

激子绝缘体*

娄文凯 常凯[†]

(1 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

(2 中国科学院大学材料科学与光电技术学院 北京 100049)

2022-04-24收到

[†] email: kchang@semi.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220502

Exciton insulators

LOU Wen-Kai CHANG Kai[†]

(1 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 激子绝缘体是20世纪60年代初由诺贝尔物理学奖获得者莫特提出的一种新物相。众所周知,激子是固态系统中最典型的集体激发之一,简单地可视为电子-空穴由于库仑相互作用而形成的束缚对。在常规绝缘体或半导体材料中,单粒子能隙远大于激子束缚能。而在某些特殊的材料体系,如窄能隙半导体和二维材料中,激子的束缚能可能大于体系的单粒子能隙,因此体系内会自发形成大量的激子,进入激子绝缘体相。激子绝缘体是体系的基态,低浓度下激子可视为组合玻色子,在低温下会形成宏观相干态——激子玻色-爱因斯坦凝聚。文章简要地回顾了激子绝缘体的发展历史,并介绍了激子绝缘体、玻色-爱因斯坦凝聚和自旋超流的最新进展。

关键词 激子绝缘体, 窄能隙半导体, 二维材料, 激子凝聚, 自旋超流

Abstract An excitonic insulator is a new quantum phase proposed by the Nobel Prize winner in physics Nevill Mott in the early 1960s. It is well known that excitons are bound pairs formed by electron-hole Coulomb interaction in insulator and semiconductor systems where, traditionally, the single-particle energy gap is much larger than the exciton binding energy. However, in some specific materials, such as narrow-gap semiconductors and two-dimensional materials, this is reversed and a large number of excitons are spontaneously formed in the system, which becomes an exciton insulator and is the ground state. At low concentrations, excitons can be regarded as composite bosons, a macroscopic quantum coherent phase, thus an exciton Bose-Einstein condensate can be observed at low temperatures. This paper briefly reviews the history of exciton insulators, as well as recent progresses on exciton insulator phases and spin superfluidity.

Keywords excitonic insulators, narrow-gap semiconductors, two-dimensional materials, exciton condensation, spin superfluidity

* 国家自然科学基金(批准号: 11974340)资助项目

1 引言

在过去的几十年中，凝聚态物理领域发现了形形色色的宏观量子物态。对称性与多体相互作用共同导致复杂的集体行为，产生了许多奇特的量子现象。两者之间的相互影响对理解量子材料中宏观效应的微观起源具有重要意义。激子绝缘相^[1-5]的形成就是这种相互影响的一个典型特例。

激子是半导体或绝缘体中广泛存在的一种典型的元激发或准粒子。简单地看，绝缘体中激子是电子—空穴通过库仑相互作用结合而形成的一种束缚对。在半导体中激子态有两种典型的情况：一种是弗伦克尔(Frankel)激子，电子—空穴束缚能大，激子玻尔半径小，局域在分子上，此类激子多见于分子晶体中；另一类则是万尼尔(Wannier)激子，电子—空穴束缚能小，玻尔半径

远大于晶格常数，万尼尔激子在半导体中十分常见。半导体中的激子在低浓度下可视为一种组合玻色子。那么一个自然的问题是，半导体中激子是否可以实现玻色—爱因斯坦凝聚态(BEC)?

关于激子凝聚这个有趣的话题，长期以来学界一直存在争议。原因是通常玻色—爱因斯坦凝聚都是指玻色子凝聚到体系的基态。而半导体中的激子则是体系的激发态。在绝缘体中光激发产生的激子通常由于自发辐射光子而迅速复合，激子寿命很短(例如GaAs中的激子寿命是0.39 ns)，这成为形成激子BEC的主要障碍^[6, 7]。处于激发态的激子的宏观相干性已有明确的实验证据，但由于不是系统的基态，至今激子BEC的实验证据尚存在争议。在半导体材料中，人们更多地利用激子与光子强耦合形成的激子极化激元来实现BEC^[8]。激子极化激元同时继承了激子和光的属性，如极低的有效质量、较强的非线性效应、高速传播以及外场调控的敏感性等等。人们已经在更高温度区域实现了激子极化激元的凝聚相和相干激射^[8-11]。

