

GaInP/GaAs 异质结双极晶体管小信号模型 参数提取的新方法^{*}

刘海文¹⁾²⁾ 孙晓玮¹⁾ 程知群¹⁾ 车延峰¹⁾ 李征帆²⁾

¹⁾中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200050)

²⁾上海交通大学电子工程系,上海 200030)

(2002 年 10 月 25 日收到,2002 年 12 月 22 日收到修改稿)

提出了一种直接提取 GaInP/GaAs 异质结双极晶体管(HBT)小信号模型参数的新方法.该方法基于 HBT 器件 S 参数的测试数据,对 HBT 的小信号模型进行电路网络分析,利用 S, Z, Y 参数关系以及电路“抽出”的技巧,分别对 HBT 小信号模型的寄生参数和本征元件参数进行提取,建立了一套完整的直接提取 HBT 小信号模型参数的新方法.与文献报道 HBT 小信号模型参数提取的方法相比,该方法的优点是,提取过程具有简明清晰的物理意义,无需建立特殊的测试结构,无需引入繁琐的数学优化过程,提取速度快,并且具有比较好的精度和较宽频带范围的适用性等.

关键词:GaInP/GaAs HBT, 参数提取, 小信号模型

PACC: 7340L, 3620K, 5270G

1. 引 言

异质结双极晶体管(HBT)具有高频、高速、低噪声和高电流驱动能力等优点^[1-3],特别适合于制作微波及高速数字电路.随着 HBT 应用的不断开拓,建立精确的器件模型及对其等效电路元件参数的提取,对 HBT 的电路模拟及 MMIC 的 CAD 都具有十分重要的意义.

目前,已有不少有关 HBT 小信号模型参数的提取方法的报道^[4-5].这些提取方法主要是借助数学优化和数学近似来提取参数,由于要提取的参数数目一般超过 10 个,故优化的目标函数变得相当复杂.而且,其计算结果很大程度依赖于参数初始值的选择.同时,由于提取方法侧重于数学形式的演算变换,从而使得参数提取过程中,各参数的物理意义变得模糊,这对于 HBT 器件的实际运用是不可取的.近年来,有学者提出了一些改进的方法^[6-13].他们从 HBT 器件本身物理特性和等效电路结构出发,来研究其小信号模型参数提取的方法.这些方法主要有: 1)基于电路网络理论,分析 HBT 器件小信号模型的

等效电路,并与 HBT 的 S 参数测试数据进行拟合,提取参数.由于提取参数的数目较多,而从电路网络推导关系和已有的物理试验获得 HBT 器件参数等已知条件有限,所以采取数学近似的技巧和方法,由某一已知参数推出另外一个参数的近似解,来完成整个参数提取.如 Schaper^[6]和 Lin^[7]提出的方法.2)忽略 HBT 寄生参数的影响,即减少参数提取数目,来分析 HBT 器件小信号模型的等效电路,并与 HBT 的 S 参数测试数据进行拟合,提取参数.由于参数数目的减少,因而提取算法变得相对简便,但是小信号模型的完备性下降.如 Weif^[9]提出的方法.

为了精确而快速的提取 HBT 小信号电路模型参数,从研究 HBT 器件的物理结构和等效电路特性出发,无需引入数学优化或者数学近似方法,我们提出了一种直接提取 HBT 小信号模型参数的新方法.和其他学者的提取方法相比,该方法提取过程没有繁琐的数学推导和优化过程,提取速度快,并且,参数提取具有简明清晰的物理意义.此外,该方法只需测试 HBT 的 S 参数数据就可以提取出小信号电路模型的全部参数,因此,该方法的测试条件简单易行,对测试结构无特殊要求,而且,提取方法是基于

^{*} 上海市科委 AM 基金(批准号 0109)资助的课题.

具有物理意义频段内的 S 参数测试数据,因此,与所提取参数初始值的选取无关,并且避免了收敛于错误解的可能性^[14].经测试和模拟结果对比分析表明,该方法还具有比较好的精度和较大频带范围的适用性等优点.

