

文章编号: 1671-6833(2008)03-0054-05

## 基于引擎机制的 PECVD 工作过程的虚拟仿真

王 栋, 马小峰, 李大磊, 胡书杰

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 讨论了卧式 PECVD 的工作原理, 对虚拟加工过程中仿真实现的关键技术进行了研究. 基于 Open Inventor 开发平台强大的引擎机制, 用程序实现了连续式等离子体增强化学汽相沉积 (PECVD) 系统 (In-line PECVD System) 的虚拟加工工作过程的仿真, 从而保证物理样机的设计成功率、减少物理样机的设计与试制时间.

**关键词:** 虚拟现实; 等离子体增强化学汽相沉积; 过程仿真; 引擎机制

**中图分类号:** TP 391 **文献标识码:** A

### 0 引言

能源与环境问题是 21 世纪人类面临的两大主要问题. 太阳能发电的大规模应用是解决能源与环境问题的有效途径. 在技术上实现创新和突破, 发展廉价、高效的新一代太阳能电池, 是摆在我们面前的迫切任务<sup>[1]</sup>. 采用氮化硅薄膜作为晶体硅太阳能电池的减反射膜已经成为光伏界的研究热点<sup>[2-3]</sup>. 氮化硅薄膜的制备方法很多, 但现在工业上和实验室一般使用等离子体增强化学汽相沉积 (PECVD) 来生成氮化硅薄膜<sup>[4]</sup>. 这是因为这种方法沉积温度低, 对多晶硅中子寿命影响小, 且能耗低, 工艺重复性好等.

目前 PECVD 的国产设备在技术上还落后于国外水平, 其中最大的问题就是实用性、稳定性难以保证器件的正常生产, 甚至造成大多数企业的亏损, 可靠性不强. 鉴于此, 上海市科委将研制新一代卧式 PECVD 设备作为一项重大科技攻关项目. 笔者基于 Open Inventor 开发平台强大的引擎机制, 对连续式 PECVD 系统 (In-line PECVD System, 简称 ILPECVDS10-1) 的虚拟加工工作过程进行仿真, 从运动学上保证物理样机的设计成功率, 减少物理样机的设计与试制时间, 实现太阳能电池设备研制的跨越式发展之路.

### 1 设计原理及工作过程定义

ILPECVDS10-1 设备系统结构上主要由预加

热室、工艺镀膜室、预冷室、净化推舟系统、气路系统、电气控制系统、计算机控制系统、真空系统、射频系统等 9 大部分组成. 设备原理图如图 1 所示 (由于结构对称, 只画原理图的一半.)

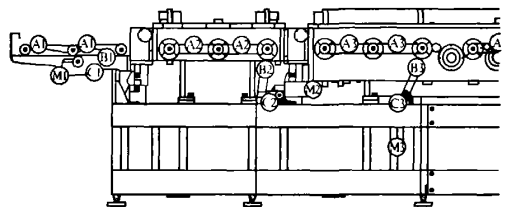


图 1 ILPECVDS10-1 样机部分设计原理图

Fig.1 Design principle diagram of ILPECVDS10-1 model machine part

在设计样机原理图的基础上, 定义各电机、皮带和各工艺腔室门的动作顺序, 以及整个载片架 (载太阳能电池基板) 的运动过程, 见图 2. 图中: M 表示马达; C、B、A 表示跟马达相连的传动轮.

### 2 技术实现

#### 2.1 Open Inventor 引擎机制<sup>[5]</sup>

Open Inventor 是建立在 OpenGL 之上的面向对象建模工具集, 已经成为在 Windows、Unix、Linux 交叉平台上用 C++ 和 Java 语言开发三维图形的标准. Open Inventor 深层次的功能如引擎机制的应用可以方便地开发出虚拟工作过程, 并使得该虚拟现实系统在普通的 PC 机上运行成为可能.

收稿日期: 2008-05-20; 修订日期: 2008-07-01

基金项目: 上海市重大科技攻关项目 (05DZ11001).

作者简介: 王 栋 (1970-), 男, 河南沁阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事虚拟技术及数字化工艺等方面的研究.

