

# 磁、电受限半导体异质结构中电子的波矢过滤效应

张桂莲<sup>1\*</sup>, 卢卯旺<sup>2</sup>, 彭芳芳<sup>1</sup>, 孟劲松<sup>1</sup>

<sup>1</sup>湖南都市职业学院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>桂林理工大学, 广西 桂林

Email: \*glzhang01@126.com

收稿日期: 2020年11月17日; 录用日期: 2020年12月2日; 发布日期: 2020年12月9日

## 摘要

研究了磁、电受限半导体异质结构中电子的波矢过滤效应, 实验上该结构可通过在GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As异质结表面上平行地沉积铁磁条带和肖特基金属条带实现。利用改进的转移矩阵法求解电子的薛定谔方程获得透射系数, 然后透射系数对电子纵向波矢微分计算波矢过滤效率。由于磁纳米结构中电子的运动本质上是一个二维过程, 明显的波矢过滤效应出现在这个结构中。波矢过滤效率与肖特基条带的宽度、位置和外加电压密切相关, 使得电子的波矢过滤效应变得可操控。因此, 这样一个结构可以用作可控的纳米电子动量过滤器。

## 关键词

磁纳米结构, 波矢过滤效应, 波矢过滤效率, 动量过滤器

# Wave-Vector Filtering Effect for Electrons in Magnetically and Electrically Confined Semiconductor Heterostructure

Guilian Zhang<sup>1\*</sup>, Maowang Lu<sup>2</sup>, Fangfang Peng<sup>1</sup>, Jingsong Meng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hunan Urban Professional College, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Email: \*glzhang01@126.com

Received: Nov. 17<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2020; published: Dec. 9<sup>th</sup>, 2020

\*通讯作者。

文章引用: 张桂莲, 卢卯旺, 彭芳芳, 孟劲松. 磁、电受限半导体异质结构中电子的波矢过滤效应[J]. 光电子, 2020, 10(4): 123-132. DOI: 10.12677/oe.2020.104016

## Abstract

Wave-vector filtering effect is explored for electrons in magnetically and electrically confined semiconductor heterostructure, which can be realized experimentally by depositing a ferromagnetic stripe and a Schottky metal stripe in parallel configuration on surface of GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructure. Adopting improved transfer matrix method to solve Schrödinger equation, electronic transmission coefficient is calculated exactly, and then wave-vector filtering efficiency is obtained by differentiating transmission probability over longitudinal wave-vector. An obvious wave-vector filtering effect appears, due to an essentially two-dimensional process for motion of electrons in magnetic nanostructure. Besides, wave-vector filtering efficiency is associated closely with width, position and externally applied voltage of Schottky metal stripe, which makes wave-vector filtering effect become controllable. Therefore, such a device can serve as a manipulable momentum filter for nanoelectronics.

## Keywords

Magnetic Nanostructure, Wave-Vector Filtering Effect, Wave-Vector Filtering Efficiency, Momentum Filter

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

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

实验上, 利用现代材料生长技术, 比如, 分子束外延生长(molecular beam epitaxy, 简记为 MBE)、金属有机化学气相沉积(metal-organic chemical-vapor deposition, 简记为 MOCVD)等, 可以构筑重要的磁纳米结构[1], 例如, 在半导体 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结表面上沉积铁磁(ferromagnetic, 简记为 FM)条带等[2]。在磁纳米结构中, 磁性材料产生不均匀的磁场, 局域地影响半导体内高迁移率二维电子气(two-dimensional electron gas, 简记为 2DEG)的运动。由于小尺度、低维度和量子磁受限, 磁纳米结构中蕴藏着新奇的量子效应[3], 例如, 自旋极化[4] [5] [6]、巨磁阻(GMR) [7] [8] [9]和古斯 - 汉兴(Goos-Hänchen)效应[10] [11] [12]等。这些新颖的量子效应可以被广泛地用于设计和开发新型的纳米及量子电子器件, 比如, 自旋过滤器[13] [14] [15]、空间自旋分离器[16] [17] [18]、GMR 器件[19] [20] [21]等。因此, 磁纳米结构中量子效应及其器件的设计已经成为凝聚态物理、材料物理、半导体器件等领域中的研究热点。

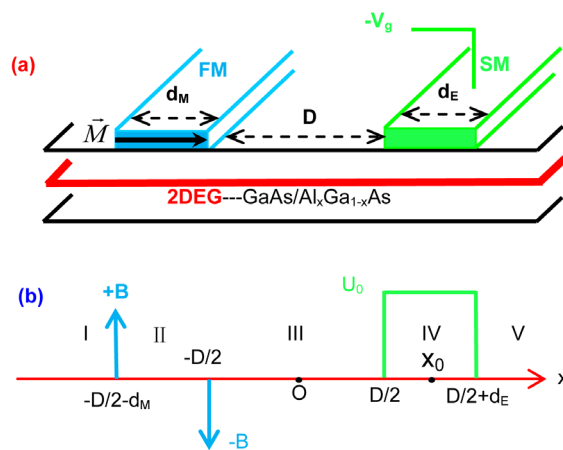
近年来, 磁纳米结构中的波矢过滤(wave vector filtering, 简记为 WVF)效应[22]吸引了研究人员的广泛关注, 因为其本身的科学意义以及在开发纳米电子动量过滤器(momentum filter)中具有潜在的应用价值。在 2017 年, 选取一个真实的磁纳米结构——可通过在半导体 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结表面上沉积具有垂直磁化强度的纳米 FM 条带在实验上制备, Lu 等人[23]率先研究了波矢相关的输运以及  $\delta$ -掺杂的影响, 发现电子具有相当大的 WVF 效应, 而且其程度(即 WVF 效率)可通过改变  $\delta$ -掺杂的权重或位置进行有效的调控, 因此, 基于该磁纳米结构, 他们成功地提出了一个纳米电子动量过滤半导体器件。随后, 另一个真实磁纳米结构[24]及其简化结构[25]中电子的 WVF 效应的  $\delta$ -掺杂的调控也被研究, 支持了文献[23]的研究结果, 并设计了一个新的结构可控的电子动量过滤器。考虑一个磁、电受限半导体异质结构[26]——实验上通过在半导体 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结上、下表面分别构筑 FM 条带与肖特基金属(Schottky metal, 简记为 SM)

