

集成电路课程设计指导手册

一、课程简介

集成电路课程设计是一门将理论应用于实际的设计课程，是《集成电路设计基础》的后续实践课程，是培养我国急需的集成电路设计人才的基础课程，也是射频集成电路设计、专用集成电路设计等课程的基础课程。通过本课程的学习，使学生熟练掌握集成电路设计流程，了解和熟悉集成电路所需的 EDA 软件，培养学生的创新意识，使命感和责任感，并熟练掌握集成电路设计流程中的 Hspice 软件，掌握先进的集成电路工艺知识，电路的设计，网表文件的编写，器件模型的建立，仿真参数和条件的设置，仿真结果的分析，使学生具有对集成电路设计的综合能力和实践能力，为更复杂、规模更大的集成电路和系统的设计奠定基础，培养和激发学生爱国情怀，培养学生社会责任感和使命感，立志投身“中国芯”制造。

二、课程教学目标

课程目标 1：通过美国制裁华为和中兴引出集成电路设计的重要性和紧迫性，培养和激发学生爱国情怀，培养学生社会责任感和使命感，立志投身“中国芯”制造；通过介绍我国集成电路设计面临机遇和挑战，增强学生“科技强国”的担当意识；对比国产 EDA 工具和全球主流 EDA 工具，培养学生的创新意识，使命感和责任感。

课程目标 2：掌握芯片设计的相关电路知识、工艺知识和工具知识，针对设计需求，能对进行集成电路管子级的设计与分析，掌握库文件的调用，model 文件的编写，掌握 Hspice 的网表文件的编写，并能对所设计的电路进行仿真设置，获取电路的瞬态波、工作点、功耗和时延等仿真结果。

课程目标 3：掌握电路的分析方法，能根据仿真得到电路的瞬态波形，进行电路的功能分析；掌握电路的延时和功耗的测量和计算，根据时延和功耗仿真结果，分析沟道长度 L、沟道宽度、电路负载的变化对电路功能和性能的影响，并且能根据仿真得到的结果进行 MOS 管参数的调整和优化。

课程目标 4：掌握集成电路前仿真工具 Hspice，能独立完成软件的安装，熟练操作软件操作界面、掌握 Hspice 编写语言和各种仿真设置，掌握波形查看和电路调试方法。

三、课程教学目标与毕业要求的对应关系

毕业要求	毕业要求指标点	课程目标
毕业要求 4: 研究	4.2 能够基于研究方案和技术路线，采用科学方法设计和实现仿真方案和实验，获取仿真和实验数据；	课程目标 1、2
	4.3 能够分析与解释实验数据，通过信息综合得出有效的结论，优化技术方案和参数；	课程目标 3
毕业要求 5: 使用现代工具	5.2 掌握现代工程工具和信息技术工具的使用方法，具备开发技能，并能够理解其技术优势和局限性。	课程目标 4

