

单层二硫化钼的磁光电导率研究

李悦¹, 肖宜明^{1*}, 徐文^{1,2,3*}

(1. 云南大学物理与天文学院和云南省量子信息重点实验室, 云南昆明 650091;

2. 深圳网联光仪科技有限公司, 广东深圳 518118;

3. 中国科学院合肥物质科学研究院固体物理研究所材料物理重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘要: 考虑外加磁场导致的量子化朗道能级以及邻近效应诱导产生的交换作用, 采用无规相近似 (Random-phase approximation, RPA) 下的介电函数对单层二硫化钼 (Monolayer molybdenum disulfide, ML-MoS₂) 的纵向磁光电导率进行理论研究。探究了磁场、邻近效应诱导产生的交换作用等因素对纵向磁光电导率的影响。在太赫兹 (Terahertz, THz) 频段, 可以看到由导带内电子跃迁所贡献的两个磁光吸收峰。在可见光频段, 可以观察到从价带到导带电子跃迁所贡献的多个磁光吸收峰。研究结果表明, 邻近效应诱导产生的交换作用和磁场强度对纵向磁光电导率有重要的影响, 单层二硫化钼可应用于可见光到太赫兹频段的自旋电子学和谷电子学磁光器件。

关键词: 单层二硫化钼; 磁光电导率; 邻近效应诱导产生的交换作用

中图分类号: O47

文献标识码: A

The study of magneto-optical conductivity of monolayer MoS₂

LI Yue¹, XIAO Yi-Ming^{1*}, XU Wen^{1,2,3*}

(1. School of Physics and Astronomy and Yunnan Key Lab for Quantum Information, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Micro Optical Instruments Inc., Shenzhen 518118, China;

3. Key Laboratory of Materials Physics, Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The longitudinal magneto-optical conductivity of monolayer molybdenum disulfide (ML-MoS₂) has been theoretically investigated under the quantizing Landau levels induced by applied magnetic field and proximity-induced exchange interaction via using the random-phase approximation (RPA) dielectric function approach. The effects of the proximity-induced exchange interaction and magnetic field on the longitudinal magneto-optical conductivity are examined. There are two magneto-optical absorption peaks induced by the transitions processes within the conduction band in Terahertz (THz) frequency range. The inter-band transitions between conduction and valence bands result in a series of magneto-optical absorption peaks in the visible frequency range. The results indicate that the magnetic field and proximity-induced exchange interaction could have important influence on the longitudinal magneto-optical conductivity of ML-MoS₂ and it could be applied in promising magneto-optics devices for spintronics and valleytronics working from visible to THz frequency range.

Key words: ML-MoS₂, magneto-optical conductivity, proximity-induced exchange interaction

引言

近年来, 以单层二硫化钼 (Monolayer Molybde-

num Disulfide, ML-MoS₂) 为代表的单层过渡金属硫化物 (Monolayer Transition Metal Dichalcogenides, ML-TMDs) 以其优异的物理性质^[1]和极其广泛的潜

收稿日期: 2022-08-15, 修回日期: 2022-12-23

Received date: 2022-08-15, revised date: 2022-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 (12004331, U2230122, U2067207), 深圳市科技计划资助 (KQTD20190929173954826)

Foundation items: Supported by National Natural Science foundation of China (12004331, U2230122, U2067207), Shenzhen Science and Technology Program (KQTD20190929173954826)

作者简介 (Biography): 李悦 (1997-), 女, 云南曲靖人, 在读硕士研究生, 主要研究领域为单层过渡金属硫化物的磁光特性。E-mail: yue-li.123@foxmail.com

*通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: yiming.xiao@ynu.edu.cn; wenxu_issp@aliyun.com

在应用价值^[2-3]而引起研究者的关注。单层二硫化钼由两层硫原子中间夹着一层钼原子形成三明治结构,具有较强的本征自旋轨道耦合。随着层数的增加,其将由单层的直接带隙变为多层的间接带隙半导体。相比于其他二维层状材料如石墨烯、硅烯、黑磷等,单层二硫化钼的直接带隙较大且具有独特的自旋和谷极化特性,使得单层二硫化钼具有更多的调控自由度和更独特的光电响应特性。这些特有的性质使其展现出优异的物理特性^[4-5],如荧光发射^[3]、良好的磁光响应特性^[6]、较高的开光比^[7]、以及高迁移率^[8]等。

