

## InSb 薄膜磁阻效应的厚度依赖性

张豫徽<sup>1,2</sup>, 宋志勇<sup>2,3</sup>, 陈平平<sup>2</sup>, 林铁<sup>2</sup>, 田丰<sup>1</sup>, 康亭亭<sup>2\*</sup>

(1. 上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083

3. 华东师范大学 极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:**在 12 ~ 300 K 的温度范围内研究了 InSb 薄膜(利用 MBE 生长)的磁阻效应随厚度的变化关系. 实验发现厚的 InSb 薄膜只能产生半经典( $\propto B^2$ )磁阻效应. 而减小薄膜厚度, 在薄的 InSb 薄膜中会更容易出现弱反局域化效应, 从而造成在低温下( $< 35$  K) 出现了一个异常的随温度增加而迁移率降低的趋势. 我们发现该弱反局域化效应可用 HLN 模型拟合, 证明了它可能来源于二维(2-D)体系, 比如 InSb 的界面态.

**关键词:** 碲化铟; 磁阻效应; 弱反局域化效应; 界面/表面态

**中图分类号:** O472; O484 **文献标识码:** A

## Thickness-dependent magnetoresistance effects in InSb films

ZHANG Yu-Hui<sup>1,2</sup>, SONG Zhi-Yong<sup>2,3</sup>, CHEN Ping-Ping<sup>2</sup>, LIN Tie<sup>2</sup>, TIAN Feng<sup>1</sup>, KANG Ting-Ting<sup>2\*</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education,

East China Normal University, Shanghai, 200062, China)

**Abstract:** We experimentally investigated the thickness-dependent magnetoresistance properties of InSb films in the temperature range of 12 ~ 300 K. The samples were grown on semi-insulating GaAs (100) substrates by molecular beam epitaxy (MBE). It was observed that the thick InSb only can show the semi-classical  $B^2$  dependence magnetoresistance resulted from the Lorentz deflection of carriers. At the same time, we found that weak antilocalization (WAL) effect can be much enhanced by reducing the sample's thickness (with the thickness  $\sim 0.1 \mu\text{m}$ ). The thin sample's WAL magnetoresistance plot can be well fitted by Hikami-Larkin-Nagaoka (HLN) model, which demonstrates that the observed WAL effect for thin InSb is with a 2-dimension character, which can be associated with the surface/interface states of InSb.

**Key words:** InSb, magnetoresistance, weak antilocalization effect, surface/interface states

**PACS:** 73.40.-c, 73.50.-h

### 引言

III-V 族化合物碲化铟 (InSb), 是一种窄禁带半导体材料, 室温禁带宽度 0.18 eV, 因此被广泛应用

短波和中波红外(1 ~ 5  $\mu\text{m}$ ) 探测器. 另外, InSb 具有极高的电子迁移率和较小的电子有效质量等优良的电学特性. 因此, InSb 作为一种优秀的光电材料, 一直都是研究的热点<sup>[1]</sup>.

收稿日期: 2016-10-03, 修回日期: 2016-12-21

Received date: 2016-10-03, revised date: 2016-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(11204334, 61475178)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11204334, 61475178)

作者简介 (Biography): 张豫徽 (1989-), 男, 河南睢县人, 硕士, 主要从事半导体材料的低温光电特性、低温输运特性的研究. E-mail: zyh15286829397@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: kang@mail.sitp.ac.cn

与一般的半导体(比如 GaAs, Si)相比, InSb 具有非常特殊的界面/表面性质. 比如 InSb 的表面存在电子聚集层<sup>[2]</sup>, 这使得制备 InSb 的欧姆接触非常容易, 同时也让 InSb 的肖特基接触变得困难. 另外, 在光电行为方面, InSb 的界面态(及其参与的光生载流子俘获过程)也被认为是造成 InSb 中特殊的负光电导的主要原因<sup>[3,4]</sup>. 近年来, 利用 InSb 极强的自旋-轨道耦合(spin-orbit coupling, SOC)作用与超导体的近邻效应(proximity effect)构成的 InSb/超导体结(比如 InSb/Nb)<sup>[5,6]</sup>也展现出了在马约拉纳费米子(Majorana Fermions)应用方面的潜力. 而能否实现有效而稳定的马约拉纳费米子被认为是实现拓扑量子计算的关键因素. 在这方面, InSb 的界面态的 SOC 效应将是一个具有广泛兴趣和深远物理意义的话题.