四、教学内容与教学要求

(一) 实验课、课程设计等实践性课程实验内容与教学要求

项目名称	实验内容	教学要求	学时	对应课程目标	主要设备及实验环境	每组人数	实验属性	开出要求
实践环节一 选题确定设计方案	(1) 学习 IC 设计流程 (2) 安装 Hspice 软件 (3) 确定电路设计方案	(1) 掌握集成电路设计流程; (2) 能够独立思考, 查阅资料 and 书籍, 自行设计方案; 了解我国集成电路设计工具的挑战和机遇, 培养学生的使命感和责任感。	3	课程目标 1、4	计算机/EDA 实验室	1	综合	必做
实践环节二 网表文档的编写 电路仿真	(1)编写电路 Hspice 网表文件; (2) 仿真瞬态波形, 验证电路功能 (3) 测量电路的延时; (3) 测量电路的功耗	(1) 熟练 Hspice 的操作; (2) 能自主编写电路网表文件; 能进行电路分析和验证, 进行电路优化设计, 培养学生的工匠精神	8	课程目标 1、2、4	计算机/EDA 实验室	1	综合	必做
实践环节三 电路性能测试和优化设计	(1) 学习影响功耗和时延的参数; (2) 测试沟道长度 L 的变化对电路功耗和时延的影响; (3) 测试沟道宽度 W 的变化对电路功耗和时延的影响; (4) 测试电路的带负载能力。	(1) 理解工艺参数对电路性能的影响; (2) 掌握改变 MOS 管沟道长度 L, 测试电路的功能和性能变化; (3) 掌握改变 MOS 管沟道长度 L, 测试电路的功能和性能变化; (4) 掌握测试电路负载能力的测量; (5) 电路创新设计和改进, 培养学生的创新精神	6	课程目标 1、3、4	计算机/EDA 实验室	1	综合	必做
实践环节四 撰写设计报告	1) 学习设计报告的撰写和数据统计方法; (2) 总结设计内容, 整理有关数据, 撰写设计报告。	(1) 掌握设计报告撰写的内容完整性、格式规范性和数据的准确性; (2) 能对实验结果进行总结、分析, 并形成完整有效的设计报告;	2	课程目标 1、2、3	计算机/EDA 实验室	1	综合	必做
实践环节五 答辩	(1) 讲解设计报告的撰写规范, 数据的统计分析; (2)讲解答辩要求及具	(1) 能对设计进行总结和汇报; (2) 能够分享技术观点, 并且能够清晰表达和准确回答问题。	1	课程目标 1、2、3	计算机/EDA 实验室	1	综合	必做

项目 名称	实验内容	教学要求	学时	对应课程目标	主要设备及实验环境	每组人数	实验属性	开出要求
	体流程。							
实验课学时总计			20					

五、Hspice 简明使用介绍

Hspice 简明手册

Hspice 是一个模拟电路仿真软件，在给定电路结构和元器件参数的条件下，它可以模拟和计算电路的各种性能。用 Hspice 分析一个电路，首先要做到以下三点：

- (1) 给定电路的结构（也就是电路连接关系）和元器件参数（指定元器件的参数库）；
- (2) 确定分析电路特性所需的分析内容和分析类型（也就是加入激励源和设置分析类型）；
- (3) 定义电路的输出信息和变量。

Hspice 规定了一系列输入，输出语句，用这些语句对电路仿真的标题，电路连接方式，组成电路元器件的名称，参数，模型，以及分析类型，以及输出变量等进行描述。

一 Hspice 输入文件的语句和格式

Hspice 输入文件包括电路标题语句，电路描述语句，分析类型描述语句，输出描述语句，注释语句，结束语句等六部分构成，以下逐一介绍：

1 电路的标题语句

电路的标题语句是输入文件的第一行，也成为标题行，必须设置。它是由任意字母和字符串组成的说明语句，它在 Hspice 的 title 框中显示。

2 电路描述语句

电路描述语句由定义电路拓扑结构和元器件参数的元器件描述语句，模型描述语句和电源语句等组成，其位置可以在标题语句和结束语句之间的任何地方。

(1) 电路元器件

Hspice 要求电路元器件名称必须以规定的字母开头，其后可以是任意数字或字母。除了名称之外，还应指定该元器件所接节点编号和元件值。

电阻，电容，电感等无源元件描述方式如下：

R1 1 2 10k (表示节点 1 与 2 间有电阻 R1,阻值为 10k 欧)

C1 1 2 1pf (表示节点 1 与 2 间有电容 C1,电容值为 1pf)

L1 1 2 1mh (表示节点 1 与 2 间有电感 L1,电感值为 1mh)

半导体器件包括二极管，双极性晶体管，结形场效应晶体管，MOS 场效应晶体管等，这些半导体器件的特性方程通常是非线性的，故也成为非线性有源元件。在电路 CAD 工具进行电路仿真时，需要用等效的数学模型来描述这些器件。

(a) 二极管描述语句如下：

DXXXX N+ N- MNAME <AREA> <OFF> <IC=VD>

D 为元件名称，N+和 N-分别为二极管的正负节点，MNAME 是模型名，后面为可选项：AREA 是面积因子，OFF 时直流分析所加的初始条件，IC=VD 时瞬态分析的初始条件。

