



The unique combination of simulation tools for
LASer Cavity Analysis and Design

经过了15年的发展,LASCAD™已经成为激光谐振腔分析与设计(Laser Cavity Analysis and Design)行业的领军软件。大量的用户群体反馈的意见和建议帮助我们更好地提高谐振腔的设计技术并且积累了很多经验。

为了优化谐振腔的设计,LASCAD™提供了一套独特的模拟工具的集合:

- 热性能与腔结构的有限元分析(FEA)方法对腔内晶体的热效应进行分析。
- ABCD高斯光束传输矩阵,包括热透镜效应和增益导引机制的分析。
- 多模与调Q运行的动态分析(DMA)方法,分析激光光束的动态特性以及三维空间中的特性。
- 3D物理光学传输矩阵(BPM),包括了衍射与增益的动态特性。

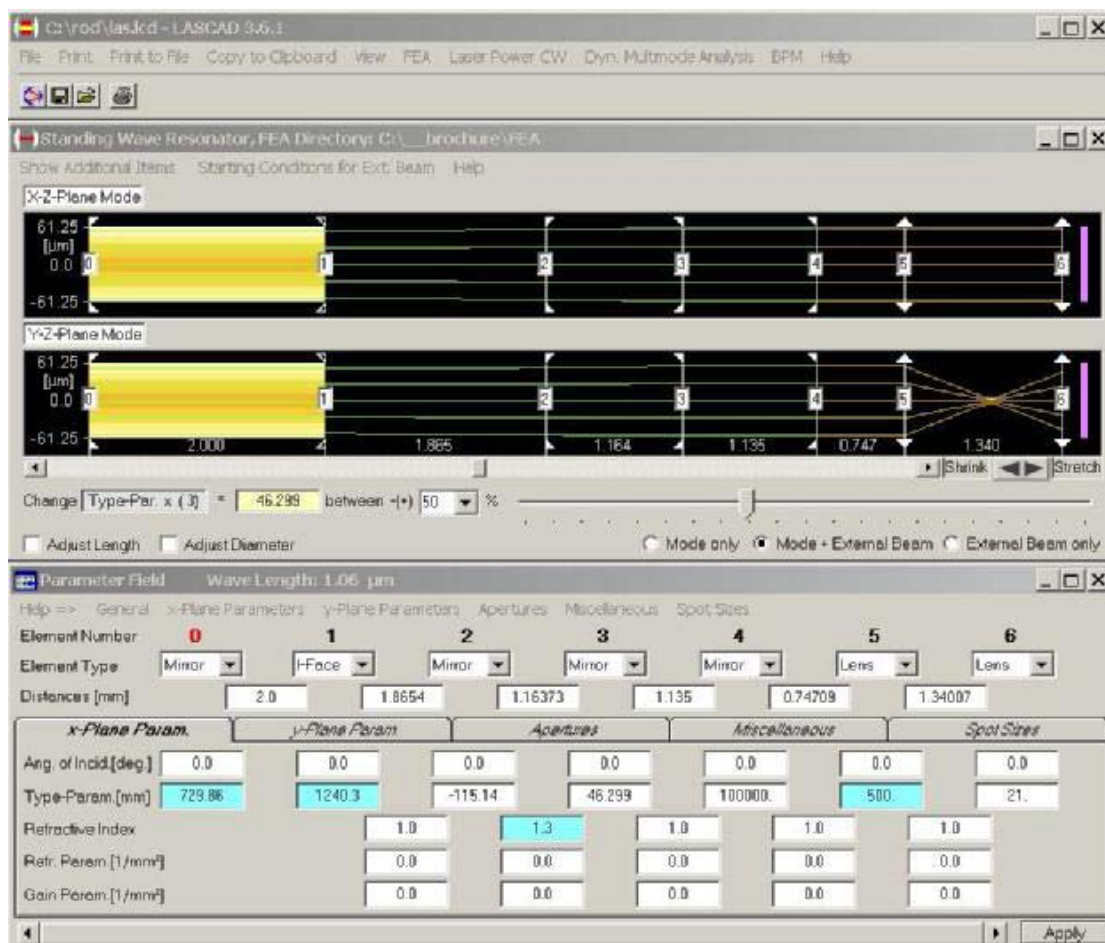


图 1. LASCAD™的图形用户界面



LASCAD™

计算机上的光学工作平台

为了简化操作，LASCAD™提供了复合的工程工具，如图1所示的软件用户界面，可以当作计算机上的工作平台，用户可以直接进行谐振腔的设计。这样，用户就可以不用花费大量的时间学习复杂的操作。