虽然 InSb 的界面性质如此重要, 但是在这方面却缺少系统性的研究. T. Zhang 等人研究了不同厚度下 MBE 所生长的 InSb 薄膜电学性质<sup>[1]</sup>. 而他们的测量温度太高(室温), 对于澄清 InSb 界面的 SOC 效应几乎没有帮助. Y. H. Zhang 等也做了类似的变厚度及更进一步的低温测量<sup>[7]</sup>. 但是他们最薄的样品也有 1  $\mu\text{m}$  厚, 也不大可能触及到 InSb 的界面态. 另外, 以上工作亦局限于仅研究迁移率  $\mu$  和载流子面密度  $n$  等普通电学性质, 未能深入地研究 InSb 界面态的 SOC 效应. 在本文中, 我们将利用磁阻测量这一研究 SOC 的有力工具来研究 InSb 的界面态.

研究与厚度相关的输运行为是澄清界面/表面态行为的有效方法. 在此方法中, 通过减小厚度, 界面对样品整体的电学性质的贡献将越来越大, 从而可以很明确地确认界面态具有哪些特殊的输运行为, 同时澄清体态的影响. 比如, 最近在三维拓扑绝缘体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ <sup>[8,9]</sup> 中发现, 减小材料的厚度可以明显地分辨出拓扑表面态与平庸的体态(bulk state)之间截然不同的电学性质, 比如不同的与温度的关系. 因此, 为了研究 InSb 界面态, 本文选择几种不同厚度的 InSb 薄膜进行了低温电学测量, 以期待能够系统地澄清 InSb 的界面态的输运性质.

## 1 实验

利用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)技术在半绝缘 GaAs(100)衬底上生长三块 InSb 薄膜样品, 生长厚度  $d = 0.75 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$  和  $0.15 \mu\text{m}$ , 并被分别命名为样品 A、B 和 C. 这些样品被切割成  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  的正方形, 在其四角上采用焊 In

法制作电极, 然后经过  $300^\circ\text{C}$  左右的低温退火使其形成欧姆接触. 在垂直磁场 ( $-1.4 \text{ T} < B < 1.4 \text{ T}$ ) 的条件下, 采用范德堡法对薄膜样品 A、B、C 分别进行变温 ( $12 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ ) 磁阻及霍尔测量. 霍尔测量结果表明所有 3 个样品均为 n 型.

## 2 结果与讨论

图 1(a, b, c) 分别展示了 3 个样品的零磁场下方块电阻  $R_{\square, B=0}$ , 迁移率  $\mu$ , 电子二维面密度  $n$  随温度  $T$  的变化关系. 图 1(a) 中, 3 个样品均表现出典型的半导体型的导电机理, 即  $R_{\square}$  随温度升高而减小. 而比较特殊的是, 最薄的样品 C 的  $R_{\square, B=0}$  在低温下 ( $T < 35 \text{ K}$ ) 随着温度的升高, 减小幅度较小, 呈平台状趋势. 图 1(b) 中, 3 个样品的迁移率仍然大体上表现出典型的半导体型的行为, 即: 迁移率随温度升高而增大. 比较特殊的仍然是样品 C: 它的迁移率在低温下 ( $T < 35 \text{ K}$ ) 突然随温度的升高有异常的降低. 图 1(c) 中, 3 个样品的载流子浓度均随温度的增加而变大. 特别是在  $200 \text{ K}$  温度以上, 载流子浓度的增加尤为明显. 这与文献中的报道是一致的<sup>[2]</sup>. 一般认为是从价带到导带的热激发主导了 InSb 的体载流子浓度与温度的关系. 而对于样品 C, 其载流子浓度随温度的变化明显比厚后的样品 A、B 小很多, 表明界面态中的载流子来源与体内存在显著的差异.

