

## 轻金属 Cr 薄膜的逆轨道霍尔效应\*

陈锋<sup>1)</sup> 王平<sup>2)4)†</sup> 张志佳<sup>1)‡</sup> 何康<sup>3)††</sup> 冯正<sup>3)</sup> 张德林<sup>2)4)</sup>

1) (天津工业大学材料科学与工程学院, 天津 300387)

2) (天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387)

3) (中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心, 成都 610200)

4) (沧州市天津工业大学研究院, 天津 061000)

(2025 年 3 月 16 日收到; 2025 年 4 月 17 日收到修改稿)

轻金属材料 Cr 具有较大的轨道霍尔电导, 并且不依赖强自旋-轨道耦合即可实现高效的电荷流-轨道流转换, 这些优点在自旋电子领域具有重要的应用前景, 有助于开发新型的轨道-自旋电子器件. 本研究采用磁控溅射的方法在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底上制备了 Cr 薄膜和 Cr/Ni 异质结. 通过太赫兹发射谱测量观察到 Cr 中的逆轨道霍尔效应. 在 Cr/Ni 异质结中由铁磁层 Ni 中自旋-轨道耦合所产生的轨道流通过 Cr 的逆轨道霍尔效应转换为电荷流. 此外, 研究了太赫兹信号对 Ni 层厚度的依赖性, Ni 厚度的增加显著地提高了自旋流-轨道流的转换效率, 增强了轨道太赫兹发射信号. Cr 的逆轨道霍尔效应为轨道-自旋电子器件的设计与性能调控提供了新的研究思路.

**关键词:** 轻金属 Cr 薄膜, 逆轨道霍尔效应, 太赫兹**PACS:** 75.70.-i, 72.15.Gd, 78.70.Gq**DOI:** 10.7498/aps.74.20250346**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250346

## 1 引言

轨道霍尔效应 (orbital Hall effect, OHE) 是指在外部电场作用下, 轨道角动量输运引起的横向轨道流分布现象<sup>[1-4]</sup>. 与传统的自旋霍尔效应 (spin Hall effect, SHE) 不同, OHE 不依赖于强自旋轨道耦合 (spin-orbit coupling, SOC), 其独特的物理机制使其具有巨大潜力<sup>[5-8]</sup>. 首先, OHE 不依赖于 SOC, 外部电场可以直接与轨道自由度相互作用, 并且用于电荷流 ( $J_C$ )-轨道流 ( $J_L$ ) 转换的材料选择非常广泛, 而不是局限于具有强 SOC 的自旋霍尔

材料 (spin Hall materials, SHMs)<sup>[9,10]</sup>. 其次, 轨道霍尔材料 (orbital Hall materials, OHMs) 通常具有较大的轨道霍尔电导率 (orbital Hall conductivity, OHC), 能够实现更高的电荷流-轨道流转换效率<sup>[11-13]</sup>. 最后, OHMs 的轨道扩散长度比 SHMs 的自旋扩散长度更长<sup>[14-17]</sup>. 这些优势为探索低成本、超低能耗和优异稳定性的轨道存储和逻辑器件带来了机遇.

轻金属 Cr 是一种 3d 过渡金属材料, 其具有 OHE<sup>[6,18]</sup>. Cr 的轨道霍尔电导率可达约  $8200 \hbar/e \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  远远高于其自旋霍尔电导率 (约为  $-130 \hbar/e \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ )<sup>[19-21]</sup>. 其较大的 OHC 有利于实现电荷流-轨道流的高效转换, 从而实现大的轨道转矩效率<sup>[22-24]</sup>. Lyalin 等<sup>[25]</sup> 通过磁光克尔效应, 首次

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1204003)、国家自然科学基金 (批准号: 52271240, 62027807)、沧州市重点研发计划 (批准号: 222104008) 和河北省自然科学基金 (批准号: E2023110012) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pingwang@tiangong.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhangzhijia@tiangong.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: hekang\_mtrc@caep.cn

