(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2018 年 1 月 18 日 (18.01.2018)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2018/010241 A1

(51) 国际专利分类号:
H01L 43/12 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2016/093987

(22) 国际申请日: 2016 年 8 月 8 日 (08.08.2016)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201610553896.5 2016年7月14日 (14.07.2016) CN

(71) 申请人: 华中科技大学(HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国湖北省武汉洪山珞喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。

(72) 发明人: 程晓敏(CHENG, Xiaomin); 中国湖北省武汉洪山珞喻路1037号, Hubei 430074 (CN)。 王升(WANG, Sheng); 中国湖北省武汉洪山珞喻路1037号, Hubei 430074 (CN)。 关夏威(GUAN, Xiawei); 中国湖北省武汉洪山珞喻路1037号, Hubei 430074 (CN)。 连晨(LIAN, Chen); 中国湖北省武汉洪山珞喻路1037号, Hubei 430074 (CN)。 黄婷(HUANG, Ting); 中国湖北省武汉洪山珞喻路1037号, Hubei 430074 (CN)。 缪向水(MIAO, Xiangshui); 中国湖北省武汉洪山珞喻路1037号, Hubei 430074 (CN)。

(74) 代理人: 华中科技大学专利中心 (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PATENT AGENCY CENTER); 中

WO 2018/010241 A1

(54) **Title:** SPIN WAVE TRANSMISSION CONTROL METHOD

(54) 发明名称: 一种控制自旋波传输的方法

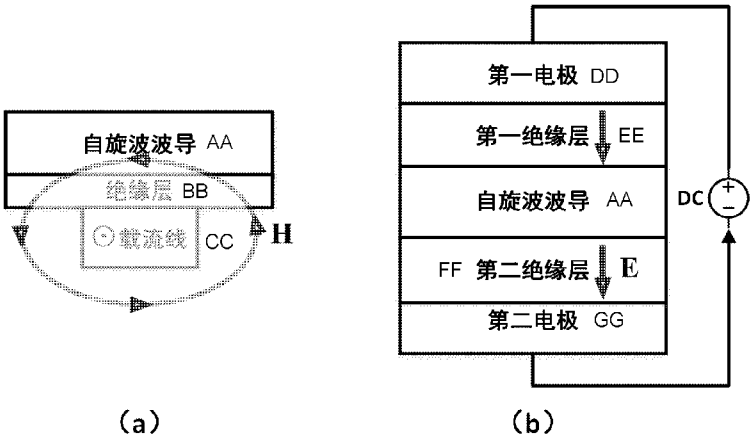


图 1

AA Spin wave waveguide
BB Insulating layer
CC Current carrying line
DD First electrode
EE First insulating layer
FF Second insulating layer
GG Second electrode

(57) **Abstract:** Disclosed in the present invention is a method for controlling spin wave transmission, the invention relating to the field of spintronics. In the present method, the internal exchange intensity of a magnetic waveguide material can be effectively changed by applying an electric field to a spin wave waveguide structure. By controlling the size of the exchange constant by means of an electric field, a spin wave chromatic dispersion relationship can be regulated, thereby realizing control of spin wave transmission. The present invention controls exchange by means of an electric field, and can realize ultra-low power, locally precise control of spin wave

[见续页]

国湖北省武汉洪山珞喻路1037号华中科技大学东一楼340, Hubei 430074 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护)：AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

transmission, making possible practical applications of magnonic devices compatible with ultra-low power and CMOS processes.

(57) 摘要：本发明公开了一种控制自旋波传输的方法，该发明属于自旋电子学领域。本方法通过在自旋波波导结构上施加电场，可以有效改变磁性波导材料内部交换作用强度。通过电场控制交换常数大小，可以达到调控自旋波色散关系进而实现控制自旋波传输的目的。本发明通过电场控制交换作用，可以超低功耗实现对自旋波传输的局部精确控制，为超低功耗、CMOS工艺流程兼容的磁振子学器件实际应用提供了可能。

一种控制自旋波传输的方法

【技术领域】

本发明属于自旋电子技术领域，更具体地，涉及一种控制自旋波传输的方法。

【背景技术】

磁振子学（magnonics）以其独特的优势被公认为是后 COMS 时代最具潜力的信息传输和处理技术。在磁振子学中，承载信息的是电子自旋的集体进动即自旋波而非耗散性电荷移动。原理上讲，磁子（自旋波的量子）允许在不移动任何实物粒子的前提下实现信息的传输和处理，因而是没有焦耳热耗散的。在磁振子学中，信息可以编码在自旋波的振幅和相位，因而对自旋波传播的有效控制成为推进磁振子学实际应用的核心所在。近年来，涌现了一大批基于自旋波振幅或相位的逻辑器件，然而，到目前为止，其绝大多数逻辑功能实现依赖于电流的奥斯特场来改变自旋波色散关系以实现对自旋波传输的控制。

图 1（a）为一种利用磁场控制自旋波传输的典型结构，其利用载流线中电流产生的附加奥斯特场改变有效偏置场的大小，从而实现对自旋波色散关系的调控以控制自旋波传输。

然而，磁场控制具有一些固有的缺陷和问题：首先，通过载流线产生局部奥斯特场将会使器件结构复杂化（特别是在弯曲波导的设计中），而载流线持续耗散系统功率将会抵消磁振子学器件的低功耗优势。其次，局域奥斯特场的空间分布不均匀性和相邻波导分支的杂散场将会导致系统的低可靠性和高误码率。因而，如何通过简单的设计高效节能地实现自旋波传输的控制，仍然为本领域的一个技术难点。