综上所述, 样品 C 的  $R_{\square, B=0}$  在低温下 ( $T < 35 \text{ K}$ ) 的异常“平台”来源于电子迁移率在低温 ( $T < 35 \text{ K}$ ) 下随温度升高的异常减小. 为了研究该电子迁移率在低温温度升高而减小的机制, 我们对 3 个样品进行了磁阻测量. 图 2(a) 是 3 个样品在  $12 \text{ K}$  下的  $R_{\square, B=0}$  随磁场  $B$  变化的磁阻曲线. 对于样品 B [图 2(a, 中)], 我们可以看到  $R_{\square}$  随磁场  $B$  的变化呈现出抛物线状的变化, 即:  $R_{\square}(B) - R_{\square}(0) = \Delta R_{\square}(B) \propto B^2$ <sup>[10]</sup>. 这抛物线型的关系可以用半经典机制解释, 即电子运动轨迹在磁场的作用下被偏转, 从而导致  $R_{\square}$  随磁场的增大而变大<sup>[10]</sup>. 对于更厚的样品 A, 材料在厚度方向的性质不均匀性开始显现, 因此  $R_{\square}(B)$  开始偏离单层假设, 需要用多层模型来解释. 这直接导致  $R_{\square}(B)$  在磁场较大时, 开始出现类似“饱和”的趋势, 从而偏离  $B^2$  的关系.

一般来说, 随着生长的进行, 由于衬底的影响越来越小, InSb 的晶体质量会逐渐改善, 样品总体的迁移率因而随厚度的增加会不断提高, 如图 1(b) 所示. 这个现象被广泛地在 InSb 材料生长实验中观测

到<sup>[1,7]</sup>. 另外,该现象的一个结果就是:样品在生长方向的晶体质量会发生变化,使得整个样品不再可以简单地看成一个单层结构,而应该等效地看作一个多层结构加以考虑. 而对于最简单的双层模型(由层 1 和层 2 组成)<sup>[2]</sup>,在半经典机制的框架下,我们可以用以下公式描述  $R_{\square}(B)$ :

$$\Delta R_{\square}(B)/R_{\square}(0) = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2 G_1 G_2 B^2}{(G_1 + G_2)^2 + (\mu_1 G_2 + \mu_2 G_1)^2 B^2}, \quad (1)$$

其中下标 1、2 为层的名称,  $G$  为电导,  $\Delta R_{\square}(B) = R_{\square}(B) - R_{\square}(0)$ . 当两层电导大小相近时,即  $G_1 \approx G_2$  时,式(1)可近似为:

$$\Delta R_{\square}(B)/R_{\square}(0) \approx \frac{D \times B^2}{1 + E \times B^2}, \quad (2)$$

其中  $D$ 、 $E$  为常数. 当磁场  $B$  足够大时,  $\Delta R_{\square}(B)/R_{\square}(0)$  就会趋近于一个常数,也就是上面提到的图 2(a,上)中样品 A 在磁场较大时出现的“饱和”. 需要指出的是,这里的多层结构仅仅是由特殊的材料生长机制导致非常平庸的结构,它和我们感兴趣的界面态/体态的双层模型是完全不同的. 因此这种多层结构所导致的磁阻效应反而在厚膜材料中才会出现.

对于薄的样品 C, 由图 2(a,下)所示,其  $R_{\square}(B)$  曲线已经完全不能够用半经典模型来解释了. 具体来说,样品 C 表现出了同时包含弱局域化(WL, weak localization)和弱反局域化(WAL, weak anti-localization)复杂的磁阻效应<sup>[11]</sup>. 在无序系统中,电子在输运的过程中不断地受到散射,从而产生类似于随机的运动轨迹. 基于量子力学效应,在此过程中,电子的波函数的相位将不断发生干涉和叠加. 其结果就是电子趋向于形成一个闭合的运动轨迹(因为这将使得波函数形成正的叠加),导致电阻变大. 这就是所谓的弱局域化效应. 当更进一步考虑 SOC 效应的时候,由于自旋翻转  $2\pi$  角度将给电子波函数带来  $\pi$  的相位变化,电子的波函数在闭合轨迹内将形成负的干涉(导致电阻变小,迁移率变大),这就是弱反局域化效应<sup>[12]</sup>.