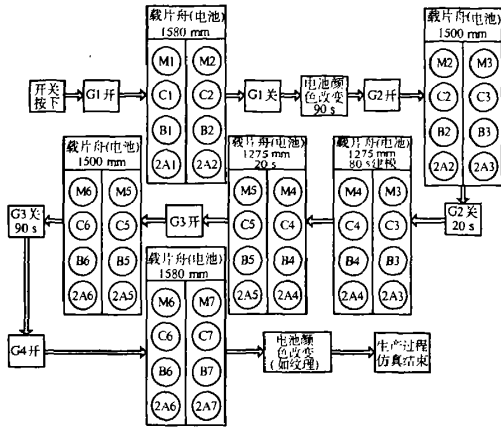


图2 工作过程定义

Fig.2 Definition of work process

通用引擎一般包括3个部分:输入域、输出域和计算表达式函数。输入域值和另一引擎的输出接口相连或由计算机时钟驱动。当输入发生变化时,引擎会自动调用计算表达式,Expression的作用是完成从输入到输出的复杂逻辑功能的实现,包括数学计算( Calculator Engine 中的功能)、标量到矢量的转换等功能。引擎的输出接口一般和我们想要控制的运动节点的域值相连,或作为下一相连引擎的驱动。引擎中的计算功能和通知功能是分别实现的,即一旦输入变化,输出一定变化,因为此时调用了 Expression 功能,但是否传到与其相连的下一级输入域值是由另外的 Notification 机制控制,这一功能分离模式使得引擎的应用十分灵活和容易控制。一般引擎的功能原理图如图3所示。

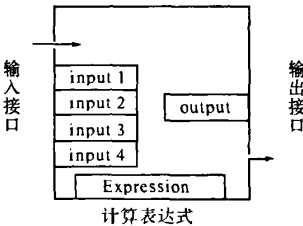


图3 引擎原理图

Fig.3 Schematic diagram of engine

2.2 场景图

在场景图中,顶层节点位姿状态影响较底层层次上的节点信息,靠左边节点位姿状态影响同层次右边节点信息。以上正是应用了 VRML2.0 中的场景图技术。VRML 的场景图就像 2D 图像的位图,它提供一个所要创建世界的结构。一张 VRML 的场景图包含一组对象。当它们被填充后,这些对象在三维空间中存在,都具有空间位姿、材质、纹

理等信息<sup>[6]</sup>。基于 Open Inventor 传感器及引擎机制的腔室门开关场景图如图4所示。

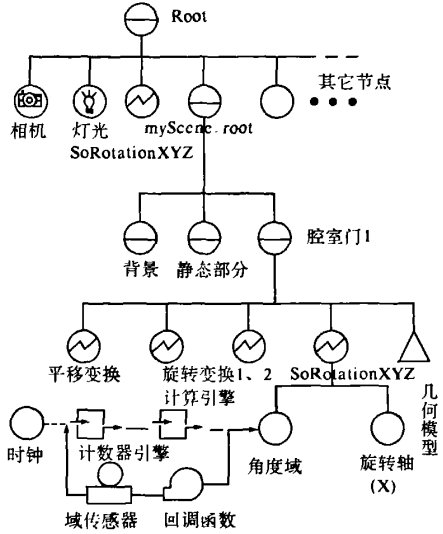


图4 工艺腔室门1开关场景图

Fig.4 Scene graph about first door of workroom

2.3 立体显示效果的实现

从本质上说虚拟现实(VR)是用计算机仿真的方式生成一种虚拟环境(VE),通过各种传感设备,将用户“投入”到该环境中,实现用户与该环境直接进行自然交互的技术,它具有沉浸-交互-构想(Immersion-Interaction-Imagination)3个基本特征<sup>[7]</sup>,而立体效果的实现则是凸现虚拟现实技术的关键环节。本课题在实现整个 PECVD 加工工艺过程的基础上,利用 Open Inventor 封装好的 SoXtAnaglyphStereo 类,实现了快捷键快速转化为立体显示的功能,从而避免了在利用 Open Inventor 自身带浏览器浏览动画过程中要手动进行繁琐调整的步骤,进一步增强了装备加工工艺过程演示的现场沉浸感和交互效果。针对普通 PC 普遍支持红绿立体效果,本研究实现了一般 PC 上的红绿立体效果。立体显示原理图如图5所示。

