

利用波矢滤波超表面实现超衍射成像

郭畅 张岩

Super diffraction imaging with wave vector selective metasurface

Guo Chang Zhang Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 147804 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.147804

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.147804>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小波变换在太赫兹三维成像探测内部缺陷中的应用

Wavelet transform in the application of three-dimensional terahertz imaging for internal defect detection

物理学报.2017, 66(8): 088701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.088701>

雪崩倍增 GaAs 光电导太赫兹辐射源研究进展

Research progress on avalanche multiplication GaAs photoconductive terahertz emitter

物理学报.2015, 64(22): 228702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228702>

太赫兹人工电磁媒质研究进展

Progress of terahertz metamaterials

物理学报.2015, 64(22): 228701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228701>

血凝素蛋白及抗体相互作用的太赫兹光谱主成分分析

Principal component analysis of terahertz spectrum on hemagglutinin protein and its antibody

物理学报.2015, 64(16): 168701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.168701>

相位补偿算法对提高太赫兹雷达距离像分辨率的研究

Improvement in the range resolution of THz radar using phase compensation algorithm

物理学报.2014, 63(14): 148701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.148701>

专题: 电磁波衍射极限

利用波矢滤波超表面实现超衍射成像*

郭畅 张岩†

(首都师范大学物理系, 北京市成像技术高精尖中心, 北京市超材料与器件重点实验室, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

(2017年5月17日收到; 2017年7月13日收到修改稿)

超衍射成像是当前光学领域的研究热点. 本文利用一种不对称分裂环超表面结构来实现超衍射成像, 该结构由上下两个不对称的金属环组成, 通过集体陷模共振可实现对入射光的波矢选择性透过. 当物体发出或反射的光照射到超表面上时, 入射角大于某一角度的入射光会被共振电场耦合吸收或反射, 只有低空间频率的光波可以通过, 从而减小衍射的影响, 实现超衍射成像. 数值模拟结果表明了这一方法的可行性.

关键词: 超材料, 太赫兹, 频率选择表面, 超衍射**PACS:** 78.67.Pt, 87.50.U-, 42.25.Bs**DOI:** 10.7498/aps.66.147804

1 引言

在过去20年中, 太赫兹(Terahertz, THz)成像技术得到了迅速的发展. 由于太赫兹辐射对样品的损伤远小于X光, 并且能穿透干燥的非极性介质, 在医学^[1]、通信^[2]、无损检测^[3]以及航空航天^[4]等领域都有很重要的应用. 但是由于太赫兹辐射的波长较大, 容易在传播中发生衍射, 使得太赫兹图像模糊不清, 需要经过后期处理才能得到高分辨率图像. 消除太赫兹波衍射过程的影响, 提高成像分辨率, 对太赫兹成像技术的发展十分必要.

当物体发射或反射的光经过衍射, 携带物体高频信息的光具有更大的波矢, 衍射的角度会更大, 因此, 一个点光源经过衍射就会形成一个衍射光斑. 传统的成像系统利用透镜收集衍射的高频信息, 然后重新组合得到图像, 如果收集的高频信息足够多, 物体就可以得到高精度的重建, 所以人们不断增加成像系统的数值孔径来获取更多的高频信息, 从而提高图像的分辨率. 但是我们可以从另一个方面来考虑超衍射成像. 物体的衍射是由于空间高频分量具有更大的衍射角, 如果可以设计一种器件, 去除衍射空间高频衍射模糊, 只保留与原结

构调制相同的低频信息, 也可以有效地提高成像质量. 研究者们提出了一种具有波矢选择性透过的超表面结构^[5], 这种结构只允许垂直入射到该表面的光透过, 而具有较大入射角的光会被结构反射或吸收. 本文尝试将这种波矢选择超表面应用到成像系统中, 利用其空间低通滤波的效果, 降低空间衍射的作用, 提高成像分辨率. 基于波矢选择超表面的超衍射成像原理如图1所示, 物体发出或者反射的光照射在超表面器件上. 由于超表面器件具有波矢选择性透过, 携带物体空间高频分量的光具有更大的波矢, 经过空间传播后照在超表面上具有更大的入射角, 结构将反射或吸收这部分能量, 只有垂直入射的可以高效地通过结构, 在成像平面上产生图像. 超表面结构有效地实现空间滤波, 缩小了成像系统的点脉冲响应函数, 从而达到提高成像分辨率的目的.

