

· 电子信息材料与器件 ·

基于SEMI标准的半导体工艺设备功能仿真系统设计

王 巍^{1,2}, 邹龙庆^{1,2}, 徐 华², 李 搏^{1,2}, 贾培发², 李 垒^{1,2}

(1. 重庆邮电大学光电工程学院 重庆 南岸区 400065;

2. 清华大学清华信息科学与技术国家实验室, 清华大学智能技术及系统国家重点实验室, 清华大学计算机科学与技术系 北京 海淀区 100084)

【摘要】设计实现了一个基于SEMI标准的半导体工艺设备仿真平台,该平台具有通用可配置特性。在该平台的基础上,构建了一套基于SEMI标准的气路功能仿真系统,该气路仿真系统包含了功能层、逻辑层和外部通信接口层,既能满足单独设备的功能仿真需求,也能对整个系统的功能进行仿真验证。该系统实现了对物理气相沉积(PVD)系统中,气路中阀门的闭合作用及气流变化等的实时仿真分析。

关键词 功能仿真; 物理气相沉积系统; 半导体工艺设备; SEMI标准

中图分类号 TN305; TP39

文献标识码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.04.024

Design of Semiconductor Manufacturing Equipment Function Simulation System Based on SEMI Standard

WANG Wei^{1,2}, ZOU Long-qing^{1,2}, XU Hua², LI Bo^{1,2}, JIA Pei-fa², and LI Lei^{1,2}

(1. College of Electronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications Nan'an Chongqing 400065;

2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University Haidian Beijing 100084)

Abstract A general and configurable simulation platform based on SEMI standard is designed. On this general platform, a gas pressure subsystem simulation platform is implemented, which has the function layer, logic layer and communication interface layer. This system can meet the needs of both a single device and a whole system. Results show that the operation of the valve and the change of the gas flow in physical vapor deposition (PVD) system can be simulated in real time.

Key words device function simulation; physical vapor deposition (PVD) system; semiconductor manufacturing equipment; SEMI standard

随着集成电路芯片集成度的不断提高和芯片功能的不断增加,对工艺的要求越来越高,这对半导体工艺设备的设计和制造是一个巨大的挑战^[1-2]。作为最近几年的研究热点之一,半导体工艺设备的研究和开发面临着不少难题需要解决。其中主要的问题有两个:1) 半导体工艺设备在研发过程中,不仅有硬件部分的研发,而且还涉及该设备的控制软件系统的研发。目前大部分的设备控制软件在进行测试时,首先需要在仿真环境下进行验证,为某一特定设备所研发的硬件测试平台不仅费时且可重用性很差,为了提高软件测试的效率和准确定位系统所存在的问题,迫切需要一个软件的功能测试平台系

统。2) 在硬件平台设计好后,由于硬件条件的限制,很多方面都必须通过运行硬件测试,而受测试的条件限制,不能提前对可能出现的故障进行预测。为减少半导体工艺设备的研发成本,缩短开发周期,迫切需要能够实现对半导体工艺设备功能级仿真。

很多半导体工艺装备仿真系统及软件与关键技术均被视为各大公司的核心技术。目前已经公开发表的文献较少,同时讨论的内容范围也不够全面,如在文献[3]中仅提到了最简单的输入输出(I/O)循环回路仿真。一个控制系统软件的测试可以使用仿真设备的输出和相关信息,以及仿真返回的输入信息就能做到,该测试可以在线进行,无需实时仿真硬

收稿日期: 2011-06-10; 修回日期: 2012-04-18

基金项目: 02号国家科技重大专项(2009ZX02001-003); 国家自然科学基金(60875073)

作者简介: 王巍(1967-),男,博士,教授,主要从事RFIC及微波集成电路设计方面的研究。

件。而这仅是最简单的仿真工作，远远达不到对一套复杂半导体工艺设备仿真的要求。目前我国的半导体工艺设备的研发已经进入了非常关键的阶段，针对国内对高性能半导体工艺设备的需求，迫切需要在半导体工艺设备功能仿真等关键技术研究上有所突破。