当在垂直于二维电子气系统平面方向外加均匀磁场将构成二维量子化朗道系统,并在该系统将能观测到许多有趣的物理现象^[9],如整数量子霍尔效应、分数量子霍尔效应、舒布尼科夫-德哈斯(Shubnikov-de Hass, SdH)效应和德哈斯-范阿尔芬(de Haas-van Alphen, dHvA)效应等。单层二硫化钼在强磁场下的磁光输运研究也是单层二硫化钼最重要的研究方向之一。早在2007年,C. H. Yang等人就采用无规相近似(Random-phase Approximation, RPA)下的介电函数研究了自旋劈裂二维电子气的磁光吸收谱,发现在二维电子气中Rashba自旋轨道耦合能产生新的磁光跃迁通道^[10]。M. Tahir等人研究了单层二硫化钼的量子磁输运特性,发现自旋轨道耦合、磁场和塞曼场的联合作用下允许朗道能级之间的跃迁并且导致产生新的量子霍尔平台^[6]。2018年,C. V. Nguyen等人研究了单层二硫化钼的线性及非线性磁光性质,在对磁光吸收系数的研究中发现带间电子跃迁能产生一系列吸收峰,而带内电子跃迁只有一个吸收峰出现^[11]。H. M. Dong等人以太赫兹(Terahertz, THz)频段实验研究了磁场下单层二硫化钼在不同衬底上的磁光性质,发现在弱磁场中磁光电导呈现近线性响应,而在强磁场中磁光电导出现由衬底中较强的杂质散射等相互作用引起的非线性响应^[12]。目前,有多种实验测量电子材料磁光吸收特性的方法。例如,P. Plochocka等人通过磁光透射谱测量研究了多层石墨烯在强磁场中的磁光吸收^[13],Z. Wang等人利用手性分辨反射光谱实验研究了单层二硫化钼中的磁光带间跃迁,并得到了自旋和谷极化的朗道能级结构^[14]。此外,R. Pisoni等人制备了高质量 n -型单层二硫化钼样品来研究磁输运特性,在实验上观察到谷和自旋劈裂的朗道能级并研究了自旋轨道耦

合和电子-电子相互作用对朗道能级的影响^[15]。

随着对二维电子气材料磁光吸收特性实验研究的不断增加,对相关理论研究的需求也日益突出。在本论文中,将对单层二硫化钼的磁光电导率进行理论计算。在此之前对单层二硫化钼等新型二维电子气材料的磁光性质研究大多采用Kubo公式、玻尔兹曼方程等方法。本文利用RPA理论下的介电函数和磁光电导之间的关系分析得到纵向磁光电导率。在磁场以及由衬底引入的邻近诱导交换作用下,研究自旋和谷极化对 n -型单层二硫化钼中的朗道能级(Landau Levels, LLs)和磁光电导率的影响。

1 理论方法

在本研究中,我们考虑图1所示的实验样品和实验测量情形:(1)单层二硫化钼置于介电衬底上;(2)一个线偏振光(取偏振沿 x -方向)垂直(也即沿 z -方向)入射到单层二硫化钼表面;(3)沿 z -方向外加磁场 B ,形成样品、入射光场、磁场的法拉第几何结构(Faraday Geometry)。考虑单层二硫化钼与衬底间相互作用时产生的邻近效应,并且存在本征自旋轨道耦合、自旋及谷塞曼场的情况下,单层二硫化钼在磁场作用下的单电子哈密顿量表示为^[16-18]:

$$H^r = v_F(\tau\pi_x\hat{\sigma}_x + \pi_y\hat{\sigma}_y) + \Delta\hat{\sigma}_z + \tau s(\lambda_c\hat{\sigma}_+ + \lambda_v\hat{\sigma}_-) - s(B_c\hat{\sigma}_+ + B_v\hat{\sigma}_-) + sM_z - \tau M_v, \quad (1)$$

