



## 前沿科学中心物质材料应用研究---量子人工智能大脑黑洞并行计算 (1)

长江康

Recommended: 王德奎 (Wang Dekui), 绵阳日报社, 绵阳, 四川 621000, 中国, y-tx@163.com

**Abstract: 摘要:** 联系虚拟世界改进现实世界的物质材料以适应社会发展的需要, 有人推进前沿科研的同时, 自然界也在对人类自身这种材料在进行改进, 并且不仅是一次、两次, 如 2020 年全球抗击蔓延的新冠肺炎疫情开辟的科学新纪元---只要“无症状感染”的病毒或细胞风暴等肉眼看不见的类似虚拟世界的存在, 科技仍将是人类赖以生存的有力工具---这种看不见的类似虚拟世界的不是以意识形态划分的“全球化”, 即使追踪各国蔓延的新冠肺炎疫情来龙去脉不可行, 但从“1→1”和“0→1”都联系着分散“数”和“正负数对”, 即使真空和“无”也不例外。“数”和“正负数对”是类似物质、材料的代号, 所以前沿科学对物质材料的应用研究始终是离不开中心议题, 是前沿材料人物的造就。

[长江康. 前沿科学中心物质材料应用研究---量子人工智能大脑黑洞并行计算 (1). *Academ Arena* 2020;12(5):26-54]. ISSN 1553-992X (print); ISSN 2158-771X (online). <http://www.sciencepub.net/academia>. 3. doi:[10.7537/marsaaj120520.03](https://doi.org/10.7537/marsaaj120520.03).

**Keywords: 关键词:** 新冠肺炎 科学新纪元 物质材料 中村修二

## 0、前言---科学开辟新纪元

2020 年突发的新冠肺炎疫情, 对全球各国和整个人类的应急管理理念和能力, 提出巨大挑战。但人类同全球蔓延的新冠肺炎疫情较量最有力的武器, 是科技。所以全球抗击新冠肺炎病毒的“夺命斗争”, 战胜大灾大疫离不开科技发展和创新, 也开辟了科学的新纪元---这有三个标志。一是在 2020 年之前已出现前沿科学“量子、人工智能、大脑、黑洞、并行计算”结合的大趋势, 进一步得到加强和巩固。

例如 2020 年 3 月 26 日 20 国集团 (G20) 轮值主席国, 沙特阿拉伯是历史上首次基于网络进行远程视频会议方式召开的 G20 领导人特别峰会---如此的云视频会议, 20 国之前还没有专线, 云视频最合适是混合多品牌终端组网远程办公、视频会议; 所以经此一役, 可变成常规操作---这背后是互联网的前沿科学革命的支撑; 而互联网又联系微观粒子高能加速器、计算机网络、神经网络、量子弦网膜等人工智能并行计算的结合---即超弦理论的回采已迈开大步向前。

二是改革开放 40 多年来, 延续之前的“反相反量反中医”的潮流式微可见。如有军网背景的“西陆网”支持的“挑战相对论专栏”, 已没有多少新东西; 类此有科学院专家背景组织的“相对论研究联谊会”网的核心成员, 已不知战斗方向。

三是东西方两个极为成功、却似乎互不相容的生物/生理医学理论---中医药学和西医药学, 如今希望能用“量子簸场”超弦理论, 将两者各自指导

今天看待疾病、处方用药的既定的理、法、方、药等, 能和谐统一。即科学=基因组学+暴露组学=中医---中国的治疗有效方法, 中国古代是有科学的; 中医抗疫, 在我国历史上 500 多次瘟疫有确切记载的抗击 300 多次瘟疫中, 成长起来的, 它是能救命的。

用“暴露组学”类比中医药学, 用“基因组学”类比西医药学, 这只是描述科学在目前的现状。从统一的暴露组学与基因组学的“量子簸场”理论看, 人、动物、植物, 到治疗新冠肺炎所有的药物、诊断的所有工具, 以及病毒与细菌风暴等, 都是大自然“量子簸场”造物的材料。而材料也离不开微观材料---如生命体中病毒与细菌, 只有依附在人体这种寄生材料时, 才对生命量子簸场存在产生破坏。

而当人的身体产生抗体后, 加之医疗等“量子簸场”手段, 对病毒、细菌抑制灭杀, 人类的生命能获得完好延续---这既含有病毒、细菌量子簸场可伤害人类, 但是无法毁灭人类。可以毁灭人类生存的是宇宙“量子簸场”自然运动变化。如人类对大自然的过份索取及破坏, 会造成环境污染, 使人类失去适应的生存环境, 结果也会导致人类走向毁灭---这里就需要把实际从事病毒、细菌生物实验研究的科学家, 与其他专项的科学家分隔升级管理起来, 看成是另一个特殊的科学家人群---未来科学暴露组学与基因组学走向统一, 科学家之间发生争论虽仍是正常现象, 而且不再分意识形态全球化性, 也是科学必经之路, 弦理论已升级与量子网络人工智能渐行渐近。例如金灿荣教授说: 石墨烯、基因工

程、人工智能、量子通信、核能源等五个代表第四次工业革命的方向，都可发现有弦理论应用的踪影。

暴露组学与基因组学走向科学统一，类似“合伙人管理时代”，并且这种升级走向统一的弦理论也类似“全员持股合伙人模式”。有人说：“不是要不要用合伙人管理模式，而是时代已经选择了合伙人管理模式！”今天的互联网，其实也与弦理论相通——虽然互联网从不安全的通信，链接到云端数据缺乏保护，漏洞无处不在。但如果量子弦物理学家获得成功，这些弱点很快就会消失——弦量子物理学家是建立量子网络，在这里信息的创建、存储和移动，都以一种反映量子世界奇异行为的方式进行。尽管完全实现量子网络仍是一个遥远的愿景，但最近在传输、存储和操纵量子信息方面取得的突破，已是一种简单的原理验证迫在眉睫：人类杀手的“夺命斗争”，对病毒生物研究与核武器研制，各国都来走“不再分意识形态全球化”之路，都应一视同仁，共同管控。

## 一、从蝙蝠之奇到上海首例新冠患者治愈

### 1) 前沿科学应用的材料研究

#### A、维尔切克难题

2020年2月号《环球科学》杂志，发表弗兰克·维尔切克的《我们生活在虚拟世界中吗》一文，提出一道我们人类前沿科学应用研究中心的物质材料说不清楚的难题，甚至把它提到与“唯心主义哲学”作斗争的高度来强调，事情真的像维尔切克说的那么不能切换吗？

由于弗兰克·维尔切克名气很大——他在攻读研究生期间，因发现夸克粒子的渐近自由，在2004年荣获诺贝尔物理学奖；现任麻省理工学院物理系教授，拥有“赫尔曼·费什巴赫教授”的荣誉称号。而且2014年浙江工业大学，成立了以他命名的维尔切克量子中心；2015年维尔切克教授又受聘为浙江工业大学维尔切克量子中心首席科学家。其实他是1951年才出生在纽约的人；大学时学的也并非物理专业。1970年他在芝加哥大学获得数学学士学位。1972年在普林斯顿大学获得数学硕士学位。硕士期间，他开始痴迷于理论物理研究，1974年获得物理学博士学位。2004年他与戴维·格罗斯、戴维·波利茨一起荣获诺贝尔物理学奖。除了诺贝尔奖外，他还获得了很多奖，包括狄拉克奖，美国物理学会的Sakurai奖，洛伦兹奖等。除了是美国科学院院士外，他还是美国艺术与科学院院士。

我们读过湖南科技出版社2010年出版他的《存在之轻》一书，对他把世界建立在充满多层次空间的“网格”，称为“以太”印象很深——他通过超越旧的物质和空间观念，诠释物质是由几乎无重量的单元构造的——纯能量是质量的最终之源，展示的不止空间绝不是单纯的容器，不是空无一物和被动

的它是一种动态。网格要比任何“基本”粒子更基本；其自发活动产生并消灭着粒子这种对物质和“虚空”，解释了引力为什么那么微弱，并使自然界所有力的大统一图像变得格外清晰。但维尔切克似乎没有迈过2020年，人类抗击全球蔓延的新冠肺炎疫情开辟了科学新纪元这道坎——他把我们生活的“现实世界”，和计算机通过“0和1”的各种数据流创造出电子线路人工心灵我们能感知的“虚拟世界”，绝对分开来，不明白微观世界存在的多层次“虚拟世界”如何去分清，和找到它们与真实之间的变换。

维尔切克在《我们生活在虚拟世界中吗》一文最后总结的这道难题的说法是：“想象一个虚拟的世界当然是可能的，但如果我们的世界真的是虚拟的，那创造它的心灵——天晓得它是由什么构成的”。

#### B、2020年全球蔓延的新冠疫情与虚拟世界

维尔切克教授自己解答自己的物质现实与虚拟世界是绝对分开的难题，说是如果世界真的是虚拟的“工作方式，实在是太神秘了”——“神秘了”吗？2020年全球蔓延的新冠肺炎疫情，没有来源——无论是被隔绝的监狱里，还是在深海封闭的舰艇里，新冠肺炎疫情也会自然发生——微小生命体的病毒与细菌作为一种“虚拟世界”存在是可行的。因为“人传人”的病毒或细胞风暴是肉眼看不见的类似虚拟世界——有人说：“当今世界形成了支持和反对全球化的四大力量板块：占据主导地位的跨国金融资本，正在反抗的各国产业资本，另外还有伊斯兰世界，以及以中国为代表的第三世界新兴经济体……产业资本反对全球化，而跨国企业幕后的金融资本支持全球化”，但复旦大学春秋发展战略研究院、曾常驻巴黎20余年的郑若麟教授仍然说：“今天的世界，早已不是以意识形态划分，不然人们不会觉得奇怪，东西方阵营，怎么变得四分五裂？共产主义和资本主义的斗争，怎么变得奇形怪状，甚至于看不见？”

即2020年全球抗击蔓延的新冠肺炎疫情，开辟的科学新纪元，只要“人传人”的病毒或细胞风暴等肉眼看不见的类似虚拟世界的存在，科技仍将是人类赖以生存的有力工具——这种看不见的类似虚拟世界，不是以意识形态划分的“全球化”；即使追踪各国蔓延的新冠肺炎疫情来龙去脉不可行——都怕“污名化”；实验病毒学家也怕说之前会做病毒基因克隆；各国怕实验有失手的概率承担不起责任，但从“1→1”和“0→1”，都联系着分散“数”和“正负数对”，即使真空和“无”也不例外。“数”和“正负数对”类似物质、材料的代号，所以前沿科学对物质材料应用研究，是始终离不开中心的议题。

### 2) 材料蝙蝠为何“百毒不侵”？

#### A、蝙蝠——移动的病毒库

近年来诸多大规模致死疫情都和蝙蝠发生着千丝万缕的联系，而蝙蝠也已经被公认为新兴病毒最重要的天然“蓄水池”。蝙蝠属于哺乳动物门翼手目，是唯一能真正飞行的哺乳动物。有人说 19 科 185 属 961 种蝙蝠之最，是体型不超过 9cm 的最恐怖的吸血蝙蝠。但也有说，生物界吸血的动物不在少数，论恐怖程度，吸血蝙蝠只能屈居末位；蚊子才是世界上最常见的吸血动物。据估计蚊子大概有 3500 多个种类，但并不是每一种蚊子都会吸血。那些以人类血液为食的蚊子经常会传播慢性或致命疾病，比如疟疾、黄热病、登革热等。蝙蝠只是“百毒不侵”的天然病毒蓄水池，它们为什么携带大量病毒却免受其害？人类是否可以从中寻求一条对付多种病毒的普适性思路？

清华大学结构生物学高精尖创新中心、杜克-新加坡国立大学医学院、中国疾控中心、中科院动物研究所、美国杜克大学的研究团队联合发表了一项最新研究，从蝙蝠基因组分析入手，使用领先的功能基因组学方法，系统地寻找病毒生命周期依赖的宿主因子，通过理解病毒-宿主因子的相互作用的分子机制来寻找新的抗病毒药物靶点。通过对蝙蝠细胞的两万多个基因进行系统全面的筛查，确定了数十个病毒复制所依赖的关键蝙蝠基因，并发现了一个共同的新的宿主基因 MTHFD1。进一步的研究发现蝙蝠细胞的 MTHFD1 表达水平比人类相应组织的细胞要低很多，这可能和蝙蝠适应飞行生活的生理变化有关。最终他们发现宿主蛋白 MTHFD1 的抑制剂 carolacton，可有效抑制新冠病毒复制。该研究成果不仅能助力新冠病毒药物研发，有力抗击疫情，更为人类未来抗击突发病毒流行打下基础。

## B、蝙蝠为何能与多种病毒和平共处

严家新，1945 年出生武汉。现任卫生部武汉生物制品研究所基因工程室研究员，中华医学病毒学会武汉分会理事，中国生化学会和微生物学会会员，国家药品监督管理局药品审评专家。1969 年毕业于北京大学生物系，1981 年在武汉大学获硕士学位，1986 至 1989 年先后在美国堪萨斯大学和纽约市立大学西奈山医学院作博士后研究。主要研究领域是病毒的分子生物学、免疫学、流行病学和相关科学史，研究过流感病毒、轮状病毒、狂犬病毒、丙肝病毒等。他认为在地球上几乎所有的生物（包括蝙蝠）体内都存在病毒，但为啥蝙蝠是大量病毒的储存宿主，还能与之和平共处？

严家新教授说出 6 个方面的特征---1.长寿。2.繁殖。3.栖息。4.自主飞行。5.免疫学。6.回声定位和冬眠等来解释。例如，随着寿命的延长，蝙蝠为病毒的可持续性复制和生存提供了一个稳定的环境，允许病毒在种群内长时间持续存在。高密度栖息的蝙蝠物种采取季节性繁殖的模式，导致大量易

感个体的涌入。密集的栖息聚集促进了病毒在种内和种间的高传播率。飞行活动增加了病毒在大的地理区域进行长距离传播。蝙蝠既有先天免疫应答又有适应性免疫应答。“飞行即发烧”假说认定，蝙蝠对发烧反应有更强的耐受性，这些病毒会表现出更强的毒性。蝙蝠控制病毒感染的能力与抑制免疫状态(耐受)相关。冬眠被认为有助于病毒的持续存在；回声定位系统被认为如同打喷嚏，让口咽的液滴、粘液或唾液喷出作为病毒的一种传播途径。总之这些生活特征不是相互排斥，它们可能与一些未知因素一起，在支持蝙蝠体内观察到的病毒的高度多样性方面发挥着复杂的作用。

中科院武汉病毒研究周鹏教授也认为，蝙蝠的免疫系统是很独特的，它是唯一一个会持续飞行的哺乳动物，飞行这种能力，造成它很多基因和人或者其他哺乳动物的基因不一样。这些不一样的基因，很多就是和抗病毒、免疫系统相关的---研究蝙蝠携带病毒而不患病这一独特之处，是有望让人类从中学学习如何对抗病毒。

## C、蝙蝠抑制剂有效抑制新冠病毒复制研究

Carolacton 是一种天然产物，被作为抗生素候选分子用于抑制细菌的菌膜生成。清华大学结构生物学高精尖创新中心、杜克-新加坡国立大学医学院、中国疾控中心、中科院动物研究所、美国杜克大学的研究团队的蝙蝠生理学和基因组测序，为解释其耐受病毒的能力提供了多种解释。通过对两个课题组的筛选结果进行比较，研究团队发现其中都包括细胞内吞作用和蛋白分泌通路的重要基因，这些跟人类细胞的病毒感染是类似的，说明蝙蝠细胞和人类细胞的病毒感染对这些通路的依赖是保守的。除此之外，两组筛选都发现了一个共同的新的宿主基因 MTHFD1。MTHFD1 编码亚甲基四氢叶酸脱氢酶，是 DNA 和 RNA 的组成成分嘌呤碱基从头合成的重要代谢酶。而以前的工作在人体细胞的全基因组筛选病毒宿主因子都没有发现 MTHFD1。而发现抑制剂 carolacton 研究团队进一步发现，RNA 病毒包括腮腺炎病毒、马六甲病毒、寨卡病毒等都对 MTHFD1 的缺失非常敏感，而 MTHFD1 的抑制剂 carolacton 对于上述病毒的复制，有非常强的抑制作用。这个现象在蝙蝠和人类细胞都很显著。

蝙蝠的基因筛查导致了 MTHFD1 这个全新的抗病毒药物靶点，及 carolacton 这个抗病毒小分子的发现，也提示我们可以从研究蝙蝠的病毒感染机制中，学习到如何应对病毒感染---研究团队后续将在动物感染模型上进一步对 carolacton 及其衍生物的抗病毒功能进行临床前测试，希望能将其作为一种广谱抗病毒药物早日推向临床。MTHFD1 相关的基因对病毒的影响及其药物靶向的研究，也有望提

供更多的候选药物分子。另外，研究团队前期建立的全基因组筛选系统，也将在针对蝙蝠的其它组织细胞，特别是免疫细胞的研究中发挥巨大作用，帮助研究者继续探寻蝙蝠的更多的奥秘。

### 3) 中国医治方法老药新用解科学之谜

#### A、蔓延新冠解真实与虚拟维尔切克难题

维尔切克教授的文章《我们生活在虚拟世界中吗》，反对“唯心主义哲学”，重视“大部分时间我们生活的共同现实世界”是正确的。他要分清“由计算机模拟出来的”虚拟世界----“想象一个虚拟的世界当然是可能的，但如果我们的世界真的是虚拟的，那创造它的心灵----天晓得它是由什么构成的”难题，也对----因为这是搞人工智能的一个基本常识。但维尔切克教授似乎忘记在计算机模拟出来的“虚拟世界”，和在大部分时间我们生活的一个共同“现实世界”，存在一个“天晓得它是由什么构成的”难题的“虚拟世界”----还有类似 2020 年暴发新冠疫情全球蔓延不是计算机的 0 和 1 的内存模拟，而是有真实物质材料的“人”感染的中间层级在衔接。它由我们生活的共同“现实世界”中的“人传人”大量重症患者，和死亡呈展出来；它不是心灵的创造，也不是“天晓得它是由什么构成的”难题。

因为虽说新冠肺炎疫情首先在武汉暴发，但并不一定说明病毒源头在中国。如 1918 年暴发的大流感欧美捂盖子，酿百年前大流感惨剧；当流感疫情扩散到西班牙时，才有人捅破这层窗纸，反被甩锅，因此以“西班牙流感”闻名于世。即镶嵌在类似计算机“虚拟世界”和人心灵的真实世界之间的“虚拟世界”----新冠肺炎仍然是科学问题，在搞清楚以前，随便下结论是不负责任的。它很有可能是输入性感染，而且全世界有很多国家的感染者，并没有来过中国武汉，没有过武汉接触史，但是他们也自己发病感染了----新冠病毒并不具有“之前使用的病毒主干结构”，因此并非人类创造----可能是一种在蝙蝠体内发现的病毒和另一种穿山甲携带的病毒结合发展而成，新冠病毒与在蝙蝠中发现的冠状病毒有 96% 的类似性，正是 4% 的变异，解释了为何它有如此高的传染性。

其次早在百年前，抗疫守护主权的 1903 年的天津防疫，1910-1911 年东北暴发鼠疫，屈永秋筹办防疫实行“传染不分中外”，把关消毒、隔离、深埋等措施，值得铭记。其实今天治疗新冠病毒重症，目前西医都承认没有有效的特效药，所以只能提供吸氧、呼吸机等支持疗法。即对转重症的病人提供对症支持疗法，吸氧，呼吸机等等。而治疗上以中医为主----幸亏祖宗给中国人留下了中医药----通过坚持中西医结合治疗全覆盖，针对每一位病人的病情，采用不同的中药配方，做到一人一案，同时结

合提供药膳营养餐等辅助治疗措施，促进患者肺功能恢复，提高患者免疫力，加速患者康复。中医疗效好在经济不发达地区，往往发达----这还因费用低，治一个肺炎病人，中医药可能几百几千就够了，而西医要几千、几万甚至几十万。

