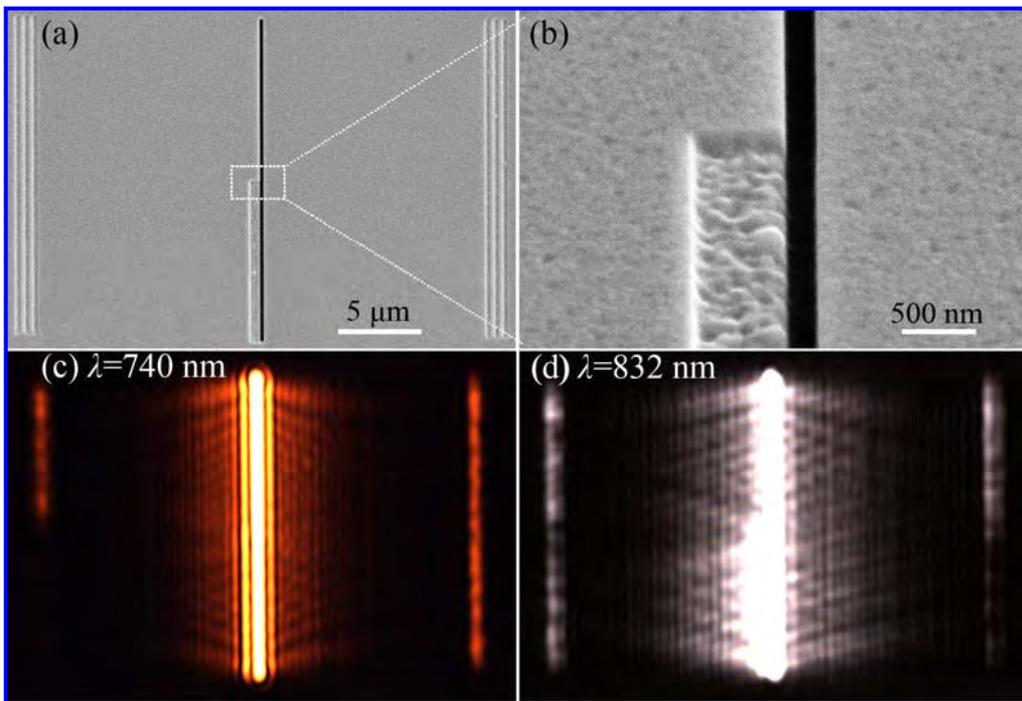
典型波长下能流分布

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

SPPs项

准柱面波项

实验验证

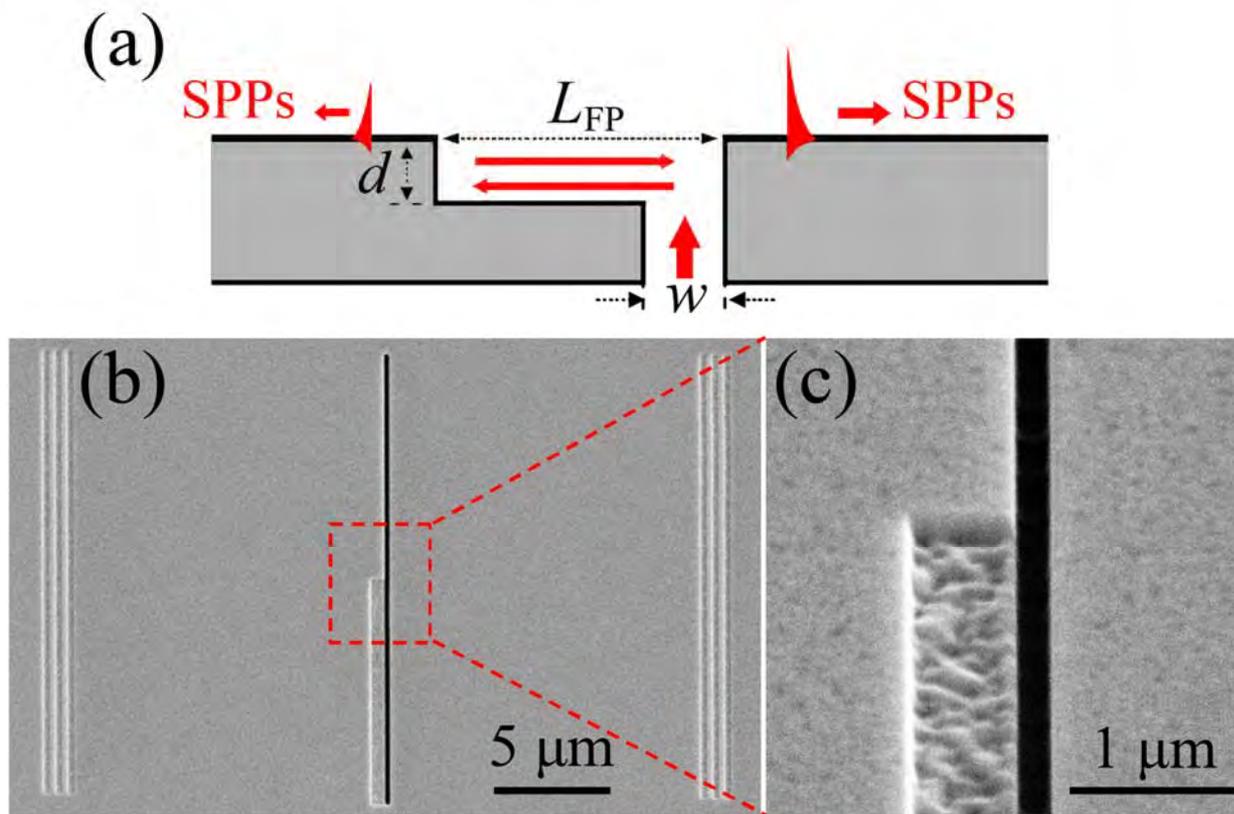


样品SEM图和实验采集的CCD图

两边SPP强度比值随波长变化

非对称单缝横向尺度**800nm**，波长740 nm和830 nm分束，消光比分别为30和12。首次发现**准柱面波对总场的调制效应**。

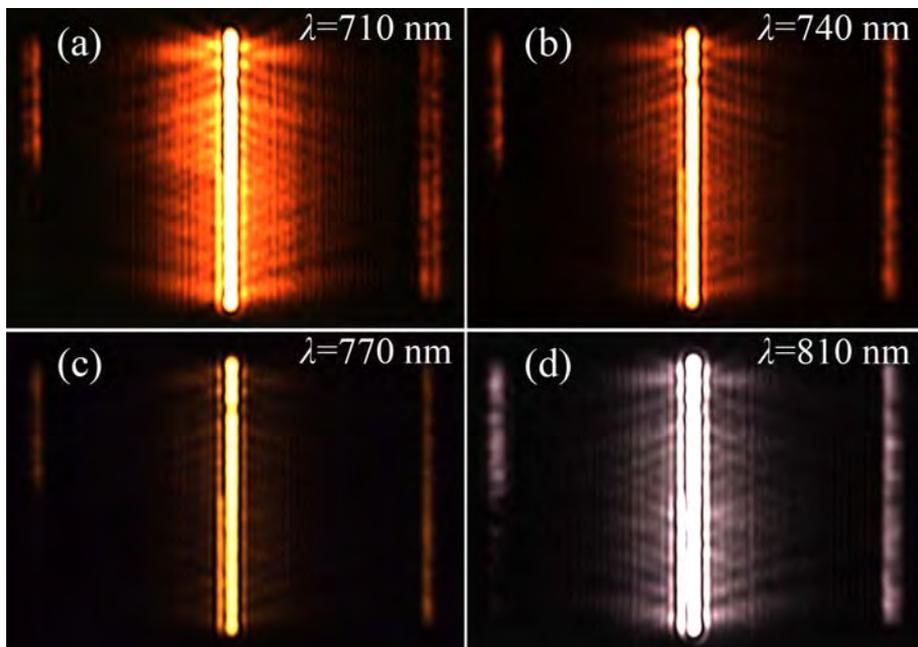
3.3 宽带单向SPP激发



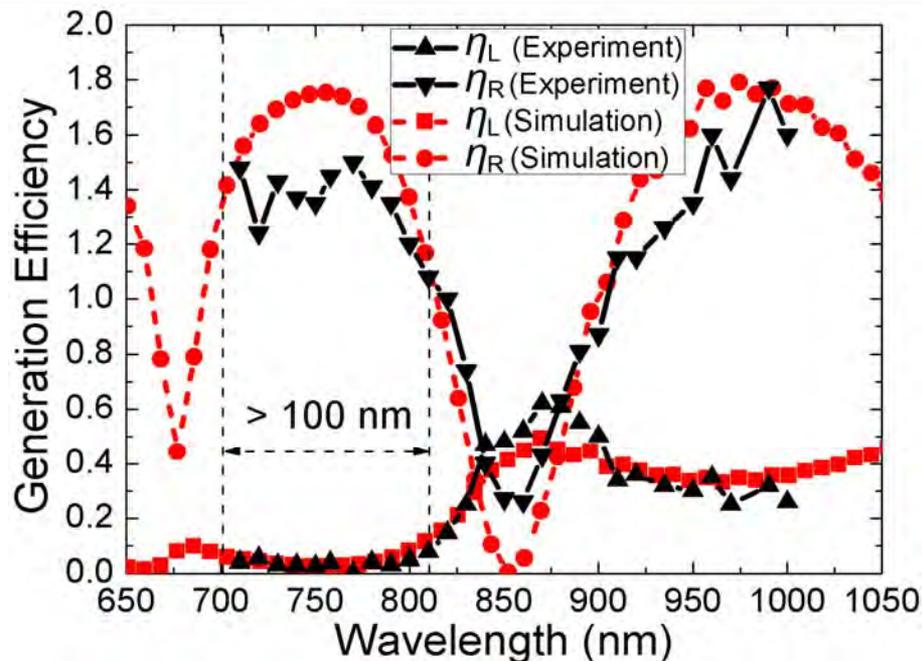
深槽非对称纳米单缝结构和样品SEM图

缝宽:190 nm, 槽深:140 nm, 腔长:865 nm, 折射率:1.5

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

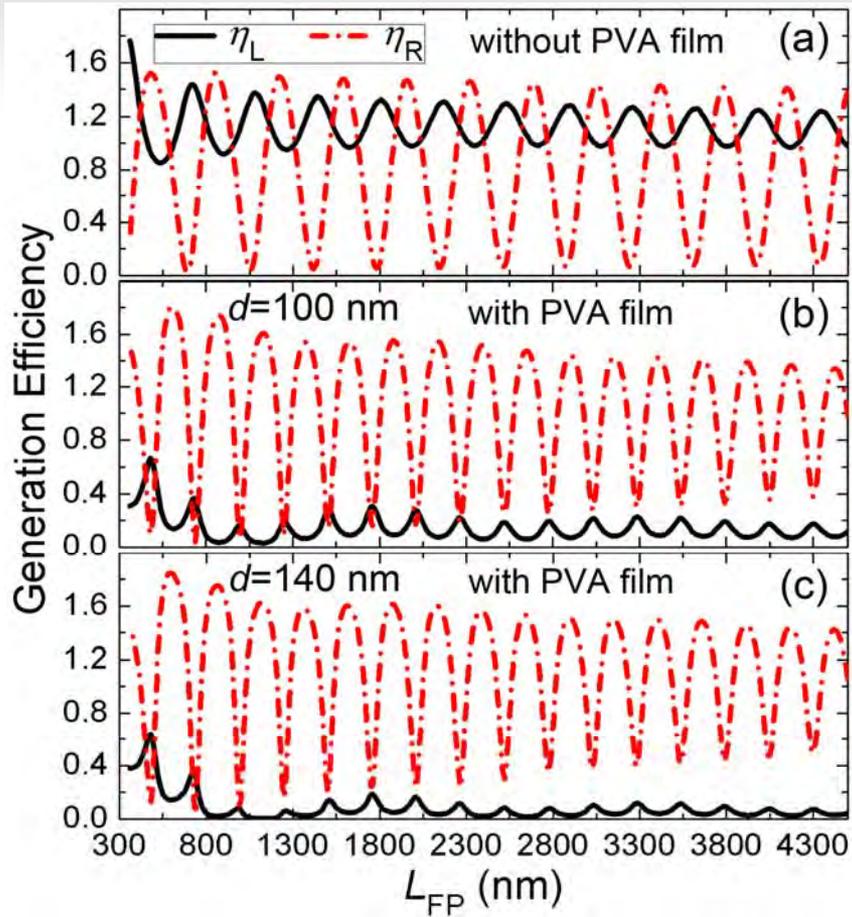


不同入射波长下实验采集的CCD图



激发效率随波长的变化

非对称单缝横向尺度**865nm**，单向激发谱宽**>100 nm**，消光比**> 11 dB**。