【发明内容】

针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了基于电场的自旋波传输控制方法，通过施加电场，调节磁性波导材料内部交换作用强度，进而调控自旋波的色散关系，实现对自旋波传输的电场精确调控，由此解决传统磁场控制手段存在的设计复杂、高能耗和系统可靠性低下等技术问题。

为实现上述目的，本发明提供了一种电场控制自旋波传输的方法，所述方法包括，在自旋波波导结构上施加电场，通过改变电场强度可以有效改变磁性波导材料内部交换作用强度。通过电场控制交换常数大小，可以调控自旋波色散关系，改变自旋波的波数、相速、波长和群速，从而实现控制自旋波传输的目的。

优选地，所述电场可以通过自旋波波导结构引入：第一电极/第一绝缘层/自旋波波导材料/第二绝缘层/第二电极，或第一电极/第一绝缘层/自旋波波导材料/第二电极，或第一电极/自旋波波导材料/第二绝缘层/第二电极，或第一电极/自旋波波导材料/第二电极，通过在所述两电极间施加电压可以引入法向电场，调节电压可以改变电场强度。理论上，电场可以沿任意方向施加，但当电场垂直于自旋波波导平面时调控效应最为显著。

具体地，增大第一电极和第二电极间电压，沿自旋波波导平面法向的电场强度随之增大，波导材料内部交换作用强度相应减弱，从而沿波导传播的自旋波的波数增大，波长减小，相速增大。换言之，自旋波的传播参数随电场强度变化而单调变化，这种电场调控效应可以用于实现对自旋波传输的控制。

优选地，所述波导材料可以是铁磁金属单质，或铁磁合金，或稀磁半导体，或磁性绝缘体，或半金属材料，或多铁材料。

优选地，所述自旋波激发模式可以是反向体波（the forward volume wave，FV）或前向体波（the backward volume wave， BV）或表面波（surface

wave）结构。具体而言，反向体波中，材料沿面内磁化，且外加偏置磁场$\vec{H}_0$平行于波矢$\vec{k}$；前向体波中，外加偏置磁场$\vec{H}_0$垂直于波导平面施加，波矢$\vec{k}$方向在面内；表面波中，外加偏置磁场$\vec{H}_0$和波矢$\vec{k}$方向均在面内且互相垂直，其群速度$\vec{v}_g$和相速度$\vec{v}_p$具有相同的方向。

总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比，具有以下有益效果：

（1）电流的奥斯特场控制方式属于“常开型”，在器件工作过程中，电流持续流过产生磁场的载流线产生焦耳热；而在电场控制模式中器件属于“常关型”，除去控制状态切换过程中的电容充放电功耗，器件几乎不从系统吸收额外功耗。因而通过电场控制自旋波传输可以规避传统磁场控制所固有的高能耗、低功效问题；

（2）通过平行板电容器引入电场可以适应复杂的波导形状设计需求，获得全局均一的控制，亦可实现局部精确控制；而在传统磁场控制中电流的奥斯特场的空间分布具有非均匀性，而且相邻控制磁场间易产生相互串扰。因而采用电场控制大大减小了磁振子学器件设计的复杂度；

（3）采用电场控制可以借鉴成熟的 CMOS 电场控制技术，同时可以促进磁振子学器件与 CMOS 器件的兼容性，加速推进磁振子学的实用化进程。

【附图说明】

图 1（a）为传统的奥斯特场控制自旋波传输的结构原理示意图，图 1（b）为本发明提供的电场控制自旋波的结构原理示意图。

图 2 是自旋波的三种激发模式原理示意图：（a）反向体波，（b）前向体波，（c）表面波。

图 3（a）为本发明实施例 1 中 VASP 模拟的模型原理图，图 3（b）为本发明实施例 1 中模型在 0.0 （黑色曲线） 和 5 V/nm （灰色曲线）条件下面平均电势分布。

图 4 为本发明实施例 1 中交换常数随电场强度变化曲线。

图 5 为本发明实施例 2 中微磁模拟模型原理图。

图 6 为本发明实施例 2 中自旋波的空间域特性，图（a）-（f）分别对应 0， 1 V/nm，2 V/nm，3 V/nm，4 V/nm，5 V/nm。

图 7（a）为表面自旋波波数 k 和波长 λ 随电场变化曲线，图 7（b）为自旋波色散关系曲线（交换过 xy 轴），从下到上各分支依次对应 0，1 V/nm，2 V/nm，3 V/nm，4 V/nm，5 V/nm 情形。

【具体实施方式】

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

本发明提供了一种电场控制自旋波传输的方法，通过改变施加在自旋波波导结构上的电场强度可以有效改变磁性波导材料内部交换作用强度。通过电场控制交换常数大小，可以达到调控自旋波色散关系进而实现控制自旋波传输的目的。

本发明提供的调控自旋波传输的方法具体为：通过在自旋波波导结构上施加电场来调控自旋波色散关系，实现对自旋波传输的控制。

其中，对自旋波传输的控制具体包括：对自旋波的波长、相速、波数或群速度的控制。具体地，增大第一电极和第二电极间电压，沿自旋波波导平面法向的电场强度随之增大，波导材料内部交换作用强度相应减弱，从而沿波导传播的自旋波的波数增大，波长减小，相速增大。

在本发明实施例中，电场可以沿任意方向施加，但当电场垂直于自旋波波导平面时调控效应最为显著。优选地，施加在所述自旋波波导结构上的所述电场的方向为：沿自旋波波导平面法向。

