自旋波逻辑门的关键器件研究进展

张子康, 金立川, 文天龙, 廖宇龙, 唐晓莉, 张怀武, 钟智勇*

电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054

* 通信作者. E-mail: zzy@uestc.edu.cn

收稿日期: 2018-12-06; 修回日期: 2019-05-22; 接受日期: 2019-06-13; 网络出版日期: 2020-01-07

国家自然科学基金 (批准号: 61734002, 61571079, 51702042) 和国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0300801) 资助项目

摘要 传统电荷型器件的发展已接近摩尔定律的极限, 亟需寻求新原理或新架构进行信息处理, 用“非电荷型器件”替代传统的“电荷型器件”是一种极具潜力的途径. 其中利用电子自旋的集体进动所产生的自旋波进行信息的输运及计算, 有可能成为后摩尔时代信息传输与处理的重要方式. 自旋波逻辑器件在能量损耗、器件尺寸应用频段、逻辑实现等诸多方面具有传统器件无法比拟的优势. 本文在介绍 Mach-Zehnder 干涉型自旋波逻辑门工作原理的基础上, 从器件层面剖析自旋波逻辑门中的关键器件的实现原理, 并系统性综述了这些关键器件近年来的研究进展. 论文最后就自旋波逻辑门的未来发展做出了展望.

关键词 自旋波电子学, 磁振子, 自旋波, Mach-Zehnder 干涉仪, 逻辑门

1 引言

2017 年的 IRDS (international roadmap for devices and systems) 报告指出¹⁾, 随着摩尔 (Moore) 定律的发展临近极限^[1], 半导体行业的生态系统将发生巨变. 一方面是由于单一追求晶体管尺寸与集成度的发展已无法满足现代计算系统的需要, 另一方面是基于 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 工艺的集成电路受到物理极限与功率耗散等问题的制约而难以取得突破性进展^[2], 因此国际行业发展路线图的焦点重新回到器件及系统层面¹⁾²⁾. 鉴于上述背景, 对于未来集成电路产业的发展, 业界提出了 3 种解决方案, 即深度摩尔定律 (more Moore)^[3]、拓展摩尔定律 (more than Moore)^[4,5], 以及超越 CMOS 工艺 (beyond CMOS)^[6~10]. 其中深度摩尔定律指利用新的工艺手段促使摩尔定律继续推进; 拓展摩尔定律指依靠电路设计以及系统算法优化来横向发展集成电路系统; 而超越 CMOS

1) International roadmap for devices and systems 2017 edition executive summary. <https://irds.ieee.org/roadmap-2017>.

2) International technology roadmap for semiconductors 2.0 2015 executive report. <http://www.itrs2.net/>.

引用格式: 张子康, 金立川, 文天龙, 等. 自旋波逻辑门的关键器件研究进展. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 67–86, doi: 10.1360/N112018-00320
Zhang Z K, Jin L C, Wen T L, et al. Recent advances in key elements of spin-wave logic gates (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 67–86, doi: 10.1360/N112018-00320

工艺旨在寻求新原理或新架构实现信息处理,即用“非电荷型器件”替代传统的“电荷型器件”,在器件和系统层面上实现电路体系的革新. 继续发展传统 CMOS 器件面临着技术与成本的双重压力,从长远看,由于传统电荷型器件在高频、低尺度环境下的发展受到固有条件的限制,新型的超越 CMOS 器件的研究将是未来集成电路发展的必经之路.

在众多的“beyond CMOS”器件中^[7~11],自旋电子器件因其高速、低功耗等优点引起了学术界的广泛关注^[12~14].自旋是电子等亚原子粒子的一种内禀属性,属量子力学范畴.由于电子间的自旋相互作用远小于电子电荷间的相互作用,使得改变电子自旋取向相比改变电子电荷运动状态来说要简单的多,因此与传统电荷器件相比,自旋电子器件拥有更低的功耗、更小的尺寸,以及更优的性能.目前利用自旋的极化特性设计的硬盘磁头、磁随机存储器(MRAM)等已成功实现商用并带来了颇丰的经济收益^[15~17].除可利用自旋的极化特性外,研究表明自旋相互作用产生的自旋集体进动,即自旋波(spin waves),可以用于信息的输运和处理.自旋波的发现与研究恰好契合了逻辑器件的发展条件与要求.总体说来,自旋波逻辑器件具有如下 5 大优势:(1) 自旋波传输依赖于电子自旋的集体进动,其传输过程无实物粒子的运动,因而具有无热耗散、非欧姆接触的特点,因此自旋波器件的功耗极低,相较于连接电路的驱动能耗来说甚至可以忽略不计.由于自旋波逻辑器件尚处于发展的初始阶段,器件能耗只能以一定精度在实验室条件下估算,且与计算方法的选择密切相关.以 Intel 公司的测试结果为例,以磁致伸缩转换方式测试的自旋波逻辑器件(SWD, spin wave devices)的固有能耗值仅为 1.38 aJ^[8].以自旋波多数决定门为例,其每逻辑单位的转换能耗约为 5 aJ/bit^[18,19].(2) 理论上自旋波的波长可低至 10 nm^[20~22],即自旋波器件的极限尺寸远小于现有高频器件尺寸.在相同频率下,自旋波相比电磁波来说其波长要小数个量级^[23,24].而微波波长决定了微波器件的最小尺寸极限,因此自旋波的应用为高频器件的微纳尺度下的小型化发展奠定了有利条件.(3) 自旋波器件拥有广阔的应用频段,其应用频率覆盖了 GHz 频段,甚至可达到 THz 频段^[25~27].(4) 基于自旋波的逻辑实现更具优势,逻辑信息可基于依据自旋波的振幅及相位编码,这种基于波的计算方式除可实现完整的布尔(Boolean)逻辑外,还能实现非布尔逻辑(如多数决定逻辑),这对于现代计算体系如量子计算等尤为重要^[28~30].(5) 自旋波逻辑器件可利用众多的自旋相关效应及微磁材料特性实现进一步的发展.如自旋状态的非易失性,信息不会因掉电而失去,结合这一特性可开发出可重构、可编程的逻辑器件,这一特性深刻地与现代硬件发展理念匹配^[31].正是由于这一诱人的前景,如何利用自旋波进行信息传输与处理已形成了新兴学科——自旋波电子学(Magnon spintronics)^[24].

除自旋波逻辑器件外,传统的自旋逻辑器件如普渡大学(Purdue University)提出的 ASLD(all spin logic devices)^[32]、Intel 公司提出的 STMG(spin torque majority gate)^[33]、华中科技大学提出的 CMMG(cascadable magnetic majority gate)^[34]和 RSL(reconfigurable Skyrmion logic gate)^[35]等在功耗、互联性上也拥有不俗的表现.为了能对近年来新兴的“beyond CMOS”器件在集成电路应用中的潜力有一个客观清晰的认识,Intel 公司的 Nikonov 和 Young^[8,9]设计了一套相对完善的测试系统及标准来评估现有的新型逻辑器件,其主要结果请参考文献[8]中的表 10 和 11.可以看出,自旋波器件(SWD)在功耗、体积、延迟上的表现更为突出.

基于上述背景,近年来关于自旋波逻辑器件的研究已成为学术界和工业界的热点,是未来集成电路最具发展前景的方向之一.本文将首先介绍自旋波逻辑门的工作原理,再对组成自旋波逻辑门的关键器件进行归纳和分析,进而对现有设计及最新的发展状况综述评价,最后还将对自旋波逻辑门的未来发展做出展望.

表 1 应用于自旋波器件的主要磁性材料及其预估自旋波特性 [36]

Table 1 Selection of magnetic materials for magnonic applications, their main parameters, and their estimated spin-wave characteristics [36] ©Copyright 2017 IOP Publishing Ltd.