本文提出了一种构建半导体工艺设备仿真系统的方法，搭建了可应用于物理气相沉积(PVD)设备中气路子模块的仿真系统。

1 系统设计所采用的SEMI标准概述

1.1 SEMI标准

在高度自动化的芯片制造过程中，软件集成自动化存在的主要问题是在不同的设备供应商之间没有标准的通信协议。设备供应商不向集成电路生产商开放通信协议及接口软件，这使得芯片生产商不得不设计自己的软件中间件来进行“连接”，导致了生产费用急剧增加^[4]。

SEMI组织制定了半导体工艺设备通讯标准接口SECS(semiconductor equipment communication standard)，使CIM(computer integrated manufacturing)与设备有共同的通信标准接口。设备制造商只要提供符合通信标准规范的设备，便可快速地集成在CIM的管理系统中。这样做不但可缩短设备开发的时间及成本，还可增加设备装机效率，快速实现量产，进而提升集成电路的产能^[4-5]。

1.2 SECS/GEM框架及其组成

SECS/GEM框架如图1所示。SECS是集成电路行业中设备与主机的通信标准，由SECS-I/HSMS、SECS-II两层及GEM构成^[6-7]，主机和设备通过SECS/GEM通信接口进行数据传输。一般来说，SECS/GEM通信接口用于定义消息、状态机制和方案，以使半导体芯片厂通过控制软件来控制 and 监测制造设备。在一个自动化的芯片厂，该接口具有启动和停止设备处理，收集测量数据，更改变量和选择产品配方等功能。

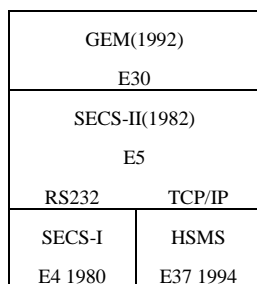


图1 SECS/GEM框架

SECS-I/HSMS为物理传输层，SECS-I以RS-232串口作为传输方式，定义了SECS通信的传输速度、握握手、校验和、消息头等内容。与SECS-I同属SECS传输接口的HSMS(high-speed SECS message services)标准^[6-8]，是以RJ-45接口作为传输方式，目的是用于更快速的通信方式，可以替换SECS-I用于更高级的通信环境中。本文采用底层传输方式(HSMS)，在仿真设备与控制软件之间用TCP/IP协议进行消息交换。

SECS-II是指定文本格式和意义的最小单位^[6,8]。SECS-II提供一个必须遵循的格式，并规范主机与设备间相互会话关系，实质上SECS-II是把SECS-I传输过来的二进制串翻译成形象直观的格式表示出来，方便操作者查看数据内容。SECS-II定义了SECS协议的报文格式和表示内容，通常称为Stream Function报文格式。所有的报文(通称Message)都用 S_nF_m (n 为Stream Number, m 为Function Number)的形式表示。操作者可以使用SML(SECS message language)在设备与主机之间进行通信。

GEM(generic equipment model)^[7]关注的是具体信息的传输(SECS-II的传输)及收到后其采取的具体行动。GEM标准定义了在下什么情况下使用何种SECS-II信息，以及由此所产生的行为。而且定义了一组通用设备的行为和通信能力，以支持集成电路器件制造商的生产自动化程序。表1列出了可以定义的通用设备的一些常用行为。

表1 常用设备行为

常用设备行为	常用设备行为
建立通信	警报管理
事件广播	远程控制
动态事件报告管理	可变数据采集
时钟	状态数据采集
错误信息	在线鉴定
处理过程管理	设备终端服务
原材料运动	极限监测

GEM会配合状态模型及脚本规范信息的使用。GEM所定义的脚本由一连串SECS信息所组成，其依照特定的顺序描述主计算机与设备之间问答(握手)的关系，以完成GEM所规范的功能。GEM主要包括3个基础状态模型，分别是通信状态模型、控制状态模型和设备处理状态模型。

通信状态模型定义了设备通信状态的变化以及与主机通信链路的行为。该模型涉及设备和主机之间的逻辑连接，而不是物理连接。控制状态模型定义了主机和设备之间的合作水平，还指定了操作人员在不同的主机控制级别下如何进行沟通。虽然通

