

射频电路辅助分析第二章笔记

电磁1802 吴叶赛 U201813405

第二章 微波半导体器件及应用

第一节 微波半导体器件及模型概述

目前, 应用于微波及超高速集成的砷化镓为衬底的有源器件主要有: **砷化镓场效应管(GaAs MESFET)**、**高电子迁移率晶体管 (HEMT)**、**异质结 极 体管 异质结双极晶体管 (HBT)**、**砷化镓IMPATT二极管**和**Gunn管**、**砷化镓肖特基势垒二极管**、**变容二极管**和**PIN管**等。

准静态法:

在具体使用某种分析方法计算微波有源电路特性时, 必须作准静态假设, 即要求有源器件中的所有非线性元件 即要求有源器件中的所有非线性元件 (如电容和跨导) 的参数应与一个或多个控制电压或电流同时变化。

实验证明, 在频率高达100GHz时仍可认为非线性元件是准静态的, 因此, 准静态模型可以应用于100GHz以上的频率。

准静态法的优点是, 固体器件的小信号模型可以很方便地变换为大信号模型、采用集总参数模型比采用二端口参数 采用集总参数模型比采用二端口参数 (如线性电路的 S 参数、 Y 参数等) 描述固体器件的小信号特性要简单一些, 因为后者需要大量的测量数据。在小信号模型的基础上, 如果计入电路元件的电 或电流依赖关系 电压或电流依赖关系, 并把模型拓扑作少许变化 并把模型拓扑作少许变化, 就可以很容易地将它变换为固体器件的大信号模型。

固体器件模型应满足一定要求:

1. 它应具有足够的精度
2. 在保证足够精度的前提下, 模型越简单越好。
3. 必须能够比较容易确定模型的有关参数。

微波器件的计算机辅助测量建模

微波器件的计算机辅助测量建模, 即通过对器件的直流、高频和微波特性的测量, 确定等效电路拓扑及其元件参数, 是微波CAD的重要环节。

建模工作的基本思想比较简单, 就是要寻求一种模型, 使得由模型计算出的响应与实测的相差最少。

这里涉及**模型选取**、**测量方法**和**参数提取**三方面的问题。

模型选取: 参数化行为模型、图表模型、准静态集总参数等效电路模型

测量方法：包括直流、脉冲、高频和微波测量多种。微波测量主要是利用网络分析仪，获取器件线性等效电路的网络参数。直流、脉冲和低频测量是为了获取器件的直流特性和非线性特性。最新的 NVNA 可以提供非线性参数——X 参数（Keysight 的 PNA-X 系列矢量网络分析仪）。

参量提取：参数提取与测量方法有密切关系 参数提取与测量方法有密切关系。

有序建模的优化方法

其要点是从一个简单的基本模型结构开始，按规定序列 增加 些对改善器件与模型之间匹配最有效的元件参量 一些对改善器件与模型之间匹配最有效的元件参量，自动优化 迭代，直到获得满意的匹配和不再增加元件为止。