	μm -thick LPE YIG	nm-thick YIG	Permalloy (Py)	CoFeB	Heusler CMFS compound
Chemical composition	$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$	$\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Si}$
Structure	Single-crystal	Single-crystal	Amorphous	Amorphous	Single-crystal
Gilbert damping α	5×10^{-5}	2×10^{-4}	7×10^{-3}	4×10^{-3}	3×10^{-3}
Saturation magnetization M_0	$140 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$	$140 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$	$800 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$	$1250 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$	$1000 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$
Exchange constant A	$3.6 \text{ pJ} \cdot \text{m}^{-1}$	$3.6 \text{ pJ} \cdot \text{m}^{-1}$	$16 \text{ pJ} \cdot \text{m}^{-1}$	$15 \text{ pJ} \cdot \text{m}^{-1}$	$13 \text{ pJ} \cdot \text{m}^{-1}$
Curie temperature T_C	560 K	560 K	550–870 K	1000 K	>980 K
Typical film thickness t	1–20 μm	5–100 nm	5–100 nm	5–100 nm	5–100 nm

The following parameters are calculated for dipolar MSSW modes,
film magnetized in-plane by the field of 100 mT, for the spin-wave wavenumber $k = 0.1/t$:

Lifetime for dipolar surface wave τ	604.9 ns (@ 4.77 GHz)	150.2 ns (@ 4.80 GHz)	1.3 ns (@ 11.1 GHz)	1.6 ns (@ 14.9 GHz)	2.6 ns (@ 12.8 GHz)
Velocity v_{gr}	33.7 km/s (@ $t = 5 \mu\text{m}$)	0.23 km/s (@ $t = 20 \text{ nm}$)	2.0 km/s (@ $t = 20 \text{ nm}$)	3.5 km/s (@ $t = 20 \text{ nm}$)	2.6 km/s (@ $t = 20 \text{ nm}$)
Freepath l	20.4 nm	35.1 μm	2.7 μm	5.7 μm	6.9 μm
Ratio l/λ	64.9	27.9	2.1	4.5	5.5

2 自旋波逻辑门的工作原理

近年来自旋波逻辑门的研究成为自旋电子学领域中比较活跃的分支之一, 研究主要是基于微磁仿真的验证性设计, 因此在深入探究其逻辑门的工作原理前, 对于自旋波器件的应用材料和激励、探测方法的了解是十分必要的. 表 1 总结了应用于自旋波研究的几种主要材料的特征参数 [36]. YIG (Yttrium Iron Garnet) 是已知材料中具有最小阻尼因子 (Gilbert damping) 的材料, 在学术研究上被广泛使用, 但其厚度难以微缩至纳米尺度, 在不损害其性能的条件下尽可能地降低其薄膜厚度是现阶段 YIG 制备所面临的关键技术问题. 坡莫合金 (permalloy) 具有较低的矫顽力和各向异性, 它作为拥有极低磁损耗的金属材料, 非常适宜在纳米尺度下的制备, 且与 CMOS 工艺有着良好的适配性. 钴铁硼 (CoFeB) 材料和半金属 Heusler 化合物拥有极高的饱和磁化强度和超低的磁损耗, 在最近的研究中被学术界普遍看好. 自旋波的传输特性与波导材料、形状和自身传输模式密切相关, 表 1 中以静磁表面波 (magnetostatic surface wave, MSSW) 模式为例, 在固定波矢条件下总结了不同材料中自旋波的传输频率、群速等特征参数, 便于比较不同材料的频率适应性. 此外, 高效稳定的自旋波激励源和探测器对于自旋波逻辑电路的实际应用同样具有重要意义, 表 2 列举了现有自旋波的激励和探测的常用方法及其主要特征 [36]. 得益于前述的研究基础, 随着相关基础研究的进步, 自旋波逻辑门的研究正受到广泛关注.

自旋波逻辑门依据其信息编码方式的不同可分为幅值型、相位型及频率型逻辑门. 由于频率型的自旋波逻辑门的设计、操作难度较大, 尚未得到广泛的认可, 现阶段绝大部分自旋波逻辑器件是基于幅值或相位进行信息处理的 [37]. 而幅值型与相位型器件通常利用自旋波的干涉效应来进行构筑与设

表 2 自旋波的激励、探测技术及其特点 [36]

Table 2 Techniques for excitation and detection of spin waves and their main features^[36] @Copyright 2017 IOP Publishing Ltd.

	Technique	Function	Features
Microwave techniques	Conventional microstrip antenna based approach	Excitation + detection	Coherent excitation, high sensitivity, phase control, high frequency resolution
	Contactless antenna based approach	Excitation + detection	Simplified design without wiring, access to short-wavelength magnons
	Ferromagnetic resonance (FMR) technique	Excitation + detection	Robust method for the characterization of magnetic materials
	Parametric pumping technique	Amplification + excitation	Access to high magnon densities and short-wavelength magnons
	Pulsed inductive microwave magnetometer (PIMM)	Excitation + detection	Excitation of waves in a wide frequency range
	Inductive magnetic probe (IMP) technique	Detection	Spatial resolution, high time and frequency resolution
Optical techniques	Brillouin light scattering (BLS) spectroscopy	Detection	Space-, frequency-, time-, phase-, and wavenumber-resolved measurements
	Thermal and nonthermal excitation by fs laser	Excitation	Access to high-frequency magnons, suitable for fundamental studies
	Magneto-optical Kerr effect (MOKE) spectrometry	Detection	Space, frequency, time, and phase resolutions
Spintronic approaches	Spin pumping (SP) based technique detection	Detection	Direct conversion to DC, not sensitive to spin-wave wavelength
	Spin transfer torque (STT) based technique	Amplification + excitation	Direct conversion from DC, efficient at nano-scale
	Spin-polarized electron energy loss spectroscopy (SPEELSC)	Detection	Access to high wavenumbers up to the edge of Brillouin zone
Other techniques	Magneto-electric (ME) cells	Excitation + detection	Highly suitable for magnon logic
	Magnetic resonance force microscopy (MRFM)	Detection	High spatial resolution
	Detection of magnon-induced heat	Detection	Major opportunities for fundamental studies
	Nuclear resonant scattering	Detection	Highest spatial resolution currently achievable
	X-ray-detected ferromagnetic resonance (XFMR)	Detection	High spatial resolution, access to layer resolution
	Electron-magnon scattering approach	Detection	Suitable for the detection of domain wall position

计, 典型代表即是 MZI (Mach-Zehnder interferometer) 干涉型自旋波逻辑门. 除利用自旋波的干涉原理外, 也有部分设计利用自旋波的非互易性^[38]、传输波导的宽度调制^[39]等其他机制来实现自旋波逻辑门的设计, 但这类非干涉仪型器件在功能性和匹配性等方面均未展现突出的优势, 因此干涉仪型自旋波逻辑门因其设计的灵活性、功能的多样性成为了当前自旋波逻辑器件设计的主流. 下面将首先介绍 MZI 型自旋波逻辑门的工作原理及其发展历程.

图 1 (网络版彩图) Mach-Zehnder 干涉仪型自旋波逻辑门

Figure 1 (Color online) Spin wave logic gate based on Mach-Zehnder interferometer. (a) Schematic structure of Mach-Zehnder-type interferometer; (b) truth table of amplitude-based XNOR logic

2005 年德国的 Kostylev 团队^[40]首创性地提出了 MZI 型自旋波逻辑门, 并实验验证了基于该结构的自旋波逻辑非门的实现, 该研究对于自旋波逻辑器件的发展具有里程碑式的重要意义, 成为后续自旋波逻辑器件发展的奠基石. MZI 型自旋波逻辑门的原理结构如图 1(a) 所示, 其由功分器、移相器、合成器及连接组件构成. 其中功分器尽可能无衰减地使自旋波信号均分至干涉仪支路上, 同时还需保证自旋波的相干性, 移相器负责对支路上的自旋波信号进行移相 (反相) 处理, 合成器使两支自旋波信号产生干涉并输出. 当相位相同的两自旋波产生干涉时, 输出结果与原输入信号一致, 当相位相反的两自旋波干涉时, 由于干涉作用相互抵消, 输出信号强度大大降低, 可视为无自旋信号输出. 若以 I_π 表征支路上的移相器通入一定大小电流恰好使自旋波产生 π 相移, 同时以自旋波的高幅值表征逻辑 1, 反之为逻辑 0, 据此依照图 1(a) 结构可得到一个两输入的异或非门, 其逻辑真值表如图 1(b) 所示. 这种依据有无自旋波通入的逻辑称为自旋波幅值型逻辑, 其与传统电平逻辑相似, 在设计时可以借鉴现有电路的体系结构, 在数字电路的构建及与 CMOS 电路的匹配上具有一定的优势.