信状态模型满足了主机和设备交换信息的能力,但控制模型在设备收到消息后,会对设备后续行为进行连续控制。设备处理状态模型的作用是不同的设备根据其过程特性,定义不同的设备处理状态,但当设备状态改变时,必须主动发送Event信息给主机,且设备必须提供可描述当前状态的状态变量供主机读取。

2 工艺设备功能仿真系统设计

一般而言,以模拟器为基础的控制系统的测试是先建立一个由控制系统控制的设备模型。该模型以数学算法为代表,然后加载到模拟器,用来模拟设备。该模拟器与控制系统相连接,控制系统再对模拟器进行测试^[3]。控制系统的输出信息作为一个输入传输给具有硬件条件的模拟器。当模拟器收到控制系统的输入后增加一个时间延迟,再发送一个输出到控制系统的输入,模拟实际设备的行为。一个以模拟器为基础的控制系统的测试使用的实例如图2所示。

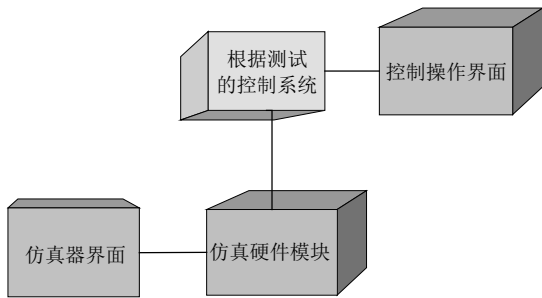


图2 一个以模拟器为基础的控制系统的测试实例

本文采用软件功能仿真的方式实现半导体工艺设备的功能仿真系统,模拟设备的硬件行为及其功能,测试控制系统软件的可靠性,减少其在实际设备上的调试时间。

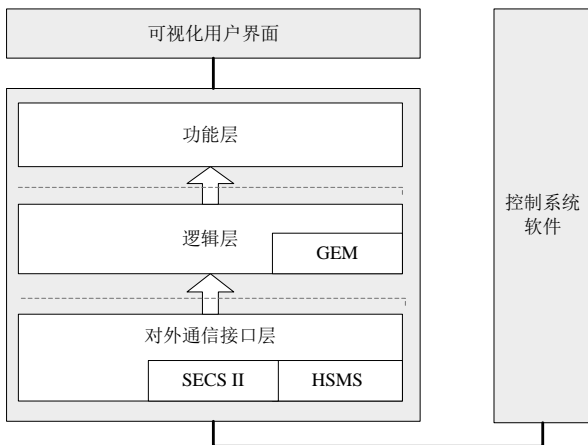


图3 仿真系统框架图

由于半导体工艺设备是一个庞大而复杂的系统,在实现前需要构建一个基础仿真系统,即一个

气路子模块仿真系统。该仿真系统对控制软件实施测试,它可以验证复杂集成电路工艺设备仿真系统的可行性与有效性。该气路仿真系统的原型是PVD设备的气路子模块,包含了阀门、液体流量控制器(LFC)、蒸发器等设备,分为功能层、逻辑层和外部通信接口层,既能满足单独设备的仿真需求,也能进行整个系统的功能仿真。该仿真系统的框架如图3所示。

2.1 通信接口层设计

对外通信接口层主要基于SECS标准实现,可建立通信级和物理I/O级接口与控制系统软件的通信联系,通过SEMI标准规定的通信接口和协议与系统控制软件建立连接,并且相互传递信息。由于使用标准化通信协议,通信接口层可以实现设备通信的通用化设计,减小设备物理通讯层次多样性对仿真系统上层的影响。本文采用HSMS作为底层的通信标准。

HSMS标准的目的是建立通信、发送及接收信息,SECS-II则把底层传输的二进制串翻译成形象直观的格式传达给上层GEM。HSMS/SECS-II采用C#开发,编译为一个单一的DLL文件,包含了SECS标准的主要内容,方便用户的调用。下面用伪码的形式给出了对外通信接口层的一部分功能:

```

device.Begin(); /*打开设备通信接口*
.....
voidDevice_Event(); /*接收信息*
.....
device.Encode(); /*将信息写入发送缓冲*
.....
device.SendSECSII(); /*发送信息*
.....
device.Stop(); /*停止通信*

