

FEMAG全球领先的材料晶体生长多物理场仿真分析软件

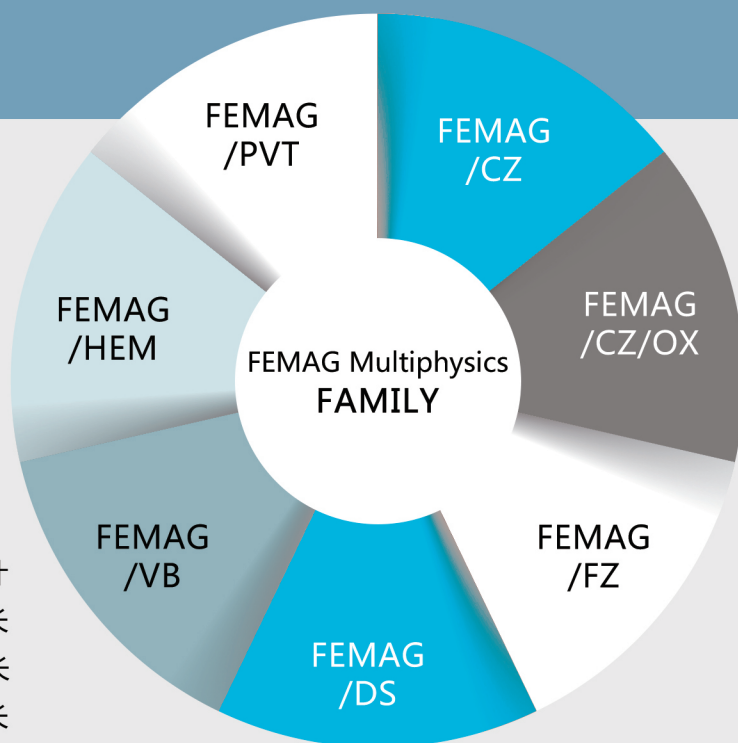
产品介绍

FEMAG是世界上首款商业的晶体生长数值模拟软件，由比利时新鲁汶大学教授 Dr. François Dupret 于20世纪80年代中期领导开发。Dr. Dupret 是第二届晶体生长模型国际研讨会主席、EUROTHERM相变热力学研讨会联合主席，曾任 Journal of Crystal Growth 期刊主编。

作为FEMAG公司创始人和首席科学家，Dr. Dupret 主持开发的FEMAG软件拥有国际上最先进、最高效、最全面的晶体生长工艺模拟技术和多物理场耦合仿真分析功能，可模拟各种晶体生长工艺，包括提拉法（Cz）、泡生法（Ky）、区熔法（FZ）、定向凝固法（DS）、垂直布里奇曼法（VB）、垂直梯度凝固法（VGF）、热交换法（HEM）以及物理气相传输法（PVT）等。FEMAG软件在集成电路、太阳能光伏、半导体芯片、蓝宝石等领域具有广泛的应用。

应用领域

- 晶体生长熔炉的设计
- 半导体单晶硅的生长
- YAG功能晶体的生长
- 光学级单晶锗的生长
- GaAs、CdTe晶体的生长
- 集成电路级单晶硅的生长
- 第三代半导体材料SiC晶体的生长
- 太阳能光伏单晶硅、多晶硅锭的生长
- 航空发动机涡轮叶片单晶高温合金的生长
- 氧化物（蓝宝石）、卤化物等LED光电晶体的生长



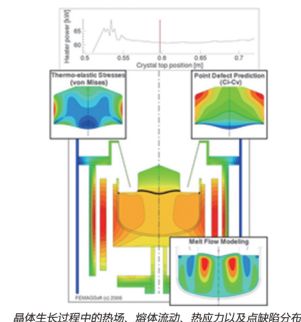
选择FEMAG

本土化的技术支持

位于上海的中仿FEMAG研发中心本着前瞻性的技术研发和本土化服务的目标，致力于为中国地区的FEMAG用户提供最全面的解决方案以及最优质的技术服务。

功能强大的晶体生长工艺模拟：

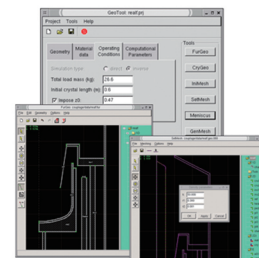
- 弯液面自动生成和计算
- 集成连续投料的工艺设置
- 固液界面与自由表面的精确分析
- 考虑对流、辐射传热的热场精确仿真
- 考虑磁场效应的流动、传热、应力的计算
- 用于熔体、气体流动计算的强大层流、湍流模型
- 支持包含温度、磁场变量的材料参数自定义功能



晶体生长过程中的热场、熔体流动、热应力以及点缺陷分布

简洁高效的操作流程：

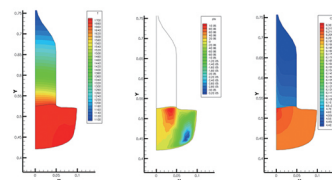
- 交互式的建模环境
- 丰富的材料数据库
- 非结构化网格自动剖分功能
- 全球领先的晶体生长专用的求解器
- 高效的几何建模工具，支持CAD模型导入
- 内置多种工艺条件、快速识别和定义边界条件



FEMAG软件操作界面简洁直观

强大的缺陷预测和分析能力：

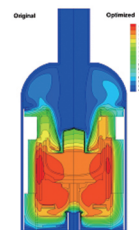
- 点缺陷浓度计算
- 氧浓度分布计算
- 掺杂物浓度计算
- 各向异性的热应力分析