在图 2(a,下)中,低温下(12K)和  $|B| > 0.16$  T 时,样品 C 的  $R_{\square}(B)$  表现为 WL, 即:随着磁场增大,  $R_{\square}$  变小. 当磁场较小[  $|B| < 0.16$  T]时,  $R_{\square}(B)$  呈现出一个方向朝下的尖峰,这就是所谓的 WAL. 而 WAL 的存在也就意味着样品中有很强的 SOC. InSb 的 WAL 以及 WAL 和 WL 的并存现象已经被广泛地报道了<sup>[11,13-15]</sup>. 而我们工作表明降低样品厚度更有利于 WAL 效应的出现,也就是样品 C 比样品

A、B 更容易变现出 WAL,这意味着表面态可能比体态有更强的 WAL 效应.

在图 2(b)中,我们更系统地研究了样品 C 中磁阻效应随温度变化的情况. 当温度较低时( $T < 40$  K), WAL 和 WL 同时存在. 但是随着温度升高, WAL 迅速变弱. 当  $T > 40$  K 时, WAL 几乎完全消失. 进一步升温将使 WL 也被减弱. 在室温(300 K)下,样品 C 中的量子局域化(包括 WL 和 WAL)效应已经全部被热效应所抑制,样品的磁阻曲线趋近于半经典的  $B^2$  关系. 而对于厚的样品 A[图 2(d)]和 B[图 2(c)],从 12 K 到 300 K,均为半经典的  $B^2$  关系. 这进一步证明厚度是决定 InSb 中 WAL 能否被观测到的重要因素.

WAL 效应可以用来很好地解释样品 C 中存在的低温( $T < 35$  K)下迁移率的异常的随温度升高而下降的现象. 这是由于温度升高可以破坏电子运动的相干性,从而也会抑制 WAL 效应及其导致的迁移率变大的效果,因此迁移率也就随温度升高而下降了. 在图 2(b)中,样品 C 的 WAL 效应在 35 K 时已经非常微弱了,在温度为 40 K 时基本消失. 这和图 1(b)中样品 C 的迁移率随温度升高而产生异常下降( $T < 35$  K)在相似的温度范围内. 这进一步支持了我们的观点:WAL 效应是造成样品 C 的方块电阻和迁移率在  $T < 35$  K 温度下异常的主要原因.

应该指出的是,WAL 在更薄的 InSb 中更明显,这与一般的 SOC 材料是不一样的. 一般的 SOC 材料中,如果材料的无序程度变大,WAL 将会被削弱,直到消失<sup>[16]</sup>. 按照这个趋势,随着厚度的降低,受衬底的影响 InSb 的晶体质量会变差,即无序程度变大. 这直接的证据就是越薄的 InSb 的迁移率越低,如图 1(b)所示. 因此,由于增大的晶格无序,WAL 将会变得越来越弱. 这明显与我们观测到的结果相反. 因此,我们认为,样品 C 中的 WAL 不大可能是由变薄的体态所产生的,而是由 InSb 独特的界面态所贡献的.

对于样品 C 中的零磁场附近的 WAL 磁阻曲线,可以用以下 HLN(Hikami-Larkin-Nagaoka)公式<sup>[17-18]</sup>很好地加以拟合[比如在图 2(a,下)所示]:

$$\frac{\Delta R_{\square}(B)}{[R_{\square}(0)]^2} = -\alpha \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar} \left[ \psi\left(\frac{1}{2} + \frac{B_{\phi}}{B}\right) - \ln\left(\frac{B_{\phi}}{B}\right) \right], \quad (3)$$

其中  $\Delta R_{\square}(B) = R_{\square}(B) - R_{\square}(0)$ ,  $\Psi(x)$  是 digamma 函数,  $B_{\phi}$  是一个和自旋-轨道散射相关的特征磁场值. 由  $B_{\phi} = \hbar/(4el_{\phi}^2)$  可以计算得到电子的 SOC 退