#### B、上海首例新冠重症治愈解维尔切克难题

解维尔切克教授现实世界“天晓得它是由什么构成的”虚拟世界的难题，更特别的是看重实践出真知----回到维尔切克教授重视的“大部分时间生活的共同现实世界”，仍然要落实到“人”这种可见的“物质材料”----新冠疫情全球蔓延，破除了西医和中医都没有神话攻关模式----对目前新冠肺炎的疫苗、特效药还没有出来时，没有药物的疫病首要关注的是人命，让更多人死亡、让更多的人获得拯救，要发扬中医和西医各自优势，优势互补，这使得实践出真知的“老药新用”，可能捕捉到提高治愈率的亮光----即有过抗击瘟疫、流感实践的经验丰富的医生----如感染科、呼吸科、影像科、重症医学科、药学部等相关的专家，能够统一认识应急攻关，见到成效。

例如，2020 年 3 月 30 日《新民晚报》发表的中国作协副主席何建明教授写的《何建明 | 首场出击》一文报道，上海首例新冠肺炎确诊患者在同仁医院治愈，很能说明解维尔切克教授的悲观----“天晓得它是由什么构成的”难题的“虚拟世界”，有很大一部分还在重视对人类自己“大部分时间生活的共同现实世界”中成功的科学、历史的回采，如类似“老药新用”。

何建明教授说：上海市疾控中心急性流行性传染病调查科主任，此次上海抗击新冠病毒领导小组现场技术指挥组副组长、流调专家潘浩教授等专家，在 2019 年 12 月 31 日----2020 年元旦的前一天，对上海敏感地“嗅”到的不安因素，神经就被拨动了。2020 年 1 月 3 日上班第一天，疾控中心立即组织应对“不明原因肺炎”的医学专业培训。当时媒体报道武汉已有 40 多例确诊患者，所以在 1 月 15 日有一位 56 岁的陈阿姨，因发热、乏力、咳嗽等症状在家人的陪同下走进同仁医院发热门诊，临时支援发热门诊的呼吸与危重症医学科医生于亦鸣教授，听这位女士说话似乎有点像武汉的口音，就多留了一份心。

果然询问这位患者的流行病学史，她说自己是从武汉来看在上海工作的女儿和女婿的。36 岁的于亦鸣医生立刻警觉起来，并在得到血常规化验和胸片发现血象和胸片符合病毒性肺炎表现后，他就是马上汇报，以最快速度让感染科行政副主任刘岩红教授得知情况。所以到 1 月 20 日经国家卫健委专家复核，陈阿姨就被确诊为“新型冠状病毒肺炎”。五天时间从同仁医院医务科科长顾志俭到马骥院

长，再到上海市疾控中心负责病毒医学流行性调查的潘浩、中心主任付晨，再到上海各相关部门，都知道同仁医院出现了这种病人。于是蒋利副院长带着感染科、呼吸科、影像科、重症医学科、药学部等相关的六七位专家来到陈女士病房，对她的病情进行会诊。长宁区疾控中心人员又来到病房对这个病人进行鼻咽拭子、血液、痰液等采样。16日又按有关要求对这个病人再次进行肺泡灌洗液采样。她的病房内也又增加了几台设备：特级护理的吸氧和心电图仪器。

还有叫“莫西沙星”注射液、“磷酸奥司他韦胶囊”、宣肺止咳合剂、氨溴索片等药物，放了一大堆……到1月17日市级专家、中山医院呼吸科的宋元林教授和市第六人民医院感染科汤正好教授，都来到同仁医院进行会诊。两位专家建议维持莫西沙星+奥司他韦的对症治疗，并在随访血常规和胸部CT之后，又建议加用莲花清瘟颗粒抗病毒治疗等很重要的“中西医混合”战术。

这种治疗方法，后来也被运用到武汉和其他省市区的新冠病毒肺炎患者的治疗之中。但到1月20日已经近三天“平安无事”的陈女士，突然感到胸闷难忍的一般重症肺炎也不曾见过的近似窒息地步的攻击。几个医生全力配合给患者陈女士进行高流量的增氧，蒋副院长看着患者慢慢自行地缓解过来，一直到最后完全恢复常态。病人急转直下的险情，让上海医生和专家们知道了武汉那边传言的新冠病毒确实与众不同：稍有大意病情险恶，就可能被夺去一条生命。

再到22日市级专家——这次来的是瑞金医院影像科严福华教授、龙华医院ICU的陈主任以及中山医院呼吸科宋元林主任。三位专家对病人陈女士进行会诊，认为同仁医院对患者的治疗方案是正确的；根据现在的情况看患者仍需要按原治疗方案继续巩固治疗；建议23日再做一次呼吸道采样查病毒化验，如果与21日采集化验的结果一样均呈阴性，可以考虑出院。果然1月23日患者陈女士基本恢复了平时的状况，1月24日除夕夜康复出院，成首例上海治愈患者。

### C、新冠疫苗破“虚拟世界”最高境界之则

“不同技术路线各有特点，最后谁研发出的疫苗效果最好就是最佳（路线）”——这也是新冠疫苗破维尔切克教授“虚拟世界”难题：“天晓得它是由什么构成的”最高境界之则——这是2020年4月8日《中国科学报》报道专访开展新冠病毒疫苗研发的中国工程院院士、河南农业大学校长张改平教授时，张改平院士说的话。

由于所有技术路线做出来的疫苗，注射给人后抵抗新冠病毒基本是没有问题的，但注射剂量、是否高效、副作用（安全性）、免疫期、成本、生产

能力等一系列问题，也属于类似“暴露组学”——跟“基因组学”一样也十分关键。因为“暴露组学”的不同路线，会有很大差异，甚至决定了疫苗能否成功。“暴露组学”认为的高效安全、精确微量、易储价廉，以及低成本工厂化生产的疫苗，才称得上最理想的疫苗。“暴露组学”有类似张改平院士说“新概念疫苗”和“超级疫苗”的理念，可助力这种疫苗的诞生。

“暴露组学”新概念疫苗，不同于传统“基因组学”疫苗研发路线，且多以新技术命名，如基因工程疫苗、基因疫苗、亚单位疫苗、病毒空壳疫苗等都属于其中。“暴露组学”由于现代科学技术的进步，疫苗抗原制备的速度可以很快。“暴露组学”新冠疫苗成就全世界的研究者，得益于中科院武汉病毒研究所的新冠病毒基因序列的公布。张改平院士说：我们追求的是安全、高效、不浪费免疫潜力的疫苗，力争把特定疫苗做到它是现代科学技术条件下的最高境界——所谓免疫潜力，作为生理潜力的组成部分，人、动物都非常强大。但在正常情况下，这些能力是用于生长、抗逆、工作、学习和生产（就动物而言）等的；若一个疫苗而过多使用（抗原不够高效、免疫次数多、免疫剂量大等），就会影响其它方面，同时也因机体免疫系统承受压力过大而免疫保护效果欠佳。

如何做到不浪费免疫潜力？根本是六个字：

“精确、微量、纯化”。精确即结构、位点、启动免疫反应的精确；微量即数个微克级，甚至是纳克级；纯化即尽可能地减少杂质。这是现代科学技术条件下能够做到的。过去十余年张改平院士团队，也一直致力于理想的“超级疫苗”研究，在此次疫情科研攻关中，他们设计出新的疫苗抗原分子，建立哺乳动物细胞表达系并纯化了抗原蛋白，用微剂量免疫动物后（小动物5微克，大动物10微克）产生了高达百万倍试纸测试效价的抗体。免疫抗体经在国家批准的P3实验室测定，中和病毒的效价都达到了要求，有的超过了检测单位设定的最高限。目前他们已开始免疫猴子、小鼠和雪貂准备攻毒中和实验，并在申请临床试验。但根据我国目前的具体情况，新冠疫苗的批准也许会稍晚一些。

总之，现实世界联系虚拟世界的实用材料前沿研究，用于生命科学的材料创新与无机材料创新的项目相比，要少得多，下面来介绍。

## 二、联系虚拟世界的有机材料科研前沿

### 1) 奠定形形色色生物适应性基础材料的研究

#### A、转座子变异促进快速表型变异的材料

说来涉及生命科学和有机材料的前沿科学研究很多，我们还是分成五个方面，选几个例子来说明。

在物种形成或物种入侵过程中，往往只涉及到

祖先物种里的少数群体和个体，这些适应于新生境的新物种或入侵群体，其遗传多样性通常很低。这种很低的遗传多样性和很强的适应能力之间存在巨大的反差，被称为“生物入侵的遗传悖论”。对于这一问题进行研究，有助于人们加深对物种适应性进化的认识。例如，2019年3月26日科学网报道中科院植物研究所研究员郭亚龙团队与研究员葛颂，以及澳大利亚莫纳什大学科研人员合作，以芥属植物为研究对象，揭示了“生物入侵的遗传悖论”的一种进化机制，为理解植物关键适应性状的进化提供了新的证据——通过比较两个物种，发现转座子在自交物种 *C. rubella*（斜体）里高度富集，转座子变异促进了快速的表型变异，如转座子插入到开花时间相关基因区域促进开花，早开花使这个物种能够适应地中海气候。

这一结果表明“生物入侵的遗传悖论”，产生的一个原因是由于转座子“爆发”式的大量扩增，导致产生遗传变异特别是关键适应性状的变异，使得遗传多样性很低的物种在新的生境快速适应——十字花科芥属的 *Capsella rubella*（斜体）是一个新近起源的二倍体物种。在进化过程中，其祖先物种 *C. grandiflora*（斜体）少数个体的交配系统发生转变，从异交变为自交，形成了 *C. rubella*（斜体）。然而，尽管 *C. rubella*（斜体）形成中遗传多样性极大降低，但其分布范围却比其祖先大得多。

## B、视觉神经生物医学与材料纳米技术结合

自然界存在众多光线，能被人类眼睛感受到的可见光只占其中很小一部分，比如人类就看不到红外光。人类为何看不到红外光？红外光光子能量较低。为了感知红外光，眼睛的感光蛋白必须降低其吸收能量阈值，然而过低的能量阈值，会使热能更容易自发激发感光蛋白活性，从而影响探测信噪比——不仅人类，在生物的进化历程中也尚未发现任何动物能够基于感光蛋白感知波长超过 700 纳米的红外光，更没有动物能够在大脑中形成红外光图像视觉。不过个别动物，如部分蛇类，可以通过温度感知红外光。为了获取超过可见光谱范围的信息，人类发明了以光电转换和光电倍增技术为基础的红外夜视仪。但红外夜视仪有诸多缺陷，如笨重、佩戴后行动不便、需要靠有限的电池供电、可能被强光过曝、同可见光环境不兼容等。

为解决上述问题并发展裸眼无源红外视觉拓展技术，2019年3月5日《中国科学报》报道，中国科技大学生命科学与医学部薛天研究组，与美国马萨诸塞州州立大学医学院韩纲研究组合作，结合视觉神经生物医学与创新纳米技术研究，实现了动物裸眼红外光感知和红外图像视觉能力，或许也能让人类具有红外光感知能力——该研究突破了传统近红外仪的局限，并发展出裸眼无源红外视觉拓展

技术，架起红外线与眼睛的“天线”，提示人类拥有超级视觉能力的可能。

这是一种转换纳米材料，该材料可以把近红外光转换成可见光线绿光。如果能将这种材料应用在动物眼睛上，那将是非常有应用价值的事。薛天教授说：这只是设想研究的第一步——如何缩短该材料与感光细胞的距离，提高感光蛋白的红外敏感度，切实让该材料发挥作用是关键。为此他们研究出一种特异表面修饰方法，使该纳米材料可以与感光细胞膜表面特异糖基分子紧密连接，从而牢牢地贴附在感光细胞表面。即修饰后使纳米颗粒就成为一种隐蔽的、无须外界供能的“纳米天线”，即为视网膜感光细胞特异结合的上转换纳米颗粒。

将含有纳米颗粒的液体，注射到小鼠眼睛中，可让小鼠看见近红外——如何证明小鼠可以看见近红外光，并知晓它们的近红外视觉有多强呢？多种视觉神经生理如瞳孔的光反射实验，是设计一个带隔间的箱子，一个隔间全黑，一个用近红外光照亮。针对小鼠是夜行动物，喜欢黑暗的特性，比较在近红外光照射下已注射小鼠的瞳孔产生收缩，与未注射小鼠瞳孔的没有任何变化——观察能发现，已注射小鼠在黑暗隔间停留的时间更长，而未注射小鼠在两个隔间的停留时间基本相同。这表示两个实验证明小鼠的光感受器细胞被近红外光激活，产生的信号通过视神经传递到小鼠大脑视觉皮质，小鼠具有感知红外线的的能力。但已注射小鼠，是否还可以分辨近红外光图像呢？实验方法是，用 Y 形水迷宫测试小鼠的图像识别能力。

水迷宫的一端被分隔为两个通道，一个平台隐藏在通道末端，平台也成为不愿意长时间待在水里的小鼠的“诺亚方舟”——用不同的近红外光图像训练小鼠，随机把竖直和水平光栅图像，照射到通道两端，而隐藏的平台，仅在竖直光栅图像一端。几次尝试后，已注射小鼠很快发现了竖直光栅图像与隐藏平台的关系，并迅速向竖直光栅图像游去。而未注射小鼠看不见近红外图像，只是随机在迷宫中游来游去。此后再将竖直光栅变成圆形、三角形，也得到了相同的结果。这个实验证明，已注射小鼠可以分辨复杂的红外图像，并且在获得红外视觉的同时，小鼠的可见光视觉不受到影响。即动物可以同时看到可见光与红外光图像，而有望治疗或弥补“视觉缺陷”。

该研究还发现分子、细胞、组织器官以及动物行为的检验证明，pbUCNPs 纳米材料具有良好的生物相容性——该材料可以在小鼠眼中，停留两个月以上；长期存在于动物视网膜，而对视网膜及动物视觉能力均未发现明显负面影响。此项技术有效拓展了动物的视觉波谱范围，实现裸眼无源的红外图像视觉感知，可突破自然界赋予动物的视觉感知物理

极限；通过开发具有不同吸收和发射光谱参数的纳米材料，还有可能辅助修复视觉感知波谱缺陷相关疾病，例如红色色盲；这种可与感光细胞紧密结合的纳米修饰技术，还可以被赋予更多的创新性功能，如眼底药物的局部缓释、光控药物释放等。

## 2) 人工智能介入生物基因材料的研究

### A、神经网络建模推动作物育种走向智能化

DNA 分子结构模型的发现推动了分子生物学的发展，让育种家们能够从基因和分子水平上解码作物的生命秘密，通过调控基因获得特定表型，以期培育出最想要的作物品种----自从作物被驯化以来，培育集抗性强、优质、高产等性状为一体的作物品种一直是育种家的梦想。但如何调控作物基因才能培育优良品种？如何不用大规模田间试验就能预测基因变异后的作物生长状况？时至今日，这些问题依然困扰着育种学家们。2019年3月19日《中国科学报》报道,中国农业科学院生物技术研究所副研究员汪海教授，与合作者共同开发出从基因组DNA序列预测基因表达调控模式的人工神经网络模型，有望借助人工智能(AI)技术实现定向育种。

从某种意义上来说，育种是把来自不同种质资源的优良等位基因，聚合起来作物育种经历漫长的改良之路。传统育种，是耕作者对作物表型变异的肉眼观察，通过主观判断选出高产优质抗性强的育种材料。而职业育种家出现，是根据对作物遗传规律的认识，通过预先设计杂交育种试验，再从后代中筛选出优良栽培品种。这种方法虽然为作物改良、有效解决粮食安全问题作出了巨大的贡献，但在某种程度上却都是基于经验和观察，完全根据表型对育种材料进行选育的“经验育种”；类似“一把尺子一杆秤，用牙咬，用眼瞪”----过去几十年、上百年来沿用的方式，因作物表型易受环境、气候等因素影响，依赖于经验育种效率低，且成本高、田间管理难度大，并无大的突破。直到20世纪50年代分子生物学与基因工程的诞生，才打开了人类认识生命本质的大门。

作物育种从经验育种时代，进入了分子定向育种时代，育种家可在明确基因型的表型效应的情况下，有的放矢地把符合预期要求的基因型进行组合----找到控制作物最佳性状的基因，对其进行标记，在后代中监测追踪，从而有目的地对单一目标性状进行基因改良，大大提高了育种效率和精确度。然而伴随着高通量基因组测序技术的发展，越来越多的作物全基因组密码被解开，在海量的基因组数据面前，控制优良性状的基因是哪些？怎样的基因组组合才能产出最优的作物品种？上述分子标记有效利用与定向育种的先决条件却不得而知----明确哪些分子标记和哪些性状相关联，需要借助机器学习模型或深度学习模型，帮助育种家根据基因型预测表

型。所以人工智能技术，使作物育种更加精准而高效，突破了人的经验。

深度学习模型帮助预测优势品种的原理是，借助计算机算法机器学习，建立模型并解析数据，通过不断学习数据的自身特征并训练模型，从而实现目标对象的判断和预测----基于线性模型的传统机器学习方法，由于不考虑生物学过程背后的分子机制，造成模型不会“举一反三”，在某个基因上学习到的特征，不能运用到相似分子机制的基因，而且不能有效预测低频、罕见变异的表型效应。而以基因组序列为预测变量的深度学习模型，可以克服这一难点。

例如，玉米自然群体中，有超过50%的变异属于低频、罕见变异。以基因家族代替单个基因为单位，随机分配训练集和测试集数据，可解决“进化依赖”造成的模型“过拟合”问题。其次，进一步利用多种算法对模型进行解析，可获得调控基因表达的关键DNA基序。在此模型基础上，利用进化上亲缘关系较近的两个物种，可成功预测同源基因的相对表达量，并进一步获得调控同源基因相对表达量的关键DNA基序----深度学习模型通过模拟分子生物学过程，可在自然群体中预测直接造成表型的因果变异，而非和因果变异紧密连锁的变异。

针对因果变异进行基因组编辑，未来还可以直接将有利自然变异，引入现有的育种材料----与传统高投入、大规模的田间试验相比，人工神经网络模型可在计算机中对基因组DNA序列进行虚拟诱变，并利用模型预测变异的后果，从而再挑选符合预期目标的变异序列进行实验验证，实现低成本定向设计育种。智能化育种对作物优良基因挖掘方法的突破，代表了未来的发展方向----以人工神经网络为代表的新一代人工智能技术，具有更强大的数据挖掘能力，正推动作物育种走向智能化的“4.0”时代。

中国农业大学王向峰教授阐释育种“4.0时代”：依托人工智能、基因组测序、基因编辑等相关技术，实现玉米组学基因型与表型大数据的快速积累；通过遗传变异等数据的整合，实现作物性状调控基因的快速挖掘与表型的精准预测；通过人工改造基因元器件与人工合成基因回路，使作物具备新的抗逆、高效等生物学性状；通过在全基因组层面上建立机器学习预测模型，创建智能组合优良等位基因的自然变异、人工变异、数量性状位点的育种设计方案，最终实现智能、高效、定向培育新品种。美国农业公司在人工智能技术辅助育种方面已有应用，如原孟山都公司通过人工智能筛选，只需对最具开发潜力的品种分子进行田间测试，即可帮助农民增收；借助机器学习和预测建模技术，快速为农民提供数字化解决方案。

汪海教授说：目前把深度学习等人工智能技术应用于基因组学领域，在国内外都刚刚起步。阻碍人工智能技术在基因组学中广泛应用的因素之一，是跨领域人才缺乏----“基因组学领域的人需要学习和掌握人工智能技术方法，并根据基因组学领域问题的特殊性，对人工智能技术进行改造……训练深度学习模型，需要大量的数据，然而在农业领域，作物的基因型和表型数据量却积累不足”。

华南农业大学生命科学学院王海洋教授说：“有数据是第一步。对数据进行规范化采集处理、存储与管理，并建立开放共享的数据库更重要”----研究人员在育种后，除了留下优质品种数据，也要保存非理想型品种的全套基因组和表型数据，以便数据建模时进行优劣比较，找出调控优良表型性状的基因。大数据时代下智能化育种的前提是标准化大数据体系。而农业数据采之不易且不统一，作物表型数据差异性较大，不同人采集的数据真实可靠性与准确性也难以控制。除外彼此数据不开放共享，也使得研究中可比较的数据量少。

