**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”。