实现这种有序建模，有两个前提条件：一是要有广泛的参考模 型可供选用；二是要求掌握或能及时计算出模型响应与诸等效电路 参量之间的关系。

第二节 金属-半导体结二极管

混频与检波，都是一种频率变换的过程。

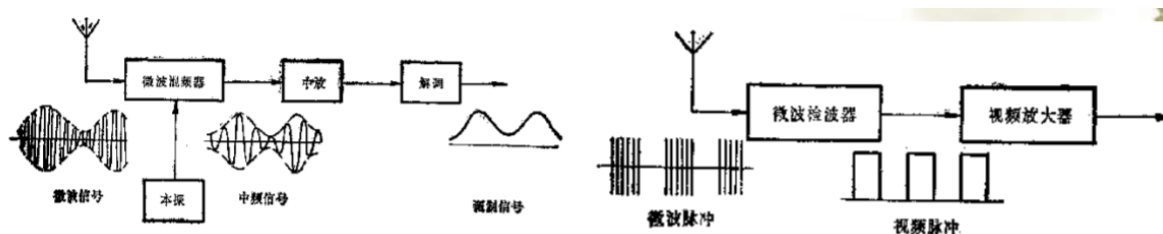


图2-4 微波接收机方框图
(a) 超外差微波接收机；(b) 直接检波式微波接收机。

为了实现混频与检波，必须采用非线性电阻元件，即所谓变阻管。可以作为变阻管的有点接触二极管、肖特基表面势垒二极管、反向二极管等。

一、金属—半导体结二极管的特性

1. 伏安特性

根据简化的热电子发射理论，在平衡状态下，由半导体流向金属的电子流密度为：

$$J_{sm}(0) = qv_n n_0 e^{-q\phi_{MS}/kT}$$

流过二极管的电流等于电流密度乘以结面积A，所以

$$I(V) = AJ(V) = AJ_{sa} \left(e^{qV/kT} - 1 \right) = I_{sa} \left(e^{qV/kT} - 1 \right)$$

式中， I_{sa} 叫反向饱和电流。它决定于金属 - 半导体结的性质和温度 与外加电压几乎无关。

2. 势垒电容

金属-半导体结和PN结相似，势垒区相当于一个容纳有正负电荷的电容（空间电荷区，其介绍见第三节），这个电容叫做势垒电容或阻挡层电容。

$$C_j(V) = \frac{dQ_s}{dV} = A \sqrt{\frac{\epsilon q N_D}{2(\Phi_s - V)}}$$

对于金属-半导体结二极管来说，因为不存在少数载流子（空穴）储存产生的扩散电容，**势垒电容就是结电容**。

3. 等效电路和参数

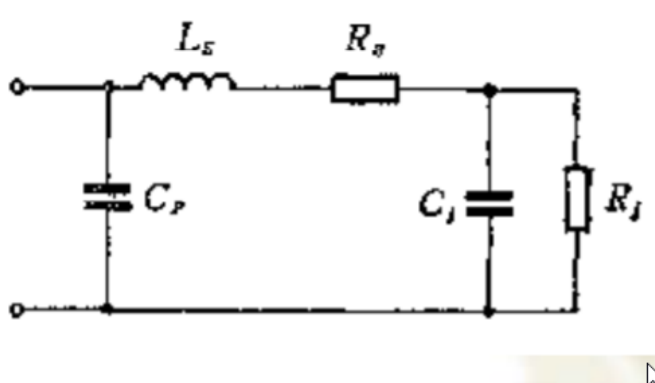


图2-7 金属-半导体结二极管的等效电路

与点接触二极管比较，肖特基表面势垒二极管具有如下优点：

(i) 点接触二极管利用金属丝压接在半导体表面形成金属-半导体结，由于金属丝的压力常常破坏了晶体结构，形成晶体缺陷；同时由于接触面暴露在外，极易污染；所以它所形成的是不完善的肖特基势垒。其伏安特性的斜率参数 n 偏离理想较大，二极管噪声温度比较大。肖特基表面势垒二极管避免了这一缺点。

(ii) 制作肖特基表面势垒二极管时采用了外延技术，外延层 N 很薄，衬底 N^+ 层杂质浓度高，电阻率低，因而串联电阻 R 大大降低。通常肖特基表面势垒二极管的比点接触二极管低一个数量级，噪声性能有较大的改善。

(iii) 点接触二极管利用压接形成，点接触二极管利用压接形成，压力不同，结的直径就不同，结的直径就不同，因此性能的一致性很差，不便于设计使用。肖特基表面势垒二极管利用光刻的办法控制结的直径，用蒸发的方法形成金属膜，结的直径和膜的厚度都能严格控制，因此性能一致性好，便于设计和批量生产。