实现了 Cr 单层薄膜中 OHE 的直接观测, 发现 Cr 表面存在电流诱导的轨道积累, 其轨道极化方向与电流方向呈横向分布, 且与电流密度呈线性关系, 这与轨道霍尔效应的理论预测一致. Zhang 等<sup>[6]</sup>发现在 Cr/Au/Co 异质结中, Cr 层产生的轨道流可通过 Au 插入层有效转换为自旋流 ( $J_S$ ) 并驱动磁化翻转. Guo 等<sup>[19]</sup>则在 Cr/CoTb 结构中实现了高达 -0.57 的转矩效率, 临界翻转电流密度低至  $8 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>. Xie 等<sup>[22]</sup>还利用 Cr 的 OHE 产生轨道流, 实现了反铁磁 Mn<sub>3</sub>Sn 的磁化翻转. 这些特点使 Cr 薄膜材料应用在轨道-自旋电子器件中有助于提高整体器件的性能.

逆轨道霍尔效应 (inverse orbital Hall effect, IOHE) 是 OHE 的逆效应, 提供了一种将轨道流转换为电荷流的方法<sup>[26]</sup>. 目前, 基于 ISHE 的 SHMs/铁磁材料 (ferromagnetic materials, FM) 异质结太赫兹发射已成为可靠的太赫兹源. 最近, 在 OHMs/FM 异质结中基于 IOHE 实现了高效率、性能优异、可灵活调控等优点的轨道太赫兹发射器. Wang 等<sup>[26]</sup>发现轨道流可通过 IOHE 转换为电荷流, 并在 Co/Ti 和 Co/Mn 异质结中实现了轨道太赫兹发射, 并且可通过插入 W 层增强轨道太赫兹发射. Seifert 等<sup>[27]</sup>观察到由逆轨道 Rashba-Edelstein 效应 (inverse orbital Rashba-Edelstein effect, IOREE), 引起的轨道太赫兹发射源自 Ni/W/SiO<sub>2</sub> 异质结中的 W/SiO<sub>2</sub> 界面, 证明了在 Ni/W/SiO<sub>2</sub> 薄膜中轨道角动量的长距离运输及其高效转换为电荷流的机制. Kumar 等<sup>[28]</sup>通过 IOHE 实现了与温度相关的太赫兹发射, 并区分了 NiFe/Nb 异质结中轨道和自旋的贡献. Xu 等<sup>[29]</sup>在 Ni 基多层结构中通过飞秒激光激发轨道流, 并利用太赫兹时域光谱检测 IOREE 驱动的电荷载转换. 发现 Ni 中可以高效产生轨道流, 且其扩散长度受材料厚度调控, 为轨道角动量传输提供了实验依据. 同时, Mishra 等<sup>[30]</sup>发现 Ni/Pt 异质结中的太赫兹发射是远程弹道轨道传输, 可通过入射飞秒激光脉冲的电场来控制. 基于 Cr 显著的 OHE, 有望实现显著的 IOHE, 这为实现轨道太赫兹发射源提供了重要的材料基础.

本文使用磁控溅射在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>( $\langle 0001 \rangle / \langle 11\bar{2}0 \rangle$ ) 衬底上制备了 Cr/Ni, Pt/Ni 薄膜, 研究了薄膜的表面形貌以及 IOHE. 实验结果表明, 磁控溅射生长的 Cr 薄膜具有平整的表面形貌以及 IOHE, 此外还发现 Ni 层厚度的增加有效提高了自旋流-轨

道流的转换效率. 通过研究不同异质结的太赫兹发射信号能够证实 Cr 薄膜中的 IOHE, 为设计和调控轨道-自旋电子学器件提供帮助.

## 2 实验方法和表征

利用磁控溅射镀膜机 (AJA-ORION8 型), 通过直流磁控溅射方法, 在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衬底 (10 mm × 10 mm × 0.5 mm) 上制备了 Cr 薄膜. 薄膜制备时真空度小于  $5 \times 10^{-8}$  mTorr (1 mTorr = 0.133 Pa), 基片温度为 450 °C, 压强为 3 mTorr, 氩气流量为 33 sccm (1 sccm = 1 mL/min), 溅射功率为 50 W. 在 450 °C 高温退火 1 h, 并自然冷却至室温. 参考样品 Pt 薄膜制备温度为室温, 压强为 3 mTorr, 功率为 15 W. 随后在压强为 3 mTorr, 溅射功率为 50 W 的条件下溅射生长 Ni 薄膜以及 SiO<sub>2</sub>. 所有样品均使用 SiO<sub>2</sub> 作为保护层, 其中 Cr 溅射速率为 0.2902 Å/s, Pt 溅射速率为 0.1705 Å/s, Ni 溅射速率为 0.2760 Å/s, SiO<sub>2</sub> 溅射速率为 0.1902 Å/s.