其中, v_F 为费米速度, $\tau = \pm$ 和 $s = \pm$ 分别为谷和自旋指数。磁场下正则动量 $\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{p} + e\boldsymbol{A}$ 并取朗道规范 $\boldsymbol{A} = (0, Bx, 0)$ 。泡利矩阵 $\hat{\sigma}_i$ 表示自旋, $\hat{\sigma}_\pm = (\hat{\sigma}_0 \pm \hat{\sigma}_z)/2$, $\hat{\sigma}_0$ 为 2×2 的单位矩阵。 Δ 为带隙参数, λ_c/λ_v 分别为导带/价带本征自旋轨道耦合参数。 B_c 和 B_v 分别是邻近诱导的交换作用下导带和价带中电子所受的有效塞曼场。此外, M_z 和 M_v 具有相同的形式 $M_j = g_j\mu_B/2$,其中 $j=z, v$ 分别表示自旋和谷塞曼场,玻尔磁子 $\mu_B = e\hbar/2m_e$, $g_z = g_e + g_s'$, $g_e = 2$ 为自由电子 g 因子。将哈密顿量 H^r 对角化后,可以得到能量本征值(朗道能级):

$$E_{\beta n}^{rs} = \beta[n\hbar^2\omega_c^2 + \Delta_{\tau s}^2]^{1/2} + O_{\tau s} + sM_z - \tau M_v, \quad (2)$$

这里, n 为朗道指数, $\beta = \pm 1$ 分别表示导带和价带,回旋频率 $\omega_c = v_F\sqrt{2}/l$, $l = (\hbar/eB)^{1/2}$ 是磁场长度。 $\Delta_{\tau s} = \Delta + \tau s(\lambda_c - \lambda_v)/2 - s(B_c - B_v)/2$, $O_{\tau s} = \tau s(\lambda_c + \lambda_v)/2 - s(B_c + B_v)/2$ 。由式(1),通过求解薛定谔方程分别得到 K 和 K' 谷在 $\alpha = (\tau, s, \beta, n, k_y)$ 态的本征波函数 $\psi_{\beta nk}^{\alpha}$:

$$\psi_{\beta n k_y}^{+s} = \frac{e^{ik_y y}}{\sqrt{L_y}} \begin{pmatrix} A_{\beta n}^{+s} \Phi_{n-1}(\bar{x}) \\ B_{\beta n}^{+s} \Phi_n(\bar{x}) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

和

$$\psi_{\beta n k_y}^{-s} = \frac{e^{ik_y y}}{\sqrt{L_y}} \begin{pmatrix} -A_{\beta n}^{-s} \Phi_n(\bar{x}) \\ B_{\beta n}^{-s} \Phi_{n-1}(\bar{x}) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

在式(3)和(4)中, $\bar{x} = x - x_0$, $x_0 = l^2 k_y$, $\Phi_n(x)$ 是谐振子波函数, k_y 为 y 方向上的电子波矢。 $A_{\beta n}^{\tau s} = [(\beta [n\hbar^2 \omega_c^2 + \Delta_{\tau s}^2]^{1/2} + \Delta_{\tau s})/2\beta [n\hbar^2 \omega_c^2 + \Delta_{\tau s}^2]^{1/2}]^{1/2}$, $B_{\beta n}^{\tau s} = [(\beta [n\hbar^2 \omega_c^2 + \Delta_{\tau s}^2]^{1/2} - \Delta_{\tau s})/2\beta [n\hbar^2 \omega_c^2 + \Delta_{\tau s}^2]^{1/2}]^{1/2}$ 。

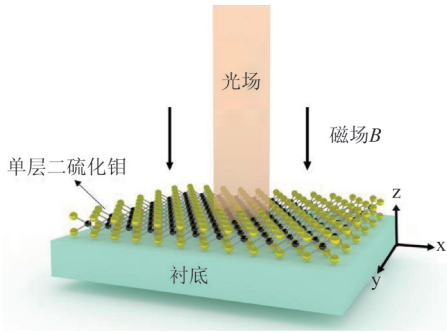


图1 理论模型所考虑样品和实验测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of theoretical consideration of the sample and experimental measurement

由电子数守恒定律得到电子浓度 N_e 表达式:

$$N_e = \frac{1}{2\pi l^2} \sum_{\tau, s, n} f(E_{\beta n}^{\tau s}), \quad (5)$$

这里, 电子的费米-狄拉克分布函数为 $f(E) = 1/[1 + \exp(E - \mu)/k_B T]$, 其中 μ 为 n -型样品中电子的化学势(或是在绝对零温情况下的费米能量)。