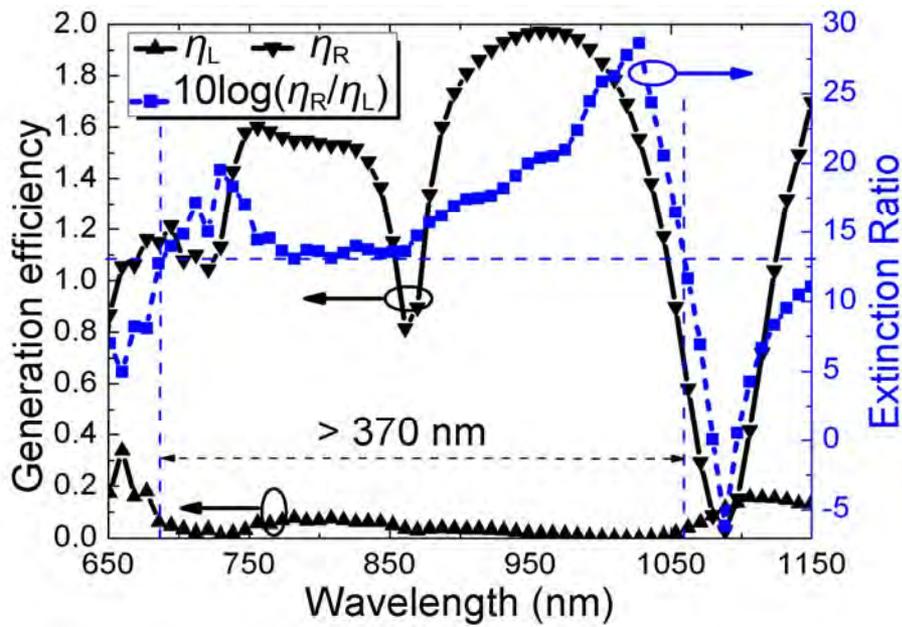
SPP激发效率随腔长变化

非对称单缝横向尺度**865nm**，

单向激发谱宽**>370 nm**，消光

比**> 13 dB**。

槽深: 150 nm
折射率: 2.0



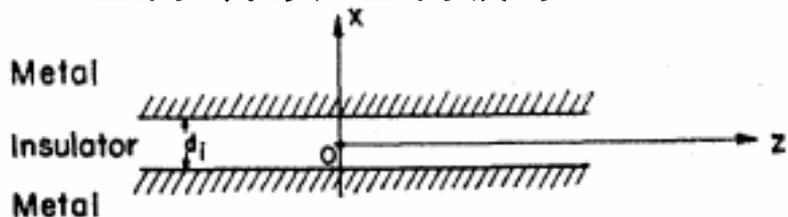
激发效率随波长的变化

主要内容

- 背景介绍
- 非对称单缝中SPP的全光调制
- 单向激发、分束及宽带单向激发
- 基于耦合腔效应高分辨的SPP器件
- 总结

四、基于耦合腔效应高分辨的SPP器件—背景

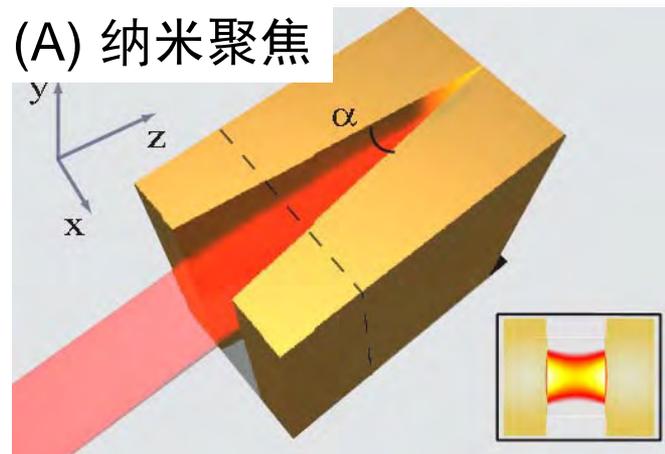
金属-介质-金属波导 (MIM)



- 1、具有强束缚，可到深亚波长尺寸
- 2、相对较长的传播距离： $\sim 10 \mu\text{m}$

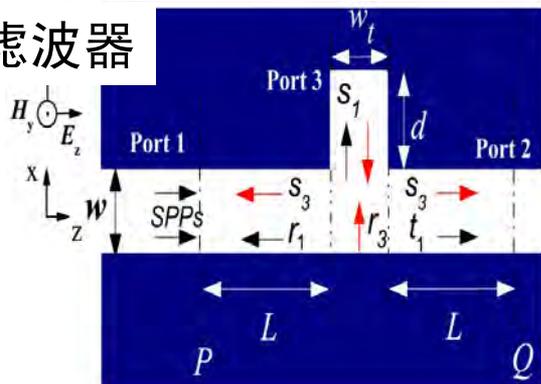
Phys. Rev. **182**, 539 (1969)

(A) 纳米聚焦



PRL **105**, 116804 (2010)

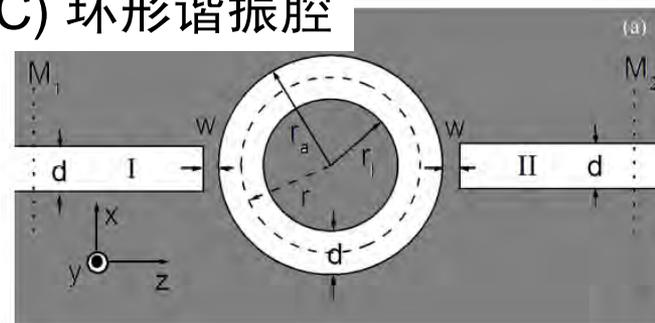
(B) 滤波器



■ Silver □ Air

Opt. Lett. **33**, 2875 (2008)