条带实现,其电子的 WVF 效应被报道,并发现它的效率可通过改变 SM 条带参数进行控制[27]。利用原子层掺杂技术, Liu 等人[28]进一步研究了  $\delta$ -掺杂的影响,建议了一个结构可控的电子动量过滤器。Kong 等人[29]施加偏压到系统上、激发一个横向电场,发现通过改变电场的方向或强度可以有效地操控该磁、电受限半导体异质结构中电子的 WVF 效应,结果提出了一个电可控的纳米电子动量过滤半导体器件。近期 Zhang 等人[30]研究了一个新奇的磁纳米结构,其具有零平均磁场、并可通过在半导体异质结上、下表面沉积 3 个具有垂直磁化强度的 FM 条带实现,为纳米电子学器件的应用提出了一个新的电子动量过滤器。

受到上述研究工作的激励,本文研究另一个磁、电受限半导体异质结构[31]中电子的 WVF 效应。实验上,这个磁纳米结构可以通过在半导体 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结的表面上,平行地沉积 FM 条带与 SM 条带制备。我们发现系统中存在一个相当强的电子 WVF 效应,而且其 WVF 效率与 SM 条带的位置、宽度及应用门控电压有密切的关系。因此,基于这个磁纳米结构,我们设计了一个新的纳米电子动量过滤半导体器件。

## 2. 结构模型和理论方法

本文考虑的磁、电受限半导体异质结构[32]被大体上画在图 1(a)中,这里具有水平磁化强度( $\vec{M}$ )的 FM 条带和施加负直流电压( $-V_g$ )的 SM 条带被平行地沉积在半导体 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结的表面上[33][34];图 1(b)表示它的结构模型。



**Figure 1.** (a) Magnetically and electrically confined semiconductor heterostructure and (b) Its structural model  
**图 1.** (a) 磁、电受限半导体异质结构构筑图和(b) 它的结构模型图

在图 1 中,参数  $d_M$  和  $d_E$  分别代表 FM 条带和 SM 条带的宽度,  $D$  是两条带之间的距离,  $x_0 = (D + d_E)/2$  表示 SM 条带的中心位置坐标。如果 FM 条带与 2DEG 平面之间的距离很小,水平磁化的 FM 条带产生的、作用于 2DEG 的磁场轮廓通常可以用两个反方向的  $\delta$ -函数形状的磁垒来近似[5],即:

$$\begin{cases} \mathbf{B}(x) = B_z(x)\mathbf{k} \\ B_z(x) = B[\delta(x + d_M + D/2) - \delta(x + D/2)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $B$  是  $\delta$ -磁垒的磁感应强度,  $\delta(x)$  是 Delta 函数。采用 Landauer 规范,对应的磁矢势可以表示为  $\mathbf{A}(x) = [0, A_y(x), 0]$ , 其中[35]:

$$A_y(x) = \begin{cases} 0, & x < -(d_M + D/2) \\ B\ell_B^{-1}, & -(d_M + D/2) < x < -D/2, \\ 0, & x > -D/2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\ell_B = \sqrt{\hbar/eB_0}$  是磁长度,  $B_0$  表示一个典型的磁场。当 2DEG 材料的电阻率各向同性并且 SM 条带到 2DEG 平面的距离很小时, 施加了负压的 SM 条带在 2DEG 平面上产生的电势, 导致一个近似的方形电势垒, 如:

$$U(x) = U_0 [\Theta(x - D/2) + \Theta(D/2 + d_E - x)], \quad (3)$$

其中  $U_0$  表示方形电势垒的高度,  $\Theta(x)$  是 Heaviside 阶跃函数。

在单电子、有效质量近似, 磁、电受限半导体异质结构中电子的 Hamiltonian 算符可表示为:

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}_x^2}{2m^*} + \frac{[\hat{p}_y + eA_y(x)]^2}{2m^*} + U(x) + \frac{ehm^*g^*\hat{\sigma}_z}{4m_0}B_z(x), \quad (4)$$

