

The Research of SPP Mode Based on Metallic Grating Structure

Yaling Yun, Pengfei Cao*

School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou Gansu
Email: caopf@lzu.edu.cn

Received: Jan. 16th, 2020; accepted: Jan. 31st, 2020; published: Feb. 7th, 2020

Abstract

Metal nanostructures are based on the principle of localized surface plasmon resonance on optical wavelengths. It can be controlled by changing various parameters (size, material, shape) of the structure and the environments in which they are located. This paper presents a metallic grating structure. The spectral characteristics of the structure and under different parameters and sensitivity under different environments are analyzed, and the resonance wavelength can be tuned in the near infrared band.

Keywords

Localized Surface Plasmon Resonance, Metallic Grating, Spectral Characteristics, Sensitivity, Resonance Wavelength

基于金属光栅结构的SPP模式的研究

贲亚玲, 曹鹏飞*

兰州大学信息科学与工程学院, 甘肃 兰州
Email: caopf@lzu.edu.cn

收稿日期: 2020年1月16日; 录用日期: 2020年1月31日; 发布日期: 2020年2月7日

摘要

金属纳米结构在光波段上支持局域表面等离子体共振, 可以由结构的各项参数(尺寸、材料、形状)以及
*通讯作者。

环境控制。本文提出了一种金属光栅结构, 分析了该结构在不同参数下的光谱特性和在不同介质环境下的灵敏度, 实现共振波长在近红外波段的可调谐。

关键词

局域表面等离子体共振, 金属光栅, 光谱特性, 灵敏度, 共振波长

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 等离子体激光光学领域[1] [2] [3]致力于研究各种金属波导结构的光学特性, 如金属纳米颗粒链[4]、天线阵列[5]、金属光栅波导[6] [7] [8]等结构。其中, 金属光栅波导结构可以将能量局域在尺寸远小于波长的金属狭缝中, 在 TM 波垂直入射时, 相较于其它结构具有更好的偏振性能和透射特性。2007 年, 孟凡涛等[6]所设计的光栅谐振器, 所针对的波长范围是 320~520 nm, 具有大于 61.5%的透射率, 但是带宽较宽。2014 年, 张英杰[7]设计的带有凹槽的亚波长金属光栅的偏振滤波器, 通过调制凹槽光栅的几何参数, 实现共振波长在可见光波段的可调谐。该滤波器具有大于 65%的透射峰, 但是 FWHM 的最小值为 90 nm, 同样无法实现窄带效应。2016 年, 陆晓元等[8]设计的基于金属光栅 - 电介质 - 金属镜周期结构的传感器, 适用于太赫兹波段, 具有窄带效应(FWHM = 20 nm), 也可用于检测周围环境折射率的变化(灵敏度 $S = 500 \text{ nm/RIU}$), 品质因数 $FOM = 25$ 。这三种金属光栅波导结构的物理尺寸较大, 导致光栅的周期性结构体积较大, 降低了它们在实际应用中的灵活性。

在本文, 我们提出了一种新型的基于金属光栅结构的谐振器, 通过调整其结构参数及周围环境的折射率, 该谐振器在 1200~3000 nm 的波长范围内能够达到接近 90%的透射率。同时具有较高的灵敏度($S = 920 \text{ nm/RIU}$)、较好的窄带效应(FWHM = 23 nm)和品质因数($FOM = 40$), 并且更明显地表现出在金属 - 介质接触点周围局域电场增强的效果, 从而实现了更低的光损耗。相对传统的金属纳米棒天线仅产生偶极子共振[9]模式, 该结构能同时产生金属光栅的等离子体模式[10]和金属纳米棒的偶极子共振模式。

2. 金属纳米棒与金属光栅结构几何参数的分析

我们使用有限元方法进行了全场电磁模拟, 研究了由金属纳米棒(图 1(a))和金属光栅结构(图 1(b))组成的谐振天线阵列。SiO₂ 衬底上的金属纳米棒和金属光栅结构的三维结构如下:

入射光源偏振态设置为垂直于结构入射的 TM 平面波, 电场磁场分别沿 x, y 轴传播, 整体结构边界模拟设置为周期性边界条件。x, y 方向上阵列的晶格常数均为 $P_x = 1000 \text{ nm}$, $P_y = 500 \text{ nm}$, 衬底高度 $H = 50 \text{ nm}$, 与金属纳米棒不同, 该金属光栅结构由两层构成, 第一层为光栅周期结构(金属凹槽结构), 第二层为金属纳米棒。图 1(a)中金属纳米棒的宽度和高度分别为 $W = 30 \text{ nm}$, $h = 60 \text{ nm}$, 长度 L 依次设置为 270、390 或 510 nm。图 1(b)中光栅周期 $A = L_1 + a = 60 \text{ nm}$, 狭缝间隔 $a = 30 \text{ nm}$, 凹槽宽度和深度为 $W_1 = h_1 = 30 \text{ nm}$, 光栅周期结构放置在宽度和高度为 $W = h = 30 \text{ nm}$, 长度为 L 的金属纳米棒上。光栅数为 $N = 5, 7$ 或 9 的光栅周期结构的长度分别相当于 $L = 270 \text{ nm}$ 、 390 nm 或 510 nm 的纳米棒的长度。整个结构在 x, y 平面上呈周期性阵列排布。对于 Au 的有效介电常数, 我们使用了 Drude 模型, 衬底折射率为 1.45。

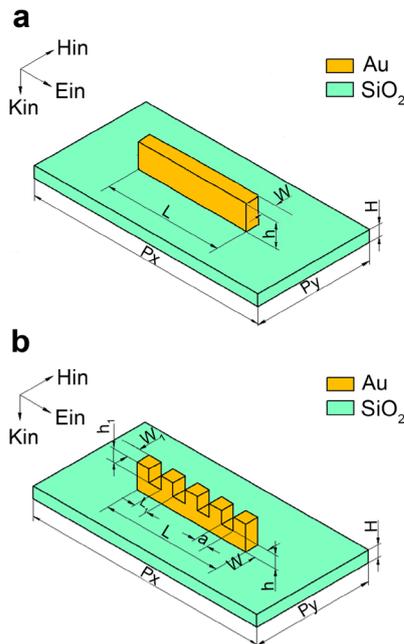


Figure 1. Metal nanorods (a) and metal grating structures (b)
图 1. 金属纳米棒(a)和金属光栅结构(b)

长度 $L = 270 \text{ nm}$ 的金属纳米棒透射光谱(图 2(a)红线)与光栅数 $N = 5$ 的金属光栅结构透射谱(图 2(b)红线)对比可知, 金属纳米棒共振波长为 1270 nm , 而金属光栅结构透射谱具有更大的共振波长, 1560 nm , 相差 290 nm 。虽然这两种结构的整体尺寸相同, 但共振波长有明显的红移。我们在图 2(a) (蓝线)、图 2(b) (蓝线)以及图 2(a) (紫线)、图 2(b) (紫线)中观察到类似的趋势。 $L = 390 \text{ nm}$ 、 $N = 7$ 时, 两种结构的共振波长分别为 1720 nm 和 2110 nm , 差值为 390 nm , $L = 510 \text{ nm}$ 、 $N = 9$ 时, 两种结构的共振波长分别为 2170 nm 和 2660 nm , 差值为 490 nm 。随着 L 和 N 的增加, 金属纳米棒与金属光栅结构的共振波长之差进一步增大。