2. HBT 小信号模型的等效电路

我们设计制作的 HBT 器件共发混合 T 形小信号模型的横截面示意图如图 1(a)所示^[14,15],图中没有考虑引线的寄生参量.与 HEMT 和 MESFET 平面工艺不同的是,HBT 是台面工艺,工艺流程和版图设计更为复杂.考虑到引线寄生参量的影响,HBT 小信号模型等效电路原理图如图 1(b)所示.该模型包含了 HBT 器件的极间寄生参数 $R_b, R_c, R_e, C_{bcp}, C_{bep}, C_{cep}, L_b, L_c, L_e$ 等,比较完整的描述了 HBT 小信号等效电路.图 1(b)中,虚线框 Y' '内是不含寄生参量的电路部分,称之为 HBT 器件的本征电路(intrinsic part),它包括 $R_{bb}, R_{bc}, R_{be}, C_{ex}, C_{bc}, C_{be}, \alpha_0, \tau$ 等

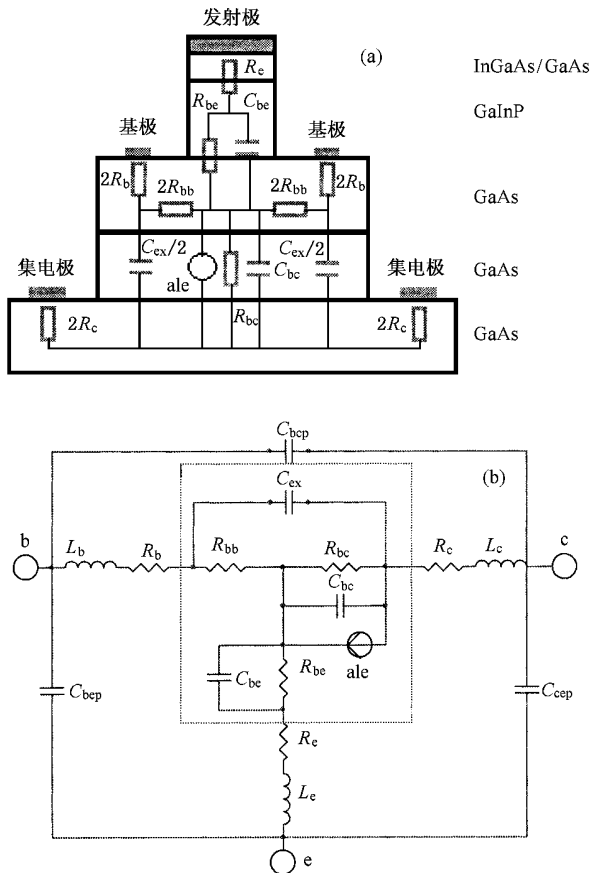


图 1 (a) HBT 器件小信号模型的横截面示意图 (b) HBT 小信号等效电路原理图

本征元件参数.本征电路外面,为电路的寄生参量部分.因此,该电路模型共包含以上 17 个待求电路元件参数.其中, $R_{bc}, R_{be}, C_{bc}, C_{be}$ 和 α 是和 HBT 的工作状态相关的,其他元件独立于 HBT 的工作状态. R_{bc}, R_{be} 分别是基极-集电极和基极-发射极的动态结电阻. $R_{bT} = R_b + R_{bb}$ 为基极电阻, C_{be} 是基极-发射极结电容. $C_{ex} + C_{bc}$ 是基极-集电极结电容. α 是电流增益.

3. 参数提取

HBT 小信号模型的参数提取过程分两步.第一步是极间寄生参数提取.极间寄生参数的值一般很小,但是在 HBT 小信号模型本征电路参数的提取过程中十分重要.第二步是在第一步的计算基础上,并基于 HBT 的 S 参数的测试数据,运用电路网络理论,分析 HBT 小信号电路模型的 Z, Y 参数,从 HBT 小信号等效电路模型中“抽出”本征电路,从而得到本征电路的各参数值.

3.1. 寄生参数的提取

小信号等效电路模型中,取 HBT 为集电极开路偏置工作状态.此时,集电极电流为零,基极-集电极结电阻 R_{bc} 和基极-发射极的结电阻 R_{be} 相对于基极-集电极的结电容 $C_{ex} + C_{bc}$ 和基极-发射极的结电容 C_{be} 要小得多,因此电流主要流经 R_{be} 和 R_{bc} ,而 C_{be}, C_{ex} 和 C_{bc} 被视为短路.HBT 反向偏置的等效电路如图 2 所示.

