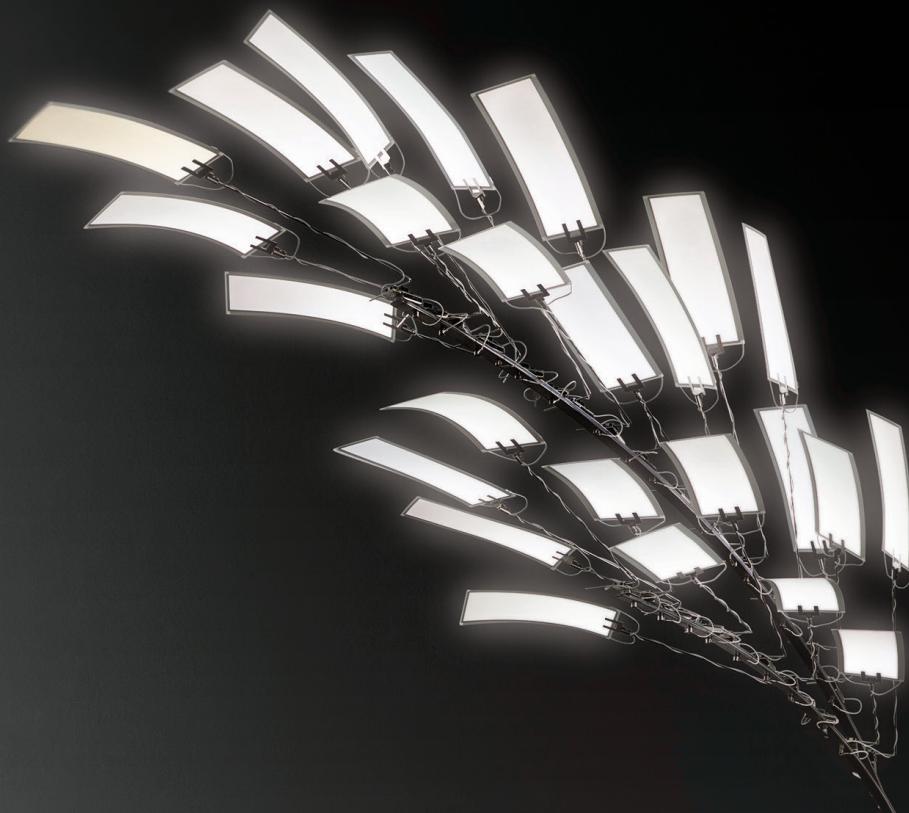


多物理场仿真

IEEE
SPECTRUM

2016年9月

COMSOL
赞助

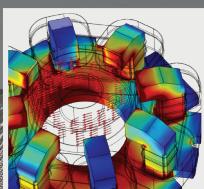


柯尼卡美能达
表面等离子激元模型
助力 OLED 的
亮度提升

P 24



GRAFTECH
用于电子元件散热的
石墨烯解决方案
P 3



圣犹达医疗用品
(ST. JUDE MEDICAL)
新一代无线植入式医疗设备
P 7

产品创新背后的仿真分析

作者 **JAMES A. VICK, IEEE SPECTRUM** 发行人

当今世界,各种新技术风起云涌,新产品层出不穷。在这个科技迅猛发展的环境中,产品创新是企业保持竞争力的关键。

为了确保产品设计的合理性,并尽可能使产品设计接近于实际应用,很多企业在产品设计的初期都引入了建模和仿真分析环节。这一过程帮助企业有效缩短了产品开发周期,提高了产品质量,降低了开发成本。

本年度由 COMSOL 公司赞助的《多物理场仿真》杂志全面地讲述了企业如何使用数值仿真来提升产品的核心竞争力,涵盖了诸如表面等离子激元纳米天线、离心式心脏泵、5G 物联网 (IoT) 以及声学隐形等应用。

特别值得关注的是,借助于专业定制、易于使用的仿真 App,仿真分析的应用正进一步扩展到企业的各个部门。从 GrafTech 公司的文章中,我们可以深刻感受到这一趋势。作为在工业应用领域全球领先的石墨材料解决方案供应商, GrafTech 的研发团队建立了用于智能手机热管理系统的石墨散热片模型,并将此模型开发为仿真 App,以供销售团队根据客户的个性化需求,定制产品设计参数。本期杂志中呈现了很多类似的案例,从中您将看到,借助于这些融合了仿真人员专业知识的仿真 App,企业的工程师、合作伙伴甚至客户不再受到专业技能的限制,得以更加深入地参与到产品的创新设计中。

请继续阅读本期《多物理场仿真》杂志,了解各个行业如何有效地利用仿真分析这一强大工具,锐意进取,开拓创新! ◎

电子邮件: jv.ieeemedia@ieee.org

封面图片: 灯光设计大师英葛·摩利尔 (Ingo Maurer) 与柯尼卡美能达 (Konica Minolta) 合作设计的开创性 OLED 产品“风之低语” (Whisper Wind)。这个台灯由 25 片 OLED 柔性面板组成。面板吸附在带有磁铁的双面树状铜结构上的,而这个树状的结构又作为电源线为 OLED 供电。请前往第 24 页阅读全文,了解有关 OLED 建模的更多详细信息。



照片由 Ingo Maurer 提供。

目录

3 碳和石墨在热管理中的工业应用

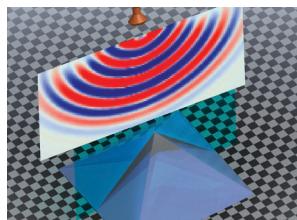
— GrafTech International, 美国

7 多物理场仿真提升植入式医疗设备的性能和安全性

— 圣犹达医疗用品, 美国

10 轻便、坚固、零缺陷的激光焊接: 完善汽车工业的工艺流程

— 安塞乐米塔尔, 法国

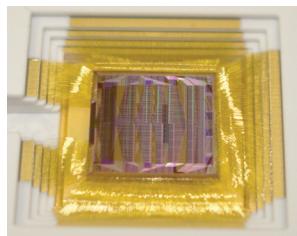


13 操控声音: 仿真助力声学超材料的前沿研究

— 杜克大学, 美国

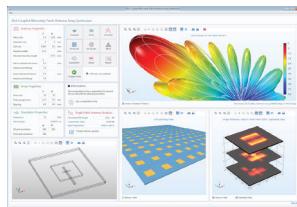
16 汽车音响系的虚拟调制

— 哈曼, 法国



18 设计低功耗光开关应对日益增长的网络流量

— 华为, 加拿大

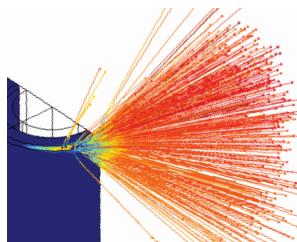


22 我们的“5G 未来”: 借助数值仿真驶入通讯快车道

— COMSOL, 美国

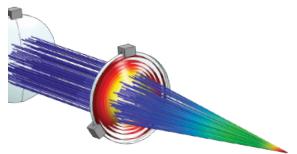
24 让世界充满光明: OLED 的广阔前景

— 柯尼卡美能达, 美国



27 从纳米天线到外太空卫星, 电子发射实现高效发电

— 意大利技术研究所, 意大利



30 射线光学仿真照亮创新之路

— COMSOL, 美国

32 计算纳米光子学: 从黑洞到表面等离激元光镊

— 普渡大学, 美国

碳和石墨在热管理中的工业应用

GrafTech International 公司设计和生产的碳和石墨产品广泛应用于包括工业感应炉和消费电子产品在内的众多领域。仿真分析是针对其产品进行设计和工艺优化的关键。使用仿真可以在控制能耗和材耗的同时,最大程度地提高产品性能。

作者 JENNIFER SEGUI

为特殊热管理应用识别并设计最佳材料,是一项具有挑战性的任务。工业设计师们往往可以从供应商那里获得无数种材料供选择,但帮助他们做出明智决定的信息却非常有限。

GrafTech International 公司(以下简称 GrafTech 公司)的研究人员和工程师十分重视对自己公司产品的深入了解,因为这有助于为他们的客户提供充分的信息,帮助客户选择最佳的碳和石墨解决方案。

“为了更好地理解我们的产品及其在特殊热管理应用中的工作原理,我们一直将数值仿真与物理测试结合起来使用。” GrafTech 公司创新技术部门的资深研究员 Richard Beyerle 介绍道,“我们正在开发的最新计算工具可以帮助我们的销售工程师、现场专员及客户在进行实际安装和测试之前,对比不同产品在虚拟样机中的表现。”

图 1 显示的仿真 App 应用程序便是此类工具的一个示例。这个仿真 App 为底层的数学模型提供了友好的用户界面,使得与之相关的任何人都可运行仿真分析。

数值仿真,或者更为确切地说是

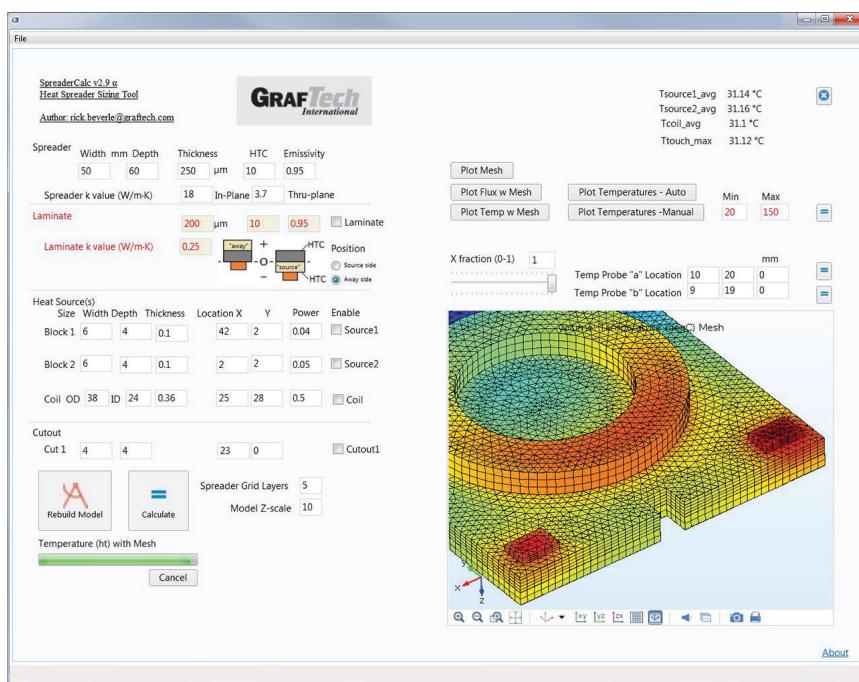


图 1. 仿真 App 为一个底层数学模型提供了用户友好的界面,将模型的使用范围扩展到更广泛的用户群。用户可以借助图中的仿真 App 来比较用于消费电子产品中进行散热的石墨箔的传热性能。图片由 GrafTech 公司提供。

多物理场建模,正在整个创新技术部门普及开来。GrafTech 公司的创新技术经理 Ryan Paul 说:“事实上,我们所有的产品和应用都受益于多物理场仿真。” Beyerle、Paul 以及资深研究员 Nathanael May 都在他们各自的工作中使用多物理场建模和仿真 App 来更

深层次地理解碳和石墨在电气、结构及热力学方面的性能,并针对多种工业应用中的设计和工艺进行优化。

» 了解碳和石墨

GrafTech 公司基于碳和石墨制造的先进材料解决方案呈现多种物理



图 2. GrafTech 公司设计制造的先进材料解决方案包括刚性复合板、膨胀石墨片、粉末和柔性石墨箔，以及许多其他定制产品。图片由 GrafTech 公司提供。

“我们正在开发的“仿真 App”还可以帮助我们的销售工程师、现场专员，以及客户比较产品在虚拟样机中的工作性能。

— RICHARD BEYERLE, GRAFTECH INTERNATIONAL 公司资深研究员

形态，包括刚性片材、卷材、粉末、柔性箔以及定制加工结构单元等，图 2 展示了其中的几种形态。图 3 中对无定形碳和石墨的微观结构进行了比较，两者的主要化学成分均为碳元素。相对于无定形碳而言，石墨由许多平面层组成，并且结构高度有序。在单层石墨中，可以观察到蜂巢状的晶格，这是由于碳原子之间的共价键形成了六方晶系。

与无定形碳相比，石墨的结构使其具有极佳的面内电导率和热导率。同时，石墨也十分坚硬，单层石墨（称为石墨烯）是目前已知的最硬的材料。然而，石墨各层之间是通过范德华力这种弱的结合力相互键合，这导致各平面间的电导率和热导率较低，这也使得石墨材料的属性具有高度的各向异性。石墨中每一层之间都

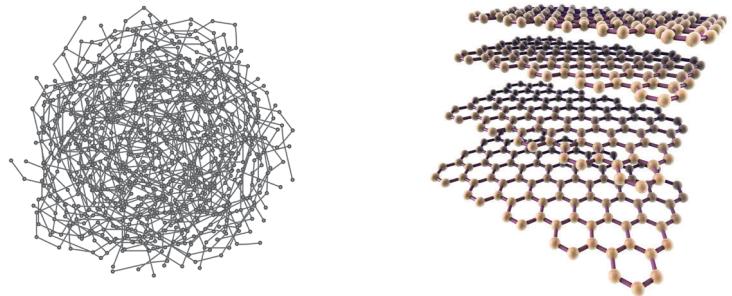


图 3. 与无定形碳（左图）相比，石墨具有高度有序的结构，它由许多单独的石墨烯层组成（右图）。

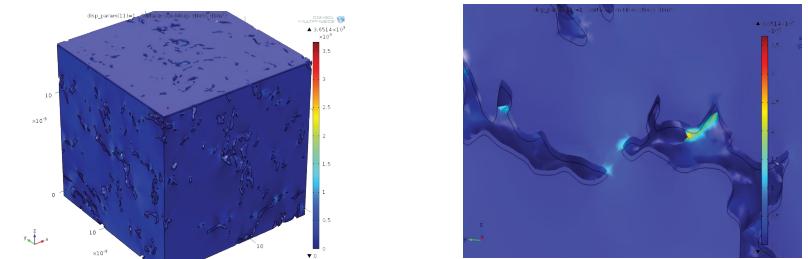


图 4. 使用计算机断层扫描 (CT) 生成可显示材料孔隙率的石墨重建体，并导入 COMSOL® 软件中进行仿真。经过验证的模型将用于研究合成石墨的孔隙率对其弹性属性的影响。图像由 GrafTech 公司提供。

能相互滑动，这使得这一材料相对比较柔软。许多形态的石墨都能在无氧条件下承受 3000 °C 以上的高温。

为了能够在热管理要求较高的工艺中使用石墨并有效利用其独特的热力学特性，我们需要更深层次地

了解材料的整体性能。为达成此目的，GrafTech 公司正结合物理测量和 COMSOL Multiphysics® 软件的仿真能力来研究材料的物理性能，其过程如图 4 所示。

“产品设计中面临的挑战是：在



图 5. 由于具有很高的面内导热率, 柔性石墨箔散热片可对电子元件进行散热, 同时又因为层间导热率低, 可以保护底层的热敏区域。照片由 GrafTech 公司提供。

箔诸多的应用中, 具有代表性的是 SPREADERSHIELD™ 散热片, 这是专门针对智能手机、平板电脑和显示器等多种不同产品的散热需求而设计的材料。图 5 展示了石墨箔散热片如何对电子元件或设备进行降温, 使它们能在较低的温度下工作, 从而延长其使用寿命并提高性能。

石墨箔散热片有多种参数可供选择, 如厚度、电导率、热导率、接触阻抗及不同的涂层。“一个常见的难题是: 如何平衡石墨箔的热力学性能和生产成本。” Beyerle 说, “数值仿真可以极好地评估石墨箔在特定设备中对电子元件的散热效率, 因此让我们能够在不影响性能的前提下为客户提供成本最低的解决方案。”

为了评估柔性石墨箔在传热性能方面的各向异性, 及其在多种电子设备中的热管理应用, Beyerle 正在使用 COMSOL Multiphysics® 软件开发数学模型和仿真 App。使用仿真 App, 用户就能评估应用于便携式电子设备(如手机)的石墨散热片的几何特征(仿真 App 界面在图 1 中已作介绍)。

用户可以通过这个仿真 App 更改热源、插槽和其他开口的位置和尺寸, 还能指定热源功率, 以及对有限元网格和仿真结果进行可视化预览。图 6 显示了更改插槽长度对附近热源散热情况产生的影响。

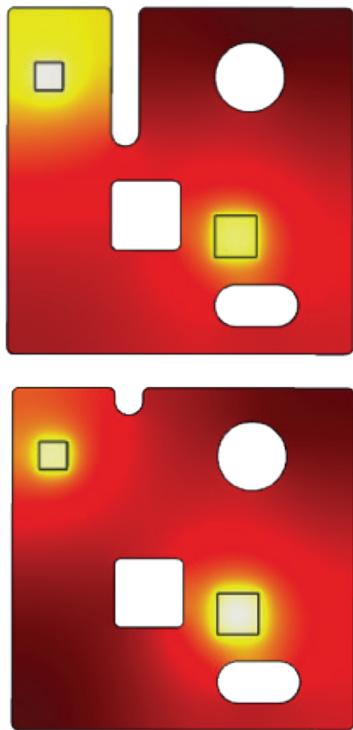


图 6. 使用 GrafTech 公司的仿真 App, 可以评估整个石墨散热片的散热情况, 同时还可以考虑热源的大小和位置, 以及缺口的大小。图像由 GrafTech 公司提供。

动态的热力学-力学-电学负载下, 对石墨随温度变化的属性和性能进行建模,” Paul 解释道, “通过对石墨及其应用进行建模, 我们获取相关知识的速度明显加快, 同时还帮助我们基于对物理机制和理论的更深理解进一步设计了实验, 这些成果是仅靠一些实验数据所远不能及的。”

» 模拟石墨箔为电子器件散热

针对石墨在电子元件热管理中的潜在应用, GrafTech 公司设计并制造了厚度极小的柔性石墨箔。在石墨

“通过对石墨及其应用进行建模, 我们获取相关知识的速度明显加快, 同时还帮助我们基于对物理机制和理论的更深理解进一步设计了实验, 这些成果是仅靠一些实验数据所远不能及的。”

— RYAN PAUL, GRAFTECH INTERNATIONAL 公司创新技术经理

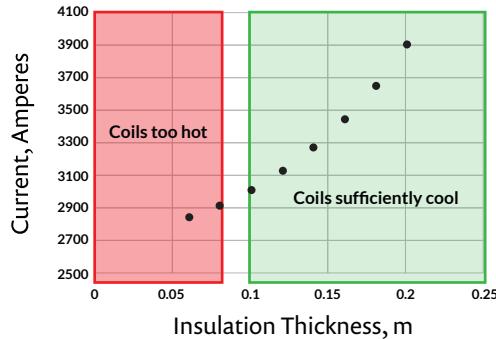
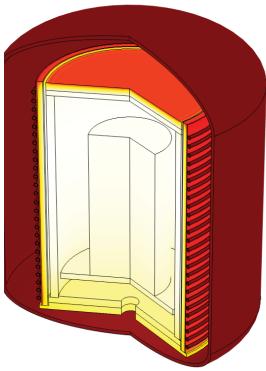