### B、解析药物定向改良中“蝴蝶效应”材料研究

小分子药物结构上一个基团的变化，比如不同位点的甲基化，类似气象、生态系统中的“蝴蝶效应”，会使药物活性发生巨大变化。而与化学合成法相比，基于酶的生物催化技术具有简易高效、节能环保、选择性专一等优点。因此，解析药物结构变化中“蝴蝶效应”的发生机理，掌握这种改造技术对药物创制以及药物分子的定向改良具有重要意义----药物分子结构，决定着它们的理化性质和药理活性，而医药、农药、食品添加剂等都是生活、生产中常见的药物。用于定向提质增效前景的药物的工程化生物合成。据 2019 年 3 月 2 日《科技日报》报道，中国农业科学院生物技术研究所徐玉泉教授研究组，与美国亚利桑那大学伊斯万·莫纳教授团队合作，在真菌氧甲基转移酶的理性设计和结构改造上，成功开发出一种能够定向改造氧甲基化生物催化元件的技术，已经成为新型药物开发的发展方向之一。

该研究是以两种真菌氧甲基转移酶 LtOMT 和 HsOMT 为研究对象，利用蛋白质同源建模等技术，解析出二者在催化位点上产生差异的分子机制----通过多肽片段交换和氨基酸定点突变等手段理性设计、合理改造 LtOMT 的结构，重塑其催化位点，成功开发出一种能够定向改造氧甲基化生物催化元件的技术。经应用改造后的 LtOMT，在多种多酚类药物先导化合物上实现了氧甲基化修饰方式的改变，改善了这些小分子的理化性质。这种基于多组学和大数据库资源，可以进行生物催化元件的大量挖掘，利用合成生物学技术理性设计这些元件，是实现药物先导化合物结构优化的一条全新技术路线。

### C、材料研究皮肤细胞重编程重见光明

科学家已经能从动物模型的皮肤或血细胞中制造干细胞材料，并将这些干细胞编程成光感受器，然后将其移植到动物眼睛的后部。在这项新研究中有可能跳过干细胞步骤，直接将皮肤细胞重新编程为感光细胞移植到视网膜上的材料，以解决光感受器丧失----感受光的细胞，是大部分视网膜疾病（老年性黄斑变性和糖尿病视网膜病变）的常见结果，最后会导致患者出现不可逆失明的情况。

据 2020 年 4 月 16 日《中国科学报》发表的《皮肤细胞帮小鼠重见光明》报道，美国研究人员已发现一种直接将皮肤细胞重新编程用于杆状光感受器的技术，将这些实验室制造的杆状物材料，移植到失明小鼠眼睛后，这些动物能够探测到光线。此前诱导多能干细胞重编程可能需要 6 个月才能使细胞或组织为移植做好准备；现在直接重编程仅在 10 天内，就将皮肤细胞诱导成可移植的功能性光受体。

这种直接化学改编就可以产生视黄醛样细胞的研究，提供了一种新方法治疗年龄相关性黄斑变性，和其他由感光器缺失引起的视网膜疾病。而且还能借此设计更好的细胞替代方法，快速建立疾病模型，以便研究疾病的机制----直接从皮肤细胞进入感光细胞，而不需要中间的干细胞研究，鉴定出了 5 种可以驱动纤维母细胞转化成视杆细胞样细胞（CiPCs）的化合物，这 5 种化合物一起通过化学方式介导与杆状光感受器细胞相关的分子通路。对小鼠胚胎纤维母细胞源 CiPCs 进行基因表达图谱分析后发现，新细胞的基因与视杆细胞类似。与皮肤细胞功能相关的基因被下调之后，将 CiPCs 植入 14 只视网膜变性的小鼠的眼睛里面，以检验这些细胞能否恢复瞳孔反射和视觉。发现在移植 3~4 周后，其中 6 只小鼠在低光条件下的瞳孔反应有所改善。又采用灰光测试（具备视觉的小鼠倾向于偏好黑暗环境），评估了这 6 只小鼠的视觉功能恢复情况。结果显示，接受了移植的 6 只小鼠在黑暗环境中停留的时间比失明小鼠要长。

这些所观察到的改善，是由于实验室制造的光感受器，而不是对宿主现有光感受器的辅助作用。弄清这种直接的重新编程是如何在细胞水平上进行调节的，将帮助研究人员不仅将这项技术应用于视网膜，而且还能扩展到许多其他类型的细胞。

### 3) 联系生物传感、催化、紫外光的材料研究

#### A、展现生物传感检测技术的材料开发

羟基自由基（•OH）是一种生物体内存在的超高活性自由基，能够破坏诸如细胞与组织内的脂质、蛋白质、DNA 等生物分子，与许多疾病及衰老现象密切相关。对此，场效应晶体管传感器是一种潜力巨大的传感技术，被广泛应用于检测金属离子、DNA、蛋白质、有机小分子等。然而，•OH 自由基



化学性质非常活泼，寿命很短，只有 10<sup>-6</sup> 秒量级，很容易转变成其他物质。因此，到目前为止还没有 •OH 自由基场效应晶体管传感器的报道。然而 2019 年 4 月 22 日科学网报道，复旦大学高分子科学系、聚合物分子工程国家重点实验室研究员魏大程教授课题组，在场效应晶体管传感器领域获重要进展---新型场效应晶体管传感器实现羟基自由基检测。

魏大程教授团队，开发的是一种基于内剪切反应的石墨烯场效应晶体管传感器---在传感器中，石墨烯作为导电沟道，并在石墨烯表面修饰金纳米颗粒，以 Au-S 键在金纳米颗粒表面固定原卟啉分子。当加入带电金属离子，金属离子会和原卟啉分子发生络合反应，从而对石墨烯产生电掺杂。在检测过程中，•OH 自由基与 Au-S 键发生氧化剪切反应，从石墨烯表面释放带电金属离子，发生石墨烯的去掺杂，引起石墨烯沟道的电流变化，从而间接实现对•OH 自由基的检测。采用不同浓度金属离子修饰的 FET 传感器进行检测，就能够半定量地测量•OH 的浓度。该传感器对•OH 具有良好的选择性，最低检测浓度达到 10<sup>-9</sup> M---这是首例•OH 自由基场效应晶体管传感器。

魏大程教授团队展现出这种技术在生物传感及相关领域巨大的实用价值，长期致力于开发场效应晶体管电学材料，包括共轭有机分子、大分子、低维纳米材料，研究场效应晶体管器件的设计原理以及在光电、化学传感、生物传感等领域的应用---原位测量了器件表面培养的 HeLa 细胞，在 LPS 刺激下释放的•OH 自由基。

## B、可调试极紫外光化学相干的材料研究

羟基自由基(OH)是星际介质和行星大气中最重要的分子之一，其性质活泼，能和大部分原子和分子发生反应，但是星际中，超热的羟基自由基的来源一直困扰着天文学家---实验中发现水分子在极紫外光照射下，会生成大量的处于高转动激发态的羟基自由基，部分羟基自由基的转动能甚至超过了羟基化学键的解离能，实验上称其为“超级转子”。2019 年 3 月 26 日《大连日报》报道，中科院大连化物所袁开军研究员、杨学明院士团队，与南京大学谢代前教授合作，利用我国自主研发的基于可调试极紫外相干光源的综合实验研究装置（简称“大连光源”），研究水分子光化学揭示了星际中超热的羟基自由基的来源---在 115nm 水分子光解下，发现迄今为止最热的羟基自由基产物，通过与理论研究合作，解释了其动力学来源。

“大连光源”是我国第一台大型自由电子激光科学研究用户装置，也是当今世界上唯一运行在极紫外波段的自由电子激光装置。该实验结果表明水分子的极紫外光化学过程，有可能是星际中超热的羟基自由基的来源，需要加入星际化学的模型中。

自项目通过验收以后，“大连光源”装置运行情况良好，将对大气化学中性团簇、行星原始大气演化、地下水和冰川样品测年、发动机燃烧过程中复杂机理等能源化学相关领域重大科学问题开展研究，吸引了众多国内外知名科学家团队前来寻求合作

## C、新型铂单原子催化剂材料的研究

二氧化碳加氢反应后的产物比较复杂，既可能是甲醇，也可能是一氧化碳、甲酸，甚至是另一种温室气体甲烷---这也是国际科学界近年来致力于解决的一个科技难题。但据 2019 年 4 月 30 日新华网报道，中国科技大学曾杰教授研究团队，与中科院上海同步辐射光源研究员司锐教授合作，研发出一种负载在金属有机框架上的新型铂单原子催化剂。这种铂单原子催化剂催化的二氧化碳加氢产物中，甲醇的纯度高达 90.3%，其他成分不足 10%，可将二氧化碳高效转化为纯度 90%以上的甲醇，这对减排和开发新能源具有重要意义。

## 4) 誉为亲水液态门工业味精活性剂材料的开发

### A、从科幻到真实响应性的“液态门”薄膜组合

“液态门”不是科幻场景，将在化学检测中一步步走向现实应用---2019 年 3 月 21 日《科技日报》报道，厦门大学化学化工学院和物理科学与技术学院双聘教授侯旭团队，研究响应性“液态门”的调控机制，通过采用限域空间物理化学界面设计，建立了一种物质检测的新方法，就像铸造的一把开门钥匙，能准确迅速打开特定的“液态门”，首次构建响应性“液态门”调控机制。

现实中，液体具有很强的流动性，其分子之间的相互作用比固体中的分子弱。液体分子只在很小的区域内作有规则的排列，这个区域是暂时形成的，边界和大小会随时改变；因受到重力、离心力等的作用，液体便会很快流动，无法形成一个稳定的门。而“门”的概念，一直是以固态的形式存在。受到液态“星际之门”的启发，侯旭教授对“门”的形态，有了更为广义的理解，并首次提出了“液态门”的门控概念---“液态门”即液体在多孔薄膜中毛细力作用下，稳定填充在薄膜孔道内部，形成的一种闭合状态。如果“施加”一定压力，“液态门”会迅速开启，形成孔道内壁有液体层的通路，就像吸了水的海绵，需要通过挤压才能将水排出。

近年来无电可视化检测微量物质---微量物质检测技术一般采用光学、电学等信号的检测方法，通过专门的仪器设备对检测信号进行输出读取。由于该机理复杂，往往不是直观获得的检测结果，对光源、电源等的需求条件限制了其设备的大小。另外，一般需要专业人士进行操作，这些综合因素都会增加检测成本。

而新的“液态门”体系，能够将功能门控液体中双亲分子与待检测物质特异性相互作用导致的界

面张力信息, 转化为气体跨膜临界压力阈值变化信息。在检测时, 该体系可动态调控通过薄膜的气体, 拥有压力驱动标记物移动特性。这种直观的微量物质检测新技术, 能够实现待检测物成分、浓度变化信息的无电可视化检测。以二价金属钙离子为例检测的灵敏度, 设计了无电可视化化学检测装置。在该装置中, 一端是有特定压强的腔室系统, 另一端是有标记液滴的管路, 并与响应性的“液态门”薄膜组合, 当向“液态门”系统中注射待检测钙离子, 能够非常直观地看到标记液滴在管路里的移动。

### B、表面活性剂“工业味精”的液滴移动原理

是什么原理使标记液滴能够移动? 实际原理是在该检测体系中, 双亲分子在检测物的偶极诱导作用下会发生界面性质改变, 宏观上表现为表面张力的降低, 进一步引起液体门控系统临界压强阈值降低, 释放高压气体, 推动标记液滴在管路里移动---表面活性剂被誉为“工业味精”, 由于其亲水亲油的特性称双亲分子; 能使液体的界面性质发生明显变化, 广泛应用于制作肥皂、洗发液、护肤品等。侯旭教授团队研究发现当引入表面活性剂为门控液体, 它将不同于其他液体为“液态门”带来极其灵敏开关作用。因为进一步通过设计作为门控液体的表面活性剂, 采用量子化学计算方法, 来得到表面活性剂双亲分子与待检测物质的最优结构和双亲分子的偶极矩, 从而跳出了传统的化学检测方法, 实现了简单、直观、无需耗费电能的微量化学检测, 就像铸造一把开门的钥匙, 能够准确迅速地打开特定的“液态门”。

在实际的化学检测过程中, 检测信号将通过仪器中标记液滴的移动速度、状态等来直观呈现, 从而得到检测物的成分、浓度等信息, 且全程无需耗费电能。该体系的灵敏度与所用膜材料的性质与孔径及双亲分子的结构与浓度有关, 一般情况下, 孔径越小, 灵敏度越高, 同时也可以通过双亲分子的化学设计, 提高检测灵敏度---响应性“液态门”技术的提出, 突破了传统微量物质化学检测机制与应用的限制, 其操作简单且可微型化使用, 不仅可以应用在重金属污染物等快速便携式微量检测应用中, 同时也在食品安全、环境监测、医疗诊断等领域具有广阔的应用前景。

### 5) 新冠肺炎中医药防控中的清肺排毒汤

2020年央广网4月17日记者车丽据中央广播电视总台中国之声《全国新闻联播》报道, 国务院联防联控机制17日下午召开新闻发布会, 介绍新冠肺炎疫情中医药防控工作进展和成效。北京中医药大学东直门医院党委书记叶永安教授介绍, 在此次抗击新冠肺炎疫情中, 中医药在重症及危重症的救治中发挥了良好的作用, 国家组织专家制定了三版重症、危重症的诊疗方案, 并且推荐了4个方剂和

8个中药注射剂, 减缓、阻止了重症向危重症的转化, 促使危重症转为普通症, 从而提高了治愈率, 降低了病死率。北京中医药大学副校长王伟教授介绍, 中药清肺排毒汤是个适用于轻型、普通型、重型新冠肺炎的通用方剂, 具有速效、高效、安全的特点。现在在全国28个省市广泛使用。王伟教授说: “有一组专家对它的物质基础做了研究, 目前已经完成300多种化学成份, 还有200多种入血成份的鉴定工作, 通过网络药理学的方法初步预测有790多个潜在的靶点, 初步说明这个药物可以通过多个成份、多个环节, 对新冠肺炎起到调控的作用, 特别是它可以有效抑制内毒素的产生, 可以避免或者延缓炎症风暴的发生”。

据有关互联网介绍, 清肺排毒汤是由汉代张仲景所著《伤寒杂病论》中的多个经典方剂优化组合而成, 是目前唯一的一个对新冠肺炎的通治方剂, 不仅可用于轻型、普通型、重型新冠肺炎患者, 在危重症患者的救治中也能用。这也需遵医嘱, 每天一剂, 煎好后早晚饭后40分钟各温服一次, 连续服用3天即可。如有条件, 每次服完药可加服大米汤半碗, 舌干津液亏虚者可多服至一碗。处方组成为: 麻黄9g, 炙甘草6g, 杏仁9g, 生石膏15-30g(先煎), 桂枝9g, 泽泻9g, 猪苓9g, 白术9g, 茯苓15g, 柴胡16g, 黄芩6g, 姜半夏9g, 生姜9g, 紫菀9g, 冬花9g, 射干9g, 细辛6g, 山药12g, 枳实6g, 陈皮6g, 藿香9g。清肺排毒汤剂药如果被量产制成可冲服的颗粒后, 是否还具有良好的效果呢? 4月14日在国务院联防联控机制新闻发布会上, 国家中医药管理局科技司司长李昱表示, 清肺排毒颗粒已经国家药监局批准, 获得国家的临床试验批件。

## 三、联系虚拟世界的无机材料科研前沿

### 1) 奠定拓扑量子计算基础的材料研究

#### A、马约拉纳零能模二维铁基高温超导材料

现实世界联系虚拟世界的无机材料科研前沿的内容非常丰富, 下面选六个方面的题材来作简单的介绍, 第一就说量子计算机。

研制超越经典计算机运算能力的量子计算机, 已成为国际前沿焦点和各国实现量子超越的核心方向。然而量子计算面临的最大问题是, 由于存在退相干效应, 量子比特的运算需要更多比特数来纠错。因此, 探索可容错量子计算---即对环境细节不敏感的拓扑量子计算, 就成为最终实现规模化量子计算的重要途径。2020年3月26日北京大学新闻网报道, 北京大学物理学院量子材料科学中心王健教授团队, 和美国波士顿学院汪自强教授等合作, 首次在二维铁基高温超导体中一维原子链缺陷两端, 发现马约拉纳零能模, 为实现拓扑量子计算奠定了基础---凝聚态物质中马约拉纳准粒子的零能束缚态, 被称为马约拉纳零能模, 具备抗局域干扰和高容错

的特性，被认为是实现拓扑量子比特的基础。目前探测马约拉纳零能模需要构造工艺复杂的异质结构，且进行观测需要极低温及外加磁场，这都给马约拉纳零能模可能的应用带来极大困难和挑战。

但在最新研究中，王健团队通过分子束外延技术，在钛酸锶衬底上成功制备出大尺度、高质量的单层 FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> 高温超导薄膜，厚度约为 0.59 纳米，其超导转变温度约为零下 211 摄氏度，远高于块材 Fe (Te,Se) 的零下 258 摄氏度---利用原位低温扫描隧道显微镜和扫描隧道谱技术，他们在薄膜表面发现了一种由最上层 Te/Se 原子缺失形成的一维原子链缺陷，并在缺陷两端同时观测到了零能束缚态，而且发现该束缚态具有良好的抗干扰性，汪自强教授团队则对此提出了可能的理论，解释王健教授认为的该工作为进一步实现可应用的拓扑量子比特提供了一种可能的方案---因为揭示了二维高温超导体 FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> 单层薄膜中，一类拓扑线缺陷端点处的零能激发，具备单一材料、较高工作温度和零外加磁场等优势。

### B、量子计算入门瓶颈降低的材料研究

2020 年 4 月 17 日“观察者”网报道，杨智寰教授是澳大利亚新南威尔士大学电气工程与电信学院的量子实验科学家兼工程师，4 月 16 日他作为第一作者发表在《自然》杂志的论文---《硅基量子芯片在高于 1K 温度下的一种运作方式》研究，演示了一种可在目前技术能及温度 (0.1K) 的 15 倍温度 (1.5K) 下运作的量子计算平台。

当今量子计算的入门瓶颈是在制冷机---制冷机压力小了，能让更多的研究团队参与进来。杨智寰教授等精妙解决方案的实施，是温度放大的结果可使用现有的硅芯片工艺，进行生产量子芯片，并且无需数百万美元的冷却系统即可运行；同时与传统的硅芯片也更容易集成---这是控制量子处理器所必须的。杨智寰和同组教授 Andrew Dzurak 领导的研究团队，为这一问题的解决提供了一个可行的“热量子位”方案---用的是硅基 MOS (金属--氧化物--半导体) 的量子点---这是当今绝大部分芯片的技术---在选材上使用的硅-28 同位素的无自旋材料，它可以令电子的自旋存活更久。这也主要依赖于读取电子自旋的方式改变，得以将平台温度提升。

此前读取电子自旋，是通过电子隧穿到一片二维电子气 (2DEG) 的方式。这种方式在温度提升时容易因“能量模糊”，导致无法读取电子自旋信息。在他们的试验设计中，设计了一种由两个量子比特组成的“单位晶胞”，并将它们限制在一对嵌入硅的量子点中。这样可以利用两个量子点之间的“泡利自旋阻塞”特性，来读取电子自旋信息；试验也证实在温度稍高的环境下仍能继续作用。同一期《自然》杂志“背对背”发表的另一篇《热硅量子位中的

通用量子逻辑》论文，第一作者 Menno Veldhorst，是 Dzurak 小组的前博士后研究员。

此研究使用相似的硅技术，也取得了在 1.1K 温度下运作的量子电路类似的结果---两个原理性试验虽然获得成果的时间不同---Dzurak 小组的成果取得于 2019 年 2 月，Menno 小组的成果取得于 2019 年 10 月，但它们相互独立、相互印证，表明了相关成果的突破性---克服了阻碍量子计算机成为现实的最艰巨的障碍之一---尽管从 0.1K 到 1.5K 这一升温幅度，看似并不高，但该研究提出的“热量子位”方案给工程上带来的便利，或将改变量子计算的发展---目前国际上正在开发的大多数量子计算机，只能在绝对零度以上的几分之一度内工作。主要原因在于添加进系统的每个量子比特都会产生热量，而热量的增加会干扰量子系统，进而导致系统失稳---一般固态 (如超导或半导体电路) 平台，需要约 0.1K (-273.05℃) 的温度下运转，而这需要投入数百万美元开发接近极限的制冷技术。

即便如此，将它们插入常规电路后，它们也会立即因过热停止运作。而 1.5K 这个温区制冷机好做很多，硅量子芯片可直接利用强大的半导体工业技术。量子计算入门瓶颈降低---温度提高后，可以取得许多优势。其一，不受超冷条件的制约，意味着不再需要复杂且昂贵的“稀释冰室”系统来运作量子比特；其二，可以有更强大的冷却功率，这意味着将低温操作电子元件，直接整合于量子比特芯片上不再是梦。这两项好处，都能大大降低开发工程的难度和成本---虽然温度“只”提升 15 倍，但散热的冷却功率可提升上千倍之多，这给制冷机的压力就小很多。硅量子计算这一突破---1.5K 下可以工作的量子比特，对于用制冷机的人来说可以称得上“高温”。

### C、量子计算机小型化控制系统一体机的研究

量子计算机控制系统是搭建量子计算机的重要部分，其小型化之路将会推动量子计算机朝着集成度更高的方向发展，这是未来量子计算机发展的趋势。量子计算是新兴产业，国外发展较早，但科学家们关注更多的是量子芯片的性能提升，而忽视其控制系统的更新迭代。回顾计算机发展史，电子计算机在 20 世纪 50 年代刚刚被发明出来时，体积巨大---首台电子计算机“ENIAC”占地 170 多平方米，发展至今才成为可以握在手中的设备。眼下正处于起步阶段的量子计算机，似乎也在重复当年的故事---大部分致力于量子芯片研究的团队，都是用现有的设备搭建控制系统，但这样成本高且效率低。

因此研发专门针对量子计算的优化控制设备，就显得迫在眉睫---要实现量子芯片的精准操控，需动用的仪器设备也要占满整个房间。量子计算机小型化势的历史进程正在上演---2019 年 1 月 17 日

《中国科学报》报道，来自中科院量子信息重点实验室的研究团队，从量子计算机的外设硬件设备入手，研制了一套精简、高效的量子计算机控制系统——这套具有“小型化、专业高效、国产化水平较高”等特点的“量子测控一体机”，将其“控制系统”的功能集成在一台行李箱大小的仪器之中，踏出了国内量子计算机小型化的第一步。

目前量子测控一体机的一些元部件已经国产化，在其可应用的多个领域，高端仪器依赖进口的局面或将改善。量子测控一体机随着量子芯片的发展而迭代芯片位数的提高，其对控制系统的要求也相应提高，这其中有不少挑战：必须满足量子芯片对于信号生成、采集的指标需求；满足量子芯片在运行时对信号控制与处理的指标需求；在利用量子芯片实现量子信息处理应用时，从量子计算机控制系统不同信号接口处输入输出的信号，需要满足更加严格的逻辑关系。这需要对量子芯片运行时的一切指标需求进行严格的考核论证，理解量子信息处理的本质以及实际工作方式，以便针对性地研发满足指标的量子计算机控制系统，这是一个技术难点。

量子计算机控制系统，是指除量子芯片之外量子计算机所有的外部硬件，类似于经典计算机的主板、内存、存储器、电源等一系列部件的总称。为了满足量子计算实验研究的需要，以中科院院士郭光灿教授领衔的量子计算研究团队，很早便开始尝试量子计算机控制系统的搭建。后来由该团队创立的、致力于推动量子计算机走向应用的我国第一家量子计算公司——“本源量子”成立，量子计算机控制系统的研发也就成了本源量子的重要研发项目——量子测控一体机最基本功能，是提供量子芯片运行所需的关键信号，同时负责对量子芯片传回信息的处理，并执行对量子计算机程序的编译。即量子测控一体机通过提供量子芯片的运行环境与接口，提供量子芯片所需的精密信号的生成、采集、控制与处理，使得量子芯片最大程度发挥其性能优势。量子测控一体机采用模块化设计，当前发布的版本包含四种功能模块，总计 40 个功能通道。功能通道之间通过 PCIe 高速扩展总线互连、实现一体化，可直接支持 8 位超导量子芯片或者 2 位半导体量子芯片。在使用过程中，还可以将其升级至最多 200 通道，以支持更高性能的量子芯片。目前已经开发了半导体 2 比特量子芯片，以及超导 6 比特量子芯片，这两种工艺路线均在量子测控一体机上得到良好支持。

本源量子可提供多种版本的量子测控一体机，支持超导与半导体量子芯片，是世界上首台可以同时支持两种不同固态量子计算技术路线的集成化测控设备。同时还在研制适用于离子阱、金刚石、NEMS 等更多量子物理体系研究需要的系统级方案

以及独立功能模块。量子测控一体机将主要应用于量子芯片的测试研究与量子计算机的原理搭建等场景；此外其本身作为高端仪器仪表，还可应用于精密测量、基础科学研究、雷达探测等更广泛的领域中——量子测控一体机的核心指标以及模块设计，均由其技术团队独立研发而成，模块设计采用的是“完全多功能一体化方式”，这与当今发布的其他几款由商用仪器搭建的量子计算机控制系统有明显区别。

当前由于我国高端仪器仪表严重依赖进口，传统的量子计算控制系统多使用国外进口商业仪器搭建，成本高昂（超千万元）且功能冗余、兼容性差；而专门针对量子芯片设计的量子测控一体机，不仅功能专精、性能优异，成本也可节约一半以上（批量生产成本仍有下降空间）。这套设备的优势来自于高度的集成化，相当于把很多台不同功能的设备融合到一台设备中去，专为量子计算优化设计，从而带来功能上的专精、性能上的优势，精度更高、速度更快、成本更低，仪器占用空间小并且方便携带。未来本源量子研发团队将对量子测控一体机进行持续改进升级，使其向着集成度更高、信号指标更高、模块化独立产品、量子计算机汇编语言等多个方向优化，并满足更多位数量子芯片的测控需求。

对于何时推出量子计算机样机，要根据各个集成测试模块的进度来调整工作内容的安排——量子计算机的研发是一个长期的工作，这里面包含“开发--测试--迭代开发”这样不断向前演进的研发周期。在合适的时机中科院量子信息重点实验室会推出量子计算机样机——量子测控一体机的研发成功，使得可以进入到整个量子计算机系统的集成工作中来。这个过程需要一些时间——除了硬件上的适配和调试之外，包括控制程序、量子算法程序等软件相关的调试都要作；调试完成之后还要进行一段时间的运行测试，以确保整个系统的正常、可靠运行，同时也会给下一步的研发提供相关数据。

#### D、超冷原子操纵提供量子计算新途径材料研究

先前人们利用光场或磁场等外场对超冷原子进行搅动来制备涡旋，原子的旋转与外界搅动之间并不发生相干耦合。但 2019 年 3 月 29 日新华网报道，由中科院武汉物理与数学研究所研究员江开军教授领衔的研究团队，和青岛大学以及美国莱斯大学、澳大利亚斯威本科技大学的科研人员组成的联合研究团队，利用带有涡旋的光驱动原子两能级（分别记为自旋向上和自旋向下）间发生跃迁，在这个过程中，将光的涡旋相干地转移给原子——在实验中，原子的状态可以分为三种：自旋向上的原子转而自旋向下的原子不转；自旋向上的原子不转而自旋向下的原子转；两种原子朝相反方向旋转。通过控制光的强度和频率，可以操控原子体系旋转的状

态----这好比两个人在舞厅跳舞,自旋向上和自旋向下分别代表男生和女生,而光场代表音乐,在不同的音乐节奏下,男生和女生以不同的旋转方式翩翩起舞。这从实验上获得了耦合体系的基态相图,即“舞蹈”的“音乐节奏”。

这是科学家首次在实验中实现自旋-轨道角动量耦合的稳定状态----利用涡旋光和原子相互作用,将超冷原子缓慢地旋转起来,实现了旋转的原子和涡旋光之间相干耦合,即超冷原子的自旋-轨道角动量耦合效应,让原子伴着光子“跳舞”,并揭示了这种“舞蹈”的“音乐节奏”----在实验中所采取的方法,为研究超冷原子体系的相变和非平衡动力学行为提供了新的途径。

### E、光使物体悬浮并推其移动的方法材料研究

30多年前光学镊子的出现,使科学家能够用激光束的辐射压力移动和操纵微小物体,被许多人认为是光学镊子之父的亚瑟·阿什金,也因在该领域的杰出贡献而获得了2018年诺贝尔物理学奖----光是操纵物质的有力工具,但光学镊子只能在小范围内操纵非常小的物体,对于大尺寸物体则无能为力。2019年3月21日《科技日报》报道,美国加州理工学院的科学家通过在物体表面创建特定的纳米结构,设计出一种使用光即可使物体悬浮并推其移动的新方法。这一理论方法将有很多实际用途,甚至可用于新一代光能驱动航天器的开发。光是操纵物质的有力工具,因为加州理工学院设计的这一新方法,可以用光束操纵小至微米级、大至米级的多种不同形状和尺寸的物体,不仅可以使物体悬浮空中,还可推其循光束行进方向移动。

该方法的关键是在物体表面创建特定的纳米级结构,这种结构会与光相互作用通过控制沿物体表面光散射的各向异性,实现对毫米级、厘米级甚至米级尺度物体的自稳定光学操纵。物体在受到扰动时可以自行调整,产生恢复扭矩以使其保持在光束行进路线中;并不要求高度聚焦的激光束,也不会过分限制物体形状、尺寸和材料组成。从理论上讲,具有多种实际用途既可用于非接触式晶圆的制造和组装,也可用于轻型航天器的轨迹控制。这样的航天器不需要携带燃料,可利用纳米级结构构建的激光推进光帆,通过激光加速,其速度甚至可接近光速。

### 2) 凝聚态量子霍尔效应拓扑绝缘材料研究

#### A、三维新型手性费米子拓扑量子材料研究

在固体中一些材料的体态电子结构,因某些对称性或者拓扑的保护致使能带交叉时不会杂化,出现能带简并。这个特征介于金属和绝缘体或半导体之间,属于半金属材料,也被称为拓扑半金属。在简并点附近会激发各种类型的费米准粒子。迄今为止,实验已经证明“固体宇宙”中存在3种费米准

粒子:四重简并的狄拉克费米子、二重简并的韦尔费米子、以及三重简并费米子。只有韦尔费米子具有手性,狄拉克费米子和三重简并费米子本身没有手性。

而手性是指一个物体与其镜像不能重合的现象,比如我们的双手,左右与右手不能重合。手性现象在自然界中广泛存在,在物理学中表示一种重要的“对称性”。在相对论物理中,手性是指无质量粒子的自旋和动量方向平行或者反平行,尽管90年前理论预测了存在无质量手性费米子----韦尔费米子,但它们作为基本粒子的存在尚未经过实验证实。而2019年3月21日科学网报道,中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心研究员丁洪、钱天和副研究员孙煜杰团队,与中国人民大学物理学系雷和畅等合作者,共同发现三维材料CoSi中存在新型手性费米子的确定证据实验,证明了新型手性费米子的存在,为探索由手性费米子引起的新奇物理现象提供了一个较为理想的平台----通过破缺对称性,比如外加磁场,将它们退简并成手性的韦尔费米子。

在众多关于新型手性费米子的理论预言中,过渡金属硅化物CoSi属于能带结构比较理想的材料。也正因如此,该材料引起了国际上多个研究团队的关注。角分辨光电子能谱实验可以提供直接的证据,但需要原子级平整的样品表面。由于CoSi是三维材料,传统的解理方法获得的表面无法满足实验要求。但借助“抛光-轰击-退火”的方法,经过长时间的不断摸索,终于在CoSi单晶样品上得到原子级平整的表面,并在上海光源“梦之线”观测到清晰的体态和表面态能带。实验结果显示在体布里渊区的中心和角落处,存在体态能带简并点,并通过分析表面态确定了简并点处存在手性的费米子,这与理论计算结果高度吻合----这种全新的奇特拓扑量子材料狄拉克半金属和三重简并点半金属中,表现出的许多物理性质。例如,手性反常导致的负磁阻效应和表面态费米弧,本质上都是来源于手性的韦尔费米子。

现有的理论已经证明,在“固体宇宙”中还存在着多种类型的除韦尔费米子以外的手性费米子以及相关的材料,但直接的实验证据仍然缺乏。日本、美国、英国的3个研究团队,也在CoSi这一类材料中寻找新型手性费米子的证据,但中国科学家在样品质量、数据质量等方面获得了最高质量的结果。此次发现韦尔费米子之外的新型手性费米子不仅是拓扑半金属领域上的突破,也可为探索手性费米子相关的物理现象提供更多的途径,而具有重要的科学意义和应用价值。

#### B、三维量子霍尔效应材料的研究

量子霍尔效应是否只存在于二维体系?这个

基础问题从二维量子霍尔效应发现后不久即引起领域的关注。从上世纪八十年代初在二维电子体系中发现至今，量子霍尔效应作为超导之外的另一个著名宏观量子现象在凝聚态物理中催生出了一个越趋活跃的研究领域。其内在本质，是将数学中的拓扑概念引入物理，超越了根据对称性破缺理论的朗道-金兹伯格-威尔逊相变和物质分类理论的传统凝聚态物理学标准，为近年的拓扑物态与拓扑材料的快速发展奠定了基础。

早在 1987 年就有从理论上预言三维量子霍尔效应的存在和它的测量特征，但要验证这个新奇效应，对材料体系与测量手段的要求都非常高；尽管已有诸多尝试，实验上仍缺乏可信的观测证据。但 2019 年 5 月 15 日科学网报道，合肥微尺度物质科学国家研究中心国际功能材料量子设计中心（ICQD）和中国科大物理系的乔振华教授，与南方科技大学张立源教授、新加坡科技设计大学杨声远教授、美国佛罗里达州立大学的杨昆教授、麻省理工学院的 Patrick A. Lee 教授和布鲁海文国家实验室的 Genda Gu 教授等理论与实验合作，在碲化锗（ZrTe5）块体单晶体材料中首次观测到三维量子霍尔效应的明确证据，并指出该效应可能是由于磁场下相互作用产生的电荷密度波诱导的——在层状碲化锗材料中，垂直磁场的出现使得体内电子在垂直磁场的平面中形成朗道能级；而在侧边界，存在手性传输的电流。在垂直磁场的平面内，边界电子形成单向传输的边缘态，产生该效应的关键是电子之间的关联作用导致电荷密度波的形成。

无论二维还是三维量子霍尔效应，系统的体相都必须都是绝缘的。对于三维体系，由于沿着磁场方向的电子运动不受磁场影响，一个初始的金属态在弱电子关联效应下是无法变成绝缘体的。而当系统进入仅有一个朗道能级被占据的量子极限区域，电子之间的关联效应大大增强，导致费米面的不稳定。其结果是形成了一种奇特的量子态——电荷密度波，即电子的密度沿着磁场方向以一定的周期振荡，整个体系转化为三维量子霍尔绝缘体。碲化锗是一种各向异性较强的三维层状材料，碲原子和锗原子沿着 x 方向形成一维原子链，该原子链沿着 y 方向堆叠为一层，xy 面内的原子层再沿着 z 方向堆叠成为体材料。费米面的形状尽管存在各向异性，但还是一个封闭的椭球面，所以整个体系仍为三维系统。当沿着 z 方向施加磁场时，该研究团队在实验上观测到一系列电阻振荡。尤其重要的是，当体系进入量子极限区域时，纵向电阻为零，而霍尔电阻的数值和 z 方向的费米波矢相关联。

该研究发现和理解掺杂莫特绝缘体产生的奇异量子现象，是凝聚态物理研究中的核心问题。掺杂莫特绝缘体的一个典型例子就是铜氧化物高温超

导体。在该体系中 d 波高温超导、赝能隙、电子-玻色子耦合等三个重要量子现象逐步被实验发现。并且，人们进一步意识到这三者之间相互密切联系。例如，赝能隙与 d 波超导密切相关（不管是作为可能的竞争者还是属于一种预配对）；电子-玻色子耦合则可能为超导提供配对所需的“胶水”；而最近的实验证明电子-玻色子耦合与赝能隙也紧密联系。尤其在铜氧化物高温超导体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  的研究中发现电子-玻色子（声子）耦合和赝能隙间可以形成一个正反馈，并有可能进一步增强 d 波超导。综上赝能隙、d 波超导以及电子-玻色子耦合的发现和理解，对于最终揭示铜氧化物高温超导体中的物理规律至关重要。铋氧化物  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  作为一种典型的自旋轨道耦合莫特绝缘体，在理论上跟铜氧化物高温超导体可以被相同的微观模型所描述。因此，一个很自然的问题是，在  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  体系中是否可以发现如铜氧化物中所呈现的奇异量子现象。近些年，实验上确实在电子掺杂的  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  体系中发现了与铜氧化物中类似的赝能隙和 d 波能隙，然而电子-玻色子耦合还没有被发现。

该工作中使用高分辨角分辨光电子能谱对电子掺杂  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  进行了系统的研究，发现了电子-玻色子耦合的直接实验证据的这第三个与铜氧化物类似的特征。这一最新发现不仅揭示了铋氧化物与铜氧化物另一个共同的物理性质，而且为研究掺杂莫特绝缘体中的核心问题：赝能隙、d 波能隙以及电子-玻色子耦合间的关系，提供了一个崭新的窗口。在这个效应中，由于维度的不同，现象背后的微观物理机制，也展现其新颖与诱人的方自旋轨道耦合莫特绝缘体研究取得进展。而上述的这些工作，也终于将经历了 30 余年等待的三维量子霍尔效应这一预言展现于世人面前。

### C、量子三维光学拓扑绝缘体材料研制

为何科学家锲而不舍地研究三维光学拓扑绝缘体呢？这是因为光学拓扑绝缘体的实验研究局限于二维空间。在二维光学拓扑绝缘体中，表面波传播时只有一维单向的拓扑边界态，而表面波在三维光学拓扑绝缘体中传播时，其拓扑表面态表现为二维无质量狄拉克费米子。而三维光学拓扑绝缘体的设计理论，因其参数十分苛刻，很难实现。而拓扑绝缘体自提出以来一直是凝聚态领域的一大研究热点，关于拓扑物质的研究工作荣获了 2016 年的诺贝尔物理学奖。拓扑绝缘体介于导体和绝缘体之间，其内部表现为绝缘体，而材料表面表现为导体。其表面电流源于材料内部电子能带的拓扑特性，能够对缺陷、拐角、无序等“免疫”，故而实现电子的高效运输。

据 2019 年 1 月 15 日科学网报道，三维拓扑绝缘体从费米子体系扩展到了玻色子体系，有望大幅

度提高光子在波导中传输效率的这项研究,已由浙江大学教授陈红胜课题组和新加坡南洋理工大学教授 Baile Zhang、Yidong Chong 课题组合作完成---国际联合研究团队通过联合攻关,成功设计出三维光学拓扑绝缘体,并突破了实验上的技术难点,完成了测量,首次实验实现了具有宽频带拓扑能隙的三维光学拓扑绝缘体。三维拓扑绝缘体的本质特征在于材料体内具有三维能隙,而材料表面具有二维狄拉克锥形式的能带。此前科学家们验证电子拓扑绝缘体需要购买高昂的检测设备。此次国际联合团队根据光子或电磁波的特性搭建电磁波三维扫描平台,进行了实验测试。他们通过对三维光学拓扑绝缘体内部及表面电磁场分布成像,提取电磁波模式的色散特征。该研究团队在实验中成功观测到该材料的三维能隙,以及具有二维狄拉克锥形式的表面态---这些正是三维光学拓扑绝缘体的关键特征。

三维光学拓扑绝缘体的设计过程并非一帆风顺,但借团队在新型人工异向介质材料上雄厚的研究基础,经过十几个版本迭代,历时数月设计出了电磁双各向异性介质单元。在这一研究过程中设计提出了一种由多个开口谐振器构成的电磁单元结构,该电磁单元结构具有很强的电磁双各向异性特性,这是实现宽频带三维光学拓扑绝缘体并使实验得以成功验证的关键。由于表面光子受到拓扑保护,该三维光学拓扑绝缘体可以用来构建光子“高速公路”,让光子在传输过程中,不被杂质、缺陷或者拐角影响,或者说,使各类缺陷“隐身”。为验证上述理论,该研究团队通过对三维曲面上表面态的成像,实验验证了表面波在界面传播时能够无障碍地绕过 Z 型拐角。这一现象表明,对表面波来说,这些拐角就像被“隐形”不可见一样,而能够绕过拐角实现高效传播,正是受益于三维光学拓扑绝缘体的拓扑保护特性。

这项研究实现的三维光学拓扑绝缘体,或可适用于三维拓扑光学集成电路、拓扑波导、光学延迟线、拓扑激光器以及其他表面波电磁调控器件中。该研究将三维拓扑绝缘体从费米子体系扩展到了玻色子体系,有望启发其它波色子系统(如声子及冷原子等)中三维拓扑绝缘体地实验实现,对拓展三维拓扑态体系具有重要意义。实验实现三维光学拓扑绝缘体十分重要,将推动该新兴领域的发展。

#### D、锁定电子“高速公路”的材料研究

手机或电脑用上一段时间就会发热,用不到一天就得充电,越用越卡……在物理学家看来,这个问题的本质在于电子运动会消耗能量。这不仅是制造算力要求高的电子器件的限制,也是科学界长期关注的难题---要让电子运动绝对无能耗,就必须将其杂乱无章的运动变成“高速公路”一样的有序运动---对电子运动制定规则的“量子霍尔效应”成为

解决这个问题的希望。但由于实现“量子霍尔效应”需要庞大的外加磁场,成本高昂,因此无磁场的“量子反常霍尔效应”成为科学家的梦想。所以研究量子反常霍尔效应,是科学发展中自然的选择,这也是学术发展的趋势。

2019年1月8日2018年度国家科技奖揭晓,中科院院士、清华大学副校长薛其坤教授领导的清华大学、中科院物理研究所实验团队完成的“量子反常霍尔效应的实验发现”项目,获得自然科学奖项中**唯一的一等奖**。薛其坤1994年才在物理所获得博士学位,并于1999年从日本留学归国后入选中科院“百人计划”加盟物理所,直到2005年调入清华大学。基于团队在拓扑物态领域积累的经验,薛其坤教授踏上寻找“量子反常霍尔效应”的征途---这其中中科院物理所崔琦实验室,完成了对这一实验现象的极低温电输运测量,获得了量子反常霍尔效应的关键实验证据。该实验室于2006年成立,掌握着国际领先的极低温输运测量技术。其创始人崔琦就曾因发现分数量子霍尔效应,获得过1998年的诺贝尔物理学奖。以崔琦先生名字命名的实验室,能够参与到量子反常霍尔效应的实验发现这一工作中来,得益于不同单位科学家之间的通力合作。

在理论上,实现“量子反常霍尔效应”所需材料的条件非常苛刻。近几年“火”起来的拓扑绝缘体,给薛其坤团队提供了思路。2009年,科学家从理论上预言了碲化铋( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )能够实现“量子反常霍尔效应”。随后中科院物理所研究人员从理论上提出 Cr 或 Fe 磁性离子掺杂的碲化铋等拓扑绝缘体薄膜,是实现量子反常霍尔效应的最佳体系,预言在磁性掺杂的拓扑绝缘体材料中可真正观察到“量子反常霍尔效应”。基于上述预言,薛其坤团队与清华大学、中科院物理所、斯坦福大学的研究者合作,对量子反常霍尔效应的实验开始了“大浪淘沙”的攻关。在物理所学习和工作期间,薛其坤主要开展了分子束外延生长及高质量薄膜制备的实验,调入清华大学工作后仍与物理所研究团队保持着密切合作。

研究团队共生长测量了超过1000个样品,可谓“千里挑一”。随后,他们一步一步实现了对拓扑绝缘体的电子结构、长程铁磁序以及能带拓扑结构的精密调控,与当时在物理所工作的何珂、马旭村充分酝酿,利用分子束外延方法生长出了高质量的 Cr 掺杂碲化铋拓扑绝缘体磁性薄膜,并在极低温输运测量装置上成功地观测到了“量子反常霍尔效应”。目前团队已将量子反常霍尔效应的观测温度从30mk提升到1K,实现了30倍的增长。量子反常霍尔效应可以用于发展新一代低能耗晶体管和电子学器件,克服芯片发热和能量损耗问题,加速信息技术革命进程,但距离产业化应用还有很长的一

段路要走。

### E、量子材料研究实现声二阶拓扑绝缘体

在空气声系统中首次观测到不同空间维度的拓扑相变，并利用多维度的拓扑相和拓扑相变实现了二阶拓扑绝缘体，揭示了高阶拓扑相形成的新机制。2019年3月27日科学网报道，南京大学教授卢明辉、陈延峰团队与苏州大学教授蒋建华团队合作，在声子晶体中发现二阶拓扑相和多维拓扑相变---为了验证声二阶拓扑绝缘体，他们利用3D打印技术制备了一系列样品，并在实验上进行了测量表征，不仅发现了一维的边界态，在边界态的带隙中也观测到零维的角态，这正是二阶拓扑绝缘体的特征。

一维边界态可随着系统几何参数的变化发生拓扑相变，类似于二维的体随几何参数的变化发生的拓扑相变。利用这一现象，研究实现了在空间不同维度上对声波的拓扑调控，即可以通过改变系统几何参数控制二维体态、一维边界态以及零维角态的产生和消失。此研究以空间多维度的拓扑相为基础，实现了声二阶拓扑绝缘体，所揭示的多维度拓扑性质，为深入研究高阶拓扑相提供了新的理论和实验。同时，该研究所提出的物理机制，可推广到其他经典体系中，为高阶拓扑相研究提供了新的平台。

### F、二维拓扑相变材料基于拓扑原理的全新知识

长久以来研究人员坚信热力学扰动，会毁坏二维平面内物质的所有有序性---即便是在绝对零度条件下，也是如此---拓扑相变并非常规的相变，就像水冰和液态水那样的相变。在拓扑相变中发挥关键作用的因素，是平面材料中的微小漩涡。在低温下它们会形成紧密的“对”。随着温度上升，相变发生了：这两个成对的小漩涡突然之间相互远离并各自在材料中独自运动---状态转变发生在物质状态相互转变时，如冰融化变成水。但据北京大学博导周程教授介绍，在1970年代早期戴维·索利斯和迈克尔·科斯特利茨，在英国伯明翰相遇并决定一同对这一主流观点提出挑战。

他们选定了二维平面内相变作为研究课题---索利斯这样做的原因，主要是因为好奇；而科斯特利茨则完全是因为无知。他们的这次合作带来了对于物质相变的全新理解，并被认为是20世纪凝聚态物理学领域最重要的成就之一。现在他们的理论被称为“科斯特利茨-索利斯相变”(KT相变)或BKT相变---此处多出来的这个“B”，代表瓦迪姆·贝里辛斯基，这是一位已故的俄罗斯物理学家，他曾经提出过相似的理论观点。KT相变背后的理论，也有最初的提出者以及后来者们进一步发展并在试验中得到了确认。

实验的发展最终带来了一系列全新的物质状

态需要得到解释---神秘的量子跃迁。在1980年代戴维和邓肯提出了一项突破性的理论，对先前有关材料导电性原理的理论提出了挑战---先前的相关理论，最早是从1930年代开始发展的，经过几十年的发展，当时的主流观点认为相关理论已经非常完善。因此当在1983年戴维·索利斯证明先前的理论体系是不完善的，并且在低温条件下以及在强磁场环境下，需要引入一种全新的，基于拓扑原理的理论时，很多人都感到非常意外和惊讶。在大约同一时期邓肯·霍尔丹在对磁性原子链进行分析时，同样得到了一个非常相似出人意料的结果。他们的工作在随后新物质相的理论发展中，起到了指导作用。

利用拓扑，科斯特利茨和索利斯阐述了一种非常冷的物质的拓扑状态变化。在寒冷条件下，涡对就会在特定温度下形成和突然分开。这是20世纪凝聚态物理学领域最重要的发现之一---这一理论的美妙之处，就在于它能够被应用于低维度下各种不同的材料，即KT相变理论是普适的。现在它已经成为一种重要的工具，不仅被应用于凝聚态物质，同时也在其他物理学领域发挥作用，如原子物理以及统计力学等领域。

### 3) 复合材料和混合材料研究的重要作用

在过去十年中，金属、块体金属玻璃、高性能合金、陶瓷和玻璃等领域取得了令人振奋的进展。由于复合材料和混合材料能够承受恶劣环境，如体相材料、复合材料和涂层材料，以及它们在设备中的功能性，因此它们已经得到了高价值的应用。材料科学一些重要研究进展，是纯发现驱动科学的产物，如拓扑绝缘体；而另一些则是通过协调一致的技术努力而产生的，如大猩猩玻璃是由前身是美国康宁公司在1960年代生产的，具防弹功能的特种玻璃，常被用于直升机，在正常情况下，非故意损坏不会造成划痕，是一种环保型铝硅钢化玻璃，现在主要应用于防刮划性能要求高的高端智能手机屏幕；还有一些则是这两者的某种结合，如增材制造和超分子材料 vitrimers。美国政府推出的材料基因组计划和国家纳米技术计划，在促进美国材料研究方面，就发挥过重要作用。

例如，涂层技术的进步提高了可靠性，并将其用于热保护和环境保护系统---在越来越多的应用中，分层材料系统正在取代先进的单片材料，在这些应用中，每一层的独特性能和功能显著提高了性能和寿命。在聚合物、各种生物材料以及软物质(如胶体和液晶)方面都取得了巨大的进展。又如超导材料一直是一个富矿，而量子材料领域则更为普遍，正在迅速发展，包括量子自旋液体、强相关薄膜和异质结构、新型磁体、石墨烯和其他超薄材料，以及拓扑材料等。

另外像石墨烯激发人们对新物理现象的研究，



在太阳能电池、晶体管、相机传感器、数字屏幕和半导体等许多电子应用领域具有潜在的应用价值---而另一个活跃的领域是增材制造的发展,虽然这一领域只有几十年的历史,但目前已成为一个重要工艺,既可用于大规模生产,也可用于一次性按需制造。其他重要进展包括经济实惠的发光二极管(LED)照明、平板显示器和改进的电池等。

### A、红外隐身复合新材料应用广阔

自然界中的一切物体,都会辐射红外线。物体辐射红外线能力的大小,和其表面温度直接相关。因此无论白天黑夜,红外探测仪都可以测量到目标与背景间的辐射差,得到不同物体的红外图像。现有的红外隐身技术原理通常是改变目标热辐射特性,但这些隐身材料大多有耗能持续、应用范围窄、反应慢等不足。但据2019年4月8日新华网报道,发现新型红外隐身材料的中科院苏州纳米所张学同研究员领导的科研团队,发现的这种红外隐身材料新材料,可以在不需要额外能源的情况下,躲过红外探测仪的“法眼”,应用前景广阔。

此研究首先制造了一种坚固、轻便、可折叠的柔软纳米纤维气凝胶薄膜,这种薄膜具有优异的隔热性能---将这种薄膜用相变材料聚乙二醇(PEG)浸泡,并进行防水处理就得到一种轻薄、坚固、柔韧,但红外隐身性能优异的复合新材料,发明出一种可以适应不断变化的温度,且不需要额外耗能的红外隐身材料。由于纳米纤维气凝胶薄膜本身是一种良好的绝热材料,而聚乙二醇受热时会储存热量并软化,凝固时又释放热量后重新硬化,在模拟太阳光照下,覆盖目标物的复合薄膜可以从太阳吸收热量,达到抑制升温目的,就像周围环境一样,使得目标物体对红外探测仪“隐形”。

当夜晚来临,薄膜又能缓慢地释放热量,以匹配周围环境。此外,选用合适厚度的气凝胶薄膜覆盖在发热目标与相变复合薄膜之间,也能做到让发热物体“隐身”。新材料不仅可以用于红外隐身,还可以用作电子隔热材料、电池隔膜材料等应用。

### B、攻克铌酸锂纳米光学材料研究

信息时代网络中每一个比特的电子数据,都要经过铌酸锂调制器转换为光子信息,进而通过光纤传向世界。因此,铌酸锂被誉为光电子时代的“光学硅”。然而,如何实现铌酸锂器件的微纳化、集成化,是各国科学家竞相研究的世界难题。据2019年4月10日科学网报道,南开大学弱光非线性光子学教育部重点实验室教授许京军团队和副教授任梦昕团队,五年攻关成功实现了铌酸锂纳米结构的加工。

铌酸锂因其电光特性而闻名,已成为最广泛使用的光学材料之一。早在30年前人们就试图制造高质量、小型化的铌酸锂器件,希望以此制造出高集

成度的光电芯片,以实现超高速、大容量的光电信息转换、传输与处理---实现这一目标的关键,在于铌酸锂纳米结构的加工,即可在纳米尺度内按照需求任意地调控光的特性与行为。但长久以来,由于铌酸锂硬度高、化学性质不活泼等问题,导致传统机械刻划或化学腐蚀方法均无法实现铌酸锂纳米结构的加工。

这一棘手问题极大地阻碍了微小化、集成化铌酸锂光电芯片及其器件的研发。许京军和任梦昕团队研发的这种特殊的铌酸锂制备与处理工艺,是利用一束聚焦的高能镱离子束,实现了选择性地轰击与去除铌酸锂分子,在仅百纳米厚度的铌酸锂薄膜表面,加工出了有序周期排列的纳米线阵列,首次获得了一种名为“铌酸锂超构表面”的新型人工材料。此新型材料实现了对入射光颜色的选择性透过,并获得了与蝴蝶翅膀类似的结构性颜色效果,找到了一种可有效调控并赋予铌酸锂全新光学性质的手段。这标志着已经具备了基于铌酸锂实现纳米尺度下,对光行为进行精细操控的能力,为铌酸锂这一独特的光电材料,在微纳光子学、集成光子学等领域的应用开启了大门。

### C、智能手机薄膜的材料研究

根据摩尔定律,过去50年间晶体管一直在小型化。摩尔定律观察到,一块芯片上的晶体管数量约每18个月增加一倍,成本则减半。但如今已经面临不能再进一步扩大晶体管的局面---智能手机包含数十亿个被称为晶体管的微小开关,这些开关让人们可以处理除打电话以外的无数任务,比如发送短信、在社区导航和自拍。它们包括一个导电通道,其电导率可通过一个栅终端改变。而栅终端通过一个只有5~6个原子厚的介电薄膜,从通道中被分离出来。

2019年4月29日《中国科学报》报道,美国加州大学伯克利分校的科学家提出的晶体管发展新思路---负电容场效应晶体管(NC-FETs)的新的器件概念,它不仅解决了为半导体行业寻找新的电子开关这一迫切问题,还是一个针对被共同称为“朗道开关”的广义类相变装置的概念性框架。NC-FETs只需添加一层薄薄的铁电材料,便可以大大提高传统晶体管的效率。如果投入使用,同样的芯片可以计算更多,并且需要更少的频繁充电。

### D、原子同为固体和液体的新物质形态材料研究

迄今为止,人们普遍认为,物理材料中的原子只能以固态、液态或气态这3种状态中的一种存在。对原子施加压力,会导致两个相互链接的固体晶格结构的形成,其中一个晶格中原子之间的化学相互作用很强,这意味着,当结构被加热时它们保持固态;而其他原子则熔化成液态。据2019年4月9日《科技日报》报道,原子可同时为固态和液

态----一种新的物质形态----链融态，其中原子可同时以固态和液态存在。这是英国爱丁堡大学和中国西安交通大学科学家团队进行的研究，他们发现在极端条件下，某些元素可“一人分饰两角”，同时展现出固态和液态的特性。这是他们对钾这种简单的金属施加高温高压，会创造出链融态----其中钾元素的大部分原子，形成固体晶格结构；但该结构同时还包含另一组以流体排列的钾原子。

在研究中该团队使用功能强大的计算机，模拟了 20000 个钾原子在极端条件下的表现，结果表明，形成的新结构代表了新的、稳定的物质态。在合适的条件下，包括钠和铷在内的 6 种以上的元素，能以新发现的这种状态存在。例如，钾是众所周知的最简单的金属之一。他们证明这个不寻常但稳定的状态，是部分固体和部分液体，在其他材料中重构这一状态或有多种应用。不过新发现的结构究竟仅代表一种独特的物质状态，还是两种状态之间的过渡状态仍需进一步确定。

#### 4) 从银河系方面认识重元素材料起源的研究

恒星很大程度上保留了它诞生时所处环境的化学成分，通过分析恒星的化学成分可以追溯它们的起源。类似银河系这样的大型星系，被认为是通过并合矮星系形成的，但天文学家对银河系中有多少恒星来自于矮星系以及这些恒星具有什么样的特征仍知之甚少。2019 年 4 月 30 日人民网报道，中科院国家天文台赵刚研究员领导的中日合作研究团队，证实银河系内一颗重元素（包括银、铕、金、铀等）含量超高的恒星，起源自被银河系瓦解的矮星系，首次揭示了这类稀有恒星的吸积起源，深化了对重元素产生机制的认识，为基于恒星化学成分识别来自附近矮星系的恒星提供了重要线索。

他们依托我国重大科技基础设施 LAMOST 望远镜提供的海量光谱数据，在银河系晕内发现了目前已知铁含量最高的快中子俘获过程元素超丰恒星----快中子俘获过程是重元素产生的重要机制之一，例如铕(Eu)、金(Au)和铀(U)等重元素都属于快中子俘获过程元素。这颗恒星的铕相对于铁的丰度是太阳的 10 倍有余，大大超出同类恒星的平均值，目前在银晕中仅发现了 30 多颗该类型的恒星。更为新奇的是，这颗恒星的镁元素以及其它  $\alpha$  元素（包括硅、钙和钛等元素）的含量异常低，仅为同类恒星的五分之一，而具有类似化学成分的恒星在银河系近邻矮星系中却是普遍存在。这是国际上首次在银河系中发现低镁的快中子俘获过程元素超丰恒星。

通过与日本国立天文台的天文学家进行后续 8 米光学望远镜高分辨率光谱联合观测，研究团队确定了这颗恒星中 24 种元素的含量，并与矮星系恒星和银晕场星进行了细致比较。对比发现这颗恒星的

化学成分与矮星系恒星高度吻合，明显不同于银河系的晕族恒星，表明这颗恒星来自于被银河系瓦解的矮星系，是银河系并合事件的确切和可靠的化学证据。进一步的分析显示这颗恒星是在其原属的矮星系，经历了极为罕见的中子星并合事件之后形成的。

中子星并合产生大量的快中子俘获过程元素，显著提高了矮星系内快中子俘获过程元素的含量。这颗恒星的发现首次揭示了银河系内快中子俘获过程元素超丰恒星的吸积起源，为银河系并合矮星系提供了清晰的证据，显示银晕中的快中子俘获过程元素超丰恒星极可能全部来自于瓦解的矮星系，同时为中子星并合是快中子俘获过程发生的主要天体物理场所提供了证据支持。它的化学丰度特征将有助于识别吸积自附近矮星系的恒星，为研究银河系的并合历史提供理想的示踪体，加深人类对星系形成和演化的认识。

#### 5) 前沿科学量子通信材料资源的开发

##### A、潘建伟院士团队量子物理实验室的目标

2016 年 8 月 16 日我国墨子号量子科学实验卫星发射成功，在国际上率先实现了千公里级星地双向量子纠缠分发、星地高速量子密钥分发、地星量子隐形传态等三大科学目标，在量子通信领域跻身国际领先地位。量子物理实验室，需要激光器、电子学、材料学、探测技术等方面的材料和人才。中国科技大学教授潘建伟院士为组建实验室，国内国外两头跑，将一批有志于从事量子物理研究的年轻学生送出国门，他们有一条不成文的约定：学成后必须回国。2019 年 3 月 22 日中国科大新闻网报道，潘建伟获美国光学学会 2019 年度伍德奖----由于“在量子力学基础和光量子信息，包括量子力学非确定性检验、量子密钥分发、量子隐形传态以及光量子计算领域的先驱性实验研究贡献而获此荣誉”。这是自伍德奖设立 40 余年来，中国科学家在本土的研究工作首次获得该奖。

2019 年 1 月 21 日“观察者”网报道，中国科大教授潘建伟、赵博等利用超冷原子分子量子模拟在化学物理研究中取得突破----在量子模拟研究方向上，人们首先研究的是理论上可以处理的问题，通过理论和实验比较来演示量子模拟的可靠性和潜在的优越。2016 年潘建伟、陈帅等在超冷原子量子模拟中，实现了二维自旋轨道耦合的玻色-爱因斯坦凝聚，发展了超冷原子人造规范场模拟凝聚态拓扑问题的新途径；2017 年潘建伟、陆朝阳等针对玻色取样任务的光量子计算原型机，超越了早期的电子管和晶体管计算机，但仍需要技术上的进一步发展才可能超越目前的经典超级计算机。

量子模拟最有前途的现实应用，是真正解决那些经典数值计算方法无法有效求解的重要多体问

题。例如在化学物理领域通过量子力学计算原子分子相互作用势能面，以及模拟粒子在这一势能面下分子碰撞的动力学，就是这样一类重要科学问题。理论上计算原子分子的势能面，需要求解多电子体系的薛定谔方程来得到电子系统的基态能量。由于电子之间存在强关联，其基态能量无法精确求解。因此理论量子化学发展各种方法来近似求解势能面，并在小质量少电子的分子体系取得了成功。但是对大质量多电子的分子体系，理论计算的势能面已经无法可靠地模拟分子碰撞中的动力学行为。通过构建针对特定问题的专用量子模拟系统，势能面的信息可以由实验测量原子分子的散射共振来获得。散射共振的测量结合理论建模可以准确地反推出势能面的全局信息，从而给出势能面最精准的刻画。

分子的散射共振是典型的量子现象，只有在超低温下才会显现出来。近年来，随着超冷原子分子技术的发展，完全可控的超冷基态分子可以从接近绝对零度的原子气中被制备出来。自 2008 年美国科学院院士黛博拉·金和叶军的联合实验小组，制备了铷钾超冷分子以来，多种碱金属原子的双原子分子先后在其他实验室中被制备出来。但由于这种大质量多电子分子体系的散射共振无法在理论上进行预测，十多年来观测超冷分子的散射共振一直是该研究领域在实验上的重大挑战。在该项研究中中国科大教授潘建伟、赵博等成功观测到了超低温下钠钾基态分子和钾原子间的散射共振。

在实验中他们从温度为几百纳开的超冷钠和钾原子混合气出发，制备出处于不同超精细态的钠钾振转基态分子，并将之与处于不同内态的钾原子相混合。在此基础上通过精密的调节磁场来精确地调控原子分子散射态和三体束缚态的能量差，成功地在分子损失谱上观测到了超低温下钠钾基态分子和钾原子间的一系列散射共振峰。这是一个令人振奋的工作——当前超冷化学研究的主要困难，在于势能面的短程部分的信息无法从以往的实验中获取，这一工作改变了超冷极性和超冷物理化学的游戏规则，是当前原子分子物理研究的亮点。

### B、郭光灿院士团队量子密钥研究获重要突破

随着量子密钥分发系统速率不断提高，单光子探测器的后脉冲效应将显著增强。后脉冲是指探测器中的雪崩光电二极管在发生雪崩之后，一段时间内随机产生二次雪崩的现象，其非完美性会带来安全性漏洞，是实际系统安全性测评的重要内容。过去忽略后脉冲效应的模型需要修正。2019 年 1 月 4 日《人民日报》报道，中国科技大学教授郭光灿院士团队，在量子密钥分发实际安全性研究中获得重要突破——利用探测器雪崩时的漏洞，量子黑客可有效控制该探测器的响应，并获取全部密钥信息而不

被感知。鉴于此，他们基于自身多年来对探测器的深入研究，针对量子密钥分发系统中单光子探测器实际特性提出了新的模型。该模型将高阶后脉冲考虑在内，给出了新的计数率和误码率的计算方法，显著提升了高速实用化系统的核心性能指标。

雪崩光电二极管探测器的非完美性会带来安全性漏洞，是实际系统安全性测评的重要内容。科研人员发现了门控模式单光子探测器的一种潜在漏洞，提出并实现了雪崩过渡区攻击方法。在门控信号从开启到关闭的过渡阶段，探测输出具有很强的非线性特性。通过控制攻击信号的光强和在过渡区的位置，量子黑客攻击方法，其实为实际系统的安全性测评和标准化，提供了技术储备。

2019 年 3 月 6 日科学网还报道，郭光灿院士团队在高维量子密码领域的研究中也取得新进展——该团队韩正甫研究组，利用量子态的不同自由度之间的映射方法，设计并实验验证了一种保真度和稳定性极佳的高维量子密钥分发方案。高维量子密钥分发利用高维量子态编码，可以在单个量子态上加载多于 1 比特的经典信息，从而有效提高安全密钥生成率；同时，高维量子密钥分发可容忍更高的系统误码率，因此具有更强的抗噪能力。该团队量子密码组陈巍、银振强等学者，还基于光子的偏振—轨道角动量不可分离态，提出了偏振和轨道角动量双自由度之间的态映射方法和实现方案，进而实现了对高维量子态的高精度制备和测量。该方案在操控光子偏振态的同时，可以通过映射装置同时高精度的操控光子的轨道角动量子态，从而实现高保真度的信息加载和提取。

该研究为解决高维量子密钥分发的态制备和态测量两大难题，开拓了一条有效的解决思路，为高维量子密钥分发技术的实用化起到了积极的推动作用。与现有技术相比，该方案的最大优势在于编解码过程不需要进行光子态的干涉操控，因而具有很低的本底误码率和极佳的稳定性。该方法实现的高维量子密钥分发系统的平均误码率，仅为  $0.60\% \pm 0.06\%$ ；利用弱相干光源实现了 1.849 比特/脉冲（理论极限为 2 比特/脉冲）的高阶后安全密钥率。并且由于系统只需操控光子的偏振态，有望实现与二维量子密钥分发系统相同的高工作速率。

### C、奠定量子纠缠通信基础的材料研究

自旋是微观粒子的基本属性，电子的自旋态有两个。对于人工合成的超导量子比特来说，两个自旋态对应于能量值 0 和 1。这两个值在量子计算中也被看作是比特的二进制数。手征性是指物体和它的镜像不能重叠。这就好比我们左右手，互为镜面对称，但上下叠放时却不重合。微观物体也有这种特性。联系自旋之间的相互作用，分对称相互作用和反对称相互作用两种。此前，对称自旋交换相互

作用已经在人工量子系统里实现，反对称自旋交换作用在人工系统中还很难合成。2019年1月23日新华网报道，浙江大学和中国科技大学的学者，联合中美多个研究团队，在人工量子系统中合成了反对称自旋交换作用，演示了利用“手征自旋态”制备量子纠缠的新方法。

在这项研究中浙江大学教授王大伟、王浩华等学者，在超导量子比特系统中，同时利用量子叠加和自旋的手征性演化方法，合成了反对称自旋交换作用，当多个粒子的集体状态处于不可分解的叠加态时，量子纠缠就出现了。量子纠缠态的特征，是相互纠缠的粒子之间“牵一发而动全身”，当其中一个的状态被测量确定时，其他粒子的状态也就确定了。该成果将对研究量子磁性、提高多粒子纠缠态制备速度、利用手征自旋态进行量子计算等，具有积极意义。

## 6) 从电子到光子说人工智能芯片材料

### A、光子人工智能芯片的发展应用

对于光子人工智能芯片的发展，国内电子芯片设计领域能力很强，但在核心加工环节有一个很强的技术壁垒，需依赖国外的高制程光刻机，在成本等多个方面都会受限。

光子人工智能芯片的生产过程自主可控，全流程可在国内完成，采用国内130nm微电子工艺加工完成，摆脱了对于国外高制程光刻机的依赖，无需在工艺制程上进行追赶——芯片的设计、加工、封装、测试全部在国内完成，摆脱了对国外高制程光刻机的依赖，是我国在芯片领域换道超车的核心技术。未来芯片主要还是针对人工智能领域的应用与发展。2019年1月7日《新京报》报道，光子人工智能芯片项目落户顺义，由清华、北大、北交大等等多所高校的在校博士生组成的创业团队，研发的光子人工智能芯片，将这项新技术推向了台前，并且未来可广泛应用于手机、自动驾驶、智能机器人、无人机等领域。该团队负责人、光子芯片的研发者之一——白冰，目前正在北京交通大学通信与信息系统专业攻读博士学位。

白冰博士说：光子芯片的计算速度为电子芯片的1000倍，但功耗仅为其百分之一；算力是传统电子人工智能芯片的1000倍，但功耗只有其百分之一，低延迟，还抗电磁干扰——计算能力是传统芯片的三个数量级，功耗却只有传统芯片的百分之一。芯片的设计、加工、封装、测试全部在国内完成，摆脱了对国外高制程光刻机的依赖，是我国在芯片领域换道超车的核心技术。目前光子人工智能芯片的产品部署主要集中于设备端，预计于2022年将光子芯片运用到云端。

### B、啥是光子人工智能芯片

集成电路的发展沿着摩尔定律已趋于极限，硅

光子技术是超越摩尔研究领域的发展方向之一。通过硅光集成，用光代替原来的电进行传输，成本有可能降低到原来的十分之一，甚至更低。所以光子人工智能芯片，是指采用硅基光子集成技术，让光提供算力，为人工智能应用提供高性能的硬件支持。

即第一个层面是电子“人工智能芯片”——如果一个芯片要跑得非常快、非常省电，一定是芯片的物理结构跟软件高度匹配，这样才能达到一个比较高的效率。包括现在的人脸识别、自动驾驶、安防监控、AI金融、AI医疗等，实际上都是一种人工智能算法，要设计一款芯片结构跟其特征匹配，这就是人工智能芯片。

第二个层面是“光子人工智能芯片”——已有的人工智能芯片都是电子芯片；电子芯片在计算速度和功耗方面会有瓶颈。光子人工智能芯片是依托硅基光子集成技术，在内部用光完成矩阵运算与数据交换。它的计算过程与人工智能算法高度匹配，计算速度比普通电子芯片高，功耗比电子芯片低。

第三个层面是“光子”与传统芯片比，有两方面优势：一个优势是计算速度，光子人工智能芯片的计算速度大概是电子芯片的三个数量级，约1000倍，单个电子芯片的计算速度大约是7.8TFlops，而光子人工智能芯片的计算速度大概是3200TFlops。第二个优势是功耗，光子人工智能芯片的功耗仅为电子芯片的百分之一，单位电子芯片和耗电量大概300W，对应的光子人工智能芯片的耗电量只有4W。

第四个层面是对比不同芯片在同一情境下，是否具有优势，要考虑性能功耗比、单位美元提供算力两方面——性能功耗比是指消耗单位瓦特提供的性能，重在强调涉及多少电费，单位美元提供算力则重在强调芯片的生产成本。在这两方面，光子人工智能芯片比电子芯片更有优势——光子人工智能芯片，可广泛用于手机、安防监控、自动驾驶、服务机器人、无人机、工业物联网、企业服务器和数据中心等关键人工智能领域。比如在分拣机器人机械臂上装上摄像头，让它识别有什么东西，控制它去抓取等。光子人工智能芯片的发展，得益于人工智能的发展。光学计算芯片其实在实验室一直存在，但它一直没有比较好的应用场景，没有办法落地应用。

这个过程是近年来伴随着人工智能的兴起，人工智能的算法特征恰好跟光学芯片物理性能匹配，这使得光学计算有了走出实验室、走向产业应用的机会。特别是中科院“百人计划”，很多回国的专家，也都一直致力于硅光工艺平台的建设。

## 四、前沿材料人物造就以新型照明光源为例

### 1) 前沿照明光源应用材料的科学研究

#### A、从新冠病毒到中村修二式传奇

联系虚拟世界改进现实世界的物质材料以适

应社会发展的需要，有人推进前沿科研的同时，自然界也在对人类自身这种材料在进行改进，并且不仅是一次、两次---最能说明的就是 2020 年暴发新冠病毒肺炎疫情，已成为世界性突发公共卫生事件引发全球，生命健康安全和经济社会秩序的重大危机。而最令人不解的是，新冠病毒肆虐引发全球瘟疫，人类社会几乎所有国家都面临着巨大的考验、我国的抗击胜利之时，狡猾、凶险的“新冠”病毒，又冒出“无症状感染”出现有很多矛盾的信息---关于无症状比例、传染性强弱、转归比例等令人迷惑的在科学上的真相，最终应该只有一个明确答案。

但如果无症状感染者，转归确诊率很低，大多数至始至终没有症状，而又具备相当强的传染性，无疑就等于潜藏在人群中的隐性炸弹。因为 2020 年 4 月 9 日《晚霞报》发表《“伤寒玛丽”的故事》一文报道，“伤寒玛丽”是美国历史上著名健康带菌者的“零号名人”，本名叫玛丽·梅伦(1869--1938)，1869 年出生在爱尔兰，1883 年跟着家人移居美国。最初只能在有钱人的家里当女佣，后来她改行当了一名厨师。但每到一个地方就会爆发伤寒，她为了不受感染只得不停地更换工作。1906 年银行家华伦的别墅中，家庭成员、女佣、厨师、园丁等共有 11 人，其中有 6 人得了伤寒。华伦通过律师找到处理伤寒疫情方面很有经验的专家乔治·索伯，寻找感染伤寒的原因。乔治·索伯通过排查，将目标锁定在厨师玛丽·梅伦的身上---原因是玛丽工作过的地方，都曾暴发过伤寒病例，累计感染者总数超过了 22 例，死亡 1 例；而每次伤寒爆发之后，玛丽都会重新换工作。

1907 年乔治找到更换了工作的玛丽，然而却与玛丽发生了冲突---玛丽以移民身份在美国备受歧视，而自己健康的身体又被认为是伤寒病毒的源头。而当年“健康带菌者”是个闻所未闻的概念，她拒绝做血液、尿液或粪便化验。乔治最后只得在警察的帮助下，才控制住玛丽的愤怒。医院通过对玛丽血液、粪便的化验，证实乔治的推测，玛丽被送到纽约州附近的一个孤岛上进行隔离。到 1910 年玛丽被隔离了三年没有任何伤寒症状，她向卫生部门提起诉讼，在一次次抗议之后，她和卫生部门达成和解---承诺不再做厨师而被解除隔离。

五年后的 1915 年纽约曼哈顿妇产医院又暴发伤寒，重症感染者 25 人，2 人死亡。在这家医院的厨房里人们再次找到玛丽，只是她已名叫“玛丽·布朗”。自觉理亏的玛丽又返回之前的孤岛进行隔离。在孤岛上，医生和专家尝试者着在她身上使用了多种药物，都没有办法清除她身上的伤寒病毒，直到 1938 年她去世，从此记入医学史册。当然玛丽不是唯一的伤寒健康带原者；她也并不是最致命的带原者；她亦不是唯一一位被告告知了自己的传染情况后，依

然违反了不得从事餐饮业并采取卫生措施规定的人。她的被歧视、女佣地位，悍妇性格，她也始终不肯相信自己可以传播伤寒。但历史上恶毒的“伤寒”，也唯有她被终身隔离---这说明啥？类似消灭天花全球要接种疫苗吗？

2020 年 4 月 20 日世界卫生组织总干事谭德塞在日内瓦的新闻发布会上警告：缺乏团结正在助长新冠疫情的流行---新冠病毒是一种非常危险的病毒，它利用了人与人之间、政党与政党之间、国家与国家之间的分歧。他呼吁：“不要把这种病毒作为相互对抗或者赢得政治得分的机会。这很危险，就像在玩火。尽管新冠病毒溯源工作仍在进行中，科学家和医学界均尚无定论，世卫组织也多次表示，新冠病毒是全球现象，源头尚不确定。研究提供的证据证明，目前发生在新冠病毒基因组中的突变，具有影响病毒致病性的功能潜力”。

研究人员也在提醒：除了不断积累的基因组测序数据外，还应尽可能在细胞水平上进行病毒监测。最后，与流感类似，药物和疫苗的开发虽然紧迫，但也需要考虑到这些累积突变，尤其是始祖突变的影响，以避免潜在的缺陷。诚然，天花是人们用疫苗消除的第一种传染病---它是由天花病毒感染人，引起的一种烈性传染病，传染性强，死亡率极高。在人类消灭天花的过程当中，人们经过多年的探索和研究最终发明了牛痘疫苗。但距离牛痘疫苗发明近 200 年后，到 1980 年世界卫生组织才宣布全球彻底根除天花的目标才真正实现。

这是人类迄今唯一通过疫苗接种，消灭由于技术，如缺乏冷链造成运输和保存的困难，和文化的屏障，如牛痘在印度难以被接受的问题、资金在贫穷国家尤其突出，以及防疫体系，如后勤和合格的接种人员缺乏等原因，在得益于冻干疫苗和三叉针等疫苗接种技术的改进，各国政府、国际组织和非政府组织通力合作才取得的结果。

1976 年全球开始推行牛痘疫苗接种，实现了对所有易感人群的保护，天花病毒的感染才被大大遏制，死亡率也有了明显的降低，进而成功阻断了天花的传播。但如果新冠疫苗成功问世，人们是否能像消灭天花一样，消灭新冠病毒呢？问题很多。一是尽管疫苗的开发取得了巨大的进步，全球主要的疾病杀手，比如疟疾、艾滋病，依然没有任何一种达到商业生产阶段的有效疫苗。二是如艾滋病病毒突变之快，更是让科学家伤透了脑筋---而新冠无症状感染者还分两类。

一类是新冠肺炎确诊病人，只是还在潜伏期，没有症状，需要把他们甄别出来纳入确诊病例管理；另一类是没有任何症状，没有任何影像改变，是真正的无症状感染者。他们不是病人，只是核酸检测阳性。无症状感染者的存在，是传染病的规律，麻

疹、流感、SARS 等都有一定比例的无症状感染者，他们都没引起在社会上的大传播。

三是关注新冠肺炎相关研究进展，包括病毒学、免疫学、病理学以及含抗体和疫苗在内的药物研发，世界卫生组织网站信息显示截至 3 月 26 日，全球还有至少 52 款候选疫苗处于临床前研究。处于研发前沿的候选新冠病毒疫苗，可以概括为两大类。第一类是此前无同类疫苗获批过的新型疫苗，主要是指核酸疫苗，分为 RNA（核糖核酸）疫苗和 DNA（脱氧核糖核酸）疫苗，这类疫苗是将编码抗原蛋白的 RNA 或 DNA 片段直接导入人体细胞内。第二类是此前已得到广泛应用的传统类型疫苗，包括灭活病毒疫苗、基因工程亚单位疫苗、重组病毒载体疫苗等，多数在研新冠病毒疫苗都属于此类。

比如中国团队研发的“重组新冠疫苗”，就属于重组病毒载体疫苗，采用 5 型腺病毒作载体，向人体内输送表达新冠病毒刺突蛋白的基因。有效的药物和疫苗开发摆在全世界面前，新药或是疫苗到底有无作用，如何评价？科学评价药物药效的试验方法制定最为关键，但对双盲实验作用，各国却也还有分歧。因此围绕人类健康与生物医药、信息技术、资源环境、公共安全与社会事业发展等领域，重点从病毒结构、功能、溯源、演化、传播与流行规律，病毒与宿主互作及免疫系统多层次多尺度调控机制，中医药防治病毒感染内在机制，诊疗与防护的多学科交叉的新技术、新策略，公共卫生应急管理，人工智能与大数据等方向（不限于上述方向），都需要研究创新的思路。

疫苗接种，被认为是医学科学最伟大的成就之一，也是回报率最高的公共卫生投入之一；这代表了医学界普遍的共识。但追溯疫苗发明的历史，会发现其中有科学的理性，有科学家的睿智、直觉和奉献，有国际组织、私人基金会、国家政府、制药公司的协作和斡旋，但也裹挟着政治、商业、国家安全、文化和宗教等各种力量的角逐，甚至还同时交织着一部若隐若现的反疫苗史。从传染病传播的三个要素的角度来分析，新冠病毒导致的疫情，回答仅靠疫苗还不够，还需要提高自身免疫力。新冠病毒最初来源于蝙蝠体内，经过某种尚且未知的中间宿主传染给人类。随着在人群中的传播，感染了病毒的患者成了新的传染源，也需要及时接受隔离治疗，避免传染给更多的人。

从控制传染源这个角度来说，疫苗的作用是不大的。如无法给野生动物注射疫苗，也没法限制野生动物的活动区域。最好的方法是从我们自己做起，减少被病毒感染的机会。总之实现起来虽比困难，一方面相比于天花病毒基因组稳定的 DNA 病毒而言，新冠病毒由于是 RNA 病毒，更容易发生基因突变，这很有可能会让病毒本身的性质发生改变，

也造成疫苗效果大打折扣。总之疫苗的研发，需要时间以及科学家们的努力，不同种类的疫苗也因其原理、效果、安全性、制备工艺等方面的不同而各有利弊。

2020 年 4 月 19 日中国工程院院士李兰娟团队发布未经同行审议的新论文指出，新冠病毒已经出现了较多变异，而且相当一部分与适应性有关的突变，就富集在病毒 S 蛋白和人类 ACE2 受体结合处的界面。新冠病毒感染后的症状表现非常复杂，还与病人的年龄、身体状况等因素有关。为了客观评估这些突变对病毒致病性的影响，研究人员决定开展体外感染试验；药物和疫苗研发工作也有必要把这些突变纳入考虑。所以这里举发现新型照明光源材料的“中村修二的传奇”，来共勉全球人类抗击新冠疫情在技术材料创新上能取得突破。

获诺奖前的中村修二教授，是在日本的日亚这个乡镇企业就业的，而且是在日本三流大学德岛大学读硕士毕业的。中村修二 1954 年生于日本伊方町，是个非典型的日本科学家：他出身普通渔民家庭，考试能力也平平。他读的德岛大学甚至没有物理系，但他自学能力非常强，对物理学具有深刻的理解，而且完全是靠自学而来的。他 1993 年在日本日亚化学工业株式会社就职期间，动手能力也非常强，上午调仪器，下午做实验。中村修二教授的创新，使得半导体生态光源（LED）生产商能够生产三原色（红、绿和蓝）LED，从而使实现 1600 万色成为可能。或许最为重要的是 LED 行业，利用这种新技术来开始白色 LED 的商业化生产。他基于 GaN 开发了高亮度蓝色 LED，从而广为人知。当时开发一种蓝色 LED 被认为是不可能的，此前的 20 年间，只有红色和绿色 LED。2014 年中村修二因发明高效蓝色发光二极管，和赤崎勇、天野浩获得 2014 年诺贝尔物理学奖。

## B、从我国光刻机看中村氮化镓基功率器件材料

在我国高端芯片生产过程中，最为关键的设备高端芯片用的光刻机，长期靠国外进口。但这种新型的化学气相沉积设备却是由中村修二在乡镇企业率先研制成功的——中村修二发明的高效率蓝色 LED 双气流 MOCVD 装置研制出的高效率蓝色发光二极管，也许和“量子通信和量子计算机”的二维拓扑绝缘体高端芯片研制风马牛不相及——但“高效率蓝色发光”是一种频率；“量子通信和量子计算机”联系的信息也是一种频率（表征一个东西变化的快慢）。

2020 年 1 月 3 日人民网报道，上海微电子装备有限公司（SMEE）通过 17 年的“卧薪尝胆”，持续攻关，基本掌握了高端光刻机的集成技术，并部分掌握了核心部件的制造技术，实现了“用中国人的光刻机造中国芯”的梦想。2020 年 3 月 17 日网易网报

道，中国合肥莱德设备技术有限公司研发出真空蒸镀机。对于芯片从研发到量产的过程而言，光刻机犹如心脏一般稳稳站在产业链顶端，而光刻机制造行业则由ASML垄断全球。对于面板制造工艺而言，真空蒸镀机的地位，丝毫不亚于光刻机在芯片领域的地位，而真空蒸镀机行业则被日本公司佳能特机几乎垄断全球。真空蒸镀机的体积相对较大，生产线长度可达百米，因此真空蒸镀机与光刻机一样，对于全球市场而言十分稀缺，售价更是昂贵，一台高端蒸镀机的价格在7亿元左右，相当于一台EUV光刻机。

可能在核心技术方面，中国制造业的发展相对缓慢，例如上海微电子、合肥莱德设备等企业，都尚处在研发的初级阶段。不过中国企业以及中国技术，正在用坚定地步伐踏足全球各类产业链的顶端。无论是芯片还是面板的研发、量产阶段，国产芯和中国技术都有越来越多的中国企业加入其中。而文小刚教授的“量子拓扑绝缘体”课讲：根据量子力学，频率就对应能量，再根据相对论，能量就对应质量，质量就表征物质。据此文小刚教授认为：量子力学更深刻的含义，是统一信息与物质。他做研究的时候，这两者的边界已经十分模糊了，甚至不加以区分。

蓝色照明的发光二极管(LED)的心脏是一块半导体晶片。LED主要优点是寿命长，可达10万小时，而白炽灯的寿命通常只有1千小时，荧光灯的寿命也只有1万小时左右。所以LED很早就被用来制作对可靠性要求很高的交通信号灯和汽车尾灯。而且LED属于冷光源，没有红外和紫外耗损，在同样亮度下，其耗电量大约仅为普通白炽灯的十分之一，荧光灯的二分之一。因此，LED很早就被用于白色照明、景观装饰和液晶显示等。目前，照明消耗了全球发电量的近四分之一，超过了水力和核能发电量的总和。若今后全球逐步改用LED照明，必将会产生巨大的节能减碳之环保效益。

在研制LED过程中，科研首先攻克的是波长比较长的红外和红色LED，其次是波长稍短的黄色LED和绿色LED，之后才是波长更短、研制难度更大的蓝色LED。有了红、绿、蓝三种基本色光之后，人们便可以复合出光谱中的任何一种色光。换言之，没有蓝色LED，全彩LED显示便不可能实现。而且，没有蓝色LED，也就不可能有白光LED照明。因此2014年度的诺贝尔物理学奖授予了为攻克蓝色LED作出开创性贡献的三名科学家：赤崎勇、天野浩和中村修二。

赤崎勇和天野浩是师生关系，他们在日本的名古屋大学---名古屋大学研制出蓝色LED也许并不令人感到特别意外。但攻克高效率蓝色LED技术难题的中村修二所在的日亚化学公司，当时只是

一家位于偏僻的四国岛上、员工不超过200人的小型家族企业。由于不少员工农忙时还要请假回家干农活，所以说其是乡镇企业，似乎一点都不过分。蓝色LED的应用前景极其广阔，其市场规模也非常庞大。中村修二怎么会是一家小型家族企业一举攻克呢？基于中村修二本人的自述、日亚公司技术负责人写的著作以及诺贝尔奖委员会公布的资料，中村修二在日亚公司“发明高效率蓝色LED，带来节能明亮的白色光源”的具体过程，或许会发现攻克关键核心技术、开展颠覆性技术创新虽然没那么简单，但是也没有一般人想象的那么难。

关键是确定蓝色发光二极管氮化镓基功率器件要得法。中村修二1954年生于日本四国岛上的爱媛县，其父是日本四国电力公司一名主要负责变电站维护保养的普通员工。中村修二在家排行老三，上面有一个姐姐和哥哥，下面还有一个弟弟。中村修二读小学二年级时跟随全家由爱媛县西南部的西宇和郡搬迁至爱媛县西部的大洲市，并在那里读完了市立小学和初中，以及县立高中。1973年中村修二考入四国岛上的一所普通国立大学---德岛大学的工学院电子工程学系。1977年本科毕业后，中村决定留在多田修教授的实验室从事半导性钛酸钡的物性研究。入学不久他就与在德岛大学附属幼儿园工作的一名女同学结了婚。第二年妻子为他生了一个可爱的女儿，在这种情况下，中村修二不得不考虑留在德岛发展。最终其导师多田教授，把他推荐给了自己的同乡好友---日亚化学工业公司总裁小川信雄。

日亚当时是一家总部坐落在德岛县阿南市的小型家族企业，创立于1956年，主要生产显像管和日光灯用荧光材料，1979年的年销售额只有30亿日元，员工数还不到200人，且大多是当地的农家子弟。1979年中村修二正式加盟日亚公司，成了该公司第一个学电子工程出身的员工，并被安排到了主要从事新产品开发的开发科。虽说是开发科，实际上除科长外，只有两名全职研究开发人员。当时主要生产化工材料的日亚正在思考如何拓展经营范围。产品销售部门提供的信息表明，发光半导体材料市场前景很大，日亚可以从制备红色发光二极管用磷化镓(GaP)多晶体入手，逐步扩展产品线。这样，如何制备磷化镓多晶体便成了开发科的主要研究课题。

进日亚时，中村并没有想到自己可以从事与材料物性有关的研究，因此当接到磷化镓多晶体研制任务时，感到非常兴奋。但他启动研究后发现，在日亚这样的小型化学公司研制磷化镓多晶体需要解决的难题实在太多。首先，磷和镓只有在真空和高温条件下才会发生反应；其次研究经费有限，制备磷化镓多晶体所需的装置必须自制。实际上，即使

研究经费充足，为防止技术参数等研发信息外泄，公司也不主张外购。结果，中村只能发挥学生时代习得的本领，自制两温区电热炉等实验设备。由于反应室必须使用价格昂贵的耐高温石英管制作，为节约经费，中村只好将用过的石英管再加以回收利用，以致用氢氧燃烧器一段一段焊接起来的石英管常常因抗不住磷气化后所产生的高压而发生爆炸。经过不断的探索，中村在进入日亚后的第三年，终于掌握了制备磷化镓多晶体的技术诀窍。

1982年中村又根据销售部门的建议，开始研制另一种含镓的化合物半导体材料——砷化镓(GaAs)结晶。尽管制备砷化镓多晶体和制备磷化镓多晶体使用的都是水平布里奇曼法，但砷和镓的反应温度要比磷和镓的高200度，也就是说高温区的温度必须达到1200摄氏度。这样，不仅需要到先前制作的实验装置进行改进，而且还要更加注意防范石英管发生爆裂。在不断试错之后，中村总算掌握了砷和镓两种原料的配比以及各自的最佳温控值，并解决了石英管爆裂等问题。之后，中村使用自制装置制备砷化镓单晶体也取得了成功。

1985年日亚意识到，砷化铝镓单晶体薄膜，即砷化镓和砷化铝混晶薄膜，更有市场前景，于是决定研制砷化铝镓单晶体薄膜。研制混晶薄膜意味着公司现有的装置已无用武之地。当时，制备混晶薄膜多采用液相外延生长法。问题是这种装置虽然可以订购，但交货周期长达一年，而且价格昂贵，于是日亚决定组织力量，自行研制。在中村等人的努力下，液相外延生长装置只花了半年时间便大功告成。

使用液相外延生长装置制备砷化铝镓单晶体薄膜时，需要做大量实验才能逐步摸清溶液组成、加热温度、与基板接触时间的最佳值。而且，薄膜制成之后，还需要对其进行霍尔效应检测。薄膜检测设备当然也得自行研制。经过不断试错，中村于1988年成功地解决了制备高质量砷化铝镓单晶体薄膜以及使用其制作红外或红色发光二极管等技术难题。

## 2) 今日科学日益技术化与技术日益科学化

### A、前沿照明光源应用材料的科学研究

今日自行改造或设计制作实验装置，确保其先进性和唯一性，在一些情况下已成为开拓研究领域、催生源头创新、推动前沿突破、攻克核心技术的前提条件之一。使用别人已经使用过的实验装置开展研究，无异于跟在先行者后面去海边拾贝壳，虽然偶尔也能够获得一些意外的发现，拾得几个漂亮的贝壳，但其概率要远小于先行者。因此，对于从事实验研究和技术开发的科研人员来讲，没有什么事情比率先获得最先进的测控仪器和实验设备更令人高兴的了。

但是，最先进的测控仪器和实验设备靠金钱是很难买得到的，即使买得到，也需要花费很多时间。所以，能否自行设计制作研究开发所需的测控仪器和实验设备，对那些希望开展原始性创新、攻克关键核心技术的中国科研人员来讲，尤为重要。而科研人员要自行设计制作实验装置，首先得到第一线从事实验研究，知道哪些测控仪器和实验设备需要改进以及应朝什么方向改进。如何只是忙着坐在办公室写项目申请书和论文，或者到处应酬，很少进实验室和助手们一起动手做研究，那是很难了解真实的实验需求的。

其次不能过于依赖测控仪器和实验设备的外购，更不能将其维修保养都一律外包。如果不肯动手搭建实验装置，甚至连维修、调试仪器设备都觉得麻烦，那是培养不出动手改进实验装置的能力的，久而久之便会完全失去自行研制实验装置的能力。总之欲攻克重要产业领域中那些卡脖子的关键核心技术，首先得解决精密测控仪器和先进实验设备的自行设计制作问题。当很多精密测控仪器和先进实验设备都能自行设计制作之时，攻克重要产业领域中的关键核心技术就不会像今天这么困难。所以高等院校乃至中小学，都有必要像日本那样高度重视动手能力、工匠精神和创新意识的培养。

例如，尽管中村修二进入日亚的最初九年，先后开发出了三种含镓化合物，但它们对日亚销售额的贡献并不大。对于公司研发人员来讲产品开发出来后，若销路不好很难获得公司的好评。问题是，在小公司开发新产品，即使起步比较早，也难保不被大公司迎头赶上乃至全面超越。因此，小公司开发绝对不能跟风、模仿，必须另辟蹊径、独树一帜。这意味着小公司的研发人员不能只做销售部门的应声虫，不能跟在其它企业后面亦步亦趋，而应根据技术发展的大势明确地做出自己的判断。基于上述认识，中村认为日亚有必要启动蓝色发光二极管研究。因为蓝色发光二极管的应用前景广阔、市场规模庞大。还有就是，在研制磷化镓多晶体、砷化镓单晶体、砷化铝镓红色发光二极管过程中，日亚在开发含镓化合物半导体二极管方面已形成了一定的技术积累。1988年中村将自己的想法直接向小川信雄总裁汇报后，意外的是小川总裁当即表示同意，并答应为此项目提供3亿日元研发经费。在年销售额不到200亿日元，这称得上是一笔巨额投入。

### B、中村修二决定用氮化镓试制蓝色发光二极管

1988年前后，有望被用来制作蓝色发光二极管的化合物半导体材料主要有三种：碳化硅、硒化锌和氮化镓。由于碳化硅属于间接迁移型半导体，不适合制作高亮度蓝色发光二极管，故中村修二一开始就将其排除掉了。问题是，不论是硒化锌，还是氮化镓，都无法使用现有的液相外延生长装置制备



其单晶体薄膜。这意味着，如果使用可反应形成硒化锌或氮化镓的气体来外延生长其单晶体薄膜，必须订购或研制气相外延生长装置。当时，气相外延生长主要有两种方式，一是分子束气相外延生长（MBE）法；二是金属有机化合物气相外延生长（MOVPE）法。MBE 法外延生长效率太低，而且装置价格昂贵，用来在研究室里做些实验还可以，用于工业化生产显然不合适。这样，可供中村选择的方法实际上只有一种，即 MOVPE 法。这种方法对中村来讲，无疑是一个需要从头开始学习的全新领域。

恰巧德岛大学的酒井士郎副教授此前访问日亚时提过，气相外延生长法比液相外延生长法更适合制作化合物半导体薄膜。那时，酒井士郎将接受邀请赴美国佛罗里达州立大学工学院开展 MOVPE 法研究。如果日亚觉得有必要，可以派遣一人同他一道去佛罗里达州立大学。日亚公司认为这是一个非常难得的学习机会，于是开始考察适合派遣到美国的人选。最终，中村得以脱颖而出，以日亚派遣的方式于 1988 年 4 月赴佛罗里达州立大学工学院学习一年。与此同时，日亚在酒井的指导下向美国有关厂家发出了购置 MOVPE 装置及其相关设备的订单，并开始在新落成的研发大楼里筹建 MOVPE 实验室。

中村修二以研制砷化镓红外 LED 为名赴美国学习 MOVPE 法时，因没有获得过博士学位也没有发表过学术论文，遇到了很多困难。对年龄快满 35 岁的他来讲，没有受到应有的尊重倒是次要的，最令他烦恼的是，实验室的 MOVPE 装置已各有其主，唯一一台没有被占用的还被拆解得面目全非。在这种情况下，中村只好以这些零部件为基础，自行搭建 MOVPE 装置。结果，来美国后的最初九个月，中村大多数时候都在从事焊接、配管之类作业。

在搭建 MOVPE 装置过程中，中村看到了自己的比较优势，增强了开展实验研究的自信。因为和他同在一个实验室的众多拥有博士学位的韩国和中国留学生，不仅连电热炉之类简单的实验设备都不会制作，甚至在实验设备出现故障时都不知道如何检查、修理。这些留学生做实验时遇到很小的挫折就说行不通，进而放弃当初的研究计划。在中村看来，和这些动手能力不强的留学生相比，自己理应有更大的作为。但是当他搭建好 MOVPE 装置，在美国的时间只剩下三个月了。因此，他如饥似渴地使用磷化镓和砷化镓做了十余次气相外延生长薄膜实验。尽管没有来得及做更多的实验，但在搭建 MOVPE 装置过程中积累起来的经验对其后来改造外购的 MOVPE 装置、研制氮化镓薄膜产生了非常重要的影响。

在美国访问研究期间，中村就开始思考究竟是

优先选择硒化锌，还是氮化镓来制作蓝色发光二极管？他在参加学术会议时发现，大多数学者认为使用硒化锌制作蓝色发光二极管更有前途，而仍在执着地使用氮化镓来研制蓝色发光二极管的学者已为数极少。其中一个非常重要的原因是，找不到一个适合用来外延生长氮化镓单晶体薄膜的基板，或叫做衬底。用气相外延生长法沉积制作单晶体薄膜时，基板的原子间隔，即晶格大小最好能与半导体结晶材料的晶格大小一致，晶格大小相差越大，沉积出来的半导体结晶薄膜中的晶格缺陷越多，就像在高尔夫球或网球上堆乒乓球比在乒乓球上堆乒乓球更难堆齐一样。由于氮化镓的反应温度超过 1000 摄氏度，而且反应气体之一氨具有很强的腐蚀性，因此，当时只能选用碳化硅或氧化铝（蓝宝石）基板。可是，碳化硅、蓝宝石与氮化镓的晶格常数相差 5% 乃至 15%，以致人们长期无法解决氮化镓结晶薄膜晶格缺陷过多难题。

而当时使用砷化镓基板制作硒化锌结晶薄膜，晶格缺陷要少很多。但是中村在回国之前，决定采用氮化镓制作蓝色发光二极管。因为过去的经验告诉他，如果跟在别人后面亦步亦趋，即使掌握了使用硒化锌制作蓝色发光二极管技术，也很难绕开众多学者先前发明的专利，更何况美国和日本的一些大公司已经涉足这个领域，以日亚的实力根本拼不过他们。而氮化镓蓝色发光二极管则不然，众多欧美公司已从这一领域撤退，当时仍在从事这项技术开发的基本上只剩下名古屋大学的赤崎勇教授。对当年在产品营销上被大公司击败的教训记忆犹新的中村，坚持走自己的路，最终选择了当时不被人看好的氮化镓来研制蓝色发光二极管。

### C、高质量氮化镓单晶体薄膜的研制

1989 年 3 月中村修二从佛罗里达州立大学回国后不久，日亚在美国订购的 MOVPE 装置就到货了。在公司安排的数名研究助手的协作下，中村开始安装、调试这套高 2 米、长 4 米、宽 1 米的大型装置。为订购这套装置，日亚花掉了近 2 亿日元。这在日亚的历史上是前所未有的。此举对中村的研究构成的压力可想而知。尽管该月小川信雄已退居二线，公司总裁已由其女婿小川英治接任，但因研制蓝色发光二极管是他们当年在担任正、副总裁时共同做出的决定，故中村在研究经费一事上并没有受到任何肘肘。

安装、调试完毕之后，中村便开始使用这套装置试制氮化镓单晶体薄膜。在装置允许的限度范围内试制三个多月后，中村仍没有取得任何进展。其实，这并不奇怪。如果使用现成的装置就能制成氮化镓单晶体薄膜，那么氮化镓蓝色发光二极管的研制也就不会成为世界性的难题了，更何况这套装置当初还是按照研制砷化镓红外 LED 的要求定制的。

