

doi:10.3788/gzxb20174610.1023004

金属纳米线阵列全光调制

汪梅婷¹, 郭佳², 王美玉², 党鹏², 童凯²

(1 燕山大学 里仁学院, 秦皇岛 066004)

(2 燕山大学 电气工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要:提出一种基于长程表面等离子体的介质-金属纳米线阵列-非线性介质复合全光调制器.考虑克尔效应对折射率变化的影响,采用时域有限差分法分析了金属纳米线直径、介质层厚度和泵浦光强度对反射谱的影响,通过合理配置金属纳米线和介质层的参数提高调制器的耦合性能,并在此基础上分析不同强度泵浦光的反射特性.结果表明:当金属纳米线直径为 40 nm,介质层厚度为 1 800 nm 时,全光调制器的模式耦合能力达到最强.反射谱的反射率与泵浦光强度的变化呈线性关系,相关系数为 0.998 1,且只需要 0.5 GW/cm² 功率的泵浦光就能使入射光的反射率从 0.015 提高到 0.82,较好地实现光信号对光的全光调制.

关键词:全光调制器;长程表面等离子体;时域有限差分法;金属纳米线阵列;克尔效应

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1023004-6

All-optical Modulation of Metal Nano-wires Array

WANG Mei-ting,¹ GUO Jia², WANG Mei-yu², DANG Peng², TONG Kai²

(1 College of Liren, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(2 School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: An all-optical modulator based on long-range surface plasmon resonance with metal nano-wires array is proposed. It respected for the Kerr effect to induce refractive index changes and numerically investigated respected for using the finite-difference time-domain simulation. The all-optical modulator is realized with low intensity of pump light. The diameter of metal nano-wire, the thickness of buffer dielectric layer and the intensity of pump light have a significant influence on the reflectance spectra of all-optical modulator. The coupling performance of the all-optical modulator is improved by allocating the parameters of metal nano-wire and buffer dielectric layer reasonably. The results show that the mode coupling ability of the all-optical modulator is optimal when the diameter of metal nano-wire and the thickness of buffer dielectric layer are 40 nm and 1 800 nm, respectively. There is a linear relationship between the change of reflectivity spectrum and pump intensity, which the correlation coefficient is 0.998 1. The reflectance of incident light reaches 0.82 by applying the intensity of pump light as low as 0.5 GW/cm², which can realize all-optical modulation of optical signal to light very well.

Key words: All-optical modulator; The long-range surface plasmon; The finite-difference time-domain; Metal nano-wires array; Kerr effect