那么是否存在激子为基态的体系呢？这个问题早在20世纪60年代初，诺贝尔物理学奖获得者内维尔·弗朗西斯·莫特(Nevill Francis Mott)教授就提出了理论设想^[1]。莫特认为在半金属中，如果载流子浓度比较低，并且有足够强的库仑相互作用束缚电子—空穴形成激子，那么系统的基态将不是半金属相，而进入一种新的物质状态——激子绝缘体。随后前苏联物理学家Keldysh等人进一步将激子绝缘相拓展到窄禁带半导体中^[2, 12]。他们认为当激子束缚能大于带隙时，系统将失稳，大量自发形成激子而降低系统能量，使系统趋向于一种能隙更大的稳定状态：激子绝缘体。人们期待电阻会出现峰值，可以作为判断激子绝缘体存在的证据^[13]。此时虽然体系中激子是基态，但相位不是相干的。Keldysh、Rice和诺贝尔奖获得者Kohn等人进一步指出^[2-5]，这种激子宏观地凝聚到一种新的基态的过程，可以类比如超导体的形成过程，它们的相变都是由于相互作用引起的。与常规BCS超导体中通过交换虚声子而形成库珀对的凝聚不同，激子绝缘体是

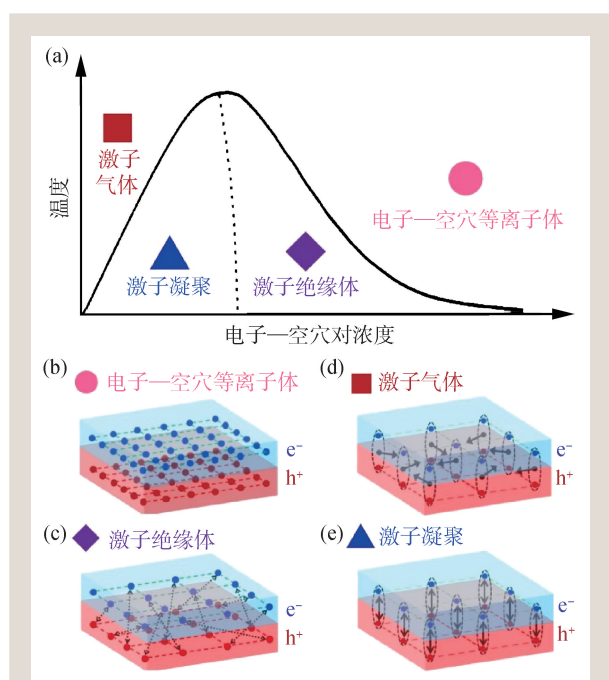


图1 (a)电子—空穴体系在参数空间中的相图；(b)电子—空穴等离子体或者是半金属；(c)激子绝缘体，电子和空穴在此时是弱结合，就像库珀对一样；(d)由具有有限质心动量的玻色子粒子组成的激子气体；(e)激子玻色—爱因斯坦凝聚态，其中激子态是简并的。在(b)–(e)中，蓝点代表电子，红点代表空穴，椭圆虚线表示电子与空穴的强结合，带箭头的虚线表示电子与空穴的弱结合，单箭头表示中心激子的质心运动^[25]

通过库仑相互作用形成的电子—空穴对发生凝聚。另外还有 Zittartz、Fenton、Ebisawa 等人也系统地研究了激子绝缘体的掺杂效应^[14]、各向异性^[15]和输运性质^[16]，磁场下的激子绝缘体行为^[17]，以及激子绝缘体的霍尔效应^[18]。

在随后的几十年中，人们也提出在一些半导体材料，如 1T 相二硒化钛(1T-TiSe₂)^[13, 19]、钽镍硒(Ta₂NiSe₅)^[20–23]、铋硒碲(TmSe_{0.45}Te_{0.55})^[24]等材料中发现激子绝缘体存在的证据，但这些激子绝缘相的实验研究一直存在争议。问题的关键是材料能隙的打开是否一定是由于激子绝缘相的存在。能隙打开的机制可能存在多种原因，如晶格畸变、电荷密度波、自旋密度波和超导等，因此仅仅观察到能隙打开并不能确认是激子绝缘相。在常规半导体中，激子寿命相对较短(纳秒量级)也增加了实验的难度。总的来说，从 20 世纪 60 年代至今，人们始终保持着对激子绝缘体的研究热情，期待通过研究的努力能寻找到一个实际材料体系，观察并确证激子绝缘体。