(iv) 此外，肖特基表面势垒二极管反向击穿电压较点接触二极管高，肖特基表面势垒二极管反向击穿电压较点接触二极管高，比它更能承受机械的冲击，因此可靠性好。

第三节 微波变容二极管和PIN管

一、变容二极管

变容二极管是 种半导体二极管 一种半导体二极管，它的结电容随外加偏压而改变，并呈现明显的非线性。其非线性结电容可以采用PN结或肖特基结形成。

由于内建电场的作用，载流子的扩散运动 受到阻碍。其中一部分运动速度较小的空穴和 电子，将在内建电场的作用下分别返回 将在内建电场的作用下分别返回P区和N 区，这种运动称之为漂移运动。

突变型PN结的势垒电容（结电容）：

$$C_j(V) = \frac{C_j(0)}{\left(1 - \frac{V}{\phi_s}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

线性缓变型PN结的势垒 电容（结电容）：

$$C_j(V) = \frac{C_j(0)}{\left(1 - \frac{V}{\phi_s}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

任意杂质浓度分布时 任意杂质浓度分布时，PN结的势垒电容（结电容）：

$$C_j(V) = \frac{C_j(0)}{\left(1 - \frac{V}{\phi_s}\right)^n}$$

二、PIN二极管

PIN管结构如图，两边分别为重掺杂的P+型和N+型半导体，中间夹一层电阻率 很高的本征半导体I层，故称为PIN管。

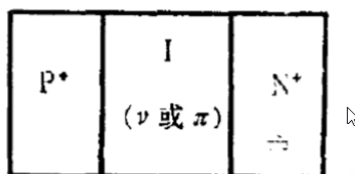


图2-16 PIN管

1、直流偏压作用下的PIN管特性：

加正向偏压时，□ 层的电 阻率下降，PIN管呈现低 阻抗 外加正偏压越大 □ 。，通过 PIN管的电流越大，层的电阻率就越低。因此，□ 改变 PIN管的正向偏流可 改变其电阻值，使PIN 管 成为一个可变电阻器。

2、交流电压作用下的PIN管特性：

PIN管在交流电压作用下，其特性与交流电压的频率和幅度有关。

低频时，由于交流信号的周期很大，载流子进、出I层的渡越时间与信号周期相比可以忽略。在交流信号的正半周，呈现低阻抗；在负半周呈现高阻抗。PIN管具有明显的单向导电性，可作为整流元件。

高频时，载流子渡越时间已不能忽略，单向导电性减弱。当频率足够高时（这个频率与I层厚度有关），如100MHz，PIN管在交流信号的正半周阻抗与负半周阻抗基本相同，此时整流效应完全消失，类似一个线性元件。其根本原因在于载流子的渡越时间效应，在正半周和负半周并未达到真正的导通和截止。

3、交、直流电压共同作用下的PIN管特性：

微波信号作用于正向偏置PIN管时，只要很小的正向偏置电流，就可以使很大的微波信号工作在PIN管的正向状态，对微波信号而言，PIN管呈现出低阻抗导通状态。

同理，在较小的反向直流偏压作用下，即使微波信号电压的振幅图2-19 正向偏压和微波信号共同作用于PIN管的情况很大，也能保证PIN始终工作在反向状态，对微波信号而言呈现出高阻抗截止状态。

因此，PIN管可以用很小的直流功率来控制很大的微波功率。

第四节 微波雪崩二极管和体效应二极管

一、雪崩二极管

包括碰撞雪崩渡越时间模式二极管 包括碰撞雪崩渡越时间模式二极管IMPATT（崩越模）、俘获等离子体雪崩触发渡越模式二极管TRAPATT（俘越模）。

二、转移电子器件：又称体效应二极管、Gunn管。

负阻振荡器的工作条件：

当电路的阻抗轨迹具有复杂形状时，它与器件线就可能有多多个交点。此时须判别各个交点图2-31 负阻振荡器的一般等效电路，器件线和电路阻抗轨迹的交点成为振荡工作点（工作点）是否稳定。

第五节 微波双极晶体管和场效应晶体管

微波晶体管分为双极晶体管和单极晶体管两种。所谓双极晶体管，是指PNP或NPN形这类有两种极性不同的载流子参与导电的晶体管，也称为晶体三极管。单极晶体管只有一种载流子参与导电，指场效应晶体管。

一、微波双极晶体管

微波双极晶体管通常都是平面结构，并且几乎都是NPN型。微波双极晶体管的工作原理和普通双极晶体管相同。

1、微波双极晶体管的结构和等效电路

微波双极晶体管在封装和内部结构上与低频双极晶体管有很大区别。图2-32表示微波双极晶体管的几种典型封装形式。其中，图（a）表示同轴型结构，图（b）表示两种不同的带状引线型结构。同轴型结构的管子适用于同轴结构的电路，主要用作功率放大器和振荡器；带状引线型结构的管子适用于微带电路，主要用作低噪声放大器，目前在功率放大器中也大量使用。

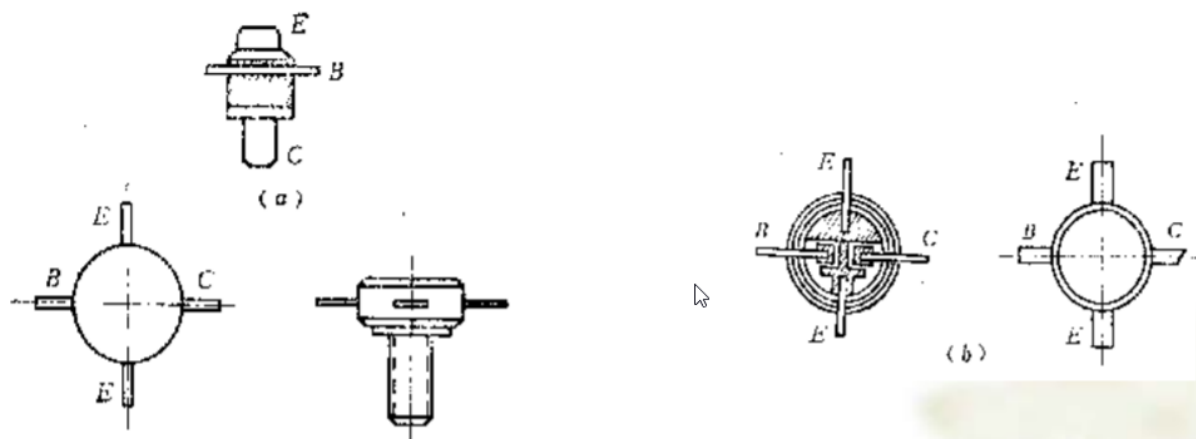


图2-32 微波双极晶体管的几种典型的封装形式

(a) 同轴型；(b) 带状引线型。

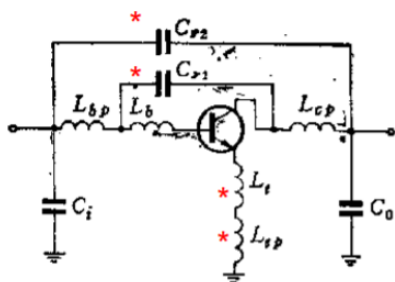


图2-37 封装管壳的等效电路

反馈电容 C_{F1} 和 C_{F2} 影响晶体管的增益和稳定性， C_i 和 L_{bp} 使晶体管的带宽变窄， L_{cp} 使晶体管的增益下降和带宽变窄。另外，引线电阻将产生输入损耗和反馈损耗，使晶体管的增益下降。在上述寄生参量中，反馈电容 C_{F1} 和 C_{F2} 和发射极电感 L_e 、 L_{cp} 对晶体管性能的影响最为严重。因此，在微波波段，若能直接使用管芯，可更好地发挥器件的性能。同时可以看出，微波晶体管封装后，要对其等效电路进行分析和计算是很复杂的。

2.微波双极晶体管的性能参数

(1)特征频率

通常用特征频率表示微波晶体管的高频放大性能，它定义为共发极短路电流增益时的频率。

经过推导，得到特征频率为：

$$\omega_T = 2\pi f_T = h_{fe0}\omega_0$$

特征频率与晶体管的结构参数密切相关。

(2)噪声

在微波晶体管中，由于闪烁噪声不起主要作用，因此微波晶体管的噪声主要有两类：一是热噪声，二是散弹噪声。

福井(H. Fukui)利用晶体管的共发极噪声等效电路，根据上述噪声源的表示式，推导出了计算微波晶体管最小噪声系数的简便公式：

$$F_{\min} = 1 + h \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2}{h}} \right)$$

降低微波晶体管噪声系数的途径，即：提高晶体管的特征频率、 T_f 降低基区电阻。最小噪声系数是集电极电流的函数。

二、微波场效应晶体管

目前在微波波段使用的场效应晶体管有金属-半导体场效应晶体管(MESFET)、PN结场效应晶体管(JFET)和绝缘栅场效应晶体管(IGFET)，但以在砷化镓半绝缘材料衬底上制作的在砷化镓半绝缘材料衬底上制作的N沟道MESFET的微波性能最好。MESFET也叫肖特基势垒栅场效应晶体管。

1、微波场效应晶体管的结构、工作原理和等效电路

当在栅极加上负压时，耗尽层变厚，N沟道变薄，变薄的程度受栅极反向电压的控制。如果不断增加负栅压，当它达到某一数值时，沟道V_g极反向电压的控制。如果不断增加负栅压，当它达到某数值 V_p 时，沟道的厚度变为零，即沟道被耗尽层夹断了，这时的栅压称为夹断电压。

因此，耗尽层沿沟道的分布是不均匀的，形成的沟道厚度也是不均匀的：近源端沟道较厚，近漏端沟道较薄。

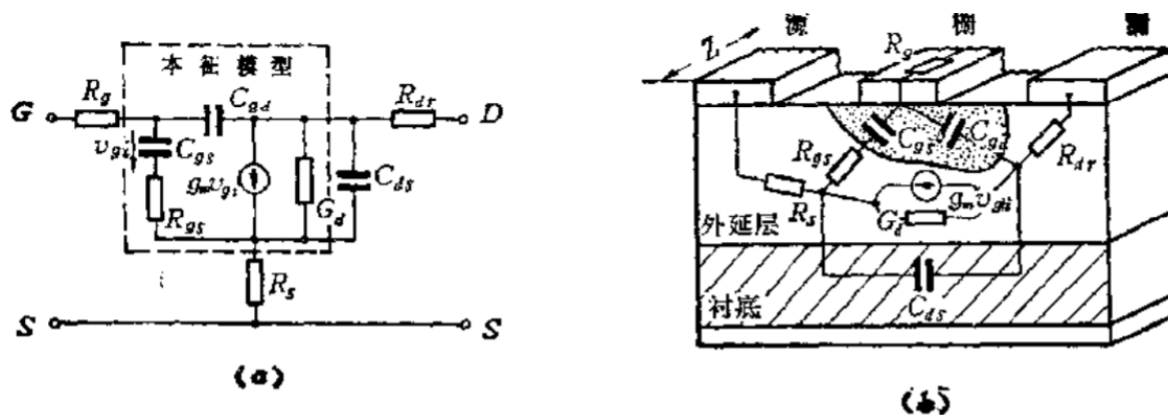


图2-41 MESFET的等效电路及等效电路元件在结构中的位置
(a) MESFET的等效电路 (b) 等效电路元件在结构中的位置

2、微波场效应晶体管的性能参数

(1)特征频率

特征频率是共源电路短路电流增益时的频率。

$$|h_{21}| = \frac{g_{m0}}{2\pi f_T [C_{gd} + C_{gs}(1 + g_{m0}R_s)]} = 1 \Rightarrow f_T = \frac{g_{m0}}{2\pi [C_{gd} + C_{gs}(1 + g_{m0}R_s)]}$$

可见，为了提高特征频率，必须提高管子的跨导和减小。为了减小 $g_{m0}R_s$ ，应缩短栅长。从物理意义上也可以这样理解，栅长越短，电子在沟道中渡越的时间越短，特征频率越高。因此，微波场效应管都是短栅的。

(2)噪声

本征场效应管的噪声来源主要有两个：一是沟道热噪声，它是由沟道中导电部分的电阻产生的；二是感应栅极噪声，它和前者有关，是沟道中产生的起伏噪声电压在栅极上感应的噪声。这两种噪声，就其本质来说，都是热噪声。

综上所述，砷化镓场效应管除热噪声外，还有高场扩散噪声和谷间散射噪声，因而使噪声温度升高。而且在沟道内噪声温度的分布是不均匀的，随电场强度的增加而增加。

据场效应管的噪声等效电路由上述微波场效应管各噪声源的表示。根据场效应管的噪声等效电路，由上述微波场效应管各噪声源的表示式，可以求出本征微波场效应管最小噪声系数的表示式

$$F_{\min} \approx 1 + 2\sqrt{P \cdot R \cdot (1 - C^2)} \frac{f}{f_T}$$

由上式可见，最小噪声系数与频率成正比，所以它比双极晶体管中 最小噪声系数随频率上升的趋势慢得多，因此，在C波段以上，通常选用 微波场效应管做低噪声放大器。

三、微波晶体管的S参数

微波晶体管的S参数是频率和工作状态的函数，要想测出在某一频率 范围的S参数，就需要在许多频率点进行测量。用微波网络分析仪可以方便地测出晶体管的S参数。

第六节 器件模型参数的提取（含X参数）

一、参数提取概述

确定 固体器件模型的拓扑之后 确定 了固体器件模型的拓扑之后，还需确定电路 件的电容 还需确定电路元件的电容、电 阻 或跨导值。在线性电路中，确定这些元件的值比较容易，因为每个电容、电阻或受控源只需由一、两个常数就可以确定了。

当固体器件作小信号准线性应用时，其特性可由测得的 S参数确定 。在该器件用一个等效电路模型表示时，模型中各个元件的值可通过优化 拟合的方法加以提取 的方法加以提取，使得由等效电路计算得到的使得由等效电路计算得到的 S参量与测得的 S参量 相等。

一般采用的提取方法有如下几种：

1.模型参数的部分提取法

即根据不同模型参数的性质，通过测量与这些模型有关的电学特 性，并利用简单的计算处理或曲线外推，来得到相应的模型参量 来得到相应的模型参量 。

2.模型参数总体优化提取方法

模型参数总体优化提取是将所有与某种器件特性相关的模型参数一次 性提取出来。该方法就是利用器件的某些端口特性，采用最优化计算方法，将隐含在这些端口特性中的模型参数作为优化变量进行提取。只要这些模 型参数之间是线性无关的（或是弱相关的），就可以采用这种方法实现参 数提取；如果已知模型参数之间是相关的，则可以用统计分析的方法获取 模型参数 。

在求解目标函数的最优解时，，一般采用梯度法或随机搜索法，

在上述方法基础上，可以进一步采用组合优化算法： 1，先用改进的模拟退火法在模型参数空间作大范围随机搜索，获取 一个可靠的初值； 2，然后对目标函数进行主成分灵敏度分析，导出一个空间坐标变换 公式，将模型参数空间变换到 将模型参数空间变换到 个变量互不相关的新 一个变量互不相关的新空间； 3，在新空间里采用Levenberg-Marquardt算法（L-M算法，具有阻尼 因子的高斯 -牛顿最小二乘法 ）进行优化拟合 。

二、双频激励提取非线性器件的大信号S参数

当研究含有强非线性微波装置时，常希望直接获得器件的S参数。 习惯上采用两种从器件时域特性提取的方法：

一种是简单易行的单信号近似方法

它假定、仅为第一端口电压的函数，在第二端口无激励（）的条件下求解；类似地、假定仅为的函数，在11 s 21 s V1 E 0 2 □ 22 s 12（）的条件下求解；类似地、s假定仅为V2的函数，在E 0 1 □的条件下求解。