OCIS Codes: 230.4110; 250.0250; 250.4110; 250.5403; 250.7360

0 引言

全光信号处理是利用光波信号控制操纵光信号,实现信号的产生、传输以及处理.随着全光网络的发展,

基金项目:国家自然科学基金(No.61172044)资助

第一作者:汪梅婷(1976—),女,讲师,硕士,主要研究方向为光学信息处理.Email:tongkai0338@sina.com

通讯作者:童凯(1973—),男,教授,博士,主要研究方向为光子晶体器件、光学测量、等离子体晶体、生物传感.Email:tongkai@ysu.edu.cn

收稿日期:2017-04-14;录用日期:2017-07-17

<http://www.photon.ac.cn>

全光器件作为光交换系统的重要组成部分,引起了国内外的广泛关注^[1-2].基于无机材料的传统全光器件非线性效应低、调制响应速度慢、信号稳定性低,使应用被限制^[3].文献[4-6]利用表面等离子体激元的特殊局域性和近场增强特性设计出光调制器件,该器件具有尺寸小、速度快的特点,为实现纳米全光集成电路提供了依据.近年来,基于衰减全内反射(Attenuated Total Reflection, ATR)和纳米金属阵列的全光器件得到了迅速发展^[7-9],Okamoto等^[10]在低入射光强下,将表面等离子体激元与非线性光学材料相结合以增强材料的非线性光学性质,提出基于表面等离子体的全光调制器,Nagamuraa等^[11]在此基础上利用聚合物的热光非线性效应提出了具有响应速度快、低泵浦光功率及高灵敏度的全光调制器.Margheri等^[12]将克尔效应与表面等离子体激元相结合,提出只需 4.8 GW/cm²功率的泵浦光实现了 0.004 1 折射率变化的全光开关.Chen等^[13]利用金膜设计的全光开关,只需 0.9 GW/cm²功率的泵浦光实现了光的反射率从 0.017 达到 0.63.Liu等^[14]利用全介质超材料进行全光研究,其 Q 值高达 920.

为了提高全光调制器的灵敏度特性,本文将长程表面等离子体结构的金属薄膜层替换为金属纳米线阵列,构成一个能激发 LRSPP 的 IMI 结构,结合克尔光电效应提出了一种具有较高灵敏度的全光调制器.并基于三维时域有限差分(Three-Dimensional Finite Difference Time Domain, 3D-FDTD)法对金属纳米线阵列层和介质层的参数进行优化配置,研究了结构参数对反射谱反射率的影响,模拟分析了不同泵浦光功率条件下的反射谱曲线特性.结果表明,泵浦光功率的改变可以使反射率的值发生相应的变化,能实现光信号对光的全光调制.

1 全光调制器结构及其原理

全光调制器由棱镜、介质层、金属纳米线阵列层和非线性聚合物层组成,其结构见图 1.金属纳米线支持表面等离子激元共振,当两个纳米金属线的间距在近场范围内,且入射光的横向波矢与表面等离极化激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)的波矢分量相匹配时,即可实现 SPP 的激发.当不同功率的泵浦光照射到非线性聚合物上时,垂直方向光场的作用会引起非线性聚合物层折射率的变化,从而引起反射光谱的全吸收峰向长波长方向移动.选用的棱镜材料为 BK7,折射率 $n_0 = 1.515$.介质层材料为氟化镁(MgF₂),厚度为 d_1 ,折射率 $n_1 = 1.38$.金属纳米线材料为金(Au),直径为 d_2 ,折射率 $n_2 = 0.197 + 3.09i$.非线性聚合物层选用聚甲基丙烯酸甲酯,此聚合物层的厚度如果太厚,会导致泵浦光的作用减弱,如果太薄,会影响长程表面等离子体波的激发,因此本文选择厚度 $d_3 = 1\ 000$ nm,折射率 $n_3 = 1.462$.在全光调制器结构中,金属纳米线阵列是镶嵌在非线性聚合物聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和缓冲介质层中的,其目的是能够有效的激发表面等离子体波.在此模型结构中,入射光波长设置为 633 nm.

令入射光的入射角为 θ ,全光调制器的反射率 R 可由菲涅尔方程得到,即^[15]

$$R = \left| \frac{r_{01} + r_1 \exp(2id_1 k_{z1})}{1 + r_{01} r_1 \exp(2id_1 k_{z1})} \right|^2 \quad (1)$$

式中, r_1 为表面等离子体 ATR 结构的反射系数,表示为

$$r_1 = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2id_2 k_{z2})}{1 + r_{12} r_{23} \exp(2id_2 k_{z2})} \quad (2)$$

令 r_{mj} 是第 m 层材料和第 j 层材料的菲涅尔反射系数,则

$$r_{mj} = \frac{n_m^2 k_{zj} - n_j^2 k_{zm}}{n_m^2 k_{zj} + n_j^2 k_{zm}} \quad (m=0,1,2; j=1,2,3) \quad (3)$$