晶体质量控制与分析
(a) 熔体/晶体温度分布；(b) 熔体流函数分布；(c) 熔体/晶体中的硼浓度分布

精细的熔炉结构设计与优化：

- 加热器布局设计
- 保温层结构布局设计
- 辅助加热器/多加热器功率布局设计
- 隔热罩与反射体形状、材质及布局设计



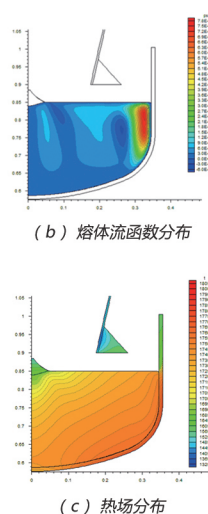
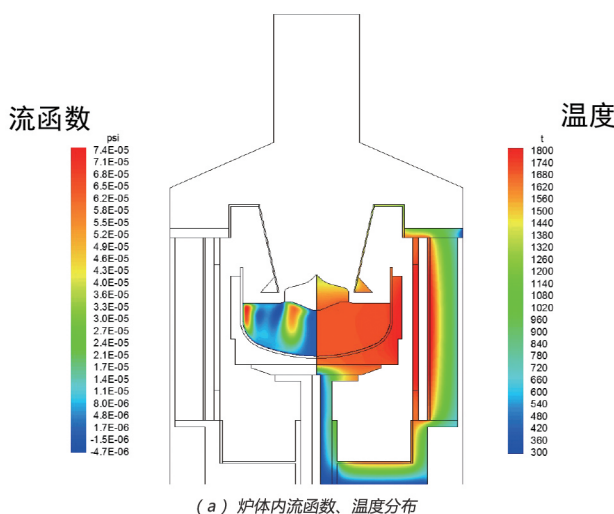
优化前后温度场对比

FEMAG/CZ是FEMAG专门用于模拟提拉法（Cz）晶体生长工艺的软件。该软件可对整个提拉生长过程，包括引晶、缩颈、转肩、等径生长、收尾等各个生长阶段所涉及的物理问题进行模拟分析。FEMAG/CZ广泛用于半导体/太阳能光伏单晶硅、单晶锗以及小尺寸蓝宝石等晶体生长的仿真应用。

FEMAG/CZ软件包括FEMAG/CZ基本模块与FEMAG/CZ/TMF三维磁场附加模块。后者可用于复杂磁场作用下的多场耦合晶体生长三维分析。

FEMAG/CZ软件的主要功能及特色：

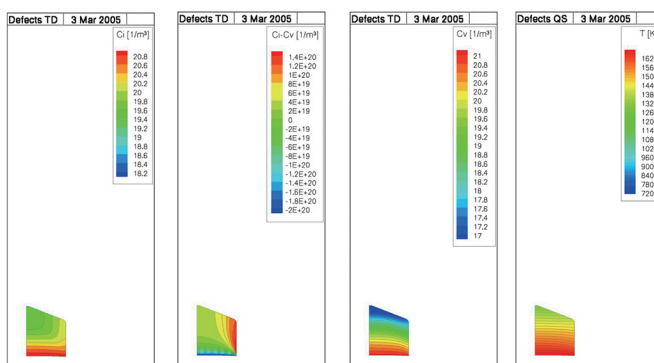
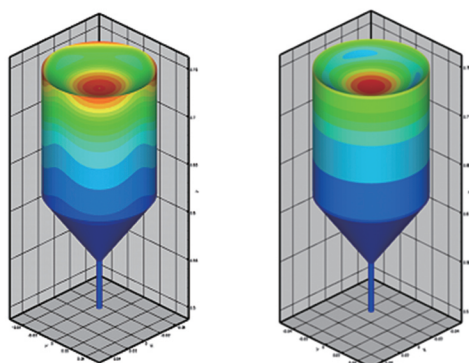
- 炉体全局热场分析
- 固液界面形状计算与位置跟踪
- 固液界面温度梯度计算
- 考虑时间参量的动态分析
- 熔体、气体对流计算
- 辐射传热计算
- 加热器功率预测
- 氧/碳含量预测
- 各向异性热应力计算
- 点缺陷浓度分析
- 连续提拉生长模拟
- 磁场作用下的三维多物理场计算



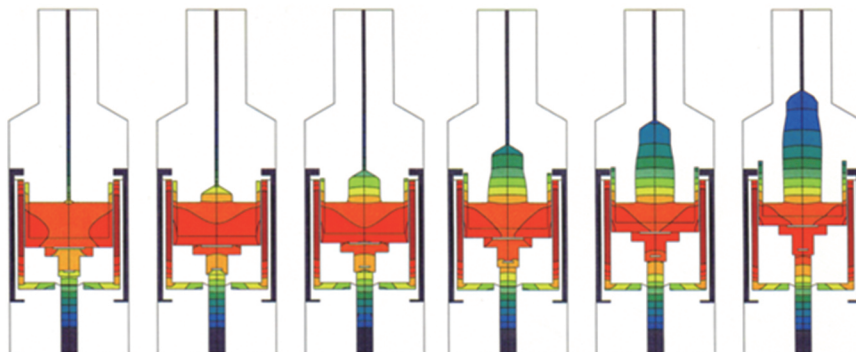
利用逆向动态模型全局模拟单晶硅生长（放肩、转肩阶段）时炉体内的流函数、温度分布，用户可以根据软件模拟结果，确定晶体提拉生长过程中的全局传热与流体流动特性。

晶体生长方位不同，热应力的分布明显不同，呈现明显的各向异性。

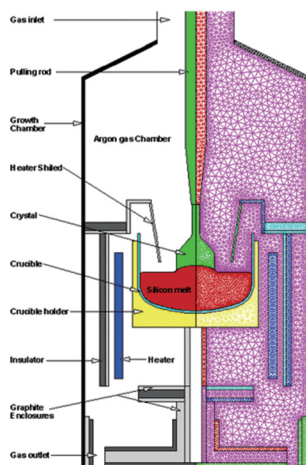
利用FEMAG/CZ软件可以综合考虑晶体生长、冷却过程中所有瞬时的影响因素，有效预测晶体缺陷浓度分布。