近年来，半导体低维系统的制备技术日益提高，使得人们可以精确地制备各种半导体低维结构，在这些低维系统中形成激子绝缘体的条件得以满足：窄能隙的能带结构、强激子束缚能和弱库仑屏蔽，从而使激子绝缘体的研究成为可能(图 1(a)—(c))^[25]。目前有两种材料体系最受人关注，分别是半导体量子阱结构和层状二维材料。前者样品制备精确干净，但晶格匹配的异质结材料不够普遍，需要在一些特定的材料之间才能形成高质量界面的异质结，如 GaAs/AlGaAs, InAs/GaSb 等。而二维材料的范德瓦尔斯异质结之间则无需考虑晶格匹配的问题，可以形成更为广泛的异质结。

2 拓扑激子绝缘相

对大多数半导体材料来说，激子寿命短，并且与能隙相比，激子束缚能很小。以 GaAs 体材料为例^[26]，激子束缚能约为 4 meV，远小于其能隙(约 1.4 eV)，即便考虑量子阱情形^[27, 28]，其激子束缚能最大也不过为体材料情形的 4 倍，约为

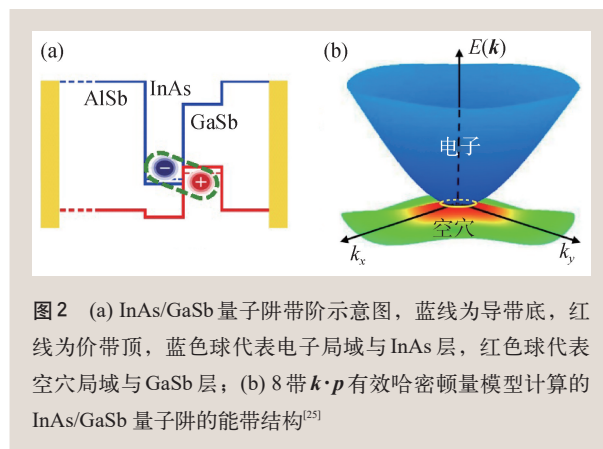


图 2 (a) InAs/GaSb 量子阱阶示意图，蓝线为导带底，红线为价带顶，蓝色球代表电子局域与 InAs 层，红色球代表空穴局域与 GaSb 层；(b) 8 带 $k \cdot p$ 有效哈密顿量模型计算的 InAs/GaSb 量子阱的能带结构^[25]

16 meV。所以在大部分常规半导体材料中难以实现激子绝缘体。因此，很自然地认为激子绝缘体应该存在于窄能隙半导体体系中。另一方面，电子—空穴在库仑吸引力的作用下极容易发生复合，难以形成长寿命的激子。为了便于开展激子物理的实验研究，人们将电子和空穴进行实空间或/和动量空间的分离，这样可以大大地延长激子的寿命。L. V. Butov 实验组首次在 GaAs 耦合半导体量子阱中施加垂直电场，诱导电子和空穴的空间分离^[29]，实现了宏观相干的激子凝聚。但需要指出的是，此类体系中激子仍是系统的激发态。因此为了实现激子绝缘体，人们搜寻着新的材料体系。

在典型的窄能隙半导体中，有一类被诺贝尔物理学奖获得者 Kroemer 教授称为 6.1 Å 家族的半导体材料，即 InAs、GaSb 和 AlSb^[30]。这类材料晶格常数十分匹配，可以生长出高质量的异质结界面，特别是 InAs/GaSb 量子阱体系的光电特性尤其引人注目。它具有独特的能带结构，可以在本征样品中自发地形成空间分离的电子层(InAs 层)和空穴层(GaSb 层)(图 2(a), (b))。这种特别的带阶构造被称为 III 型异质结^[29, 31–36]。由于电子和空穴分离在两层中，所以形成的激子寿命长，这为研究激子物理提供了绝好的实验平台。