(b) 双极型晶体管

QXXXX NC NB NE <NS> MNAME <AREA> <OFF> <IC=VBE,VCE>

Q 为元件名称，NC NB NE <NS>分别是集电极，基极，发射极和衬底的节点。缺省时，NS 接地。后面可选项与二极管的意义相同。

(c) 结型场效应晶体管

JXXXX ND NG NS MNAME <AREA> <OFF> <IC=VDS,VGS>

J 为元件名称，ND NG NS 为漏，栅，源的节点，MNAME 是模型名，后面为可选项与二极管的意义相同。

(d) MOS 场效应晶体管

MXXXX ND NG NS NB MNAME <L=VAL> <W=VAL>

M 为元件名称，ND,NG,NS,NB 分别是漏，栅，源和衬底节点。MNAME 是模型名，L 沟道

长，M 为沟道宽。

(2) 元器件模型

许多元器件都需用模型语句来定义其参数值。模型语句不同于元器件描述语句，它是以“.”开头的点语句，由关键字.MODEL,模型名称，模型类型和一组参数组成。电阻，电容，二极管，MOS 管，双极管都可设置模型语句。这里我们仅介绍 MOS 管的模型语句，其他的可参考 Hspice 帮助手册。

MOS 场效应晶体管模型

MOS 场效应晶体管是集成电路中常用的器件，在 Hspice 有 20 余种模型，模型参数有 40—60 个，大多是工艺参数。例如一种 MOS 模型如下：

```
.MODEL NSS NMOS LEVEL=3 RSH=0 TOX=275E-10 LD=.1E-6 XJ=.14E-6
+ CJ=1.6E-4 CJSW=1.8E-10 UO=550 VTO=1.022 CGSO=1.3E-10
+ CGDO=1.3E-10 NSUB=4E15 NFS=1E10
+ VMAX=12E4 PB=.7 MJ=.5 MJSW=.3 THETA=.06 KAPPA=.4 ETA=.14
.MODEL PSS PMOS LEVEL=3 RSH=0 TOX=275E-10 LD=.3E-6 XJ=.42E-6
+ CJ=7.7E-4 CJSW=5.4E-10 UO=180 VTO=-1.046 CGSO=4E-10
+ CGDO=4E-10 TPG=-1 NSUB=7E15 NFS=1E10
+ VMAX=12E4 PB=.7 MJ=.5 MJSW=.3 ETA=.06 THETA=.03 KAPPA=.4
```

上面：.MODEL 为模型定义关键字。

NSS 为模型名，NMOS 为模型类型，LEVEL=3 表示半经验短沟道模型，后面 RSH=0 等等为工艺参数。

(3) 电路的输入激励和源

Hspice 中的激励源分为独立源和受控源两种，这里我们仅简单介绍独立源。独立源有独立电压源和独立电流源两种，分别用 V 和 I 表示。他们又分为直流源，交流小信号源和瞬态源，可以组合在一起使用。

(a) 直流源

```
VXXXX N+ N- DC VALUE
IXXXX N+ N- DC VALUE
```

例如：VCC 1 0 DC 5v （表示节点 1,0 间加电压 5v）

(b) 交流小信号源

```
VXXXX N+ N- AC <ACMAG <ACPHASE>>
IXXXX N+ N- AC <ACMAG <ACPHASE>>
```

其中，ACMAG 和 ACPHASE 分别表示交流小信号源的幅度和相位。

例如：v1 1 0 AC 1v （表示节点 1,0 间加交流电压幅值 1v，相位 0）

(c) 瞬态源

瞬态源有几种，以下我们均只以电压源为例，电流源类似：

* 脉冲源（又叫周期源）

```
VXXXX N+ N- PULSE (V1 V2 TD TR TF PW PER)
```

V1 初始值，V2 脉动值，TD 延时，TR 上升时间，TF 下降时间，PW 脉冲宽度，PER 周期

例如：V1 5 0 PULSE (0 1 2NS 4Ns 4Ns 20NS 50NS)

* 正弦源

```
VXXXX N+ N- SIN(V0 VA FREQ TD THETA PHASE)
```

V0:偏置，VA:幅度，FREQ: 频率，TD:延迟，THETA: 阻尼因子，PHASE:相位

* 指数源

```
VXXXX N+ N- EXP(V1 V2 TD1 TAU1 TD2 TAU2)
```

V1 初始值, V2 中止值, TD1 上升延时, TAU1 上升时间常数, TD2 下降延时, TAU2 下降时间常数

例如: V1 3 0 EXP(0 2 2ns 30ns 60ns 40ns)