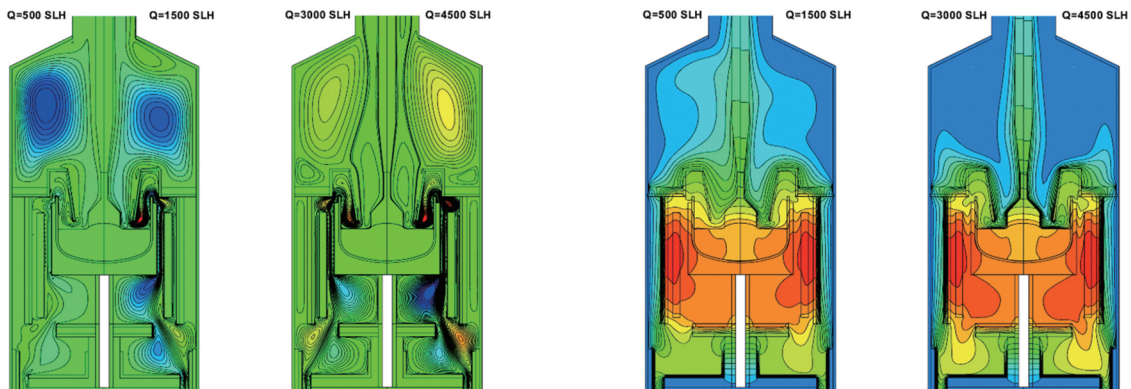
利用动态模型全局预测晶体生长中的温度场以及缺陷浓度（Ci-Cv）分布



单晶锗Cz直接动态全局模拟（逐步减小加热功率，计算晶体形状）温度场随时间的变化



FEMAG/CZ全局非结构化网格



气体流动对全局传热的影响（流线）

气体流动对全局传热的影响（温度场）

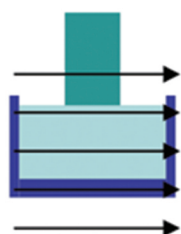
100mm单晶硅Cz生长过程中的气体流动模拟
(提拉速率：2 mm/min；进气口流动速率分别为：500, 1500, 3000, 4500 st.lit/h；出气口压力：0.1 MPa；晶体转动速率：20 rpm；坩埚转动速率：-5 rpm)

FEMAG/CZ/TMF是FEMAG/CZ软件的附加模块。该模块可以有效分析横向磁场（TMF）作用下的晶体生长三维多物理场问题。依据磁场作用的方向，TMF包括以下三种磁场：

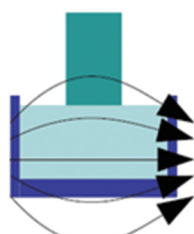
- 水平磁场（HMF）
- 卵形磁场（OvMF）
- 倾斜磁场（SMF）

FEMAG/CZ/TMF模块的主要特色：

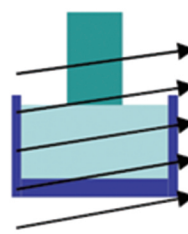
- 分析磁场对熔体流动、温度以及组分的影响
- 分析磁场作用下固液界面的变形
- 计算磁场作用下晶体生长过程中的温度梯度以及氧化物分布
- 可求解高强磁场（可达到工业实际应用中的500mT）问题



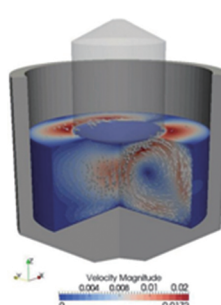
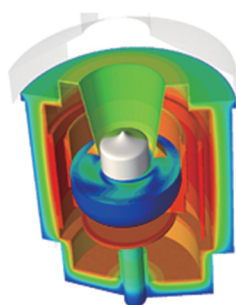
水平磁场



卵形磁场



倾斜磁场

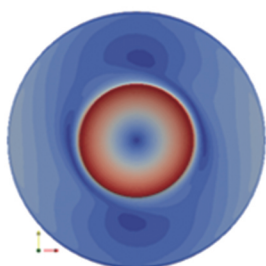


横向磁场作用下的3D单晶硅提拉生长全局传热与流动模型

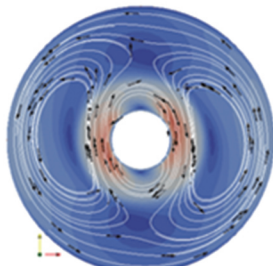
当生长系统中存在磁场时，粘性与磁场的相互作用将促使很薄的边界层沿坩埚、晶体产生。在考虑TMF情况下，沿着熔体-晶体（固液）界面、熔体-坩埚界面处存在两种MHD（磁流体力学，magnetohydrodynamics）边界层：

- Hartmann边界层（HBL）——沿不能忽略磁场法向分量的表面产生；
- Parallel边界层（PBL）——沿可忽略磁场法向分量的表面产生；

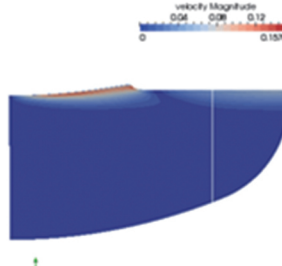
HBL比PBL的厚度要小很多。



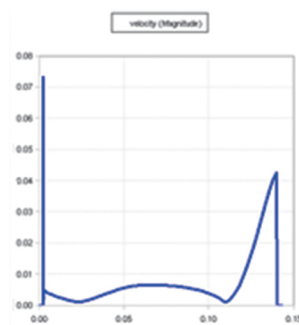
(a)



(b)



(c)



(d)

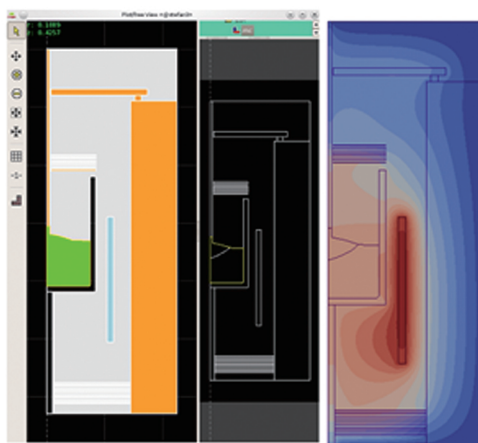
直径为300mm的单晶硅在0.5T TMF下提拉生长时的速度场分布（a）及流线（b）（c）、（d）熔体-坩埚界面处的速度场与截面上的速度曲线（界面处有显著的Hartmann边界层）