- 通过鼠标实现对光学元件，例如反射镜，透镜或者晶体的添加，复合，调整或者删除。
- 谐振腔和晶体的像散在设计过程中已经自动考虑了。
- 软件的菜单提供热效应的有限元分析，高斯光束的ABCD 传输矩阵，物理光学，调Q运行，谐振腔稳定性以及输出功率的计算。

LASCAD™

激光工程师的有用助手

为了发展一种强大的谐振腔设计软件，激光工程师们必须面对技术和理论的交叉问题。随着激光系统的小型化，输出功率的不断增长，热透镜效应的分析变得越来越重要。该效应严重依赖于系统的特性：包括材料参数、腔的几何形状、泵浦光束的分布以及冷却系统。同时它与增益动态特性、模式竞争、调Q 以及其他影响光束质量和激光器效率的因素相互作用。基于这些效应的数值模拟，LASCAD 为激光工程师们提供了谐振腔设计过程中相关特性的定量分析。

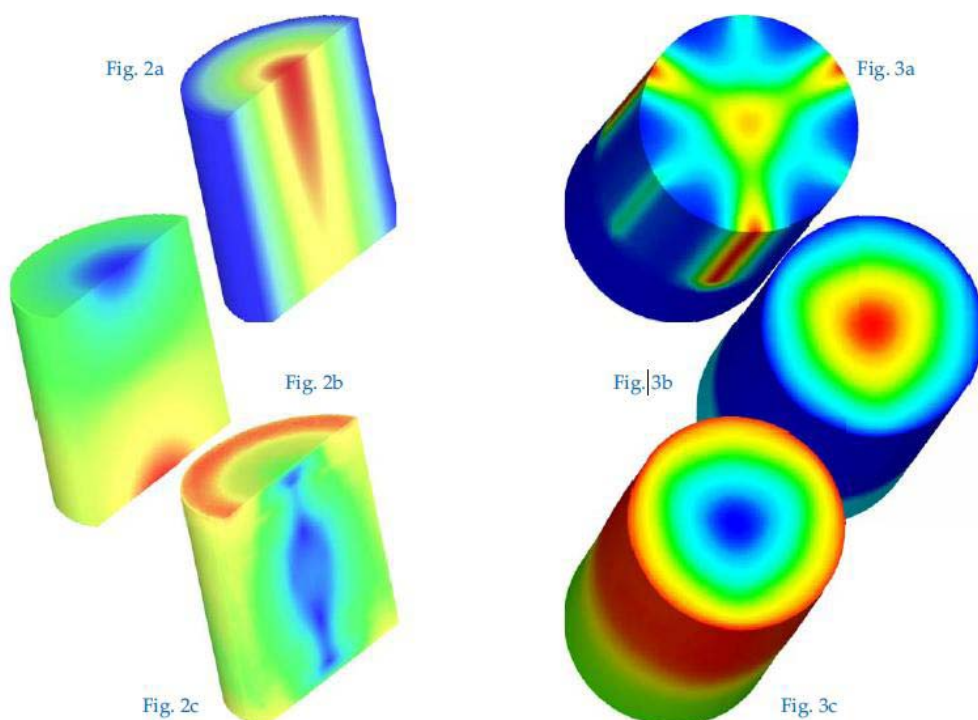
热效应的有限元（FEA）分析

FEA 可以用于计算激光器晶体的温度分布、变形、应力和机械断裂。计算过程中需要考虑材料的参数、泵浦构型以及冷却结构等。FEA 是技术物理领域中一种众所周知的求解差分方程的数值方法，例如，热传导方程。虽然在其他许多工程领域，FEA 得到广泛的成功应用并且是一个不可或缺的方法，但是目前还没有在其他任何一款商用激光设计软件上实现。