InAs/GaSb 量子阱的研究始于 20 世纪 70 年代^[37]，1987 年人们在理论上提出该体系是优异的红外材料^[38]，可以实现红外探测器。随着分子束外延技术的提高，1990 年至 2000 年，人们制备出中红外 3—5 μm 波段的红外探测器面阵^[39, 40]，2005 年扩充至 20 μm 以上的远红外波段^[41]。2008

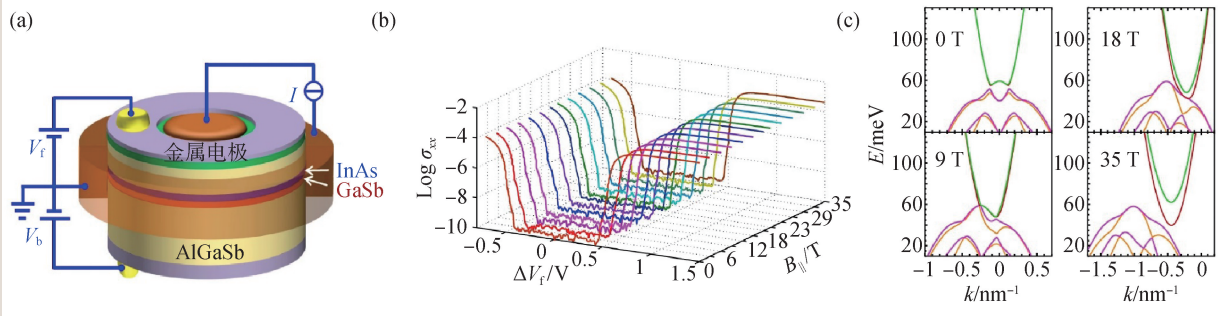


图3 激子绝缘体存在于InAs/GaSb量子阱中的电输运证据 (a)实验测量装置图;(b)在30 mK处用Corbino器件测量 σ_{xx} 的前栅极偏置电压依赖性,在 B_{\parallel} 从0 T到35 T变化过程中,零电导一直出现,该零电导不随磁场大小变化,表明体系在磁场变化的过程中能隙是一直存在的;(c)使用8带自洽模型计算的能带,在 $B_{\parallel}=0$ T、9 T、18 T和35 T处具有典型的倒带^[25]

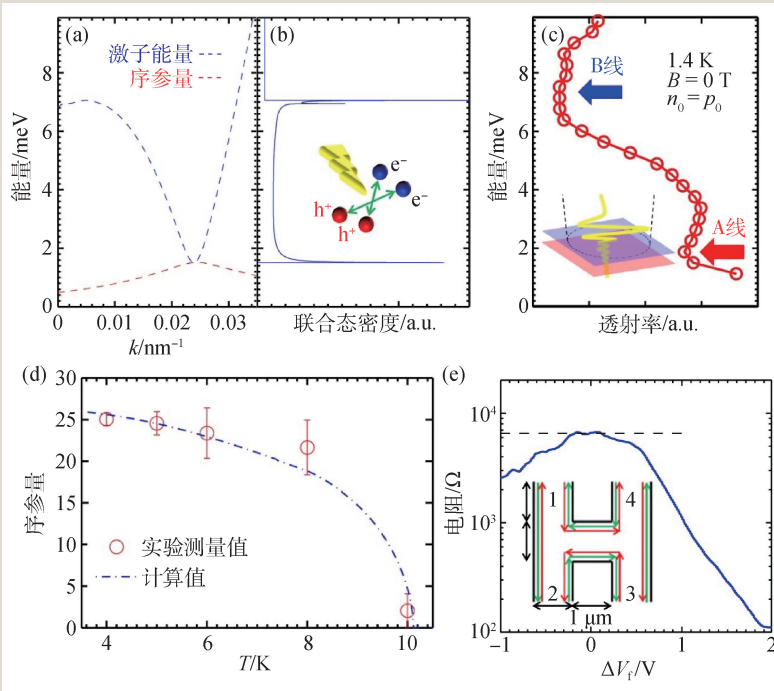


图4 (a)激子绝缘体的色散关系;(b)激子绝缘体的联合态密度;(c)太赫兹吸收谱,在插图中,紫色层代表InAs量子阱,红色层代表GaSb量子阱,黄色波表示太赫兹光,黑色虚线圆圈表示聚焦太赫兹光束在样品位置的横向范围;(d)激子绝缘体序参量与温度的关系;(e)实验测得的拓扑边缘态,在介观H-bar结构(内插图)中进行非局部电阻测量,边缘电流路径在插图中显示为红色和绿色箭头^[25]