利用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 对样品进行表面形貌表征. 通过太赫兹发射谱测量不同样品的太赫兹发射信号, 太赫兹发射光谱测试采用自主搭建的时域光谱系统, 其激发光源为钛宝石飞秒激光器 (中心波长 800 nm, 脉宽 100 fs, 输出功率 1 W, 重复频率 80 MHz). 实验采用泵浦-探测技术, 其中泵浦光以正入射方式辐照样品表面, 激发产生的太赫兹发射信号通过光电采样法进行检测. 检测系统采用 (110) 晶向的 ZnTe 电光晶体 (厚度 2 mm), 测试过程中施加 50 mT 的面内偏置磁场, 所有实验均在室温、干燥空气环境下完成.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 Cr 薄膜的表面形貌

为了表征 Cr 和 Cr/Ni 样品的表面形貌, 对样品进行了 AFM 测试, 如图 1 所示. 图 1(a)—(c) 分别为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr(40 nm), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr(10 nm)/Ni(5 nm) 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr(40 nm)/Ni(5 nm) 的 AFM 图, 其粗糙度分别为 0.254, 0.278 和 0.253 nm, 起伏分别为 -1.1—1.1 nm, -1.2—1.2 nm 和 -1.0—1.3 nm, 表明 Cr 和 Cr/Ni 样品表面较为平整.

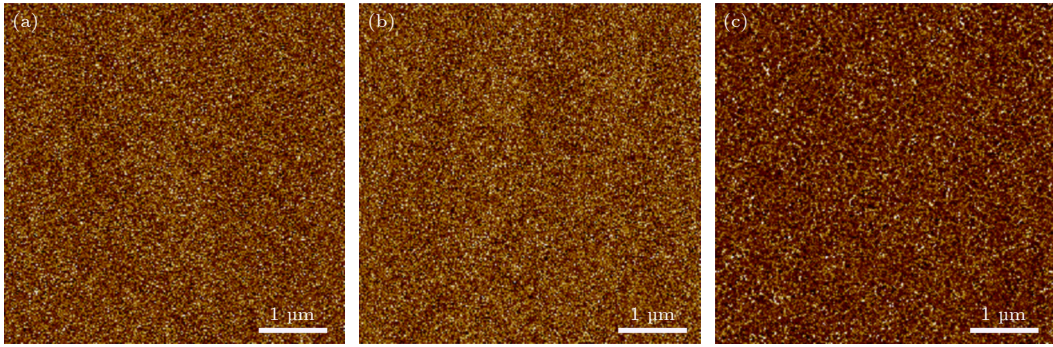


图 1 (a)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}$  (40 nm), (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}$  (10 nm)/Ni (5 nm) 和 (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}$  (40 nm)/Ni (5 nm) 的原子力显微镜图像  
Fig. 1. AFM images of (a)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}$  (40 nm), (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}$  (10 nm)/Ni (5 nm) and (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}$  (40 nm)/Ni (5 nm) samples.