式中,  $m^*$ 、 $m_0$ 、 $\hat{p} = (\hat{p}_x, \hat{p}_y)$  和  $g^*$  分别表示电子的有效质量、自由质量、动量和有效朗德因子,  $\hat{\sigma}_z = +1/-1$  是 Pauli 算符的  $z$  分量、对应于自旋向上/自旋向下电子。需要指出的是, 在方程(4)的右手边的最后一项表示电子自旋与结构中磁场的相互作用, 即 Zeeman 耦合项, 对于 GaAs 材料( $m^* = 0.067m_0$  和  $g^* = 0.44$ ) 该项的值很小, 其对电子在磁、电受限半导体异质结构中的输运性质影响可以忽略[36]。由于电子在磁纳米结构中沿  $y$  方向的运动没有限制, 其定态 Schrödinger 方程  $\hat{H}\Psi(x, y) = E\Psi(x, y)$  的解, 可以写为  $\Psi(x, y) = \psi(x)\exp(ik_y y)$ , 其中  $k_y$  是电子波矢的  $y$  分量(即纵向波矢), 波函数  $\psi(x)$  满足下面的一维(1D) Schrödinger 方程:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\psi''(x) + U_{\text{eff}}(x, k_y, U_0, x_0)\psi(x) = E\psi(x), \quad (5)$$

其中, 电子在磁、电受限半导体异质结构中所感受到的有效势为[37]:

$$U_{\text{eff}}(x, k_y, U_0, x_0) = \frac{[\hbar k_y + eA_y(x)]^2}{2m^*} + U(x) \quad (6)$$

该有效势不仅与纵向波矢有关, 而且与 SM 条带有关。有效势对  $k_y$  的依赖性, 使电子在磁纳米结构中的隧穿本质上是一个二维(2D)过程, 导致了磁纳米结构中的 WVF 效应[22]; 而有效势依赖于 SM 条带, 使通过改变 SM 条带的宽度、位置和应用电压调控磁、电受限半导体异质结构的 WVF 效应成为可能[27]。

利用改进的转移矩阵法(improved transfer matrix method, 简记为 ITMM) [6], 可以严格求解 1D Schrödinger 方程(5)。为此, 把整个磁、电受限半导体异质结构分成入射区 I、结构区(II、III、IV)和透射区 V, 如图 1(b)所示。在 I 与 V 区, 电子的波函数可分别假设为  $\psi_I(x) = \exp(ik_I x) + \gamma \exp(-ik_I x)$  和  $\psi_V(x) = \tau \exp(ik_V x)$ , 其中  $k_I = k_V = \sqrt{2m^*E/\hbar^2 - k_y^2}$ ,  $\gamma/\tau$  是反射波/透射波的幅度。在结构区, 电子的波函数是平面波的线性组合, 即:

$$\begin{cases} \psi_{II}(x) = C_{II} \exp(ik_{II}x) + D_{II} \exp(-ik_{II}x) \\ \psi_{III}(x) = C_{III} \exp(ik_{III}x) + D_{III} \exp(-ik_{III}x) \\ \psi_{IV}(x) = C_{IV} \exp(ik_{IV}x) + D_{IV} \exp(-ik_{IV}x) \end{cases} \quad (7)$$

其中三个区的波矢分别为  $k_{II} = \sqrt{2m^*E/\hbar^2 - (k_y + eB/\hbar)^2}$ ,  $k_{III} = \sqrt{2m^*E/\hbar^2 - k_y^2}$  和  $k_{IV} = \sqrt{2m^*(E - U_0)/\hbar^2 - k_y^2}$ , 而  $C_{II/III/IV}$  和  $D_{II/III/IV}$  是六个待定常数。利用波函数及其一阶导数在各区边界  $[x = -(d_M + D/2), -D/2, D/2 \text{ 和 } (D/2 + d_E)]$  连续的条件, 借助于 ITMM 方法[6], 可以得到:

$$\begin{pmatrix} \exp(ik_I x_-) & \exp(-ik_I x_-) \\ ik_I \exp(ik_I x_-) & -ik_I \exp(-ik_I x_-) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \gamma \end{pmatrix} = M \times \begin{pmatrix} \exp(ik_V x_+) & \exp(-ik_V x_+) \\ ik_V \exp(ik_V x_+) & -ik_V \exp(-ik_V x_+) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中,  $x_- = -(d_M + D/2)$ ,  $x_+ = D/2 + d_E$ , 以及

$$M = \begin{pmatrix} \cos(k_{II}d_M) & -\sin(k_{II}d_M)/k_{II} \\ k_{II}\sin(k_{II}d_M) & \cos(k_{II}d_M) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(k_{III}D) & -\sin(k_{III}D)/k_{III} \\ k_{III}\sin(k_{III}D) & \cos(k_{III}D) \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos(k_{IV}d_E) & -\sin(k_{IV}d_E)/k_{IV} \\ k_{IV}\sin(k_{IV}d_E) & \cos(k_{IV}d_E) \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (9)$$

因此, 电子通过该磁、电受限半导体异质结构的透射系数为

$$T(E, k_y, U_0, x_0) = 1 - \left| \frac{k_I m_{11} - k_V m_{22} + i(k_I k_V m_{12} + m_{21})}{k_{II} m_{11} + k_V m_{22} + i(k_I k_V m_{12} - m_{21})} \right|^2 \quad (10)$$