第 i 层材料中沿着 SPP 传播方向的波矢分量 k_{zi} 为

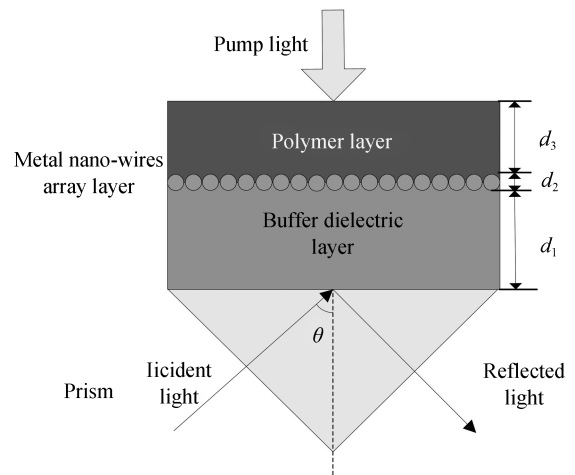


图 1 全光调制器结构

Fig.1 Schematic diagram of the all-optical modulator

$$k_{zi} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_i^2 - n_0^2 \sin^2 \theta} \quad (i=0,1,2,3) \quad (4)$$

式中, n_i 是第 i 层材料的折射率。

由克尔光电效应可知,非线性聚合物的折射率 n_p 与入射泵浦光的关系为^[16]

$$n_p = n_3 + n_{p0} I \quad (5)$$

式中, n_3 是未加泵浦光时聚合物层的折射率, n_{p0} 是非线性折射率变化系数, I 是泵浦光的功率. 在泵浦光波长为 800nm 时,非线性折射率变化系数 $n_{p0} = 20 \times 10^{-13} \text{ cm/W}^{[17]}$.

2 仿真结果与分析

给定介质层厚度为 1 800 nm,金属纳米线直径从 34 nm 增加到 44 nm,利用 FDTD 方法得到不同金属纳米线直径与反射率的关系见图 2. 由图 2 可知,随着金属纳米线直径的增加,共振角逐渐增大. 当金属纳米线直径在 34~40 nm 范围变化时,反射率的极小值随着金属纳米线直径的增加而逐渐减小. 当金属纳米线的直径增加到 40 nm 时,反射率的极小值达到 0.013, 此时共振峰深度 (Depth) 为 0.908, 半高全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 为 0.326° . 这是由于金属纳米线的直径小于 40 nm 时不能很好地激发出长程表面等离子波, 当金属纳米线的直径增加到 40 nm 时,模式耦合能力达到最强,大部分能量耦合到了长程表面等离子体波,此时反射率曲线的耦合特性最优. 随着金属纳米线直径的继续增加,由于金属纳米线阵列引起的损耗增加,模式耦合能力减弱,反射率的极小值增大.

不同金属纳米线直径对应反射率曲线的共振深度和半高全宽见图 3 和图 4. 由图可知,金属纳米线的直径对整个结构反射率的共振峰深度和半高全宽有明显的影响. 随着金属纳米线直径的增加,Depth 值增加,FWHM 值逐渐减小,这是因为随着金属纳米线直径的增加,金属纳米线阵列上下两个界面的耦合能力逐渐增强,将大部分能量耦合到了长程表面等离子体波. 当金属纳米线直径达到 40 nm 时,模式耦合能力达到最强,此时品质因子 $Q = \text{Depth}/\text{FWHM} = 2.785$. 随着金属纳米线直径的继续增大,将打破长程表面等离子体波模式耦合的对称性,导致 Depth 值减小,FWHM 值升高,从而品质因子 Q 值下降. 分析可知,金属纳米线直径为 40 nm 时, Q 值达到最大,反射谱曲线最优.