实现步骤为:

Step1: 窗口系统处理用户动作并生成相应的窗口事件,如键盘、二维及三维鼠标事件等;

Step2: SoXtViewer 与窗口系统相联系,在 SoXtViewer 中将窗口事件转化为工具包事件并和相应的 HandleEventAction(事件行为句柄)相联系,而 HandleEventAction 直接应用于场景图,在 SoXtViewer 中封装了产生立体效果所必须的视差设置函数,一旦回调函数被激发后,立即产生视差;

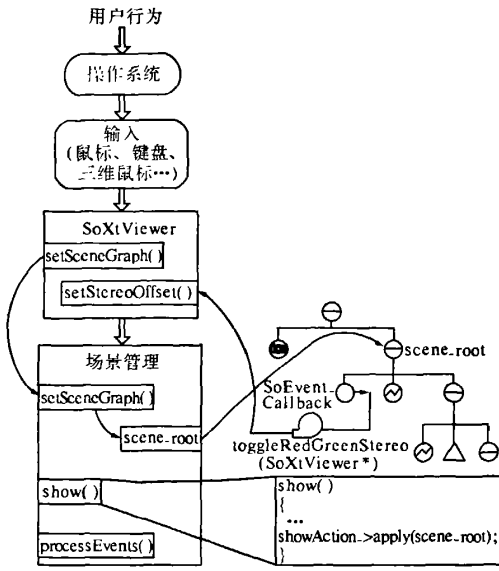


图5 立体显示实现原理及场景图

Fig.5 Stereo displaying theory and scene graph

Step3: 场景管理器负责对场景图的管理和绘制工作。在 scene\_root 组节点中插入 SoEventCallback(事件回调节点)用于接收来自用户的动作事件,一旦收到用户感兴趣的事件(按下 P 键),则可以利用回调函数机制触发用户自定义的功能函数 toggleRedGreenStereo(红绿立体显示);

Step4: toggleRedGreenStereo 中定义了 SoXtViewer 类中的 setStereoOffset(视差),一旦红绿立体显示函数被调用,则用户自定义的视差参数即被设定;

Step5: 根据设定的视差值,绘制窗口绘制左右两帧场景画面,因本例中考虑到普通 PC 上的使用,定义了红绿立体显示函数,左面场景为绿色,右面场景为红色,使用最普通的红绿立体眼镜即可在普通 PC 上开发和观察结果,如果有高端的视设备如光栅立体眼镜,只需要在程序开发中应用 SoRawStereo 类中封装好的方法即可;

Step6: 循环事件处理列表,继续接收不同的用户行为及事件,按照定义好的事件处理函数作相应的处理。实现一般 PC 机上的红绿立体显示程序如下:

```
void toggleRedGreenStereo(SoXtViewer * pViewer)
{ pAnaStereo = new SoXtAnaglyphStereo();
  pAnaStereo -> setColorFilter ( SoXtAnaglyphStereo::RED_CYAN );
  pViewer -> setStereoOffset(0.25); }
```

PC 机上的红绿立体显示效果图如图 6 所示。

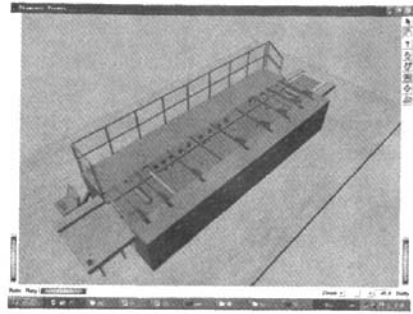


图6 实现 PC 机上的红绿立体显示效果

Fig.6 Red and green stereo display effect on PC

### 2.4 硅片组加热程序实现

硅片的加热过程是工作过程中一个比较重要的仿真过程,在程序实现过程中有两个比较关键的步骤:①在 UG 中建模时把 25 片载片舟上的硅片作为一个部件来建模。先建立一个模型,然后再建立一个硅片模型,在后面组装时按绝对坐标来控制装配即可以实现硅片组的建立。②在场景图的构建中,在和硅片组同一层次同一 SoSeparator 节点下,添加一 SoDirectionalLight 节点于模型节点前,利用 Open Inventor 中的回调函数机制对光源的颜色进行控制,从而模拟出硅片组加热颜色的变化过程,仿真效果如图 7 所示,程序实现如下:

```
myDirLight_open_Callback ( void * data, SoSensor * )
{ ...
  myLight_Switch -> on. setValue ( TRUE/ FALSE ); }
SoDirectionalLight * myDirLight = new SoDirectionalLight;
SoAlarmSensor * myAlarm_1 = new SoAlarmSensor ( myDirLight_open_Callback, myDirLight );
... }
```