透射系数对纵向波矢微分, 可以计算表征 WVF 效应程度的 WVF 效率, 即[23]:

$$\eta(E, k_y, U_0, x_0) = \left. \frac{\partial T(E, k_y, U_0, x_0)}{\partial k_y} \right|_E \quad (11)$$

### 3. 结果与讨论

作为电子入射能量的函数, 图 2(a)展示了电子通过图 1 所示磁、电受限半导体异质结构的透射系数, 图中结构参数取为  $d_M = 57.5 \text{ nm}$ 、 $D = 34.5 \text{ nm}$ 、 $d_E = 34.5 \text{ nm}$ 、 $x_0 = 34.5 \text{ nm}$ 、 $B = 0.6 \text{ T}$  和  $U_0 = 1.36 \text{ meV}$ , 电子的纵向波矢为  $k_y = -8.7 \mu\text{m}^{-1}$  (实线)、 $0.0$ (虚线)和  $8.7 \mu\text{m}^{-1}$  (点线)。由于电子在磁纳米结构中的传输本质上是二维过程, 电子透射系数关于纵向波矢的各向异性可以从这个图清楚地观察到。当电子纵向波矢从负值向正值变化时, 它的透射系数值减小, 透射谱略微向高能方向移动。在低能区, 透射谱上出现一个共振峰, 那是因为此时电子的有效势等效于对称的双垒结构, 电子的入射能量大约等于势阱内的束缚能级、发生了共振隧穿。电子通过磁、电受限半导体异质结构的透射系数随纵向波矢的变化特点, 可以从其有效势对纵向波矢的依赖性得到理解。为了更清楚地观察电子透射的各向异性, 在该图的插图中我们给出了电子透射系数随其纵向波矢的直接变化, 图中电子的入射能量取为  $2.04 \text{ meV}$ 。的确, 从这个插图我们可以清楚地看到, 电子的透射系数随着它的纵向波矢剧烈地变化。这个现象表明, 我们考虑的磁、电受限半导体异质结构具有很强的电子 WVF 效应。在图 2(b)中, 我们计算了电子 WVF 效率, 图中电子的纵向波矢仍然取为  $k_y = -8.7 \mu\text{m}^{-1}$  (实线)、 $0.0$ (虚线)和  $8.7 \mu\text{m}^{-1}$  (点线)。相当大的 WVF 效率可以被看到, 比如, 当电子的纵向波矢  $k_y = -8.7 \mu\text{m}^{-1}$  时, 在入射能量  $E = 0.75 \text{ meV}$  处, WVF 效率可达到  $-1.65$  左右。

考虑到在磁、电受限半导体异质结构中, 电子的有效势与结构中 SM 条带的参数密切相关[参见式(6)], 接下来研究通过改变 SM 条带的应用电压产生的电垒( $U_0$ )、位置( $x_0$ )、宽度( $d_E$ )等对电子的 WVF 效应调控。为了突出 SM 条带的影响, 下面的讨论中电子的纵向波矢被固定为  $k_y = 0.0 \mu\text{m}^{-1}$ , 即仅考虑电子正入射的情况。首先, 把 SM 条带的宽度和位置固定为  $d_E = 34.5 \text{ nm}$  和  $x_0 = 34.5 \text{ nm}$  (此时 FM 条带与 SM 条带相距  $D = 34.5 \text{ nm}$ ), 来研究施加在 SM 条带上的负直流电压( $-V_g$ )在 2DEG 内产生的电垒高度( $U_0$ )对 WVF 效应的影响。在图 3(a)中, 我们展示了电垒高度分别为  $E = 0.34 \text{ meV}$  (实线)、 $1.02 \text{ meV}$  (虚线)和  $1.70 \text{ meV}$  时电子的 WVF 效率。这个图清楚地显示, 电子在磁电受限半导体异质结构中的 WVF 效率与结构中 SM 条带上的应用电压密切相关。一般地, 当电垒变高, 电子的 WVF 效率会增加, 而且  $\eta-E$  曲线向高能方向移动。所以, 我们可以通过改变施加在 SM 条带上的直流负压的大小, 控制磁、电受限半导体异质

结构中电子 WVF 效应的程度，这是因为电子的有效势依赖于 SM 条带上应用的电压。而且，电子 WVF 效应对电垒高度的依赖性，与电子的入射能量有关，特别是在 1.02 meV 至 3.06 meV 的能量范围内更为明显。为了更清楚地观察电垒高度的影响，直接作为  $U_0$  的函数我们计算了电子的 WVF 效率，如图 3(b) 所示，图中电子的能量  $E = 1.02$  meV (实线)、2.04 meV (虚线) 和 3.06 meV (点线) 被考虑。这个图的两条曲线，特别是低能量 1.02 meV 的结果，都明显的反映出电子的 WVF 效率随着 SM 条带上应用电压产生的电垒剧烈地变化。这个特点将导致我们考虑的磁、电受限半导体异质结构，可以被设计成电可控的电子动量过滤器，其过滤效率可通过 SM 条带上施加的电压进行调节。