### 3.2 Cr 薄膜的逆轨道霍尔效应

我们设计了 Cr/Ni 异质结, 并以 Pt/Ni 异质结作为参考样品, 使用太赫兹发射光谱表征和分析其 IOHE, 如图 2 和图 3 所示. 对比图 2 中 Cr/Ni 异质结和图 3 中 Pt/Ni 异质结的太赫兹发射谱可知, Cr/Ni 和 Pt/Ni 的太赫兹极性相同. 在传统的 Pt/Ni 异质结中, 飞秒激光在 Ni 中激发自旋流, 自旋流注入到 Pt 层, 并通过 Pt 层的 ISHE 转换为电荷流, 产生太赫兹信号 [31]. 其极性主要取决于非磁层 Pt 的自旋霍尔角符号 (Pt 的自旋霍尔角符号为正) [32]. 而 Cr 的自旋霍尔角符号为负 [32], Cr/Ni 异质结中若是 ISHE 占主导, 其太赫兹极性应与 Pt/Ni 相反, 而实际测量中 Cr/Ni 的极性与 Pt/Ni 的相同, 这表明 Cr/Ni 中的主导机制并非 ISHE. IOHE 与 ISHE 不同, 其太赫兹极性由非磁层材料的轨道霍尔角和铁磁层材料的自旋-轨道转换系数的符号共同决定 [26]. 在 Cr/Ni 异质结中, Cr 的轨道霍尔角和 Ni 的自旋-轨道转换系数符号均为正号, 其产生的太赫兹极性也应为正号 [18]. 因此, Cr/Ni 异质结中的太赫兹信号由 Cr 中 IOHE 主导, 其 ISHE 的贡献相对较弱. 在 Pt/Ni 结构中 Pt 的 OHC 为  $2919 \text{ } \hbar/e \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 与其 SHC ( $2152 \text{ } \hbar/e \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) 相当 [32], 也有可能实现 IOHE, 但 Pt/Ni 结构中基于 IOHE 和 ISHE 产生的太赫兹极性相同, 区分两者存在困难.

此外, 测量结果表明, 随 Cr 层厚度的增加 (2—40 nm), Cr/Ni 异质结的太赫兹信号逐渐减弱. 当 Cr 的厚度为 2 nm 时, 太赫兹信号强度最大, 当厚度增加到 40 nm 时, 太赫兹信号接近消失. Cr/Ni 异质结中太赫兹信号随 Cr 厚度呈现减小的趋势, 可能与激光吸收率和透射率等因素有关, 随 Cr 层厚度的增加, 激光在 Cr 层中的吸收可能增加, 导致

透射到 Ni 层的激光能量减少, 从而减少了 Ni 层中轨道流的产生 [26]. 这种太赫兹信号随 Cr 层厚度减小趋势也可能受轨道流在 Cr 层中的扩散长度影响 [26].

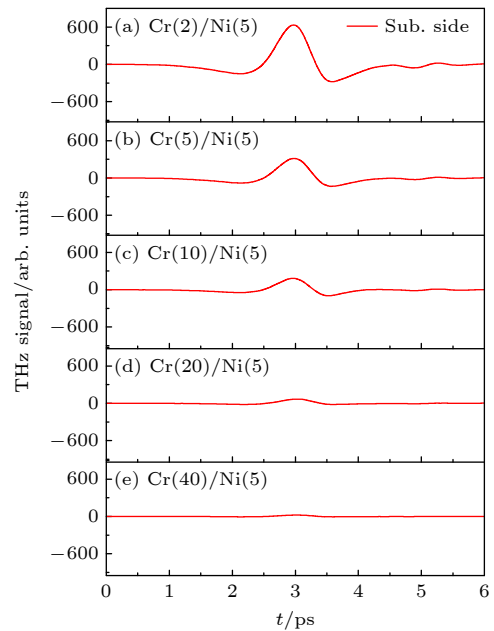


图 2 (a)—(e) Cr (2—40 nm)/Ni (5 nm) 结构的太赫兹信号  
Fig. 2. (a)—(e) The THz signals of the Cr (2—40 nm)/Ni (5 nm) structures.

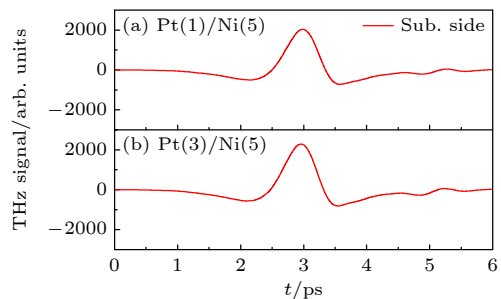


图 3 (a) Pt (1 nm)/Ni (5 nm) 和 (b) Pt (3 nm)/Ni (5 nm) 结构的太赫兹信号

Fig. 3. The THz signals of the (a) Pt (1 nm)/Ni (5 nm) and (b) Pt (3 nm)/Ni (5 nm) structures.