图 7. 左图为通过仿真生成的配备有水冷感应线圈的熔炉的温度分布图。右图中的结果展示了为线圈散热的石墨绝缘层的最优厚度。图像由 GrafTech 公司提供。图注: Current, Amperes - 电流, (单位: 安培); Coils too hot - 线圈过热; Coils sufficiently cool - 线圈充分冷却; Insulation Thickness, m - 绝缘厚度, (单位: 米)

要确保仿真 App 成为有效的工具, 验证底层数学模型是极为重要的一步。Beyerle 特别关注的一个问题是, 对石墨散热片传热性能各向异性的仿真, 必须在平面和弯曲面的情况下同时准确。如果仿真不够准确, 结果可能导致具有独特性能的石墨看起来与普通金属毫无差异。在 COMSOL® 软件中, 用户可以很方便地创建自定义的坐标系, 从而对弯曲和分支部分的材料各向异性进行建模。

运行此仿真 App 的速度非常快 (用时少于 12 秒), 这使得仿真 App 这一工具可以十分方便的在整个销售过程中使用。通过 COMSOL Server™ 产品的安装和使用, Beyerle 不仅能在 GrafTech 公司的本地电脑上运行仿真 App, 还能让同事和客户通过 Windows® 环境下的 COMSOL 客户端或网页浏览器远程运行该仿真 App。

» 优化熔炉设计和工序

尽管石墨在应用中有诸多优点, 但 GrafTech 公司制造的许多独特等级的石墨材料都具有各向异性与温

“通过数学建模生成的虚拟样机, 可以有效提升潜在客户对 GrafTech 公司的信任, 同时也能证明本公司提供的解决方案完全经得起考验。”

— NATHANAEL MAY, GRAFTECH INTERNATIONAL 公司资深研究员

度高度相关的材料属性。对这样的材料进行准确的建模是极具挑战的。Beyerle、Paul 和他们的同事 Nathanael May (创新技术部门的另一名资深研究员) 都明确地指出了这一问题。

“由于我们的材料拥有许多独特的属性, 这意味着我们必须要通过实验来构建一个可以在模型中使用的材料属性数据库。” May 解释道, “所有这些努力是完全值得的。通过数学建模生成的虚拟样机, 可以有效提升潜在客户对 GrafTech 公司的信任, 同时我们也能够很容易地向客户证明 GrafTech 提供的解决方案的有效性。”

May 的主要研究方向之一就是使

用 COMSOL Multiphysics 搭建精确的多物理场模型。他说: “我多数时候需要构建用于模拟高温熔炉的二维和三维模型, 这些高温熔炉包括感应炉、真空炉和高质量晶体生长炉。”

图 7 向我们展示了 May 正在研究的感应炉示例, 以及使用仿真计算出的优化设计结果。他使用仿真来优化 GRAFSHIELD™ 石墨绝缘层的厚度, 以防止水冷感应线圈中的温度超过 100 °C。此外, 尽可能地减少绝缘层的厚度, 可以降低维持炉温所需的电流。

» 碳和石墨的广阔世界

谈到深入了解 GrafTech 公司极具特色的碳和石墨解决方案, 建模和仿真在其中起着不可或缺的作用。Beyerle, Paul 和 May 将实验测量和仿真模拟有效地结合在一起, 从而开发出了针对实际应用的 GrafTech 解决方案。

通过对产品建模, 并开发这些融合了仿真人员专业知识的仿真 App (这是 COMSOL Multiphysics® 软件特有的功能), GrafTech 公司拥有了为热管理应用提供易用的仿真设计的能力。仿真 App 不仅打开了碳和石墨以及数值分析的广阔应用领域, 同时还使企业内的员工和潜在客户能够从中受益。📍



Richard Beyerle 是 GrafTech International 公司创新技术部门的一名资深研究员。

多物理场仿真提升 植入式医疗设备的 性能和安全性

美国圣犹达医疗用品公司 (St. Jude Medical) 致力于开发心室辅助装置来改善心力衰竭患者的生活。数值仿真的应用贯穿了整个设计流程, 涵盖了从热效应、流体动力学到能量传输的方方面面。

作者 SARAH FIELDS

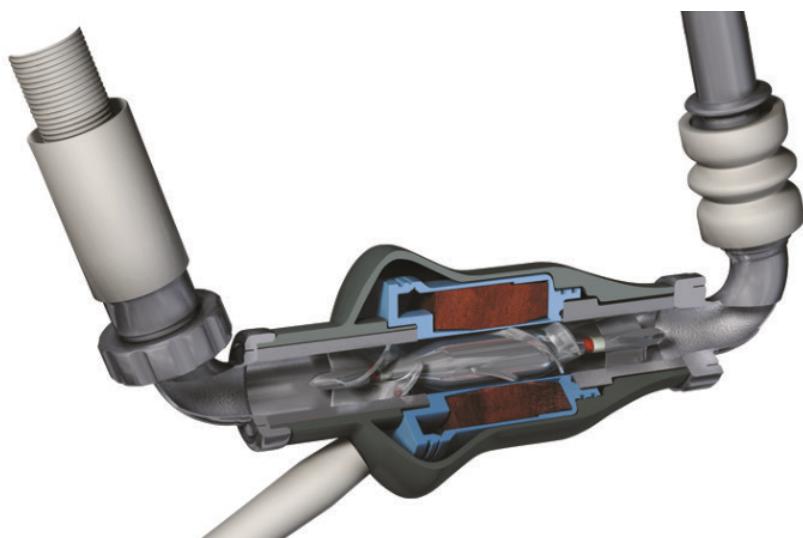


图 1. LVAD 泵的作用是帮助富氧血液在全身循环。图像由圣犹达医疗公司提供。

研发用于辅助或完全代替心脏功能的装置无疑是一项非常复杂的任务。从给装置供电到确保装置对人体正常的机能没有干扰, 设计中的各个环节都充满了巨大的挑战。圣犹达医疗公司的研究人员使用多物理场仿真来设计左心室辅助装置 (left ventricular assist device, 简称 LVAD), 坚持不懈地致力

于帮助心力衰竭患者改善生活质量, 树立健康的心态。

心力衰竭这种疾病通常始于心脏左侧, 由于左心室负责将富氧血液泵入全身, 而右心室仅将血液泵入肺部, 因此前者的输送距离远大于后者, 负担也更重。通常来说, LVAD (见图1) 能为左心室功能不全的患者提供机械循环的支持。

心室辅助装置是有史以来最复杂的体内植入器械之一。LVAD 除了为人体全身的血液循环提供动力、维持生命外, 还必须与人体内的生物环境相兼容。圣犹达医疗公司旗下的 Thoratec 公司, 经过多年临床试验, 终于在 2010 年为 LVAD 产品开辟出了广阔的市场。

» 设计强大、高效、血液相容的血泵

设计 LVAD 时必须考虑到诸多因素: 装置必须足够小才能与心脏连接, 并需要使用相容性材料和合理的几何结构才能将其植入人体内而不引起排异反应。另外, 设计者还必须考虑流体力学、供电和热管理等问题。在每个环节的研发中, 研发人员都必须清楚地了解多个相互作用的物理效应, 因此, 多物理场仿真在整个设计过程起到了至关重要的作用。

在开始实验研究之前, 圣犹达医疗公司的高级研发工程师 Freddy Hansen 会利用专业知识对 LVAD 这种复杂的植入式医疗装置的特性进行物理和数学的建模。

Hansen 从 2011 年起就开始使用 COMSOL Multiphysics® 软件, 到目前为止已创建了超过 230 个模型, 成功攻克了多项与人工泵装置独特物理现象相关的设计难题。

“不论是验证概念模型, 还是处理具有详细 CAD 几何结构和多物理场耦合的复杂仿真, COMSOL Multiphysics 的使用贯穿于我每天的研究中。对于一些复杂的模型, 有时需要好几个月才能从模型中获取全部需要的信息。”

每一代 LVAD 产品进入市场前都经过了改进优化, 以增强产品的安全性, 提高患者的生活质量。圣犹达医疗公司的研发重点是提升装置的生物相容性、血液相容性以及免疫相容性, 确保装置



图 2. LVAD 的外部设备。图片由圣犹达医疗公司提供。图注：Left Ventricular Assist Device - 左心室辅助装置；Battery - 电池；Percutaneous Cable - 经皮导线；Controller - 控制器；LVAD control - LVAD 控制；Patient user interface - 患者用户界面；Emergency backup battery - 紧急备用电源

不会引起不良的免疫反应或干扰其他人系统。

几何结构和尺寸对装置的整体功能有着重要的影响。植入 LVAD 时，外科医生首先将 LVAD 的一端连接到左心室，然后将另一端连接到升主动脉（见图 2）。装置的体积越小，操作就越简单，也就越不容易干扰相邻的器官或组织。借助仿真，研发人员可以在完成物理样机之前，评估不同的尺寸或几何结构对 LVAD 设计的影响。

» 优化 LVAD 设计，提高生物相容性

研发人员在 LVAD 离心泵的开发过程中运行了大量仿真分析。设计此类装

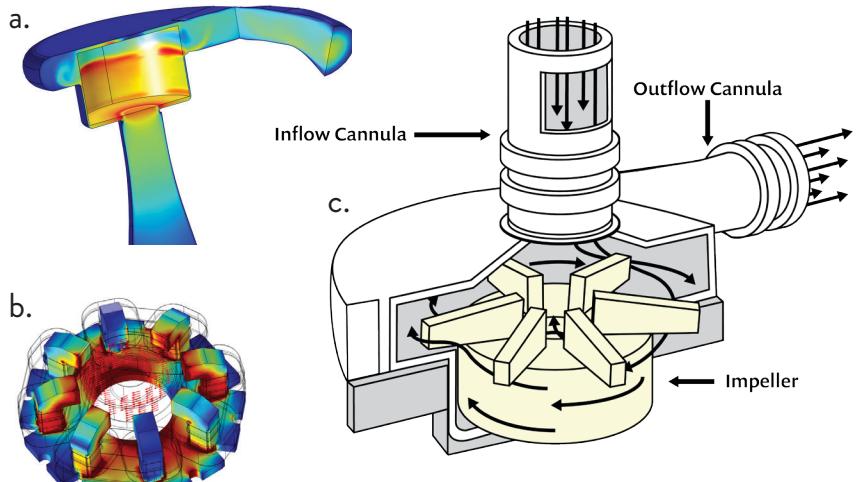


图 3. (a) 三维 CFD（计算流体力学）仿真，描绘了泵体内的流体速度。(b) 磁悬浮转子，用来取代球轴承及其他组件，因为这些几何结构可能会促进凝血。图中显示了转子磁场的大小和方向，以及定子磁场的大小。(c) LVAD 离心泵示意图。图注：Outflow Cannula - 流出套管；Inflow Cannula - 流入套管；Impeller - 叶轮

置面临的一个挑战是防止在泵的内部或周围空间发生血液凝结。为应对这一挑战，工程师们开发出了磁悬浮转子，用来取代容易引起凝血的球轴承和其他组件。Hansen 利用软件中的“旋转机械”建模技术对磁悬浮转子和湍流流动进行了模拟。

泵转子中的永磁体由定子中的线圈驱动，这些线圈的转动会在转子内产生扭矩，并对转子轴的位置产生主动控制。转子的垂直位置或悬浮状态通过磁场线张力实现，无需施加主动控制。转子沿轴向接收血液，随后将血液沿径向输出到螺旋管或流体收集器中（见图 3）。部分血液将回流到转子外部边缘附近，然后进入转子入口，这实际上形成了血液的持续洗涤的过程，

有助于消除血液的堵塞和凝结。

另一项重大突破是开发出了能够产生脉冲式流动而非连续流动的泵系统，因为脉冲式流动方式更接近人体心脏的真实工作状态。此外，脉冲式流动还有助于洗涤血液，防止血液凝结，并能为全身的血管产生积极的生理效应。

» 全植入型 LVAD 实现无线充电

目前的 LVAD 需要通过生物相容性材料制成的电线，将电能从体外控制器中的外部电池传输到泵。但如果可以去除电线将会怎样呢？

Hansen 深入研究了通过磁共振耦合来传输电能的方式。其原理是，当两个共振频率大致相同的物体通过振荡磁场相互传递能量时，会发生磁共振耦合。通过这种方式，电源中的电能可以无线传输到另一个装置中，即使穿过人体组织这种生物介质也能实现。

全植入式 LVAD 系统 (FILVAS) 使患者不必再担心电线带来的问题，同时也降低了感染的风险、改善了患者的生活质量。有了这个发明，患者就可以摆脱

“ 不论是验证概念模型，还是处理具有详细 CAD 几何结构和多物理场耦合的复杂仿真，COMSOL Multiphysics 的使用贯穿于我每天的研究中。对于一些复杂的模型，有时需要好几个月才能从模型中获取全部需要的信息。

— FREDDY HANSEN, 圣犹达医疗公司高级研发工程师

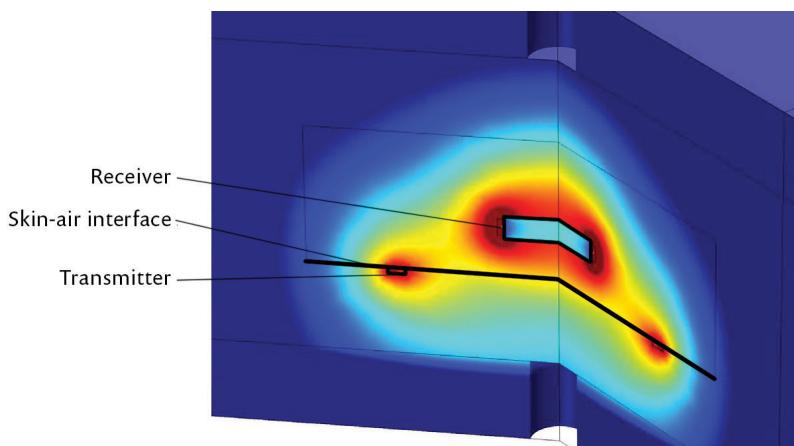


图 4. 磁能传输造成的体内升温模型。结果显示了组织和周围空气中的能量密度分布。图注：Receiver - 接收器；Skin-air interface - 皮肤-空气界面；Transmitter - 发射器

电线的顾虑，放心地淋浴和游泳了。

为了评估向 LVAD 装置进行能量无线传输的可行性，以及确定合理尺寸的线圈之间可传输的电量大小，Hansen 耦合了三维磁场模型和电路模型，用来确定能量的传输效率和损耗，以及最优的电路设计和元器件参数。

他评估了重要电路元件（如变压器线圈的电线）中使用的各种不同材料，还研究了由于患者走路、跑步及其他活动导致的线圈偏移等问题。研究中还考虑了人体附近可能存在的磁性物体或金属物体对装置产生的影响。

不仅如此，工程师还必须确保患者的体温和生物系统不会受到植入物的影响。无线能量传输会在线圈附近的人体组织中引起微小的电流。Hansen 模拟了组织中由于感应电流而产生的热量，以及植入物（磁导线、电子设备及电池）内部产生的热量。进而通过采用由著名医疗机构克利夫兰诊所（Cleveland Clinic）试验测定的人体组织导热系数，来最终确定植入物附近的人体组织的温升情况（见图 4）。

» 保护维持生命的电池

LVAD 是患者日常生活中赖以生存的装置。这意味着 LVAD 的外部控制器（装有重要的“救命”电池）必须经得起日常使用过程中的磨损，甚至是掉在地上时产生的冲击。为了保证控制器即使被患者随手乱扔，也能继续正常工作，Hansen 对控制器进行了机械冲击分析，以评估它的弹性形变恢复能力（见图 5）。

不仅如此，他还分析了变形的结构外壳和扭曲的框架的边缘和表面，以确认控制器的整体性能。分析结果表明，即使控制器遭受明显冲击，也能继续为 LVAD 提供维持生命的电能。

» 新技术将在未来带给患者更佳选择

在设计用于辅助和替代心脏功能的装置时，多物理场分析已被证明是至关重要的。Hansen 将实验测量与数学建模相结合，来理解心室辅助装置相关的物理原理，从而提高了植入装置的生物相容性，进而整体改善了患者的体验。

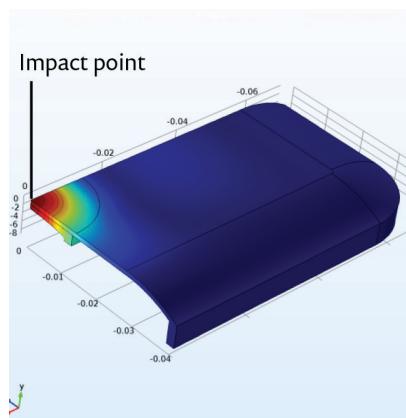


图 5. 钢珠对 LVAD 控制器的冲击仿真，用于评估控制器的弹性形变恢复能力。结果显示了沿垂直轴的位移。图注：Impact point - 冲击点

最新的机械泵系统经历了一系列的创新，其中包括更小的装置尺寸、血液相容性更佳的血泵和脉冲式流动的引入，再加上如今无线能量传输也成为可能，所有这些无不未来更先进的医疗技术带来巨大希望。☺



FREDDY HANSEN 毕业于瑞典哥德堡的查尔姆斯理工大学（Chalmers University of Technology in Gothenburg, Sweden）

获得工程物理学学士学位，在加州理工学院（Caltech）获得了应用物理学硕士、博士学位并进行了博士后研究，期间专门从事与航天器等等离子体推进相关的等离子体物理领域的研究。此后，他在美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室（Lawrence Livermore National Laboratory）

工作九年，致力于研究流体力学、天体物理学与核聚变。Freddy 共发表研究论文 40 余篇、拥有六项正在申请或已授权的专利，并参与编写了一本畅销的物理学教材。Freddy 目前供职于圣犹达医疗公司，运用他在电磁学和流体力学领域的专业知识设计人工心脏。

轻便、坚固、零缺陷的激光焊接： 完善汽车工业的工艺流程

在降低排放量、提高驾驶安全性的同时，还要保持成本低廉，汽车工业当前正面临着向环保汽车转型的挑战。安赛乐米塔尔 (ArcelorMittal) 公司的工程师们正着手优化汽车设计中对材料的使用，使设计既能符合安全标准，又能减轻对环境的影响。

作者 LEXI CARVER

在顾及产品的安全性及对环境影响的同时，还要控制设计的成本，汽车制造商在产品开发过程中需要考虑的因素之多，令人震惊。对于不断提升的驾驶安全标准以及越来越受关注的减排和成本控制，车辆的设计和车身重量是能够对上述关注点产生重要影响的两大因素。