相干长度  $l_\phi$ .  $-\alpha$  表示导电通道的数目:  $-\alpha = 1$  表示 2 个独立通道,  $-\alpha = 1/2$  表示 1 个通道. 上述 HLN 公式实际上描述的是强 SOC 情况下二维体系的 WAL 效应. “二维体系”意味着  $l_\phi$  应该满足  $l_\phi \geq t_0$  ( $t_0$  为体系的特征厚度). 由图 3(a), 我们拟合得到  $l_\phi \approx 360$  nm (当  $T < 40$  K 时), 该  $l_\phi$  值大于样品 C 的厚度 150 nm, 而 InSb 界面态的特征厚度应该会比 150 nm 更小, 因此  $l_\phi \geq t_0$  完全可以被满足, 进一步证明了 HLN 公式在样品 C 的 WAL 中的适用性.

利用式(3), 通过拟合 WAL 曲线, 我们得到了样品 C 中  $l_\phi$  [图 3(a)] 和  $-\alpha$  [图 3(b)] 随温度的变化关系. 正如所预期的,  $l_\phi$  随着温度的升高逐渐变小, 展示了 WAL 被热效应所抑制的过程, 即温度升高非弹性增强, 破坏了电子的自旋轨道耦合. 另一参数  $-\alpha$  随温度的变化情况: 随温度升高,  $-\alpha$  从  $\sim 0.18$  (12 K 时) 变小到  $\sim 0.06$  (40 K 时). 一般来说,  $-\alpha = 1$  意味着样品的上/下界面分别构成了 2 个独立的通道,  $-\alpha = 1/2$  意味着样品的上/下界面合并成了一个通道. 由于实验体系的复杂性和拟合带来的误差, 在实践中,  $-\alpha$  经常会偏离理想值 (1 或 1/2). 这在别的体系中也曾遇到过, 比如  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [18]. 不过一般认为,  $-\alpha$  值的减小, 意味着上/下界面的耦合变强了, 导致了它们趋向于合并为一个通道. 关于温度升高会增强上/下界面的耦合, 一个可能的解释是界面态和体态之间存在非弹性的弛豫过程, 而该过程是通过晶格振动来协调实现的, 例如最近所报道的所谓的声子协调的体-表面态耦合 (phonon-mediated coupling between bulk and surface states) [19], 因此该过程的强度将会随温度升高导致的晶格振动加强而变大, 从而导致界面-体的耦合增强, 进而使上下界面有效耦合在一起.

### 3 结论

系统地研究了不同厚度的 InSb 薄膜的磁输运行为. 实验发现, 厚膜表现为半经典磁阻效应, 或者是多层体态的半经典磁阻效应, 薄 InSb 的在低温下出现弱反局域效应. 薄的 InSb 薄膜电子浓度随温度变化很小, 而且电子迁移率在低温下 ( $< 35$  K) 随温度升高会发生反常的降低, 这是由于薄的 InSb 更容易发生弱反局域化效应. 由于在一般的自旋轨道耦合材料中, 材料中的无序对反弱局域效应起抑制的作用, 考虑到降低样品厚度会引入更大的材料无序, 以上结果很难用一般的 InSb 体态来解释, 必须用 InSb 的界面态来解释, 即: InSb 的界面态具有比体