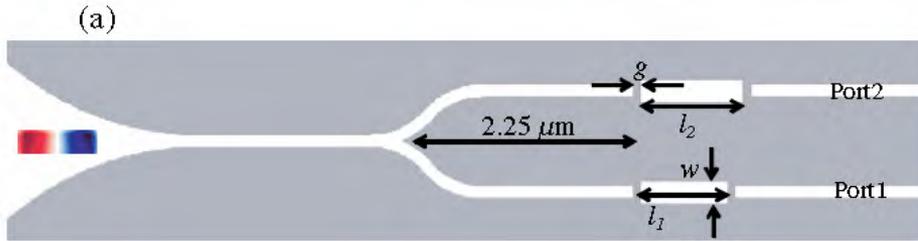
(C) 环形谐振腔



Ring resonator

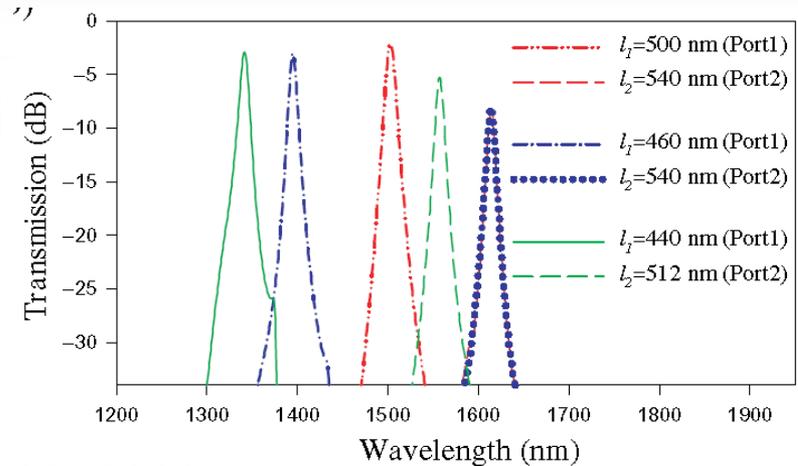
Opt. Express **17**, 24096 (2009)

背

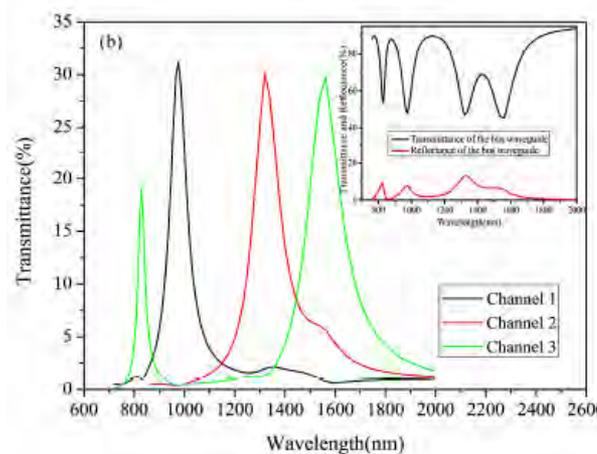
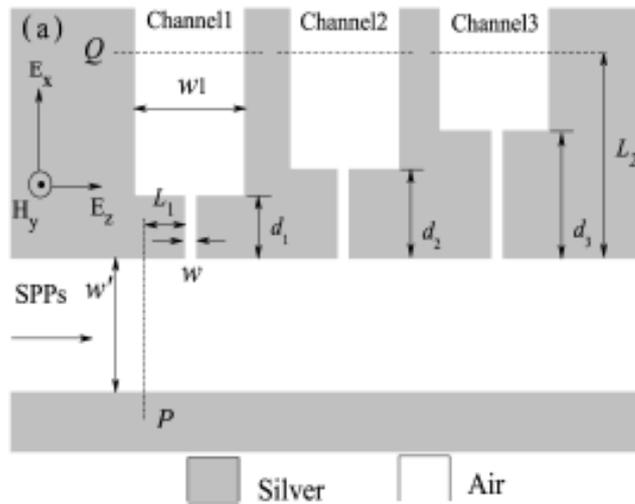


Large size

$$\Delta\lambda = 200\text{nm}$$



N. J. Phys. **11**, 103020 (2009)



$$\Delta\lambda \sim 500\text{nm}$$

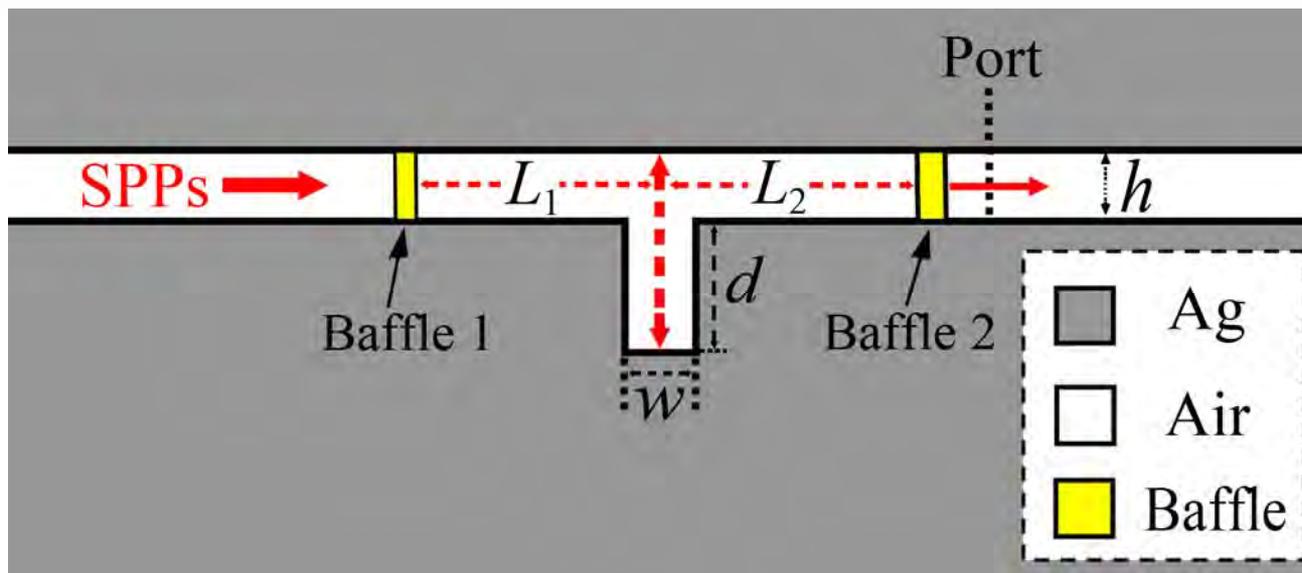
Opt. Express **17**, 24096 (2009)