平面超材料即超表面, 是一种经过特殊设计的层状结构. 这种结构具有一个厚度远小于工作波长的金属薄层, 薄层中图案的特征尺度远小于工作波长. 随着人工结构设计和加工技术的发展, 人们已经通过超表面技术制备了具有负折射率^[6]、隐身^[7]、磁镜^[8]、非对称传输等^[9]各种特性的材料.

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CBA01702)、国家自然科学基金(批准号: 11474206, 91233202, 11374216, 11404224)、新世纪优秀人才项目(批准号: NCET-12-0607)和北京市教委科研项目(批准号: KM201310028005)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yzhang@cnu.edu.cn

超表面材料还会增强光与物质间的相互作用^[10], 产生相干辐射^[11,12]. 本文将利用超表面材料实现太赫兹波段的波矢选择性透过, 通过合理设计超表面中微结构的结构参数与分布, 实现对物体衍射光波的波矢滤波, 将具有强衍射的高频分量滤除, 缩小成像系统的点脉冲响应函数, 最终达到超衍射成像的目的. 数值模拟的成像效果证明了该方法的可行性.

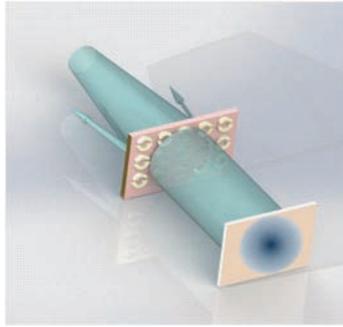


图1 基于波矢量滤波超表面实现超衍射成像系统示意图
Fig. 1. Schematic diagram of a super diffraction imaging system based on wave vector selective metasurface.

2 结构设计

通常的超表面材料关注的是单个单元的个体共振, 相邻单元相距较远, 单元间的耦合非常微弱. 当单元间的距离变小, 相邻单元间电磁耦合变强^[13], 超表面的响应光谱就不再由单元个体共振来决定, 激发光的入射角度变得非常重要, 此时电磁响应光谱由单元激励产生的集体模式和空间相干模式决定^[14]. 本文选择的超表面结构是阵列排布的不对称分裂环矩阵, 周期性排列在介质基底上, 阵列周期 $d = 100 \mu\text{m}$. 单元结构如图 2(a) 所示, 为一对不同长度的金属环, 半径为 $40 \mu\text{m}$, 金属丝宽为 $10 \mu\text{m}$, 上下两个圆弧分别为左右对称的 140° 和 150° . 器件的工作波段为太赫兹波. 利用基于时域有限差分 (FDTD) 法的 FDTD solution 软件对平面波经过该结构的传播特性进行了计算. 计算时金属为完美电导体. 样品选用硅基底, 在太赫兹波段的折射率为 3.4. 光源在基底前 $1000 \mu\text{m}$ 处, 光源