* 分段线性源

VXXXX N+ N- PWL(T1 V1 <T2 V2 T3 V3 ... >)

其中每对值 (T1, V1) 确定了时间 t=T1 是分段线性源的值 V1。

例如: Vpwl 3 0 PWL (0 1, 10ns 1.5)

(4) 子电路

* 子电路语句

.SUBCKT SUBNAM N1<N2 ... >

子电路的定义由.SUBCKT 语句开始。SUBNAM 是子电路名, N1<N2 ... >是外部节点号

* 终止语句

.ENDS (表示结束子电路定义)

* 子电路调用语句

XXXXY N1<N2 ... > SUBNAM

在 Spice 中调用子电路的方法是设定以字母 X 开头的伪元件名, 其后是用来连接到子电路上的节点号, 在后面是子电路名。

例如: .SUBCKT OPAMP 1 2 3 4

具体运放电路描述

.ENDS

Xop 1 2 3 4 OPAMP (调用该运放子电路)

3 电路的分析类型描述语句

分析类型描述语句由定义电路分析类型的描述语句和一些控制语句组成, 如直流分析 (.OP), 瞬态分析 (.TRAN) 等分析语句, 以及初始状态设置 (.IC), 选择项设置 (.OPTIONS) 等控制语句。它的位置可在标题语句和结束语句之间的任何地方。

(1) .TRAN(瞬态分析语句)

一般形式: .TRAN TSTEP TSTOP <TSTART <TMAX>> <UIC>

TSTEP 为时间增量, TSTOP 为终止时间, TSTART 为初始时间 (若不设定, 则隐含值为 0)

例如: .TRAN 1NS 10000NS 500NS (瞬态分析 500—10000NS, 步长为 1NS)

(2) .AC(交流分析语句)

在规定的频率范围内完成电路的交流小信号分析

.AC DEC ND FSTART FSTOP (数量级变化)

其中, DEC 为 10 倍频, ND 为该范围内点的数目, FSTART 初始频率, FSTOP 中止频率。

例如: .AC DEC 10 1 10K (指从 1 到 10KHZ 范围, 每个数量级取 10 点, 交流小信号分析)

(3) .DC(直流扫描语句)

是在指定的范围内, 某一个独立源或其他电路元器件参数步进变化时, 计算电路滞留输出变量的相应变化曲线。

DC SRCNAN VSTART VSTOP VINCR <>

例如: .DC VIN 0.25 5.0 0.25 (表示电压源 VIN 的值从 0.25V 扫描到 5V, 每次增量 0.25V)

(4) .OPTION(可选项语句)

ACCT(打印出计算和运行时间统计)

LIST (打印出输入数据总清单)

NODE (打印出结点表)

NOMOD(抑制模型参数的打印输出)

具体电路的分析类型描述语句可查阅 Hspice 在线帮助。

4 输出描述语句

(1) 文本打印语句.PRINT

.PRINT TYPE ov1<ov2...>

TYPE 为指定的输出分析类型, 如 (DC); OV1 为输出变量名。

例如: .PRINT DC V(5)