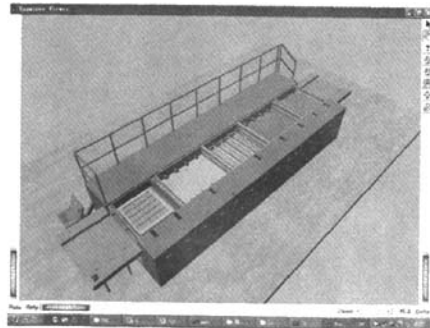


图7 硅片组加热后的运行界面

Fig.7 Effect on Silicon Group hotted

## 2.5 粒子系统的实现

粒子系统方法的基本思想是用许多形状简单且赋予生命的微小粒子作为基本元素来表示物体。该方法侧重于物体的总体形态和特征的动态变化,把物体定义为不规则的、随机分布的粒子,而每个粒子均有一定的生命周期。随着时间的推移,旧的粒子不断死亡,新的粒子不断生长,借助粒子的这种出生、成长、衰老和死亡的过程,能够较好地反映模糊物体的动态特性。同时与粒子相关的每一个参数均受到一个随机过程的控制,以规定粒子在系统中的形状、特征和运动。

利用粒子系统方法描述自然现象,首先应对所要描述的对象特性进行分析,包括对象的静态特性、动态特性等;其次是对粒子系统进行绘制。具体步骤如下:

Step 1:在系统中产生新的粒子;

Step 2:赋予每个粒子一定的静态属性;

Step 3:删除在系统中已经存在但超过其生命周期的粒子;

Step 4:根据剩余粒子的动态属性对粒子进行移动和变换;

Step 5:显示具有生命的粒子所组成的图形。

首先加入包含粒子系统的动画类头文件、种类类头文件及其他必须的头文件:

```
#include <FXViz/nodes/SoParticleFlame.h >
#include <FXViz/nodes/SoParticleAnimation.h >
#include <FXViz/nodes/SoParticleLightRay.h >
#include <FXViz/SoFXViz.h >
```

然后根据粒子场的效果调试各个参数,如粒子的大小、颜色、种类、发射体的形状、生命周期、速度及影响因子的参数的调整。其中第4个等离子源构建程序如下:

```
SoParticleLightRay * plasma_4 = new SoParticleLightRay;
plasma_4 -> speed. setValue(200. f); //粒子运行速度
plasma_4 -> numParticles. setValue(50000. ); //生成粒子数目
plasma_4 -> initialColor. setValue(1. 0, 0. 0, 0. 0); //初始颜色值
plasma_4 -> endColor. setValue(0. 0, 0. 0, 1. 0); //终止颜色值
plasma_4 -> initialSize. setValue(1. f); //初始粒子大小
```

```
plasma_4 -> endSize. setValue(1. f); //终止粒子大小
```

```
plasma_4 -> particleShape = SoParticleAnimation::POINT; //粒子形状为点球形
```

```
plasma_4 -> emitShapeType = SoParticleAnimation::SQUARE; //发射形状为线形
```

```
plasma_4 -> shapeScale. setValue((float) 0. 0, (float) 500. 0, (float) 0. 0); //使 SQUARE 变为长线,坐标等同于 Open Inventor 中的坐标
```

```
plasma_4 -> dispersionAngles. setValue(0. 0f, 2. 0f); //散射角度
```

```
plasma_4 -> lifeSpan. setValue(700); //生命周期
```

```
plasma_4 -> lifeSpanVariation. setValue(0. 20f); //生命周期系数
```