为了让FEA 能够直接应用于激光腔的设计，LASCAD™对重要构型进行FEA 模型预设计，例如，端面或者侧面泵浦的棒状、条状以及盘状激光器。多种材料或者掺杂的晶体也有相关的模型，例如未掺杂的端面镜。用户可以自定义尺寸、FEA 网格、边界条件以及模型中的其他参数。与温度相关的材料参数也可以通过解析式添加到模型中去。

被吸收的泵浦功率密度分布采用基于超高斯函数的解析近似表达式进行表征。为了实现吸收泵浦光的数值建模，LASCAD™支持从ZEMAX和TracePro的光线追迹程序导入数据。这些程序可以生成吸收泵浦功率密度的三维数据，可以直接导入到LASCAD™中。ZEMAX 和TracePro对模拟闪光灯泵浦或者非常规的泵浦结构时的泵浦光分布非常有用。

图 2a, 2b, 2c分别给出了端面泵浦棒状晶体的温度分布、变形以及应力分布。图3a, 3b, 3c分别给出了侧面泵浦棒状晶体的泵浦功率、温度以及应力张量



高斯光束ABCD 传输矩阵方法

将 FEA 的结果应用到 ABCD 传输矩阵，温度分布，以及温度相关的折射率函数，在垂直光轴方向进行抛物线拟合，结果如图4 所示。在拟合过程中，有限元网格在沿着晶体轴和垂直的方向上又进行划分。用同样的方法可以完成晶体端面变形的拟合。对于很多结构，例如端面泵浦的晶体棒，上述拟合近似可以得到的激光模式的可靠解。

为了查看 ABCD 传输矩阵的结果，沿着谐振腔轴向的基模光斑尺寸以及高阶模的厄米-高斯多项式都会显示出来。在晶体内部，泵浦光与激光横模之间的叠加也可以直接显示，如图1 中所示。为考虑像散的影响，与腔轴垂直的两个平面同时进行计算。

对于驻波腔，可以基于产生 g 参数的谐振腔稳定性图，结果如图5 所示。

计算得到的高斯模式以及吸收泵浦功率的密度分布可以用来分析连续波激光和激光的瞬态过程。

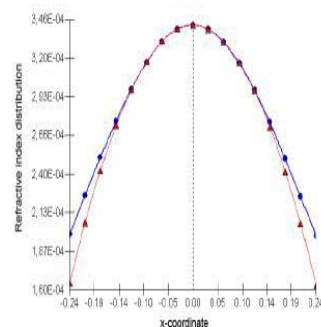


Fig. 4. / FEA Result / Parabolic Fit

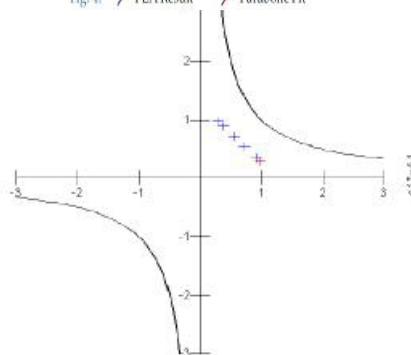


Fig. 5. Stability Diagram



CW激光特性

连续波运转的激光可以直接分析。它可以计算基模光的输出功率以及近似得到多模运转时的输出功率。通过对整个晶体进行迭代积分，可以得到与时间无关的三维激光速率方程的解。图6 是一个端面泵浦Nd3+:YAG 棒的例子。圆圈表示模拟结果，绿色三角是测量结果。具体过程参见“结果验证”的段落。