理论上基于 Cr 较大的 OHC, 有望实现高效率的轨道流-电荷流转换效率和较强的太赫兹发射, 但受到 Ni 中自旋流-轨道流转换效率的影响, Cr/Ni 异质结并没有表现出比 Pt/Ni 异质结更强的太赫兹发射信号强度. 因此, 我们通过增加 Ni 层厚度来提高自旋流-轨道流转换效率以增强太赫兹发射信号强度. 图 4 为不同 Ni 厚度的 Cr(10 nm)/Ni(3—10 nm) 异质结的太赫兹信号. 测量结果表明: 随 Ni 厚度的增加 (3—10 nm), Cr/Ni 异质结的太赫兹信号强度逐渐增加, 这归因于 Ni 中自旋流-轨道流转换效率的提高. 一方面, 随着 Ni 厚度的增加, 自旋流可扩散得更远, 有更多的自旋流转换为轨道流; 另一方面, 薄膜的晶体质量随 Ni 厚度的增加得到改善, 晶格缺陷减少, 自旋流-轨道流转换效率显著提升, 这两者的共同作用显著提升了太赫兹信号的产生效率<sup>[29]</sup>.

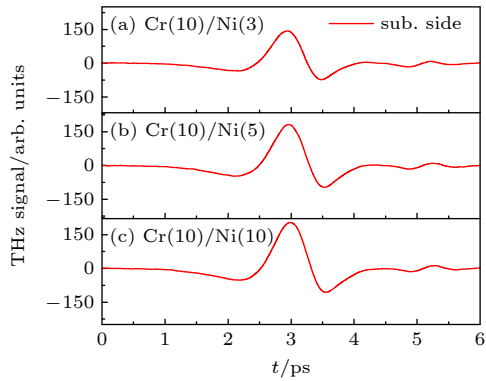


图 4 (a) Cr (10 nm)/Ni (3 nm), (b) Cr (10 nm)/Ni (5 nm) 和 (c) Cr (10 nm)/Ni (10 nm) 结构的太赫兹信号  
Fig. 4. The THz signals of the (a) Cr (10 nm)/Ni (3 nm) structures, (b) Cr (10 nm)/Ni (5 nm) and (c) Cr (10 nm)/Ni (10 nm) structures.

根据以上实验现象, 我们验证了如图 5 所示的物理机制. 在飞秒激光作用下, FM/NM 异质结中可基于 ISHE 和 IOHE 机制产生太赫兹发射, 飞秒激光激发可以直接在 FM 层中产生  $J_S$ , FM 层中的  $J_S$  一部分通过界面扩散到 NM 层中, 通过 NM 层的 ISHE 转换为  $J_C$ , 以太赫兹的形式发射出去, 其中  $J_C$  的方向和大小取决于自旋霍尔角的符号和大小<sup>[26]</sup>; 另一部分  $J_S$  通过 FM 层的 SOC 转换为轨道流 ( $J_L$ ),  $J_L$  进入 NM 层中并通过 NM 层的 IOHE 转换为  $J_C$ , 并以太赫兹的形式发射出去,  $J_C$  的方向和大小共同取决于 NM 的轨道霍尔角和 FM 的自旋-轨道转换系数的符号和大小<sup>[26]</sup>.  $J_L$  和  $J_C$  之间的转换不依赖强自旋轨道耦合, 而是依赖于轨道杂化所诱导的轨道织构所产生的轨道霍尔角,  $J_S$  和  $J_L$  之间的转换则依赖于 FM 层的自旋轨道耦合作用<sup>[24]</sup>. 在 Cr/Ni 结构中, 太赫兹 FM 层选用具有较强自旋-轨道转换效率的 Ni, 可以高效地实现  $J_S$  到  $J_L$  的转换, NM 层选取具有较大 OHC 的 Cr. 如图 5(a) 所示, 在 Ni 层一侧使用飞秒激光泵浦产生  $J_S$ , 一部分  $J_S$  通过 Ni 的 SOC 转换为  $J_L$  并流入 Cr 层并由 IOHE 而转换为  $J_C$ , 而另一部分  $J_S$  将由 Cr 中的 ISHE 直接转换为  $J_C$ , 但由于 Cr 的自旋霍尔角相对较小, Cr/Ni 结构中 IOHE 机制占据主导地位. 而在 Pt/Ni 结构中, 如图 5(b) 所示, 激光束首先在 Ni 层中激发  $J_S$ , 然后通过 Pt 层的强 ISHE 转换为  $J_C$ , 导致结构中的太赫兹发射, Pt/Ni 结构中 ISHE 机制占据主导地位. 通过太赫兹测量可以证明异质结中的 IOHE, 但定量表征轨道流到电荷流的转换效率具有一定的挑战.