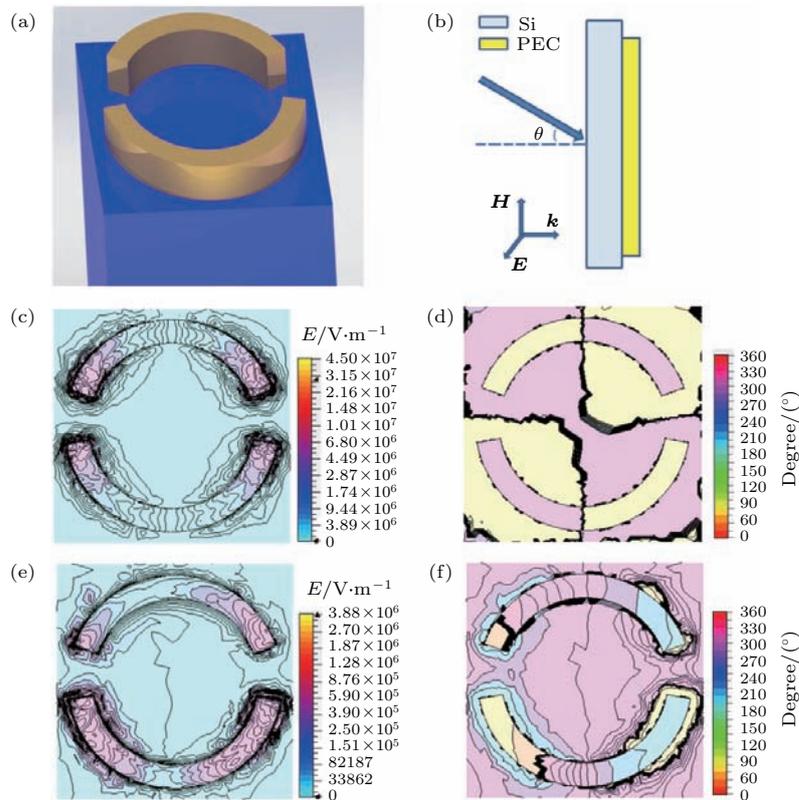


图2 (a) 不对称分裂环结构立体示意图; (b) 不对称分裂环结构侧面示意图; (c) 垂直入射时的电场分布; (d) 垂直入射时的位相分布; (e) 倾斜入射时的电场分布; (f) 倾斜入射时的位相分布

Fig. 2. (a) Schematic of asymmetrically split ring; (b) side view of the structure; (c) field and (d) phase distributions of wave vector selective metasurface for normally incident wave; (e) field and (f) phase distributions for obliquely incident wave.

面积为 $100 \mu\text{m} \times 3000 \mu\text{m}$, 以高斯光束垂直照射超表面, 入射光的偏振方向平行于环的分裂方向. 图 2(b) 为图 2(a) 的顶面示意图, 其中 θ 为入射角. 波阵面模拟区域是 $12800 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 2900 \mu\text{m}$.

在不同倾斜角度入射的照明光照射下, 所选超表面结构的频谱响应如图 3 所示. 可以发现结构中产生了窄带共振, 即频率选择. 由于超分子结构的对称性破缺, 周期性自由空间耦合产生了陷模, 继而由陷模激励产生了窄带共振. 图 3 中实线为垂直入射时透射光的频谱, 虚线和点划线分别是入射角为 32° 和 56° 时的归一化透过幅度. 当照明光垂直入射时, 超表面发生了明显的共振, 共振频率为 0.456 THz . 随着入射角度的增大, 共振峰产生了明显的蓝移. 为了获得最好的波矢选择特性, 工作频率设定为 0.454 THz . 可以看到, 随着入射角从 0° 增加到 56° , 0.454 THz 处的透过率明显下降, 归一化后透过率由 0.91 降低到 0.087 . 图 2(c), (d), (e) 和 (f) 分别给出了垂直照明和 56° 倾斜照明下, 超表面结构上一个周期单元内的电场分布以及位相分布. 电场单位为 V/m , 位相单位为 $(^\circ)$. 在图 2(c) 和图 2(d) 中的垂直照明情况下, 单元结构中的上下两个金属圆弧以相同的振幅但相反的位相进行振荡. 这个电流结构引起的电磁散射非常微弱, 从而减少了相邻单元之间的耦合以及辐射损失. 因此感应电流形成了陷模共振模式, 可以达到一个非常高的 Q 值, 产生很强的振荡 [15]. 当入射光频率稍稍偏离共振峰时, 如图 2(e) 和图 2(f) 所示, 不对称分裂环的上下两个圆弧中的电流不再反相振荡, 且其中一个圆弧中的激励大于另一个 [16], 结构便偏离了陷模共振模式, 透过率大大降低.

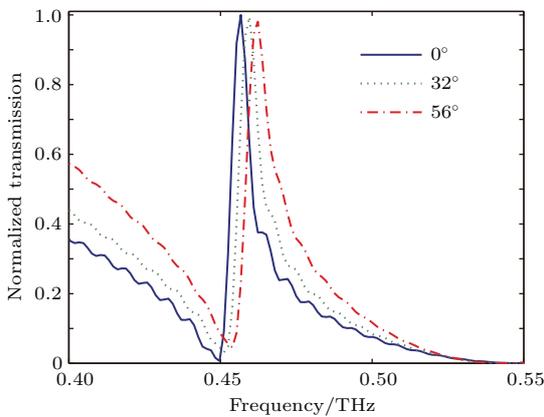


图 3 集体陷模共振时的透射光在不同入射角时的频谱
Fig. 3. Transmission spectrum of the selected structure in collective trapped mode with different incident angles.

为了验证不对称分裂环结构对入射光的矢量滤波效果, 本文模拟了单一频率光源对超表面结构进行照明时, 透射振幅随入射角度变化. 照明光频率为 0.454 THz . 如图 4 所示, 可以看到透射振幅呈现出明显的低通特性, 透过率随着入射角的变大而减小. 当入射角大于 30° 时, 透射振幅降低到垂直入射时振幅的 60% , 强度降为峰值的 36% 以下. 数值模拟表明, 当结构更加不对称时, 超材料对角度的选择性也会增加.

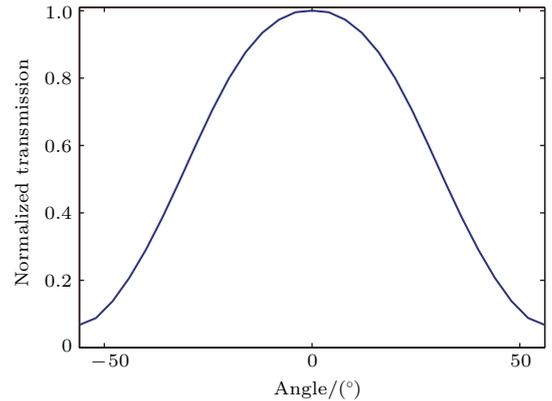


图 4 集体陷模共振时, 0.454 THz 透射光幅值随入射角的变化.

Fig. 4. Transmission of 0.454 THz light for different incident angles.

本文选用的不对称分裂环结构只有在入射光偏振方向平行于分裂口, 即 TM 偏振波激发时才能实现矢量滤波效应, 这是因为 TE 偏振波入射时产生的是磁场耦合, 而 TM 偏振波入射时产生的是电场耦合. 当入射光为 TE 偏振时, 此时磁偶极子间相互作用能为

$$\langle U^m \rangle \propto \frac{m_z^2}{d^3} \cos(k_{//}d), \quad (1)$$

其中 d 为单元结构的周期长度, m_z 为光激发的磁偶极子强度. 在 $k_{//} = 0$ 时, $\cos(k_{//}d)$ 取最大值. 随着入射角的增大, $k_{//}$ 会不断变大, 而磁偶极子间相互作用力以及 TE 波激发的集体陷模能量则会逐渐减小. 当入射光为 TM 偏振时, 由于其垂直入射时超分子间吸引力耦合到的能量已经是最小值, 随着入射角的增大, 耦合到的由 TM 波激发的陷模能量只会不断增加, 此时就会引起与陷模有关的透射峰的蓝移.

可以看到, 单元结构间的强耦合导致了一个“视野狭窄”现象, 即在光的传播方向上产生一个很窄的连续透明窗口. 这种效应一般会伴随对入射波前的“矫正”. 没有任何空间调制或自适应反馈的初

始球面波在通过波矢选择超表面结构后, 就会变成平行于超表面结构的平面波. 这种效应与入射波前的曲率无关. “视野狭窄”现象可以被理解为波矢滤波. 事实上, 在相同单元组成的亚波长周期平面阵列中, 由垂直入射的平面波激发的单元的振荡相位相同, 在一个周期内的耦合最强, 因此透过率最高. 任何非垂直入射的平面波都会令单元产生沿材料表面线性变化的位相延迟. 这一相位延迟会减小耦合强度, 并改变表面等离子体共振的能量. 因此, 透明窗口会移动到不同的频率, 而超表面材料变成不透明, 从而实现波矢选择性滤波.