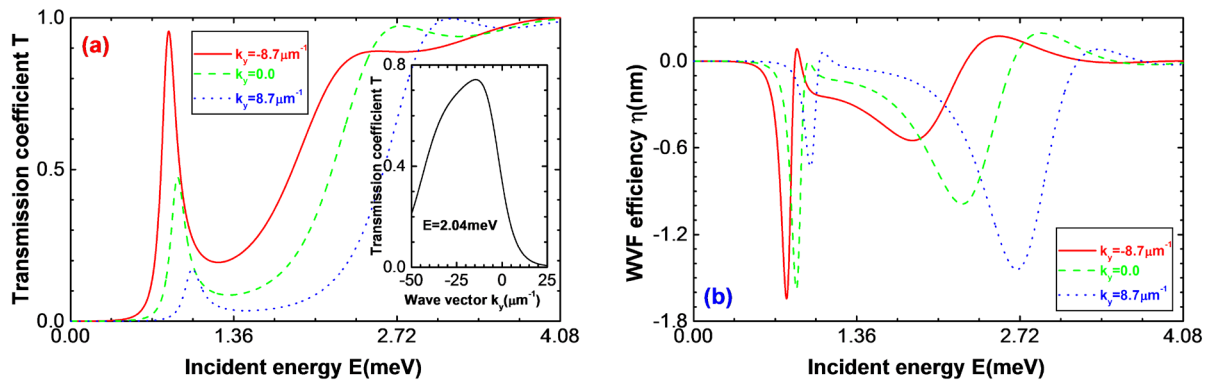


Figure 2. (a) Transmission Coefficient and (b) WVF efficiency  
图 2. (a) 透射系数和(b) WVF 效率

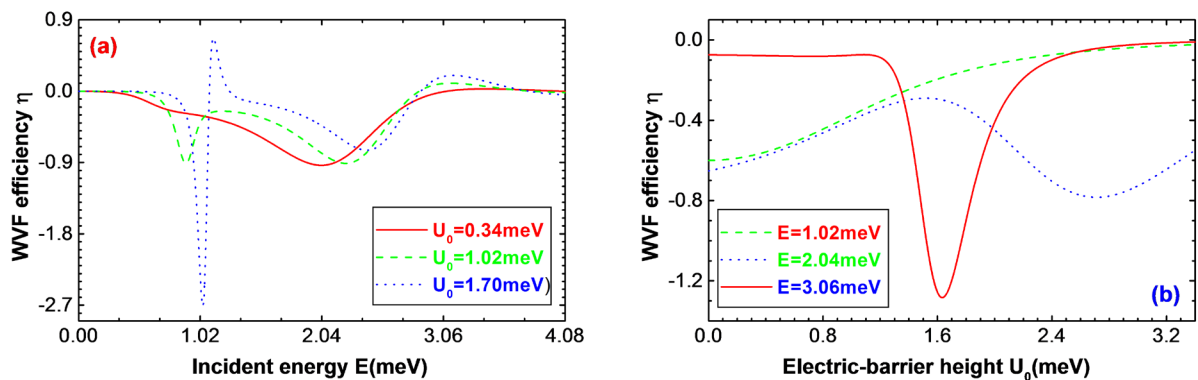
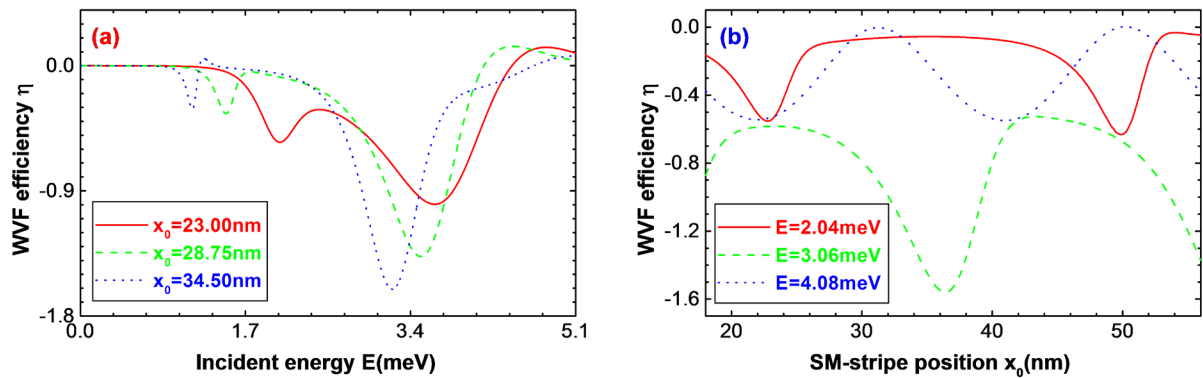


Figure 3. WVF efficiency varies with (a) Incident energy and (b) SM electric-barrier height, respectively  
图 3. WVF 效率随(a) 入射能量和(b) SM 电垒高度变化