在本发明实施例中，自旋波波导结构包括：依次设置的第一电极层、自旋波波导材料层和第二电极层。

作为本发明的一个实施例，自旋波波导结构还包括：设置在所述第一电极层与所述自旋波波导材料层之间的第一绝缘层。

作为本发明的一个实施例，如图 1（b）所示，自旋波波导结构还包括：设置在所述第二电极层与所述自旋波波导材料层之间的第二绝缘层。

其中，自旋波波导材料层的材料为铁磁金属单质、铁磁合金、稀磁半导体、磁性绝缘体、半金属材料或多铁材料。

图 2 示出了，自旋波的三种激发模式原理示意图：（a）反向体波，（b）前向体波，（c）表面波；自旋波激发模式可以是反向体波（the forward volume wave，FV）或前向体波（the backward volume wave， BV）或表面波（surface wave）结构。具体而言，反向体波中，材料沿面内磁化，且外加偏置磁场$\vec{H}_0$平行于波矢$\vec{k}$；前向体波中，外加偏置磁场$\vec{H}_0$垂直于波导平面施加，波矢$\vec{k}$方向在面内；表面波中，外加偏置磁场$\vec{H}_0$和波矢$\vec{k}$方向均在面内且互相垂直，其群速度$\vec{v}_g$和相速度$\vec{v}_p$具有相同的方向。

下面通过具体实施例的阐述，以进一步说明本发明实质性特点和显著的进步，但本发明绝非仅限于实施例。

实施例 1

本实施例通过第一性原理计算揭示了磁性波导在沿波导平面法向电场作用下交换作用强度变化规律。

计算采用模型如图 3（a）所示，为 3 层 bcc Fe（001）原子层，其真空层厚度为 20 Å，沿 c 轴方向的电场通过偶极层方法引入，施加电场强度范围为-5 V/ nm 到 5 V/ nm。计算基于第一性原理 VASP 软件包进行，交换积分 J 通过反铁磁态和铁磁态的能量差推导得出。

为简化描述，将图 3（a）中铁原子从左到右依次标记为 1，2，3。仅

考虑最近邻交换作用，可以得到铁磁态能量 E_F 和反铁磁态能量 E_{AF} 分别为：

$$E_F = E_{\mathrm{nm}} - 8JS_1S_2 - 8JS_2S_3$$

$$E_{AF} = E_{\mathrm{nm}} + 8JS_1^*S_2^* + 8JS_2^*S_3^*$$

其中 E_{nm} 为总能量的非磁性部分，J 是交换积分，S_i（S_i^*）是铁磁态（反铁磁态）结构原子 i 的总自旋（以 $\hbar$ 为单位）。

由上述两式可得，交换积分的表达式 $J = \dfrac{E_{AF} - E_F}{8(S_1^*S_2^* + S_2^*S_3^* + S_1S_2 + S_2S_3)}$；唯象参数交换常数 A 可以通过以下公式与海森堡模型中微观参数交换积分 J 建立联系，对于体心立方结构 $A = 2JS^2/a$；其中 a 为晶格常数，交换劲度 D 为 $D = 2JSa^2$；模拟所得交换积分 J，交换常数 A，交换劲度 D 随电场变化结果如下表 1 所示。

表 1

电场强度 （V/ nm）	J （meV）	A （$\times 10^{-12}$ J/m）	D （meV·Å^2）
0	9.985	18.520	225.432
±1	9.674	17.945	218.248
±2	8.757	16.204	196.934
±3	7.049	13.155	157.951
±4	4.666	8.776	103.659
±5	1.817	3.444	40.000

如图 4 中第一性原理计算结果所示，结果表明，3 层 Fe（001）薄膜的交换常数在垂直于薄膜表面的电场作用下确实发生了变化。相比于已知的线性磁电效应例如电场调制磁各向异性、电场调制饱和磁化强度，电场对交换常数表现出十分明显非线性调制作用。具体而言，计算所得零场交换常数为 1.85×10^{-11}J/m，与从 bcc Fe 的居里温度推导所得值（1.88 μerg/cm）

完美契合。随着外加电场强度的增加，交换常数快速减小。特别地，当外加电场强度为 5 V/ nm 时，交换常数减小了约 80%。

由此说明，通过外加电场实现对交换作用强度的调制是可行的，而且交换常数的电场调制效应是十分显著的。

实施例 2

本实施例通过微磁模拟揭示了电场调制交换作用对自旋波传输的影响，自旋波波数、相速、波长相应的变化规律，证实利用电场调控交换常数控制自旋波传输的可行性。

模拟采用基于 LLG 方程的 OOMMF 软件包进行，计算特别考虑了电场调制交换作用效应：

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\frac{|\gamma|}{1+\alpha^2}\vec{m}\times(\vec{H}_{eff} + \alpha\vec{m}\times\vec{H}_{eff}) \qquad (6)$$

其中 $\vec{m}=\vec{M}/M_S$ 为归一化磁化矢量，M_s 为饱和磁化强度，α 为吉尔伯特衰减因子，γ 为吉尔伯特旋磁比。$\vec{H}_{eff}$ 为有效场，包括海森堡交换场，磁各向异性场，退磁场和外加偏置磁场，可以表示为：

$$\vec{H}_{eff} = \frac{2A(\vec{E})}{M_s}\nabla^2\vec{m} + \frac{2K}{M_s}(\vec{m}\cdot\vec{c})\vec{c} + \vec{H}_d + \vec{H}_{ext}$$