FEMAG/CZ/OX是FEMAG专门用于模拟化合物晶体的提拉法与泡生法生长工艺的软件。该软件可以分析卤化物/氧化物闪烁性晶体与大尺寸蓝宝石晶体的生长过程，在LED光电技术、高能物理、医学成像等领域具有广泛的应用。

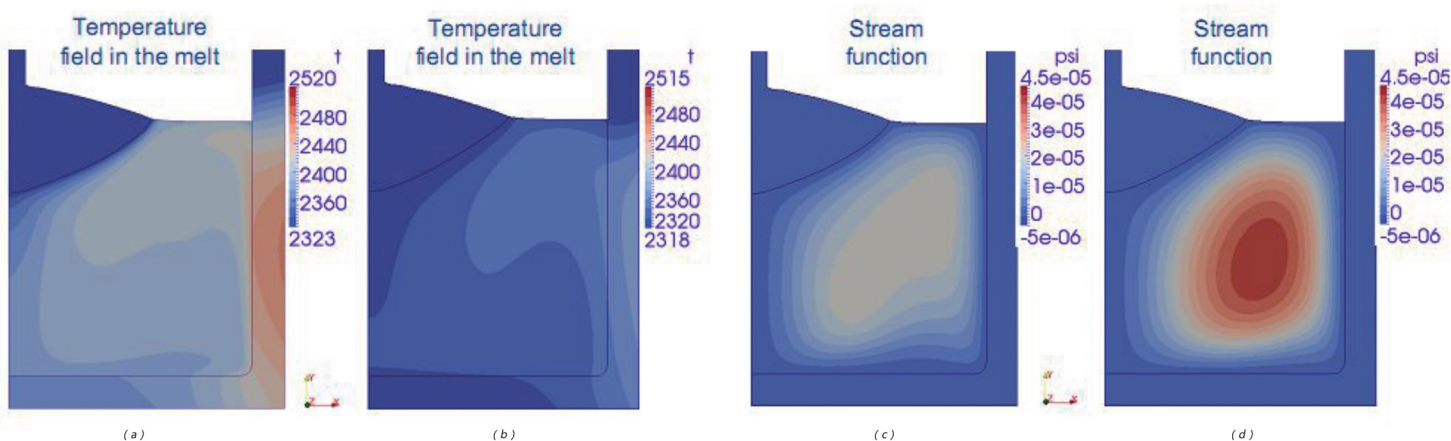
FEMAG/CZ/OX软件的主要功能及特色：

- 化合物晶体提拉生长模拟
- 蓝宝石泡生法生长模拟
- 固液界面形状计算
- 熔体全局热场计算
- 熔体、气体对流计算
- 内部热辐射计算
- 晶体各向异性热应力计算
- 电阻加热与感应加热灵活设置

蓝宝石因其特殊的物理化学性质、价格优势与晶体尺寸优势成为光电子与微电子产业中用量最大的无机氧化物晶体。泡生法（Ky）因容易获得适合大尺寸蓝宝石晶体生长的最佳温度梯度而成为生长蓝宝石单晶最常用的工艺方法。



大尺寸蓝宝石晶体泡生法生长过程模拟



图（a）、（b）分别为不同熔体热导率与不同结晶温度下，不同的熔体温度分布

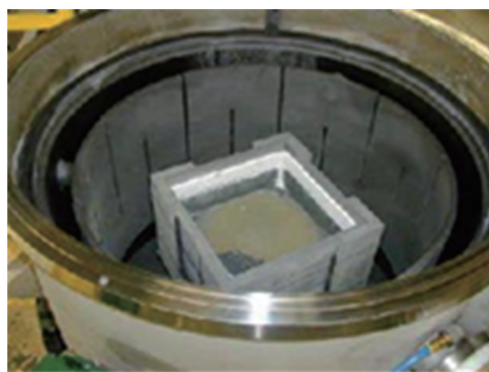
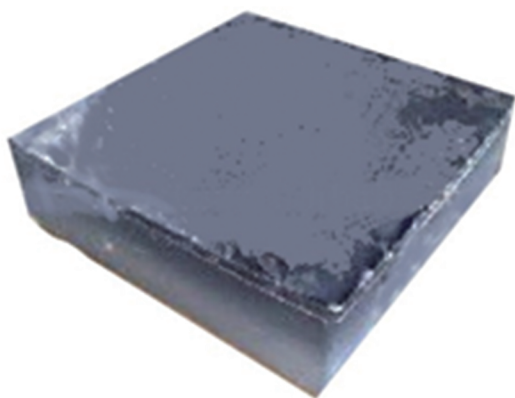
图（c）、（d）分别为不同熔体热导率与不同结晶温度下，不同的流函数分布

（a）、（c）：热导率 $\lambda=10 \text{ W/m.K}$ ，结晶温度 $T_c=2223 \text{ K}$ ；（b）、（d）热导率 $\lambda=100 \text{ W/m.K}$ ，结晶温度 $T_c=2218 \text{ K}$ 。从分析结果可以看出，通过改变熔体的热导率与结晶温度，可以改善熔体内的温度场以及流函数分布。