介电函数包含了系统对外界扰动的响应特性, 通过电子的密度-密度关联函数, 在RPA近似理论下可得到RPA介电函数表达式:

$$\epsilon(q, \omega) = 1 - v_c(q) \Pi(q, \omega), \quad (6)$$

其中, $v_c(q) = 2\pi e^2 / \kappa q$ 是库仑势的二维傅里叶变换, κ 为高频介电函数。密度-密度关联函数由下式给出:

$$\Pi(q, \omega) = \frac{1}{S_0} \sum_{\tau, s} \sum_{\beta n, \beta' n'} \sum_{k_y, k_y'} D_{\beta n k_y, \beta' n' k_y'}^{\tau s}(q) \times \frac{f(E_{\beta n}^{\tau s}) - f(E_{\beta' n'}^{\tau s})}{E_{\beta n}^{\tau s} - E_{\beta' n'}^{\tau s} + \hbar\omega + i\delta}, \quad (7)$$

其中, $D_{\beta n k_y, \beta' n' k_y'}^{\tau s}(q) = \left| \langle \alpha' | e^{-iq \cdot r} | \alpha \rangle \right|^2$ 是电子-电子相互作用项的形状因子, S_0 为所考虑系统的面积。

纵向磁光电导可由 Kubo 公式得到^[10]:

$$\sigma_{xx}(\omega) = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\kappa \omega}{2\pi q} \text{Im} \epsilon(q, \omega), \quad (8)$$

利用狄拉克等式 $1/(x \pm i\sigma) = P(1/x) \mp i\pi\delta(x)$, P 代表主值部分, 纵向磁光电导可写为:

$$\sigma_{xx}(\omega) = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\pi \hbar \omega \sigma_0}{l^2 q^2} \sum_{\tau, s} \sum_{\beta n, \beta' n'} D_{\beta n k_y, \beta' n' k_y'}^{\tau s} \times [f(E_{\beta n}^{\tau s}) - f(E_{\beta' n'}^{\tau s})] \delta(E_{\beta n}^{\tau s} - E_{\beta' n'}^{\tau s} + \hbar\omega), \quad (9)$$

其中, $n' = n \pm 1$ 为跃迁选择定则, $\sigma_0 = e^2/h$ 是量子化电导率。这里利用洛伦兹分布 $\delta(x) \rightarrow \Gamma/\pi/(x^2 + \Gamma^2)$ 来替换 δ 函数, 其中 Γ 为能量展宽。

2 结果和讨论

在本研究中, 将 n -型单层二硫化钼置于一个能引起邻近效应诱导产生的交换作用的介电衬底上。在数值计算过程中, 采用了典型的单层二硫化钼参数^[16]: 费米速度 $v_F = 5.3 \times 10^5$ m/s, $\Delta = 830$ meV, $2\lambda_c = -3$ meV, $2\lambda_v = 148$ meV, $g_v = 3.57$, $g_s' = 0.21$ 。此外, 由于有效塞曼场 B_c 和 B_v 以及磁场能通过实验进行调控, 我将其设置为可变参数。

根据式(2)和式(5)可以分别得到该系统的朗道能级以及给定电子浓度下的费米能级(Fermi Levels)。如图2所示, 朗道能级劈裂随磁场线性增加, 与报道过的未考虑邻近效应诱导产生的交换作用下的单层二硫化钼研究结果一致^[6,16]。邻近效应诱导产生的交换作用能打破谷简并, 增大自旋劈裂。此外, 有效塞曼场 $B_c = 30$ meV 和 $B_v = 20$ meV 分别导致在导带和价带内自旋劈裂的增加。我们发现设定电子浓度下的费米能级随磁场的变化呈锯齿形, 且随着磁场的增大而减小。这是因为随着磁场增大, 朗道能级能量增加, 导致费米能级提高, 当磁场增加到一定程度后, 电子会脱离高指数朗道能级并只能占据低指数能级, 由于低指数朗道能级上电子占据态的增加, 会导致费米能级下降。总的来说, 随着磁场强度增加, 朗道能级简并度不断增大, 所以费米能级总趋势是下降的。