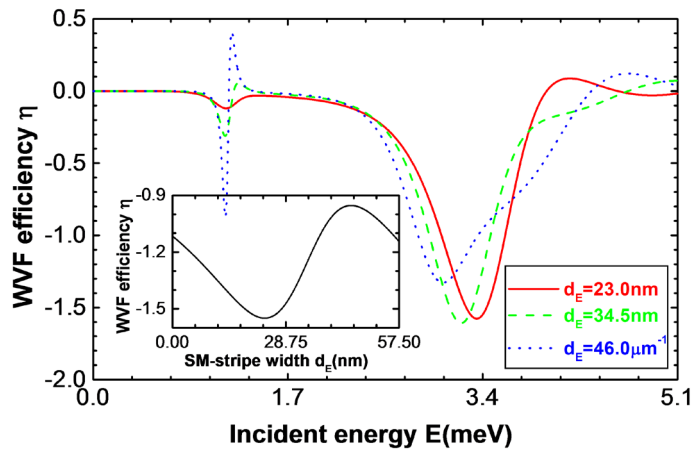
然后，保持应用电压 ( $-V_g$ ) 或电垒高度 ( $U_0$ ) 不变，比如  $U = 1.36$  meV，改变 SM 条带的位置 ( $x_0$ ) 及宽度 ( $d_E$ )，探索 SM 条带对系统中电子 WVF 效应的操控。在图 4 中，SM 条带的宽度被固定为  $d_E = 34.5$  nm，我们展示了 SM 条带的位置对电子 WVF 效应的影响，其中图 4(a) 给出了 3 个具体的宽度  $d_E = 23.0$  nm (实线)、28.75 nm (虚线) 和 34.5 nm (点线) 情况下电子的 WVF 过滤效率。从这些曲线，我们看到 WVF 效率随着电子的入射能量振荡式的变化，特别是，当能量在 1.02 meV 至 5.1 meV 范围内更为剧烈。更重要的是，当 SM 条带的位置变化时，系统中电子的 WVF 效率发生明显的改变。我们看到，当  $x_0$  增加，即 SM 条带远离磁、电受限半导体异质结构的中心时，WVF 效率显著的提高，而且  $\eta$ - $E$  曲线向低能方向移动。SM 条带的位置对 WVF 效应的影响，可以从图 4(b) 上看得更加清楚，因为该图直接展示了 WVF 效率随着 SM 条带的位置的变化，其中电子的入射能量被取为  $E = 2.04$  meV (实线)、3.06 meV (虚线) 和 4.08 meV (点线)。

的确, SM 条带对系统中电子的 WVF 效应有重大的影响, 而且其与电子的入射能量有很大的关系, 尤其是在能量  $E = 3.06 \text{ meV}$  的时候。换言之, 我们可以通过恰当地沉积 SM 条带在磁、电受限半导体异质结构中的位置, 使得系统中电子的 WVF 效应最强, 从而设计最佳的电子动量过滤器。显然, SM 条带位置对 WVF 效应的控制作用, 源于电子在系统中感受到的有效势( $U_{eff}$ )对 SM 条带位置( $x_0$ )的关联性。



**Figure 4.** WVF efficiency varies with (a) Incident energy and (b) SM-stripe position, respectively  
**图 4.** WVF 效率随(a) 入射能量和(b) SM-条带位置变化

事实上, 电子的有效势除了依赖于位置, 其还与 SM 条带的宽度有关, 因此宽度对电子的 WVF 效应也将有重大的影响。最后, 在图 5 我们给出了图 1 所示的磁、电受限半导体异质结构中电子 WVF 效率与电子的入射能量的关系, 图中我们考虑了 3 个具体的 SM 条带宽度  $d_E = 23.0 \text{ nm}$  (实线)、 $34.5 \text{ nm}$  (虚线)和  $46.0 \text{ nm}$ 。



**Figure 5.** WVF efficiency changes with incident energy and SM-stripe width (in the inset), respectively  
**图 5.** WVF 效率随入射能量及 SM-条带宽度(插图)的变化曲线

从这个图, 我们可以观察到, SM 条带的宽度对系统中电子的 WVF 效应有重大的影响。当 SM 条带的宽度变宽时, 电子的 WVF 效率被大大地改变了, 而且其随电子能量变化的曲线向低能端发生移动。SM 条带的宽度对系统中电子的 WVF 效应的影响, 被更加清楚地反映在图 5 的插图中, 这里电子的 WVF 效率( $\eta$ )直接作为 SM 条带宽度( $d_E$ )的函数被计算, 其中电子的入射能量被选择为  $E = 3.4 \text{ meV}$  (近似为电子的费米能级)。确实, 由于电子在磁、电受限半导体异质结构(参见图 1)中经历的有效势[方程(6)]与 SM 条带的宽度密切相关, 因此 WVF 效率随 SM 条带的宽度剧烈地变化。SM 条带宽度对电子 WVF

效应的影响表明了,我们也可以通过改变 SM 条带的宽度,实现对系统中电子 WVF 效应的调控,即设计可控的电子动量过滤器。

#### 4. 结论

总之,本文从理论上研究了一个磁、电受限半导体异质结构中电子的 WVF 效应,提出了可控的电子动量过滤器。该磁、电受限半导体异质结构,可通过在 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结的表面上,平行地沉积纳米 FM 和 SM 条带在实验上构筑。由于电子在磁纳米结构中的运动本质上是一个二维过程(与纵向波矢有关),因此该磁、电受限半导体异质结构中出现了明显的 WVF 效应。而且,由于电子在系统中所感受到的有效势与 SM 条带密切相关,所以通过改变 SM 条带的位置、宽度及施加的负压(电垒高度),可以调控系统中电子的 WVF 效率的大小,从而为纳米电子学器件的应用开发可调的电子动量过滤器。