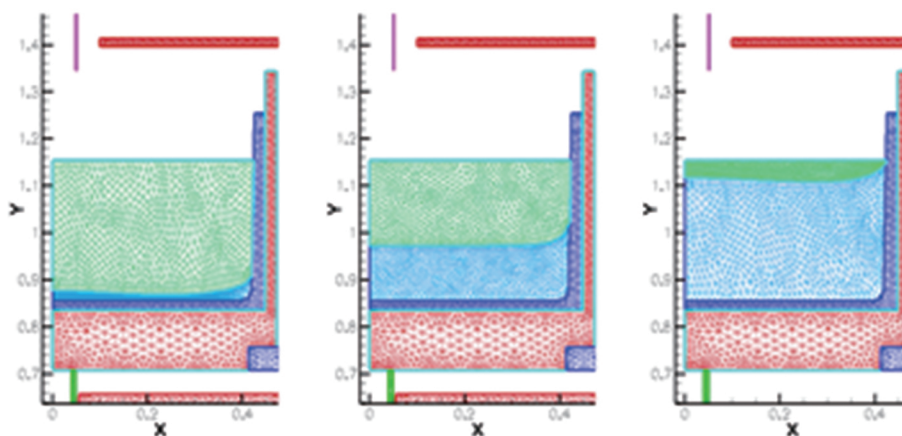
FEMAG/DS是FEMAG专门用于模拟定向凝固法（DS）晶体生长工艺的软件。该软件可用于分析多晶硅锭、单晶高温合金的定向凝固生长，在太阳能光伏、LED以及航空发动机高温合金单晶涡轮叶片等领域具有广泛应用。

FEMAG/DS软件的主要功能及特色：

- 定向凝固工艺条件设置
- 熔体全局热场计算
- 固液界面形状计算
- 辐射传热计算
- 稳态/非稳态熔体对流
- Marangoni效应分析
- 熔体中氧/碳浓度计算
- 不同冷却模式的灵活选择
- 加热器、隔热罩等熔炉组件对生长环境的影响分析
- 灵活定义加热器功率位置等参数随时间的变化关系

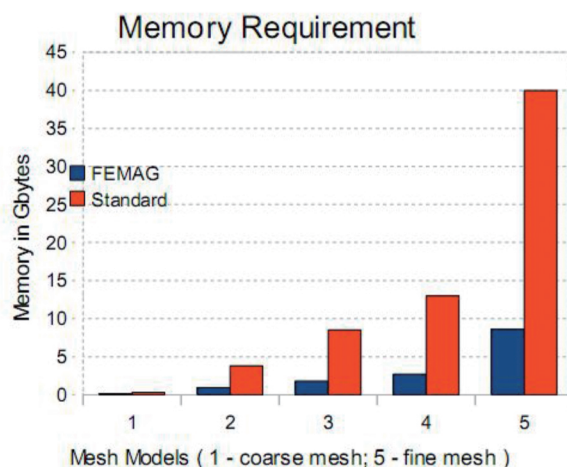
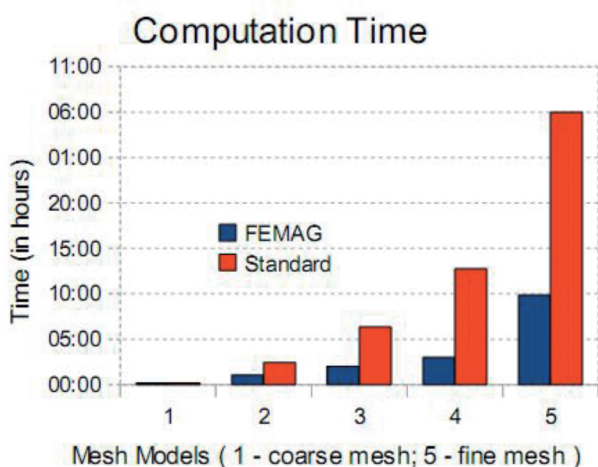


多晶硅锭及其定向凝固生长

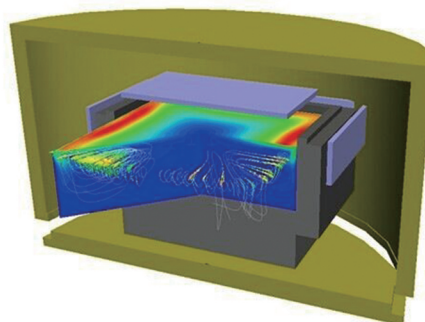
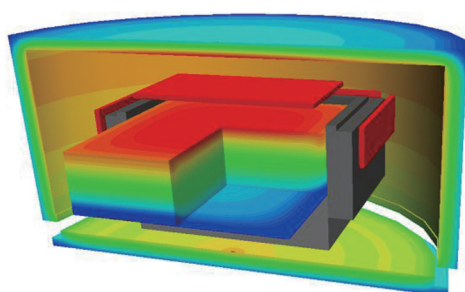


不同生长阶段全局非结构化网格

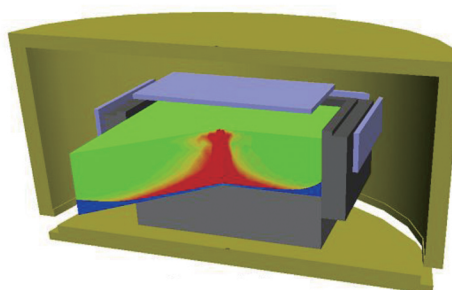
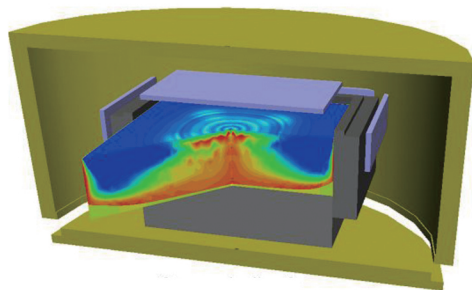
FEMAG/DS软件采用高效、快速的FLET (Fourier Limited Expansion Technique) 方法构建模型，该方法结合了2D有限元法 (R-Z面内) 与谱分析法的优点，用户只需要定义垂直面上的几何模型，而水平面上的几何信息可由谱方法自动处理生成。利用FLET方法可以显著降低建模成本、简化几何数据，使得网格生成和控制更容易，并在保证求解精度的前提下提高计算效率。利用FEMAG/DS软件可以高效率地计算出工艺过程中热传递、熔体对流、固液界面、碳/氧化物/杂质分布等结果。