2007 年 Schneider 团队^[41]利用上述 MZI 型逻辑门结构设计了异或 (XOR) 及与非 (NAND) 逻辑门, 次年韩国首尔大学的 Lee 和 Kim^[42]利用组合式的 MZI 结构逻辑门实现了完整的布尔逻辑, 标志着自旋波幅值型逻辑器件基础结构设计趋近完善.

2010 年 Khitun 团队在 MZI 型逻辑门基础上的进一步研究表明, 当干涉仪分支数目为大于 2 的奇数时, 该干涉仪结构器件可实现基于自旋波相位型逻辑的多数决定门, 同时该研究团队提出了自旋波逻辑门模块化的构筑思想, 对后续自旋波逻辑器件的研究具有重要的指导意义^[18, 28, 43]. 自旋波相位型逻辑和多数决定门的提出使自旋波逻辑门的研究迎来新一轮的发展浪潮^[44~49].

多数决定门的原理结构图如图 2(a) 所示^[49], 该器件为三支路的干涉仪结构, 由自旋波波导、电磁单元及移相器构成. 电磁单元负责电压与自旋波信号间的转换, 自旋波波导负责自旋波信号的传递及节点处的干涉输出, 而移相器用于对自旋波相位即逻辑信号进行反相操作. 该器件与早期的 MZI 型逻辑门构造基本相同, 仅由双支路结构变为三支路结构, 但核心的区别在于其逻辑实现方式的不同. 与前述幅值型逻辑不同, 该器件的逻辑信息 1 和 0 由自旋波是否存在 π 相移来表征, 是一种相位型逻辑. 当三支路的自旋波信号产生干涉时, 相位相反的输入信号因干涉而相互抵消, 使得输出信号的相位由输入信号中的多数信号相位决定, 由此实现多数决定逻辑, 其真值表如图 2(b) 所示, 可见干涉输出端的信号与输入端的多数信号相位相同. 相位型逻辑利用了自旋波的波动性, 区别于传统的幅值型逻辑, 由于改变自旋波的相位远比控制自旋波或电流的通断更为容易, 因此在信息处理中的复杂逻辑操作变得简洁和高效, 且由此带来的逻辑可逆性也满足了现代计算体系的发展需要, 如实现可逆逻辑

图 2 (网络版彩图) 自旋波多数决定门 [49]

Figure 2 (Color online) Spin wave majority gate [49]. (a) Schematic structure of the majority logic gate; (b) truth table of phase-based majority logic @Copyright 2012 AIP Publishing

图 3 (网络版彩图) 首次实验验证自旋波多数决定门设计 [52]

Figure 3 (Color online) The first experimental realization of a spin wave majority gate [52]. (a) Sketch of the microwave setup used in the experiments; (b) photograph of the device under test @Copyright 2017 AIP Publishing

门等 [30].

Klingler 团队 [50] 于 2014 年提出了首个较为完善的多数决定门的设计, 该结构可实现多数决定逻辑及输入调控的布尔逻辑. Chumak 团队 [51] 为弥补上述自旋波逻辑器件难以组合的缺陷, 提出了全磁振子晶体管的构想以省去组合连接时对电磁转换模块的依赖. 自旋波多数决定门的首次实验验证于 2017 年由德国多所大学联合 IMEC (inter-university microelectronics centre) 共同完成 [52] (如图 3 所示), 标志着自旋波逻辑器件的发展迈上了新的台阶. 2018 年 Balinskiy 团队实验测试了基于 MZI 结构的自旋波控制的开关设计 [53], 并进一步提出了可重构的自旋波逻辑门 [54]. 同年多个研究团队均提出了基于电场控制的自旋波逻辑器件设计 [55, 56]. 至此, 有关自旋波逻辑门的研究重心已转移到逻辑调控的实现方式上, 如何实现无苛刻的外场条件要求且调控操作简易的自旋波逻辑器件将是日后的主要研究方向.

综上所述, 自旋波逻辑器件经过近十多年来的发展, 其设计模式已初具雏形, 即以 MZI 结构为基础, 利用自旋波的干涉效应辅以逻辑调控的关键器件组合而成的设计模式. 模块式的组合设计使得自旋波逻辑器件的发展依赖于各组成模块, 移相器的设计决定了自旋波逻辑器件的工作方式及性能, 是整个 MZI 型自旋波逻辑器件的核心, 连接器件除负责提供稳定的工作环境外还可带来丰富的功能拓

展. 为实现自旋波逻辑器件的进一步发展, 对各关键器件的深入研究成为关键, 本文后续将就自旋波移相器和连接器等关键器件的研究进行综述.

3 自旋波逻辑门的关键器件研究进展

3.1 移相器

自旋波移相器的设计从本质上来说, 均是通过一定方式改变自旋波传输过程中的色散关系, 通过传输过程的相位积累, 来达到移相的目的. 随着对自旋波研究的逐步深入, 越来越多的方法被证明可应用于移相器的设计. 依据对自旋波传输过程的影响方式, 可将现有移相器设计归为两类: 基于微磁结构的设计以及基于外场调控的设计.

3.1.1 基于微磁结构的设计

基于微磁结构的设计是指移相器主要依赖于磁性材料的微磁结构特性来影响自旋波的色散关系. 较为常见的微磁结构有磁畴壁^[57~59]、磁缺陷^[60]、磁振子晶体^[61]等. 早期 Hertel 等^[57]的研究便证明了当自旋波经过磁畴结构时, 其相位会受到影响. 他们模拟坡莫合金纳米条带上自旋波传输的仿真结果显示, 经过 180° 畴壁的自旋波相位较无畴壁的情况下相移约 90° , 进一步对照 360° 畴壁与无畴壁情况, 相位相移约 180° , 实现了反相操作, 如图 4(a) 所示. 利用上述 360° 畴壁设计环形 Mach-Zehnder 干涉仪如图 4(b) 所示, 自旋波传输 660 ps 后, 存在畴壁结构的波导其干涉结果 (红线表示) 与对照组 (黑线表示) 相比有着明显的幅值差异, 从而验证了畴壁相移机制的可行性. 后续的研究表明磁畴结构, 如 180° Bloch 壁, 存在着等效的潜在势垒, 这一势垒会对传输的自旋波的色散关系造成影响, 且影响程度与自旋波频率及磁畴结构尺寸有关^[58].

利用磁畴壁结构作为移相器有以下两个优点, 一是磁畴壁结构尺寸相对较小, 适宜构建低尺度的自旋波逻辑器件; 二是磁畴壁结构具有一定的稳定性, 既能够在无外磁场条件下保持稳定, 又能够通过合适的外场条件进行调控. 但同时畴壁结构的使用也存在局限性, 首先要实现对磁畴壁的精确控制还有待进一步的研究, 其次相移大小即畴壁对自旋波色散关系的影响程度与自旋波频率有关, 在相同条件下频率越高的自旋波获得的移相效果越弱, 因此难以应用在高频情况, 而磁畴壁的移动速度较慢且所需能耗大.