阶结构(图2(a), (b)),即使没有光激发也可以自发地形成空间分离的电子和空穴层,因此它是形成激子物理的一个天然体系。该体系能带翻转打开的反常能隙约为4 meV左右,而激子束缚能的大小也相仿。理论上猜想在该体系中可能形成激子绝缘相,并同时具有拓扑特性:激子绝缘体具有无耗散的螺旋边缘态。近来人们从实验和理论两方面研究了InAs/GaSb量子阱中的激子绝缘相。实验组从电子输运观测到(实验示意图如图3(a)所示):在低温且低电子-空穴对密度的InAs/GaSb量子阱器件中,能隙不随平面内磁场的变化而变化(图3(b))。而单粒子能谱计算表明(图3(c)),较小的面内磁场就会关闭能隙,实验观察和单粒子的计算结果大相径庭。为了理解和解释两者之间的

差异,利用量子多体理论,作者建立了温度依赖的激子绝缘体的多体理论模型,发现体系的基态会出现激子绝缘相,并提出可以利用太赫兹透射谱来验证激子绝缘相的存在。太赫兹透射谱表现出两个吸收峰(图4(a), (b)),并且实验测量的太赫兹吸收峰位与理论预言结果一致(图4(c)),解决了长期以来激子绝缘相光学观测的问题。同时,电输运测量发现能隙不依赖于面内磁场强度,而

年张首晟等人理论预言该体系是二维拓扑绝缘体^[42],并随后由莱斯大学杜瑞瑞组实验证实^[43, 44]。在该系统中观察到了拓扑边缘态输运,这种边缘态输运即使在强磁场和高温下还能较好保持。值得指出的是,与HgTe量子阱实验观测到的边缘态电导平台相比,InAs/GaSb的电导平台更平整和更接近量子化平台,因此该体系的基态可能呈现出激子绝缘体^[25]。InAs/GaSb量子阱具有独特的带

显著依赖于电子—空穴浓度和体系温度(图4(d)),另外体系还存在螺旋边缘态的导电行为(图4(e)),这些测量结果进一步佐证体系进入了二维拓扑激子绝缘体态^[25, 45]。进一步考虑InAs/GaSb量子阱中穿插厚AlSb层(10 nm)组成的InAs/AlSb/InGaSb量子阱,由于势垒层AlSb层的存在,使电子—空穴隧穿被抑制,可以增大激子绝缘体带隙^[46]。激子绝缘体理论计算还和桑迪亚国家实验室实验组的实验吻合得较好^[47, 48]。由于存在面内磁场,激子的基态是自旋极化的,因此该体系有可能实现激子自旋的无耗散运输,即激子自旋超流。

3 层状二维材料中的激子绝缘相

在新兴的层状二维材料中,如石墨烯、过渡金属二硫化物(TMDCs)和黑磷等,库仑屏蔽明显减弱^[49],层状二维材料中激子具有巨大的束缚能,如在单层WS₂中约为0.7 eV^[50],在单层黑磷中可达0.8 eV^[51]。因此,层状二维材料已成为探索激子物理的新平台。美国哈佛大学P. Kim教授等人实验研究了由六方氮化硼分离的双层石墨烯中的激子凝聚^[52]。在一个石墨烯层中驱动电流,发现在另一层中产生了接近量子化的霍尔电压,他们认为量子化的霍尔电压意味着相干激子运输^[53]。几乎同时,美国哥伦比亚大学C. R. Dean教授等人也报道了双层石墨烯结构量子霍尔效应体系中的激子凝聚的证据^[54]。他们提出的激子超流无耗散传输特性在对流(counter flow)结构的实验中得到证实,并观察到与双层石墨烯的轨道和谷指数相关的凝聚相。他们的研究结果使得激子绝缘体的相图更为丰富。