其中交换常数 $A(\vec{E})$ 是电场依赖的。计算采用的模型如图 5 所示，模拟了电场对表面波传输的影响，其中波导为 500 × 500 × 0.2866 nm^3 的薄膜平面波导，沿 y 轴方向施加偏置磁场大小 $\mu_0 H_0$=1 T，角频率为 4×10^{11} rad/s 的正弦微波源用于激发沿 x 方向传播的表面波，模拟采用了 Fe 的典型参数值：

（1）饱和磁化强度 $M_S = 1.75 \times 10^6$ A/m；

（2）吉尔伯特衰减因子 $\alpha = 0.03$；

（3）吉尔伯特旋磁比 γ=2.211 × 10^5m/（A·s）；

（4）各向异性常数 K=0（忽略了立方晶系 Fe 相对较小的磁各向异性能）。

零场和 5 V/ nm 电场下铁的临界交换长度$l_{ex}=\sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_S^2}}$分别为 3.1nm 和 1.3nm，由于最大网格单元尺寸不允许超过临界交换长度，离散化网格尺寸选为 1 nm × 1 nm × 0.2866 nm，并且在 xy 平面内应用了二维周期性边界条件。

法向电场作用下表面自旋波的空间域特性如图 6（a-f）所示，显然随着电场强度从 0 增加到 5 V/nm 波数相应有所增加。换言之，表面自旋波的相速和波长可以通过外加电场改变。特别地，相比于零场，5 V/nm 的电场可以将自旋波波长减半。

考虑交换作用后，在有限尺寸铁磁薄膜内表面自旋波色散关系的解析形式为$\omega=[\omega_{ex}\cdot(\omega_{ex}+\omega_M)+\frac{\omega_M^2}{4}(1-e^{-2kd})]^{1/2}$，其中$\omega_{ex}=\omega_0+\lambda_{ex}\omega_M k^2$，$\omega_0=\gamma\mu_0 H_0$，$\omega_M=\gamma\mu_0 M_s$，$\lambda_{ex}=\frac{2A(E)}{\mu_0 M_S^2}$，$d$ 为薄膜厚度。图 7（b）为考虑了电场调制交换常数效应后的色散关系曲线。随着外加电场强度增加，交换作用减弱，在 ω-k 视图中色散曲线分支相应下移。对于给定的载波频率，这将导致波数增加。详细的模拟计算结果如表 2 所示。

表 2

电场强度（V/ nm）	λ（nm）	k（$\times 10^9$ rad/m）	k_{th}（$\times 10^9$ rad/m）
0	45.170	0.139	0.139
±1	44.768	0.140	0.141
±2	43.300	0.145	0.148
±3	38.217	0.164	0.164
±4	29.967	0.210	0.199
±5	19.621	0.320	0.313

由此说明，通过外加电场调制交换作用强度可以有效调控表面自旋波色散关系，实现对自旋波波数、相速、波长和群速的有效调控，因而外加电场可以有效控制表面自旋波传输。

实施例 3

偏置磁场在面内沿 x 方向，其它同实施例 2。结果表明，通过外加电场调制交换作用强度可以有效调控反向体波的色散关系，实现对自旋波波数、相速、波长和群速的有效调控，因而外加电场可以有效控制反向体波的传输。

实施例 4

磁场垂直于波导平面沿 z 方向施加，其它同实施例 2。，通过外加电场调制交换作用强度可以有效调控前向体波的色散关系，实现对自旋波波数、相速、波长和群速的有效调控，因而外加电场可以有效控制前向体波的传输。

本领域的技术人员容易理解，以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求

1、一种控制自旋波传输的方法，其特征在于，通过在自旋波波导结构上施加电场来调控自旋波色散关系，实现对自旋波传输的控制。

2、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述对自旋波传输的控制具体包括：对自旋波的波长、相速、波数或群速度的控制。

3、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，施加在所述自旋波波导结构上的所述电场的方向为：沿自旋波波导平面法向。

4、如权利要求 1-3 任一项所述的方法，其特征在于，所述自旋波波导结构包括：依次设置的第一电极层、自旋波波导材料层和第二电极层。

5、如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述自旋波波导结构还包括：设置在所述第一电极层与所述自旋波波导材料层之间的第一绝缘层。

6、如权利要求 4 或 5 所述的方法，其特征在于，所述自旋波波导结构还包括：设置在所述第二电极层与所述自旋波波导材料层之间的第二绝缘层。

7、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述施加电场会改变波导材料内部的交换作用强度，从而改变自旋波色散关系，实现对自旋波传输的控制。

8、如权利要求 4-7 任一项所述的方法，其特征在于，所述自旋波波导材料层的材料为铁磁金属单质、铁磁合金、稀磁半导体、磁性绝缘体、半金属材料或多铁材料。

9、如权利要求 1-8 任一项所述的方法，其特征在于，自旋波的激发方式为前向体波模式、反向体波模式或表面波模式。

WO 2018/010241 PCT/CN2016/093987

附 图

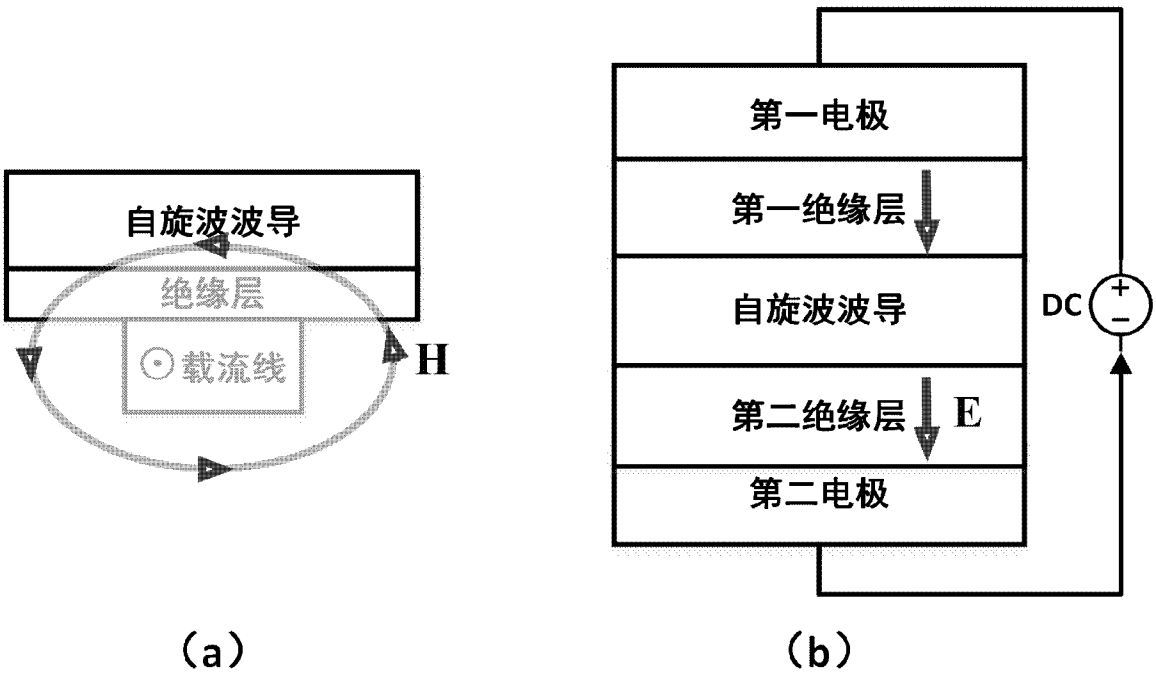


图 1

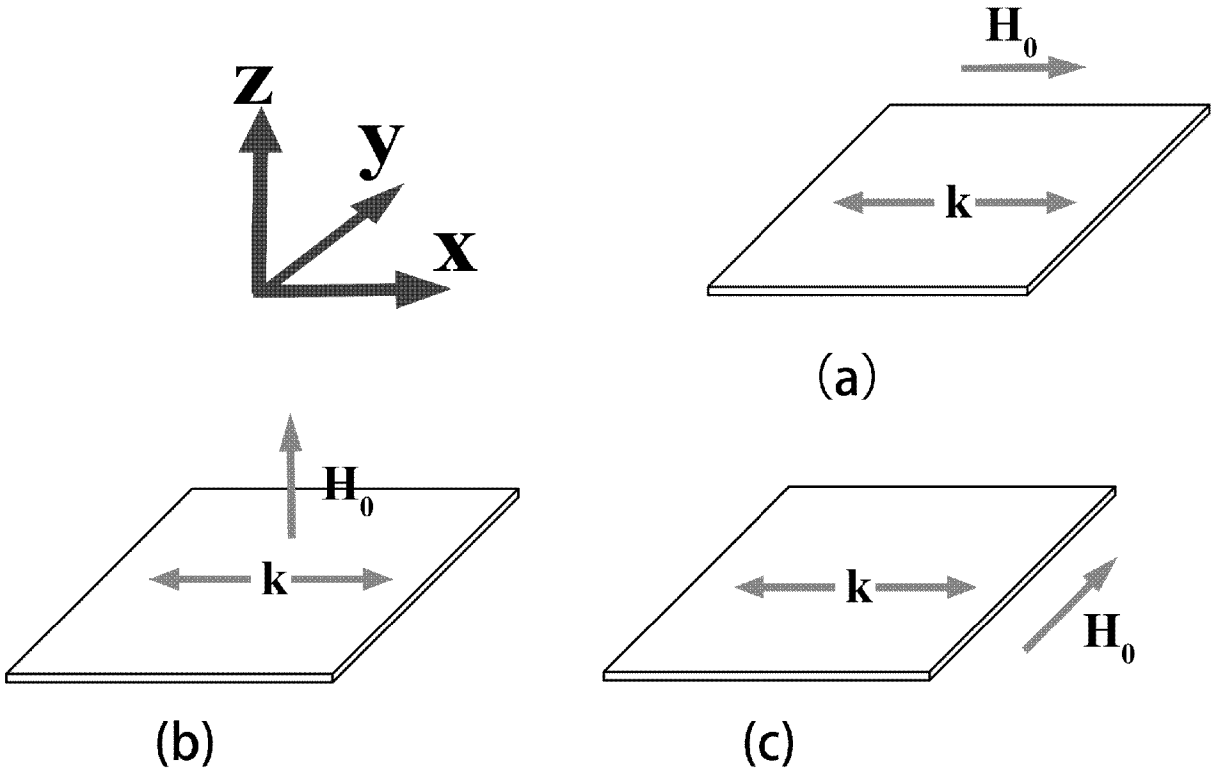


图 2

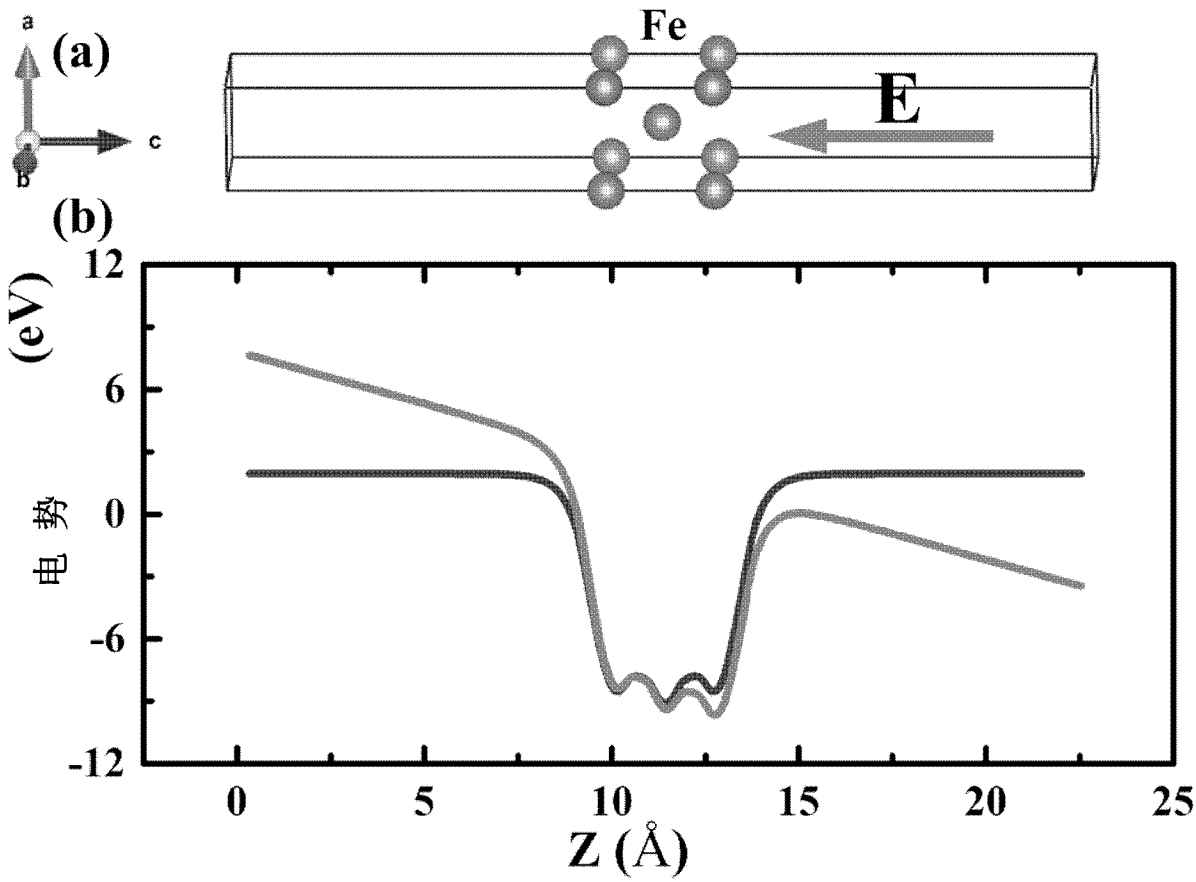


图 3

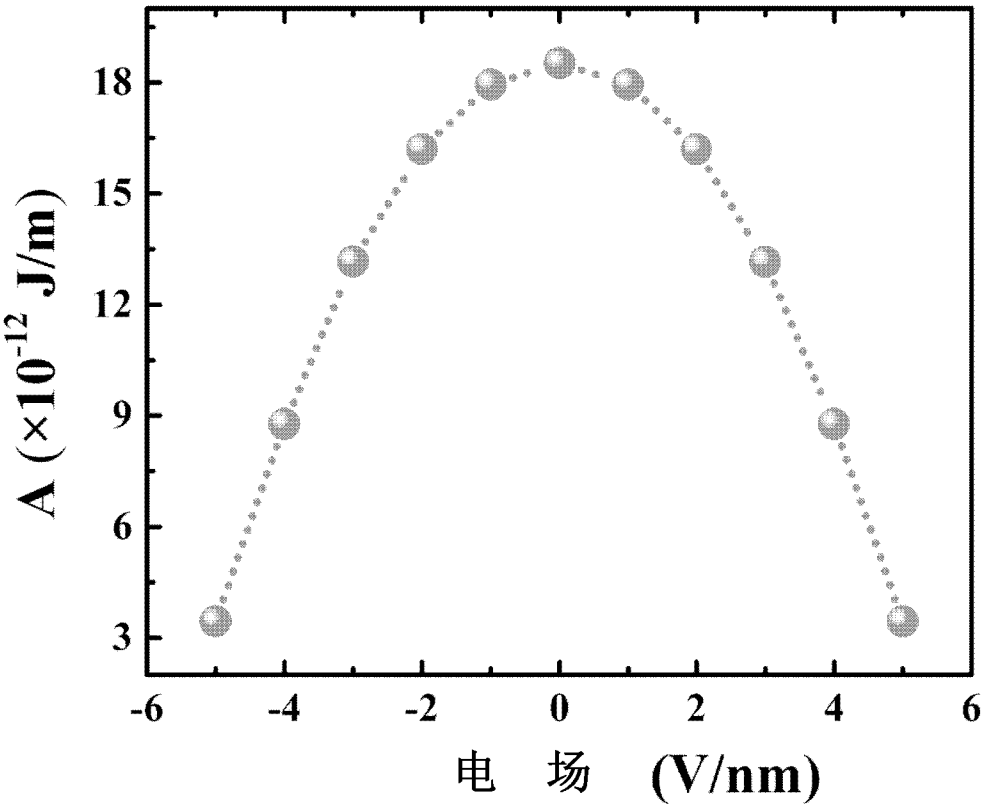


图 4