```

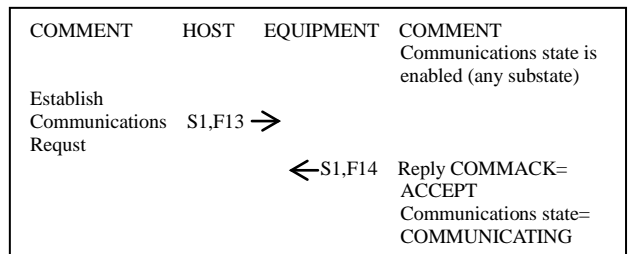


图4 设备与主机建立连接的SML示意图

对于控制端和仿真端,双方发送的信息全部采用SECS-II语言(SML)格式。SML定义了Stream Function的结构及数据内容,在用户层Message以树状结构表示。如设备已准备就绪,主机将发送S1F13到设备,当设备进入通信状态,双方准备建立连接,

设备会回复消息S₁F₁₄到主机，主机尝试建立通信，如图4所示。

2.2 逻辑层设计

在集成电路设备中可以根据不同的功能划分为许多的功能模块，如晶圆传输模块、气路模块、加热器模块等。每个模块中有很多的基本部件，而每个部件在工作运行时会有逻辑状态变化的情况发生。逻辑层的作用就是整合各种接口的部件设备，并将其组合成子系统，各子系统还可进一步整合，构成一个具有完整逻辑的集成电路工艺设备系统。设备之间存在内部逻辑联系，需要进行梳理并加以实现。逻辑层的构建基于SEMI标准中的GEM。灵活运用GEM中的3大标准模型(通信状态模型、控制状态模型和设备处理状态模型)来构建与GEM的通信模式一致的状态模型，实现设备及设备之间的逻辑状态变化。状态模型的使用使得平台内部能够使用统一通用的方法来进行设备运行逻辑管理。该仿真系统设备的逻辑状态变化框图如图5所示，3种状态是相互独立存在，并不会因某个状态的改变而影响另外一个模型的状态。图中，3条虚线隔开的区域是同一层次，即设备通信状态处于B区域时，其控制状态与设备处理状态也处于B区域。

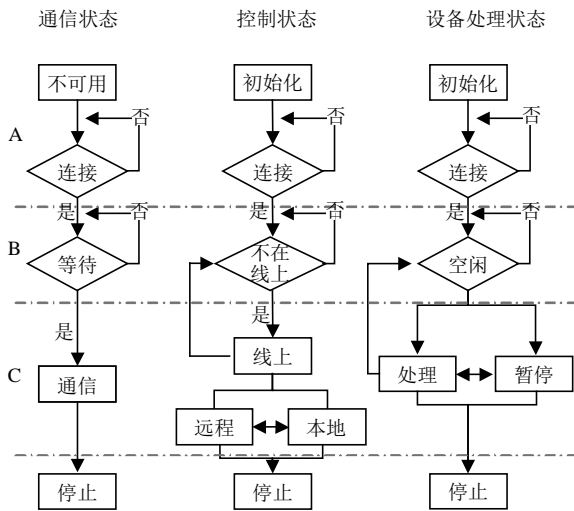


图5 设备逻辑状态变化框图

当设备连接成功后，通信状态还处于等待状态，设备逻辑还需要判断是否处于线上，此时设备并不能接收控制端的命令。当设备转换为通信状态时，设备的控制状态也转换为在线，此时设备可以正常接收命令并处理，并且可以根据用户命令使设备变为远程或者本地(设备处于远程时，可以接收到任何命令并且处理；而处于本地时，只能接收少数的命令，大部分的命令只能接收不能处理)，同时用户也可根据自己的习惯暂停或者运行设备。当设备停止