#### 基金项目

湖南省教育厅科学研究基金(批准号:18C1290)资助的课题。

#### 参考文献

- [1] Matulis, A., Peeters, F.M. and Vasilopoulos, P. (1994) Wave-Vector-Dependent Tunneling through Magnetic Barriers. *Physical Review Letters*, **72**, 1518. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.1518>
- [2] Nogaret, A., Bending, S.J. and Henini, M. (2000) Resistance Resonance Effects through Magnetic Edge States. *Physical Review Letters*, **84**, 2231. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2231>
- [3] Nogaret, A. (2010) Electron Dynamics in Inhomogeneous Magnetic Fields. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **22**, Article ID: 253201. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/25/253201>
- [4] Guo, Y., Gu, B.L., Zeng, Z., Yu, J.Z. and Kawvazoe, Y. (2000) Electron-Spin Polarization in Magnetically Modulated Quantum Structures. *Physical Review B*, **62**, 2635. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.2635>
- [5] Papp, G. and Peeters, F.M. (2001) Spin Filtering in a Magnetic-Electric Barrier Structure. *Applied Physics Letters*, **78**, 2184. <https://doi.org/10.1063/1.1360224>
- [6] Lu, M.W., Zhang, L.D. and Yan, X.H. (2002) Spin Polarization of Electrons Tunneling through Magnetic-Barrier Nanostructures. *Physical Review B*, **66**, Article ID: 224412. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.224412>
- [7] Zhai, F., Guo, Y. and Gu, B.L. (2002) Giant Magnetoresistance Effect in a Magnetic-Electric Barrier Structure. *Physical Review B*, **66**, Article ID: 125305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.125305>
- [8] Lu, M.W. and Zhang, L.D. (2003) Large Magnetoresistance Tunnelling through a Magnetically Modulated Nanostructure. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **15**, 1267. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/15/8/311>
- [9] Papp, G. and Peeters, F.M. (2004) Giant Magnetoresistance in a Two-Dimensional Electron Gas Modulated by Magnetic Barriers. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **16**, 8275. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/46/014>
- [10] Chen, X., Li, C.F. and Ban, Y. (2008) Tunable Lateral Displacement and Spin Beam Splitter for Ballistic Electrons in Two-Dimensional Magnetic-Electric Nanostructures. *Physical Review B*, **77**, Article ID: 073307. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.073307>
- [11] Yuan, L., Xiang, L.L., Kong, Y.H., Lu, M.W., Lan, Z.J., Zeng, A.H. and Wang, Z.Y. (2012) Goos-Hänchen Effect of Spin Electron Beams in a Parallel Double  $\delta$ -Barrier Magnetic Nanostructure. *European Physical Journal B*, **85**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2011-20690-y>
- [12] Lu, M.W., Zhang, G.L. and Chen, S.Y. (2012) Spin-Electron Beam Splitters Based on Magnetic Barrier Nanostructures. *Journal of Applied Physics*, **112**, Article ID: 012309.
- [13] Lu, J.D. (2009) Effect of the  $\delta$ -Doping on the Electron Transport in an Antiparallel Double  $\delta$ -Magnetic-Barrier Nanostructure. *Applied Surface Science*, **255**, 7348-7350. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.03.096>
- [14] Lu, M.W., Chen, S.Y., Zhang, G.L. and Huang, X.H. (2018) Spin Filter Based on Magnetically Confined and Spin-Orbit Coupled GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Heterostructure. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **85**, 3045-3049. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2834914>
- [15] Shen, L.H., Ma, W.Y., Zhang, G.L. and Yang, S.P. (2015) A Structurally-Controllable Spin Filter in a  $\delta$ -Doped Magnetically Modulated Semiconductor Nanostructure with Zero Average Magnetic Field. *Physica E*, **71**, 39-42.