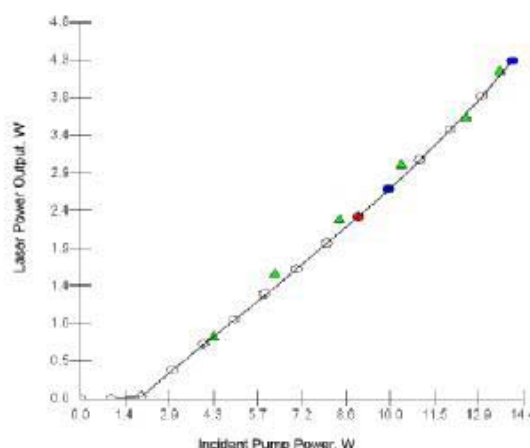


Fig. 6. Laser Power Output

激光瞬态特性

为了分析激光的瞬态特性，LASCAD™提供了多模以及调Q运转的动态多模分析（DMA）工具。为此，LASCAD 采用有限元求解工具来求解与时间相关的速率方程组，其中包含了描述各个模式（预定义的高斯横向本征模）光子数的方程。这种方法可以提供模式竞争、功率输出、光束质量和脉冲形状的信息。模拟结果被证明与实验测量结果吻合得很好，具体参见下面的“结果验证”的段落。动态模式分析（DMA）可以提供以下重要功能：

- 高重频或者单脉冲调Q运转时激光器输出脉冲形状以及输出功率随时间变化曲线。
- 调 Q或者CW 运转时激光器不同横模的输出功率。
- 调 Q或者CW 运转时激光器的光束质量因子M2。
- 硬边以及高斯光栏对光束质量的影响。
- 高斯以及超高斯型反射输出镜。

图 7 给出了通过DMA得到的输出功率随时间变化的曲线。由于计算起始点时粒子数反转密度 $N(x, y, z, t=0)=0$ ，可以看到初始时的尖峰脉冲序列，然而随着时间的增加，其逐渐衰减并且最终趋于常数值。图8 是一个典型的DMA 脉冲形状。

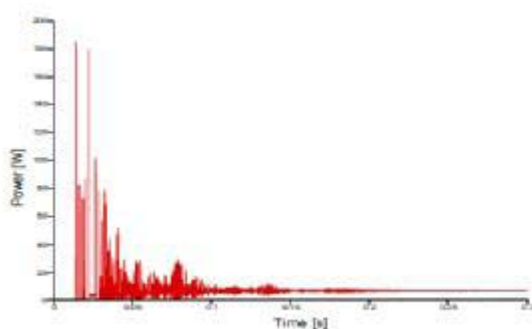


Fig. 7. DMA Power Output over Time

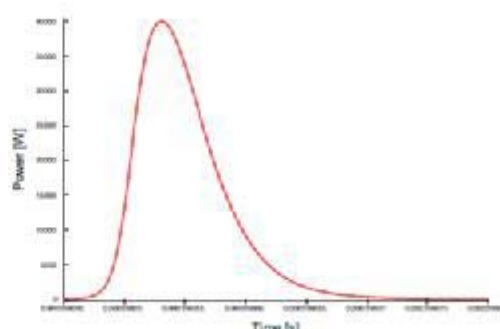


Fig. 8. DMA Pulse Shape Result



物理光学方法

在抛物线近似以及ABCD 传输矩阵精度不够的情况下，FEA 的结果可以导入到物理光学代码中进行高精度运算。物理光学方法可以在不用抛物线近似的情况下为光束在晶体中的传播提供全景三维模拟。为此，物理光学方法采用了分步光束传播方法（BPM），以小步长模拟光束在具有热畸变的晶体中传播过程。在计算过程中，BPM 考虑了FEA 分析中得到的局部折射率分布以及晶体端面形变。采用Fox-Li 迭代，BPM 方法计算了光束在谐振腔中多次往返传输，最终收敛于基模或者多个高阶横模的叠加。在计算的过程中有两个图形窗口是打开的，一个给出了随着迭代次数的增加，输出镜上的光强分布，如图9 所示。另一个窗口显示了随着谐振腔内迭代的进行，光斑的尺寸收敛过程以及同步计算的输出功率，如图10 所示。另外，还可以打开一个显示光束质量的窗口。BPM 方法还可以进行腔内本征模谱线的计算以及本征横模的形状计算。

鉴于光栏以及腔反射镜尺寸有限，BPM 工具还考虑了增益的动态特性以及衍射效应，这样它比DMA的计算更接近实际情况。BPM另一个重要的特征就是它可以模拟谐振腔失调效应。