汽车制造商依靠激光拼焊板 (laser welded blank, 简称 LWB) 来控制或减少车辆各部件 (如车架和车身) 的材料用量。LWB 是由厚度和等级不同的钣金组成，参见图 1 中的 LWB 应用示例。在满足其他相关规定的同时，这些焊板还必须符合车辆碰撞安全性的要求。

安赛乐米塔尔 (ArcelorMittal) 是一家生产高强度优质钢的公司。这家公司利用数值仿真不断优化 LWB 焊接工艺，通过寻找焊接钢板的等级和厚度这两项参数的最优组合，使他们制造出的焊板既能保证优良的性能，又可将零件的重量减至最轻。

» 符合碰撞和排放要求

“通过采用先进的高强度压力硬化钢，我们对钢板的安装进行了优化，从而使汽车的特定区域在保持强

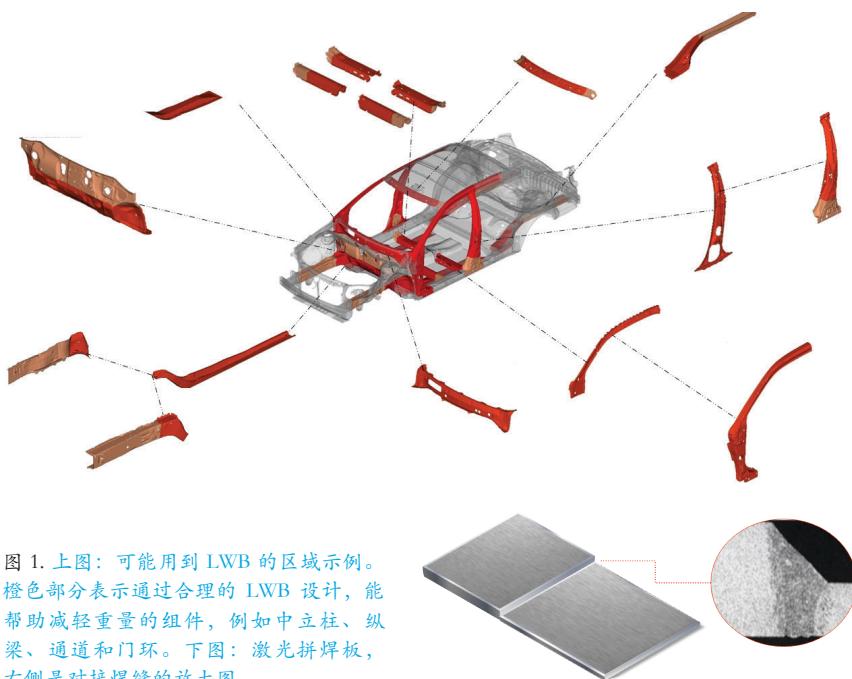


图 1. 上图：可能用到 LWB 的区域示例。橙色部分表示通过合理的 LWB 设计，能帮助减轻重量的组件，例如中立柱、纵梁、通道和门环。下图：激光拼焊板，右侧是对接焊缝的放大图。

度性能的同时更加轻薄。最终，我们期望获得卓越的焊接质量，以确保焊接符合碰撞测试的安全要求”，安赛乐米塔尔公司焊接过程建模及仿真研究团队的负责人 Sadok Gaied 博士如是说。一个安全的焊接不能在测试过程中发生破裂或折断，否则焊接件将无法通过安全性测试。

安赛乐米塔尔公司利用激光焊接的集中热源将固态钢转变成熔融金属，用来形成窄而深的焊缝，激光焊接过程见图 2。“大功率激光器可以产生大量的能量，致使部分金属蒸发。钢在熔化过程中，密度会迅速减小，体积会相应增加，并且物质运动也会增强，从而产生高压蒸气。这时会生成一个‘匙孔’，它是

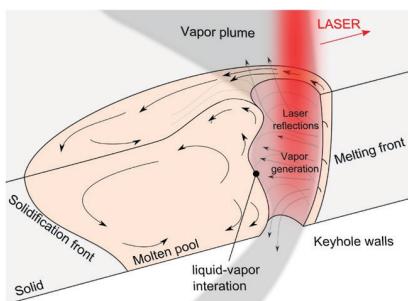


图 2. 激光焊接过程中的匙孔和钢水池。当激光沿两块钢板之间的焊缝移动时，匙孔也会随之移动，在此过程中，钢水会不断注入匙孔周围和后部的空间。图注：Vapor plume - 蒸气羽；LASER - 激光；Laser reflections - 激光反射；Vapor generation - 蒸气发生；Melting front - 熔化前沿；Keyhole walls - 匙孔壁；liquid - vapor interaction - 液体 - 蒸气相互作用；Molten pool - 熔池；Solidification front - 凝固前沿；Solid - 固态

激光冲击点上的一个窄孔。”Gaided 解释道，“这个孔周围的钢会熔化，形成一个熔池。液态钢冷却后，就会将两块钣金连接起来。”

“多数机械故障发生的根本原因在于焊缝中存在缺陷，这是因为焊接点连接着不同的材料。如果连接的处理不当，最终会导致其中的应力过大。”焊接参数不当还可能造成焊接点不稳定，导致焊缝中出现气孔、部分熔透或咬边，最终造成连接不牢固。图 3 显示了不同焊接缺陷的示例。

“我们可以测试工作条件对缺陷发生概率的影响，而且还能预测流体动力学、热力学行为和焊接点的最终形态。”

— SADOK GAIED, 安赛乐米塔尔公司项目经理

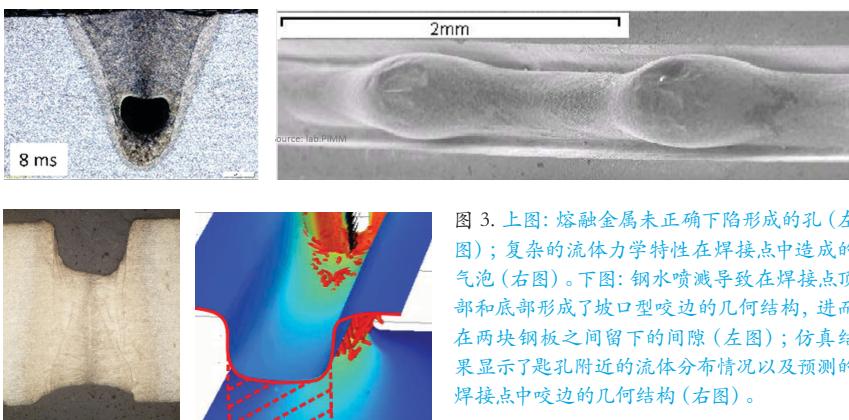


图 3. 上图：熔融金属未正确下陷形成的孔（左图）；复杂的流体动力学特性在焊接点中造成的气泡（右图）。下图：钢水飞溅导致在焊接点顶部和底部形成了坡口型咬边的几何结构，进而在两块钢板之间留下的间隙（左图）；仿真结果显示了匙孔附近的流体分布情况以及预测的焊接点中咬边的几何结构（右图）。

Gaided 补充道：“为了预测各种焊接情况中可能存在的缺陷，我们用仿真来研究诸如激光功率等参数对焊接结果的影响。通过这种方式，我们可以虚拟测试加工条件对缺陷发生概率的影响，并且还能预测焊接过程中的流体动力学、热力学行为以及焊接点的最终形态。”

了解工作条件如何影响焊接质量

在影响焊接质量的诸多因素中，激光功率、材料对激光束的反射、焊接速度及波长等细节都会对匙孔周围的传热、相变和流体流动产生影响。特别是由于存在相变和热载荷，匙孔角度和熔池形状会对流体流动特性产生较大的影响。

“流体、热力学和电学行为在这里交织在一起。”Gaided 说，“只有清楚地了解焊接中发生的具体情况，才能防止这些缺陷的产生。我们需要将所有的物理现象放在一起研究，才能跟踪匙孔内部及周围的流体流动，并明确地知道其对焊接稳定性产生的影响。”

Gaided 的团队与南布列塔尼大学

的 Mickael Courtois、Muriel Carin 和 Philippe Le Masson 合作，使用 COMSOL Multiphysics® 软件分析了钢水和固态钢中的温度分布、匙孔角度以及流场在整个焊接工艺中的变化情况。他们使用 COMSOL® 软件在同一仿真模型中进行了多项研究，从电磁模型开始着手，根据激光反射角确定了反射和材料的能量吸收特性（见图 4）。

不仅如此，他们还测试了改变功率水平、波长和焊接速度，用于预测各种工况下的匙孔形状。由于这个模型模拟了金属熔化时的传热和相变情况，因此，团队成员能够使用该模型分析焊接过程中产生的蒸发现象、液体-蒸气界面的流体动力学，以及熔池的扩大情况（如图 5 所示）。

对耦合现象的建模揭示了最终的焊接结果

为了预测焊接点的最终形态，Gaided 的团队和来自南布列塔尼大学的研究小组在前期研究的基础上，根据焊接速度、激光功率及匙孔大小这三个参数，对焊接熔深进行了建模。

高质量焊接需要对钢板全熔透。当能量密度有限、功率过低或焊接速度较快时，将会发生局部熔透。局部熔透会引起材料咬边，最终在两块焊板之间留下间隙。图 6 显示了焊接熔深和焊接缺陷形态的 COMSOL 分析结果与实验结果的对比。

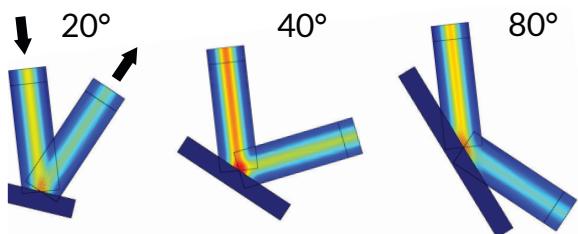


图 4. COMSOL® 软件运行的激光反射仿真结果显示了不同反射角下的电场模，这些不同的反射角导致吸收的能量大小也各不相同。

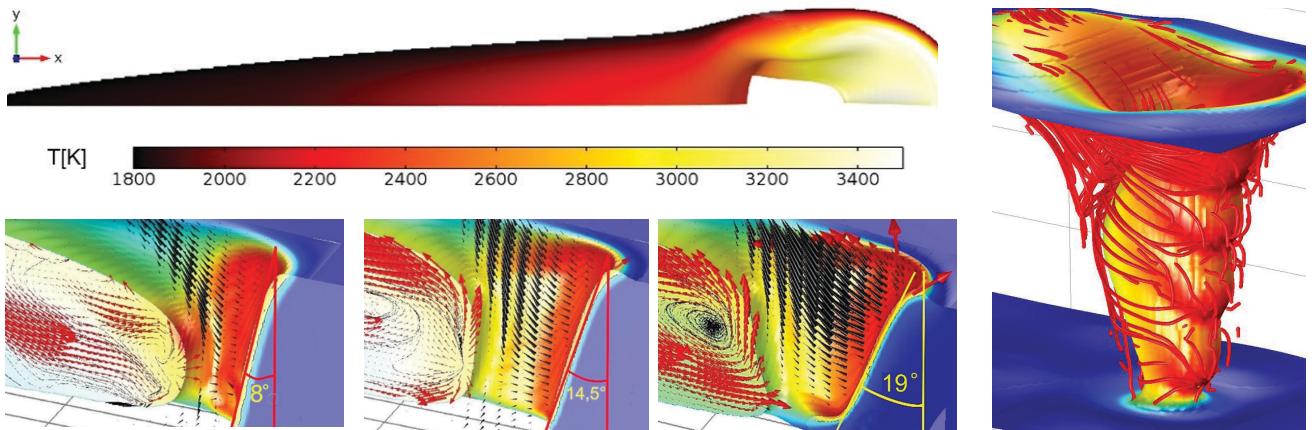


图 5. 左上图：匙孔周围流动钢水的温度场。左下图：不同焊接速度下的毛细管倾角（匙孔角度）及周围金属的温度场结果，箭头表示熔池和匙孔中的流体流动。右图：匙孔形成过程中，其周围的流体流动三维视图。^[1]

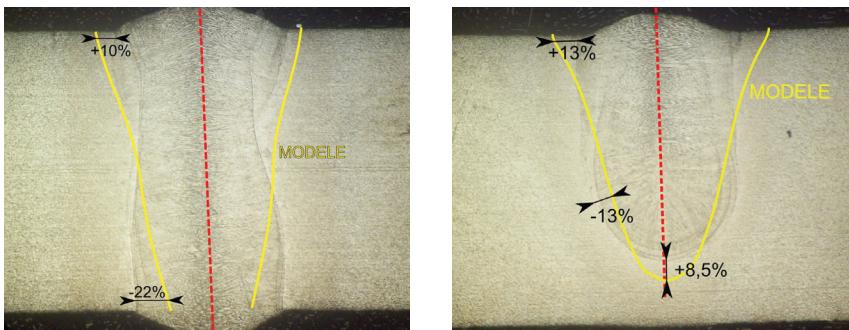


图 6. 焊接熔深和焊接缺陷形态的 COMSOL 分析结果（黄色曲线）与实验结果的对比如。左图和右图分别为当激光功率为 4 kW、焊接速度为 6 m/min 和 8 m/min 时的焊接熔深。速度较慢时可实现全熔透，说明熔敷能量密度足够高。速度较快时仅仅实现了局部熔透，说明能量不足，无法达到高质量的焊接。^[2]

» 不断完善的焊接技术以确保安全与减排要求

为客户提供合适的激光拼焊板，需要选择正确的焊接参数组合。通过调整钢板的等级和厚度才能为客户供应符合汽车碰撞测试规范、重量要求以及成本要求的激光拼焊板。Gaed 的团队通过仿真来确定一系列工艺条件，以确保生产出无缺陷的焊接点。

“了解这些相互作用的物理现象，并将它们耦合起来进行仿真，而不是并行进行多个研究，这给我们的工作带来了极大的便利。” Gaied 总结道，“我们一直致力于帮助汽车行业减轻车身重量，并确保我们的焊接产品拥有卓越的质量，从而保障驾驶员在驾驶汽车时的安全。”



从左到右依次为：安赛乐米塔尔公司的 Sadok Gaied，南布列塔尼大学的 Philippe Le Masson，Mickael Courtois 和 Muriel Carin。

参考文献

¹ M. Courtois, M. Carin, P. Le Masson, S. Gaied, M. Balabane. Guidelines in the experimental validation of a 3D heat and fluid flow model of keyhole laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* (2016), 49 (15)

² M. Courtois, M. Carin, P. Le Masson, S. Gaied, M. Balabane. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modeling in laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* (2013), 46 (50)

“我们一直致力于帮助汽车行业减轻车身重量，并确保我们的焊接产品拥有卓越的质量，从而保障驾驶员在驾驶时的安全。”

— SADOK GAIED, 安赛乐米塔尔公司项目经理

操控声音：仿真助力声学超材料的前沿研究

从消费类电声产品到超声成像，声学隐形技术的应用十分广泛。对其使用的超材料结构进行研究，无疑是一次意义深远、激动人心的探索。通过对变换声学和高度各向异性结构的研究，科学家们正借助仿真分析设计声学超材料。

作者 **GEMMA CHURCH** 和 **VALERIO MARRA**

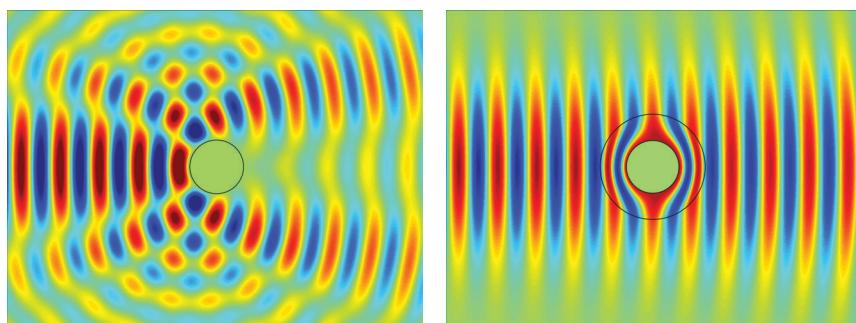


图 1. 控制由物体引起的声波散射。左图：声波由刚性物体左侧入射时，由于障碍物的影响，散射非常明显：声波呈现准镜面反射，物体背后阴影较深，一部分声波全向传播。右图：在同一物体周围施加以理想隐形外罩，我们可以看到，反射和阴影都不复存在，能量绕过超材料物体继续传播，这一过程看上去几乎没有任何损耗。

超材料是一种特制的人造材料，具有天然材料不具备的性能，例如折射率为零，甚至为负值。研究人员可以利用这种材料进行前沿设计和功能创新，例如超级透镜和吸音器等。近年来，研发人员已将研究重点转向利用超材料装置来随意操纵声波，其中包括让物体在声学上达到隐形。

这项研究已经获得成功。美国杜克大学的工程师们仅利用一些冲孔塑料板，经过了大量的数学建模和数值仿真工作，终于向世人展示了首件三维的声学隐形斗篷。这一装置能使物体周围的声波平滑地弯曲，填充到物体之后的阴影空间，从而造成声波始

终在周围空气中以直线传播的错觉。

声学隐形仅仅是变换声学这一广义概念中的一个方面，经过了精心设计的材料几乎可以任意地使声波产生变形并加以控制。从科幻小说到现实世界，这项技术的突破性进展在许多领域具有非常广泛的潜在应用。

» 静音超材料的设计

杜克大学联合麻省理工学院、加州大学伯克利分校、罗格斯大学以及德克萨斯大学奥斯汀分校，在美国海军研究办公室的赞助下成立了一个隶属于“五年研究计划”的子项目，其目标是开发一种声学超材料的新概

念：即包含有效材料参数并可在真实世界被实际制造出来。杜克大学电子与计算机工程系的 Steve Cummer 教授表示：“数学模型是研究工作的起点。我们借助数值仿真对声学超材料的设计进行优化，然后再将它转化为现代制造技术并进行实验测试。”

该研究小组目前的工作重点之一是开发出可在水相环境（包括人体在内）中使用的声学超材料结构，以便能够任意变换并控制传入的声波。事实证明，声学隐形结构（见图 1）是一个非常有用的测试平台，它能形象地展示人们可以借助变换声学来随心所欲地控制声音。这些针对水相环境的设计昭示着超材料研究方向正在发生转变：从最初的电磁隐形和变换光学，发展为现在用于空气中的声学隐形和变换声学，同时应用范围也从二维结构发展为空间三维结构。

从最早的电磁隐形研究开始，COMSOL Multiphysics® 软件就在此类研究的各个阶段起着至关重要的作用。Cummer 介绍说：“我们的第一篇论文展示了使用真实的电磁材料参数来对电磁隐形进行仿真的过程，当时我们使用了 COMSOL® 软件来进行仿真，