从上图可以看出，与Cartesian方法相比，采用FEMAG/DS软件进行多晶硅锭的定向凝固生长模拟时，计算效率更高效，同时该软件对计算机内存的配置要求也大幅度地降低。



多晶硅锭定向凝固生长的流速与温度场分布

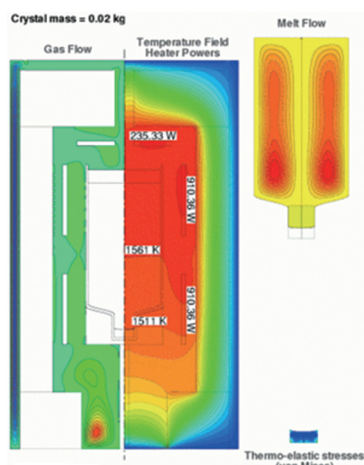


多晶硅锭定向凝固生长中氧与碳的浓度分布

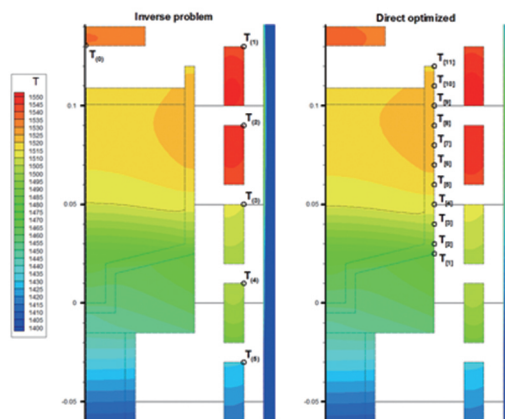
FEMAG/VB是FEMAG专门用于模拟垂直布里奇曼法（VB）与垂直梯度凝固法（VGF）晶体生长工艺的软件。该软件可对CdTe、GaAs等晶体的VB/VGF法生长过程进行仿真分析。

FEMAG/VB软件的主要功能及特色：

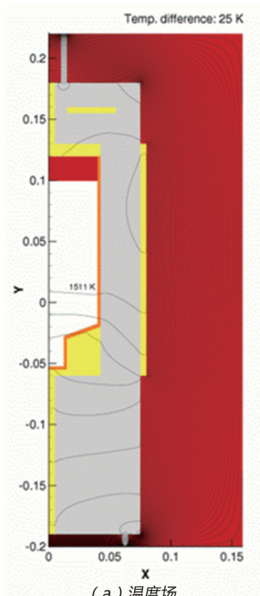
- 炉体全局热场计算
- 准稳态和动态模拟
- 熔体流场计算
- 辐射传热计算
- 固液界面形状计算
- 不同冷却模式的灵活选择
- 熔体、晶体中组分扩散与传质计算
- 加热器、隔热罩等熔炉组件对生长环境的影响分析



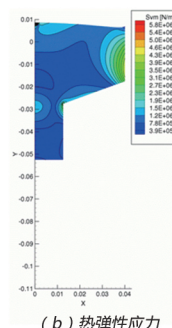
准稳态模拟3Kg GaAs单晶VGF法生长



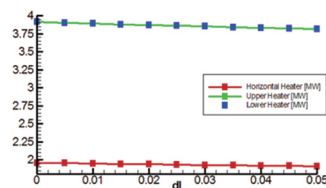
逆向动态与直接动态模拟VGF法晶体生长的比较



(a) 温度场



(b) 热弹性应力



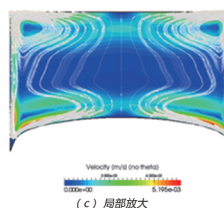
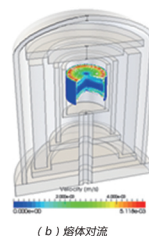
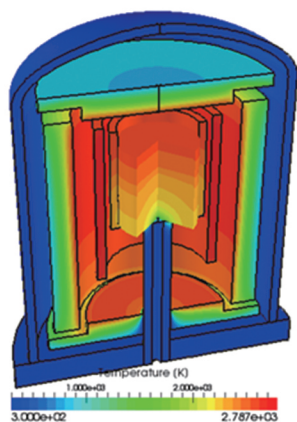
(c) 加热器功率分布评估

直径80mm晶体生长模拟（生长速率3mm/h、加热器3个、每步计算晶体长度增加50mm）

FEMAG/HEM是FEMAG专门用于模拟热交换法（HEM）晶体生长工艺的软件。该软件可对蓝宝石等晶体热交换法生长过程进行仿真分析。

FEMAG/HEM软件的主要功能及特色：

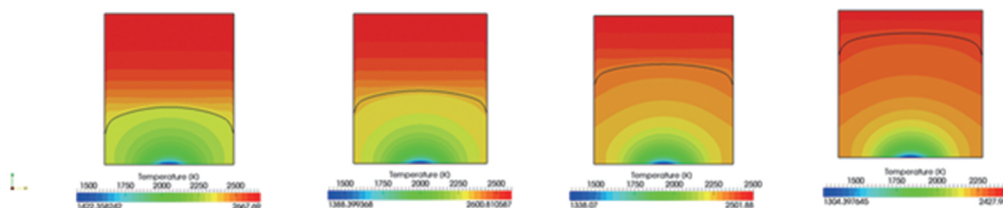
- 炉体全局与局部热场计算
- 辐射传热计算
- 熔体流动计算
- 气体对流计算
- 固液界面形状计算
- 自动加热器功率计算