(2) 文本绘图语句.PLOT

.PRINT TYPE ov1<ov2...>

5 注释语句

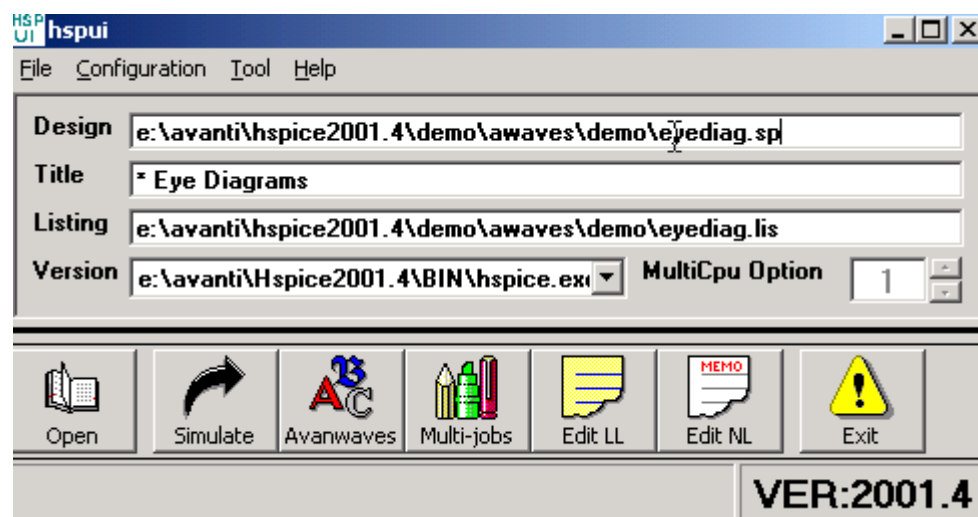
注释语句以”*”为首字符, 位置是任意的, 它为非执行语句。

6 结束语句

结束语句是输入文件的最后一行, 用.END 描述, 必须设置。

二 Hspice 仿真示例

Hspice 可以执行各种模拟电路仿真, 它的精度很高。通过点击桌面快捷方式 Hspice2001.4, 启动 Hspice 界面如下:



Hspice模拟步骤如下:

- (1) 由电路图提取网表或手工编写网表, 注意网表文件以.sp结尾。例如, 上图中电路网表文件为eyediag.sp; 标题为: *Eye Diagrams;输出报告文件: eyediag.lis。



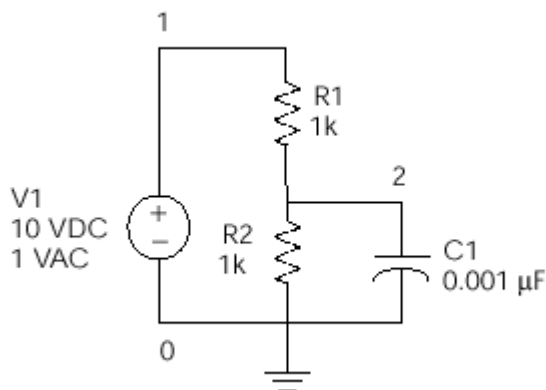
- (2) 运行模拟, 完成后检查输出报告文件后缀.lis文件察看模拟结果。



- (3) 运行查看输出波形。

以下我们通过几个例子了解Hspice的网表文件格式, 以及如何进行仿真。

1 简单RC网络电路



它的网表文件如下，文件名为quickRC.sp

```
A SIMPLE AC RUN
.OPTIONS LIST NODE POST
.OP
.AC DEC 10 1K 1MEG
.PRINT AC V(1) V(2) I(R2) I(C1)
V1 1 0 10 AC 1
R1 1 2 1K
R2 2 0 1K
C1 2 0 .001U
.END
```

注释：第一行 A SIMPLE AC RUN 为标题行；

第二行 .OPTIONS LIST NODE POST 为可选项设置，LIST 打印出元件总结列表；NODE 打印出 元件节点表 (element node table)；POST 表示用何种格式储存模拟后的数据，以便与其它工具接口。

第三行 .OP 计算直流工作点。

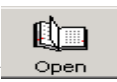
第四行 .AC DEC 10 1K 1MEG (指从 1 到 10KHZ 范围，每个数量级取 10 点，交流小信号分析)

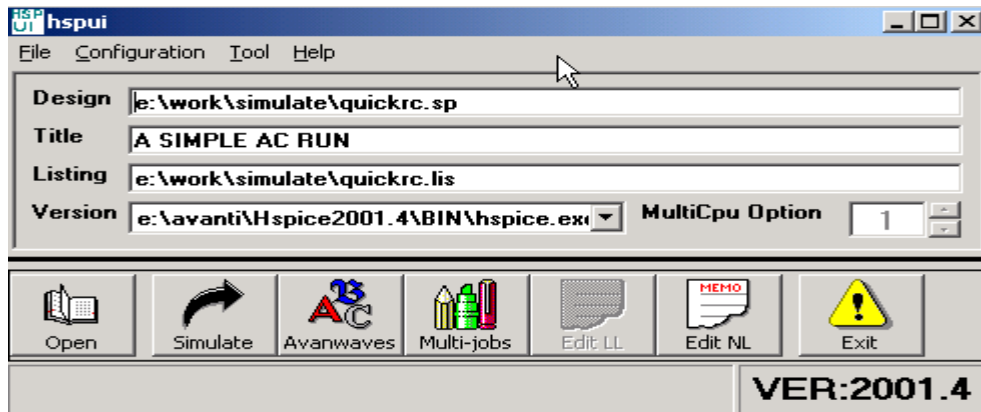
第五行 .PRINT AC V(1) V(2) I(R2) I(C1) 打印交流分析类型的节点 1, 2 的电压，以及 R2, C1 的电流