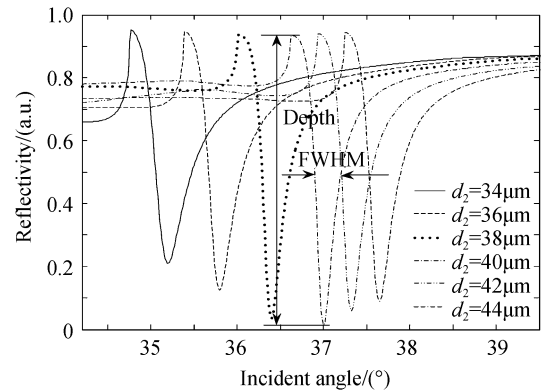


图 2 金属纳米线直径与反射率的关系
Fig.2 Reflectivity curves with different diameter of metal nano-wire

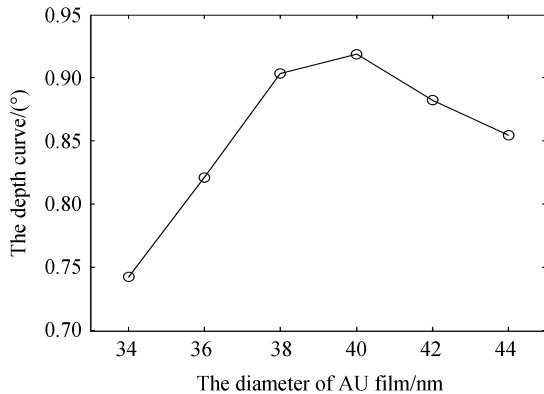


图 3 共振深度与金属纳米线直径之间的关系
Fig.3 Depth curve with different diameter of metal nano-wire

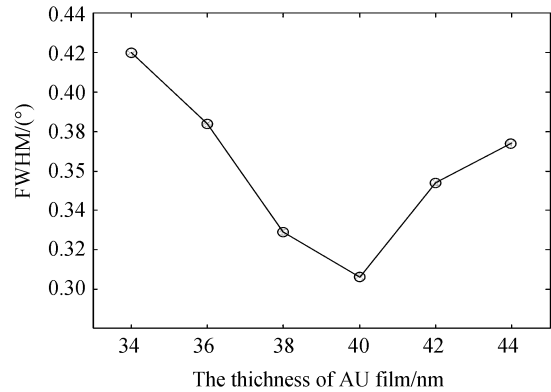


图 4 半高全宽与金属纳米线直径之间的关系
Fig.4 FWHM curve with different diameter of metal nano-wire

由于介质层厚度会影响调制器的耦合性能,因此需要对其进行优化分析.当金属纳米线直径为 40 nm,介质层厚度从 1 200 nm 增加到 2 200 nm 时,对应的反射光谱见图 5.由图 5 可知,随着介质层厚度的增加,共振角度随之增大.当介质层厚度在 1 200~1 600 nm 范围变化时,反射率的极小值约为 0.085,这是因为当介质层厚度较小时,长程表面等离子体波不能很好地被激发.当介质层厚度增加到 1 800 nm 时,反射率极小值为 0.013,此时模式耦合能力达到最强,大部分能量被耦合到了长程表面等离子体波.随着介质层厚度的继续增加,将打破耦合模式的对称性,使得能量耦合的效率降低,反射率极小值增大.

调制器结构尺寸优化结果为:介质层厚度为 1 800 nm,金属纳米线直径为 40 nm.利用时域有限差分方法得泵浦光功率与耦合角度的关系见图 6.当入射角大于全反射角度时,由于介质很薄,部分光沿着介质继续传输到介质与金属纳米线阵列的交界面,从而在介质与金属纳米线阵列交界面激发出长程表面等离子体波,且由于金属纳米线阵列直径很小,激发的长程表面等离子体波将与倏逝波发生耦合,使得入射光波的大部分能量被长程表面等离子体波吸收,转化成为热量,导致反射光强下降.根据克尔光电效应可知,随着泵浦光功率的增加,聚合物的折射率增加,从而引起长程表面等离子体波的模式有效折射率增加.若要产生模式耦合,则入射光的横向分量必须增加,从而表现为入射角的增加,这与 SPR 传感器的检测原理相一致.当将入射角固定在 37° 时,将产生 SPP 耦合,未加泵浦光时反射率的极小值为 0.013,随着泵浦光功率的逐渐增加,长程表面等离子体波的模式耦合被破坏,当泵浦光功率增加到 0.5 GW/cm² 时,入射光的反射率达到 0.82.

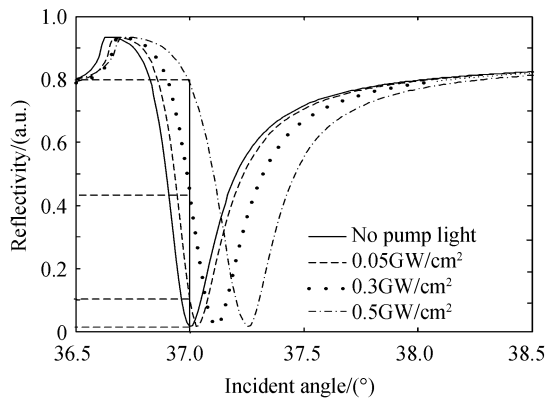


图 6 泵浦光功率与入射角度的关系
Fig.6 Reflectivity curves with different intensity of pump light

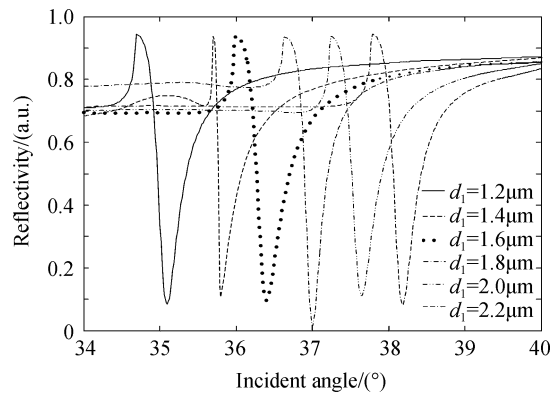


图 5 介质层厚度与反射率的关系
Fig.5 Reflectivity curves with different thicknesses of the buffer dielectric layer

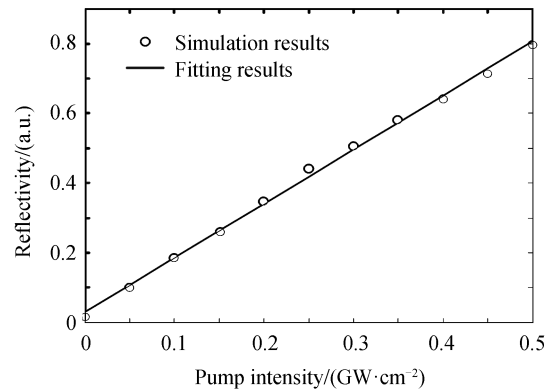


图 7 泵浦光功率与反射率的关系
Fig.7 Reflectivity for a fixed incident angle with increasing intensity of pump light

为了实现一个高反射率对比度的全光调制器,将入射角固定在 37°,提取不同功率的泵浦光与反射率的关系,见图 7,其拟合曲线为: $R=1.555 \cdot I+0.0283$,相关系数为 0.9981.由克尔效应原理可知非线性聚合物的折射率会随泵浦光功率的变化而变化,从而导致长程表面等离子体波共振角度的变化,进而改变共振曲线的反射率,此理论分析与图 7 仿真结果相一致.这说明泵浦光功率的变化可以很好地被调制到光载波上,从反射率的变化就可以得到调制的泵浦光功率,从而可以实现光信号对光的全光调制.

对全光调制器的性能而言,消光比是一项重要的指标.在数字光脉冲发射时,全“1”时的平均光功率 P_1 和全“0”时的平均功率 P_0 之比为该调制器的消光比.记做 $EXT=10\log_{10}(P_1/P_0)$ (dB).由于定义中所使用的是平均光功率,所以当光信号发送持续时间不同时,平均光功率有可能不同,因此计算出的消光比有所不同.例如当持续时间为 s 量级时,消光比主要由长时间的平均光功率决定.对于该全光调制器而言,利用时域有限差分方法仿真得到归一化消光比曲线示意图见图 8.由仿真结果可知,在固定入射波长的情况下,当满足临

界耦合条件,即入射角为 37° 时,其消光比可以达到最高值 63 dB.利用功率为 0.5 GW/cm^2 的泵浦光将入射光的反射率从 0.015 变到 0.82,提高了调制器的耦合能力,补偿了金属的吸收损耗,同时也影响了全光调制器的调制速率.调制速率指的是信号被调制以后在单位时间内的变化,即单位时间内载波参数变化的次数.它是对符号传输速率的一种度量,1 波特即指每秒传输 1 个符号.图 9 为泵浦光功率为 0.5 GW/cm^2 时的全光调制曲线.当无泵浦光照射时,介质层表现为光学各向同性,致使所接收到的能量非常低.当泵浦光开启后,由图可以看出响应时间 $20 \mu\text{s}$,对应的全光调制速率为 49 kHz.

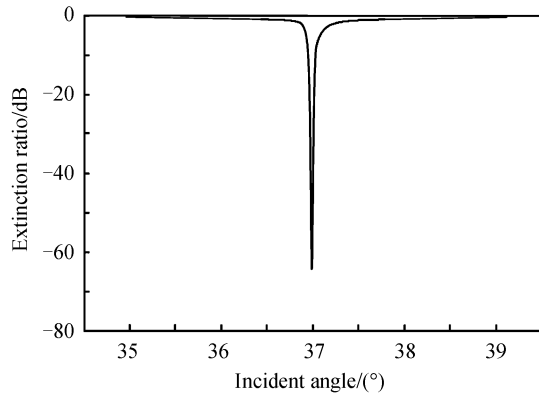


图 8 消光比曲线

Fig.8 Extinction ratio curve

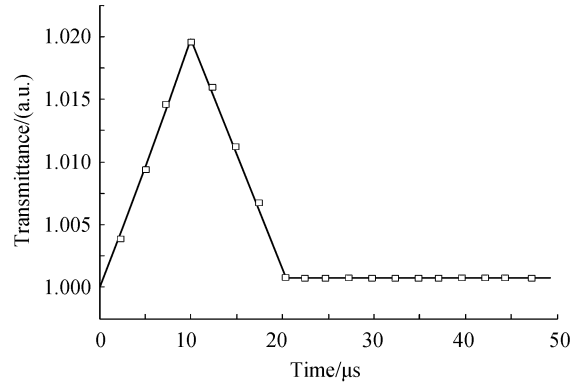


图 9 全光调制曲线

Fig.9 All-optical modulation curve

泵浦光以 37° 入射激发界面处的表面等离子体共振,使得较小的入射功率就可以产生高模密度强局域场,有效改变了非线性介质的折射率,使耦合条件发生改变,从而调制反射光强,实现高灵敏低功率的全光调制.在实际的应用中,调制器的性能受加工工艺的影响,例如金纳米线阵列的表面粗糙度、外界噪声、加工精度等,这就要求采用更新更精良的加工工艺,以减小不必要的误差.例如利用气相沉积法制备金纳米颗粒时,考虑其粒度分布的宽窄对调制器性能的影响.因此,需要针对实际情况对调制器尺寸参数进行合理的调整,以达到最佳的使用效果.