FP腔的共振谱是洛伦兹线形，为了得到高的消光比，能分辨的波长间距要远远大于谱宽。 **>200 nm**

$$\Delta\lambda \gg \Delta\lambda_{\text{FWHM}}$$

波长分辨率低

4.1 耦合腔中的非对称谱

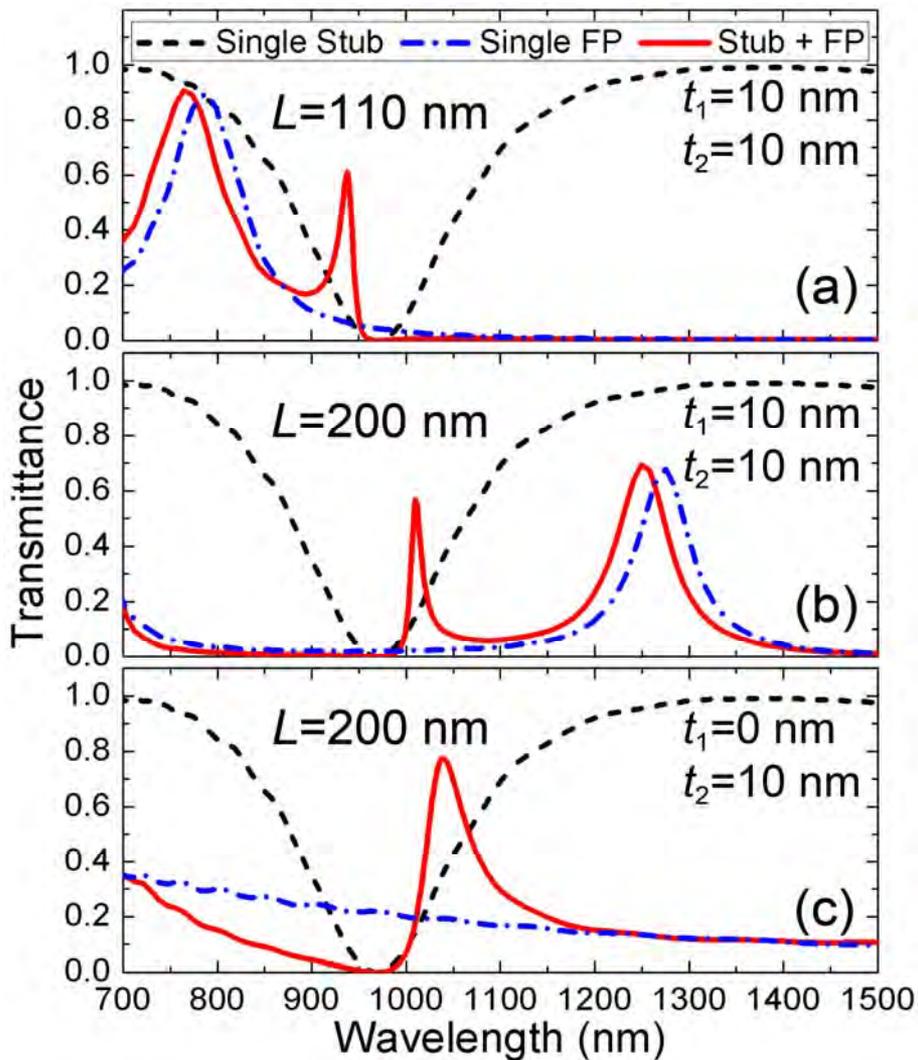


耦合腔结构示意图

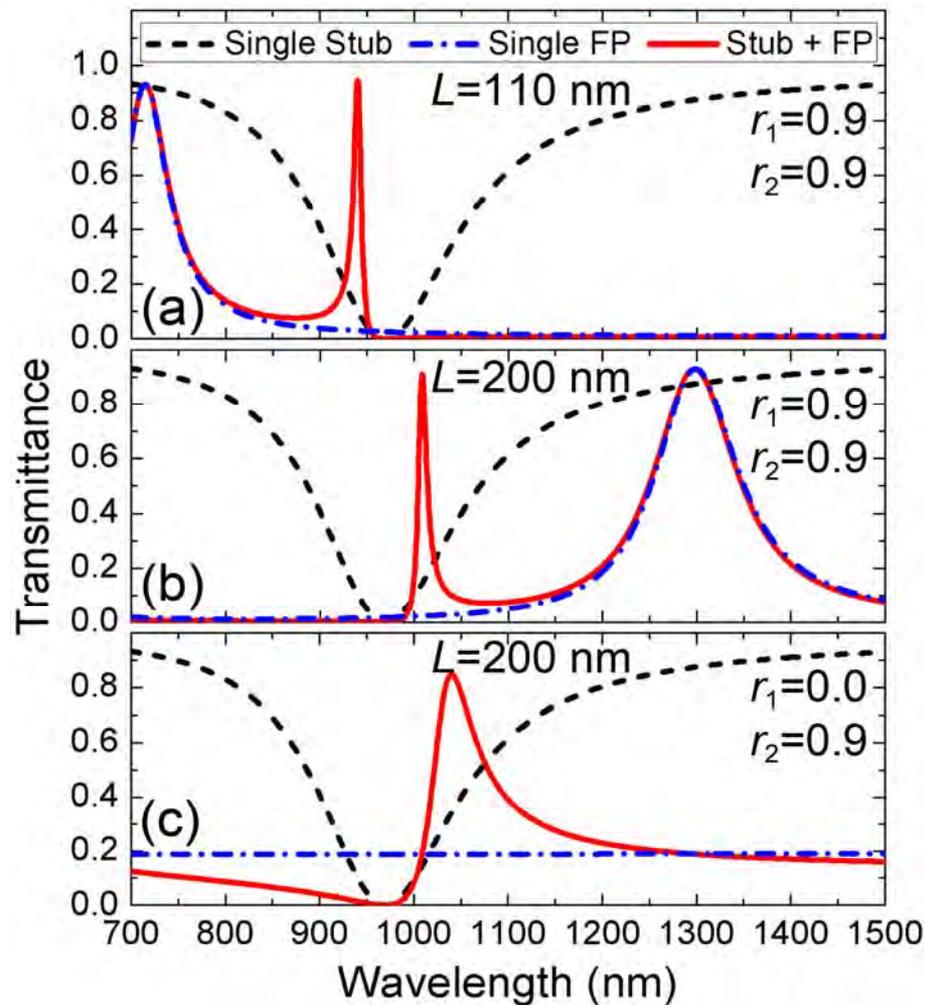
散射理论给出的解析模型:

$$t_{\text{all}} = \frac{1}{T_{\text{all},22}} = \frac{(\omega - \omega_0) \sqrt{1 - r_1^2} \sqrt{1 - r_2^2}}{(\omega - \omega_0 - i\delta) r_1 r_2 e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} + i\delta r_2 e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)} + i\delta r_1 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} - (\omega - \omega_0 + i\delta) e^{-i(\varphi_1 + \varphi_2)}}$$

有限元模拟结果和解析模型结果



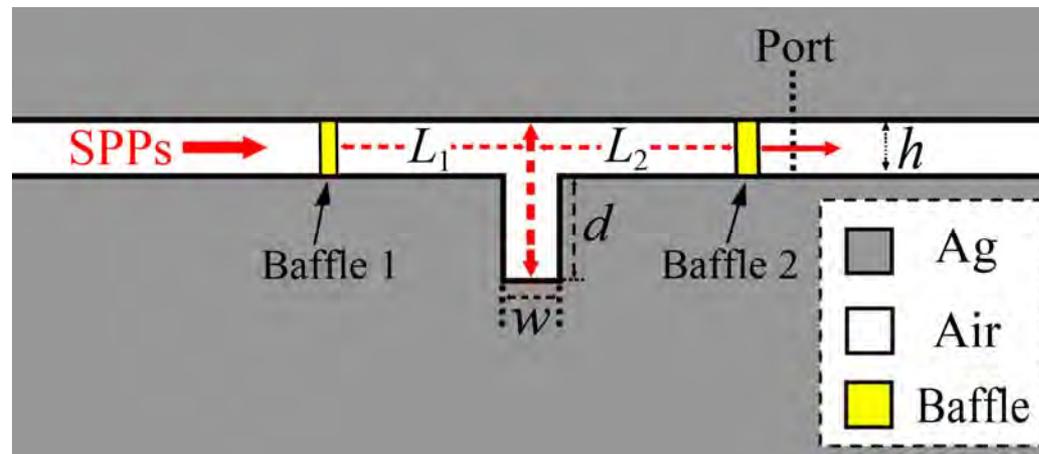
透过率随波长变化(FEM)



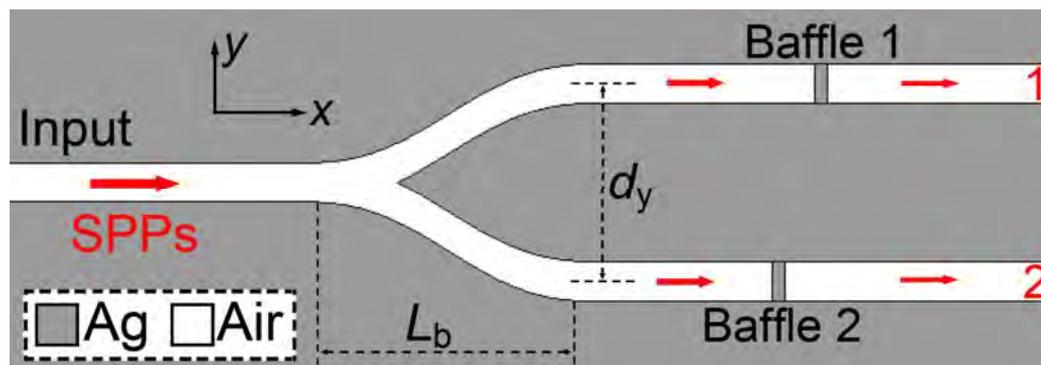
透过率随波长变化(解析模型)

小结:

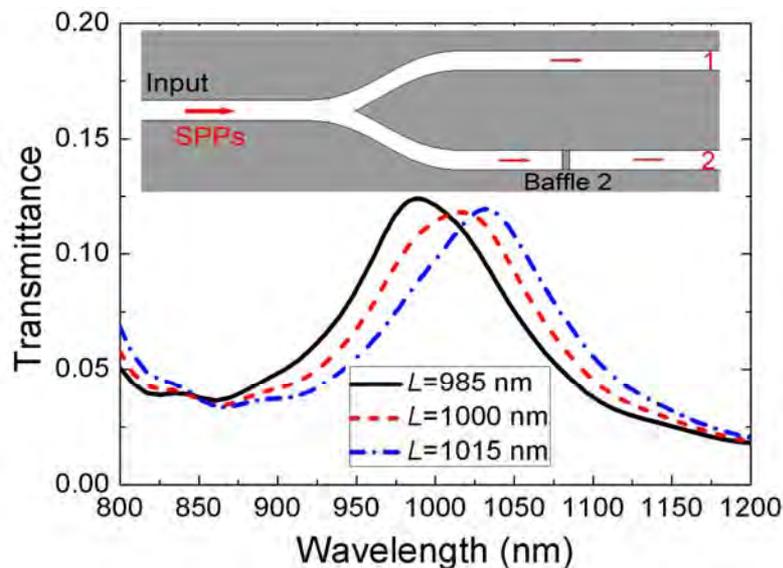
- 1、FP腔内部的腔与Stub腔的耦合导致非对称谱的出现
- 2、这两个内部腔是独立存在的，为器件的设计提供更多的选择。
- 3、为了得到相同的开关比(0% to 61%)，非对称谱只需要移动30 nm，而对称谱要移动110 nm。
- 4、当谱移动相同时($\Delta \lambda = 30 \text{ nm}$)，非对称谱的开关比是对称谱的7倍。
- 5、对提高器件的波长分辨率、提高生物传感的灵敏度，降低开关的阈值功率具有重要的意义。