第六行 V1 1 0 10 AC 1 表示节点 1 与 0 间，加直流电压 10v 和幅值为 1v 的交流电压。

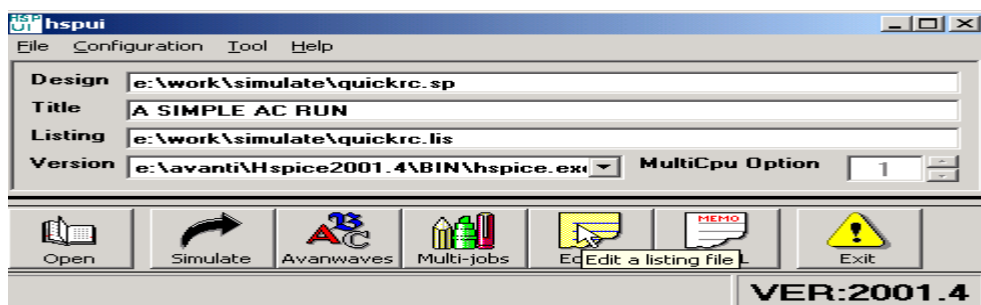
第七至九行为电路描述语句。

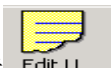
第十行为结束语句。

我们首先通过点击  打开编辑好的 quickRC.sp 文件，此时显示界面如下：

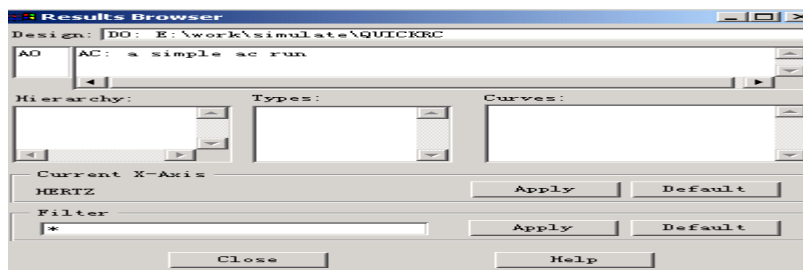


点击  仿真，仿真完成后界面如下：

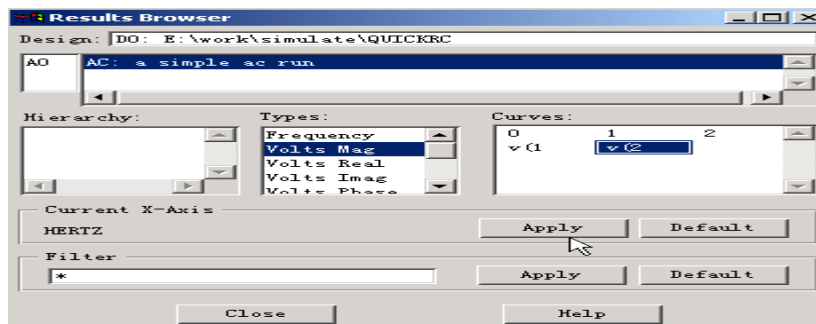


点击  查看 Hspice 输出结果文件 quickRC.lis，可以看到仿真后各种数据信息。

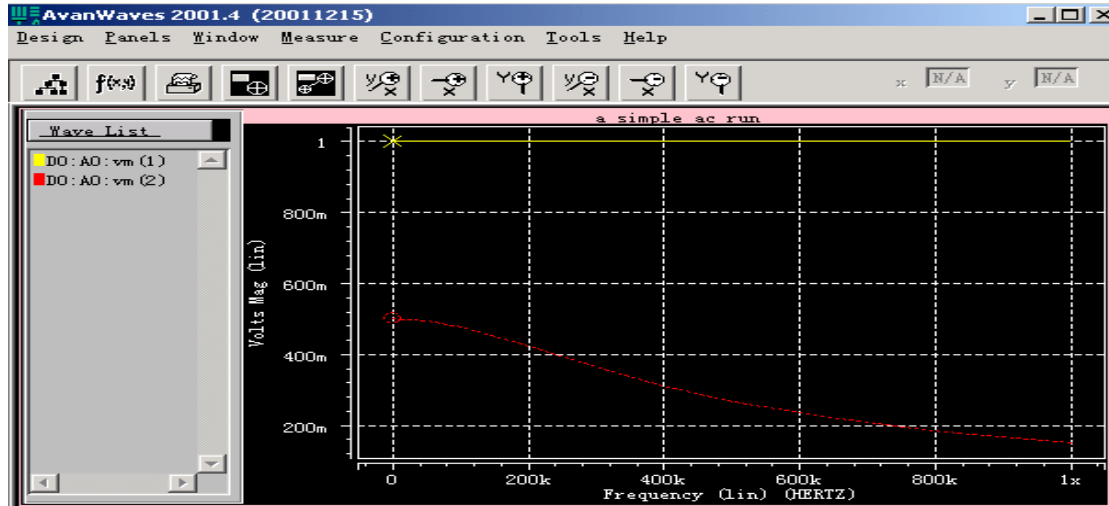
要查看输出的波形，点击 ，可以看到界面如下：