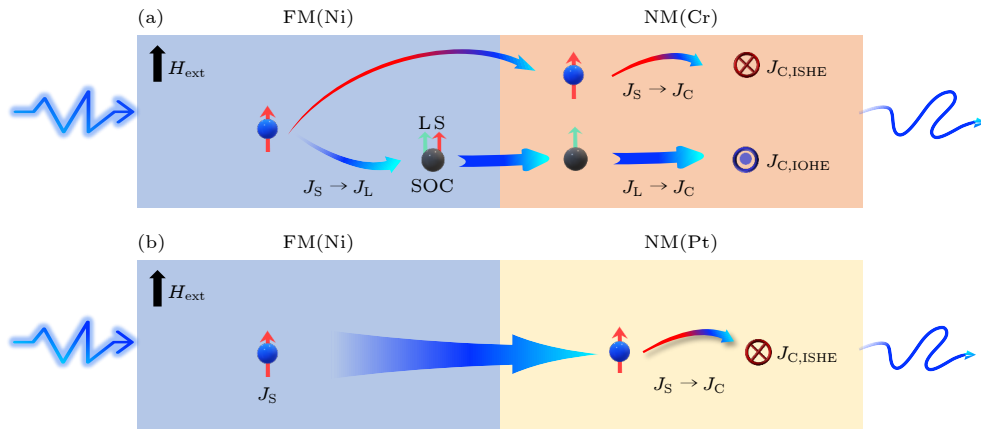


图 5 (a) Cr/Ni 结构中 IOHE 机制; (b) Pt/Ni 结构中 ISHE 机制  
Fig. 5. (a) Mechanism of IOHE in Cr/Ni structures; (b) mechanism of ISHE in Pt/Ni structures.

## 4 结 论

本文研究了 Cr 薄膜中的逆轨道霍尔效应与太赫兹发射. 测量结果表明: 通过在 Cr/Ni, Pt/Ni 异质结中观察到的太赫兹发射信号, 证明了具有弱 SOC 的轻金属材料 Cr 中的 IOHE. 其中, Ni 层有较强 SOC, 可高效地将激光泵浦所产生的自旋流部分转换为轨道流, 轨道流通过界面扩散进入 Cr 层, 通过 IOHE 转换为电荷流, 以太赫兹形式发射出去. 此外, 实验结果证明了 Ni 层厚度的增加对于太赫兹信号的增强, 其高效的自旋流-轨道流转换可以增强轨道太赫兹发射. 这些结果不仅有助于探索 IOHE 的物理机制, 而且对自旋轨道电子器件和太赫兹发射器的设计和制备具有指导意义.