后，所有的状态都会清空，当用户重新开始建立连接时，又会重复以上的状态过程。

在单一设备的逻辑状态变化实现后，需要将这些设备整合成一个具有完整功能的特定系统。其中，每个设备都有自己单独的逻辑和功能且这些设备之间还会存在耦合关系。如在图6的气路模块仿真系统的气路模块子系统中，只有当阀门V1、阀门V2和阀门V3打开，让液体进入管道后，LFC才能开始工作，控制液体流速和压力。只需了解设备间的耦合关系，在设置设备逻辑状态变化时将其与耦合对象的逻辑状态进行对应即可。

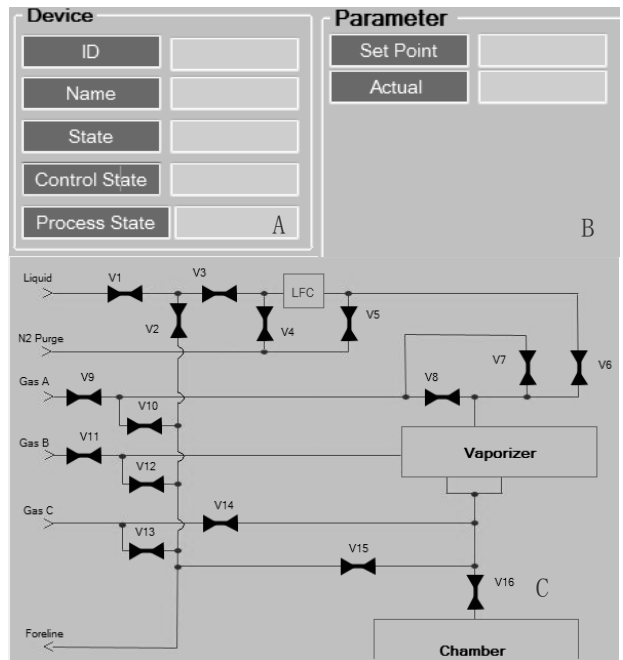


图6 气路模块仿真系统界面

2.3 功能层设计

当系统中某一设备状态发生变化时，与之相关联的其他设备状态与压力、温度等相关工艺参数也随之发生变化，需要完成该设备的功能仿真及与其他设备的关联仿真。功能层是在功能上实现对集成电路工艺设备进行逻辑功能级的仿真。在该气路模块仿真系统中，如果控制系统软件生成一个关闭阀门命令，仿真系统通过改变该阀门对应的闭合位置限位开关的值响应，同时也改变了压力和流量值，以反映整个系统的行为，使之“看起来”像阀门已经关闭。

在仿真系统中，所有设备都具有打开、关闭、返回状态信息、数据收集和报警功能，同时部分设备还具有一些对应的特殊控制功能。如LFC由于具有控制流量和压力的功能，在设计其仿真功能时，必须与实际设备相对应，可采用一个流量计算方法

和温度PID算法实现:

$$q = N_1 F_p C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad (1)$$

式中, q 为流量; N_1 为数字常数; F_p 为管道几何形状系数; C_v 为流量系数; ΔP 为管道压力差; G_f 为液态比重。由于除了 G_f 之外的所有参数都比较稳定, 可以设置为不变的常量, 所以 G_f 是整个流量的关键变量。 G_f 是根据温度及压强变化来发生改变的。在实际过程中, 当液体进入管道后压强都是趋于稳定的状态, 压强稳定时只受温度变化的影响, 因此温度变化需要密切关注。温度控制采用PID算法来设计实现。

3 实验结果分析与讨论

3.1 设备执行过程分析

在仿真系统执行时, 单独设备的模拟执行是整个仿真工作的基础, 控制系统软件也能对单独的设备进行仿真测试, 使测试工作更加灵活。单独设备的模拟执行不但包括了自身参数与逻辑状态的变化, 也包含了耦合关系的变化, 同时根据这些改变去执行相应的功能。设备执行过程如图7所示。在仿真运行中, 仿真设备能够准确及时地与主机进行通信, 并且实时地改变和显示设备参数的变化情况, 与实际设备的功能非常接近。