理论计算还表明,在二维材料半氢化石墨烯(图5(a))中存在自旋三重态的激子凝聚和自旋无耗散的运输^[55]。通过氢化石墨烯中比较弱的自旋—轨道耦合来降低体系带隙和束缚能的正相关,从而使得激子束缚能大于带隙的条件得到满足,通过第一性原理计算发现体系具有负的激子形成能(图5(b), (c)),体系趋向于形成激子绝缘体基态,并且发现系统从单体的间接带隙到多体激子直接带隙转变。有趣的是,在体系中最低导带和最高价带具有相反的自旋属性,这样形成的激子

天然地携带自旋,形成自旋三重态。通过多带量子多体理论进一步证明这种宏观凝聚的激子绝缘体带隙可达24 meV(图5(d))。宏观相干的激子绝缘体态虽然不带电荷,但是可以携带自旋,因而可以形成可观察的自旋超流运输现象。这对未来可能的无耗散自旋电子学器件应用提供了可能的物理机制。

人们对2D-TMDCs中的激子物理也展开了深入研究。在2D-TMDCs中,激子本身束缚能大、寿命长,激子还可以与谷、自旋、层和拓扑等自由度相互耦合,带来了丰富的激子物理。2017年,美国伊利诺伊大学实验组在*Science*上报道了利用他们发展的动量分辨电子能量损失谱(M-EELS)技术,研究了1T-TiSe₂中的电子集体模式^[56]。在相变温度(190 K)附近,电子的能量在非零动量下降至零,表明等离子体波动的动态减慢,电子—空穴对形成激子凝聚物,他们的研究为固体中的激子凝聚提供了令人信服的证据。值得一提的是,最近美国华盛顿大学和普林斯顿大学的实验组分别独立找到1T'-WTe₂存在激子绝缘体相的证据^[57, 58]。文献[57]发现样品中自发形成激

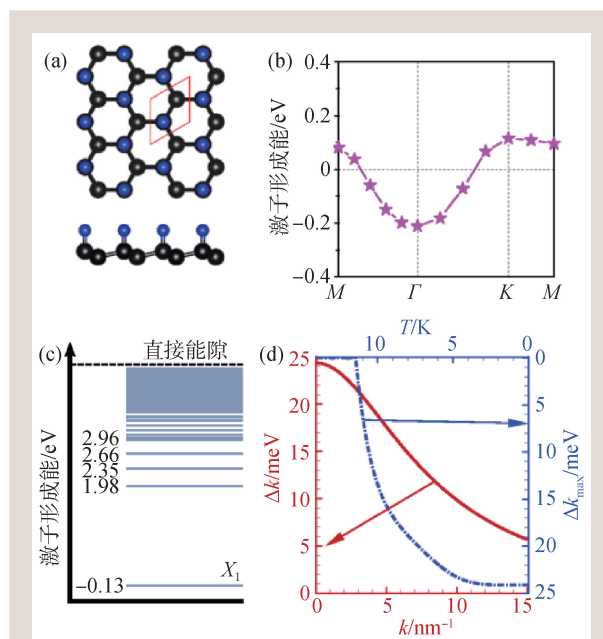


图5 石墨烯吸氢二维材料中的自旋三重态激子绝缘体相^[55] (a)石墨炔的晶体结构;(b)石墨炔激子形成能色散,激子具有负的形成能会失稳而进入激子绝缘体相;(c)激子能谱,负能量的基态代表进入激子绝缘体相;(d)激子绝缘体带隙和激子绝缘体临界温度

子, 揭示了干净样品中电荷中性点附近存在能隙, 同时还发现了在磁场存在的情况下电荷中性点附近的异常传输行为, 他们认为这两者都是激子绝缘体存在的迹象。文献[58]测量了电导和化学势与掺杂浓度的关系, 他们发现这与单粒子图像不相容, 却可以通过激子绝缘体理论来解释。美国康奈尔大学实验组发现了MoSe₂(电子层)/WSe₂(空穴层)双层原子中的强关联激子绝缘体^[59]。当施加在两个空间分离的TMD层之间的偏置电压被调谐到特定的范围时, 就会产生准平衡电子—空穴空间分离的激子流体。利用Gross—Pitaevskii(GP)方程, 人们理论上发现可以在新型二维材料范德瓦耳斯异质结中实现激子涡旋的调控^[60, 61]。