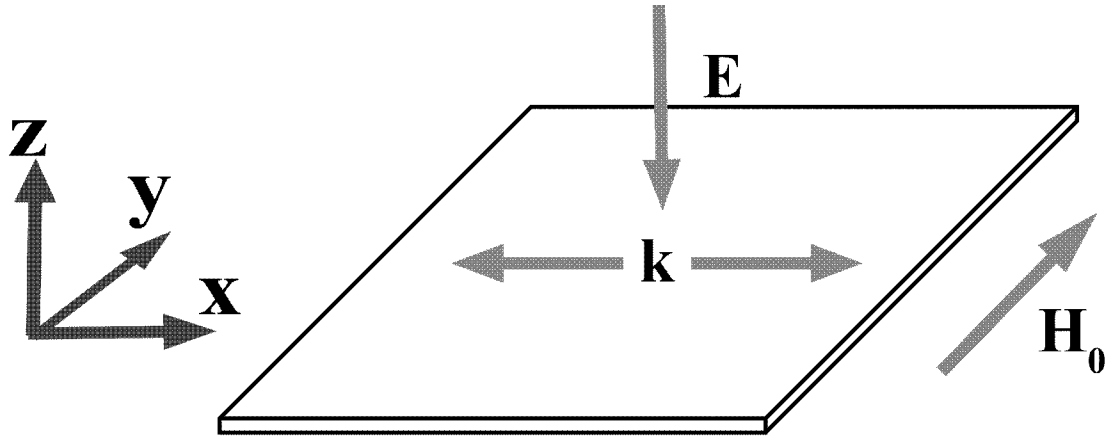


图 5

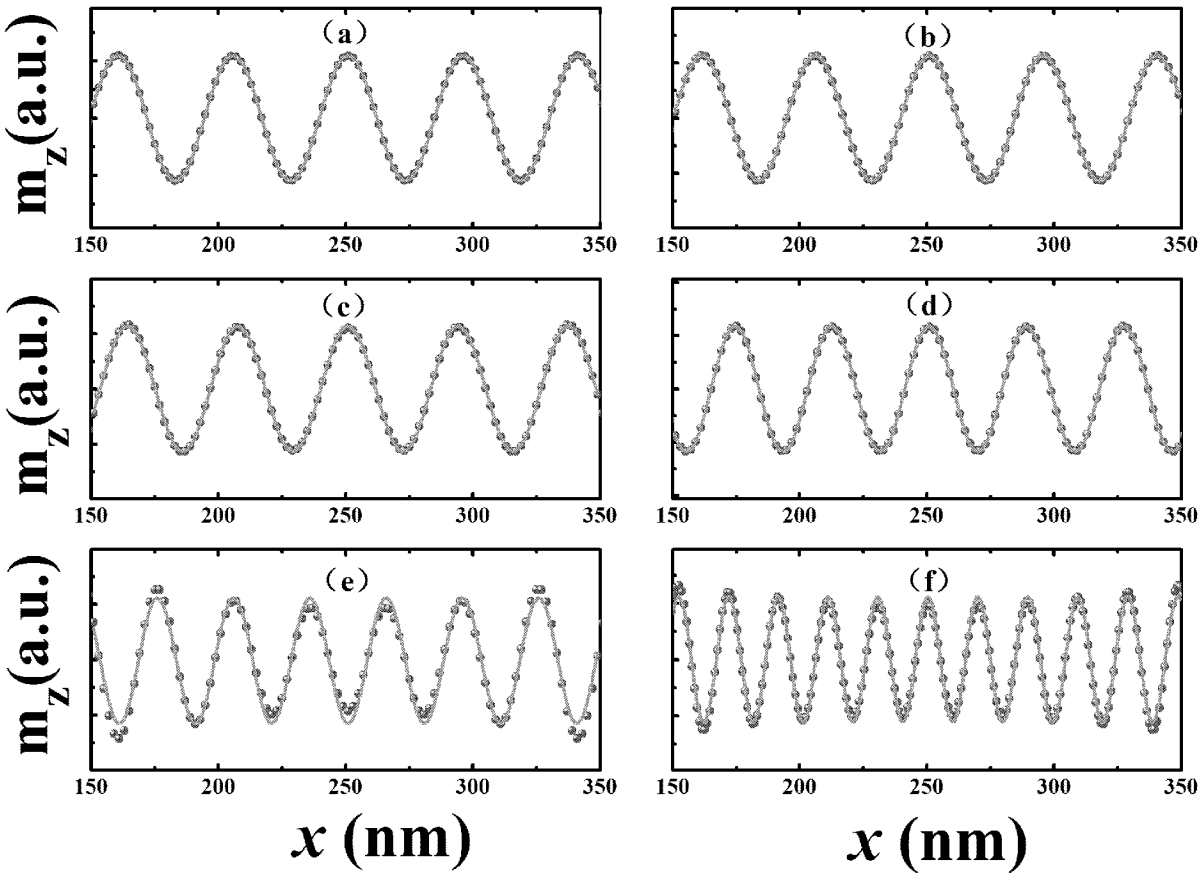

(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
m_z(a.u.)
150
200
250
300
350
x (nm)