3 超衍射成像

为进一步说明波矢选择超表面的应用, 我们利用上述的超表面结构实现一维超衍射成像. 在超表面结构前 1000 μm 处设置腰斑半径为 60 μm 的高斯光源, 并在超表面结构后 400 μm 处设置监视器, 利用 FDTD solution 软件计算监视器平面上的电场分布, 结果如图 5 所示. 在没有使用超表面结构时, 如图 5(a) 所示, 由于衍射效应, 光斑的边缘

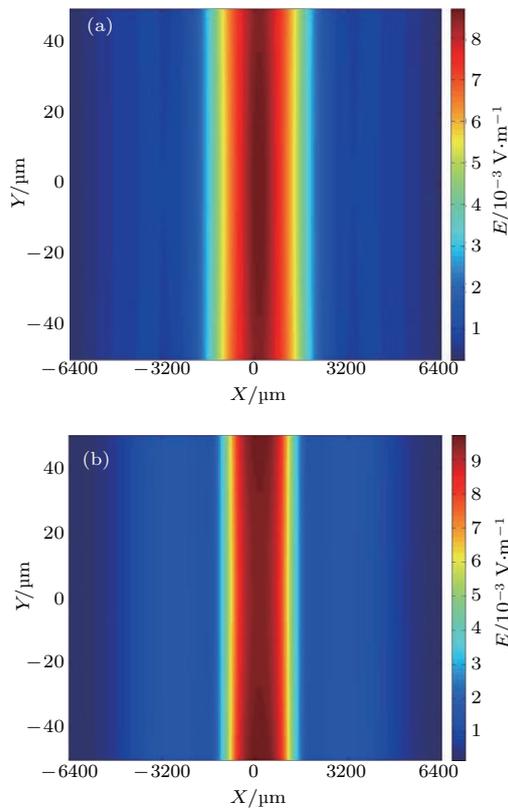


图5 没有 (a) 及具有 (b) 波矢选择超表面时透射光振幅的对比.

Fig. 5. Comparison of transmission between (a) without and (b) with wavevector selective metasurface.

变得不再清晰, 电场分布明显增大. 使用超表面结构后, 监视器平面上的电场分布如图 5(b) 所示. 由于单元间的集体陷模共振, 大角度入射的光都无法透过, 因此光源的大部分散射光经过超表面结构后都被吸收和反射. 透射光的波矢基本都是垂直于超表面, 所以原入射光产生的散射斑经过超表面结构的调制后尺寸明显变小且边缘清晰.

为了更直观地对比波矢选择超表面结构的效果, 我们在图 5(a) 和图 5(b) 中分别提取 $y = 0$ 时的电场分布, 进行归一化对比, 如图 6 所示. 图 6 中虚线为没有使用超表面结构时 x 轴上的电场分布, 实线为使用超表面结构后 x 轴上的电场分布. 可以明显看出, 当入射光经过波矢选择超表面结构后, 透射光的半高宽明显变窄, 由 2800 μm 减到了 2150 μm , 分辨率提高了 23.2%. 并且边缘处电场分布有了一个显著的减弱, 边缘陡峭度得到了提高. 数值模拟结果证明了具有波矢选择超表面结构的超衍射成像功能.

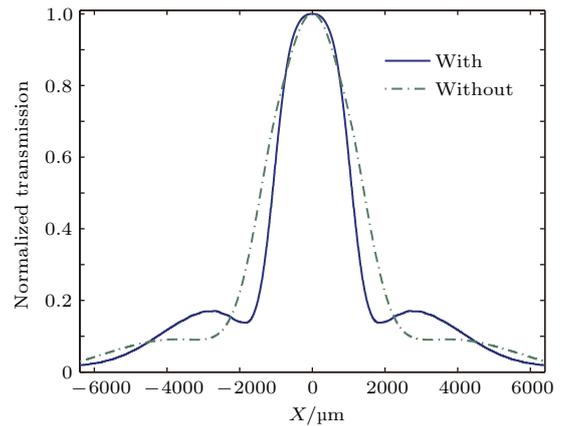


图6 有、无波矢选择超表面结构时 x 轴上的电场分布
Fig. 6. Comparison of transmission light between with and without wavevector selective metasurface when $y = 0$.

4 结 论

本文通过合理设计超表面材料基本单元间的电磁耦合, 实现波矢选择超表面, 并将这一结构用于超衍射成像中. 这种特殊设计的超表面结构可以滤除照明光中具有大入射角的平面波分量, 仅使入射光波中接近垂直入射的分量通过. 这种效应使得任何没有空间调制或自适应反馈的波前在经过超表面材料之后都变成了近似平面波. 数值模拟计算表明, 这种波矢选择超表面可以克服衍射影响, 提高系统的分辨率. 还可以利用这一技术来阻挡杂散

光, 或者环境中露水、灰尘、划痕等发出的散射光, 进而改善观测仪器的性能.

参考文献

- [1] Fitzgerald A J, Berry E, Zinov'ev N N, Homer-Vanniasinkam S, Miles R E, Chamberlain J M, Smith M A 2003 *J. Biol. Phys.* **29** 123
- [2] Bergman D J, Stockman M I 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 027402
- [3] Zimdars D, Valdmanis, J A, White, J S, Stuk G, Williamson S, Winfree W P, Madaras E I 2005 *AIP Conf. Proc.* **760** 570
- [4] Cook D J, Hochstrasser R M 2000 *Opt. Lett.* **25** 1210
- [5] Fedotov V A, Wallauer J, Walther M, Perino M, Papasimakis N, Zheludev N I 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e306
- [6] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788
- [7] Fedotov V A, Mladyonov P L, Prosvirnin S L, Zheludev N I 2005 *Phys. Rev. E* **72** 056613
- [8] Tassin P, Zhang Lei, Koschny Th, Economou E N, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 053901
- [9] Fedotov V A, Mladyonov P L, Prosvirnin S L, Rogacheva A V, Chen Y, Zheludev N I 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 167401
- [10] Zhao J, Zhang C, Braun P V, Giessen H 2012 *Adv. Mater.* **24** OP247
- [11] Bitzer A, Merbold H, Thoman A, Feurer T, Helm H, Walther M 2009 *Opt. Express* **17** 3826
- [12] Adamo G, Ou J Y, So J K, Jenkins S D, Angelis F D, MacDonald K F, Fabrizio E D, Ruostekoski J, Zheludev N I 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 217401
- [13] Papasimakis N, Fedotov V A, Fu Y H, Tsai D P, Zheludev N I 2009 *Phys. Rev. B* **80** 041102
- [14] Jenkins SD, Ruostekoski J 2012 *Phys. Rev. B* **86** 085116
- [15] Luk'yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, Halas N J, Nordlander P, Giessen H, Chong C T 2010 *Nature Mater.* **9** 707
- [16] Plum E, Fedotov V A, Zheludev N I 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 131901

SPECIAL ISSUE—Diffraction limit of electromagnetic waves

Super diffraction imaging with wave vector selective metasurface*

Guo Chang Zhang Yan[†]

(Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Key Laboratory of Metamaterials and Devices, Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Technology, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

(Received 17 May 2017; revised manuscript received 13 July 2017)

Abstract

Super diffraction imaging has been a research hotspot for a long time. We realize the super diffraction imaging with a metasurface structure, which is consisted of asymmetrically split rings. Based on the wave vector selectivity of the metasurface, radiation can be transmitted through it only in a narrow range of the incident angular. The metasurface acts as a high frequency spatial filter, reduces the diffraction effect, and obtains the super diffraction resolution. Numerical simulation results demonstrate the validity of this method.

Keywords: metamaterials, terahertz, frequency selective surface, super-diffraction

PACS: 78.67.Pt, 87.50.U-, 42.25.Bs

DOI: [10.7498/aps.66.147804](https://doi.org/10.7498/aps.66.147804)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CBA01702), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11474206, 91233202, 11374216, 11404224), the Program for New Century Excellent Talents in University, China (Grant No. NCET-12-0607), and the Scientific Research Project of Beijing Education Commission, China (Grant No. KM201310028005).

[†] Corresponding author. E-mail: yzhang@cnu.edu.cn