

硕士毕业论文初稿

YuXuan-Li

2021 年 1 月 25 日

高温超导异质结中的旋转对称破缺和部分马约拉纳角态

专业名称: 凝聚态物理

申请者: 李玉轩

导师姓名: 周涛 教授

摘要

以前, 基于维象的模型, 研究人员提出了可以在具有二维拓扑绝缘体和高温超导体的异质结构中实现高阶拓扑超导性。对于一个四方样品, 马约拉纳束缚态自然会出现在系统的各个角落。在这里, 我们从微观模型出发, 从理论上重新研究该系统。我们研究发现准粒子能谱的对称性与先前获得的显著不同。在动量空间中, 准粒子光谱的四重旋转对称性被破坏。对于圆柱几何体能带图, 零能量边缘状态可能会出现, 但它们位于一个边界。对于具有开放边界的有限大小系统, 马约拉纳边界状态仅出现在系统角的一部分处。通过研究超导配对序参量和反常格林函数, 可以很好地理解所有非对称结果。

关键词: 高阶拓扑超导, 马约拉纳, 拓扑绝缘体, 准粒子

Rotational symmetry breaking and partial Majorana corner states in a heterostructure based on high- T_c superconductors

Major: Condensed Matter Physics

Name: YuXuan-Li

Supervisor: Tao Zhou

ABSTRACT

Previously, based on a phenomenological model, it was proposed that the higher-order topological superconductivity can be realized in a heterostructure with a two-dimensional topological insulator and a high-temperature superconductor. The Majorana bound states naturally emerge at the corners of the system. Here starting from a microscopic model, we restudy this system theoretically. The symmetries of the quasiparticle energy spectra are significantly different from those previously obtained. In the momentum space, the fourfold rotational symmetry of the quasiparticle spectra is broken. For a cylinder geometry, the zero-energy edge states may appear, but they are localized at one boundary. For the finite-size system with open boundaries, the Majorana bound states emerge only at parts of the system corners. All of the asymmetrical results can be understood well by exploring the pairing order parameter and the anomalous Green's function.

Keywords: higher-order topological superconductivity, Majorana, topological insulator, quasiparticle

目 录

摘 要.....	II
ABSTRACT.....	III
1 绪论.....	1
1.1 拓扑绝缘体.....	1
1.2 拓扑超导体.....	2
1.3 高阶绝缘体.....	2
1.4 拓扑量子计算	2
2 模型建立.....	3
2.1 引言	3
2.2 模型与哈密顿量	3
2.3 运动方程.....	3
3 层间耦合对谱函数及能带的影响.....	4
3.1 谱函数计算结果及分析.....	4
3.2 边界态计算结果及分析.....	4
3.3 局域电子态密度结果及分析	4
3.4 本章总结	4
4 超导序参量计算.....	5
4.1 动量空间中超导序参量计算结果.....	5
4.2 实空间超导序参量计算结果	5
4.3 本章总结	5

5	反常格林函数计算	6
5.1	动量空间中的反常格林函数	6
5.2	系统边界处的反常格林函数	6
5.3	本章总结	6
6	总结与展望	7
	参考文献.....	8
	致谢.....	9
	参考文献.....	9

1 绪论

1.1 拓扑绝缘体

1980 年实验物理学家 Kalus von Klitzing 在二维电子气中加入高磁场，发现体系的霍尔电阻随着磁场强度改变的时候出现了一些非常平整的平台^[1]。这种整数化的平台其实是量子效应的一种宏观表现，正是这个发现为人们打开了研究拓扑物态的大门，而 Kalus von Klitzing 也因此获得了 1985 年的诺贝尔物理学奖。当均匀的电子气处于强磁场的时候会形成 Landua 能级，如果体系的费米面恰好处于 Landua 能级的中间，由能带论可知系统此时处于绝缘状态。但是之后的研究却发现虽然在强磁场下体系内部是绝缘的，但是在边界上却形成了无耗散的导电通道，正是这些通道的存在形成了平台化的霍尔电阻。1982 年 David J. Thouless, J. Michael Kosterlitz 等人 (TKNN) 对这个量子化的平台给出了完美的解释^[2]。通过 Kubo 公式求解体系霍尔电导发现它和一个正数是相关的，也就是说霍尔电导等于 ne^2/h ，这里的正数 n 表示为：

$$n = \frac{1}{2} \int_{\text{BZ}} d^2k \nabla_k \times i \sum_{l \in \text{bands}} \langle \varphi_l | \nabla_k | \varphi_l \rangle \quad (1.1)$$