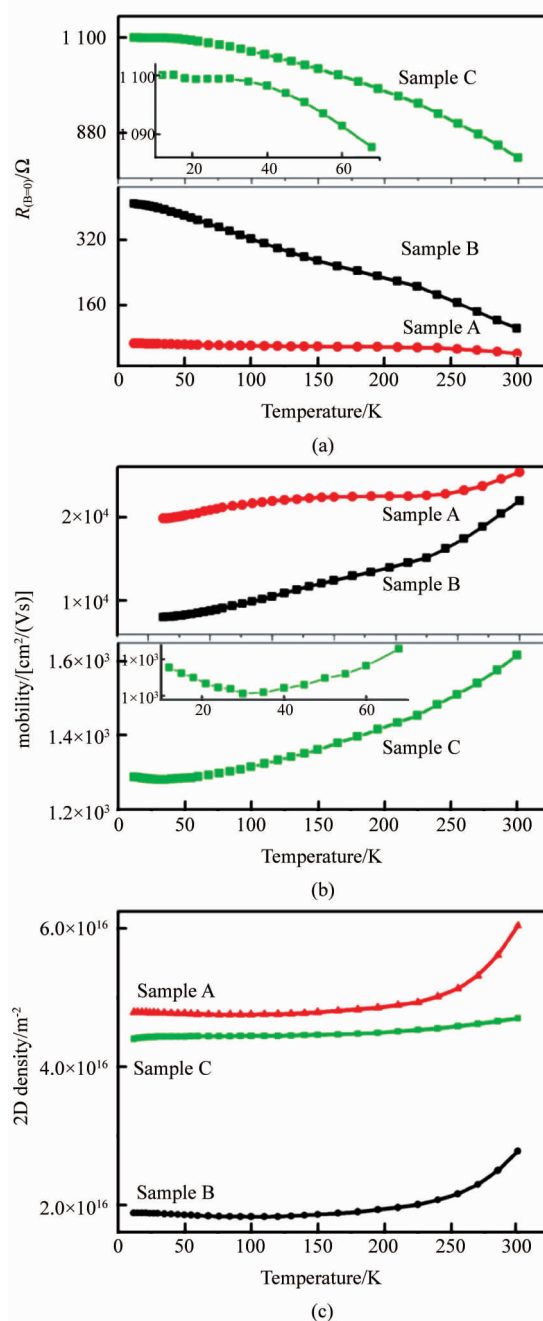


图1 样品 A、B、C 的 (a) 零磁场下的方块电阻, (b) 迁移率 (c) 载流子面密度, 随温度的变化的关系  
 Fig. 1 (a) Square Resistance  $R_{\square}$  at zero magnetic field, (b) mobility  $\mu$ , (c) 2-D density  $n$  vs. temperature  $T$  for samples A, B, and C

态更强的弱反局域化效应. 基于 Hikami-Larkin-Nagaoka 模型的分析也表明, 所观察到的薄 InSb 中的弱反局域化效应符合二维体系 (即界面态, 而不是三维的体态) 的特征.

### References

- [1] Zhang T, Clowes S K, Debnath M, *et al.*. High-mobility

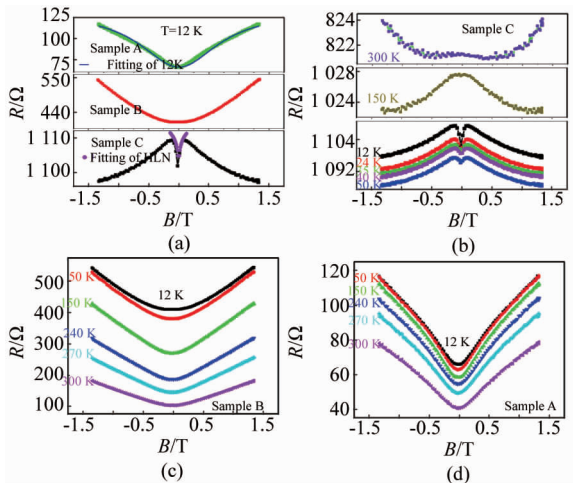


图2 磁阻测量结果:(a) 温度  $T = 12 \text{ K}$  时, 样品 A、B、C 的磁阻效应; 蓝色实线是利用公式(2)对样品 A 的磁阻结果的拟合, 粉色点线是利用公式(3)对样品 C 的 WAL 的拟合. 在  $12 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$  温度区间的磁阻曲线, (b) 样品 C, (c) 样品 B, (d) 样品 A

Fig. 2 (a) The magnetoresistance of sample A, B and C at temperature  $T = 12 \text{ K}$ . The blue solid line is the fitting to the magnetoresistance plot of sample A via Eq. (2). The pink dot line is the fitting to the WAL effect of sample C via Eq. (3). The magnetoresistance plots under the temperature range of  $12 \text{ K} \sim 300 \text{ K}$  for sample C (b), sample B(c), and sample A(d)