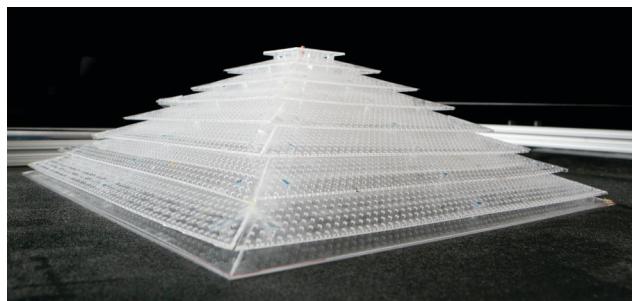
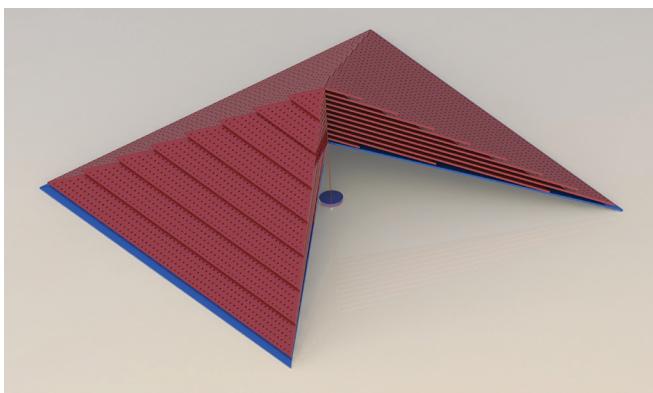


图 2. 金字塔形三维声学隐形外罩的设计图 (左) 和构造图 (右)。

因为它是仅有的几款能够任意调节各向异性电磁材料参数的电磁分析软件工具之一。”

为了解决声学问题, 研究人员便开始着手推导所需的材料属性。Cummer 解释说: “为了使用变换声学来随意控制声音, 我们首先应用坐标变换来描述如何使声场在指定的装置中按期望发生弯曲、扭曲或变形。一旦定义好坐标变换, 就可以推导出使声场发生特定变形所需的有效材料参数。”

分析得到的这组材料参数几乎全部都呈各向异性, 这意味着在不同方向的材料属性都是不同的。为此, 研究人员必须有能力改变在仿真过程中用于表征物理场的方程。“借助 COMSOL 软件, 调节材料属性和底层的动力学方程都变得非常简单直观。这一点十分重要, 因为我们可以将一个额外的各向异性扭曲添加到模型中, 并开始仿真我们曾在变换声学探索过的一些设计。” Cummer 补充道。

据 Cummer 介绍, 他们的设计已大获成功, 最终得到的材料的实际性能与仿真结果“惊人地吻合”。“如果你想检测得到的某个结构是否契合你的设计并产生符合预期的物理效应, 超材料领域文献中的黄金标准会建议你由声学超材料产生的完整声场进

“ 借助 COMSOL 软件, 调节材料属性和底层的动力学方程都变得非常简单直观。

— STEVE CUMMER, 杜克大学电子与计算机工程系教授

行测量, 并将测量数据与仿真结果进行对比。”他补充道。

在研究中即使无法避免地出现了人为误差, COMSOL 软件还是能始终如一地给出正确的结果。在早期的一个项目中, 研究人员设计并构造了一个具有一连串细微孔状结构的二维声学隐形外罩, 但实验测试结果与仿真结果却并不相符。团队成员当时迷惑

不解, 无从发现导致此问题产生的实质原因。后来他们才突然意识到, 在构造隐形外罩过程中, 研究人员曾将不同的孔径参数搞混, 这才导致了结构中的微孔的尺寸错误。

Cummer 说: “COMSOL 软件带来的高效率对我们的工作至关重要, 使我们有充足的时间和精力可以对理想的参数和实际要构建的完整结构分别运行数值

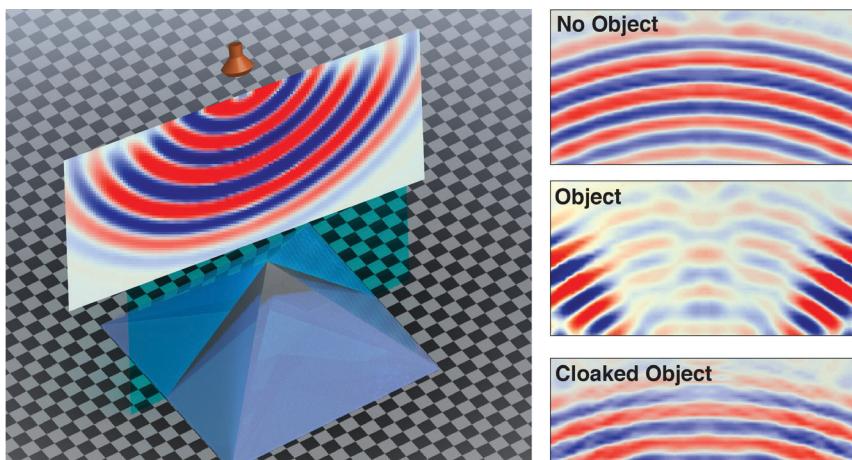


图 3. 左图: 为了测试超材料外罩, 研究人员以三种不同的方式发射声波脉冲, 并使用扫描麦克风测量反射的声波脉冲。右图: 被测物体反射的声波脉冲与未放置物体时反射的声波脉冲截然不同。当将物体置于隐形外罩下方时, 反射的脉冲与未放置物体时反射的脉冲几乎相同, 由此可见隐形外罩的声学隐形作用。图注: No object - 无物体; Object - 有物体; Cloaked Object - 物体被隐形

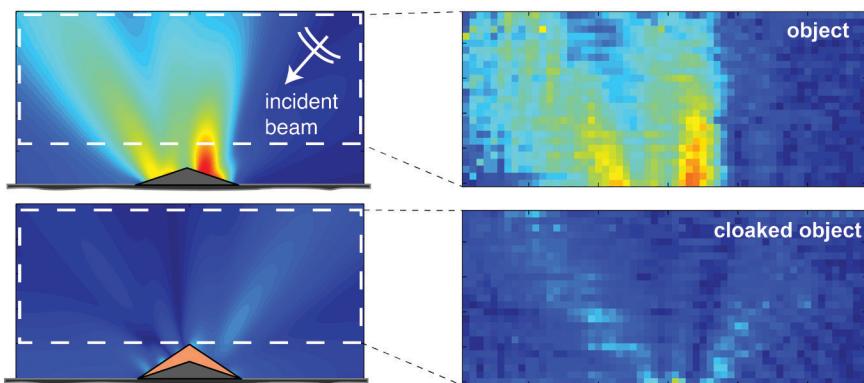


图4. 散射声场的仿真结果(左图)与测量结果(右图)完全吻合,这不仅显示了物体的声学隐形程度,还证实了 COMSOL Multiphysics® 能够精确地预测出制造装置的性能。图注: incident beam - 入射波束; Object - 有物体; Cloaked Object - 物体被隐形

仿真,进而验证其结果的一致性。”

» 声学超材料的制造与测试

三维声学隐形外罩的设计采用了与二维外罩相同的多孔板作为基本结构,整体结构呈金字塔形(见图 2)。放置在这个结构外罩下的物体能够躲避声波。这一结构乍看起来是一个十分简单的设计,但实际上需要平衡包括孔径、板间距以及板材夹角在内的诸多因素才能达到理想的声学变换。只有当所有参数结合起来才能构成恰到好处的声学各向异性,从而使这一结构达到预期的性能。这个金字塔结构是世界上第一件三维声学隐形装置,经实验室测量确认,它能够重新设定声波路径,从而制造出此装置及其下方的物体都不存在的错觉(见图 3)。无论声音来自哪个方向、观察者身在何处,该装置都可以在整个三维尺度上发挥作用。这项研究可以用于例如声呐回避和建筑声学等领域,在未来的应用前景十分广阔、潜力无限。

如果声学超材料外罩的厚度设置合理,声学隐形装置在建筑声学领域的应用就会得到进一步的发展,例如,这些装置可以用来提升音乐厅的音响效

果,或者减少餐厅等公共场所中的噪音。Cummer 说道:“隐形材料不是涂抹在物体上就能起作用的神奇涂料。总的来说,这类材料不太可能以这种方式被运用在实际的应用中。”

除了设计阶段,建模和仿真还可用于定量地预测这种超材料外罩的性能,其中包括详细分析二维隐形外罩运行过程中的声波散射情况(见图 4)。COMSOL 软件不仅能显示这种外罩对散射场的衰减量,还能通过对散射场衰减的精确预测来优化声学超材料的加工。

» 从空气到水: 不同介质,全新挑战

现今,研究人员已经将注意力转向了如何在水相环境(例如水下或人体内)中使用声学超材料。多物理场建模在该研究中已经成为主要的设计工具。在设计过程中,研究人员首先构建出之前设计的结构,然后运行仿真来测试超材料在水中的表现。将超材料的应用从空气转向水,这听起来简单,做起来却绝非易事。

问题的关键在于空气和水的力学

属性完全不同。Cummer 解释道:“在空气中控制声场流动时,固体实质上可以被看作是完美的刚性结构,因此超材料的成分其实是无关紧要的。这就是为什么我们能够在空气中使用塑料或是其他合适的固体物质来构造声学超材料的原因。”

但在密度和抗压刚度方面,水和固体材料却相差不大。“当声波冲击水中的固体结构时,固体物质的力学性质就变得非常重要了。我们需要在设计阶段进行技术创新,才能控制声波能量与固体结构相互作用的方式,从而使那些我们需要的特性得以保持。”他补充道。

“在研究中将声学 and 结构力学巧妙结合的能力是不可或缺的,这尤其体现在处理水中的结构问题时。因为当我们在水中使用固体材料来构造超材料时,材料的力学响应是不能忽略的。在空气声学中,我们可以将固体看作是近似刚性的材料,这不仅能使问题变得简单,还能提高计算效率;但对于在水中使用的材料,则必须考虑流体与结构的相互作用,这个问题可以轻松地在 COMSOL 软件中解决。”

要将声学超材料结构的研究成果商业化远非易事,这要求设计出的结构能够被重复可靠的加工出来。Cummer 总结道:“声学超材料制造面临的下一个问题是如何能达到具体的量化指标。这意味着我们的设计流程将变得更加复杂,然而这恰好是 COMSOL 软件拥有的最大优势。它支持更多的设计迭代次数,并具备智能的优化功能,让我们可以在设计过程中确定自由度,进而达到具体的数值目标。COMSOL 软件的这些优势正是推动我们的研究前行的关键。它将我们的想法从概念验证演示转化成为了现实条件下切实可行的方案。”

汽车音响系统的虚拟调制

哈曼 (HARMAN) 公司的专业人员正致力于将物理实验与仿真建模结合使用, 以期改进最新车载信息娱乐技术的开发流程。

作者 LEXI CARVER

如今的汽车, 通过智能手机连接、交互式显示屏和车载电视屏幕, 能够为用户提供令人眼花缭乱各类电子娱乐设施。哈曼公司 (HARMAN, 以下简称哈曼) 是“智联汽车”解决方案的市场领导者, 他们为全世界数量超过 80% 的豪华型轿车配备了高级音响系统。

车载音响的理想安装位置、扬声器的朝向和封装、驾驶室的几何结构 (例如车门) 等细节都会对音响的音质产生影响, 所以每一款车型都需要有独特的配置。哈曼的声学 and 仿真专业团队在设计过程中必须综合考虑上述的各个方面, 以确保不同车型与车载音响系统的完美契合。

在制作实体样机之前, 哈曼的研发团队会结合仿真分析进行虚拟测试, 通过虚拟“调制”整个系统来加速产品研发进程。这套方案支持使用虚拟测试取代原位测听, 可以大幅节省物理测试时间, 从而使该团队的成



图 1. 放置于车内的扬声器。

员能够在汽车最终的设计确定前就开始着手设计车载音响产品。

“当一款汽车处于研发初期, 其设计者还尚未确定需要怎样的车载音响系统时, 我们就已经可以参与其中了。”哈曼公司虚拟产品开发 (Virtual Product Development and Tools, 简称 VPD) 部门的高级经理 Michael Strauss 解释道, “换句话说, 我们只需要得到车厢的尺寸和体积这一类基本的设计参数就可以开始设计了。然而很多时候, 我们需要在几天内针对用户的需求提供一套完整的设计方案, 这对我们来说是一个很大的挑战。”

» 仿真和实验的协作提高客户满意度

为了准确而快速地响应客户的各类需求, 哈曼公司的工程师们开始借助 COMSOL Multiphysics® 软件的数学建模功能。“我们需要在同一个环境中综合实现力学、声学及电气学等多个物理场仿真的功能, 以及一个能够在我们创建和更新自己的工具时, 帮助我们节省大量时间和精力平台。”哈曼公司的资深声学工程师 François Malbos 说。

“多物理场仿真是虚拟产品研发过程中最为重要的环节之一。”哈曼公司 VPD 部门负责人 Michał Bogdanski 表示, “这让我们能够研究扬声器与车辆结构的任意部件 (如车门刚度)

之间相互作用而产生的声学行为, 并据此为我们的客户提供设计指导。”

在曾经的一个项目中, 他们对梅赛德斯-奔驰的一款 ML 级汽车 (见图 1) 车厢内的扬声器产生的声压级进行了测量和模拟, 目的是验证数值模型, 并随后将模型用于优化音响设备的设计。“运行车厢仿真是最具挑战性的工作之一, 因为这其中涉及很多不同的物理领域。”Strauss 解释说。幸运的是, COMSOL® 软件提供的强大功能可以让研究人员将整个系统中的声学、力学和电场效应耦合到一起。

为支持全公司的工程项目, Michael Strauss 的团队构建了一个由经过验证的模型和已知有效的解决方案整合而成的数据库, 通过这个库可以对各种类型的扬声器配置进行性能预测。“从宏观趋势分析到检测辅助系统性能的细节设计, 我们能够满足客户的各种需求。”他继续补充道。

» 车辆扬声器的性能分析

在一项研究中, 哈曼公司的工程师们使用 COMSOL 软件对车厢内的音响系统进行了仿真, 目的是针对低频声波来优化扬声器的音效。随后他们设计了一系列测试方案来验证这个模

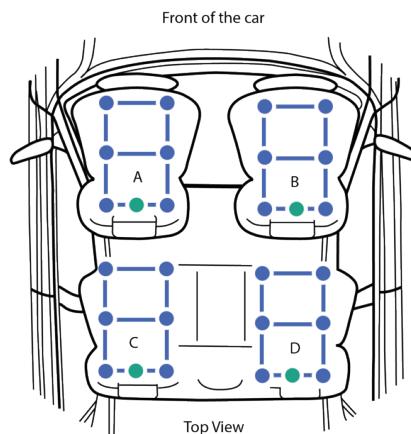


图 2. 放置于车内四个不同位置的麦克风阵列的俯视图。图注: Front of the car - 车前部; top view - 俯视图



图 3. 哈曼公司提供的车厢三维扫描图。

型。一旦模型通过了验证，哈曼公司的研究团队就能基于这一模型针对特定车型提出最佳的扬声器设置方案。

在验证测试中，扬声器安装在汽车驾驶员座椅旁边的刚性外壳上。整个车厢内使用了四组麦克风阵列来测量每个位置的平均声压级（见图 2）。

当频率低于 1 kHz 时，扬声器可以被表示为固定在简化的集总参数模型（LPM）上的刚性平面活塞，模型中考虑了音圈终端电压以及悬挂系统和扬声器音膜表面的刚度。研究人员通过手动三维扫描生成了车厢的几何结构图（见图 3）。通过使用 MATLAB® 软件中的预处理算法以及 COMSOL® 软件中的“LiveLink™ for MATLAB® 模块”（用来在这两个程序之间建立双向链接），该团队可以将扫描得到的点云转换成车厢表面的网格（见图 4），将网格优化后就可以对声压力波进行研究。

车内的挡风玻璃、地板、座椅、头枕、方向盘以及其他部位（例如车顶、车门和仪表盘等）的材料都具有

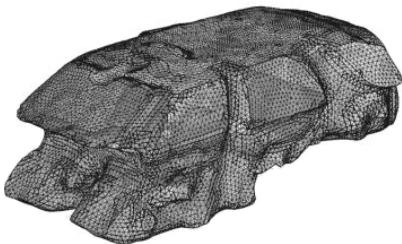


图 4. 车厢表面网格图。

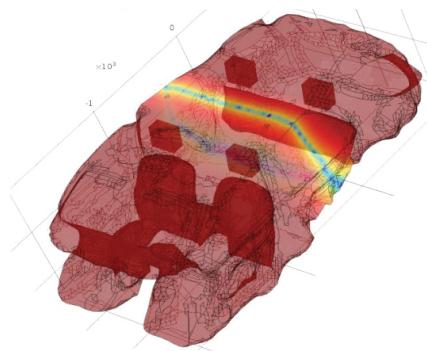
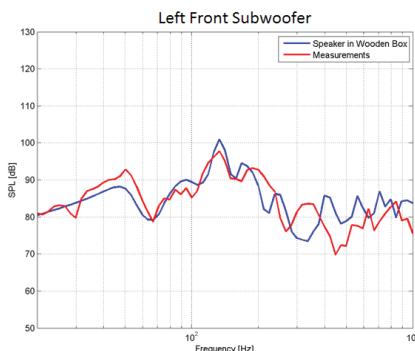


图 5. 其中一组麦克风阵列的声压级测试结果（左图）和整个车厢的声压级分布（右图）。

不同的吸收特性，仿真分析了扬声器产生的声波与上述不同材料之间的相互作用。

» 优化声学模型

除了考虑到多种不同材料的吸收特性的问题，该团队还根据外壳体积，通过 LiveLink™ for MATLAB® 定义了扬声器音膜的运动和加速度，并开发出特定的 MATLAB® 软件脚本，用于简化预处理和后处理操作。

“我们对每一步都进行了全面的优化和自动化处理，这样就不必计算每个案例的加速度，因为当一个仿真结束时，下一个便会自动启动。” Bogdanski 解释道，“如此一来，就能确保整个流程简单无误，而我们只需要运行脚本就可以了。”

不仅如此，该团队还优化了与频率相关的吸收系数，这些数据是在声压的测量结果与仿真结果之间建立强相关性的必要因素。分析结果还显示了每组麦克风阵列测定的声压级（见图 5）。

» 虚拟调制引导技术革新

有了这些通过验证的仿真，哈曼公司就能在车辆设计阶段便着手开发音响系统。而声学工程师只需要在试车阶段进入车内对音响进行微调。他们目前正在构建一种回放系统。

“让试听人员可以基于仿真结果和信

号处理，试听、评估、比较各类优化的音响系统中的超低音、中音及高音效果。” Malbos 指出，“在虚拟模型中修改设计比重建实体原型要快得多。” 试听测试表明这一科学方法能够成功地取代原位试听。

完全基于仿真来评估音响系统的效果，这大幅提升了哈曼公司产品开发过程的质量和速度、提高了客户的反馈效率、降低了修改设计的成本，同时还让工程师们在设计过程中拥有了更大的发挥空间。