除畴壁结构外, 磁振子晶体和磁缺陷结构也被证明可实现自旋波的移相. 2014 年 Zhu 等^[61]研究了一维和二维磁振子晶体对静磁表面波传输相位的影响. 研究表明, 在一维或二维磁性晶体中的自旋波对于外偏置磁场十分敏感, 在 YIG/GGG 薄膜中传输的静磁体波可通过外偏置磁场调控相移, 对于如图 5 所示的一维及二维磁振子晶体结构, 外偏置磁场的变化会导致该磁性薄膜的磁导率变化, 从而影响自旋波的传输速率, 在一定范围内通过相差相位的累积实现移相功能. 2016 年 Louis 等^[60]利用点缺陷结构实现了对在畴壁中传播的自旋波的移相操作. 该研究的突出之处在于无需外偏置场条件, 如图 6(a) 所示为磁纳米点阵列, 红色部分为畴壁“波导”, 蓝色区域表示与波导邻接的点缺陷, 而该点缺陷会对畴壁波导中传输的自旋波相位产生影响, 利用这一原理并结合 MZI 结构可设计出幅值型逻辑的异或非 (XNOR) 门, 如图 6(b) 所示. 左图表示基态情况, 红色点处为输入端, 蓝色点处为输出端, 存在点缺陷表征逻辑输入 1, 反之为逻辑输入 0, 各输入状态及输出结果如右图所示, 可见其较好地实现了同或逻辑. 2018 年 Baumgaertl 团队^[62]结合了上述两种结构, 设计了一维磁振子晶体中利用缺陷结构对自旋波相位及幅值调控的移相器, 并提出了结合逆磁致伸缩效应后实现电场调控输入的构想. 这类低维材料结构对于构造平面化、微型化的器件来说十分有利, 且有关磁振子结构的逻辑器件

图 4 (网络版彩图) 畴壁型自旋波移相器 [57]

Figure 4 (Color online) Spin wave phase shifter based on domain walls [57]. (a) Snapshots of the effect of the 180° and 360° domain walls on the phase of spin waves; (b) Mach-Zehnder interferometer based on domain wall phase-shifting mechanism @Copyright 2004 APS

研究正飞速发展, 相信不久会迎来新的突破.

除上述几种常见的微磁结构外, Au 等 [63] 在 2012 年提出了一种利用谐振体来调控自旋波幅值与相位的设计. 该设计利用了波导与谐振体间的铁磁共振现象, 谐振体在合适的磁化状态下, 将对特定频率的自旋波引起共振会共振激发该谐振体, 谐振体上伴随产生的共振激发波反作用于入射波, 改变原自旋波的色散关系, 以此来实现移相. 该器件整体由图 7(a) 中的下侧波导与中心处的谐振体组成, 灰色段表示射频激励源. 当自旋波通过谐振体下方时, 谐振体由于共振产生的共振激发波会反作用于入射自旋波, 若此时谐振体与波导间的距离较小 (5 nm) 时, 共振激发波将作为主导, 结果如图 7(b) 所示; 当距离适中 (20 nm) 时, 两种模式波相互影响导致输出结果振幅大大减小, 如图 7(c) 所示; 当距离较大 (50 nm) 时, 入射自旋波基本不受共振激发波的影响, 如图 7(d) 所示. 对比图 7 中的仿真结果, 选择合适的距离 (5 nm) 时即可实现 180° 移相器的设计. 该设计若考虑谐振体磁化状态改变的影响, 还

图 5 (网络版彩图) 基于磁振子晶体的自旋波移相器^[61]

Figure 5 (Color online) Spin wave phase shifter based on magnonic crystals^[61]. The images of (a) 1-D magnonic crystals with etched parallel channels and (b) 2-D magnonic crystals with etched circular wells @Copyright 2014 AIP Publishing

图 6 (网络版彩图) 基于点缺陷的自旋波移相器^[60]

Figure 6 (Color online) Spin wave phase shifter based on point defects^[60]. (a) Schematic structure of the point defects; (b) example for a magnonic XNOR logic gate @Copyright 2016 AIP Publishing

可设计为自旋阀器件, 对比图 7(c) 和 (f), 通过改变谐振体的磁化状态, 可实现自旋波的通断选择.

3.1.2 基于外场调控的设计

在自旋波逻辑器件的设计中, 特别是相位型逻辑器件, 需要将移相操作视为逻辑输入, 此时需要能够快速调控和响应的移相器件, 同时撤除输入后能迅速恢复原状态. 上述基于微磁结构的设计显然难以完成. 为实现这一相位逻辑操作, 需要移相器具有合适的输入调控手段, 例如通过外场进行逻辑输入. 对于这类无需改变器件的磁结构, 且具有可调控特性的移相器, 将其归纳为基于外场调控的设计. 一般来说, 现有的输入调控手段可以是依靠外磁场、电流或电压等方式^[64~68]. 但考虑到电路系统的匹配性和实际工艺的可行性, 电方式调控手段是研究的主要方向, 即通过电流或电压来实现自旋波移相器的控制.

(1) 电流调控移相器设计. 由于自旋波的色散关系对于外磁场十分敏感, 在早期的实验环境中, 通常利用电流产生的奥斯特 (Oersted) 场来实现移相器功能, 如图 8 所示^[41, 64]. 电流所产生的奥斯特场影响自旋波的传输色散关系, 进而引起自旋波相移, 当撤除电流时, 外场消失, 自旋波传输状态随之恢

图 7 (网络版彩图) 基于谐振体的自旋波移相器 [63]

Figure 7 (Color online) Spin wave phase shifter based on resonator [63]. (a) The ground state of the simulation structure. The snapshots of dynamic magnetization with the spacing kept at (b) 5 nm, (c) 20 nm, and (d) 50 nm, respectively. (e) The ground state of the same structure but with the resonator magnetization flipped to the opposite direction. (f) The snapshot of dynamic magnetization with the spacing kept at 5 nm @Copyright 2012 AIP Publishing

图 8 (网络版彩图) 电流调控相移 [41, 64]

Figure 8 (Color online) Phase shift modulated by current. (a) Current-induced Oersted field [41]; (b) current controlled spin wave phase shifter [64] @Copyright 2008 AIP Publishing, 2009 AIP Publishing

复. 但上述方式仅适用于实验环境, 实际电路设计中很难设计如此精细的恒流源, 且难以接受由此带来的发热及能耗问题, 同时其产生的磁场也可能影响周边器件.

为解决上述缺陷, 电子科技大学的 Zhong 等 [65~67] 基于微磁仿真提出了一种利用自旋极化电流调控的移相器设计. 自旋极化电流由 STT (spin transform torque) 效应产生, 直接作用于波导上并破坏原平衡状态, 使磁化状态发生改变, 所形成的新稳态结构与 180° 畴壁结构相似, 且对自旋波同样有移相作用. 器件结构如图 9(a) 所示, 图中黄色部分为坡莫合金材料, 左端为激励源, 中部为作为移相器的 MTJ (magnetic tunneling junction) 结构, 在垂直于钉扎层的方向通入直流电流, 所产生的自旋极化电流将作用于上方的坡莫合金区域. 施加的自旋极化电流密度与波导末端 Z 方向磁场分量关系如图 9(b) 所示, 随着所加的电流密度不断增大, 自旋波相移幅度也随之增大, 当电流密度达到 $12.5 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$ 时, 波形整体产生相移约 0.3π . 为达到 180° 相移效果, 在同一波导结构中加入 3 个同种 MTJ 结构组成移相器, 以此构造的反相器结构如图 9(c) 所示, 利用此种移相器设计的 MZI 型器件及其输出结果如图 9(d) 所示, 图中黑线和蓝线分别代表无电流输入和三端口均通入电流密度为 $12.5 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$ 的电流情况, 通过输出信号的幅值对比可知其实现了逻辑非门, 从而验证了基于自旋极化电流调控的自

图 9 (网络版彩图) 基于自旋极化电流调控的自旋波移相器设计 [65, 66]

Figure 9 (Color online) Spin-polarized current controlled spin wave shifter [65, 66]. (a) Schematic diagram of the simulation structure; (b) the phase shifting results under different applied current densities; (c) the phase shifting result in the application model; (d) the snapshots of dynamic magnetization in Mach-Zehnder-type interferometer @Copyright 2015 Elsevier, 2016 IEEE

图 10 (网络版彩图) 压控 MZI 型自旋波逻辑器件 [68]

Figure 10 (Color online) Voltage controlled MZI-type spin wave logic device [68] @Copyright 2011 APS

旋波移相器设计.