图3给出一定条件下 n -型单层二硫化钼导带内朗道能级间电子跃迁所贡献的纵向磁光电导随光子能量的变化情况。在太赫兹频段, 不同磁场下纵向磁光吸收光谱中都有两个吸收峰出现。与之前报道过的在太赫兹频段内有且仅有一个磁光吸收峰有所不同^[11], 这是因为邻近效应诱导的交换作用能够消除谷简并, 形成谷能级劈裂, 并通过谷间电子跃迁产生两个吸收峰。由于磁光吸收是通过电子跃迁产生, 在较低温度下电子跃迁只发生在费米

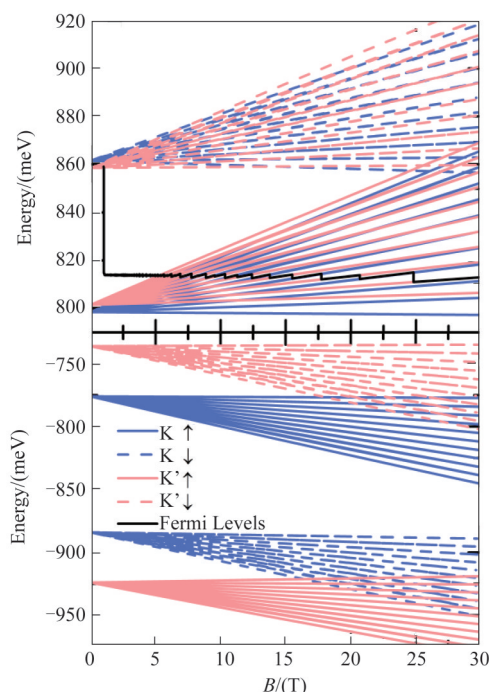


图2 单层二硫化钼随磁场强度变化的朗道能级以及载流子浓度 $N_e = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时对应的费米能级,有效塞曼场强度为 $B_e = 30 \text{ meV}$ 和 $B_v = 20 \text{ meV}$ 。顶部和底部分别为导带和价带

Fig. 2 The LLs and Fermi level as a function of magnetic field strength B for a carrier density $N_e = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ in ML-MoS₂. The effective Zeeman fields are $B_e = 30 \text{ meV}$ and $B_v = 20 \text{ meV}$. The top and bottom panels correspond to the conduction and valence bands, respectively

能级附近的朗道能级之间。在所讨论的电子浓度和磁场下,费米能级位于 K 谷和 K' 谷自旋向上的子带能级上,也就是说在较高能量的 K 谷和 K' 谷自旋向下的电子子带上几乎没有电子填充,吸收峰只能由 K 谷和 K' 谷自旋向上子带中的电子跃迁所贡献,因而图3中只出现两个磁光吸收峰。此外,随着磁场强度的增加,磁光吸收峰出现蓝移且吸收峰强度减弱。这是因为回旋共振频率 $\hbar\omega_c$ 与 \sqrt{B} 成正比,从图2中可以看到,随着磁场的增大,朗道能级之间的能级差也随之增大,导致磁光吸收峰的蓝移。同时,能量展宽 Γ 随着磁场增加将使吸收峰强度减弱。

为了探究邻近效应诱导产生的交换作用对纵向磁光电导率的影响,图4给出了一定温度、电子浓度、磁场强度、以及不同有效塞曼场下纵向磁光电导率随光子能量的变化。与图3中的结果一样,可以看到磁光吸收谱中出现两个吸收峰。图4中在右侧区域强度较大的三个吸收峰由不同有效塞曼场

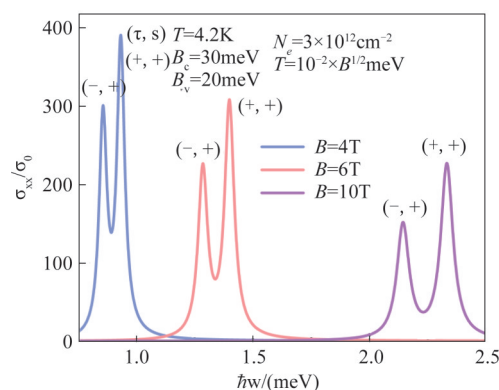


图3 在一定温度、电子浓度和有效塞曼场,不同磁场强度下 n -型单层二硫化钼导带内不同朗道能级间电子跃迁所贡献的纵向磁光电导率随光子能量 $\hbar\omega$ 的变化

Fig. 3 The magneto-optical conductivity induced via the transitions processes within the conduction band LLs as a function of photon energy $\hbar\omega$ at fixed temperature, electron density, and effective Zeeman fields for different magnetic field strengths in n -type ML-MoS₂