“仿真的魅力在于系统工程师能够无需接触汽车，只需头戴耳机置身桌前，就能调制系统。借助仿真，即使一套被提议的音响系统还没有实体原型，我们也能够评估、优化以及预测其性能。” Strauss 总结道。◎



哈曼公司 VPD 团队成员：François Malbos、Michael Strauss 和 Michal Bogdański。

设计低功耗光开关 应对日益增长的网络流量

为了推动通信技术和高性能计算产业的发展，华为技术有限公司加拿大分公司正致力于研发热光型硅光开关。借助仿真分析对设计进行优化，力图最大程度地提升光开关的转换速度，同时将器件的功耗降至最低。

作者 JENNIFER SEGUI

早在数十年前，研究人员就设想过全光学传输网络，希望利用其高速传输的潜力来满足人们对网络性能不断增长的需求。目前，光开关已经被广泛部署在城际网络和远程网络中，数据中心的相关实验及高性能计算的研发也正在持续地同步推进中。华为技术有限公司加拿大分公司（以下简称“华为”）正在研究如何利用硅光（SiPh）技术从根本上提升核心光学元

件（如光开关）的性能。

光学网络利用光波进行数据传输，拨打电话、处理搜索请求或电子邮件都是光学网络常见的用例。网络中的各个点之间要进行数据传

输，传统方法是先将光信号转换成电信号，完成交换后，再将电信号重新转换回光信号（见图 1）。转换信号时需要使用大型高耗电设备，这会导致每转换一个数据包都会增加延迟时间。相比之下，光开关无需转换信号格式，因此这种开关往往交换更加快速、尺寸更加小巧，并且具有更低的功耗。

然而，目前的光开关不仅体积庞大，而且价格昂贵，许多元件还需要人工组装。为了解决这些问题，华为正在利用集成硅光技术开发一种新型光路，这种光路是在 CMOS（互补金属氧化物半导体）芯片代工厂中进行生产的。这项技术得以实现是因为硅在信号波长范围内是透明的。

华为的开发人员们正借助集成设计环境来制作一些世界上最复杂的硅光路原型机。在整个迭代的原型开发周期中，开发人员会不断调整数值物理模型以提高其精度，同时还借助光路设计软件来确保芯片设计可一次成功。热光型硅光开关的热力学性能分析是整个设计工作流程的核心环节。

采用相移型热光开关 交换数据

研发中的热光开关是一种硅光马赫-曾德尔（Mach-Zehnder，简称 MZ）干涉仪，具有交叉和直通两

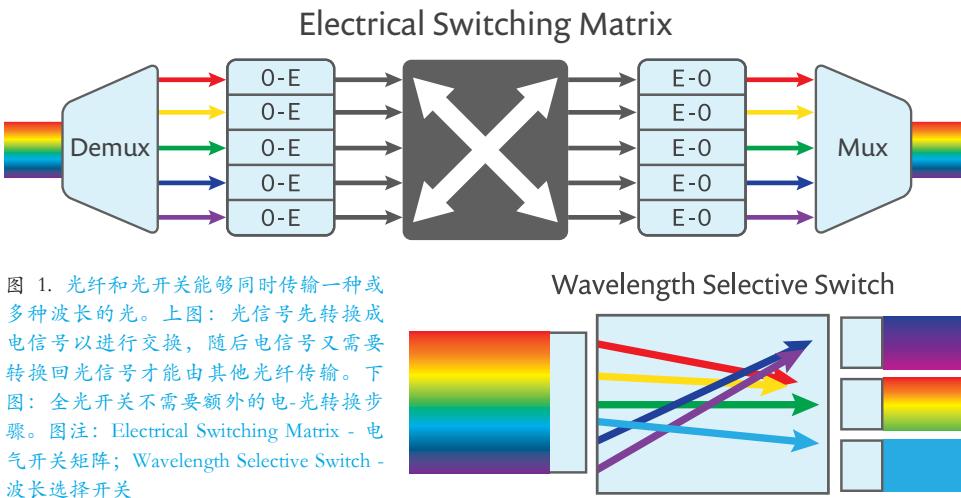


图 1. 光纤和光开关能够同时传输一种或多种波长的光。上图：光信号先转换成电信号以进行交换，随后电信号又需要转换回光信号才能由其他光纤传输。下图：全光开关不需要额外的电-光转换步骤。图注：Electrical Switching Matrix - 电气开关矩阵；Wavelength Selective Switch - 波长选择开关

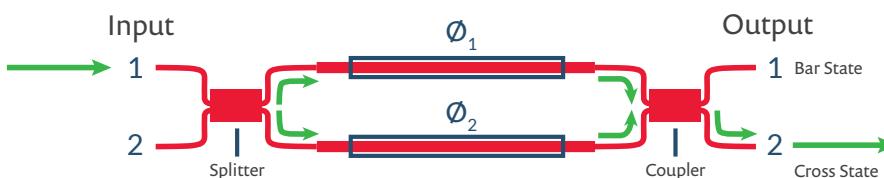


图 2. 在 MZ 干涉仪中，光进入输入波导后被分成两束并分别进入两个支臂，光波会根据每个支臂的光学特性在其中产生相移。耦合波会在输出端口发生相长干涉和相消干涉，分别表示光开关的交叉态和直通态。绿色路径显示的是开关的默认状态。图注：Input - 输入；Splitter - 分流器；Output - 输出；Coupler - 耦合器；Bar State - 直通态；Cross State - 交叉态

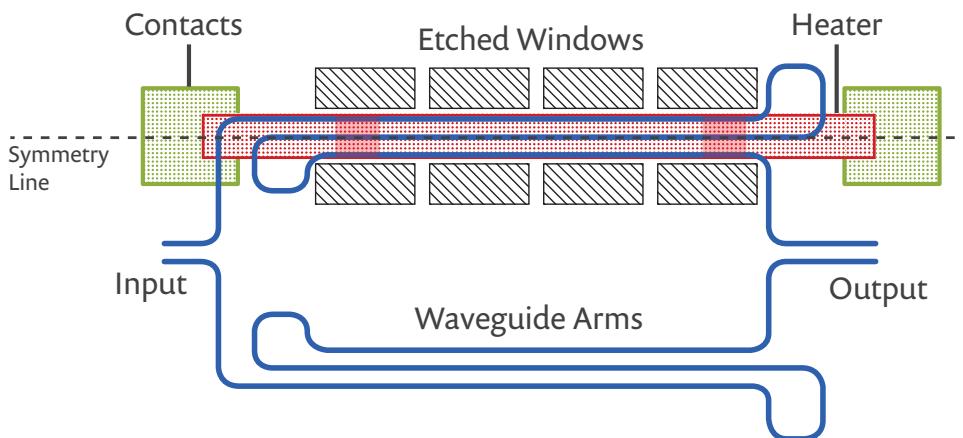
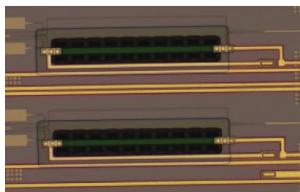


图 3. 上图为具有热下切的热光 MZ 移相器示意图，其中一条波导臂（蓝色）上方安装了电阻加热器（粉色阴影区域），用来改变折射率，从而使光波在传播时产生相移。下方的照片显示了加热波导的实物图。图注：Symmetry Line - 对称线；Contacts - 接触；Input - 输入；Etched Windows - 刻蚀窗口；Waveguide Arms - 波导臂；Heater - 加热器；Output - 输出



种状态。默认情况下，MZ 干涉仪处于交叉状态（见图 2）。光波在到达输入端口（如端口 1）时被分成两束，并沿两条支臂传播。当两支臂中的光在到达输出耦合器时会发生干涉，其相对相位导致最终所有的光都会从输出端口 2 输出。

热致相移为我们提供了一种切换开关状态的方式。通过对其中一条支臂进行加热，可将 MZ 热光开关切换到直通态。加热过程可以改变波导的折射率，从而使在这条支臂中传播的光产生 π 相移。干涉作用使得光从输出端口 1 输出，由此将数据传送到不同的目的地。通过将大量的开关单元集成到单个芯片上，可以制造一个大型的开关矩阵。

图 3 展示了华为的 MZ 开关设计。当光进入开关后，在两条折叠的波导臂（蓝线表示）中被分成两束。其中一条支臂上配备了氮化钛（TiN）电阻加热器，图 3 中用粉色阴影区域表示。在对接触电极施加电压后，加热器底层波导的温度将会升高并产生 π 相移，从而引起开关状态的改变。三折波导可以增加加热器与波导相互作用的距离，如此一来，便能将效率提升至原来的三倍。

图 3 中展示的热光开关的加热波导臂是一种悬挂结构，通过刻蚀掉其周围的包层材料，形成了热下切（thermal undercut）。图 4 显示了有热下切和无热下切时的加热波导臂的剖

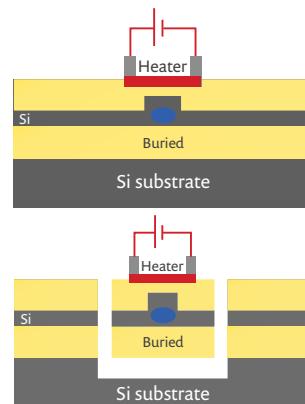


图 4. 上图和下图分别显示了无热下切和有热下切的 MZ 热光开关的加热波导臂剖面图。热下切可以将波导和加热器隔开，从而减少热量向周围材料的散失。图注：Heater - 加热器；Buried - 埋层；Si substrate - 硅衬底

面图。热下切可以防止向底层基板传热，促使加热器对掩埋式波导的升温效率提高 23 倍，并因此减少了 96% 的功耗。

» 热分析和设计优化

不仅要同时满足功耗、交换速度及尺寸的要求，还需要考虑热下切的制备设计规则，这使得对 MZ 热光开关进行优化面临着很大的难题。为了确定最终设计，研究人员借助 COMSOL Multiphysics® 软件的热分析能力，能够在

制造物理原型之前对创新设计进行有效的定量评估。

“在产品进行大规模量产之前，我们需要对设计进行彻底的优化。在这一过程中，每毫瓦的功耗都不容小觑。”华为高级研发工程师 Dritan Celso 说道。鉴于此，他们在硅光器件的集成设计环境中启用了 COMSOL® 软件。

举个例子，热分析被用来对不同热光设计的性能进行量化分析。因为热下切的存在会给制造过程增加额外的步骤，所以是否在热光设

“在产品进行大规模量产之前，我们需要进行彻底的优化工作，在这一过程中，每毫瓦的功耗都不容忽视。”

— DRITAN CELO, 华为高级研究工程师

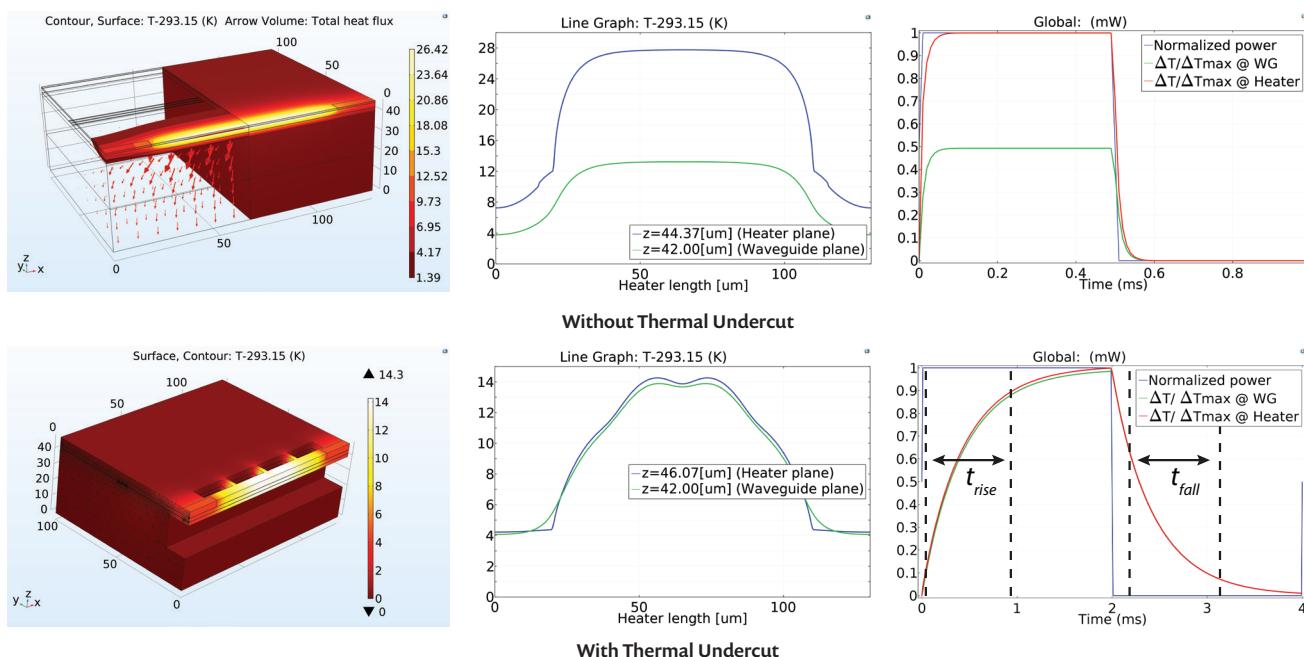


图 5. 利用 COMSOL Multiphysics® 软件建立的热光开关模型，上三张图和下三张图分别显示了无热下切和有热下切的情况。左侧的两张模拟图显示了稳态温度分布、中间的两张图谱显示了加热器与波导之间的温差、右侧两张图谱显示了波导达到目标温度所需时间的瞬态分析。
图注：Without Thermal Undercut - 无热下切；With Thermal Undercut - 有热下切

计中加入热下切成为了一个需要被着重考虑的因素。另外，尽管使用热下切有助于减少器件的功耗，但同时会降低交换速度，所以具有下切的器件几何结构只适用于一些特定的应用领域。

图 3 中显示了在 COMSOL® 软件中绘制的器件几何结构，其中包括无热下切和有热下切这两种情况。为了缩短每次设计中稳态热分析所需的计算时间，基于结构的对称性（在图 3 中以黑色虚线表示），研究人员仅使用了对称结构的一半。生成的几何结构模型见图 5（左侧的两张图），长度为数百微米的硅波导嵌在硅衬底顶部的二氧化

硅中。软件中提供了大量的材料属性选项，研究人员可以方便地从中选择适当的材料属性来定义模型的各个域。由于硅光结构高度的深宽比为 1000:1，因此 COMSOL Multiphysics® 提供的网格剖分算法是快速准确建模的关键。

研究人员对整个器件几何结构中的固体传热进行了建模，对表面钝化层和热下切边界（仅针对有热下切的设计）定义了绝热边界条件。他们将加热波导臂中的氮化钛加热器定义为开关模型中的热源，仿真结果显示了使特定设计产生 π 相移需要施加的热能。为产生 π 相移，波导温度必须以 13.3 K

为单位变化量——这一数值是由光学测量实验确定的。

热光型硅光开关的稳态分析表明，当设计中存在热下切时，实现 π 相移的功耗可降低 23 倍。图 5 中左侧的两张模拟图显示了每个器件中的温度分布情况。中间的两张图谱显示了加热器与波导之间的温差，同时表明了无下切器件向周围材料散热的程度。与无下切设计中 13 K 的温度差相比，具有下切的设计中温度差仅为 0.2 K。瞬态分析采用了对称结构的四分之一，用于进一步缩短计算时间。瞬态分析揭示了将波导调节

到期望温度和相位所需的时间，该时间的长短限制了器件在交叉态与直通态之间的切换速度。尽管有下切的器件更加节能，但它们的调节速度却比不上无下切的器件。图 5 中右侧的两张图谱中显示的上升和下降时间就说明了这一点。

在评估二氧化硅层的厚度、MZ 开关的外形尺寸、器件顶部钝化层的冷却效应等方面的过程中，通过验证的稳态和瞬态模型同样起着至关重要的作用，使器件最大限度地受益于功耗的降低。

» 成千上万的开关集成在单个芯片中

尽管传热仿真的主要目

的是针对单个 MZ 热光开关进行优化，然而在实际应用中，这些开关并不会单独出现，而是用来组成大型的开关阵列（见图 6）。华为研究人员设计这个阵列的目的是为了防止光学串扰，以确保从开关发出的光信号清晰准确。图 6 的上图显示的架构表示一个“32×32”硅光开关阵列，其中包含 448

个“2×2”的 MZ 热光开关单元。每列中都有一条光路穿过其中的一个单元，通过对这些单元施加适当的交叉或直通驱动功率可对光路的路径进行定义。对开关供电会使底层波导升温并产生必要的 π 相移，从而使信号沿选定的路径传播。

图 6 中下图显示了“32×32”开关阵列的实体

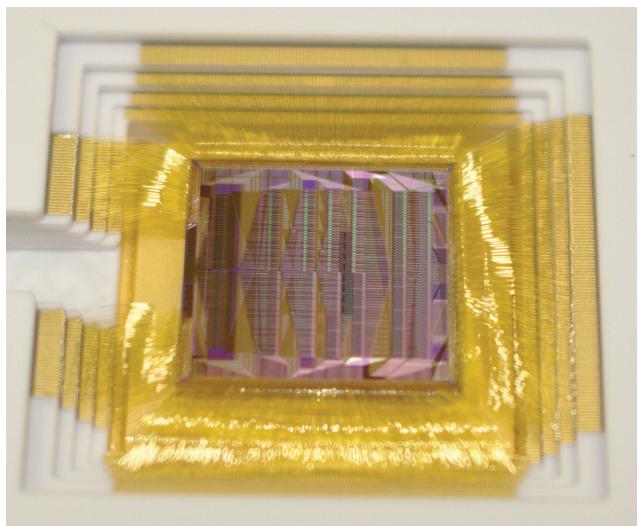
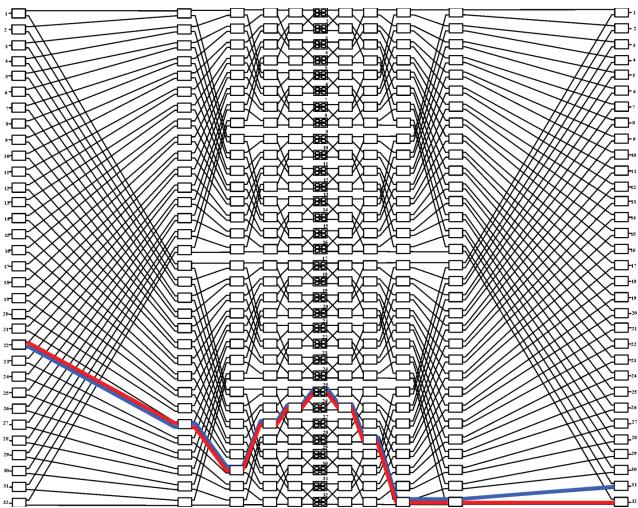


图 6. 上图显示了包含 448 个“2×2”热光 MZ 单元的“32×32”开关阵列，下图显示的是制作原型机，其中的每个单元都在芯片上集成了监控光电二极管。

制作原型，它由具备使用热下切技术来制造硅光器件经验的 CMOS 代工厂生产。这个原型的每个单元都在芯片上集成了监控光电二极管，其目的是用来确定交叉或直通驱动电流。这一原型的实现标志着该研究工作取得了重要进展。

进入原型设计和产品大规模量产阶段后，设计者们又迎来了新的挑战。他们需要在华为内部研发中心和代工厂之间合理分配时间。

“热力学性能虽然只是一个很小的方面，但却是整个器件设计工作流程中的一个重

要环节。”Celo 解释道，“产品的大规模量产阶段即将到来，在制造‘128×128’硅光开关的过程中，要将成千上万的 MZ 单元集成在单个芯片上，同时功耗还需控制在 50 W 以内。并且生产出来的开关可能会在各种不同的环境中使用，这又对产品的机械稳定性提出了要求。目前，对封装开关的结构分析成为了我们关注的焦点。我们将继续利用 COMSOL® 软件的数值仿真功能对设计进行优化，相信这个软件将再次成为我们工作中不可或缺的一部分。”



华为技术有限公司加拿大分公司先进光子学团队成员：Dritan Celo、Eric Bernier 和 Dominic Goodwill。

参考文献

D. Celo, D. J. Goodwill, J. Jiang, P. Dumais, C. Zhang, F. Zhao, X. Tu, C. Zhang, S. Yan, J. He, M. Li, W. Liu, Y. Wei, D. Geng, H. Mehrvar, E. Bernier. *32x32 Silicon Photonic Switch*, presented at *Optoelectronics and Communications Conference/International Conference on Photonics in Switching, Niigata, Japan 2016*.