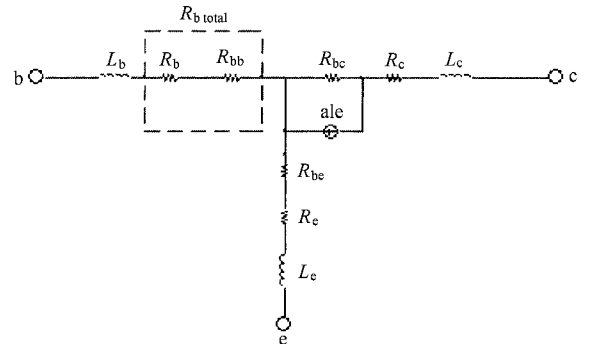


图 2 HBT 集电极开路偏置的等效电路

图 2 中等效电路的 Z 参数为

$$Z_{11} = R_{bT} + R_{be} + R_e + j\omega(L_b + L_e), \quad (1)$$

$$Z_{12} = R_{bc} + R_e + j\omega L_e, \quad (2)$$

$$Z_{21} = R_{be} + R_e - \alpha R_{bc} + j\omega L_e, \quad (3)$$

$$Z_{22} = R_c + R_{be} + R_e + (1 - \alpha)R_{bc} + j\omega(L_c + L_e), \quad (4)$$

$$R_{bT} = R_b + R_{bb}, \quad (5)$$

其中 ω 是角频率.

基极-发射极结电阻 R_{be} 和基极-集电极结电阻 R_{bc} 由下式决定:

$$R_{be} = \frac{n_{be}kT}{qI_{be}}, \quad (6)$$

$$R_{bc} = \frac{n_{bc}kT}{qI_{bc}}, \quad (7)$$

其中 n_{be} 和 n_{bc} 是理想因子, k 为玻尔兹曼常数, T 是绝对温度, q 是电子电荷, I_{be} 和 I_{bc} 分别是流经 R_{be} 和 R_{bc} 的电流.

由 (1)–(7) 式可以推出,

$$R_e = \text{rea}(Z_{12}) - R_{bc}, \quad (8)$$

$$R_{bT} = \text{rea}(Z_{11}) - R_{be} - R_e, \quad (9)$$

$$\alpha = [-\text{rea}(Z_{11}) + R_{be} + R_e] / R_{bc}, \quad (10)$$

$$R_c = \text{rea}(Z_{22}) - R_{be} - R_e - (1 - \alpha)R_{bc} \quad (11)$$

$$\omega L_e = \text{imag}(Z_{12}), \quad (12)$$

$$\omega L_c = \text{imag}(Z_{22}) - L_e, \quad (13)$$

$$\omega L_b = \text{imag}(Z_{11}) - L_e, \quad (14)$$

其中 real 表示求取复数的实部, imag 表示求取复数的虚部, 电流增益 α 表达式为

$$\alpha = \frac{\alpha_0 \exp(-j\omega\tau)}{1 + (j\omega/\omega_{-3dB})}, \quad (15)$$

α_0 表示本征电路的电流直流增益, τ 是延迟时间, ω 是测试频率, ω_{-3dB} 是直流增益幅度下降了 3dB 处的频率. 知道 τ , ω , ω_{-3dB} 后, 就可以从 α 中求得 α_0 .

经分析, 在 HBT 的截止工作状态下, 电路中仅含有寄生电容参量. 它的等效电路如图 3 所示.

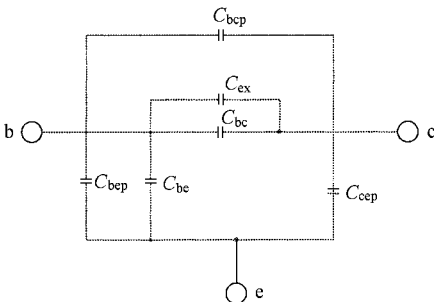


图 3 HBT 反向偏置的等效电路

图 3 中等效电路的 Y 参数为

$$Y_{11} = j\omega(C_{bep} + C_{be} + C_{bcp} + C_{ex} + C_{bc}), \quad (16)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -j\omega(C_{bcp} + C_{ex} + C_{bc}), \quad (17)$$

$$Y_{22} = j\omega(C_{cep} + C_{bcp} + C_{ex} + C_{bc}). \quad (18)$$

基极-集电极的结电容 C_{ex} 和基极-发射极的结电容 C_{bc} 可以由下式决定:

$$C_{be} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V_{be}}{V_{bi}}\right)^{m_j}}, \quad (19)$$

$$C_{ex} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V_{ex}}{V_{bi}}\right)^{m_j}}, \quad (20)$$