效果图如图8所示。

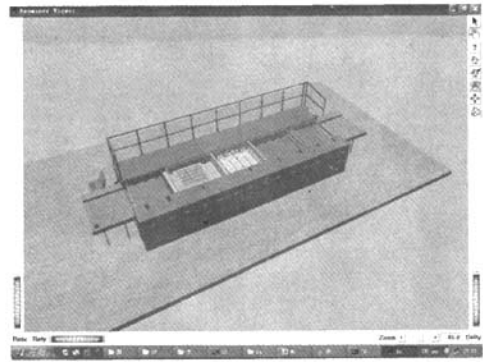


图8 粒子系统生成效果图

Fig. 8 Effect on particle system generating

## 2.6 时间控制策略

在 PECVD 加工工艺过程中,各相关动作对应着严格的时间顺序关系。实现运动物体的启动与停止,一般习惯性的方法是去控制运动物体的坐标。在本课题研究中,一开始也是这种思路,虽然基本可以实现物体按预定坐标的位置停止,但一旦在绘制区中有鼠标移动,这时就会出现我们不想看到的结果,即本来已经停止的物体会突然从停止位置到动态时间运动位置之间不断频闪,也就是鼠标时间触发了当前物体的忽然移动。为了真正使物体按预定点停止,必须精确计算出对应某确切位置的精确时间,当时间到达所需控制点时,利用 Open Inventor 中的回调函数机制关掉或打开计数器引擎的输入,从而从根本上控制物体的运动。根据工作过程定义,严格计算出载片舟的运行位置,确保工艺正确的同时必须避免运动

部件之间及运动部件和静止部件之间的干涉,并计算出各关键位置对应的时刻,在程序开始运行即获取启动时刻(全局变量),而后各运动部件以此时刻为参照定义各运动部件的启动与停止时刻。

### 3 结论

笔者以 Open Inventor 为开发工具,实现了太阳能电池关键工艺设备 PECVD 系统(IL-PECVDS10-1)的虚拟加工过程仿真中的关键技术,从而可以检验设计中的干涉、冗余及运动部件之间的匹配关系,对后续的设计工作起到了验证和指导作用。后续工作包括虚拟控制面板的连接、微观加工工艺的模拟和虚拟加工工艺过程在网络化培训及产品展示方面的应用等。

### 参考文献:

- [1] 张宇翔. 太阳能电池用多晶硅薄膜的制备研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
- [2] NAQEL H, ABERLE A G, NARAYANAN S. et al. Method for the evaluation of the influence of gettering and bulk passivation on nonuniform block-cast multicrystalline Si Solar cells[C]//Proceedings of the 1998 5th International Conference on Polycrystalline Semi-

conductors. Zurich, Switzerland: Scitec Publications Ltd, 1999: 503 - 508.

- [3] ABERLE A G. Overview on SiN surface passivation of crystalline silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2001, 65: 239 - 248.
- [4] 王晓泉, 汪雷, 席珍强, 等. PECVD 淀积氮化硅薄膜性质研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(3): 341 - 344.
- [5] Template Graphics Software Inc. Open inventor for Win32: interactive 3D graphics for Microsoft windows[M]. Template Graphics Software Inc, 1996.
- [6] WANG D, YU T, WANG W B. Study on virtual assembling and manufacturing of simulation system for numerical control machine Tools[C]//Proceedings of Piscataray, Congress on Intelligent Control and Automation. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006: 6232 - 6236.
- [7] 邹湘军, 孙健, 何汉武, 等. 虚拟现实技术的演变发展与展望[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1905 - 1909.
- [8] WERNECKE J. The inventor mentor: Programming object oriented 3D graphics with open inventor[M]. 2nd edition. Menlo Park, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1994.

## The Virtual Simulation of PECVD Process Based on the Engine Mechanism

WANG Dong, MA Xiao-feng, LI Da-lei, HU Shu-ji

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Firstly, the working principle of PECVD is introduced. This paper studies the key technologies to implement the motion simulation of virtual process through using the engine mechanism which is well encapsulated in Open Inventor development platform. Finally, the implementation of In-line PECVD System (IL-PECVDS10-1) verifies that the engine mechanism is feasible and efficient. Compared to the previous methods, the method in this paper provides an effective approach for the motion simulation, which can decrease the time on designing and manufacturing and can increase the success ratio for physical model.

**Key words:** virtual reality; PECVD; process simulation; engine mechanism