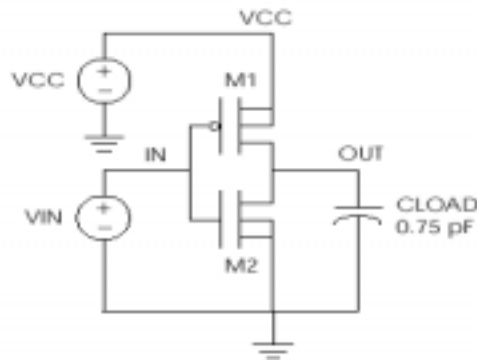
点击 AC: A SIMPLE AC RUN，就可看到各种信号，如下所示：



双击要查看的信号波形，即可将该信号加入到波形框中，显示如下：



2 倒相器电路



它的网表文件如下，文件名为 inv.sp

```
Inverter Circuit
.OPTIONS LIST NODE POST
.TRAN 200P 20N
.PRINT TRAN V(IN) V(OUT)
M1 OUT IN VCC VCC PCH L=1U W=20U
M2 OUT IN 0 0 NCH L=1U W=20U
VCC VCC 0 5
VIN IN 0 0 PULSE .2 4.8 2N 1N 1N 5N 20N
CLOAD OUT 0 .75P
.MODEL PCH PMOS LEVEL=1
.MODEL NCH NMOS LEVEL=1
.END
```