4 总结与展望

自激子绝缘相理论被提出以来, 已经经历了

半个多世纪, 近期新的低维系统和量子结构的不断涌现, 引起了人们对激子绝缘体研究的广泛关注。在激子绝缘体理论上, 宾夕法尼亚大学C. L. Kane教授提出分数激子绝缘体, 即电子—空穴的关联流体行为可以类比为零磁场下分数量子霍尔效应, 类似于电子填充 $1/m$ (这里 m 是无量纲正数)时的劳夫林(Laughlin)状态^[62]。德克萨斯大学奥斯汀分校A. H. MacDonald教授组提出激子绝缘体中会呈现出条纹相^[63]。另外, 类比于金属超导体, 人们可以期待在激子绝缘体中发现超导中的类-迈斯纳、类-约瑟夫森效应、甚至类 p 波和 d 波激子绝缘体^[64]。传统的激子物理与拓扑、磁性和超导结合, 焕发出新的青春。总之, 激子绝缘体的研究方兴未艾, 业已形成了一个凝聚态物理领域内的研究热点, 可以相信, 未来随着新材料和新结构的不断发现和优化, 或许可以期待发现室温下的激子绝缘相和无耗散的自旋超流。

参考文献

- [1] Mott N F. *Philosophical Magazine*, 1961, 6: 287
- [2] Keldysh L V K, Kopaev Y V. *Fizika Tverdogo Tela*, 1964, 6: 2791
- [3] Jérôme D, Rice T M, Kohn W. *Phys. Rev.*, 1967, 158: 462
- [4] Halperin B I, Rice T M. *Rev. Mod. Phys.*, 1968, 40: 755
- [5] Kohn W, Sherrington D. *Rev. Mod. Phys.*, 1970, 42: 1
- [6] Snoko D. *Science*, 2002, 298: 1368
- [7] Butov L V. *Solid State Communications*, 2003, 127: 89
- [8] Kasprzak J *et al.* *Nature*, 2006, 443: 409
- [9] Balili R, Hartwell V, Snoko D *et al.* *Science*, 2007, 316: 1007
- [10] Deng H, Weihs G, Santori C *et al.* *Science*, 2002, 298: 199
- [11] Zhang L *et al.* *Proceedings of the National Academy of Science*, 2015, 112: E1516
- [12] Knox R S. *Theory of excitons*, Vol. 5, *Solid State Physics*. (Academic Press, New York & London, 1963)
- [13] Cercellier H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99: 146403
- [14] Zittartz J. *Physical Review*, 1967, 164: 575
- [15] Zittartz J. *Physical Review*, 1967, 162: 752
- [16] Zittartz J. *Physical Review*, 1968, 165: 605
- [17] Fenton E W. *Physical Review*, 1968, 170: 816
- [18] Ebisawa H, Fukuyama H. *Progress of Theoretical Physics*, 1969, 42: 512
- [19] Chen P, Chan Y H, Fang X Y *et al.* *Nat. Commun.*, 2015, 6: 8943
- [20] Wakisaka Y *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103: 026402
- [21] Lu Y F, Kono H, Larkin T I *et al.* *Nat. Commun.*, 2017, 8: 14408
- [22] Kim S Y *et al.* *ACS Nano*, 2016, 10: 8888
- [23] Mor S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 119: 086401
- [24] Bucher B, Steiner P, Wächter P. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67: 2717
- [25] Du L, Li X, Lou W *et al.* *Nat. Commun.*, 2017, 8: 1971
- [26] Nam S B, Reynolds D C, Litton C W *et al.* *Phys. Rev. B*, 1976, 13: 761
- [27] Bayer M, Timofeev V B, Faller F *et al.* *Phys. Rev. B*, 1996, 54: 8799
- [28] Zhu B, Huang K. *Phys. Rev. B*, 1987, 36: 8102
- [29] Butov L V, Zrenner A, Abstreiter G *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73: 304
- [30] Kroemer H. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2004, 20: 196
- [31] Zhu X, Littlewood P B, Hybertsen M S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74: 1633
- [32] Zhu X, Quinn J J, Gumbs G. *Solid State Communications*, 1990, 75: 595
- [33] Shevchenko S I. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 72: 3242
- [34] Cheng J P, Kono J, McCombe B D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74: 450
- [35] Ando T, Fowler A B, Stern F. *Rev. Mod. Phys.*, 1982, 54: 437
- [36] Yurii E L, Berman O L. *Physica Scripta*, 1997, 55: 491
- [37] Bastard G, Mendez E E, Chang L L *et al.* *Phys. Rev. B*, 1982, 26: 1974
- [38] Altarelli M, Maan J C, Chang L L, *et al.* *Phys. Rev. B*, 1987, 35: 9867
- [39] Norton D T *et al.* *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013,