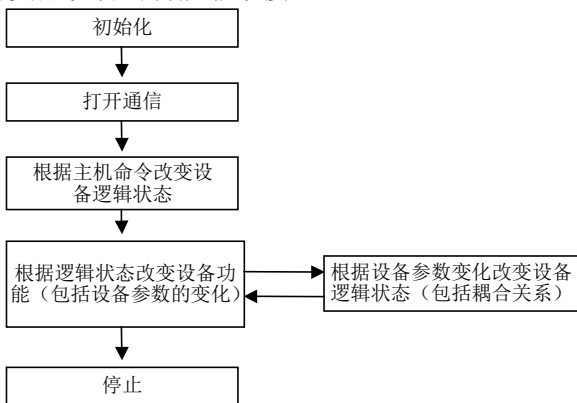


图7 设备执行过程示意图

3.2 气路模块仿真系统执行过程分析

单独设备的执行只能测试控制系统软件功能的一部分, 只有整个系统运行才能完全地检测控制系统软件的效率和准确定位。气路模块仿真系统执行流程图如图8所示。

该气路模块仿真系统以PVD设备控制系统软件为测试端, 在普通以太网环境下, 可以处理复杂的逻辑关系与设备功能, 进行重复循环仿真, 能够完整地仿真实际系统功能, 满足了控制系统软件实时

性与准确性的要求。

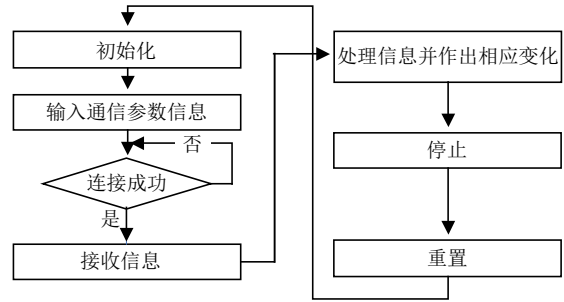


图8 气路模块仿真系统执行流程图

3.3 可视化用户界面分析

对于实际的集成电路制造系统, 有很多的设备参数和状态是实时变化并且需要监视的, 因此本文设计了前台的可视化用户界面, 将后台的系统逻辑和功能与前台的可视化界面结合起来, 以方便软件测试工程师的使用和调试。

在图6的气路模块仿真系统界面中, C部分可以直接观测到该系统的所有设备及其状态, 点击某个设备之后, 该设备的逻辑状态和参数信息会实时地显示在A、B部分。A部分能够实时地显示设备逻辑状态信息, B部分可以显示设备参数实时动态变化情况。当仿真系统开始工作, 如果LFC图标被点击了, 系统的流量变化将实时动态显示在B区域, 如图9所示。

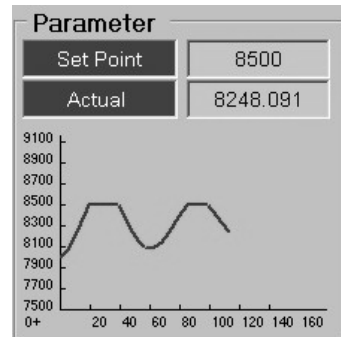


图9 LFC参数变化界面

本文设计了一个如图10所示信息显示界面。在各种设备运行的同时, 会将系统接收与发送的各种信息以及其自身的状态信息以文本的方式显示在用户界面中, 同时将这些信息按工作日期保存成日志信息, 极大地方便了用户查看与维护操作。

```

[11:53:22:6875000] 192.168.2.6[8000]:Recive 1000c100
[11:53:36:3125000] The system Test was running in GraphMode
[11:53:38:531200] The system Test Was running in TableMode
[11:53:46:1093750] 192.168.2.6 [8000]:Recive 1230c110
  