- <https://doi.org/10.1016/j.physe.2015.03.021>
- [16] Lu, M.W., Chen, S.Y., Zhang, G.L. and Huang, X.H. (2018) Calculations of Spin-Polarized Goos-Hänchen Displacement in Magnetically Confined GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Nanostructure Modulated by Spin-Orbit Couplings. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **30**, Article ID: 145302. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aab0b2>
- [17] Shen, L.H., Ma, W.Y., Liu, G.X. and Yuan, L. (2016) Spatial Spin Splitter Based on a Hybrid Ferromagnet, Schottky Metal and Semiconductor Nanostructure. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **401**, 231.
- [18] Lu, M.W., Chen, S.Y., Zhang, G.L. and Huang, X.H. (2018) Spin Splitter Based on Magnetically Confined Semiconductor Microstructure Modulated by Spin-Orbit Coupling. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, **6**, 227-232. <https://doi.org/10.1109/JEDS.2018.2793256>
- [19] Kong, Y.H., Chen, S.Y., Li, A.H. and Fu, X. (2015) Controllable Giant Magnetoresistance Effect in a  $\delta$ -Doped Magnetically Confined Semiconductor Heterostructure Nanostructure. *Vacuum*, **122**, 43-46. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.08.026>
- [20] Lu, M.W., Cao, X.L., Huang, X.H., Jiang, Y.Q. and Yang, S.P. (2016) Controllable Giant Magnetoresistance Effect by the  $\delta$ -Doping in a Magnetically Confined Semiconductor Heterostructure. *Applied Surface Science*, **360**, 989-993. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.11.101>
- [21] Shen, L.H., Zhang, G.L. and Yang, D.C. (2016) Controllable GMR Device in a  $\delta$ -Doped, Magnetically and Electrically Modulated, GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Heterostructure. *Physica E*, **83**, 450-454. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.01.014>
- [22] Lu, M.W., Zhang, L.D. and Yan, X.H. (2003) Electronic Transport in Both Magnetically and Electrically Modulated Nanostructures. *Nanotechnology*, **14**, 609. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/14/6/308>
- [23] Lu, M.W., Chen, S.Y. and Zhang, G.L. (2017) Controllable Momentum Filter Based on a Magnetically Confined Semiconductor Heterostructure With a  $\delta$ -Doping. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **64**, 1825-1829. <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2671850>
- [24] Liu, Y., Zhang, L.L., Lu, M.W., Zhou, Y.L. and Li, F. (2017) Manipulable Wave-Vector Filtering in a  $\delta$ -Doped Magnetic-Barrier Nanostructure. *Solid State Communications*, **253**, 6-9. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2017.01.016>
- [25] Liu, X.H., Liu, C.S., Gong, Y.J. and Tang, Z.H. (2017) Tunable Wave-Vector Filtering in a Two-Dimensional Electron Gas Modulated by Magnetic Barriers and  $\delta$ -Doping. *Philosophical Magazine Letters*, **97**, 150-157. <https://doi.org/10.1080/09500839.2017.1300350>
- [26] Liu, G.X., Zhang, G.L., Ma, W.Y. and Shen, L.H. (2016) Spin Filtering in a Hybrid Ferromagnet, Schottky Metal and Semiconductor Nanostructure. *Solid State Communications*, **231-232**, 6-9. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2016.01.016>
- [27] Liu, G.X., Zhang, L.L., Zhang, G.L. and Shen, L.H. (2017) Manipulable Wave-Vector Filtering in a Hybrid Magnetic-Electric-Barrier Nanostructure. *Applied Physics A*, **123**, Article No. 241. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-0846-0>
- [28] Liu, X.H., Liu, C.S., Xiao, B.F. and Lu, Y.G. (2018) Wave Vector Filtering Effect in a Magnetically and Electrically Confined GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Heterostructure with a  $\delta$ -Doping. *Vacuum*, **148**, 173-177. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.11.009>
- [29] Kong, Y.H., Lu, K.Y., He, Y.P., Liu, X.H., Fu, X. and Li, A.H. (2018) Electric Control of Wave Vector Filtering in a Hybrid Magnetic-Electric-Barrier Nanostructure. *Applied Physics A*, **124**, Article No. 440. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1853-5>
- [30] Zhang, G.L., Peng, F.F. and Meng, J.S. (2019) Wave-Vector Filtering Effect in a Novel Magnetic Nanostructure with Zero Average Magnetic Field. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **32**, 451-455. <https://doi.org/10.1007/s10948-019-4998-3>
- [31] Zhou, Y.L., Lu, M.W., Cao, X.L., Huang, X.H., Huang, M.R. and Liang, D.H. (2018) Manipulation of Spin Filtering Effect in a Hybrid Magnetic-Electric-Barrier Nanostructure with a  $\delta$ -Doping. *Applied Physics A*, **124**, Article No. 705. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2125-0>
- [32] Zhai, F., Xu, H.Q. and Guo, Y. (2004) Tunable Spin Polarization in a Two-Dimensional Electron Gas Modulated by a Ferromagnetic Metal Stripe and a Schottky Metal Stripe. *Physical Review B*, **70**, Article ID: 085308. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.085308>
- [33] Carmona, H.A., Geim, A.K., Nogaret, A., Main, P.C., Foster, T.J., Henini, M., Beaumont, A.P. and Blamire, M.G. (1995) Two Dimensional Electrons in a Lateral Magnetic Superlattice. *Physical Review Letters*, **74**, 3009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3009>
- [34] Kubrak, V., Rahman, F., Gallagher, B.L., Main, P.C., Henini, M., Marrows, C.H. and Howson, M.A. (1999) Magnetoresistance of a Two-Dimensional Electron Gas Due to a Single Magnetic Barrier and Its Use for Nanomagnetometry. *Applied Physics Letters*, **74**, 2507. <https://doi.org/10.1063/1.123022>
- [35] Yang, S.P., Lu, M.W., Huang, X.H., Tang, Q. and Zhou, Y.L. (2017) Effect of Rashba and Dresselhaus Spin-Orbit Couplings on Electron Spin Polarization in a Hybrid Magnetic-Electric Barrier Nanostructure. *Journal of Electronic*

- Materials*, **46**, 1937-1942. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5288-0>
- [36] Jiang, Y.Q., Lu, M.W., Huang, X.H., Yang, S.P. and Tang, Q. (2016) Manipulable GMR Effect in a  $\delta$ -Doped Magnetically Confined Semiconductor Heterostructure. *Journal of Electronic Materials*, **45**, 2796-2801. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-4324-1>
- [37] Tang, Q., Lu, M.W., Huang, X.H. and Zhou, Y.L. (2018) Lateral Shifts for Spin Electrons in a Hybrid Magnetic-Electric-Barrier Nanostructure Modulated by Spin-Orbit Couplings. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **31**, 1383-1388. <https://doi.org/10.1007/s10948-017-4324-x>