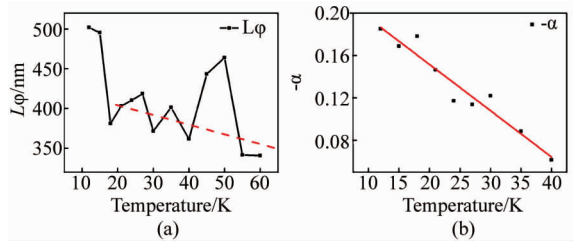


图3 对样品 C 中弱反局域化曲线通过 HLN 模型(式(3))进行拟合, 得到的(a)  $l_\varphi$ , (b)  $-\alpha$  随温度的变化关系. 虚线/实线指出了这些参数的演化趋势

Fig. 3 Extracted parameters  $l_\varphi$  (a) and  $-\alpha$  (b) from the fitting of the weak antilocalization magnetoresistance plots of sample C to Eq. (3) as a function of temperature. The solid/dashed line is a guide to eyes

thin InSb films grown by molecular beam epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**:4463.

- [2] Song S N, Ketterson J B, Choi Y H, *et al.* Transport properties in n-type InSb films grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, **63**: 964.

- [3] Beaulieu Y, Webb J B, and Brebner J L. Photoconductivity of InSb/GaAs heterogeneous at low temperature [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, **79**:1772.
- [4] Beaulieu Y, Webb J B, Brebner J L. Hot electron induced negative photoconductivity in n-InSb/GaAs with above gap illumination at low temperature [J]. *solid state communications*, 1990, **76**(3):233 – 236.
- [5] Mourik, V, Zuo K, Frolov S M, *et al.* Signatures of majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices [J]. *Science*, 2012, **336**:1003.
- [6] Steven R. Elliott, Marcel Franz, Colloquium: Majorana fermions in nuclear, particle, and solid-state physics [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2015, **87**:137.
- [7] Zhang Y H, Chen P P, Lin T, *et al.* MBE growth and electrical properties of InSb film on GaAs substrate [J]. *proc. of SPIE Vol.*, 1995, 79952G – 1.
- [8] Liu M H, Chang C Z, Zhang Z C, *et al.* Electron interaction-driven insulating ground state in Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> topological insulators in the two-dimensional limit [J]. *Physical Review B*, 2011, **83**:165440.
- [9] Yong S K, Matthew B, Namrata B, *et al.* Thickness-dependent bulk properties and weak antilocalization effect in topological insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> [J]. *Physical Review B*, 2011, **84**:073109.
- [10] He H T, Wang G, Zhang T, *et al.* Impurity effect on weak antilocalization in the topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> [J]. *Physical Review Letters*, 2011, **106**:166805.
- [11] Yang R, Gao K H, Zhang Y H, *et al.* Weak field magnetoresistance of narrow-gap semiconductors InSb [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **109**:063703.
- [12] Abrahams E. 50 Years of Anderson Localization [M]. Singapore, World Scientific, 2010:305 – 307.
- [13] Ishida S, Takeda K, Okamoto A, *et al.* Weak anti-localization in the accumulation layer of InSb/GaAs(100) hetero interface [J]. *J. Phys Soc. Jpn.*, Vol. 2003, **72**: Suppl. A pp. 153 – 15.
- [14] Ishida S, Takeda K, Okamoto A, *et al.* Spin-orbit interaction in InSb thin films grown on GaAs(100) substrates by MBE: effect of hetero-interface [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2005, **772**:1287.
- [15] Ishida S, Takeda K, Okamoto A, *et al.* Low-temperature transport properties of InSb films on GaAs(100) substrates [J]. *Physica E*, 2003, **18**:159 – 160.
- [16] Kentaro Nomura, Mikito Koshino, Shinsei Ryu. Topological delocalization of two-dimensional massless dirac fermions [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**:146806.
- [17] Shinobu Hikami, Anatoly I Larkin, Yosuke Nagaoka. Spin-orbit interaction and magnetoresistance in the two dimensional random system [J]. *Theor. Phys.*, 1980, **63**: 707.
- [18] Chiu Shao-Pin, Lin Juhn-Jong. Weak antilocalization in topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> microflakes [J]. *Physical Review B*, 2013, **87**:035122.
- [19] Reijnders A A, Tian Y, Sandilands L J, *et al.* Optical evidence of surface state suppression in Bi-based topological insulators [J]. *Physical Review B*, 2014, **89**:075138.