49:753

- [40] Marcadet X, Prevot I, Becker C *et al.* Improved InAs/AlSb/GaSb Heterostructures for Quantum Cascade Laser Application (SPIE, 2001), Vol. 4287, In-Plane Semiconductor Lasers V
- [41] Razeghi M, Wei Y, Gin A *et al.* High Performance Type II InAs/GaSb Superlattices for Mid, Long, Very Long Wavelength Infrared Focal Plane Arrays (SPIE, 2005), Vol. 5783, Defense, Security, p. SI
- [42] Liu C, Hughes T L, Qi X L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 236601
- [43] Knez I, Du R R, Sullivan G. Phys. Rev. B, 2010, 81:201301
- [44] Knez I, Du R R, Sullivan G. Phys. Rev. Lett., 2011, 107:136603
- [45] Stajic J. Science, 2017, 358:1552
- [46] Wu X, Lou W, Chang K *et al.* Phys. Rev. B, 2019, 99:085307
- [47] Jiang Y *et al.* Phys. Rev. B, 2017, 95:045116
- [48] Yu W *et al.* New Journal of Physics, 2018, 20:053062
- [49] Chernikov A, Berkelbach T C, Hill H M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113:076802
- [50] Zhu B, Chen X, Cui X. Scientific Reports, 2015, 5:9218
- [51] Zhang G, Chaves A, Huang S *et al.* Science Advances, 2018, 4: eaap9977
- [52] Liu X, Watanabe K, Taniguchi T *et al.* Nat. Phys., 2017, 13:746
- [53] Kellogg M, Spielman I B, Eisenstein J P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88: 126804
- [54] Li J I A, Taniguchi T, Watanabe K *et al.* Nat. Phys., 2017, 13: 751
- [55] Jiang Z, Lou W, Liu Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 124:166401
- [56] Kogar A *et al.* Science, 2017, 358:1314
- [57] Jia Y *et al.* Nat. Phys., 2022, 18:87
- [58] Sun B *et al.* Nat. Phys., 2022, 18:94
- [59] Ma L, Nguyen P X, Wang Z *et al.* Nature, 2021, 598:585
- [60] Chen Y, Huang Y, Lou W *et al.* Phys. Rev. B, 2020, 102:165413
- [61] Chen Y, Zhang D, Chang D. Chin. Phys. Lett., 2020, 37:117102
- [62] Hu Y, Venderbos J W F, Kane C L. Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 126601
- [63] Xue F, MacDonald A H. Phys. Rev. Lett., 2018, 120:186802
- [64] 向涛. d波超导体. 北京:科学出版社, 2007. 凝聚态物理学丛书



欧普特科技
GOLDEN WAY SCIENTIFIC

做中国专业的 光学元件与光学仪器系统集成商

TO BE A PROFESSIONAL OPTICAL COMPONENTS AND OPTICAL INSTRUMENTS SYSTEM INTEGRATOR IN CHINA



地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋东5层
E/5F M7, NO.1, JIUXIANQIAO EAST ROAD, CHAOYANG DISTRICT, BEIJING
电话: 010-8809 6218 / 8809 6099
邮箱: optics@goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd.