**李涛：超构材料的前世今生**

李涛老师从超构材料的起源开始讲起。超构材料的出现，源于人们对天然材料的功能特性的无法进一步调控的不满足；同时，在信息、能源和生物医学领域，材料是基础。

对于天然材料，有的有用，有的没用；对于人工材料：人们可以根据自己的意愿去生长、加工、制造各种功能材料。人们普遍关注的不是材料本身，而是材料的物理性质，如它的力热光电磁。以固体材料为代表，在凝聚态物质中，电子的能级展宽为电子的能带，变得可控了。典型的，如半导体材料，可以通过调控载流子掺杂浓度，来调控一些相关的物理参数，进而调控器件的性能，典型代表就是晶体管、量子阱、发光二机管LED，以及LD等。

而对于禁带宽度较宽的介电体材料、绝缘体、晶体，如石英玻璃，金钢石，可以人工调制线性介电系数，创造光子晶体，形成光子带隙，对光场进行约束，如光子晶体光纤PCF，以及自然界的孔雀羽毛（不允许蓝光通过，其他可以，所以蓝光反射）等。

人们也不满足于调制折射率的正值的起伏，在一篇论文中，作者证明了在负折射率材料中，可以造出被称为完美透镜的功能器件。平面就可成像，因为是反着折射的，而且可靠近物体很多。而且负折射材料可以超出衍射分辨极限，因为倏逝场本身是不传播，且沿z向e指数减小，但在负折射材料材料中，振幅会沿z向e指数增大。除了负折射率，还可以够造零折射率，任意折射率，折射率分布调制，光学电磁隐身等。

另外，外场与金属表面电子耦合，推动了等离激元光子学的发展。外场波长是等离激元波长的1/10的量级。可以用于突破衍射极限成像。

除了波长和亚波长量级的电介质或金属微材料，人们提出了超构材料：远远小于电磁波波长，这样光场在打进物体时，光场所看到的原子不是真实的原子本身，而感受到的是与被调制过的超原子（meta来自希腊语，在...之后，或超出）。超构材料是南大提出来的，因为结构的参数是决定物体性质的最关键的因素。

金属材料，在高频段，本身就可看作负介电常数。在微波段，介电常数是正负无穷。负无穷，界面的反射散射，阻抗失配，很难耦合进去，进去后，损耗也多。电子密度降低，可以提高到有限的负值，没那么抗了。负磁导率，需创造对磁场的负响应：用环，LC振荡电路：人工磁共振，创造负磁化率。但先只是在10Hz实现了，然后在THz波段，然后在可见光波段实现了。

在可见光波段，不是用的环，而且是通过测试的结果，反推在材料中，应该发生了什么事情。鱼网（仍是负响应），或纳米棒（双曲色散）。银膜，利用其负无穷介电常数性质，然后入射TM模，可以完美透镜。但结构加工难度太大，且损耗太大。哪怕是把倏逝波抓到，正常的光在里面传播的损耗也很大。哈利波特隐身衣，2006年，英国理工。

有人提出，既然负折射率材料都能实现，那么折射率空间任意调制，岂不是可以把n的空间分布，等效成光在其中走的路径，是弯曲的，即用变换光学的方法，加渐变折射率分布，做引力场般的映射。

但其实原理上有漏洞，比如正入射的光，按理无论如何折射率调制，也会正出射，所以有个相位奇点，这个角度上，折射率得无穷大。因此正入射的光，总会打在想要被隐身的物体上，导致出现散射光，导致隐身衣中的物体，被看见。金属共振，会带来很大损耗，不过波前会恢复。光波段也实现了隐身地毯。

超越隐身：模拟黑洞。光的传播倾向于向折射率大的地方弯折，或者光刻胶，其有效折射率与其厚度有关。设计渐变折射率分布，可以模拟黑洞，以及引力透镜。

有人提出了一个问题，光线都绕过了自己，别人是看不到自己了，那自己也看不见外面！于是提出了，幻觉光学：于是，他们就提出，在旁边加一个补偿结构，非常反常的系数，当外面的电磁波，打到人身上，同时也打到补偿结构上，则两个东西的散射场，都相消干涉了，则外界看不到自己，而自己能看到外界。

而且还能用两个物体的散射场叠加，来模拟另一个物体的散射场。这样，就能欺骗外界。但始终没能做成实验。因为补偿结构的各项参数太极端了。以前都是通过共振产生极端的参数，所以损耗很大。因此不如干脆做成有共振的表面，而不是体块。并且卡巴索还同时提出了广义。

电磁波是认不清这个结构的，只认表面的人工原子，如果各个地方原子对光场的调制or响应有滞后的话。几何相位就没有共振损耗。但依赖于圆偏振的光，用有旋转对称性的超原子，做2θ的几何相位滞后。

90％的超构全息效率。第三种方法，是柱子长度，引入传播相位。低损的超构透镜。600nm厚，可以媲美当时尼康的显微镜。颠覆式的成像技术。但有，色差问题。

DOE，比如菲涅尔透镜，但大家基本没有用这个做镜头的。因为它对光束调控还行，当成像质量不够好。通常，所有手机的摄像头，大于1个cm的厚度。如果能做到8个mm，手机摄像头就可以不凸出来了。

几何加共振，几何加传播，都可以做消色差。比如先用无损的几何相位搞透镜，然后再用共振或传播，搞消色差。目前消色差的2个缺点，一是器件尺寸做不大，50um非常小，成像视野受限。

二是损耗很大。消像差，能决定能成多大的像（如一般的手机可以正负60度），边缘人会不会扭曲。光刻机为什么难，因为关键就是许多透镜，大范围，高分辨，高精度聚焦，同时消除像差。色差也是一种像差。

石墨稀，钙钛矿，超构表面，都有这个问题，不是速胜论，也不应是亡国论，而是像抗战一样，是持久战。几何相位，好处在于对电子束曝光的加工精度不敏感，角度控制很到位，但可能单元长度，大小或深浅不太好控制，可能280或300nm不定。

若左旋聚焦，右旋必发散，一个凹透镜，一个凸透镜，相位共轭。没法独立调控。几何与传播，调控振幅调控来近场振幅，相位来调控远场振幅。解耦。

肖淑敏TiO2大深宽比的来做高效率消色差。一般20到30的效率，他们50%。足够大的厚度，纳米柱的高度，才能提供足够的传播相位，来弥补色散。大尺寸消色差，有种更直接的技术，就是基于DOE，但它严格依赖于波长，且用的高阶衍射。在超表面每个纳米柱不同高度，在这个维度上来调控。

既然单个透镜不能做到，不如整多个透镜。微透镜阵列（有点像超构材料，3d的）。光场相机，景深分布，先拍照，后聚焦：指到哪，哪就清楚。利用色差，调不同波长，就能把不同深度的信息拍出来。这样就懒得搞调。

如果将超构透镜，替换掉光路中，普通光学元件，是没有意义的，因为成像公式决定了，还是那么长的距离。但超构透镜可以贴在CCD上，压缩像距，搞小视场，高倍率的，显微成像。同轴全息孪生像的消除，也用深度学习，神经网络来搞的。同轴全息孪生像类似左右旋几何相位。

5mm以上超构表面，耗钱非常大。meta是DOE技术的升级版，因此之后ARVR柯南眼镜，中的DOE光栅等器件，会被meta所取代，到时候人类真可能进入“元宇宙”。

**邓昱：微纳失效分析**

人类自带的最灵敏的检测系统，是味觉。所以一些晶体学家、化学家、画家，他们在工作中，会时不时地尝一尝晶体材料、合成材料、颜料等固体材料的表面；像西班牙的田园画家歌雅这帮人，他在调颜料的时候，包括铅白、铅红，为了调得更正，他会舔一下，通过味觉而不是视觉，来看看颜料调得准不准，效果比视觉还好，但往往到了画家的生命后期，日久天长的低剂量摄入有毒重金属元素，往往会中毒发疯，神经系统受到损伤，开始画一些抽象风格的画。用生命来饯行艺术，这种行为称得上是真正的艺术。同样，厉害的音乐家，听音乐能听出音乐起伏的二阶导数来。

在疫情的大环境下，中国很多企业是非常悲催的，由于检测手段跟不上，对于很多进口产品，进口时能不能够达到标准而通过，比如口罩、制口罩的机器。一方面国内可能会因此收到不合格产品；另一方面，国外收到了中国出口援助的中国认为合格的口罩，但合格与否的定价权在外国手中，因此外国却反过来霸王条款让中国的企业赔钱，好心没好报，人力物力都亏损。都是因为我们分析检测行业、制订标准的秘书处没有话语权。

从2001年开始，中国意识到这件事情，但做这件事情，像战场一样。比如前不久在聚焦离子束的行业标准上，在北京与日本打了一场。但也有高光时刻，比如2007到2008年，中国从NASA手里抢回了保险丝标准。

板极失效分析，流程上，一般先光学+电学测试，比如先插上电，查看所有同批次产品的输入和输出，正如“不怕不识货，就怕货比货”，一比较就能比较出来，产线上每秒能测上千个器件，甚至一边生产，一边检测。有两个办法是提高良率的，一是改善原始的制备材料，二是通过准确快速地大数据超快全测所有产品，提高 σ。

对于1亿个三极管，怎么能发现哪两个不好。实际上，在电路设计上，相对来说，不会让一个地方特别热；热量是相对平均的，因为反过来思考的话，电阻率大，则产生的焦耳热更多，产生的热会导致电阻率的提高，进一步产生更多的热量，因此，所有的正反馈都是灾难性的。所以只需要探测发射X射线的分布图，并将其与同类的好板子比较一下，就能发现哪出了问题。比如该导电的地方被击穿而不导电了，该不导电的地方被击穿而导电了，比如电容被击穿了。过流会倾向于大面积烧融化为球状或圆状、水滴的形状，倾向于在同体积的情况下，表面积最小。

聚焦离子束，是显微术中的蓝翔挖掘机，几乎能做所有的事情。机械手是镍合金，有可焊性，接触点喷射离子束，完成金属成分的沉积成膜，离子束溅射成膜，纯金属或碳的导电材料膜，也可以沉积不导电的二氧化硅膜、水玻璃膜。所以聚焦离子束可以做类似焊而不是切割的活。机械手也可以转角和改变地点，一共6维的自由度，还可以切割或焊，也就相当于一根能缝能切的针，能探测能加工，既能挖坑、也能种树、还能转移树，所以几乎什么都能做。因此，FIB对于工业电镜行业，是个降维打击，几乎都被FIB淘汰掉了。

聚焦离子束发展最快的就是中国大陆，7、8年前，全国大概25台左右，全国就一个品牌一统江湖，现在全国有数千台；而且因为大陆的发展速度快，许多大厂，像蔡斯等不做FIB的厂，都发力做FIB了。所以，好产品是用出来的，也就是，只要有市场，有需求，供给就会百分百跟上。只有FIB市场、技术起来了，我们国家的半导体产业是起不来的。

以后的高科技领域只存在两种能力，一种是降维打击别人的能力，另一种是被降维打击后，转移赛道，打不过就加入的能力。弯道超车是上一个赛道的概念，在现在的产业中，实力是越来越不对称了。在《三体》中，“消灭你与你何干”。现在，用某领域、维度所没有的，前所未有的能力，移植到某另一看似毫不相关的领域、维度中，会给他们带来致命打击。战斗一旦开始，就结束了。

所以问题不在于战斗开始之后，而是开始之前。应该早10年去试错，试100件事，利用AI，尝试的速度比以前快10000倍。不建议大家做传统领域的深耕，传统领域的大的技术问题，都已经被别人刨了无数遍了，除非你早100年生能赶上上一波，晚生100年能赶上下一波，但这100年没有这波行情。一个是朝深度方向走，一个是朝广度方向走，但我们这个时代，深度方向深不见底，真黑，而我们的人的精力是有限的，不应该我们集中精力去深耕。

我们这个时代，除非基础科学有更大的突破，否则不要尝试着往新兴的基础科学的深度方向走。而是要往广度方向走，我们用本来不属于这个领域的能力来到这里，最大的风险在于如何找到这个领域，在这个领域中，从任何角度出发，你所携带的东西都不属于这个领域，你并不知道你能在哪里找到这个属于你自己的领域。在找到这个领域之前，你要穿越一个沙漠。但我们仍能够完成这件事，因为我们现在有更快的手段，和更广的领域，去试。早10年，我们没法同时试100件事。AI时代可以捡起一些大炼丹时代的活来干。以前一辈子可以做的事情，现在非常短的时间内可以完成。

不要赌1件事情的成功率，要赶快做1w件事情。

**颜学俊：激光超声技术**

不同的探测技术看到的是材料不同的“侧面”，即其在某一方面的投影属性。如，光学、近场、共聚焦显微镜，探究材料的光学性质，来反演结构或功能的特性。电子显微镜，电子能谱，则是用电子来解析材料；而X射线，可以用来查看原子层间距、晶格结构；AFM，则主要用来探针来探测物体表面形貌。

一方面，AFM精度很高，但只能观察表面，且不能实时；光学显微镜虽然能时实，但只能观察表面（如果材料不透明）；而电子显微镜精度高、能观察内部、能时实，但造价昂贵，视场有限，且可能对材料有损、可能需要提前对材料进行切片。另一方面，传统的超声无损探伤，就可以在探索材料的同时，不对材料破坏，还可以实时、在线检测，已经占据无损检测的半壁江山。但其压电薄片所激发的超声，最薄 0.2 mm，工艺上极限，导致波长也较长，以致于横向分辨率仍然是不够的；并且需要探头接触物体，发射一个超声，接收一个超声，无法对动态物体如飞机发动机进行检测。

若想进行高精度实时检测，可以采取激光，而非探头，非接触式地来激发超声。探测也非接触式的，是根据第二束probe光，经历了介质中的超声的调制后，相位变化后，再与参考光干涉，得到相位变化量，来检测超声。纳秒激光器，特征时间为0.1 ms。其次，材料越硬，超声越快，所以可以通过测剪切波的声速，来测弹性模量等。

可以对弹性模量、参与应力进行检测，甚至还可以对每一层的声速、超声的模态、每一层的弹性模量、每一层的应力，进行检测；并且激光超声技术，可以与激光3d打印、激光焊接，等各种激光先进制造工艺相兼容。实现加工的同时，进行检测。高精度、非接触、穿透性，可以测纯光学无法测出的，如应力、光声相互作用。

可以通过不同方向声速不一样，来求解具有双折射的单晶物质的各向异性程度、从表面到内部的应力分布、内部缺陷分析、手机或薄膜振动模态、声拓扑器件表面振动探测、声表面波器件的表面波的观测。可以服务于飞机发动机、钢轨、汽轮、生物医疗等检测领域。这个系统也可以装到机械臂上，或者集成到一个装备中去。

检测需要知道超声场是什么样的，但检测出的模场是比较复杂的，因此适合采用人工智能的方案来深度学习，超声系统所采集的各种模场分布，所对应的不同的材料内部孔隙等结构或力学性质分布。比如标准焊或虚焊，所对应的两层焊板间的焊接点的程度不同，就对应不同的检测出的超声模场，通过机器学习，可以知道不同特征的模场分布，对应的工业焊接的工件质量好坏，以及基于机器学习的缺陷预测、生物医学成像。

一个有意思的激光超声过程产生声表面波的激发方法，是通过空间调制光学系统，预先调制泵浦波前为多级空域等间距衍射点，打到材料表面，在材料内部近表面，通过热效应，热的地方晶格膨胀，冷的地方晶格被隔壁挤压而压缩，激发单一频率、单一指向的声表面波，再在一定距离后的，相同的地点，测量表面不同方向的声速，以检测不同晶粒方向的声速。

还可以利用组织的吸光系数不同，反映组织的吸光衬度，通过光声显微成像系统，实现多尺度的实时生物组织检测功能，横向分辨率可达到5μm，纵向分辩率能达到50μm。

国内半导体产业被国外垄断，很大一部分是相关检测手段落后于国外，针对更精密的半导体芯片内部的检测，需要高时空分辨的无损内部检测，因此需要高频、窄脉宽的超快光声检测技术。该技术能融合飞秒激光的高时/空分辨率的特性，以及超声的穿透特性，这2者的优势。实现时间分辩率100 fs、超声脉冲宽度0.5~3 nm的高时空分辨率，以及> 20 μm的超声穿透深度，实现内部层析检测。同时反映材料的声学性质（弹性力学），和光学性质。以及保留了全光学检测系统的无损非接触的优势。

因此可以通过检测纳米薄膜中不同层的超声纵波的波形，查看半导体芯片中多层膜的厚度，以及不同层膜的声速。即通过测量超声在纳米薄膜内部的传播时间，结合AFM的厚度检测，以及基于时域布里渊散射的薄膜层析检测，更好地获得未知纳米薄膜的结构和声学性质。实现芯片质量的在线监测。