D. Celo, D. J. Goodwill, J. Jiang, P. Dumais, M. Li, E. Bernier. *Thermo-optic silicon photonics with low power and extreme resilience to over-drive*, presented at *IEEE Optical Interconnects Conference, San Diego, CA 2016*. DOI: 10.1109/OIC.2016.7482994, IEEE.

我们的“5G 未来”： 借助数值仿真驶入 通讯快行线

作者 JIYOUN MUNN

5G 和物联网 (internet of things, 简称 IoT) 是当下射频 (radio frequency, 简称 RF) 与微波行业最热门的话题。现今, 人们的日常活动和技术革新前所未有地依赖高速并可靠的数据通信。这迫使设计人员面临着—项极为严峻的挑战: 将实时数据容量和可用性提升到一个全新的高度。为迎接这个挑战, 设计人员需要采用最先进的设计工具, 并且在信号处理技术、通信设备, 以及更新技术标准等方面取得重大突破。

» 从 4G LTE 到 5G

研究人员预计, 在部署有源电子扫描阵列 (active electronically scanned arrays, 简称 AESA) 时, 5G 将需要采用毫米波段中的更高频谱, 而 AESA 则使得多波束多路复用技术和大规模的多输入多输出 (multi-input-output, 简称 MIMO) 技术的实现成为可能 (见图 1)。活跃在这项研究—线的研究人员正借助建模和仿真工具对产品开发 and 测试进行不断地优化, 以期这种具有超高速、高带宽的新一代移动通讯技术能够取代当前的 4G LTE 技术。

仿真可以在产品的整个设计周期中为设计人员提供支持, 设计人员可以使用仿真来评估各种设计构想, 找出其中最切实可行的设计, 并据此制作物理原型。仿真的另一个优势在于, 为研究人员对各类不同的测试条件进行研究提供了可能。工程师可以通过仿真分析在不损坏原型的情况下对极端条件下的使用 (如极端的温度变化、结构变形或化学反应等) 进行有效测试。仿真专业人员的目标是通过仿真来尽可能逼真地还原真实世界、缩短设计和测试周期, 并最终使依据仿真结果制作的实体原型达到预期的性能。

» 仿真 APP 提升设计与仿真人员间的沟通

在 5G 正式上线使用前, 设计人员需要应对如频率选择、数据传输、通讯可靠性、电池寿命及信号干扰等诸多挑战。其中的每一个问题都涉及多种不同的物理现象, 需要相关领域的

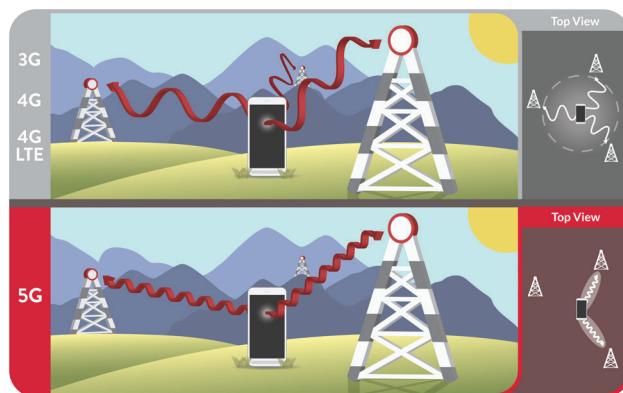


图 1. 上图: 在 5G 技术出现前, 天线通常采用各向同性的辐射方向。下图: 5G 毫米波通信需要使用能产生高增益 (具有指向性) 辐射方向的天线, 用以补偿自由空间的路径损耗。

专业人员利用适当的仿真工具为其建立正确的数学物理模型。设计人员和仿真专业人员的默契配合, 是优质的产品应时而生的关键。

为确保得到有效的输出信息, 通常情况下, 只有仿真专业人员才能安全的对模型进行数据输入。因此, 每当有新的需求出现或模型需要被修改时, 仿真专业人员都不得反复对模型进行调试和运行。不仅如此, 由于仿真结果和输出信息只有专业人员们自己熟悉, 要将这些信息分享给其他同事, 时常需要召开专门的会议对这

些结果进行解释说明。

如果仿真专业人员可以方便地创建仿真 App, 将复杂的模型通过直观的交互式用户界面呈现出来将会怎样呢? 如果没有任何仿真软件使用经验的用户也可以自如地运用专为他们设计的仿真 App, 情况又会怎样呢? 仿真专业人员能够通过仿真 App 为设计人员提供强有力的支持, 帮助他们在无线通信领域的激烈竞争中披荆斩棘。借助合适的工具, 5G 的设计人员可以运用自身的专业知识, 与从事研发和仿真分析的同事及合作伙伴通力合作。

» 仿真 APP 助力无线通信设计

以 AESA 或相控天线阵列为例, 这类技术最早只被应用于雷达和卫星等军事领域。随着人们对通信数据

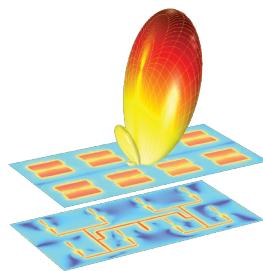


图 2. 利用 COMSOL Multiphysics® 软件为“4×2”相控微带贴片天线建立的模型。上方绘图显示了贴片上的对数电场模和三维远场辐射图。下方绘图描绘了馈线平面上的对数电场模。

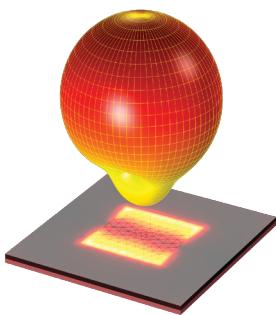


图 3. 单个贴片天线。显示了贴片上的对数电场模、网格及三维远场辐射图的可视化效果。

传输速率的要求不断提高,使得此类技术逐渐在商用领域占据了一席之地。这类设备中,一个简单元件的尺寸就能轻易超过波长几十倍,由此造成了在对其进行数值分析时会占用大量的内存,导致的结果是,即使在设计概念评估的情况下仅需近似值即可满足要求时,模型也需要花费很长的时间进行求解。快速原型设计将有助于分析性能趋势,快速地确定合理的设计参数。

图 2 显示了一个“4×2”相控微带贴片天线阵列的仿真。其中的天线阵列能够使辐射场具有明确的指向性。与单个微带贴片天线相比,对阵列天线进行仿真会极大地占用内存,且计算时间也将更长。

图 3 显示了以低温共烧陶瓷 (low-temperature-fired ceramic, 简称 LTCC) 为基板、基于有限元法 (finite element method, 简称 FEM) 模型对单缝耦合微带贴片天线进行仿真的结果,其初始

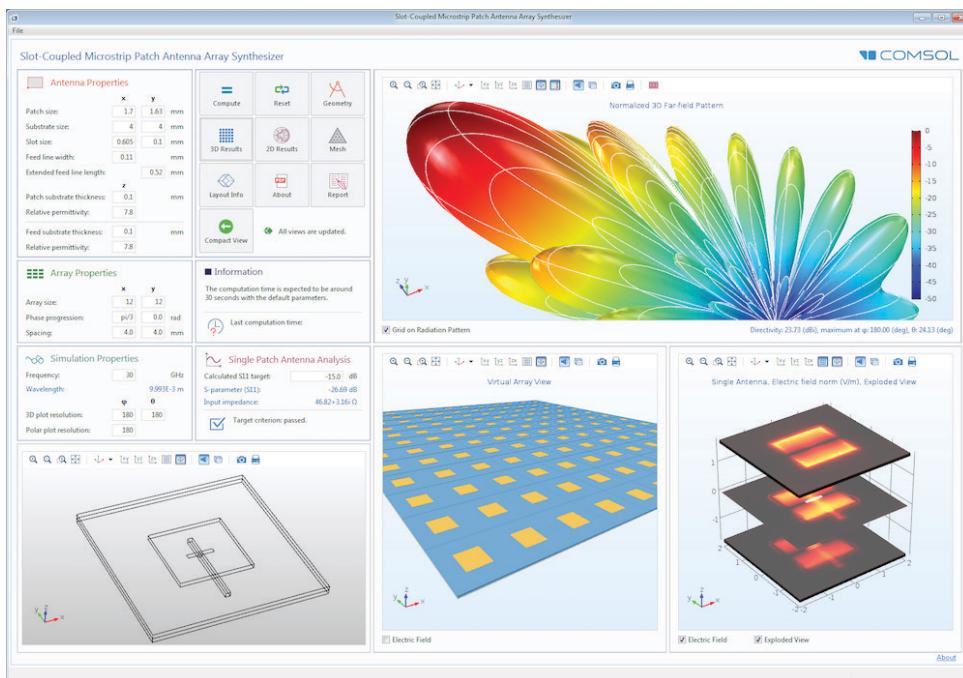


图 4. “缝耦合微带贴片天线阵列合成器”仿真 App 的用户界面,借助 COMSOL Multiphysics® 软件中的“App 开发者”工具开发。

工作频率为 30 GHz。

试想,我们是否可以通过分析单个天线来描述整个天线阵列的特性? COMSOL Multiphysics® 软件强大、灵活的功能允许仿真专业人员只需对单个微带贴片天线进行精确仿真,然后通过输入相关参数(例如阵列尺寸、相位等差数列和角分辨率等),便可完整地呈现整个天线阵列的三维远场分布情况。仿真专业人员可以轻松地使用 COMSOL 软件中内置的方程或算法来进行多物理场耦合仿真。

就本例而言,通过引入二维天线阵列因子用于表征模拟中需要的平移相移和阵列单元的加权系数,即可确定整个天线阵列的辐射场。

如何将这类模型通过一个简洁、直观的界面展示给设计人员?现在,仿真专业人员可以通过 COMSOL 软件中简单易用的“App 开发者”为他们的多物理场仿真模型创建自定义的用户界面。图 4 显示的仿真 App 就是基于上文中讨论的天线阵列仿真而创建的。

设计人员可以在这个仿真 App 中修改单个微带贴片天线的尺寸、厚度、每一层的材料属性,以及由仿真专业人员确定的其他相关参数。在这个示例中,仿真专业人员还为使用者提供了交互式的用户体验。使用者可以将计算得到的 S 参数 (S_{11}) 值与评判标准进行对比,以此判定选择的设计参数是否恰

当。除此之外,这个仿真 App 还可以生成结果报告和简要使用说明。这项功能满足了多种实际用途:例如生成的结果报告可供使用者或管理人员参考,也可以用作公司新员工的培训材料。

用户可以通过本地安装的 COMSOL Server™ 产品轻松地与同事及合作者共享仿真 App。用户可以通过 COMSOL 客户端或主流 Web 浏览器远程访问这些 App。

在正式向公众展示 5G 之前,我们还有大量工作要做。一套合适的工具可以让设计人员毫无阻碍地与相关领域的同事进行交流合作。跨部门通力合作的方式将成为在 5G 研发竞赛中获胜的关键。◎

让世界充满光明： OLED 的广阔前景

表面等离子激元建模和纳米结构电极的设计有望提高有机发光二极管 (OLED) 系统的光输出和效率。

作者 **LEXI CARVER**

托马斯·爱迪生 (Thomas Edison) 在 1879 年拨动开关, 点亮了世界上第一个具有实用意义的灯泡。此后的一个半世纪, 人们对更先进光源的探索从未停歇, 相继发明了多种不同的照明技术, 带来了高亮度、高色彩品质、可调光以及低廉的生命周期成本等诸多特性。

有机发光二极管 (organic light emitting diode) 又称 OLED, 因其可被制成形状各异、大小不一的轻薄发光面板而备受关注。OLED 可被用于制作柔性或可弯曲的照明装置, 时常被安装在带有平面或曲面的部件上, 用于制造诸如汽车尾灯的各类零件, 甚至还能用其制造出极具艺术魅力的“光之花”(见图 1)。

OLED 虽然具有诸多优点, 但与其同胞兄弟 LED 相比, 却在亮度和节能方面稍显逊色。鉴于此方面的原因, 柯尼卡美能达 (Konica Minolta) 公司的研究人员正在全力以赴地研发更先进的设计方案, 以满足人们不断增长的照明需求。柯尼卡美能达公司是世界领先的 OLED 制造商, 常年与日本各重点大学开展密切合作, 致力于开发成像和光学领

域的先进仪器。

Leiming Wang 博士是美国加利福尼亚州圣马特奥市 (San Mateo, California) 柯尼卡美能达实验室的高级研究员。他与研究团队中的其他成员一起专注于使用数值仿真来分析 OLED 的光损失机理, 希望通过虚拟测试找到改进设计的方法。“虽然 OLED 具有很多优点, 但在使用中还是存在诸多局限性, 我们正在努力将这些不利因素减至最少。”他介绍道, “对 OLED 效率影响最大的因素是由光在装置内部的相互作用而引起的复杂等离子激元耦合现象, 这一作用会造成高达 40% 的光损失。”

» OLED 的工作原理

OLED 由嵌在正电极 (阳极)、负电极 (阴极) 中间的有机半导体构成。图 2 显示了 OLED 器件的构造, 包括一个由透明钢锡氧化物 (ITO) 制成的阳极和一个银制的阴极, 两个电极之间的三个有机层组成。三个有机层分别为: 空穴传输层 (hole transport layer, 简称 HTL)、发光层 (electron transport layer, 简称 EML) 和电子传输



图 1. 豪斯登堡 (Huis Ten Bosch) 是位于日本长崎县佐世保市的一个充满荷兰风情的主题公园。柯尼卡美能达公司联合园方一同开发出“OLED 郁金香”, 在郁金香节的夜晚放出奇光异彩。

层 (electron transport layer, 简称 ETL), 它们都被集成在一个玻璃基板上, 当器件开启时, 光就会穿过这个玻璃基板。

当施加电流时, 电子注入阴极, 并在阳极形成空穴。电子和空穴会穿过各个层相向运动, 最终在发光层相遇并结合, 将能量以光子的形式释放出来。这一过程在电流通过时会不间断地快速发生, 从而引起连续发光。

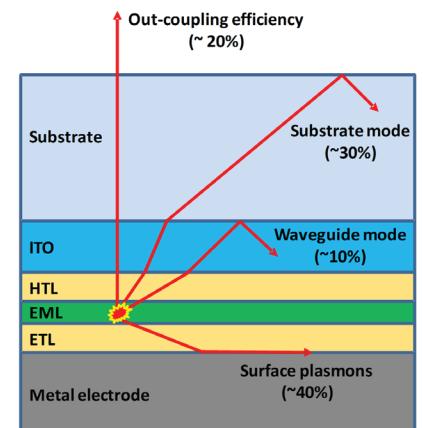


图 2. OLED 多层结构示意图, 图中显示了多种类型的光损失。图注: Substrate - 基底; Substrate mode - 基底模式; Waveguide mode - 波导模式; Surface plasmons - 表面等离子激元; Metal electrode - 金属电极



“通过使用 COMSOL 软件, 我们可以深入了解光损失的产生机理, 并轻松测试由不同设计局限带来的影响, 进而对我们的 OLED 产品进行相应的调整。正是 COMSOL 软件的强大功能, 帮助我们找到了将等离子激元造成的损失减少一半的方法。”

— WANG LEIMING, 柯尼卡美能达公司高级研究员

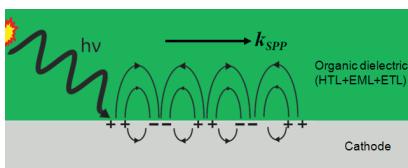


图 3. OLED 中表面等离激元与偶极辐射的耦合示意图。SPP 波会束缚部分光子,使它们无法穿过 OLED 玻璃基板。

» 抓住“偷窃”光子的“贼”

然而,有些光子却永远无法到达外部世界。造成 OLED 光损失的机理有多种,例如由于每一层的折射率不同导致光在层内反射,而不向外传播(如图 2 所示)。

Wang 博士的团队主要研究光损失的另一模式:在阴极和有机材料之间的界面上发生的偶极发射与表面等离激元的耦合情况。表面等离激元是指由振荡电子形成的沿导体表面传播的波。在 OLED 中,发光层中的辐射偶极子(分子激子)发出的光可以与阴极的电子振荡耦合,从而产生一种叫做表面等离极化激元(surface plasmon polariton, 简称 SPP)的波。SPP 在沿阴极表面传播时会不断衰减,同时带走发射的光子,使它们无法穿透玻璃向外辐射(见图 3)。

换句话说,由于金属阴极紧挨着有机发光层,部分光被阴极的电子吸收,从而引起电子振荡,并形成 SPP。这些现象最终会造成大量的能量以热量的形式损失掉。

Wang 博士借助 COMSOL Multiphysics® 软件中的数值仿真功能,对 OLED 系统中的光(由 EML 发出)和 SPP 进行建模,试图通过分析找到防止光损失的方法。