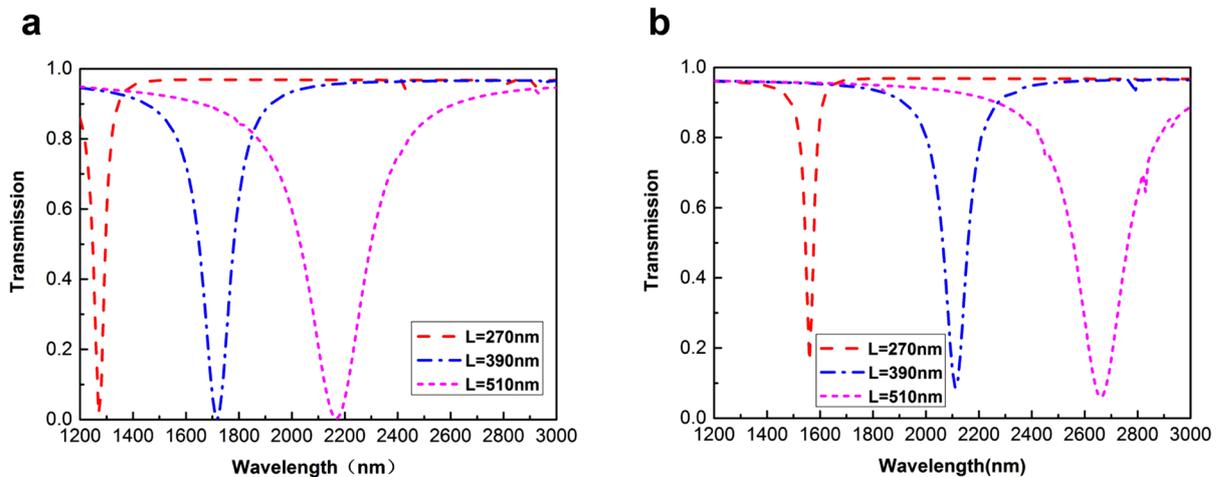


Figure 2. Transmission of metal nanorods (a) and metal grating structures (b) when L values are different
图 2. 金属纳米棒(a)与金属光栅结构(b)在 L 取值不同时的透射现象

我们可以对这两种结构共振波长偏移现象进行原理分析。金属纳米棒天线的共振波长偏移现象是由偶极共振引起的, 随着尺寸沿偏振方向增加。同时外加电场引起电荷振荡, 因此金属纳米棒起偶极谐振

器的作用。对于金属光栅结构, 电荷在更大的路径上振荡, 这是由于与纳米棒相比, 由于表面积的增加, 导致共振波长依次增加。此外, 相邻光栅之间的附加电荷积聚空间也提供了更大的耦合电容。因此, 与金属纳米棒相比, 金属光栅结构的共振波长更加显著的红移现象, 既归因于其结构表面积的增加, 也归因于光栅设计中电容的增加。

为了更清楚地说明透射谱的物理机制, 我们模拟了三种不同长度尺寸 L 下的近电场分布。图 3 显示了金属纳米棒和金属光栅结构在其对应的共振波长处的电场强度。与金属纳米棒相比, 整体尺寸相同的金属光栅结构在金属-介质接触点周围表现出更强的局域电场增强(如图 3(a)和图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)、图 3(e)和图 3(f)比较可知)。这是因为入射光作用在金属光栅结构上, 光栅衍射改变了波矢分量在电磁波沿空气/金属界面的传播, 因而可以在金属表面激发 SPP 波, SPP 波沿着金属光栅凹凸表面爬行, 等效于结构的总表面积增大(SPP 波在结构表面的传播路径增加), 导致局域电场增强, 表现为整体偶极子共振效应更明显。

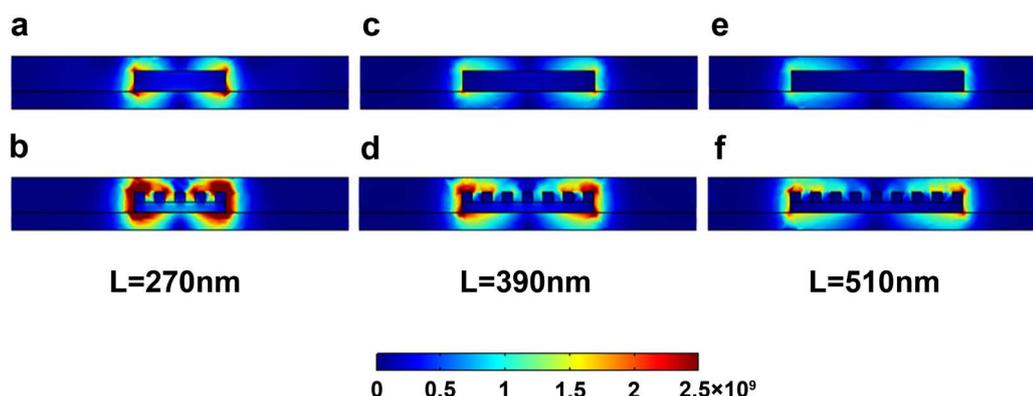


Figure 3. Electric field strengths of metal nanorods (a, c, e) and metal grating structures (b, d, f) when L values are different
图 3. 金属纳米棒(a,c,e)与金属光栅结构(b,d,f)在 L 取值不同时的电场强度分布