4.2 高分辨率的Y分束器



$$y = d_y / 2 \times [x / L_b - \sin(2\pi x / L_b) / (2\pi)]$$

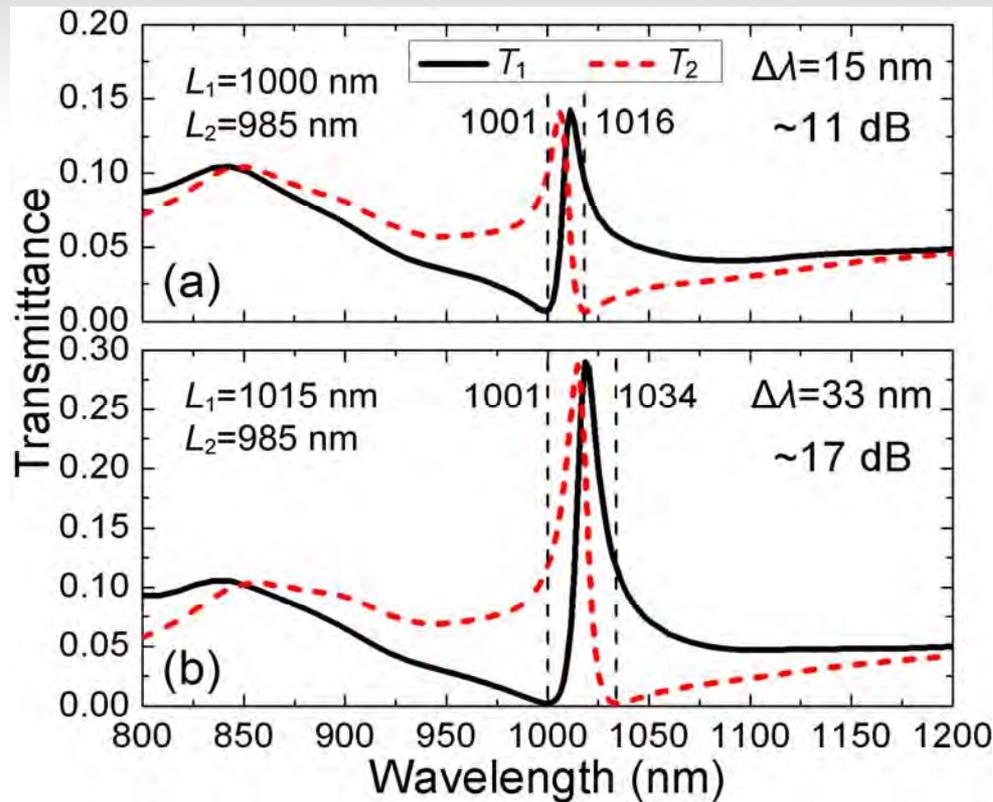


洛伦兹线型的谱宽:

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 110 \text{ nm}$$

单个FP腔的透过谱

Chen et al. Opt. Express (to be submitted)



波长分辨

$$\Delta\lambda = 15 \text{ nm}$$

能流分布



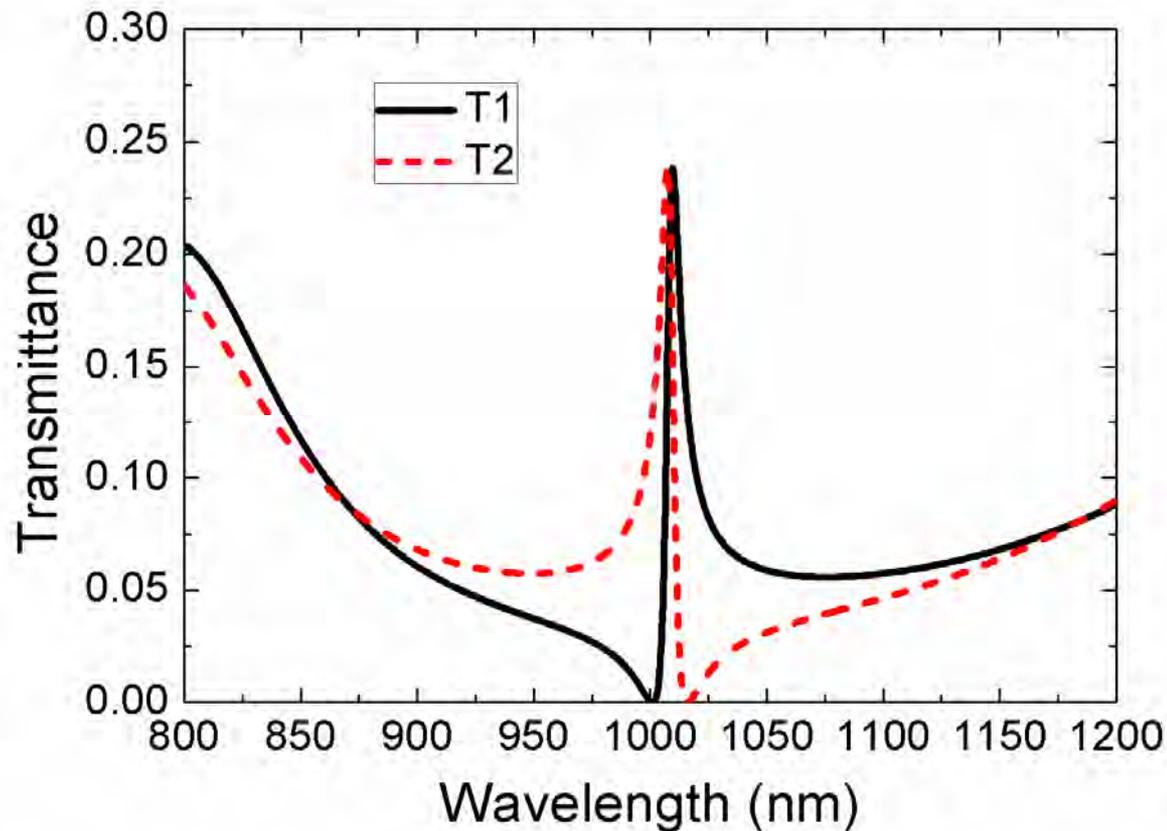
$$\lambda = 1001 \text{ nm}$$



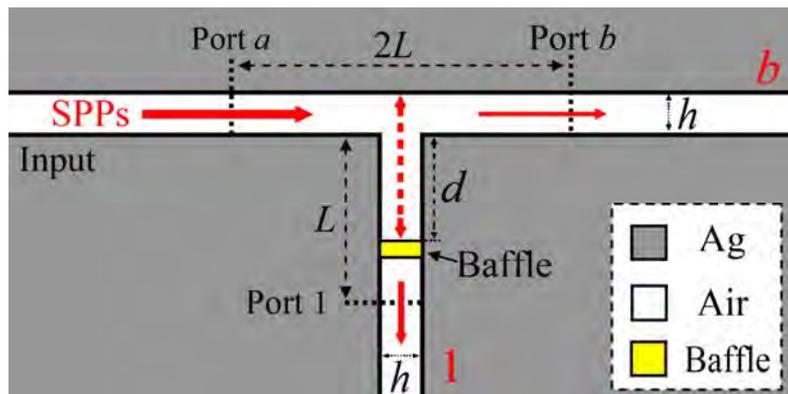
$$\lambda = 1016 \text{ nm}$$

散射理论给出的解析模型:

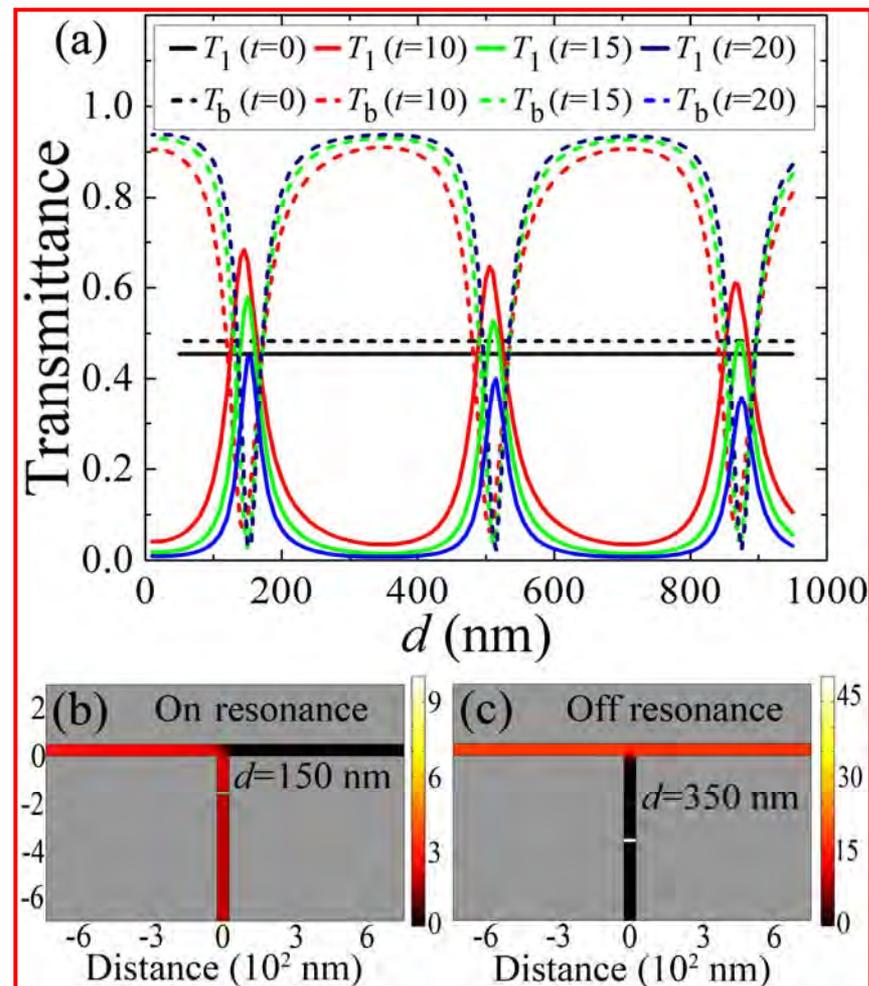
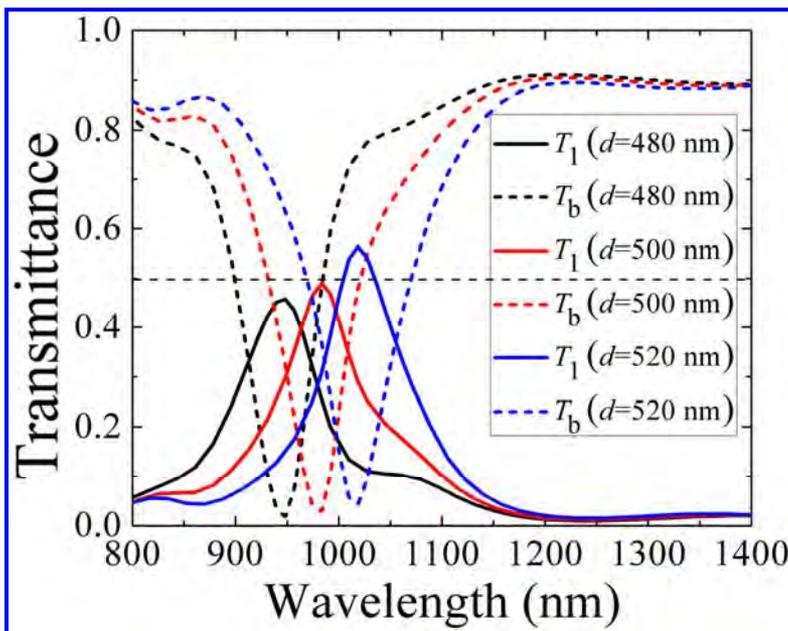
$$t_{\text{all}} = \frac{1}{T_{\text{all},22}} = \frac{i(\omega - \omega_0)\sqrt{1-r^2}}{(\omega - \omega_0 + i\delta)\exp(-i\varphi) - i\delta r \exp(i\varphi)}$$



4.3 高分辨率的波长解调器



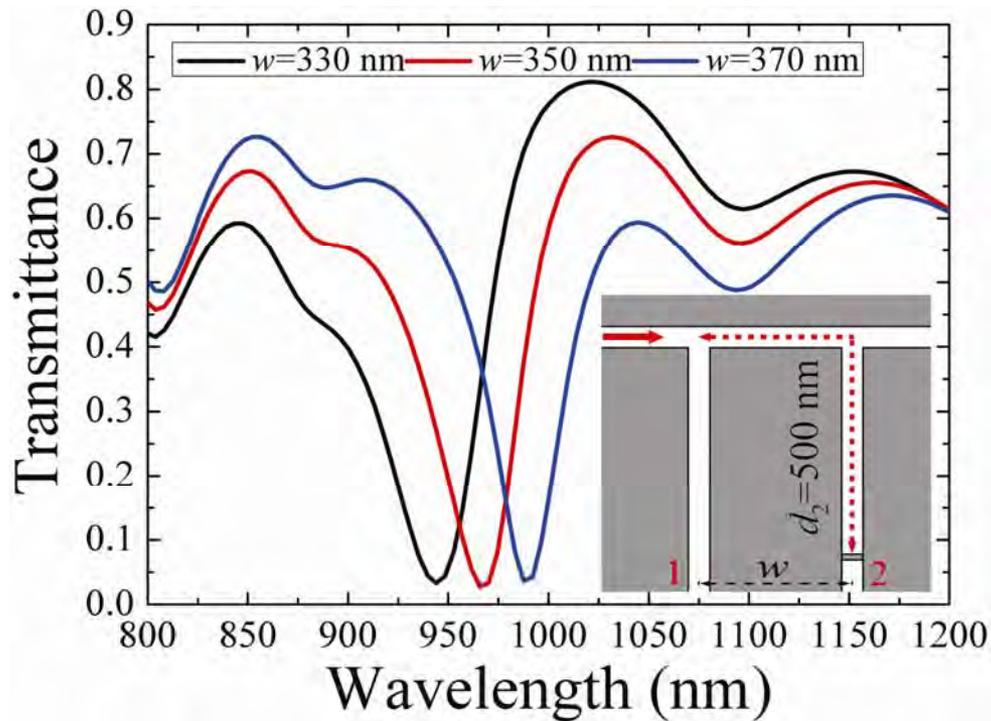
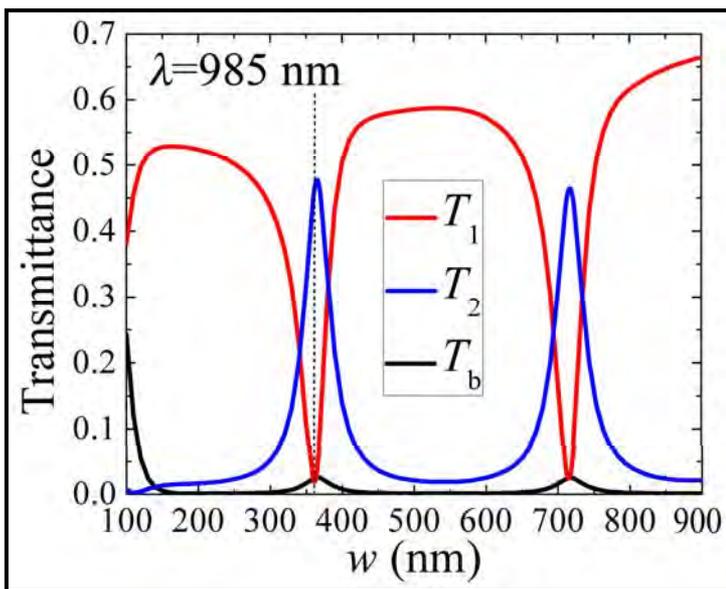
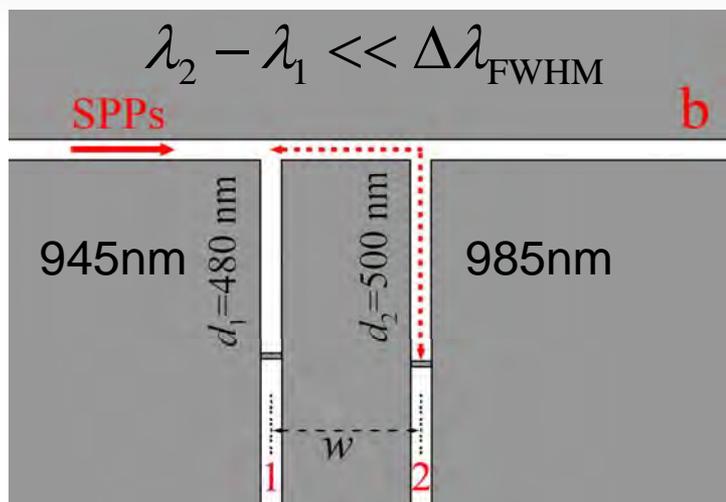
$$\varphi_{FP} = 2k_{spp}d + \theta_b + \theta_m$$



$$\Delta\lambda_{FWHM} \sim 100 \text{ nm}$$

Chen et al. Opt. Express **19**, 9976 (2011)