## 参考文献

- [1] Choi Y G, Jo D, Ko K H, Go D, Kim K H, Park H G, Kim C, Min B C, Choi G M, Lee H W 2023 *Nature* **619** 52
- [2] Go D, Jo D, Kim C, Lee H W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 086602
- [3] Jo D, Go D, Lee H W 2018 *Phys. Rev. B* **98** 214405
- [4] Sala G, Gambardella P 2022 *Phys. Rev. Res.* **4** 033037
- [5] Go D, Jo D, Kim K W, Lee S, Kang M G, Park B G, Blügel S, Lee H W, Mokrousov Y 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 246701
- [6] Zhang J, Xie H, Zhang X, Yan Z, Zhai Y, Chi J, Xu H, Zuo Y, Xi L 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 172405
- [7] Canonico L M, Cysne T P, Rappoport T G, Muniz R B 2020 *Phys. Rev. B* **101** 075429
- [8] Sala G, Wang H, Legrand W, Gambardella P 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 156703
- [9] Zheng Z, Zeng T, Zhao T, Shi S, Ren L, Zhang T, Jia L, Gu Y, Xiao R, Zhou H, Zhang Q, Lu J, Wang G, Zhao C, Li H, Tay B K, Chen J 2024 *Nat. Commun.* **15** 745
- [10] Sahu P, Bhowal S, Satpathy S 2021 *Phys. Rev. B* **103** 085113
- [11] Kontani H, Tanaka T, Hirashima D S, Yamada K, Inoue J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 016601
- [12] Tanaka T, Kontani H, Naito M, Naito T, Hirashima D S, Yamada K, Inoue J 2008 *Phys. Rev. B* **77** 165117
- [13] Salemi L, Oppeneer P M 2022 *Phys. Rev. Mater.* **6** 095001
- [14] Hayashi H, Jo D, Go D, Gao T, Haku S, Mokrousov Y, Lee H W, Ando K 2023 *Commun. Phys.* **6** 32
- [15] Seifert T, Jaiswal S, Martens U, Hannegan J, Braum L, Maldonado P, Freimuth F, Kronenberg A, Henrizi J, Radu I, Beaurepaire E, Mokrousov Y, Oppeneer P M, Jourdan M, Jakob G, Turchinovich D, Hayden L M, Wolf M, Münzenberg M, Kläui M, Kampfrath T 2016 *Nat. Photonics* **10** 483
- [16] Zhu L, Bulrman R A 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** L031001
- [17] Feng Z, Qiu H, Wang D, Zhang C, Sun S, Jin B, Tan W 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 010901
- [18] Lee S, Kang M G, Go D, Kim D, Kang J H, Lee T, Lee G H, Kang J, Lee N J, Mokrousov Y, Kim S, Kim K J, Lee K J, Park B G 2021 *Commun. Phys.* **4** 234
- [19] Guo Y, Zhang Y, Lü W, Wang B, Zhang B, Cao J 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 022408
- [20] Xie H, Chang Y, Guo X, Zhang J, Cui B, Zuo Y, Xi L 2023 *Chin. Phys. B* **32** 037502
- [21] Lyu H C, Zhao Y C, Qi J, Yang G, Qin W D, Shao B K, Zhang Y, Hu C Q, Wang K, Zhang Q Q, Zhang J Y, Zhu T, Long Y W, Wei H X, Shen B G, Wang S G 2022 *J. Appl. Phys.* **132** 013901
- [22] Xie H, Zhang N, Ma Y, Chen X, Ke L, Wu Y 2023 *Nano Lett.* **23** 10274
- [23] Go D, Lee H W, Oppeneer P M, Blügel S, Mokrousov Y 2024 *Phys. Rev. B* **109** 174435
- [24] Lee D, Go D, Park H J, Jeong W, Ko H W, Yun D, Jo D, Lee S, Go G, Oh J H, Kim K J, Park B G, Min B C, Koo H C, Lee H W, Lee O, Lee K J 2021 *Nat. Commun.* **12** 6710
- [25] Lyalin I, Alikhah S, Berritta M, Oppeneer P M, Kawakami R K 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 156702
- [26] Wang P, Feng Z, Yang Y, Zhang D, Liu Q, Xu Z, Jia Z, Wu Y, Yu G, Xu X, Jiang Y 2023 *npj Quantum Mater.* **8** 28
- [27] Seifert T S, Go D, Hayashi H, Rouzegar R, Freimuth F, Ando K, Mokrousov Y, Kampfrath T 2023 *Nat. Nanotechnol.* **18** 1132
- [28] Kumar S, Kumar S 2023 *Nat. Commun.* **14** 8185
- [29] Xu Y, Zhang F, Fert A, Jaffres H Y, Liu Y, Xu R, Jiang Y, Cheng H, Zhao W 2024 *Nat. Commun.* **15** 2043
- [30] Mishra S S, Lourembam J, Lin D J X, Singh R 2024 *Nat. Commun.* **15** 4568
- [31] Wu Y, Elyasi M, Qiu X, Chen M, Liu Y, Ke L, Yang H 2016 *Adv. Mater.* **29** 1603031
- [32] Wang P, Chen F, Yang Y, Hu S, Li Y, Wang W, Zhang D, Jiang Y 2024 *Adv. Electron. Mater.* **11** 2400554