3 结论

本文将长程表面等离子体结构的金属薄膜层替换为金属纳米线阵列,并结合克尔光电效应提出了一种高灵敏度特性的介质-金属纳米线阵列-非线性介质复合全光调制器.利用 3D-FDTD 方法对结构参数进行优化配置,模拟分析了金属纳米线直径、介质层厚度和不同泵浦光功率对反射谱曲线的影响.分析结果表明:当介质层厚度为 1800 nm ,金属纳米线直径为 40 nm 时,反射谱曲线的反射率的极小值达到 0.013,共振峰深度为 0.908.当泵浦光功率从 0 增加到 0.5 GW/cm^2 时,反射谱曲线的反射率从 0.015 增加到了 0.82,其结果优于文献[13].并且不同泵浦光功率与反射率呈现很好的线性关系,通过调节泵浦光的功率,将会引起共振曲线的反射率发生相应的变化,从而实现了光信号对光的全光调制.

参考文献

- [1] ANTÓN M A, CARRENO F. Quantum memory and all-optical switching in positive charged quantum dots via Zeeman coherent oscillations[J]. *Journal of Optics*, 2010, **12**(10): 104006-104013.
- [2] WEN Y H, KUZUCU O, HOU T, *et al.* All-optical switching of a single resonance in silicon ring resonators[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(8): 1413-1415.
- [3] RAZDOLSKIY I, BERNESCHI S, CONTI G N, *et al.* Hybrid microspheres for nonlinear Kerr switching devices[J]. *Optics Express*, 2011, **19**: 9523-9528.
- [4] MICHAEL W, TOBIAS P, MARTIN G, *et al.* 25ps all-optical switching in oxygen implanted silicon-on-insulator microringresonator[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(11): 7693-7702.
- [5] OULTONR F, SORGER V J, GENOV D A, *et al.* A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(8): 496-500.
- [6] ALMEID V R, BARRIOS C A, PANEPUCCI R R, *et al.* All-optical control of light on a silicon chip[J]. *Nature*, 2004, **431**(7012): 1081-1084.
- [7] NOZAKI K, TANABE T, SHINYA A, *et al.* Sub-femtojoule all-optical switching using a photonic-crystal nanocavity [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(7): 477-483.

-
- [8] BELOTTI M, GALLI M, GERACE D, *et al.* All-optical switching in silicon-on-insulator photonic wire nano-cavities[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(2): 30-31.
- [9] ASADI R, MALEK M. All optical switch based on Fano resonance in metal nanocomposite photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(8): 2230-2235.
- [10] OKAMOTO T, KAMIYAMA T, YAMAGUCHI I. All-optical spatial light modulator with surface plasmon resonance [J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(18): 1570-1572.
- [11] NAGAMURA T, SASAKI K, IIZUKA F, *et al.* Ultrafast all-optical spatial light modulation based on complex refractive index changes of copper phthalocyanine-doped polymer film upon photoexcitation in guided mode geometry[J]. *Optics Communications*, 2002, **205**(1-3): 107-112.
- [12] MARGHERI G, ROSSO T D, GIORGETTI E, *et al.* All optical switches based on the coupling of surface Plasmon polaritons[J]. *Optics Express*, 2008, **16**: 9869-9883.
- [13] CHEN Jun-xue, WANG Pei, WANG Xia-lei, *et al.* Sensitivity enhanced all-optical switching using prism-grating coupled surface plasmon modes[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(1): 151-154.
- [14] LIU Zheng-qi, FU Guo-lan, HUANG Zheng-ping, *et al.* Multi-band ultra-sharp transmission response in all-dielectric resonant structures containing kerr nonlinear media[J]. *Plasmonics*, 2017, **12**: 577-582.
- [15] CAO Di, TAO Feng, ZHANG Hui-fang, *et al.* Surface plasmon polaritons of the metamaterial four-layered structures [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, **26**(1): 50-59.
- [16] BRÉE C, DEMIRCAN A, STEUNMEYER G. Saturation of the all-optical Kerr effect[J]. *Optics Letters*, 2011, **106**(18): 1541-1543.
- [17] ERMOLENKO M V, BUGANOV O V, TIKHOMIROV S A, *et al.* Ultrafast all-optical modulator for 1.5 μ m controlled by Ti : Al₂O₃ laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(7): 073113.