注释：第三行.TRAN 200P 20N表示瞬态分析步长为 200ps，时间为 20ns

第四行.PRINT TRAN V(IN) V(OUT)表示打印节点 in, out 电压瞬态分析值

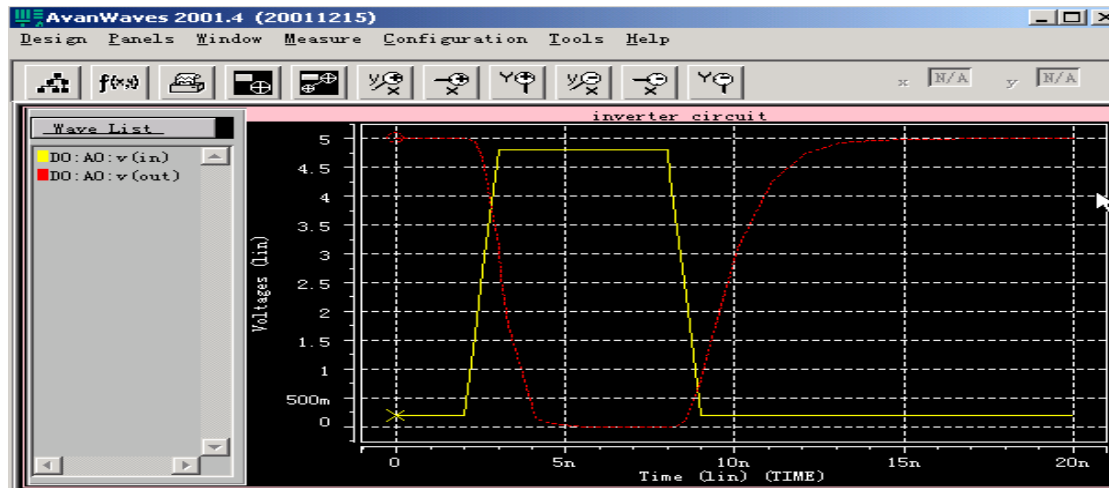
第五，六，九行为电路连接关系描述语句。

第七行VCC VCC 0 5表示在节点VCC，0之间加5v直流电压。

第八行VIN IN 0 0 PULSE .2 4.8 2N 1N 1N 5N 20N表示在节点IN，0之间加一个脉冲源，低电平0.2v,高电平4.8v，延时2ns，上升沿1ns，下降沿1ns，脉冲宽度5ns，周期20ns

第九，十行为模型语句，表示模型名 PCH，管子类型为 PMOS，使用的是一级模型。

对倒相器电路仿真的步骤类似于前面，这里仅列出输出波形供参考：



3 D 触发器电路

前面我们用 Workview 工具创建了一个 D 触发器，并提取了它的电路网表，在这里我们为网表文件加入激励源和分析语句，并使用 Hspice 进行模拟仿真。修改后的网表文件如下，文件名为 dff.sp:

```
* Project DFF
* Powerview Wirelist Created with Version 6.2
* Infile      :
* Options     : -h -d -n -m -x -c60 -le:\work\zzz.sp
* Levels      :

.OPTIONS LIST NODE POST
.include "e:\model\35model.txt"
* Definition for project INVERTER
.SUBCKT INVERTER IN  OUT
M2      OUT IN  0  0  NSS L=0.35U W=1.2U
M1      VDD IN  OUT VDD  PSS L=0.35U W=2.4U
* CROSS-REFERENCE 1
* GND = 0
.ENDS

* Definition for project TRANSFER
.SUBCKT TRANSFER IN  OUT CLKF CLK
M1      OUT CLKF IN  VDD  PSS L=0.35U W=1.2U
M2      IN  CLK OUT 0  NSS L=0.35U W=1.2U
* CROSS-REFERENCE 1
* GND = 0
.ENDS

X1I1    N1N19 N1N21 INVERTER
X1I2    N1N21 N1N16 CLK N1N10 TRANSFER
X1I3    N1N16 N1N19 INVERTER
X1I4    CLK N1N10 INVERTER
```

```

X1I5    Q   N1N29 INVERTER
X1I6    QF  Q    INVERTER
X1I7    N1N29 QF  N1N10 CLK TRANSFER
X1I8    D   N1N16 N1N10 CLK TRANSFER
X1I9    N1N19 QF  CLK N1N10 TRANSFER

```

* DICTIONARY 1

* GND = 0

.GLOBAL VDD

vin D 0 PULSE .2 2.8v 2N 1N 1N 20N 50N

vdd VDD 0 3v

Vclk clk 0 0 PULSE .2 2.8v 2N 1N 1N 5N 20N

.tran 1ns 200n

.END

注释：以上黑体字为对 Workview 生成网表的修改。

(1) .OPTIONS LIST NODE POST 为可选项设置

(2) .include "e:\model\35model.txt"表示加入 0.35um 工艺库文件，注意一定要指定工艺库文件，否则 Hspice 无法仿真。另外，库路径一定要指定正确，否则会找不到库文件。

(3) **vin D 0 PULSE .2 2.8v 2N 1N 1N 20N 50N**

vdd VDD 0 3v

Vclk clk 0 0 PULSE .2 2.8v 2N 1N 1N 5N 20N

上述为加入的输入激励和电压源语句。

(4) **.tran 1ns 200n**

指定瞬态分析 200ns，分析步长 1ns

将修改好的 dff.sp 文件存盘，注意后缀以.sp 结尾。然后打开该文件，运行 Hspice 仿真，则输出波形如下图所示：