下的 K 谷自旋向上的电子跃迁贡献,而左侧区域较小的吸收峰则由在 K' 谷自旋向上的电子跃迁所贡献。我们发现随着有效塞曼场 B_e 和 B_v 的增大,吸收峰会出现蓝移。也就是说, n -型单层二硫化钼样品的纵向磁光吸收可以通过改变有效塞曼场 B_e 和 B_v 的大小来进行有效的调节。

图5给出一定温度、电子浓度、有效塞曼场以及磁场下从满占据的价带到电子浓度 $N_e = 3 \times$

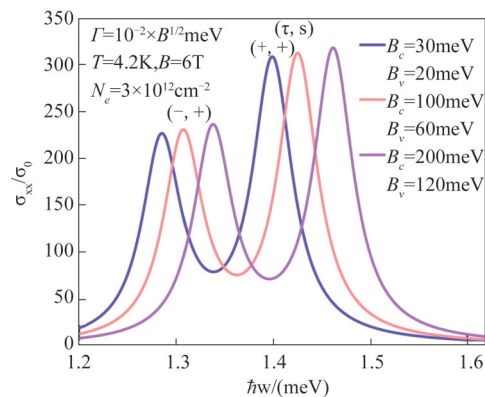


图4 在一定温度、电子浓度以及磁场强度,不同有效塞曼场下 n -型单层二硫化钼导带内不同朗道能级间电子跃迁所贡献的纵向磁光电导率随光子能量 $\hbar\omega$ 的变化

Fig. 4 The magneto-optical conductivity induced via the transitions processes within the conduction band LLs as a function of photon energy $\hbar\omega$ at fixed temperature, electron density, and magnetic field strength for different effective Zeeman fields in n -type ML-MoS₂

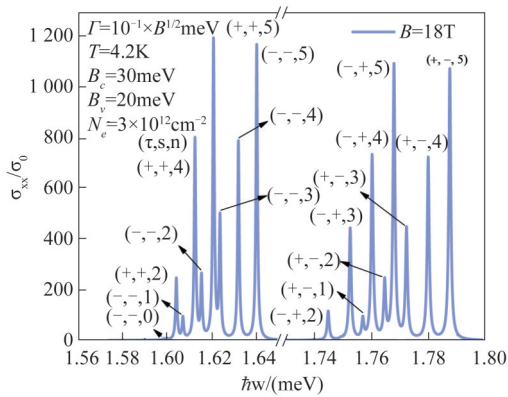


图5 在一定温度、电子浓度、有效塞曼场以及磁场强度下，从满占据的价带到电子浓度 $N_e = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的导带电子跃迁前6个通道所贡献的纵向磁光电导率随光子能量 $\hbar\omega$ 的变化

Fig. 5 The magneto-optical conductivity induced via the transitions from the occupied valence band to conduction band with an electron density $N_e = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ as a function of photon energy $\hbar\omega$ at a fixed temperature, electron density, effective Zeeman fields, and magnetic field strength. The magneto-optical absorptions from the first six transition channels are indicated

10^{12} cm^{-2} 的导带朗道能级间电子跃迁前六个通道所贡献的带间纵向磁光电导率随光子能量的变化。可以看到，在可见光频段有多个磁光吸收峰出现。与之前报道过的二硒化钨在可见光区域的磁光反射光谱实验^[14]以及理论^[11,17]结果相符合。值得一提的是，在研究中，由衬底引入的邻近效应诱导产生的交换作用能够打破电子系统中的谷简并使得在单层二硫化钼的带间磁光电导谱中出现更多的磁光吸收峰。在低频区域的磁光吸收峰由 K 谷自旋向上以及 K' 谷自旋向下的电子跃迁所贡献，高频区域由 K 谷自旋向下以及 K' 谷自旋向上的电子跃迁所贡献。说明磁场下的单层二硫化钼在可见光区域有着丰富的磁光吸收性质。

3 结论

在本项研究中，考虑外加磁场导致的量子化朗道能级以及邻近效应诱导产生的交换作用，通过低能区单电子哈密顿量和RPA近似下的介电函数，研究了单层二硫化钼中电子的朗道能级以及 n -型单层二硫化钼导带内、价带到导带间的电子跃迁所贡献的纵向磁光电导率。进一步探究了磁场、邻近效应诱导产生的交换作用对纵向磁光电导率的影响。研究表明，邻近效应诱导产生的交换作用能够提升