# Inverse orbital Hall effect in light metal Cr films\*

CHEN Feng<sup>1)</sup> WANG Ping<sup>2)4)†</sup> ZHANG Zhijia<sup>1)‡</sup> HE Kang<sup>3)††</sup>

FENG Zheng<sup>3)</sup> ZHANG Delin<sup>2)4)</sup>

1) (*School of Materials Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China*)

2) (*School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China*)

3) (*Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China*)

4) (*Cangzhou Institute of Tiangong University, Cangzhou 061000, China*)

( Received 16 March 2025; revised manuscript received 17 April 2025 )

## Abstract

Orbitronic devices have aroused considerable interest due to their unique advantage of being independent of strong spin-orbit coupling. Light metal chromium (Cr) with high orbital Hall conductivity has significant potential for application in orbit-spintronic devices. In this study, we present experimental verification of the inverse orbital Hall effect (IOHE) in Cr thin films and systematically investigate the underlying physical mechanisms of orbital-to-charge current conversion. The Cr/Ni and Pt/Ni heterostructures are fabricated on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates via magnetron sputtering. Terahertz time-domain spectroscopy is employed to measure the terahertz emission signal. The Cr/Ni heterostructure exhibits the same positive terahertz polarity as the ISHE-dominant Pt/Ni heterostructure, despite the Cr layer owing negative spin Hall angle, which confirms the IOHE of Cr/Ni heterostructure. In the Cr/Ni heterostructures, femtosecond laser excitation generates spin current in the ferromagnetic Ni layer, which is converted into orbital current via its spin-orbit coupling. This orbital current propagates into the Cr layer where it is transformed into charge current through the IOHE. Furthermore, the increase of the Cr thickness (2–40 nm) weakens the terahertz emission of Cr/Ni heterostructures due to enhanced optical absorption of Cr layers reducing spin current generation in Ni layers. However, the optimization of Ni thickness (3–10 nm) significantly enhances the terahertz emission by improving the spin-to-orbital current conversion efficiency. This work provides experimental evidence for IOHE in Cr films and demonstrates the crucial role of ferromagnetic layer engineering in spin-to-orbital current conversion efficiency, providing innovative perspectives for designing and optimizing the performance of orbitronic devices.

**Keywords:** light material Cr film, inverse orbital Hall effect, terahertz

**PACS:** 75.70.-i, 72.15.Gd, 78.70.Gq

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250346

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250346

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1204003), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52271240, 62027807), the Key R&D Program of Cangzhou City, China (Grant No. 222104008), and the Hebei Natural Science Foundation, China (Grant No. E2023110012).

† Corresponding author. E-mail: [pingwang@tiangong.edu.cn](mailto:pingwang@tiangong.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [zhangzhijia@tiangong.edu.cn](mailto:zhangzhijia@tiangong.edu.cn)

†† Corresponding author. E-mail: [he kang\\_mtrc@caep.cn](mailto:he kang_mtrc@caep.cn)



## 轻金属Cr薄膜的逆轨道霍尔效应

陈锋 王平 张志佳 何康 冯正 张德林

### Inverse orbital Hall effect in light metal Cr films

CHEN Feng WANG Ping ZHANG Zhijia HE Kang FENG Zheng ZHANG Delin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 137501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250346

CSTR: 32037.14.aps.74.20250346

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250346>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于双开口金属环的太赫兹超材料吸波体传感器

Double-opening metal ring based terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2022, 71(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212303>

太赫兹金属线波导传输特性实验研究及模拟分析

Experimental study and simulation analysis of transmission characteristics of terahertz metal wire waveguides

物理学报. 2024, 73(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240279>

基于相变材料的慢光和吸收可切换多功能太赫兹超材料

Switchable multifunctional terahertz metamaterial with slow-light and absorption functions based on phase change materials

物理学报. 2023, 72(8): 084202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222336>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

太赫兹波在神经细胞中传输的弱谐振效应

Weak resonance effects of THz wave transmission in nerve cell

物理学报. 2021, 70(24): 240301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211677>

宽带吸收与极化转换可切换的太赫兹超表面

Switchable ultra-broadband absorption and polarization conversion terahertz metasurface

物理学报. 2024, 73(14): 148701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240525>