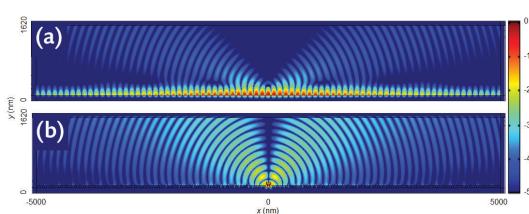
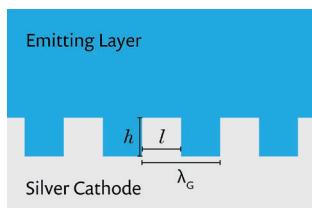


图 4. 左图为阴极的纳米光栅表面。Wang 博士的仿真团队通过对不同栅距高度和宽度产生的效果进行测试,并确定了最佳的排列方式。右图为阴极表面分别采用(a)平面和(b)纳米光栅结构的偶极发射二维场分布仿真。采用平面时,大部分偶极发射都被耦合到 SPP 波中,只有一小部分自由光形式辐射。但采用纳米光栅结构时,这种耦合得到了很好地抑制(b)。

法。一个极具潜力的设想是在阴极中加入纳米光栅结构(见图 4 左侧视图),该结构能破坏 SPP 模式的形成,进而减少偶极发射与等离激元的能量耦合。

Wang 博士的仿真结果显示了在使用不同阴极形状时电磁场的分布情况,以及 OLED 可以辐射出光的多少(见图 4 右侧视图)。通过仿真结果,他的团队已经确认这一现象确实会造成大量光损失。

COMSOL® 软件已成为柯尼卡美能达实验室的重要工具,它不仅能提供强大、全面的功能,并且使用灵活、操作简单。该实验室工作人员正利用这个软件从事各类型课题的研究。“在这个 OLED 项目中,我们可以使用 COMSOL 执行包括数据后处理在内的任何操作。我们还将与波长相关的光学性质导入在仿真模型当中,并基于这些数据进行仿真分析。”Wang 博士说。

他的团队分别为采用平面阴极和纳米光栅结构阴极的 OLED 建立了模型,并尝试使用不同的几何参数来找到最优配置(见图 5)。不仅如此,他们还通过运行仿

真探寻偶极位置的影响,以及由 SPP 引起光损失的波长,进而研究由不同偶极取向造成的影响。团队成员还利用功率流分析的方法来计算从 EML 发出的光中有多少可以从玻璃中逸出。

团队最终借助仿真实证了他们的设想,通过在阴极使用优化过的纳米结构表面,能将等离激元造成的损失减少 50%。

» 多功能建模使灯光更明亮

借助于一系列仿真工作,Wang 博士的团队得以设计出极具前景的新型 OLED。这种新设计可以使效率得到大幅提升。“我们能够通过对 OLED 系统的模拟来确定阴极纳米光栅结构的最佳配置。”他总结道,“通过使用 COMSOL 软件,我们可以深入了解光损失的产生机理,并轻松测试由不同设计局限带来的影响,进而对我们的 OLED 产品进行相应的调整。正是 COMSOL 软件的强大功能,帮助我们找到了将等离激元造成的光损失减少一半的方法。”

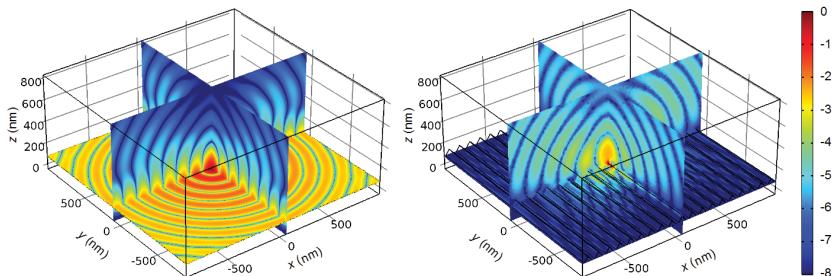
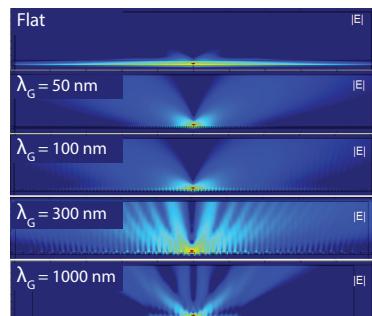


图 5. COMSOL® 软件的仿真结果显示了分别采用平面结构(左图)和纳米光栅结构(中间图)的偶极发射分布情况。光强经过归一化处理后以对数形式绘制。右图显示了几种纳米光栅阴极设计的偶极发射图案。



表面等离极化激元简介

作者 ANDREW STRIKWERDA

表面等离极化激元 (surface plasmon polaritons, 简称 SPP) 是结合了表面等离子体光子学和纳米光子学研究的一个令人兴奋的研究领域。顾名思义, SPP 是指在红外或可见光的波长范围内沿物体表面传播的电磁波。近年来, 由于 SPP 具有优异的电磁场能量束缚性能, 可以突破衍射极限, 而成为了新一轮的研究热点, 被广泛应用于近场光学、生物传感和超材料等诸多领域。不过遗憾的是, 其存在却并不总是有益的, 例如在之前有关优化多层有机发光二极管 (organic light-emitting diode, 简称 OLED) 的文章中, SPP 是导致能量损失的主要因素。如果能将这一损失降低, 就可以显著提高 OLED 的出光率, 为用户提供能效更高的设备。这里我们将简要探讨什么是 SPP、它何时产生, 以及为什么会自动包含在 COMSOL 软件的仿真过程中。

上文中提到 SPP 沿表面传播, 但它并不会沿所有表面传播。SPP 只会沿介电常数正负相反的两种材料的界面传播。空气、水、塑料、纸等许多常见材料的介电常数为正, 而金、银、铝等金属的介电常数为负。因

此, SPP 可能存在于金属和空气之间的界面上。

然而, SPP 可以存在于界面并不意味着它能轻易地产生和被控制。通过激光等传统光源产生 SPP 是一个相对更复杂的过程, 这一过程有些类似于在 OLED 中将 SPP 转换为可见光的逆过程。

为了使自由传播的光与 SPP 进行耦合, 它们的色散曲线必须相交, 这相当于使二者的能量与动量相匹配。从图 1 可以看出, 黑色的对角线是空气中自由传播的光的色散曲线, 蓝线是空气与金属界面处 SPP 的色散曲线。这两条线逐渐相互逼近, 但不相交。有多种技术可以使这两条曲线相交, 例如在 Kretschmann 装置或 Otto 装置

中使用棱镜。不过, 今天我们重点讨论光栅的使用。

光栅具有规律性的重复模式, 如正弦波或锯齿形模式。这种周期性模式具有自身的波矢, 可以与 SPP 的波矢相加或相减, 使得色散曲线发生匹配。图 1 中红色箭头表示光栅的波矢。

那么我们如何在软件中实现这个耦合呢? 其实非常简单, 只需创建一个相关的几何结构, 然后定义材料属性和边界条件, 就像进行其他任何高频电磁仿真时所做的那样, 就这么简单! 这是因为 COMSOL Multiphysics® 求解的是 Maxwell 方程, 也就是说自由空间光与 SPP 之间的耦合本来就已包含在内, 无需再作任何修改。🔗

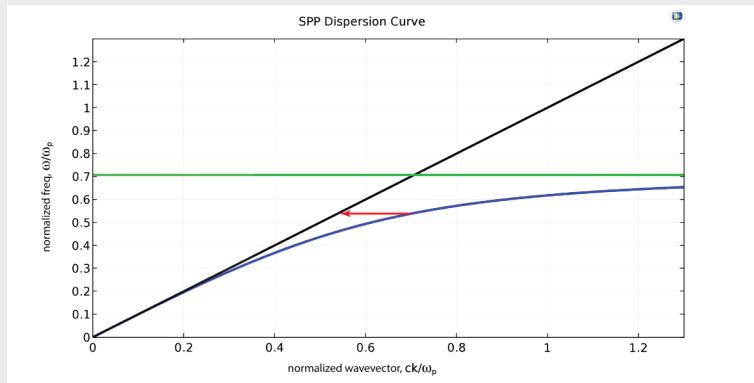


图 1: COMSOL Multiphysics® 软件中绘制的图显示了 SPP 色散曲线。黑色对角线表示自由传播的光线, 绿色水平线表示 SPP 频率。蓝色的 SPP 色散曲线分别在低频极限和高频极限内逐渐逼近蓝线和绿线。红色箭头表示光栅波矢, 可将 SPP 与自由传播的光波进行耦合。

从纳米天线到外太空卫星， 电子发射实现高效发电

意大利技术研究所 (Italian Institute of Technology) 的工程师们正利用多物理场分析进行一系列电子发射的研究, 试图利用它来提高设备在极端环境及生物医学应用中的供电效率。

作者 LEXI CARVER

工程师们在设计应用于外太空和人体中的设备时面临着一个共同的挑战：如何保证其安全性、可靠性和高效性？这是因为在水中、极端温度、高压及其他极端环境中使用的设备很难得到高效稳定的电力供应。近期，科研人员在提升设备能量使用效率的探索中发现，对于在外太空卫星和医疗器械等特殊环境中使用的设备，电子发射技术有望成为一项极具潜力的

发电方式。

当对金属表面或电极施加静电场、加热或光照时，电子会从金属中逸出，通常进入真空环境，这种现象就是电子发射，而逸出的电子可以被收集起来作为可用的电能。意大利技术研究所 (Italian Institute of Technology, 简称 IIT) 和欧洲航天局 (European Space Agency, 简称 ESA) 正在合作开发基于电子发射技术的太阳能收集

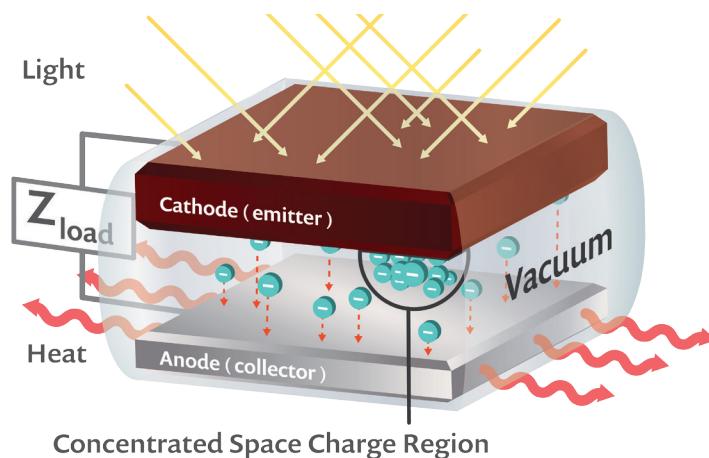


图 1. PETE 电池示意图。电子由于光（照射在半导体上）和热（由电荷载产生）的作用从负极逸出。电子在到达正极的过程中相互排斥而被“困”在真空间隙产生空间电荷的堆积。
图注：Light - 光；Load - 负荷；Heat - 热；Concentrated Space Charge Region - 集中空间电荷区；Vacuum - 真空；Cathode (emitter) - 负极（发射极）；Anode (collector) - 正极（集电极）

系统，用于为外太空的卫星供电。IIT 的研究人员还将类似的概念用于为纳米天线供电，以研究人脑中的电信号。他们使用数值仿真来研究放射电子的运动，并对相关设备进行了优化，以期拥有最佳的功能和最高的效率。

» 更高效的太阳能供电系统将被应用于卫星

光伏系统可以将太阳光转换成电能，地面或近地轨道的太阳能电池板可以有效地使用这一系统实现能量转换，但由于高温会严重影响光电转换的效率，这种系统并不适用于外太空的近日探索。美国斯坦福大学 (Stanford University) 于 2010 年最先研发了光子增强热电子发射 (photon-enhanced thermionic emission, 简称 PETE) 太阳能电池，它将光电效应与热电子发射（电子从受热半导体中逸出而形成的热导电子流）相结合来提高发电功效，并有望成为现有供电系统的替代产品。

PETE 电池 (见图 1) 是一个三明治结构，中间为真空室，其上下分别被砷化镓一类的半导体正极和负极所包覆。负极价带中的电子受入射光子激发进入导带，其中一部分逸出到真空间隙；而另一部分电子则迁移到半导体的真空能级附近，可以通过热电子发射使其轻松地逸出。对负极加热会使更多电子“沸腾”，进入真空间隙。自由电子到达另一端的正极并在此形成电荷堆积，从而产生电能。

“增强热电子发射技术利用负极的半导体结构和正负极之间的温差将热能转换为电能，” IIT 的博士后研究员 Pierfrancesco Zilio 解释道，“与标准光电效应不同，电子发射发生能量转换时会同时利用太阳光谱的紫外—可见区域和红外区域，前者激发电子到达半导体的导带，后者激发电子逸出到真空间隙”。

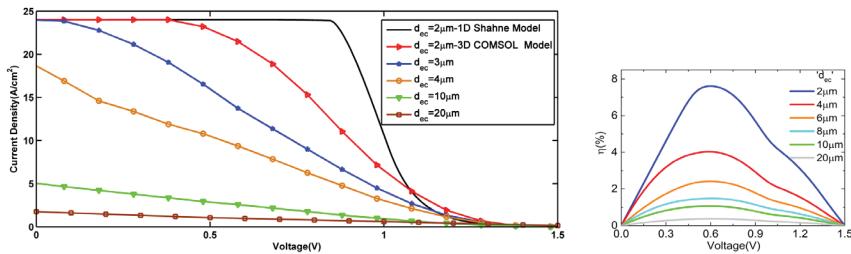


图 2. COMSOL® 软件的仿真结果，显示正极和负极之间距离不同、工作电压不同时计算得到的正极电流密度（左图）和功率转换效率（右图）。

但是，射出的电子会相互排斥，使部分电子回到负极或被“困”在真空间隙中。“困”在真空间隙中的电子会形成空间电荷（space charge）云，进而干扰电子通过，致使设备效率明显降低。

» 仿真提供强有力的技术支持

Zilio 和他的合作伙伴 Waseem Raja（在读博士生）、Remo Proietti（高级研究员）与 ESA 合作研究了多个不同的 PETE 系统，力图使正极的电荷堆积最大化，并据此为外太空卫星提供可靠的设计。他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件对各种可能的 PETE 电池设计进行建模分析，借此确定其中最实用、最有效的设计。

他的团队对正负极之间的电子流动轨迹进行了追踪，并研究了空间电荷云的形成。他们先创建了一个模型，对由光子的冲击、吸收而在负极形成的电场进行计算，接着分析了电场对电子挣脱负极表面能力的影响。

“这样我们就能预测空间电荷云会对正极上的电子堆积产生怎样的影响，进而得到最终的电流输出数据。” Zilio 介绍道，“我们计算了电子在到达正极前需要克服的各种阻力，这些阻力包括电子挣脱负极束缚的能量以及电子在迁移过程中空间电荷云对其施加的减速作用力。”

他们使用数值仿真能够对电极的不同布局进行测试，通过改变两个电

极的排布以确定可使输出电流和效率最大化的设计（见图 2）。“COMSOL 软件使我们能将空间电荷的运动与负极的光吸收和载流子输送等其他相关物理效应耦合在一起。”

为分析真空室中的电子的发射和传播，他们将粒子追踪模型与电、热分析相耦合。“我们根据电子轨迹和电势来确定正极的电流密度，” Zilio 继续说道，“从而对我们选定的 PETE 电池设计进行计算，并得到其净电流输出值和功率转换效率。”

为尽可能减少空间电荷云的影响，他们还测试了多种不同的方案。其中一种是使负极表面形成纳米锥阵列结构，其原理为锥形尖头会形成更强的电场，从而射出更多电子。Zilio 对纳米锥的电场和电子轨迹进行了模拟（见图 3），并计算了在正极产生的电流密度。

尽管纳米锥设计可以增加负极逸出的电子数量，但无法克服空间电荷云的阻力，从而无法提高输出电流。鉴于这个原因，Zilio 的团队考虑采用新的策略。“我们在真空间隙中放置

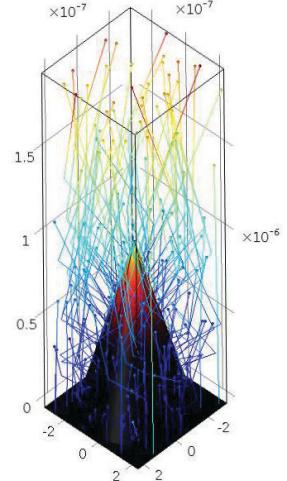


图 3. 纳米锥结构在 COMSOL 中的仿真结果。图中显示了粒子轨迹和速度大小，以及整个锥面的电场模。

了一个带正电荷的网状栅极，可以在电子逸出后吸引它们快速通过，”他说，“这个设计大幅提高了电子的提取能力，并显著减少了正极和负极之间的空间电荷云。”

“接下来，我们必须对栅极的孔径以及向栅极输入的电能进行优化，以此在总体效率、电子收集量以及减少被困在栅极中的电子数量间实现最佳的平衡。”

他们测试了不同的孔间距（相邻孔中心之间的距离），以寻找可以使正极产生最大输出电流的栅极结构。他们还考虑了向栅极输入的电能，因为该能量会影响总体转换效率。图 4 和图 5 显示了栅极采用不同结构、施加不同电压以及孔间距不同时电子的收集量以及总体转换效率。

“我们的工作需要对多个物理场进行模拟，在将粒子追踪与其他物理现象相耦合的同时，还涉及其他复杂的非线性物理现象，COMSOL 为我们提供了强大的技术支持。”

— PIERFRANCESCO ZILIO, 意大利技术研究所博士后研究员

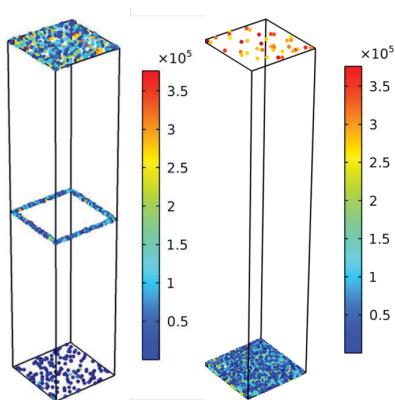


图 4. 正板上电子加速度的 COMSOL 仿真结果，左图中加了栅极，右图中未加栅极。

为提高设计的总体效率，该团队根据仿真结果针对栅极电压、孔间距和正负极之间的距离进行了选择。在完成 PETE 电池的研究后，他们使用相似的技术对应用于生物医学和神经学设备中的纳米天线进行了表面等离子激元的仿真。

» 回归人脑研究

Zilio 还利用 COMSOL 提供的分析功能研究了当纳米天线浸入与人脑相似的水相环境时电子的光电发射。这种天线由镀金或镀银的介电纳米管制成（见图 6），可被用于光刺激神经元、神经元之间电信号的研究，以及医学治疗和诊断。