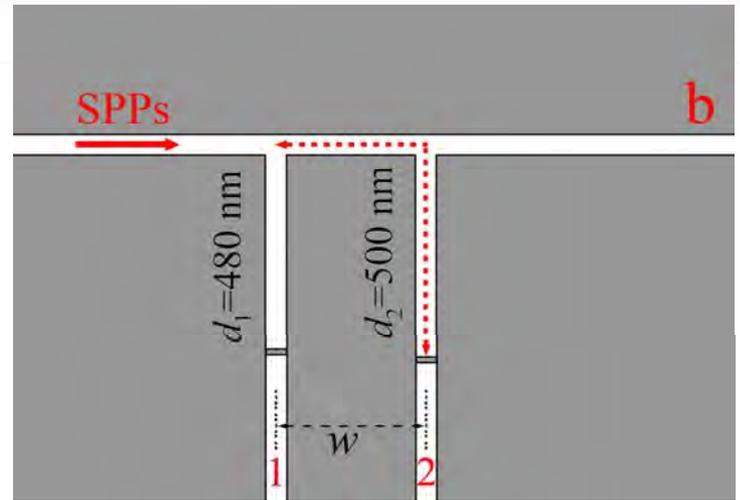
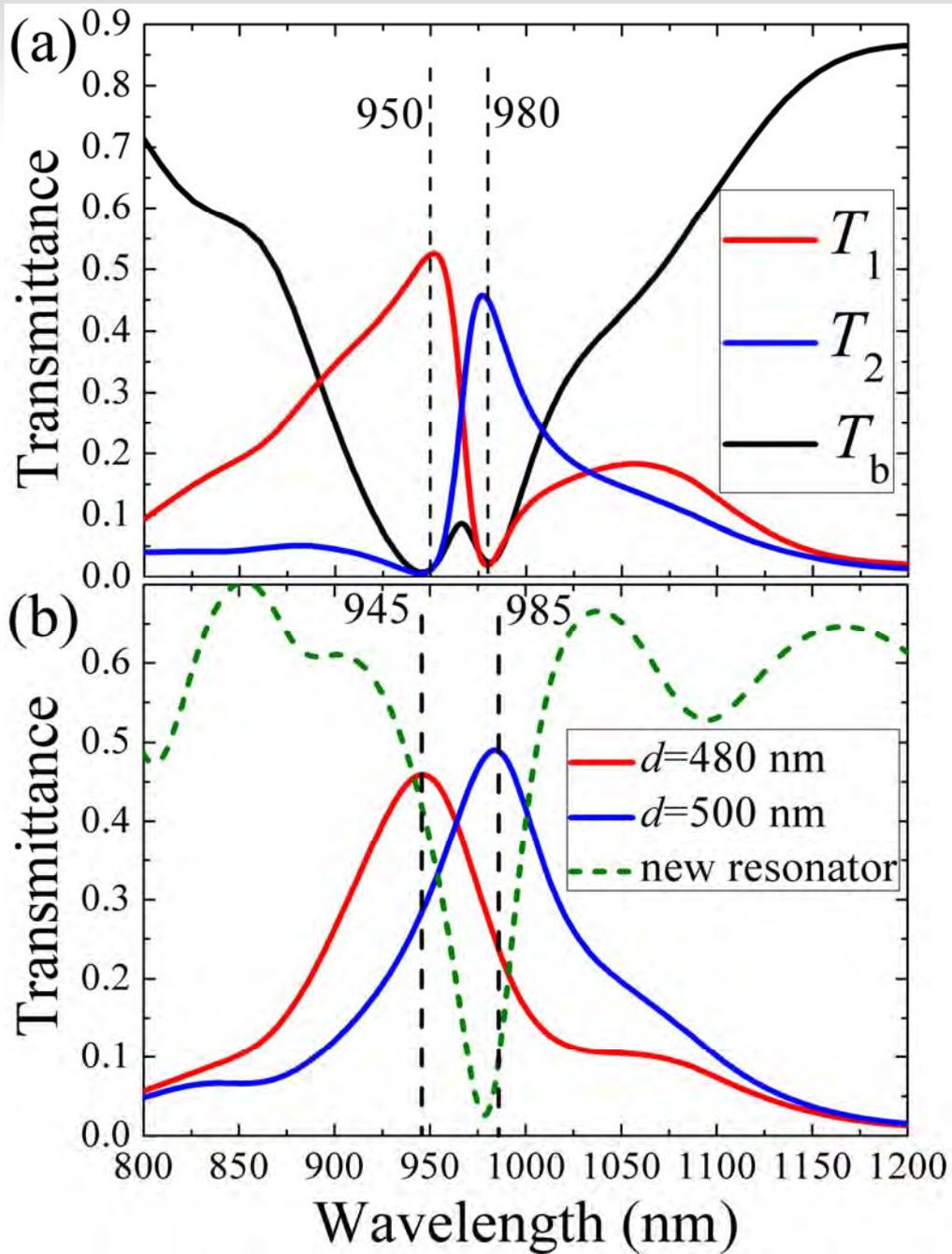
1×2 波长解调器