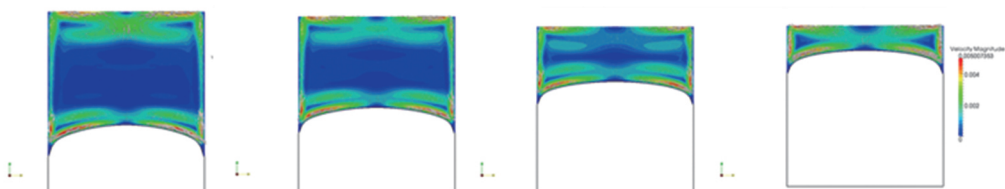
(a) 炉体全局温度分布

(c) 局部放大

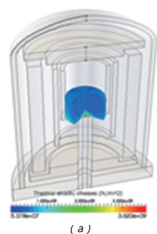
蓝宝石热交换法生长的温度分布以及熔体对流



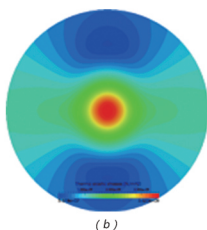
(a) 动态模型预测不同时刻晶体与熔体内的温度分布



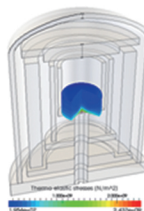
(b) 动态模型预测不同时刻熔体内的速度分布



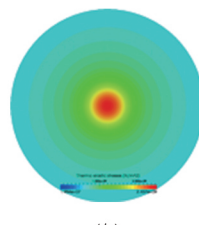
蓝宝石晶体生长在A轴方向的热应力



(b)



(a)



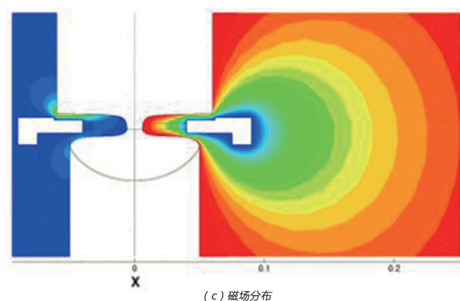
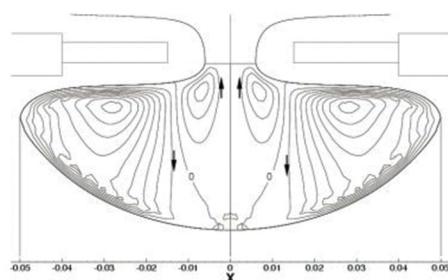
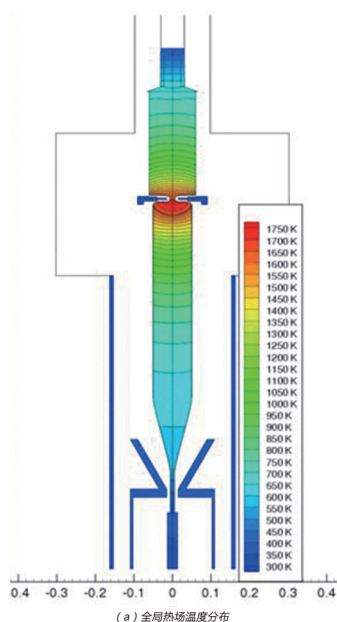
(b)

蓝宝石晶体生长在C轴方向的热应力

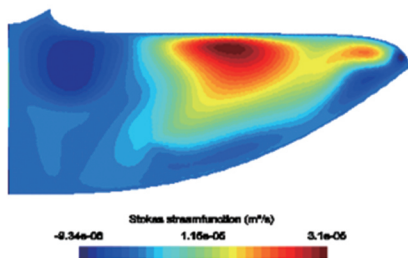
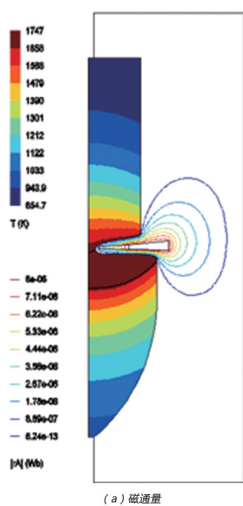
FEMAG/FZ是FEMAG专门用于模拟区熔法生长工艺的软件。该软件可对区熔法生长的超纯单晶硅工艺过程进行模拟。超纯单晶硅广泛用于大功率器件、电力汽车、高铁等设备上。

FEMAG/FZ软件的主要功能及特色：

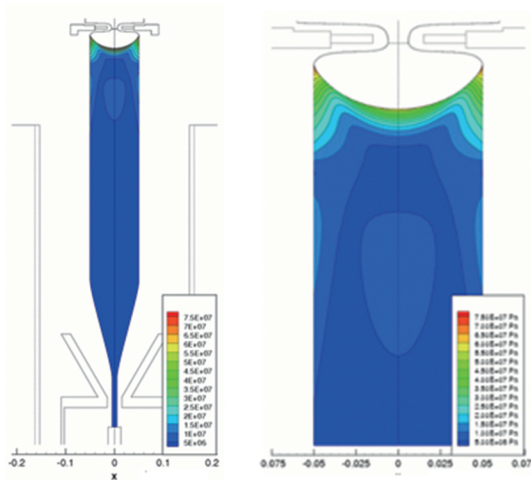
- 区熔法工艺条件设置
- 熔区受力分析
- 熔体全局热场计算
- 准稳态与逆向动态模拟
- 感应加热器设置
- 各向异性热应力计算
- 点缺陷浓度计算
- 掺杂物组分传输计算



100mm超纯单晶硅区熔法生长准稳态模拟 (1mm/min 提拉速率)



200mm单晶硅区熔法生长准稳态模拟



FEMAG/PVT是FEMAG专门用于模拟物理气相传输法（PVT）晶体生长工艺的软件。该软件可分析SiC、AlN、ZnO等晶体的PVT法生长，为热场设计、炉体组件优化、工艺质量分析等提供可靠的解决方案，在半导体、太阳能光伏等领域具有广泛的应用。