我们也可以通过模拟整体尺寸相同的($L = 270 \text{ nm}$ 、 $N = 5$)金属纳米棒和金属光栅结构在共振波长处的电荷分布来验证上述说法, 如图 4 所示。

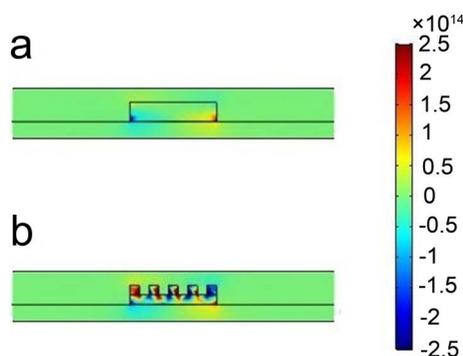


Figure 4. Charge distribution of metal nanorods (a) and metal grating structure (b) ($L = 270 \text{ nm}$, $N = 5$)
图 4. 金属纳米棒(a)与金属光栅结构(b) ($L = 270 \text{ nm}$ 、 $N = 5$)的电荷分布

纳米棒两端分布着性质相反的电荷量, 证明产生了偶极子共振现象。金属光栅结构中每个光栅两端以及相邻光栅之间同时分布着性质相反的电荷量, 光栅周期结构的设计会叠加偶极子共振产生的影响, 导致更加强烈的偶极子共振现象的产生。

由图 2(b), 图 3(b), 图 3(d), 图 3(f)可知, 相较于 $L = 390 \text{ nm}$ 、 $N = 7$ 和 $L = 510 \text{ nm}$ 、 $N = 9$ 的金属光

栅结构, 当 $L = 270 \text{ nm}$ 、 $N = 5$ 时, 金属光栅结构的透射共振谱有着更好的窄带现象和更强的局域电场增强, 验证了物理尺寸的增大会加大欧姆耗散和辐射阻尼的影响。因此我们模拟分析 $L = 270 \text{ nm}$ 、 $N = 5$ 的金属光栅结构在不同凹槽深度情况下的共振现象和电场强度, 凹槽深度取值为 $h_1 = 20 \text{ nm}$ 、 30 nm 、 40 nm , 相对应的共振波长为 1500 nm (红线)、 1560 nm (蓝线)、 1640 nm (紫线), 如图 5 所示, 随着凹槽深度的增加, 金属光栅结构的共振波长出现明显的红移现象, 当凹槽深度增加到 $h_1 = 40 \text{ nm}$ 时, 该结构可在共振谱中维持着较好的窄带现象并且在金属 - 介质接触点周围表现出更强的局域电场增强。同理, 当对狭缝间隔 a 进行变换, 当 a 值增大时, 也可得到类似现象和规律。

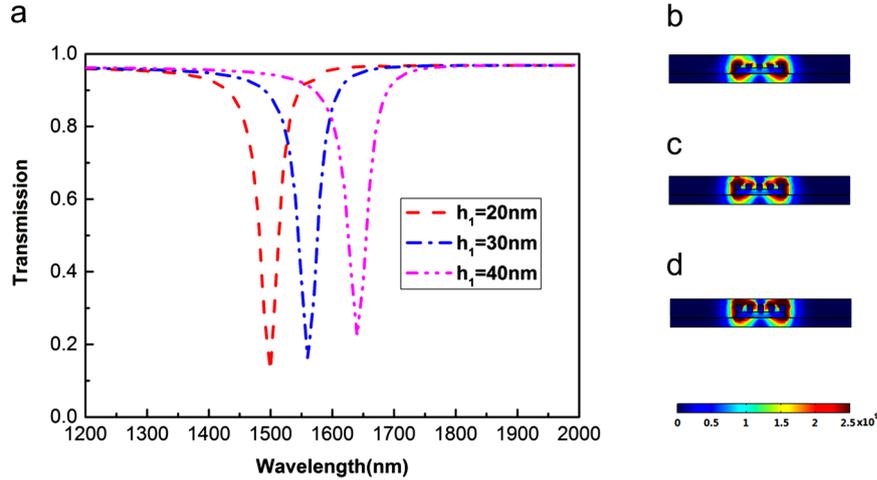


Figure 5. Transmission (a) and corresponding electric field intensity of metal grating structure at different groove depths (b, $h_1 = 20 \text{ nm}$) (c, $h_1 = 30 \text{ nm}$) (d, $h_1 = 40 \text{ nm}$)

图 5. 金属光栅结构在不同凹槽深度下的透射现象(a)和相对应的电场强度分布(b, $h_1 = 20 \text{ nm}$) (c, $h_1 = 30 \text{ nm}$) (d, $h_1 = 40 \text{ nm}$)

3. 金属纳米棒与金属光栅结构的灵敏度分析

等离子体纳米结构的共振波长也依赖于周围介质环境的折射率, 我们分析对比了同等物理大小($L = 270 \text{ nm}$ 、 $N = 5$)的金属纳米棒与金属光栅结构处于不同介质环境中的透射现象, 周围环境折射率 n 的变化范围为 $1.0 \sim 1.1$, 周围环境折射率变化量 Δn 为 0.025 。

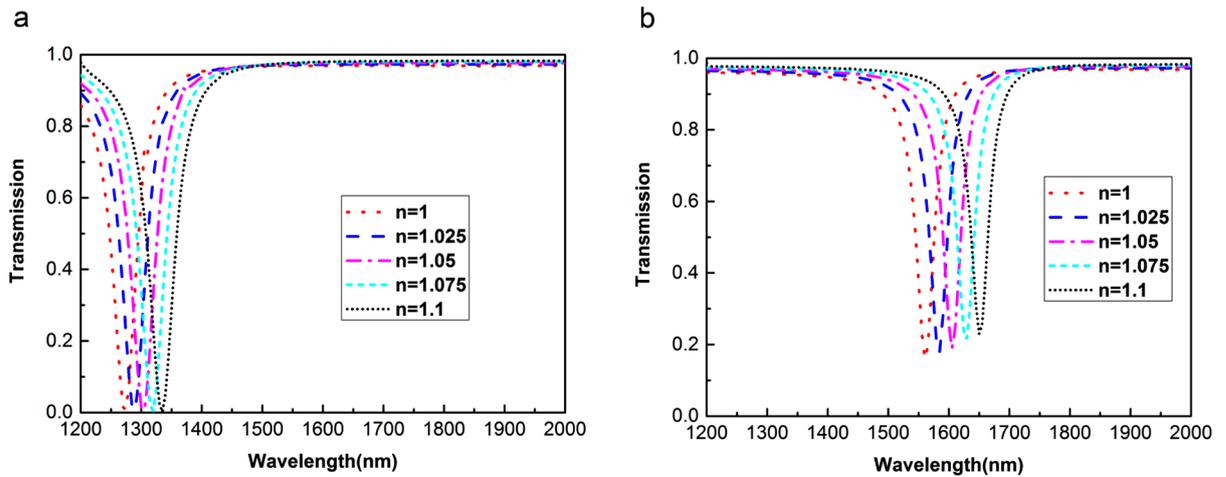


Figure 6. Transmission of metal nanorods (a) and metal grating structures (b) in different environment

图 6. 金属纳米棒(a)与金属光栅结构(b)处于不同介质环境的透射现象

Table 1. Sensitivity Physical quantities of metal nanorods in different environment
表 1. 金属纳米棒在不同介质环境中的各灵敏度物理量

Refractive index, n	1	1.025	1.05	1.075	1.1	Average
λ_{res} (nm)	1275	1290	1305	1320	1335	1305
$\Delta\lambda$ (nm)		15	15	15	15	15
FWHM (nm)	47	48	48	48	49	48

Table 2. Sensitivity physical quantities of metal grating structures in different environment
表 2. 金属光栅结构在不同介质环境中的各灵敏度物理量

Refractive index, n	1	1.025	1.05	1.075	1.1	Average
λ_{res} (nm)	1560	1585	1605	1630	1650	1606
$\Delta\lambda$ (nm)		25	20	25	20	23
FWHM (nm)	24	23	23	22	22	23

上述 λ_{res} 为周围环境折射率变化时的相对应的共振波长, $\Delta\lambda$ 为共振波长随周围环境折射率变化的偏移量, FWHM 为半峰值全宽。由图 6、表 1、表 2 可知, 随着折射率 n 的递增, 金属光栅结构的共振波长会有更大的红移现象。通过计算金属纳米棒、金属光栅结构的灵敏度, 品质因数进行验证。

金属纳米棒在近红外波段的灵敏度为

$$S_1 = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = 600 \text{ nm/RIU} \quad (1)$$

品质因数为

$$FOM_1 = \frac{S_1}{FWHM_1} = 12.5 \quad (2)$$

金属光栅结构在近红外波段的灵敏度为

$$S_2 = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = 920 \text{ nm/RIU} \quad (3)$$

品质因数为

$$FOM_2 = \frac{S_2}{FWHM_2} = 40 \quad (4)$$

由公式(1)~(4)可知, 相较于金属纳米棒, 文献[8]所提出金属光栅波导结构, 本文所提出的金属光栅结构在不同环境中具有更好的灵敏度和更高的品质因数。

4. 总结

综上所述, 基于偶极等离子体激元共振原理和金属光栅 SPP 激发原理, 我们通过对分析研究了金属纳米棒以及金属光栅结构的阵列的透射现象。通过改变金属光栅结构参数可以实现金属光栅结构在近红外波段共振波长的可调谐, 而且能够实现窄带效应和偶极子共振处局域电场的大幅增强效果。同时我们设计的这种超材料谐振器具有较高的灵敏度($S = 920 \text{ nm/RIU}$)和较好的品质因数($FOM = 40$)。这种良好的传感能力可以对微小的折射率变化进行更灵敏的检测, 进一步提高光电器件的集成度和小型化, 从而在生物传感方面有潜在的应用。

参考文献

- [1] Barnes, W.L., Dereux, A. and Ebbesen, T.W. (2003) Surface Plasmon subwavelength Optics. *Nature*, **424**, 824-830. <https://doi.org/10.1038/nature01937>
- [2] Ozbay, E. (2006) Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions. *Science*, **311**, 189-193. <https://doi.org/10.1126/science.1114849>
- [3] Liu, H.T. and Lalanne, P. (2010) Light Scattering by Metallic Surfaces with Subwavelength Patterns. *Physical Review B*, **82**, 115418. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.115418>
- [4] Hoeppener, S., Maoz, R., Cohen, S.R., Chi, L., Fuchs, H. and Sagiv, J. (2002) Metal Nanoparticles, Nanowires, and Contact Electrodes Self-Assembled on Patterned Monolayer Templates: A Bottom-Up Chemical Approach. *Advanced Materials*, **14**, 5. [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(20020805\)14:15<1036::AID-ADMA1036>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/1521-4095(20020805)14:15<1036::AID-ADMA1036>3.0.CO;2-J)
- [5] Cubukcu, E., Kort, E.A., Crozier, K.B. and Capasso, F. (2006) Plasmonic Laser Antenna. *Applied Physics Letters*, **89**, 093120. <https://doi.org/10.1063/1.2339286>
- [6] 孟凡涛, 褚金奎, 韩志涛, 等. 亚波长金属光栅偏振器设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(4): 269-272.
- [7] 张英杰. 亚波长金属光栅滤波器设计及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014: 47-56.
- [8] 陆晓元. 周期纳米金属阵列结构的等离激元特性研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2016.
- [9] Sainidou, R. and García de Abajo, F.J. (2008) Plasmon Guided Modes in Nanoparticle Meta-Materials. *Optics Express*, **16**, 4499-4506. <https://doi.org/10.1364/OE.16.004499>
- [10] Liu, D., Wu, L.X., Liu, Q., *et al.* (2017) Optical Bistability Effect in SPP-Based Metallic Grating Containing Kerr Nonlinear Medium. *Modern Physics Letters B*, **31**, 55-60. <https://doi.org/10.1142/S0217984917501469>