天线浸入液体环境后电子的逸出功会减少，即电子从金属逸出所需

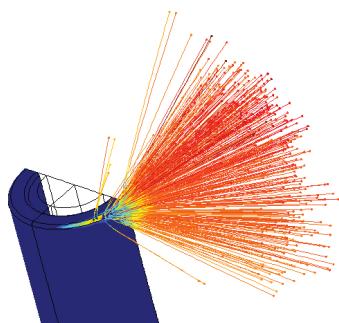


图 7. 电子从金属逸出时的粒子轨迹。

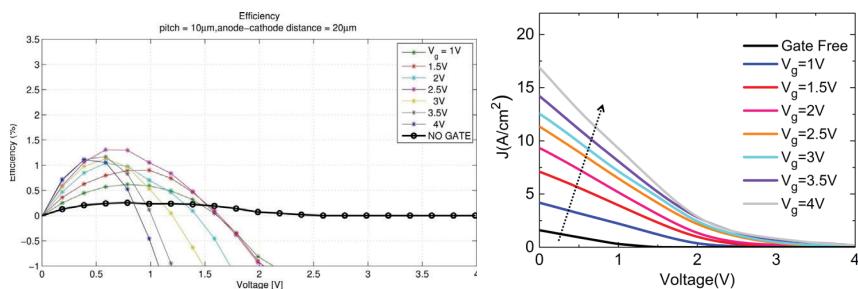


图 5. 左图中的仿真结果显示了对栅极施加不同电压且正负极距离为 20 μm 时的功率转换效率。右图显示了栅极电压和孔间距不同时正极堆积的电流密度。

的能量减少了。“这使电子更容易逸出，然而如果天线周围的电子密度持续增大并超过一定数值后，水分子的电离作用会呈指数增长，天线将无法继续工作。” Zilio 解释道。对天线施加飞秒激光脉冲会引起表面等离子共振，使金属表面的电场增强，从而提高电子发射后的加速度。

Zilio 的团队对天线的光响应进行了仿真，将其与电子发射和运动轨迹模型相耦合，还在局部增强的电场与放射电子的分布间建立了联系。接着，他的团队还研究了“电热点”，即电子密度最高的区域，并分析了水分子与放射电子发生碰撞产生的催化反应。“COMSOL 提供的碰撞模拟功能满足了我们的所有需求，”他评论道，“我能够同时模拟电子激发、水分子的电离作用以及它们之间的弹性碰撞”。

仿真结果（见图 7）揭示了天线和“电热点”周围的电场水平，并预测了电子在逸出过程中的密度和运动轨迹。通过研究天线随长度和激光功率变化而引起的不同光响应，团队确定了天线的工作范围。在该范围内电离作用会受到最大程度的抑制，并将天线失效风险降至最低。

» 展望新技术

在对外太空卫星设备及纳米天线的性能进行优化的过程中，多物理场分析为 IIT 研究团队的工作提供了极为

宝贵的帮助。“我们的工作需要对多个物理场进行模拟，例如将粒子追踪与其他现象相耦合以及相关的强非线性物理现象，COMSOL 软件为我们提供了极大的支持。” Zilio 评论道。从对外太空无止境的探索到有朝一日尝试刺激单个神经元，IIT 的工程师们计划将继续将仿真应用于极端环境下的技术开发中。🌐

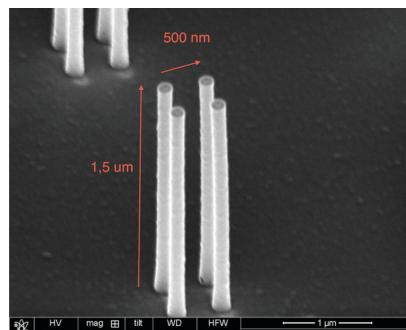


图 6. 由二次电子曝光技术制备的金纳米管天线的放大图。这种天线能在可见光谱范围和近红外光谱范围内产生强烈的等离子热点。



Pierfrancesco Zilio, 意大利技术研究所博士后研究员。

射线光学仿真照亮创新之路

作者 **CHRIS BOUCHER**

对在光学系统领域进行数学建模和数值仿真的专业人员来说，他们正处在一个令人激动的时代。相关计算工具的功能变得越来越强大，且更加易于使用，它们帮助研究人员和工程师们在光学工程应用领域中更为深入地进行设计、优化和故障诊断工作。仿真专家的研究重点是尽可能地利用仿真来准确地重现现实世界中的行为，减少对原型设计和试验的依赖。本文我们将着重讨论如何借助 COMSOL Multiphysics® 软件提供的工具在高频光学领域实现精确仿真。

» 集成软件使设计过程流程化

COMSOL Multiphysics 软件是一款高度集成的多学科建模和仿真工具。在软件的诸多优势中，最让用户受益的地方在于，仿真过程的每一步（包括几何设置、物理场、网格剖分、求解和结果评估）都呈现在一个直观、简洁的用户界面上（见图 1）。

在“射线光学模块”（COMSOL® 软件的一个插件产品）的开发过程中，很明显，COMSOL 自带的统一 workflows 也应作为这款射线追踪工具的一个突出优势，融合到这个产品中。许

多用户在进行光学仿真时都遇到过类似的瓶颈：无法在多个不同的专业软件之间实现数据交换，因此无法准确描绘现实世界。基于此，我们将“射线光学模块”设计为一个涵盖建模过程中各个步骤的综合性解决方案。

» 多物理场方法极大地扩展了光学仿真功能

当对准确性要求极高时，光学模型会变得非常复杂；而对于暴露于极端环境的设备，只考虑电磁波现象也往往是不够的。针对这些情况，在 COMSOL 软件中，电磁波仿真的输出结果可与

其他物理现象的控制方程无缝结合，从而模拟焦耳热、微波加热、激光加热、压电、磁致伸缩甚至半导体光电子学等各种效应的影响。

多物理场仿真一直都是 COMSOL 产品的核心理念，软件中的射线光学建模很明显也遵从这一相同原则。射线光学工具必须具备丰富的功能，才能轻松地与产品套件中的其他产品（例如电学、流体、力学、热学及化学分析）耦合使用。

» 单向和双向热耦合功能

“射线光学模块”最先进的功能之一是可以与其他物理场（尤其是指传热和结构力学）进行单向或双向耦合。举例来说，当射线仅仅加热吸收材料或表面，只进行单向耦合；而当射线的方向受到结构变形的影响时，就需要进行双向耦合。

太阳能（solar thermal energy，简称 STE）应用就是单向耦合的一个实例（见图 2）。高温集热器通常包含一个或一系列表面反光的槽式或碟式抛物面，可将太阳能聚焦到一个很小的目标或收集器上，其中入射热通量的大小和分布都对光电转化效率有着非常大的影响。

当高能光束在仿真域中引起了结构和热变化，而这些变化又反过来会影响射线轨迹时，就需进行双向耦合（见图 3）。温度变化可通

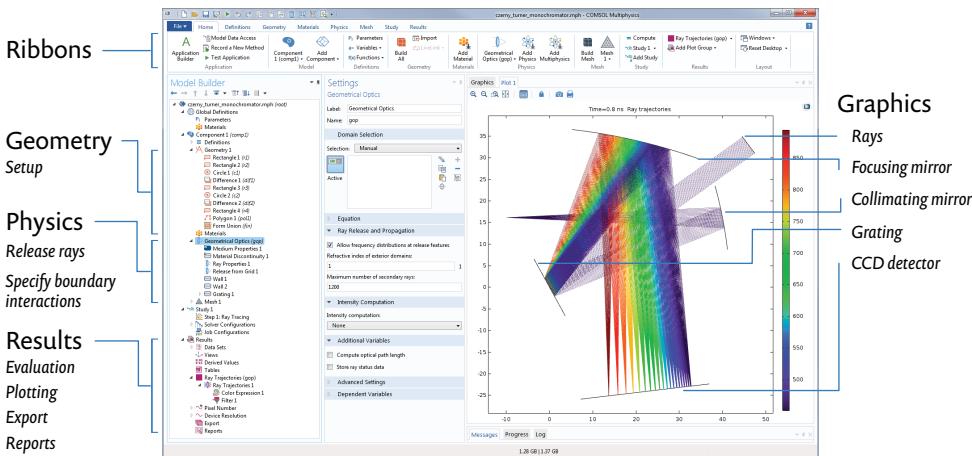


图 1. 软件用户界面支持对模型建模的每一步进行设置。图注：Ribbons - 功能区；Geometry - 几何；Setup - 设置；Physics - 物理场；Release rays - 释放射线；Results - 结果；Evaluation - 评估；Plotting - 绘图；Export - 导出；Reports - 报告；Graphics - 图形；Rays - 射线；Focusing mirror - 聚焦镜；Collimating mirror - 准直镜；Grating - 光栅；CCD detector - CCD 检测器

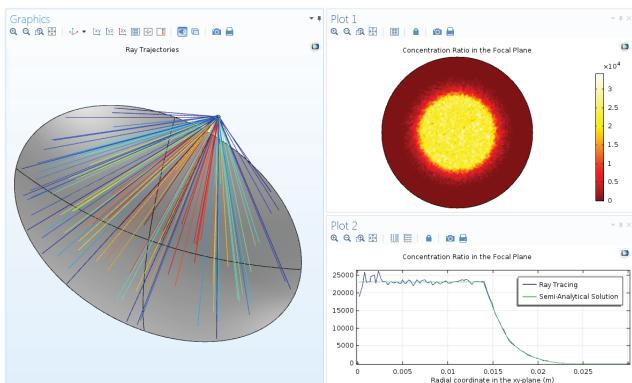


图 2. 太阳光线经碟式抛物面反射, 聚焦到一个小型接收器上 (左图)。抛物面的焦平面中绘制了入射热通量与环境太阳辐射通量的比率或集中度 (右上图)。在这个基准模型中, 集中度是径向位置的函数, 与已知解基本一致 (右下图)。

过多种机制影响射线经过透镜系统的轨迹, 如通过受温度和应变影响的折射率, 以及透镜的热膨胀等。

在热透镜效应现象中常常可以观察到射线传播与结构和热效应之间的这种双向耦合。当高能光束通过一块由吸收材料制成的透镜并聚焦时 (见图 4), 可以观察到由热效应引起的焦移并对其进行量化, 其中透镜系统中焦点位置的变化是由热膨胀和折射率的变化引起的。

» 用户需求驱动了射线光学仿真的创新

作为通用建模仿真软件平台的一个专业模块, “射线光学模块” 的创建基于软件整体的便利功能。然而, 随着源源不断的用户反馈, 我们逐渐意识到用户对关键领域的某些专业功能的需求, 例如专用的求解器序列和后处理功能等。这些功能将逐渐添加到产品中来, 进一步

完善和扩展射线光学仿真性能。在最新版本中, 我们新增了一系列专业绘图工具, 可用于彗形像差、散焦、散光和球面像差等单色像差的可视化操作 (图 5)。

COMSOL Multiphysics® 软件中将光学像差进行量化和可视化的功能是对“射线光学模块”的多物理场耦合能力的重要补充。在新版本中, 观察温度变化和应力等因素对图像失真程度的影响要容易得多。

» 展望未来

与其他专业领域类似, 光学系统计算模型的日益普及表明了人们对集成的建模和仿真环境的迫切需求。作为一个几乎适用于所有光学应用的通用型高频光学仿真工具, 像差专用绘图工具的引入是我们在支持光学领域专业用户方向迈进的又一步。通过仿真工具, 几何光学中的物理和数学机制的应用可

迅速扩展到包括眼科学, 太阳能收集以及相机、望远镜、单色仪、光谱分析仪等光学仪器的设计等的各行各业。

此外, 借助于射线追踪仿真与热和结构仿真的耦合, 工程人员可以为复杂设

备和系统创建准确而先进的多物理场模型, 甚至对极端工况进行分析。多物理场方法使仿真专业人员、工程师和设计人员能够在高科技、快节奏的光学行业及众多领域内不断创新。◎

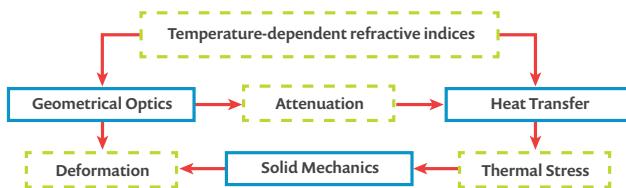


图 3. 一个对光、热和结构效应双向耦合仿真的典型 workflow。图注: Temperature - dependent refractive indices - 温度依赖性折射率; Geometrical Optics - 几何光学; Attenuation - 衰减; Heat Transfer - 传热; Deformation - 变形; Solid Mechanics - 固体力学; Thermal Stress - 热应力

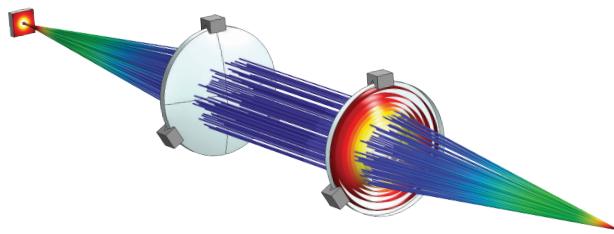


图 4. 高能激光聚焦系统中的热致焦移。

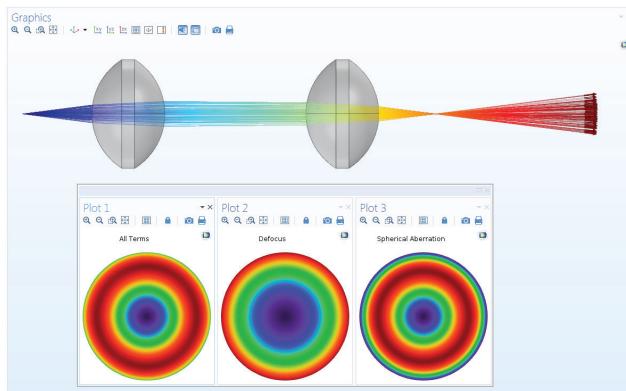


图 5. 两个凸透镜系统中的射线轨迹。通过 Zernike 多项式的叠加, 绘制单色相差其中各个项均可被选择。

计算纳米光子学：从黑洞到表面等离激元光镊

作者 ALEXANDER V. KILDISHEV

计算纳米光子学 (computational nanophotonics, 简称 CNP) 在物理学、光化学和工程学领域中都有着非常广泛的应用：纳米非线性光学、增强型光捕获技术、介电超材料表面研究、表面等离激元纳米激光器、等离激元激光器以及石墨烯纳米光子学只是其庞大应用领域中的一小部分。

在选择合适的计算工具对纳米光子学应用进行数值仿真时，对纳米尺度上光与物质之间复杂相互作用的建模能力是考量的重点。大多数情况下，近场相互作用会转变为远场辐射，导致几何尺度严重不匹配，这时一个精确的数学模型就显得尤为重要。

COMSOL Multiphysics® 软件让我们找寻合适工具的困难迎刃而解，它完美地满足了我们在许多实际应用中的严苛要求。我和合作伙伴们已将其成功地应用于纳米光子学的数学建模这一多学科交叉领域，目前的工作重点是开发 CNP 的方法，对三维光学超材料和低维超材料结构及表面进行设计，以期获得一种不同寻常的方式来引导和操控光。不仅如此，我还从事增益辅助型表面等离激元纳米结构的开发。

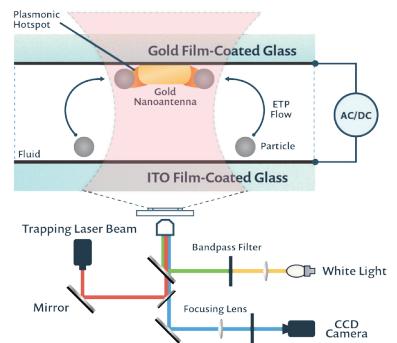
在此研究方向上的前期探索及后续深入研究，让我们在有源纳米光子学领域的新型机械装置的设计道路上更进了一步。上述这些研究工作都是在 ShalaeV 教授 (美国普渡大学) 和 Klar 教授 (奥地利约翰开普勒大学) 的共同参与和紧密合作下完成的。此外，通过与 Narimanov 教授 (美国普渡大学) 以及 Prokopenko 博士 (俄罗斯新西伯利亚国立大学) 的合作，我们

还研究出了精确的全波和近似变换光学方法，用于优化全向光吸收器或黑洞，并借助 COMSOL® 软件中的“波动光学模块”和“射线光学模块”对这些方法进行了验证 (这部分研究成果发表在 2016 年第 18 期的 *Journal of Optics* 期刊上)。

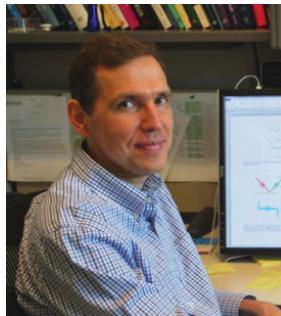
我们学院的在读研究生 Justus Ndukaife 提出了表面等离激元辅助型光学捕捉装置的初步设计 (参见下图)，目前正在积极研究用于平稳捕捉亚微米和纳米尺度对象的表面等离激元纳米光镊。Justus 在普渡大学 Boltasseva 教授的实验室中组装了一台样机，其数值计算结果与实验测试数据 (实验数据根据 Wereley 教授设计的装置得到) 基本一致 (详细内容请参见 2016 年第 11 期的 *Nature Nanotechnology* 期刊)。这类装置中存在复杂的多物理场现象，可以由强耦合的偏微分方程组来描述。纳米光镊可用于生物传感、可编程的纳米装配、超分辨率微流控光学屏幕以及集成量子逻辑单元中的表面等离激元电路等领域中微米级和纳米级对象的操控和分析。

CNP 是一个发展迅猛的研究领域，它已经对我们的日常生活产生了深远的影

响，并且这种影响力还将继续。借助合适的计算工具，我们能够验证理论假设和设计，并完整地分析纳米光子学问题。📍



图为纳米光镊的设计。光束照射在等离激元纳米天线上使流体受热，使得介电常数和电导率产生局部梯度。施加的交流电场可激发电热表面等离激元 (ETP) 的流动，使粒子流向表面等离激元热点。将交流电场切换为直流电场后，粒子就被固定在表面等离激元热点中。图注：Plasmonic Hotspot - 表面等离激元热点；Gold Film - Coated Glass - 金膜玻璃；Fluid - 流体；Gold Nanoantenna - 金纳米天线；ETP Flow - ETP流；Particle - 粒子；ITO Film - Coated Glass - ITO 膜玻璃；Trapping Laser Beam - 捕捉激光束；Mirror - 反射镜；Bandpass Filter - 带通滤波器；Focusing Lens - 聚焦透镜；White Light - 白光；CCD Camera - CCD 摄像机



ALEXANDER V. KILDISHEV 是美国普渡大学 (Purdue University) 电子与计算机工程学院及 Birck 纳米技术中心的副教授。在对真实环境中使用的纳米光子结构及设备进行数值模拟的研究领域，Kildishev 教授是全球范围内仅有的几个顶尖专家之一。他取得了多项突破性成果，其中包括负折射率超材料、光学人工磁结构、超材料中的损耗补偿、表面等离激元纳米激光器、光学超材料表面，及光学隐形装置和超透镜的理论研究和数值模型。