```

图10 信息显示界面

4 结 论

本文提出一种构建集成电路工艺设备仿真系统的方法,设计了一套通用的设备气路子模块的仿真系统。该气路仿真系统包含功能层、逻辑层和外部通信接口层,采用了符合SEMI标准的通信与设备模型管理方法,使得系统具有一定通用性的同时,既可以满足单独设备的功能仿真需求,也能对整个系统的功能进行仿真验证。仿真系统能保存仿真信息,便于对这些信息的查看与调试。该系统实现了对PVD系统中,气路中阀门的闭合动作及气流变化等的实时仿真分析。实现结果表明该仿真系统能够准确有效地仿真实际系统的功能。

参 考 文 献

- [1] SEMATECH. Guidelines for simulator-based control system testing[EB/OL]. [2011-01-15]. <http://www.semtech.org>.
- [2] 王戟, 王兵. 半导体设备通讯标准GEM的应用. 机电工程, 2008, 125(7): 34-36, 54.
- WANG Ji, WANG Bing. Application of GEM in semiconductor equipment[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(7): 34-36, 54.

- [3] 王戟. SECS/GEM在半导体生产计算机集成制造系统中的应用研究[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2008.
- WANG Ji. Research and development of semiconductor production computer integrated manufacturing systems based on SECS/GEM[D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2008.
- [4] 王延辉, 姜建国, 王宇. 基于GEM/SECS协议的数据采集系统设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(12): 3218-3223.
- WANG Yan-hui, JIANG Jian-guo, WANG Yu. Design and implementation of data acquisition based on GEM/SECS[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(12): 3218-3223.
- [5] SECREST J, GHISELLI J. SECS communications handbook[S]. SECS and GEM implementation seminar: [s.n.], 1996.
- [6] Global Information & Control Committee. SEMI E5-1104, SEMI equipment communications standard 2 message content[S]. 2006.
- [7] Global Information & Control Committee. SEMI E30-1103, generic model for communications and control of manufacturing equipment[S]. 2003.
- [8] Global Information & Control Committee. SEMI E37-0303, high-speed SECS message services (HSMS) generic services[S]. 2003.

编辑 漆 蓉

(上接第598页)

- [5] STEINER M, TSUDIK G, Waidner M. Refinement and extension of encrypted key exchange[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 1995, 29(3): 22-30.
- [6] LIN C L, SUN H M, HWANG T. Three-party encrypted key exchange: attacks and a solution[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2000, 34(4): 12-20.
- [7] LIN C L, SUN H M, STEINER M, et al. Three-party encrypted key exchange without server public-keys[J]. IEEE Communication Letters, 2001, 5(12): 497-499.
- [8] SUN H M, CHEN B C, HWANG T. Secure key agreement protocols for three-party against guessing attacks[J]. Journal of Systems and Software, 2003, 75(1/2): 63-68.
- [9] NAM J, KIM S, WON D. A weakness in Sun-Chen-Hwang three-party key agreement protocols using passwords [EB/OL]. [2010-9-19]. <http://eprint.iacr.org/2004/348>.
- [10] LEE S W, KIM H S, YOO K Y. Efficient verifier-based key agreement protocol for three parties without server's public key[J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 167(1): 996-1003.

- [11] LU Rong-xing, CAO Zhen-fu. Simple three-party key exchange protocol[J]. Computers and Security, 2007, 26(1): 94-97.
- [12] CHUNG H R, KU W C. Three weaknesses in a simple three-party key exchange protocol[J]. Information Sciences, 2008, 178(1): 220-229.
- [13] GOU hua, LI Zhou-jun, MU Yi, et al. Cryptanalysis of simple three-party key exchange protocol[J]. Computers and Security, 2008, 27(1): 16-21.
- [14] PHAN R C W, YAU W C, GOI B M. Cryptanalysis of simple three-party key exchange protocol(S-3PAKE)[J]. Information Sciences, 2008, 178(13): 2849-2856.
- [15] 许春香, 罗淑丹. 关于S-3PAKE协议的漏洞分析[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(4): 583-587.
- XU Chun-xiang, LUO Shu-dan. Security Analysis on S-3PAKE Protocol[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(4): 583-587.
- [16] NAM J, PAIK J, KANG H K, et al. An off-line dictionary attack on a simple three-party key exchange protocol[J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(2): 205-207.

编辑 漆 蓉