这意味着必须对订购的 MOVPE 装置进行改造。提出技术要求后, 如果由专业公司来改造, 一个来回至少要花三个月的时间。这显然是中村不能接受的。由于此前已练就一手焊接石英管、改造配管的绝活, 而且还亲手搭建过 MOVPE 装置, 故中村决定自己动手改造 MOVPE 装置。在中村之前研制氮化镓单晶体薄膜的团队, 都使用高频电磁场给反应室中的基座加热。由于这种情况下金属线圈绕在反应室周围不接触里面的反应气体, 所以不存在反应气体引起的线圈腐蚀问题。但这样会导致另外一个问题, 即反应室及其内部的配管、喷嘴等不能使用容易在磁场中发热的金属材料制作。

由于配管和喷嘴只能使用石英之类材料制作, 故要根据成膜条件改变配管方式和喷嘴结构非常困难, 以致试制氮化镓单晶体薄膜受到很多限制, 而且这类装置也很难满足工业化生产的苛刻需求。中村经过一番思考后, 决定采用电阻丝加热器加热。使用气相外延生长法制作氮化镓单晶体薄膜时, 反应气体通常选用的是三甲基镓 (TMGa) 和氨, 运载气体选用的是氮气或 (和) 氢气。由于氨具有强腐蚀性, 致使安装在基板下的电阻丝加热器在高温条件下很容易受到腐蚀而断路。解决电阻丝加热器在高温、强腐蚀工况下的断路难题看似很小, 实际上耗费了中村很多时间。中村最终很好地解决了加热器的断路难题。日亚没有为这项技术申请专利, 而是将其作为技术诀窍严加保密。

#### D、放弃电磁线圈加热法采用双气流抑制对流

除加热器外, 中村还根据制备氮化镓单晶体薄膜的需要对反应室中的配管和喷嘴等进行了一系列改造。1990 年元旦前后, 中村几乎每天上午都在干些打开真空容器、取出零部件、弯曲金属管道、重新配置线路、焊接石英管、改变喷嘴形状、调整喷嘴高度和角度之类的技术活, 下午则使用刚进行过改造的装置试制氮化镓单晶体薄膜, 晚上回家后则在思考明天上午如何进一步改造装置以制备出氮化镓单晶体薄膜。经历过无数次失败之后, 中村终于在 1990 年 2 月产生了灵感。以单气流的方式, 亦即将反应气体和运载气体同时由水平方向喷向基板上, 气体会在高温基板上形成对流, 因而无法在基板上沉积出高质量的薄膜。所以, 必须改变气流的喷入方式, 否则很难克服对流的干扰。

1990 年 8 月中村尝试着进行了四种喷气方案的实验。之后中村意识到, 如果让反应气体和运载气体由水平方向喷向基板, 同时让另一股惰性气体自上而下喷向基板, 则有可能起到有效抑制对流的效果。按照这一思路, 中村又对实验装置进行了一系列改造, 终于于 1990 年 9 月在蓝宝石基板上试制出了氮化镓单晶体薄膜。中村后来将上述这种制膜方式命名为 Two-Flow MOCVD 法, 并于 1990 年 10

月申请了发明专利。由于这项专利的编号为 2628404, 故人们将其简称为 404 专利。不过, 研究表明, 中村产生的这种双气流相沉积制膜想法受到了东北大学御子柴宣夫教授的影响。

正是因为参加了 1990 年 3 月底召开的日本应用物理学会时听到了御子教授的有关报告, 中村才获得了改造 MOVPE 装置的灵感。而且, 当时在使用气相外延生长法制作化合物半导体薄膜时, 已经有人采用双气流方式。因此, 双气流方式本身并没有特别的新颖之处。但是, 中村使用 TF-MOCVD 法首次制成氮化镓单晶体薄膜则是无可争议的历史事实。中村虽然使用 TF-MOCVD 法试制出了氮化镓单晶体薄膜, 但它的质量并不高。糟糕的是进入 10 月后, 连这种质量不高的薄膜都再现不了。之后中村一边改进装置, 一边根据自己的经验和直觉调整反应温度和反应时间, 终于在 1990 年底掌握了氮化镓单晶体薄膜的再现条件。不过制备出来的薄膜的表面凹凸不平。

#### E、缓冲层薄膜到氮气退火开发氮化镓 P 型结晶

鉴于名古屋大学的赤崎勇团队 1985 年使用氮化铝制作低温缓冲层, 成功地在蓝宝石基板上制作出了平面如镜的氮化镓单晶体薄膜, 中村决定也使用低温缓冲层来解决这一问题。但他没有选用氮化铝, 而是选用了与制作薄膜相同的材料——氮化镓来制作低温缓冲层。一个月后, 中村使用自制的双气流 MOCVD 装置采用同质材料制作低温缓冲层取得成功, 并在此基础上于 1991 年 1 月底制备出了质量远高于竞争对手的氮化镓单晶体薄膜。中村当然也为这项两步成膜法技术申请了发明专利。

研制出高质量的氮化镓单晶体薄膜之后, 还得解决给氮化镓单晶体薄膜掺杂以使其变成 P 型半导体的难题。因为制作高亮度蓝色发光二极管需要一个由 P 型半导体薄膜和 N 型半导体薄膜结合而成的 P-N 结来实现电光转换。氮化镓的 N 型结晶并不难制备。因为使用低温缓冲层技术制成的氮化镓单晶体薄膜中不可避免地会含有少量带有电子的杂质, 因而呈 N 型结晶性质。但是, 氮化镓的 P 型结晶必须另行制备。制备氮化镓 P 型结晶难度极大, 以致很长一段时期里, 氮化镓不适合制作 P 型结晶在学术界成了定论。

率先攻克这一难题的是名古屋大学的赤崎勇团队。当时赤崎的博士生天野浩在实验过程中意外地发现, 使用扫描电镜观测氮化镓掺锌结晶时, 该结晶的电阻会明显减小, 发光量会显著增大。受到启发后, 赤崎勇团队使用低能电子束对氮化镓掺镁结晶进行辐射, 于 1989 年成功地制备出了氮化镓掺镁 P 型结晶。使用低能电子束辐射方式制备氮化镓掺镁 P 型结晶效率太低, 难以满足工业化生产的需求。因此, 赤崎勇团队的天野浩曾尝试着使用加热

处理的方式来制备氮化镓掺镁 P 型结晶,但没有成功,以致和赤崎团队联合研制高亮度蓝色发光二极管的丰田合成化学公司 1991 年推出蓝色发光二极管时采用的仍是 MIS(金属-绝缘层-半导体)结构,而不是 P-N 结型结构。

因此中村在制定 1991 年的研究计划写到:“今年的目标:(1)P 型氮化镓膜的生成;(2)P-N 结型蓝色发光二极管的制作”。日亚的氮化镓掺镁 P 型结晶的研制,是从再现赤崎勇团队的实验开始的。这项工作主要由中村的研究助手、1989 年入职的妹尾雅之来实施。可是妹尾使用扫描电子显微镜照射中村使用双气流 MOCVD 法和两步成膜法制成的氮化镓掺镁结晶后,未能再现天野浩当年的实验结果。于是妹尾于 1991 年 2 月中旬试着改用实验室里的电子束蒸镀电极装置来辐射氮化镓掺镁结晶,没料到竟然于次月获得了氮化镓掺镁 P 型结晶。由于蒸镀电极装置中的氮化镓掺镁结晶试样是在受辐射升温情况下转变为 P 型结晶的,故妹尾等人推断受热有可能是导致试样转化为 P 型结晶的关键。但是,使用这种电极蒸镀装置很难控制电子束的辐射量,故实验结果很不稳定。

于是中村于当年 4 月专门预订了一台电子束辐射装置;在这台装置尚未到货期间,中村的另一名助手岩佐成人 1991 年 9 月在解决氮化镓掺镁结晶与蓝宝石基板因热膨胀系数不同容易发生弯曲变形问题时发现,无需进行电子束辐射,只要将氮化镓掺镁结晶加热到 600 摄氏度左右后进行退火处理,就可以获得 P 型结晶。继妹尾雅之和岩佐成人的实验研究之后,中村围绕氮化镓掺镁 P 型结晶的形成机理问题做了一系列验证实验,并得出结论:氮化镓掺镁结晶在无氢情况下,譬如用氮气进行退火处理后就可以将其转化为 P 型结晶。1991 年底,中村和岩佐成人、妹尾雅之联名为了这项氮化镓 P 型结晶的制备技术申请了专利。用氮气退火的方式制备氮化镓 P 型结晶不仅经济、方便,而且薄膜的均匀性更好,光辐射效率更高。这项技术的发明,为日亚后来工业化生产高效率氮化镓基蓝色发光二极管奠定了重要的基础。

#### F、双异质结蓝色发光二极管正式投产

在妹尾雅之试制出氮化镓 P 型结晶后,中村就开始着手试制 P-N 结型蓝色发光二极管。由于使用双气流 MOCVD 装置制作氮化镓 N 型结晶比较容易,故中村 1991 年 3 月就研制出了 P-N 结型氮化镓蓝色发光二极管。不过这种二极管通电后发出来的是青紫色的光,而且不是很亮。即便如此,它的性能仍大幅超过了碳化硅蓝色发光二极管。虽说中村当时制作的 P-N 结型氮化镓蓝色发光二极管已达到了世界最高水准,但他研制氮化镓蓝色发光二极管的目的毕竟不是为了写论文,而是要制成产品,

抢占市场,因此单项关键核心技术的突破虽然重要,但更重要的还是把有竞争力的产品尽快推出来。

正当中村为氮化镓蓝色发光二极管的实用化苦苦努力之时,传来了美国 3M 公司使用硒化锌晶体实现了蓝绿色激光器振荡发光的消息。由于并不知道 3M 公司研制的激光器振荡发光时间还不到 1 秒,离实用化要求还差得很远,所以中村倍感失落。倘若 3M 公司实现了蓝绿色激光器长时间的振荡发光,那就意味着对手跑到自己前面去了,而且把自己远远地甩在了后头。这对中村乃至日亚的刺激都非常大。当时,日亚在蓝色发光二极管这个项目上已投入数以亿计的资金,总裁都已经有点沉不住气了,故不断催促中村尽快把氮化镓蓝色发光二极管推向市场。是现在就把手上的这个技术并不成熟的 P-N 型氮化镓蓝色发光二极管推出去?还是继续改进,等颜色和亮度指标达到要求后再推出去?若匆忙把不成熟的产品推出去,大公司很有可能通过逆向工程迅速赶上甚至超越日亚。

权衡利弊得失之后,中村决定顶着压力继续研发,因为他觉得自己有把握在短期内使产品开发跃上一个新的台阶。当时,摆在中村面前的课题主要有两个:一是调整 P-N 结型氮化镓二极管的发光波长,使其发出蓝光,而不是青紫色的光;二是提高氮化镓二极管的发光效率,使其亮度更高、节能效果更好。这样一来,氮化镓(InGaN)结晶和双异质结的制备便成了中村团队 1992 年的研究重点。氮化镓是在氮化镓中添加同族元素镓制成的一种化合物。通常,氮化镓结晶通电后发紫外光,氮化镓结晶通电后发红光。

因此从理论上讲,人们可以通过往氮化镓中添加不同量的镓来制备蓝色发光晶体。往氮化镓中添加的镓越多,其结晶发出的光越接近红色;添加的镓越少,其结晶发出的光就越接近紫外。关键是加镓量的控制和掺杂结晶薄膜的生长。这样一来,中村此前研制的双气流 MOCVD 装置又有了新的用武之地。1992 年 3 月至 4 月间,日亚又投入巨资增设了两台双气流 MOCVD 装置,并进一步扩充了蓝色发光二极管的研制队伍。与双气流 MOCVD 装置格斗好几个月后,中村团队使用气相沉积法终于试制出了氮化镓结晶薄膜。掌握了氮化镓结晶薄膜的制备技术之后,中村便率领年轻的助手们向双异质结发起冲击。

1992 年 9 月,中村等人使用双气流 MOCVD 装置以及刚刚掌握的氮化镓结晶薄膜制备技术终于试制出了氮化镓/氮化镓双异质结发光二极管。尽管这是一个里程碑式的试制品,但其亮度仍然有限,而且发出的是青紫色光,尚需进一步完善。为获得更为明亮的蓝光,中村团队紧接着又围绕给氮化镓结晶掺杂问题展开了一系列的实验,并于

1992年底试制出了人眼可见亮度提高了4倍、波长扩大到450纳米的双异质结发光二极管。1993年2月,助手长滨慎一又根据中村的建议将锌和硅掺进氮化镓,获得了比只掺锌要亮数十倍的氮化镓掺杂结晶。使用这种结晶制作的双异质结发光二极管亮度有了显著的提升。

### G、中村等人开发的蓝色LED基本结构

在双异质结蓝色发光二极管的亮度突飞猛进的时候,日亚就开始紧锣密鼓地准备组织生产了。1992年11月日亚将从松下电工公司退休的小林义知博士聘为半导体研究部门的顾问。1993年2月日亚又将日本最大的发光二极管生产商史丹利电工公司的小山稔副所长请过来担任总工程师,负责组织实施蓝色发光二极管的工业化生产。根据小林的指示,中村等人使用日亚特有的双气流MOCVD装置只花了一个月不到的时间,也即在1993年3月底就将二极管的发光波长扩大到属于蓝光范围的460纳米,亮度进一步提高到2月初的20倍。

于是日亚决定自4月1日起成立“N项目组”,负责蓝色发光二极管的工业化生产。“N项目组”最初只有17人,但到7月份,人员便增加到40人,其中有好几个人是从日本大公司招聘过来的设计制造经验丰富的技术骨干。在“N项目组”启动后的半年里,通过进一步调整结晶薄膜的外延生长条件,逐步提高了结晶质量,中村团队研制的双异质结蓝色发光二极管在1993年10月亮度达到了1尼特。这个数值是美国科锐公司当时生产销售的碳化硅蓝色发光二极管的100倍。1993年11月30日日亚召开产品发布会,正式宣布高效率蓝色发光二极管开始投产,并从即日起对外销售。紧接着,中村修二等人又于1994年4月开发出了高亮度的青绿色LED,并于1995年9月开发出了亮度为黄绿色60倍的纯绿色LED;一年后,即1996年9月又将白色LED推向市场,从而拉开了白色LED照明的序幕。

### H、白色LED照明灯具到蓝色激光灯具回顾

中村团队还于1995年12月使用数十层的InGaN薄膜制成了青紫色的激光二极管(LD),并于1997年10月实现了在室温下连续发振1万小时。1999年12日日亚公司开始对外出售紫色激光二极管样品,从而为蓝色激光灯具和蓝色光盘(BD)的问世奠定了技术基础,并大量使用蓝色激光灯具的鸟巢夜景。研制蓝色LED取得成功的考察中,可以看出中村修二进入日亚公司的最初九年,应销售部门的提议先后开发出了三个产品:磷化镓、砷化镓和砷化铝镓。无论是试制磷化镓和砷化镓所需的水平布里奇曼法装置,还是试制砷化铝镓所需的液相外延生长法装置,都是由中村、或者是由中村带领人研制出来的。

在试制磷化镓和砷化镓过程中,为了节约研究经费,中村经常使用焊接设备将已经使用过的石英管拼接起来继续使用,从而练就了一手高质量地焊接石英管的绝技。这对其后来改造气相外延生长装置,研制氮化镓半导体薄膜帮助甚大。1988年中村修二赴佛罗里达州立大学学习金属化合物气相外延生长法时,由于学历和地位不高,不得不使用闲置的零部件自行搭建金属化合物气相外延生长装置。这样一来,在美国的最初九个月几乎和他在日亚的最初九年一样,大多数时候都在从事焊接、配管等作业。如果没有经历这段时间的磨炼,很难想象,他返回日亚公司后敢对花巨款从美国进口的金属化合物气相外延生长装置进行随心所欲的改造。

在佛罗里达进修期间,中村修二就已决定迎难而上,使用氮化镓来试制蓝色发光二极管。由于没有现成的生长氮化镓之类半导体薄膜用的金属化合物气相外延生长装置,所以日亚公司只能从美国订购了一套主要用于生长砷化镓半导体薄膜的金属化合物气相外延生长装置。使用这套进口装置试制氮化镓半导体薄膜不可避免地会遇到很多困难。首先遇到的难题是,使用线圈在反应室外加热时,反应室内的配管和喷嘴只能用石英之类非金属制作,因此不便调整。采用电阻丝加热器在反应室内加热时,电阻丝很容易受到氨的腐蚀,从而发生断路。这个难题后来被“工匠出身”的中村非常巧妙地解决了。

这项改进意义重大,因为此后反应室内的配管和喷嘴便可以使用金属材料来加工制作,因而配管的走向和喷嘴的形状可以根据需要随时加以改变。其次遇到的难题是,以单气流的方式将氮化镓反应气体和运载气体一并喷向基板上方时,气体会在高温基板上方形成对流,因而难以在基板上沉积出高质量的半导体薄膜。中村受日本学界的研究启发,觉得让反应气体和运载气体由水平方向喷向基板,同时让另一股惰性气体自上而下喷向基板,有可能会起到有效抑制对流的效果。按照这一思路,中村又对实验装置进行了一系列改造,并于1990年在蓝宝石基板上试制出了氮化镓单晶体薄膜。

正是因为不断试错的基础上于1990年研制出了上述这种加热器放置在反应室内的双气流式金属化合物气相沉积制膜装置,中村才能在比较短的时间内试制出一批制备高效率蓝色发光二极管所需的半导体材料或器件。譬如,使用上述这种特殊装置,中村用氮化镓作低温缓冲层于1991年初试制出了质量远高于竞争对手的氮化镓单晶体薄膜。而这种两步成膜的思路是由赤崎勇率先提出的,不仅如此,赤崎勇还曾让研究生使用氮化镓作低温缓冲层试制过氮化镓单晶体薄膜,只是因为不合适的外延生长装置,未能取得成功。

上述这种双气流 MOCVD 装置,也为中村修二开展氮化镓掺杂研究带来了很大便利。实际上中村早在 1991 年 3 月就已试制出了 P-N 结型氮化镓发光二极管,只是这种二极管通电后发出来的光是青紫色的,而且不是很亮。为此,中村团队尝试着在氮化镓中添加少许铟,以改变发光波长。使用上述双气流 MOCVD 装置,中村团队很快就掌握了能发蓝光的氮化镓结晶薄膜的制备诀窍。此后,中村团队又开始向双异质结发起冲击,因为采用双异质结,可以提高电子在发光层中的复合概率,从而提高发光效率。使用上述双气流式特殊装置和刚刚掌握的氮化镓结晶薄膜制备技术,中村团队又成功地试制出了氮化镓/氮化铟镓双异质结发光二极管。

之后又通过给氮化铟镓掺少许锌和硅,获得了发光亮度更高的氮化铟镓掺杂结晶。1993 年 3 月中村团队又进一步将双异质结发光二极管的发光波长调整到蓝光范围,并大幅提高了其亮度,为当年正式投产氮化镓基双异质结型高效率蓝色发光二极管奠定了基础。如果没有双气流式金属化合物气相沉积制膜装置,很难想象中村修二团队在 1993 年就能掌握批量生产高效率蓝色发光二极管的关键核心技术。正是因为中村能够设计制作出全球唯一的先进

实验装置,他的团队才能率先开发出全球第一个高效率蓝色发光二极管。

#### 参考文献

1. 弗兰克·维尔切克,我们生活在虚拟世界中吗,环球科学,2020年2月号;
2. 王德奎,三旋理论初探,四川科学技术出版社,2002年5月;
3. 孔少峰、王德奎,求衡论----庞加莱猜想应用,四川科学技术出版社,2007年9月;
4. 王德奎,解读《时间简史》,天津古籍出版社,2003年9月;
5. 陈超,量子引力研究简史,环球科学,2012年第7期;
6. [英]罗杰·彭罗斯,皇帝新脑,湖南科技出版社,许明贤等译,1995年10月;
7. 文小刚,量子多体理论----从声子起源到光子和电子起源,高等教育出版社,2004年12月;
8. 吴非,谢诺夫斯基:人工智能的下一阶段,环球科学,2020年3月号;
9. 王德奎、林艺彬、孙双喜,中医药多体自然叩问,独家出版社,2020年1月。

5/16/2020