(2) 电压调控移相器设计. 上述通过极化电流影响微磁结构, 进而控制自旋波相移的设计面临着两大问题, 一是所形成的稳态结构难以精确控制, 二是电流驱动所需的能耗过大. 由于恒流源的引入伴随着较大的焦耳热产生, 相比自旋电子器件来说是不可忽视的巨大功耗, 因此新的研究便着眼于电压调控方式. 2011 年有研究利用简单的超交换模型计算发现, 电场可由自旋轨道耦合 (spin-orbit coupling) 作用直接影响自旋波的色散关系, 且由此产生的移相作用远大于此前的预期效果 [68]. 如图 10 所示是基于此原理设计的 MZI 型逻辑器件, 电场由中心处红色柱体辐射向圆环形波导结构上, 两支路上的自旋波经过该结构后, 在一系列微观耦合作用下产生相对 180° 相移, 由此实现逻辑非门. 这种相对相移的设计适用于幅值型逻辑器件的设计, 但对于相位型逻辑来说由于需要保持逻辑状态的稳定, 因此并不适用. 该研究揭示了电场与磁相互作用之间的关联性, 促进了后续对电场作用下自旋轨道耦合作用的进一步研究.

图 11 (网络版彩图) 电场调控自旋波移相器^[55]

Figure 11 (Color online) Electric field controlled spin-wave phase shifter^[55]. (a) Schematics of the structure; (b) comparison of phase shifting results under different field bias ©Copyright 2018 AIP Publishing

随着电场与磁相互作用的机制不断被发掘, 在此基础上中南大学的 Guo 课题组与德国哈勒 – 维腾贝格大学 (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg) 的 Berakdar 课题组针对电磁耦合及 DMI 效应 (Dzyaloshinskii moriya interaction) 进行了深入研究, 提出了电场调控的自旋波移相器设计^[55]. 如图 11(a) 所示, 在左侧的电场施加区域中, 由于电场的存在将导致向上和向下传输的自旋波色散关系产生不对称结构, 因此两束自旋波在电场作用下将产生不同的相位偏移. 同时在方向固定的情况下, 该相位偏移量大小完全由所施加的电场强度决定, 因此可通过外电场来调节两支路自旋波的相位. 图 11(b) 给出了在不同电偏压下的移相结果, 该设计同样是产生相对相移, 即两支路自旋信号均受到移相影响.

日本理化研究所 (RIKEN, Rikagaku Kenkyusho) 的 Otani 课题组^[56] 通过微磁模拟研究, 提出了基于 VCMA (voltage-controlled magnetic anisotropy) 效应的自旋波移相器设计, 该移相器提供了另一种较好的电场控制解决方案. VCMA 指通过电压来调节三维铁磁体的界面垂直各向异性, 即通过电场改变波导的界面垂直各向异性, 从而使自旋波传输的色散关系发生改变. VCMA 调节的界面垂直各向异性大小与所加电场强度及材料自身的磁电系数 (magnetoelectric coefficient) 有关, 以 $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{MgO}$ 材料为例, 磁电系数在正负偏压下分别可达到 40 fJ/Vm 和 197 fJ/Vm. 同时 VCMA 适用于纳米尺度下的器件, 为器件小型化提供了保障, 依据此原理设计的自旋波移相器如图 12(a) 所示, 上方黄色部分为金属电极, 中间红色部分为波导层, 电场可通过电极层施加于波导上. 图 12(b) 给出了不同电压条件下自旋波色散关系的微磁仿真与理论计算的结果, 可见随着电场强度的增大, 薄膜材料的垂直各向异性随之减弱, 导致其自旋波色散曲线整体下移, 利用此机制即可实现移相器设计. 图 12(c) 表示在固定频率条件下, 施加电压与自旋波相移的关系, 即当所加电场为 0.05 V/nm 时, 自旋波恰好产生 180° 位移. 利用上述 VCMA 机制, 通过外场幅度调节和电极厚度调节的两种方式均可实现移相器功能, 如图 12(d) 和 (e) 所示, 图 12(d) 为基于外电场调控的移相器设计, 图 12(e) 为通过电极层厚度调制的反相器设计. 值得注意的是, 该仿真结果依旧处于外偏置磁场的条件下, 撤去外场条件后其移相效果会大幅下降, 且存在群速较慢, 衰减较大的问题. 但这种基于外电场调控的自旋波移相器极大地简化了调控方式, 在器件体积与电路匹配灵活性上极具优势, 对于后续的自旋波移相器的研究有着重要的参考价值.

本小节讨论了现有自旋波移相器的主流设计, 总体来说, 基于微磁结构设计的移相器无需能量输入, 可作为无源器件应用于无需逻辑调控的场景. 磁畴等微磁结构作为移相器的优势在于其对自旋

图 12 (网络版彩图) 基于 VCMA 的压控自旋波移相器 [56]

Figure 12 (Color online) Voltage controlled spin wave phase shifter based on VCMA [56]. (a) Schematic diagram of the spin wave phase shifter based on VCMA; (b) the frequency dispersion under different electric fields; (c) the relationship between the phase change and the applied electric field; (d) phase shifting achieved by modulating the bias electric field; (e) phase shifting achieved by modulating the film thickness @Copyright 2018 APS

波的反射系数较低, 且稳定性较高. 但是单一结构只对某一特定频段自旋波产生明显的移相作用, 在多个频率应用的电路中, 还需考虑结构调控手段以适应不同频率的应用场景. 从近年来的发展趋势看来, 由于相位型逻辑电路的需要, 可调的移相器设计成为了研究的重点. 从调控方式看, 由于目前尚无法实现自旋波控制的移相器设计, 电场调控由于功耗优势无疑是最佳选择, 如何通过电场作用获得尽可能高的调控精度及效率, 如何进一步发掘电场与磁相互作用的关联都是未来有待深入探究的重要内容, 同时在未来甚至可能会出现基于纯自旋控制的移相器设计, 自旋波移相器的发展前景十分光明.

现有移相器设计主要存在两大问题, 一是移相效率及速率不足, 在高频下的相移效果不佳; 二是对外磁场环境存在一定依赖性, 在无外场条件下工作性能受到限制. 由于自旋波的传输特性, 大部分自旋波器件的设计都需要一定幅度的外磁场支持, 虽然上述基于 VCMA 设计的移相器由于存在较强的垂直各向异性, 可以在无外偏置场环境下工作, 但是缺少外场后的移相性能会有明显的减弱. 为实现自旋波移相器的发展, 一方面需要理论上探究合适的外场与内场的相互作用关系, 另一方面需要改善移相器使用的环境依赖, 如器件的尺寸及电路匹配性等. 随着自旋轨道耦合效应的深入研究, 在一些异质结构中界面效应的发现, 相信会给自旋波移相器设计带来新的突破.

3.2 连接器

在 Mach-Zehnder 干涉仪型逻辑器件中, 除核心的移相器外, 还需要相应的功分器及合成器来实现完整的逻辑功能. 由于大部分研究应用的静磁表面波及背向体波模式在传输方向上存在各向异性, 因此通常利用角度较小的环形波导或叉状结构进行连接 (如图 13 所示) [42, 48], 以此实现功分器或合成器功能. 由于自旋波自身波的特性, 利用这些简单的对称结构波导便可以实现自旋波信号的功分与干涉. 随着对于自旋波逻辑门研究的深入, 学术界近年来对于自旋波功能器件的研究同样重视, 这些功能器

图 13 (网络版彩图) (a) 环形波导干涉结构^[42]; (b) 叉状干涉结构^[48]

Figure 13 (Color online) (a) Ring-shaped waveguide^[42]; (b) fork-shaped waveguide^[48] @Copyright 2008 AIP Publishing, 2017 AIP Publishing

图 14 (网络版彩图) 自旋波多路复用器^[69]

Figure 14 (Color online) Spin wave multiplexer^[69]. (a) Schematic diagram of the spin wave multiplexer; (b) the frequency dispersion under different alignment of the spin wave vector and the magnetization; (c) with no magnetic fields; (d) with locally generated Oersted field; (e) with an externally applied magnetic field @Copyright 2014 Springer Nature

件除负责自旋波信号的输运、保持自旋波的相干性外还可实现丰富的功能拓展, 比较有代表性的器件有复用器、耦合器、功分器等^[69~74].

在数字电路中, 当需要对多个输入数据进行筛选输出或为单一输入信号选择合适的输出端时, 实现这一功能的器件被称为多路复用器, 简单来说就是实现一种类似多路开关的功能. 类比到自旋波逻辑电路中, 为实现相应的逻辑功能也需要对自旋波进行类似的操作, 相关自旋波多路复用器的设计通常采用 Y 字形结构, 结合自旋波传输的各向异性来实现. 如图 14 所示便是一例^[69]. 器件由上方的磁性层及下方的电极层组成, 两层均为 Y 字形结构. 其原理为, 通过上方开关选择导通电极层的某一支路, 流经该支路上的电流会产生相应的奥斯特场, 由于静磁表面波的传输各向异性, 自旋波只能在产生了磁场的一支上通过, 如图 14(c)~(e) 所示. 该复用器通过下方电极层电流的通路选择, 控制上方自旋波的通路, 即将物理的电路开关映射到自旋波逻辑电路当中.

除多路复用器外, 由于自旋波偶极交换作用的研究展现出巨大的发展潜力, 最近几年有关自旋波耦合器的研究也逐渐成为热门. 如图 15 所示是 Wang 等^[70] 提出的一种基于波导间偶极交换作用的定向耦合器设计. 波导间的偶极交换过程如图 15(a) 所示, 偶极交换作用导致了自旋波色散曲线的分裂, 可通过耦合长度这一定义来表征耦合作用对于自旋波传输的影响程度. 耦合长度与自旋波波矢、波导尺寸、波导间间隙、自旋波频率及偏置磁场等因素均相关, 耦合长度与两端输出功率的关系如图 15(b)

图 15 (网络版彩图) 自旋波定向耦合器^[70]

Figure 15 (Color online) Spin wave directional coupler^[70]. (a) Schematic structure of the spin wave directional coupler; (b) normalized output power as a function of the coupling length; (c) switching of the device functionality by changing the signal frequency; (d) switching of the device functionality by changing the bias magnetic field @Copyright 2018 AAAS

所示. 合理设置外部输入条件如外偏置磁场、初始磁化状态等, 该定向耦合器可实现丰富的功能.

如图 15(c) 所示, 利用波导间耦合作用对不同频率自旋波影响的差异, 改变入射自旋波的频率, 可得到不同的输出结果. 在 2.88 GHz 频率下, 自旋波经过耦合波导后其大部分功率 (约 99.6%) 转移到下波导输出端; 在 3.2 GHz 频率下, 自旋波几乎无损通过上波导; 而在 3.01 GHz 频率下, 自旋波将功率均分至两波导输出. 若加入外加偏置场输入条件, 还可对给定频率的自旋波进行相应的转换操作, 如图 15(d) 所示. 以 3.2 GHz 的自旋波为例, 当其在外加 7.1 mT 外偏置场的环境中时, 自旋波功率会均分至两波导分支上, 此时可将其视为功分器. 当不加外场时, 自旋波由上波导输出. 当外加 12 mT 的偏置磁场时, 自旋波将从下波导输出. 此时实现了一种磁场控制的多路复用器. 进一步挖掘其特性, 还可以实现分频器功能, 即对不同频率的混合自旋波进行分频输出.

该定向耦合器结构设计总体来说容易实现且应用性广泛, 结合不同的输入控制手段可设计为自旋电路的连接器、磁振子开关、频率隔离器或者功率分配器等不同功能器件. 同时其理想设计尺寸仅为几十纳米, 远小于自旋波在该波导中传输距离 (微米量级), 这也为复杂自旋电路的集成发展提供了保障.

如图 16(a) 所示是一例通过电流控制的分流带式自旋波的功分器设计^[71]. 自旋波激励产生于波导左端, 整体处于沿 y 方向的外偏置磁场中, 图中褐色部分为直流电流区, 此区域内可施加沿 y 方向的直流电流. 在不加电流情况下, 当自旋波经过波导端口时, 开口结构导致自旋波在面内大角度范围

图 16 (网络版彩图) 分流带式的自旋波功分器 [71]

Figure 16 (Color online) Spin wave beam splitter [71]. (a) Schematic diagram of the simulation structure; (b) snapshot of dynamic magnetization with no DC-current applied; (c) snapshot of dynamic magnetization with a negative DC-current applied. The design of a switchable spin wave beam splitter; (d) applying negative DC-current; (e) applying positive DC-current; (f) without DC-current input @Copyright 2017 AIP Publishing

形成传输模式, 同时由于受到自旋波传播的各向异性的限制, 使得自旋波仅在部分角度上能够保持传输状态, 从而形成了如图 16(b) 所示的传输带结构. 当电流区上通入负向 100 mA 电流时, 电流产生的奥斯特场会使得总磁场方向在面内与原外磁场方向偏离一定角度, 从而改变自旋波的色散关系并进一步改变传输带的轨迹, 如图 16(c) 所示, 与原轨迹对比可看出其轨道距离偏移情况. 利用上述原理, 可设计用于连接不同波导的功分器, 如图 16(d)~(f), 当右端特定位置接入外部波导, 可实现一个三路功分器的设计, 通过电流的通入与否, 可控制该器件自旋波传输的通断, 通过改变施加电流的大小可实现输出通路的选择. 该器件可实现不同波导间的切换和通断控制, 对于多级级联的电路设计十分有益.

4 结语

自旋波逻辑门的研究是未来集成电路最具发展前景的方向之一, 这一研究领域也正处于一个飞速发展的阶段. 本文基于此背景, 为对自旋波逻辑门有一个更深入的认识, 首先对其发展历程及工作原理进行了简要介绍, 随后立足于器件层面对组成自旋波逻辑门的关键器件进行了综述性分析.

有关自旋波移相器及连接器件的研究进展表明, 自旋波逻辑门的发展已取得阶段性的成果. 从体积、功耗到逻辑实现上超越了传统电荷型器件, 但自旋波逻辑门的集成化乃至芯片化的实现仍存在多方面的阻碍.

从器件层面上看, 大部分自旋波移相器均存在对外磁场条件的依赖及高频下移相效果欠佳的问题, 如何提高调控效率、增大移相效果、收缩器件尺寸、减少外场依赖将是未来自旋波移相器设计的首要

挑战. 自旋波连接器件在拓展级联匹配性、降低信号传输损耗、简化调控方式、适应多频段应用等方面仍有不小优化的空间. 从电路层面上看, 现有自旋波逻辑器件设计纷杂, 不同器件可能具有不同的自旋波传输模式和材料结构. 由于它们相互之间的适配性不佳, 大规模级联电路的构建十分困难, 同时还要受到外围电路的硅基工艺的制约. 从应用层面上看, 现有 CMOS 工艺体系完备, 相关产业十分成熟, 自旋波逻辑门的集成化发展还需考虑到相应的成本和市场压力.

上述 3 个层面的发展阻碍对于自旋波逻辑门的发展呈递进关系, 对于尚处于发展初期的自旋波逻辑门研究, 最主要的发展阻碍源于器件层面. 在器件层面上, 针对前述面临的挑战, 未来应致力于对高性能的自旋波波导材料、自旋波激励及探测手段及相关物理效应的基础性研究, 这是实现高效小型化自旋波逻辑门的基石. 同时自旋波逻辑门的设计应朝多结构、多效应互联发展, 这也是目前自旋波逻辑门功能性发展的主要手段. 如多种异质结结构及相关表面效应 (自旋塞贝克 (Seebeck) 效应、DMI 效应等) 可以为逻辑门的设计提供新的道路. 如以往较多应用于自旋逻辑器件和电磁单元设计的多铁性材料^[75, 76], 利用其电磁耦合效应来实现对磁化状态的非易失性调控, 对缺乏相应调控手段的基于微磁结构的移相器来说便非常有启发性. 前述的传统自旋器件, 其与自旋波逻辑门有着相近的结构背景, 两者能否适当融合取舍, 实现同时进行逻辑计算与信息存储的新型器件. 在电路层面上, 一方面需要诸如电磁单元的高效转换器件的设计, 但另一方面需要逐步建立起相应的自旋波电路乃至自旋电路体系规范, 为自旋波逻辑门的大规模互联奠定基础. 在应用层面上, Intel 公司的测试结果显示自旋波逻辑门非常适合新型计算体系的电路构筑, 如可逆计算、神经网络、量子计算等. 因此自旋波逻辑门在未来新一轮的计算体系变革浪潮中的应用十分引人期待.

本文关于自旋波逻辑门的关键器件的研究为集成电路进一步的发展绘制了美好的蓝图. 随着自旋波电子学相关理论及工艺技术的进步, 相信自旋波逻辑电路的芯片集成化很快就会实现.

参考文献

- 1 Theis T N, Wong H S P. The end of Moore's law: a new beginning for information technology. *Comput Sci Eng*, 2017, 19: 41–50
- 2 Haensch W, Nowak E J, Dennard R H, et al. Silicon CMOS devices beyond scaling. *IBM J Res Dev*, 2006, 50: 339–361
- 3 Li M. Review of advanced CMOS technology for post-Moore era. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55: 2316–2325
- 4 Graef M. Positioning more than Moore characterization needs and methods within the 2011 ITRS. *AIP Conf Proc*, 2011, 1395: 345–350
- 5 Salah K. More than Moore and beyond CMOS: new interconnects schemes and new circuits architectures. In: *Proceedings of the 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 2017
- 6 Hutchby J A, Bourianoff G I, Zhirnov V V, et al. Extending the road beyond CMOS. *IEEE Circ Dev Mag*, 2002, 18: 28–41
- 7 Bernstein K, Cavin R K, Porod W, et al. Device and architecture outlook for beyond CMOS switches. *Proc IEEE*, 2010, 98: 2169–2184
- 8 Nikonov D E, Young I A. Overview of beyond-CMOS devices and a uniform methodology for their benchmarking. *Proc IEEE*, 2013, 101: 2498–2533
- 9 Nikonov D E, Young I A. Benchmarking of beyond-CMOS exploratory devices for logic integrated circuits. *IEEE J Explor Solid-State Comput Dev Circ*, 2015, 1: 3–11
- 10 Pan C Y, Naeemi A. Beyond-CMOS non-Boolean logic benchmarking: insights and future directions. In: *Proceedings of Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2017
- 11 Pan C Y, Naeemi A. Non-Boolean computing benchmarking for beyond-CMOS devices based on cellular neural network. *IEEE J Explor Solid-State Comput Dev Circ*, 2016, 2: 36–43
- 12 Sander D, Valenzuela S O, Makarov D, et al. The 2017 magnetism roadmap. *J Phys D-Appl Phys*, 2017, 50: 363001
- 13 Krishnan K M, Pakhomov A B, Bao Y, et al. Nanomagnetism and spin electronics: materials, microstructure and

- novel properties. *J Mater Sci*, 2006, 41: 793–815
- 14 Bader S D, Parkin S S P. Spintronics. *Annu Rev Condens Matter Phys*, 2010, 1: 71–88
- 15 Baibich M N, Broto J M, Fert A, et al. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys Rev Lett*, 1988, 61: 2472–2475
- 16 Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, et al. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with anti-ferromagnetic interlayer exchange. *Phys Rev B*, 1989, 39: 4828–4830
- 17 Miyazaki T, Tezuka N. Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction. *J Magn Magn Mater*, 1995, 139: 231–234
- 18 Khitun A, Bao M, Wang K L. Magnonic logic circuits. *J Phys D-Appl Phys*, 2010, 43: 264005
- 19 Chumak A V. Fundamentals of magnon-based computing. 2019. ArXiv:1901.08934
- 20 Kruglyak V V, Demokritov S O, Grundler D. Magnonics. *J Phys D-Appl Phys*, 2010, 43: 264001
- 21 Serga A A, Chumak A V, Hillebrands B. YIG magnonics. *J Phys D-Appl Phys*, 2010, 43: 264002
- 22 Chumak A V, Vasyuchka V I, Serga A A, et al. Magnon spintronics. *Nat Phys*, 2015, 11: 453–461
- 23 Hahn C, Naletov V V, de Loubens G, et al. Measurement of the intrinsic damping constant in individual nanodisks of Y₃Fe₅O₁₂ and Y₃Fe₅O₁₂/Pt. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 152410
- 24 Duan Z, Smith A, Yang L, et al. Nanowire spin torque oscillator driven by spin orbit torques. *Nat Commun*, 2014, 5: 5616
- 25 Balashov T, Buczek P, Sandratskii L, et al. Magnon dispersion in thin magnetic films. *J Phys-Condens Matter*, 2014, 26: 394007
- 26 Qin H J, Zakeri K, Ernst A, et al. Long-living terahertz magnons in ultrathin metallic ferromagnets. *Nat Commun*, 2015, 6: 6126
- 27 Zakeri K. Terahertz magnonics: feasibility of using terahertz magnons for information processing. *Phys C-Supercond Appl*, 2018, 549: 164–170
- 28 Shabadi P, Khitun A, Narayanan P, et al. Towards logic functions as the device. In: *Proceedings of IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures*, 2010
- 29 Roohi A, Khademolhosseini H, Sayedsalehi S, et al. Implementation of reversible logic design in nanoelectronics on basis of majority gates. In: *Proceedings of the 16th CSI International Symposium on Computer Architecture and Digital Systems (CADS)*, 2012
- 30 Gope J, Mondal S, Kundu M, et al. Reversible logic gates based on single spin logic. In: *Advances in Optical Science and Engineering*. Berlin: Springer, 2017
- 31 Khitun A, Wang K L. Non-volatile magnonic logic circuits engineering. *J Appl Phys*, 2011, 110: 034306
- 32 Behin-Aein B, Datta D, Salahuddin S, et al. Proposal for an all-spin logic device with built-in memory. *Nat Nanotech*, 2010, 5: 266–270
- 33 Nikonov D E, Bourianoff G I, Ghani T. Proposal of a spin torque majority gate logic. *IEEE Electron Dev Lett*, 2011, 32: 1128–1130
- 34 Li X, Song M, Xu N, et al. Novel cascable magnetic majority gates for implementing comprehensive logic functions. *IEEE Trans Electron Dev*, 2018, 65: 4687–4693
- 35 Luo S J, Song M, Li X, et al. Reconfigurable Skyrmion logic gates. *Nano Lett*, 2018, 18: 1180–1184
- 36 Chumak A V, Serga A A, Hillebrands B. Magnonic crystals for data processing. *J Phys D-Appl Phys*, 2017, 50: 244001
- 37 Khitun A, Kozhanov A. Magnonic logic devices. In: *Nanomagnetic and Spintronic Devices for Energy-Efficient Memory and Computing*. Hoboken: Wiley, 2016
- 38 Jamali M, Kwon J H, Seo S M, et al. Spin wave nonreciprocity for logic device applications. *Sci Rep*, 2013, 3: 3160
- 39 Nikitin A A, Ustinov A B, Semenov A A, et al. A spin-wave logic gate based on a width-modulated dynamic magnonic crystal. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 102405
- 40 Kostylev M P, Serga A A, Schneider T, et al. Spin-wave logical gates. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 153501
- 41 Schneider T, Serga A A, Leven B, et al. Realization of spin-wave logic gates. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 022505
- 42 Lee K S, Kim S K. Conceptual design of spin wave logic gates based on a Mach-Zehnder-type spin wave interferometer for universal logic functions. *J Appl Phys*, 2008, 104: 053909
- 43 Shabadi P, Khitun A, Wong K, et al. Spin wave functions nanofabric update. In: *Proceedings of IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures*, 2011. 107–113

- 44 Lenk B, Ulrichs H, Garbs F, et al. The building blocks of magnonics. *Phys Rep*, 2011, 507: 107–136
- 45 Nanayakkara K, Anferov A, Jacob A P, et al. Cross junction spin wave logic architecture. *IEEE Trans Magn*, 2014, 50: 1–4
- 46 Klingler S, Pirro P, Brächer T, et al. Spin-wave logic devices based on isotropic forward volume magnetostatic waves. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 212406
- 47 Almatrood A, Singh H. A comparative study of majority/minority logic circuit synthesis methods for post-CMOS nanotechnologies. *Engineering*, 2017, 09: 890–915
- 48 Zografos O, Dutta S, Manfrini M, et al. Non-volatile spin wave majority gate at the nanoscale. *AIP Adv*, 2017, 7: 056020
- 49 Khitun A. Multi-frequency magnonic logic circuits for parallel data processing. *J Appl Phys*, 2012, 111: 054307
- 50 Klingler S, Pirro P, Brächer T, et al. Design of a spin-wave majority gate employing mode selection. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 152410
- 51 Chumak A V, Serga A A, Hillebrands B. Magnon transistor for all-magnon data processing. *Nat Commun*, 2014, 5: 4700
- 52 Fischer T, Kewenig M, Bozhko D A, et al. Experimental prototype of a spin-wave majority gate. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 152401
- 53 Balinskiy M, Chiang H, Khitun A. Realization of spin wave switch for data processing. *AIP Adv*, 2018, 8: 056628
- 54 Balynskiy M, Chiang H, Gutierrez D, et al. Reversible magnetic logic gates based on spin wave interference. *J Appl Phys*, 2018, 123: 144501
- 55 Wang X G, Chotorlishvili L, Guo G H, et al. Electric field controlled spin waveguide phase shifter in YIG. *J Appl Phys*, 2018, 124: 073903
- 56 Rana B, Otani Y C. Voltage-controlled reconfigurable spin-wave nanochannels and logic devices. *Phys Rev Appl*, 2018, 9: 014033
- 57 Hertel R, Wulfhekel W, Kirschner J. Domain-wall induced phase shifts in spin waves. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 257202
- 58 Bayer C, Schultheiss H, Hillebrands B, et al. Phase shift of spin waves traveling through a 180° Bloch-domain wall. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41: 3094–3096
- 59 Duerr G, Huber R, Grundler D. Enhanced functionality in magnonics by domain walls and inhomogeneous spin configurations. *J Phys-Condens Matter*, 2012, 24: 024218
- 60 Louis S, Lisenkov I, Nikitov S, et al. Bias-free spin-wave phase shifter for magnonic logic. *AIP Adv*, 2016, 6: 065103
- 61 Zhu Y, Chi K H, Tsai C S. Magnonic crystals-based tunable microwave phase shifters. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 022411
- 62 Baumgaertl K, Watanabe S, Grundler D. Phase control of spin waves based on a magnetic defect in a one-dimensional magnonic crystal. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 142405
- 63 Au Y, Dvornik M, Dmytriiev O, et al. Nanoscale spin wave valve and phase shifter. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 172408
- 64 Hansen U H, Demidov V E, Demokritov S O. Dual-function phase shifter for spin-wave logic applications. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 252502
- 65 Chen X X, Wang Q, Liao Y L, et al. Control phase shift of spin-wave by spin-polarized current and its application in logic gates. *J Magn Magn Mater*, 2015, 394: 67–69
- 66 Chen X X, Wang Q, Bai F M, et al. A methodology to design spin-wave-based logic gates in a single ferromagnetic nanostripe using spin-transfer torque effects. *IEEE Trans Magn*, 2016, 52: 1–4
- 67 Wang Q, Zhang H W, Tang X L, et al. Dynamic control of spin wave spectra using spin-polarized currents. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 112405
- 68 Liu T Y, Vignale G. Electric control of spin currents and spin-wave logic. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 247203
- 69 Vogt K, Fradin F Y, Pearson J E, et al. Realization of a spin-wave multiplexer. *Nat Commun*, 2014, 5: 3727
- 70 Wang Q, Pirro P, Verba R, et al. Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler. *Sci Adv*, 2018, 4: 1701517
- 71 Heussner F, Serga A A, Brächer T, et al. A switchable spin-wave signal splitter for magnonic networks. *Appl Phys Lett*, 2017, 111: 122401
- 72 Sadovnikov A V, Beginin E N, Sheshukova S E, et al. Directional multimode coupler for planar magnonics: side-coupled magnetic stripes. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 202405
- 73 Sadovnikov A V, Davies C S, Grishin S V, et al. Magnonic beam splitter: the building block of parallel magnonic

- circuitry. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 192406
- 74 Davies C S, Sadovnikov A V, Grishin S V, et al. Field-controlled phase-rectified magnonic multiplexer. *IEEE Trans Magn*, 2015, 51: 1–4
- 75 Martin L W, Crane S P, Chu Y H, et al. Multiferroics and magnetoelectrics: thin films and nanostructures. *J Phys-Condens Matter*, 2008, 20: 434220
- 76 Manipatruni S, Nikonov D E, Young I A. Beyond CMOS computing with spin and polarization. *Nat Phys*, 2018, 14: 338–343

Recent advances in key elements of spin-wave logic gates

Zikang ZHANG, Lichuan JIN, Tianlong WEN, Yulong LIAO, Xiaoli TANG,
Huaiwu ZHANG & Zhiyong ZHONG*

State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

* Corresponding author. E-mail: zzy@uestc.edu.cn

Abstract Traditional charge-based device development is approaching the limit of Moore's law, thus, there is a desperate need for new information processing principles or architectures. Replacing traditional charge-based devices with non-charge-based devices for information processing shows promise. Spin waves, which are generated from the collective precession of electron spins, are thought to be an important information carrier for the transmission and processing of information in a beyond-Moore era. Spin-wave logic gates possess incomparable advantages over traditional logic devices in energy consumption, device scale, application frequency, and logical operation, among other factors. This article explains the operating principles of spin-wave logic gates based on a Mach-Zehnder interferometer structure, and then analyzes the realization theory of key spin-wave logic gate elements at a device level. Recent advances in these key elements are also reviewed systematically. Lastly, future prospects of spin-wave logic gates are discussed.

Keywords magnon spintronics, magnons, spin waves, Mach-Zehnder interferometer, logic gate

Zikang ZHANG was born in 1994. He received his B.S. degree in electronic science and technology from the University of Electronic Science and Technology of China in 2017. He is currently pursuing his M.S. degree in electronic science and technology. His research interest focuses on exploring applications of magnonic devices in logic gates.

Zhiyong ZHONG was born in 1970. He is a professor and Ph.D. supervisor at the University of Electronic Science and Technology of China. His research interests include spintronic devices and microwave magnetic devices.