单层二硫化钼的自旋和谷极化；对于 n -型单层二硫化钼样品，导带内电子跃迁纵向磁光电导率谱在太赫兹频段出现两个吸收峰；从满占据的价带到电子浓度 $N_e = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的导带间的电子跃迁贡献的纵向磁光电导率谱在可见光频段出现一系列吸收峰；磁场强度和邻近效应诱导产生的交换作用均能有效地调节磁光吸收峰的位置。研究结果表明，单层二硫化钼作为一个新型二维半导体材料，可应用于太赫兹到可见光频段的自旋电子学和谷电子学磁光材料和器件，且可通过改变外加磁场和邻近效应诱导产生的交换作用的方法来调控材料的磁光响应性质，进而拓展材料潜在的器件应用领域。

References

- [1] Arora A. Magneto-optics of layered two-dimensional semiconductors and heterostructures: progress and prospects [J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, **129**:120902.
- [2] Zhou F, Ji W. Giant three-photon absorption in monolayer MoS_2 and its application in near-infrared photodetection [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2017, **11**:1700021.
- [3] Wang Q, Wee A. Photoluminescence upconversion of 2D materials and applications [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2021, **33**(22):223001.
- [4] Tahir M, Manchon A, Schwingenschlgl U. Photoinduced quantum spin and valley Hall effects and orbital magnetization in monolayer MoS_2 [J]. *Physical Review B*, 2014, **90**(12):125438.
- [5] Di X, Liu G B, Feng W, et al. Coupled spin and valley physics in monolayers of MoS_2 and other group-VI dichalcogenides [J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(19):196802.
- [6] Tahir M, Vasilopoulos P, Peeters F M. Quantum magneto-transport properties of a MoS_2 monolayer [J]. *Physical Review B*, 2016, **93**(3):035406.
- [7] Lembke D, Kis A. Correction to breakdown of high-performance monolayer MoS_2 transistors [J]. *Acs Nano*, 2013, **7**(4):10070-10075.
- [8] Baugher B, Churchill H, Yang Y, et al. Intrinsic electronic transport properties of high-quality monolayer and bilayer MoS_2 [J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(9):42124216.
- [9] Giuliani G F, Vignale G. *Quantum theory of the electron liquid* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [10] Yang C H, Xu W, Tang C S. Fast-electron magneto-optical spectrum of a two-dimensional electron gas in the presence of spin-orbit interaction and quantizing magnetic fields [J]. *Physical Review B*, 2007, **76**(15):155301.
- [11] Nguyen C V, Hieu N N, Muoi D, et al. Linear and nonlinear magneto-optical properties of monolayer MoS_2 [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, **123**(3):034301.
- [12] Dong H M, Tao Z H, Duan Y F, et al. Substrate dependent terahertz magneto-optical properties of monolayer WS_2 [J]. *Optics Letters*, 2021, **46**(19):4492-4495.
- [13] Plochocka P, Faugeras C, Orlita M, et al. High-energy limit of massless dirac fermions in multilayer graphene us-

- ing magneto-optical transmission spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(8): 087401.
- [14] Wang Z , Shan J , Mak K F. Valley- and spin-polarized Landau levels in monolayer WSe₂ [J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, **12**:144-149.
- [15] Pisoni R , Kormányos A, Brooks M , *et al.* Interactions and magnetotransport through spin-valley coupled Landau levels in monolayer MoS₂ [J]. *Physical Review Letters*, 2018, **108**(19): 247701.
- [16] Hien N D, Nguyen C V, Hieu N N, *et al.* Magneto-optical transport properties of monolayer transition metal dichalcogenides [J]. *Physical Review B*, 2020, **101**(4) : 045424.
- [17] Huong P T, Moui D, Bich T N, *et al.* Intra- and inter-band magneto-optical absorption in monolayer WS₂ [J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, **124**:114315.
- [18] Zhao X N, Xu W, Xiao Y M, *et al.* Terahertz optical Hall effect in monolayer MoS₂ in the presence of proximity-induced interactions [J]. *Physical Review B*, 2020, **101**(24):245412.