新腔透过谱

$$\Delta\lambda'_{FWHM} \sim 40 \text{ nm}$$

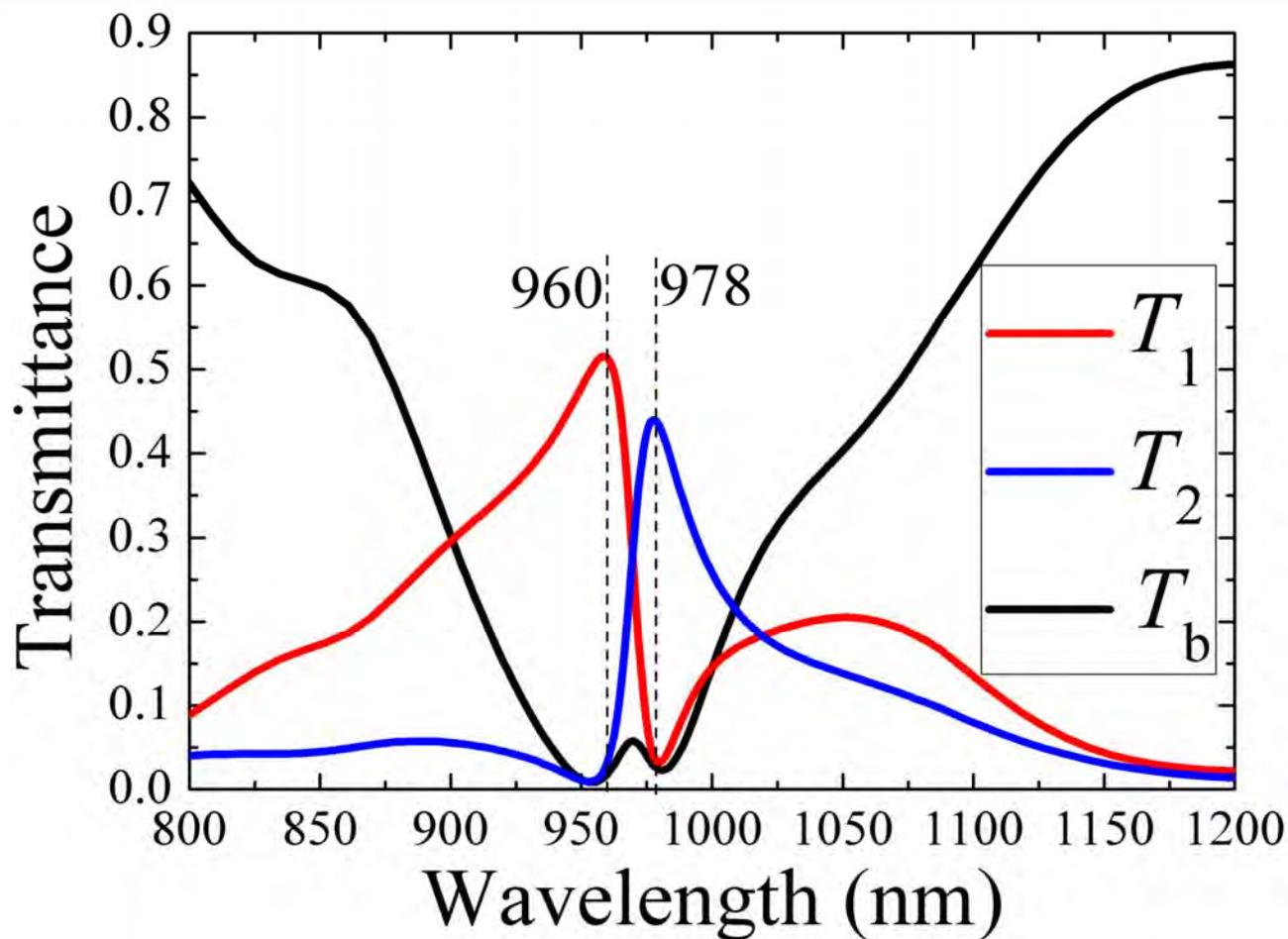
透过率随两个通道间距的变化



$$\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$$

透过率随波长的变化

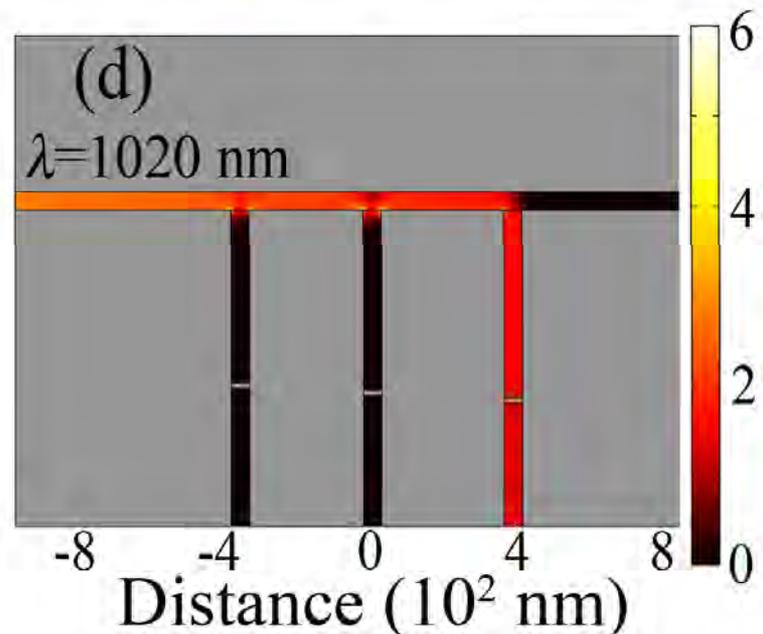
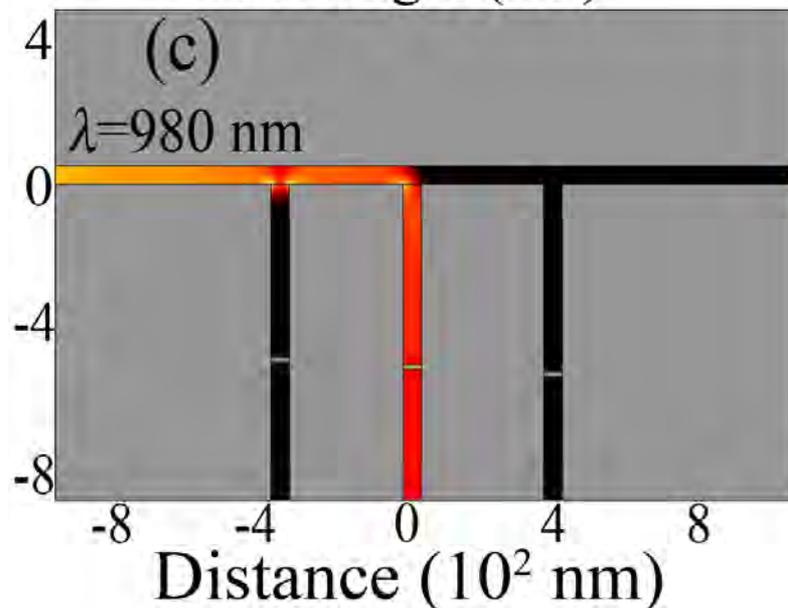
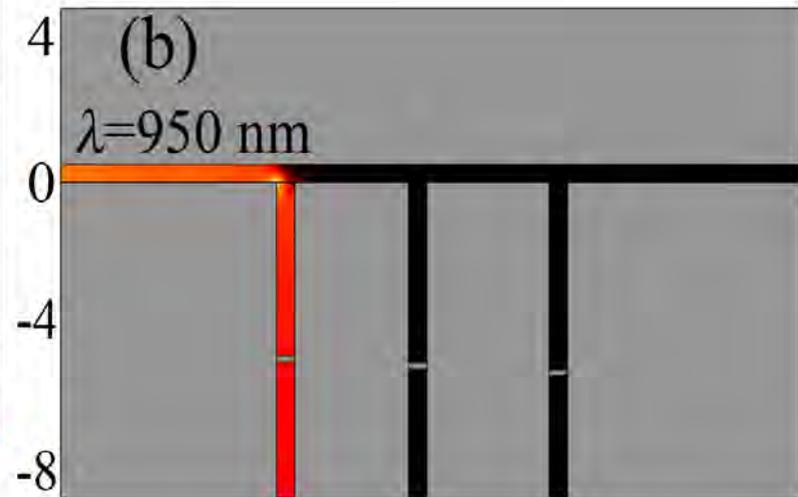
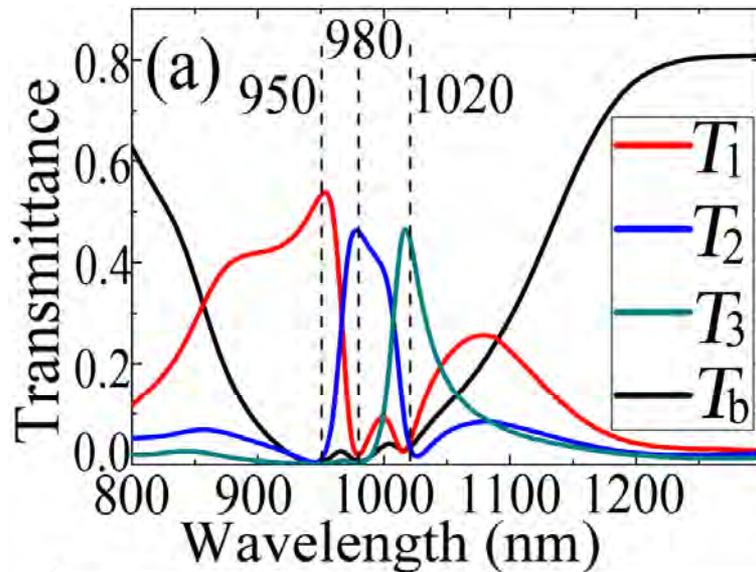
调节参数可使分辨率更高：1×2 波长解调器



透过率随波长的变化

$$d_1 = 485 \text{ nm}, d_2 = 500 \text{ nm}, w = 360 \text{ nm} \Rightarrow \Delta\lambda = 18 \text{ nm}$$

1×3 波长解调器



主要内容

- 背景介绍
- 非对称单缝中SPP的全光调制
- 单向激发、分束及宽带单向激发
- 基于耦合腔效应高分辨的SPP器件
- 总结

五、总结

- ✓ 基于非对称单缝，实现了SPPs的全光调制。器件的横向尺寸只有2 μm ，开关比 >20 dB，相位调制 $> \pi$ 。并且易于和其他SPP器件集成。
- ✓ 基于非对称纳米单缝，有效地实现了SPP单向激发和SPP分束，横向尺寸分别只有370 nm和800 nm。
- ✓ 准柱面波对总场的调制为超紧凑SPPs器件的设计提供了更多的可能性。
- ✓ 利用介质膜覆盖的非对称单缝实现了宽带单向SPP激发。

- ✓ 在MIM波导中，利用谐振腔的耦合效应，使透过谱出现了陡的非对称线型，可极大地提高器件的波长分辨率。基于散射理论，分析了这种线型的形成机理。
- ✓ 利用谐振腔的耦合效应，在Y分支中实现了高分辨的波长分束器。波长分辨率远远小于单个谐振腔的谱宽。
- ✓ 利用谐振腔的耦合效应，在MIM波导中实现了高分辨的SPPs波长解调器。波长分辨率远远小于单个谐振腔的谱宽。

论文发表

1. **Jianjun Chen**, Zhi Li, Song Yue, and Qihuang Gong. Nano Letters, **11**, 2933–2937 (2011).
2. **Jianjun Chen**, Zhi Li, Song Yue, and Qihuang Gong. Appl. Phys. Lett. **97**, 041113 (2010). IF: 3.554.
3. **Jianjun Chen**, Zhi Li, Jia Li, and Qihuang Gong. Opt. Express **19**, 9976-9985 (2011). IF: 3.278.
4. **Jianjun Chen**, Zhi Li, Song Yue, and Qihuang Gong. Opt. Express, **17**, 23603 (2009). IF: 3.278.
5. **Jianjun Chen**, Zhi Li, Song Yue, and Qihuang Gong. J. Appl. Phys. **109**, 073102 (2011). IF: 2.019.
6. **Chen Jian-jun**, Li Zhi, and Gong Qi-huang. Chin. Phys. B, **18**, 3535 (2009). IF: 1.293.
7. **Chen JJ**, Li Z, Zhang JS, and Gong QH. ACTA PHYSICA SINICA, **57**, 5893 (2008). IF: 1.003.

8. Song Yue, Zhi Li, **Jianjun Chen**, and Qihuang Gong.
Appl. Phys. Lett. **98**, 161101 (2011). IF: 3.554.
9. Xiaofei Wu, Jiasen Zhang, **Jianjun Chen**, Chenglong Zhao, and Qihuang Gong. Opt. Lett. **34**, 392 (2009). IF: 3.059.
10. Zhi Li, Song Yue, **Jianjun Chen**, and Qihuang Gong.
Opt. Express **18**, 14232 (2010). IF: 3.278.
11. YUE Song, LI Zhi, **CHEN Jian-Jun**, and GONG Qi-Huang.
Chin. Phys. Lett. **27**, 027303 (2010). IF: 0.972.

投稿文章

12. **Jianjun Chen**, Zhi Li, Ming Lei, Song Yue, Jinghua Xiao, and Qihuang Gong.
Appl. Phys. Lett. (submitted).
13. **Jianjun Chen**, Zhi Li, Xiuli Fu, Ming Lei, Li Yu, Jinghua Xiao, and Qihuang Gong.
Opt. Lett. (submitted).
14. **Jianjun Chen**, Zhi Li, Ming Lei, Jinghua Xiao, and Qihuang Gong.
Opt. Express (to be submitted).



请批评指正，谢谢！