图 6

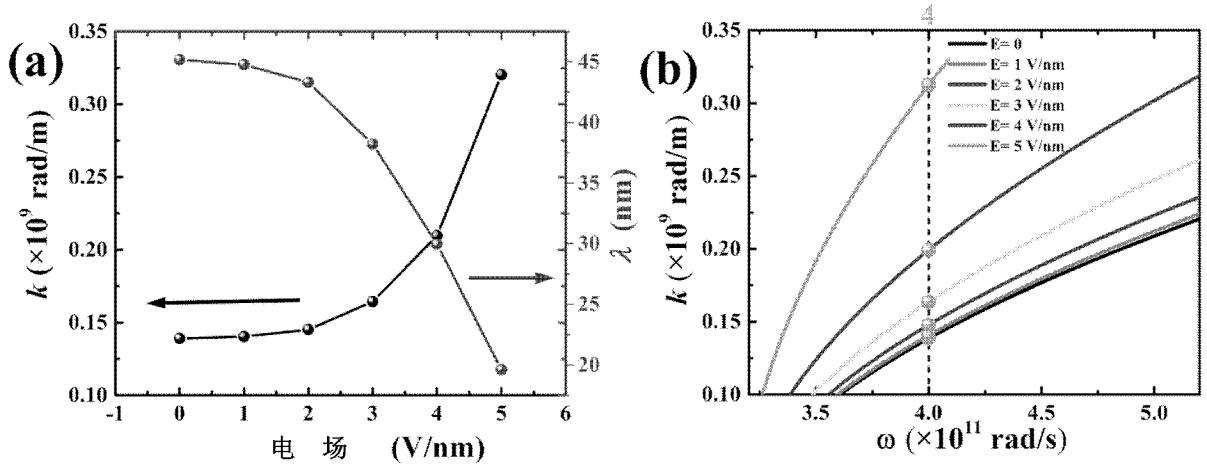

(a)
(b)
k (×10^9 rad/m)
λ (nm)
电 场 (V/nm)
ω (×10^11 rad/s)
E= 0
E= 1 V/nm
E= 2 V/nm
E= 3 V/nm
E= 4 V/nm
E= 5 V/nm

图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/093987

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L 43/12 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: spin-wave, magnon, material, electrode layer, insulation layer, dispersion, electric field, voltage, spin, wave, waveguide, structure, transmission, layer, film, electrode, insulation, magnetic, direction, mode

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 104767020 A (FUDAN UNIVERSITY), 08 July 2015 (08.07.2015), description, paragraphs [0005]-[0007]	1-7, 9
Y	CN 104767020 A (FUDAN UNIVERSITY), 08 July 2015 (08.07.2015), description, paragraphs [0005]-[0007]	8
Y	CN 104779342 A (BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS), 15 July 2015 (15.07.2015), description, paragraphs [0007]-[0009] and [0028]-[0030]	8
A	CN 101232073 A (TOSHIBA CORPORATION), 30 July 2008 (30.07.2008), the whole document	1-9
A	US 2010225312 A1 (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA), 09 September 2010 (09.09.2010), the whole document	1-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
07 February 2017 (07.02.2017)	**23 February 2017 (23.02.2017)**
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer **GAO, Fei** Telephone No.: (86-10) **62413339**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2016/093987

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104767020 A	08 July 2015	None	
CN 104779342 A	15 July 2015	None	
CN 101232073 A	30 July 2008	JP 2008186861 A	14 August 2008
		US 2010315864 A1	16 December 2010
		KR 20080070597 A	30 July 2008
		US 2008180859 A1	31 July 2008
		JP 2009194393 A	27 August 2009
US 2010225312 A1	09 September 2010	JP 2010205975 A	16 September 2010

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2016/093987

A. 主题的分类

H01L 43/12(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H01L

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNPAT,CNKI,WPI,EPODOC：自旋波，磁振子，波导，传输，结构，材料，电极层，绝缘层，色散，电场，电压，模式，方向，spin，wave，waveguide，structure，transmission，layer，film，electrode，insulation，magnetic，direction，mode

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
X	CN 104767020 A (复旦大学) 2015年 7月 8日 (2015-07-08) 说明书第[0005]-[0007]段	1-7，9
Y	CN 104767020 A (复旦大学) 2015年 7月 8日 (2015-07-08) 说明书第[0005]-[0007]段	8
Y	CN 104779342 A (北京航空航天大学) 2015年 7月 15日 (2015-07-15) 说明书第[0007]-[0009]、[0028]-[0030]段	8
A	CN 101232073 A (株式会社东芝) 2008年 7月 30日 (2008-07-30) 全文	1-9
A	US 2010225312 A1 (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 2010年 9月 9日 (2010-09-09) 全文	1-9

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2017年 2月 7日	2017年 2月 23日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 高菲 电话号码 (86-10)62413339

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2016/093987

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	104767020	A	2015年 7月 8日	无			
CN	104779342	A	2015年 7月 15日	无			
CN	101232073	A	2008年 7月 30日	JP	2008186861	A	2008年 8月 14日
				US	2010315864	A1	2010年 12月 16日
				KR	20080070597	A	2008年 7月 30日
				US	2008180859	A1	2008年 7月 31日
				JP	2009194393	A	2009年 8月 27日
US	2010225312	A1	2010年 9月 9日	JP	2010205975	A	2010年 9月 16日