第二种是在物理概念上完善的双信号精确方法。

早期的做法是以频率、幅度相同的源，从器件两端同时激励，在两源相位差的不同值下进行电路分析，观察两端口入射波和反射波幅度之比的变化，结果在史密斯圆周上画出四个圆，圆的中心就是大信号S参数。

三、PHD模型与S参数模型的不同

散射波的表达式中不仅包括了入射波，还包括入射波的共轭项，在S参数中没有这样的关系参数中没有这样的关系。这是因为在S参数模型中入射波对特定散射波的贡献与入射波的相位是没有关系的。

散射波的每一个频率分量与入射波的所有频率分量都有关系，而S参数没有这种关系。

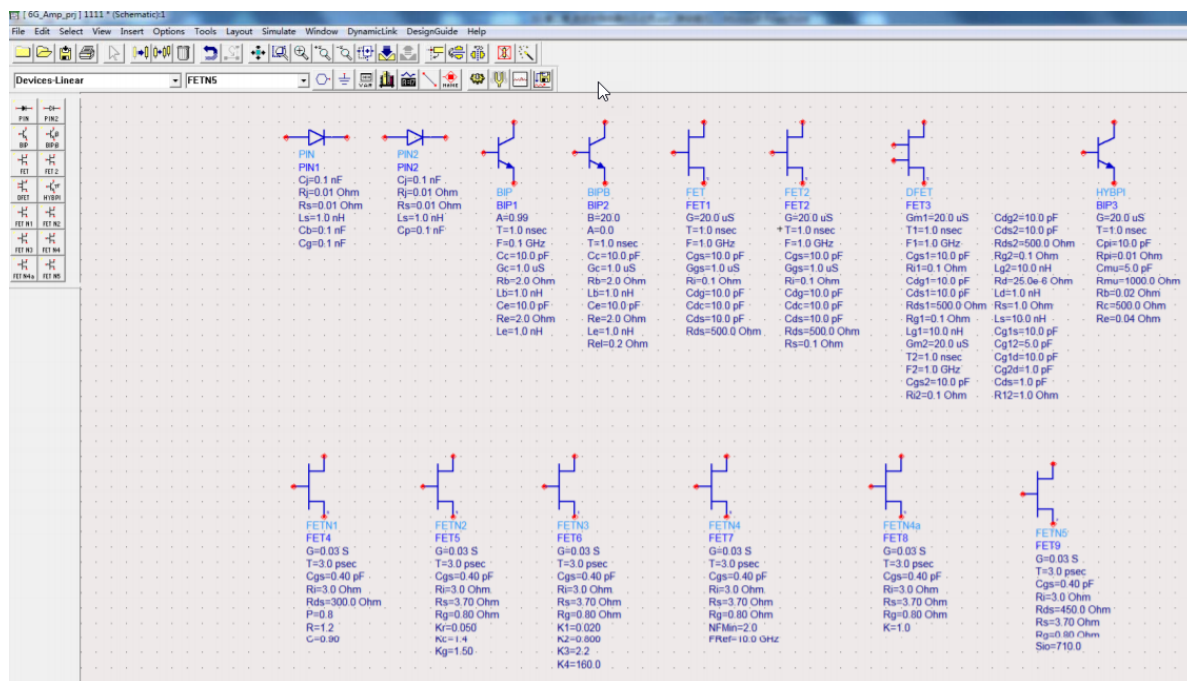
四、X参数的引用

X参数：用于采集和记录PHD模型中由谱映射函数描述的入射波各个频率分量与散射波各个频率分量之间的映射关系；

由于谱映射函数随频率、直流偏置、大信号功率、端口阻抗等改变，因此X参数也应体现这些影响因素。

第七节 ADS中的微波器件及模型

半导体器件线性模型：



其他见PPT中截图。