人们将正数 n 称为第一陈数 (Chern Number)。从能带论的角度出发进行考虑，陈数代表的是二维电子气系统的一种拓扑性质，在不闭合体系能隙的时候，连续地改变哈密顿量不会引起它的改变，所以被称为拓扑不变量，这个量仅关联与电子态的拓扑性质。把环境与均匀二维电子气当作一个整体，当电子态从电子气体系统中演化到环境的时候，陈数将会由非零变为零，那么在环境与电子气的交界处必须存在着一个能隙为零的界面来过渡，这样才可以实现陈数的变化。霍尔电导与陈数之间的这种深刻联系完美解释了霍尔电导量子化平台的起源，也打开了拓扑物态在物理学领域的应用大门。

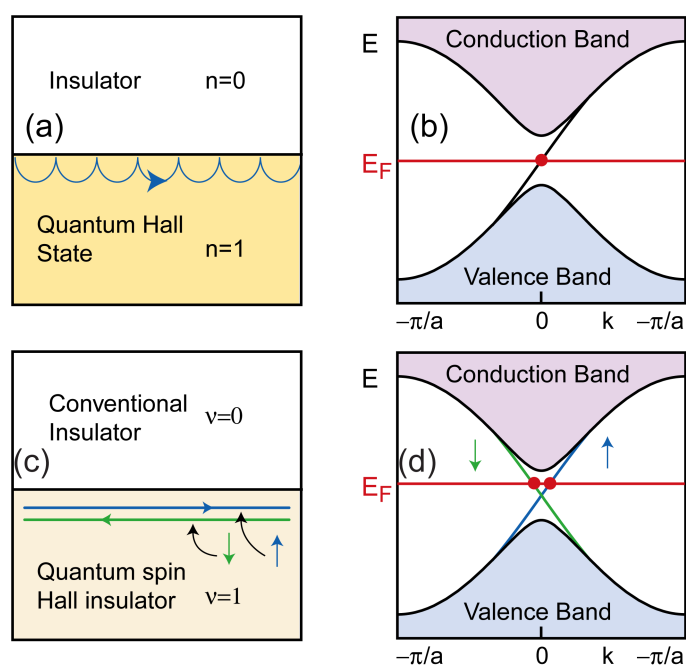


图 1.1: (a) 整数量子霍尔效应示意图。(b) 整数量子霍尔效应能带示意图。(c) 整数量子自旋霍尔效应示意图。(d) 整数量子自旋霍尔效应能带示意图。

1.2 拓扑超导体

1.3 高阶绝缘体

1.4 拓扑量子计算

2 模型建立

2.1 引言

2.2 模型与哈密顿量

2.3 运动方程

3 层间耦合对谱函数及能带的影响

- 3.1 谱函数计算结果及分析
- 3.2 边界态计算结果及分析
- 3.3 局域电子态密度结果及分析
- 3.4 本章总结

4 超导序参量计算

4.1 动量空间中超导序参量计算结果

4.2 实空间超导序参量计算结果

4.3 本章总结

5 反常格林函数计算

5.1 动量空间中的反常格林函数

5.2 系统边界处的反常格林函数

5.3 本章总结

6 总结与展望

参考文献

- [1] K. v. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper, New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized hall resistance, Phys. Rev. Lett. 45 (1980) 494–497.
- [2] D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, M. den Nijs, Quantized hall conductance in a two-dimensional periodic potential, Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 405–408.

致谢

满纸荒唐言，一把辛酸泪，都云作者痴，谁解其中味。

作者攻读学位期间发表的学术论文目录

发表的学术论文

- **Yu-Xuan Li** and Tao Zhou*, Rotational symmetry breaking and partial Majorana corner states in a heterostructure based on high- T_c superconductors, Physical Review B 103, 024517 (2021)
- 1. **Yu-Xuan Li** and Tao Zhou*, Rotational symmetry breaking and partial Majorana corner states in a heterostructure based on high- T_c superconductors, Physical Review B 103, 024517 (2021)