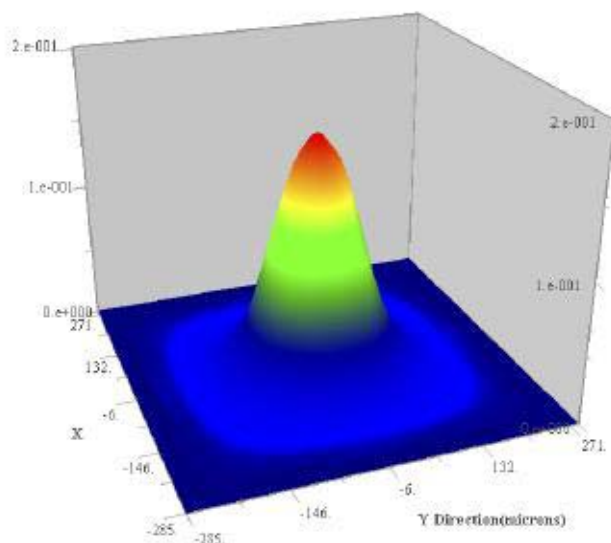


Fig. 9. BPM Beam Profile

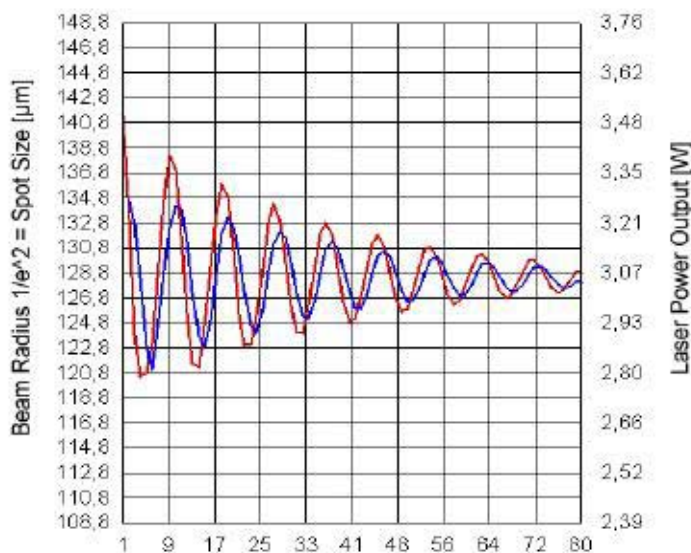


Fig. 10. / Beam Radius and / Power Output over Cavity Iteration

LASCAD™

激光教学的辅助工具

尽管 LASCAD™主要是为激光工程开发的，但是其易于操作的用户界面使得它非常适合于教学以及培训科学工作者和工程师。高斯光束的基本原理可以在使用过程中得到学习，复杂的谐振腔结构构型，包括热透镜效应，光栏，调Q等都可以清楚地进行演示。



结果验证以及展望

德国凯泽斯劳滕大学R. Wallenstein 教授领衔的激光小组多年来一直使用这款软件进行具有复合晶体高功率二极管泵浦激光器的分析设计与优化。他们一系列的实验测量结果已经验证了模拟结果的准确性非常高，参见图6。

目前 LAS-CAD 公司已经参与到政府支持的研究项目：Simulation and Optimization of Innovative Laser Systems。在该项目中LAS-CAD公司与7家德国的激光器制造商、艾尔兰根大学、德国古庭根激光实验室等合作，开发新的谐振腔数值模拟工具。其中一个最新的合作成果就是前面已经提到的DMA。DMA 模拟得到的数值结果已经被参与合作的德国Inno Las 公司实验验证，参见文章 Dynamic multimode analysis of Q-switched solid state laser cavities in Optics Express, Vol. 17, 17303 -17316 (2009)。该项目另一个研究目标是开发一种FEA 方法为谐振腔内的电磁场方程提供一个动态的三维解。初步结果已经发表在Photonics West 2009，具体参见Finite element simulation of solid state laser resonators in Proceedings of SPIE Vol. 7194-16 (2009)。