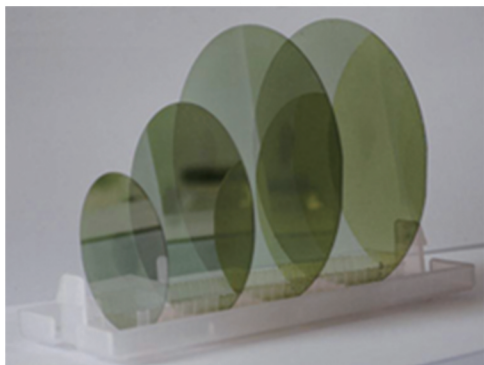
FEMAG/PVT软件的主要功能及特色：

- 支持半透明辐射传热
- 支持感应加热分析
- 准确的气体流动计算模型
- 支持多种气体进、出口模式设置
- 支持不同宏单元之间的传热系数的计算

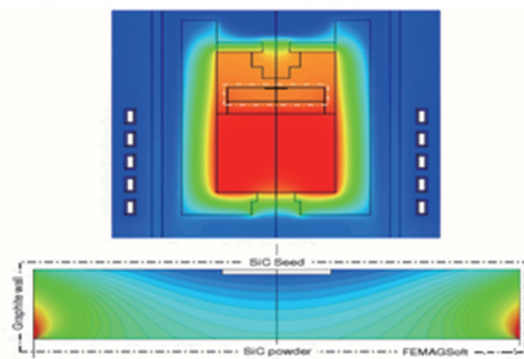
FEMAG/PVT软件可以全面分析PVT生长过程中涉及的温度、生长速率、气体流动以及热应力等问题，特别是可以用于模拟SiC晶体的PVT法生长过程。SiC晶体具有高击穿电场、高热导率、高电子漂移速率等特点，是制备高温、大功率、低损耗、大直径电子器件芯片以及光伏组件的基础和关键。



SiC晶体在半导体、集成电路、太阳能光伏电池中的应用



SiC晶片



SiC沉积腔内的温度分布（电压30V、气压0.015bar、封闭腔外流量0.004 std m³/s）

FEMAG公司的 主要合作伙伴

FEMAG拥有来自世界各地的顶级公司和机构作为合作伙伴。FEMAG公司拥有一大批世界顶尖级科学家和专业工程师，长期与新鲁汶大学有非常密切的合作。此外，公司还得到了比利时政府的大力支持。

FEMAG公司的主要合作伙伴有：

1、UCL (新鲁汶大学)

www.uclouvain.be

新鲁汶大学早在20世纪80年代就开展了晶体生长方面的研究，是晶体生长领域研究的先驱单位。目前FEMAG的相关研究在该校系统工程与应用力学中心进行。

2、Kayex (美国Kayex技术公司)

www.thermalproductsolutions.com/kayex

Kayex技术公司是美国世界五百强企业SPX的合作子公司，是世界领先的电子和太阳能级硅材料提拉单晶炉设备供应商，为全球众多优秀的太阳能硅片企业独家提供单晶生长设备，其客户遍及北美和欧亚。Kayex公司在晶体生长工艺发展和优化领域使用FEMAG软件。

3、CGS

www.cgs-gmbh.de

FEMAG公司与CGS保持着密切的合作关系。

4、IKZ

www.ikz-berlin.de

IKZ是德国莱布尼茨学会的一个研究机构，也是柏林Forschungsverbund研究协会的成员之一，其主要的研究领域包括自然科学、材料科学等。IKZ在浮动区熔领域的研究就是借助FEMAG/FZ软件来进行的。

5、Hanyang University (韩国汉阳大学)

www.hanyang.ac.kr

FEMAG/CZ软件在韩国汉阳大学相关科研领域的应用已经具有多年的历史。主要应用部门和机构包括计算机与电子工程部、纳米SOI国家重点实验室等。

6、Washington University in St. Louis (美国圣路易斯华盛顿大学)

www.wustl.edu

FEMAG公司与该校能源、环境、化学工程等诸多部门都有紧密的合作，软件得到校方的认可。

7、AWEX

www.awex.be

FEMAG在AWEX的协助与合作下发展非常迅速，商业活动遍及全球各地。

8、DGTRE

recherche-technologie.wallonie.be

DGTRE为FEMAG的发展和研究提供了大力支持。

9、其他国内高校和科研机构

清华大学、北京有色金属研究总院、上海大学、天津环欧半导体材料、中环股份等。



FEMAG公司部分合作伙伴



关于FEMAG公司>>

FEMAG是全球领先的晶体生长数值模拟软件。从20世纪80年代开始，FEMAG公司的核心成员就着力为全球用户开发最专业的晶体生长数值仿真工具。经过三十多年的不断发展，FEMAG公司已为全球绝大多数晶体设备供应商、半导体材料科研机构等提供设计、优化其晶体生长过程的帮助。

FEMAG公司总部位于比利时，由国际著名晶体生长和流体力学专家、比利时新鲁汶大学教授Dr. Dupret所创立。FEMAG在国际上广受欢迎，用户遍及全球。



关于中仿科技 (CnTech) 公司>>

近年来，中国已经成为全球最大的光伏制造基地和半导体材料消费市场，同时，处于全球竞争体系中的本土半导体设备企业面临着国际半导体设备公司的垄断，国内的晶体设备厂商要破除国际垄断的坚冰，就需要做到更灵敏的反应、灵活的研发和加倍的努力。

中仿科技 (CnTech) 与比利时FEMAG公司深度强强合作，本着“根植中国，服务全球”的理念，共同在中国设立中仿FEMAG研发中心，将国际一流的数值算法及数字仿真技术引入中国，研发更适合中国市场并完全拥有中国自主知识产权的产品，服务中国并辐射全球用户。中仿FEMAG研发中心以具有前瞻性技术的产品、强大的协同创新能力、优质的技术支持，让本土高端装备、材料科学、半导体、集成电路、LED、晶体设备厂商和科研用户更富有竞争力。

中仿科技 (CnTech) 成立于2003年，是中国领先的仿真分析软件和系统解决方案的提供者。中仿科技依靠自主创新研发拥有自主知识产权的中仿CAE系列产品，同时与国际上领先的数值仿真技术公司拥有长期而紧密的合作关系，具备较强的自主研发能力和创新能力，能够为中国企业和科研机构提供世界一流的仿真技术解决方案。