其中 C_{j0} 为零偏压势垒电容, V_{bi} 为 pn 结接触电势. m 为非线性系数, 对于突变结, $m = 1/2$, 对于缓变结或渐变结, $m = 1/3$, 对于超突变结, $m > 1/2$. V_{be} 和 V_{ex} 分别加在 C_{be} 和 C_{ex} 两端的电位势. 联立 (16)–(20) 式, 可以得到

$$\omega C_{bep} = \text{imag}(Y_{11} + Y_{12}) - C_{be}, \quad (21)$$

$$\omega C_{cep} = \text{imag}(Y_{22} + Y_{12}), \quad (22)$$

$$\omega(C_{bcp} + C_{bc}) = -\text{imag}(Y_{12}) - C_{ex}. \quad (23)$$

3.2. 本征电路参数的提取

获得寄生参数后, 再由 HBT 小信号等效电路模型的 Z, Y 参数, 从 HBT 小信号等效电路模型中“抽出”本征电路的 Z, Y 参数, 从而提取出本征电路的各参数. 如图 1 所示, 从 HBT 小信号模型 Y' 参数中去除寄生电容 $C_{bep}, C_{bcp}, C_{cep}$; “抽出”的电路的 Y 参数, 记为 Y'' . 图中 Y' 参数与 Y'' 参数的关系为

$$Y'' = Y' - \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 & -Y_1 \\ -Y_1 & Y_1 + Y_3 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

其中

$$Y' \Leftarrow S', \quad (25)$$

$$Y_1 = j\omega C_{bep}, \quad (26)$$

$$Y_2 = j\omega C_{bcp}, \quad (27)$$

$$Y_3 = j\omega C_{cep}. \quad (28)$$

S' 是 HBT 测试的得到 S 参数, “ \Leftarrow ”表示参数之间转换. 寄生电容 $C_{bep}, C_{bcp}, C_{cep}$ 在第一步中求得, 所以 Y'' 即可求出.

将 Y'' 转换为 Z 参数 Z'' , 有

$$Z'' \Leftarrow Y''. \quad (29)$$

如图 1 所示, 从 Y'' 参数中去除寄生电阻和寄生电感 $R_b, R_c, R_e, L_b, L_c, L_e$; “抽出”的电路即为 HBT 小信号模型的本征电路, 该电路的 Z, Y 参数分别记

为 Z''', Y''', Z''' 与 Z'' 的关系为

$$Z''' = Z'' - \begin{bmatrix} Z_1 + Z_3 & Z_3 \\ Z_3 & Z_2 + Z_3 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

其中

$$Z_1 = R_b + j\omega L_b, \quad (31)$$

$$Z_2 = R_c + j\omega L_c, \quad (32)$$

$$Z_3 = R_e + j\omega L_e. \quad (33)$$

寄生电阻和寄生电感 $R_b, R_c, R_e, L_b, L_c, L_e$ 在第一步中求得, 所以 Z''' 就可以确定.

将本征电路的 Z 参数转换成 Y 参数, 即

$$Y''' \Leftarrow Z''', \quad (34)$$

如图 1 中 Y''' 所示, 本征电路的 Y 参数为

$$Y'''_{11} = Y_b + \frac{Y_{bc} + (1 - \alpha)Y_{be}}{1 + R_{bb}[(1 - \alpha)Y_{be}] + Y_{bc}}, \quad (35)$$

$$Y'''_{12} = -Y_b - \frac{Y_{bc}}{1 + R_{bb}[(1 - \alpha)Y_{be}] + Y_{bc}}, \quad (36)$$

$$Y'''_{21} = -Y_b + \frac{(-Y_{bc}) + \alpha Y_{be}}{1 + R_{bb}[(1 - \alpha)Y_{be}] + Y_{bc}}, \quad (37)$$

$$Y'''_{22} = Y_b + \frac{Y_{bc}(1 + Y_{be}R_{bb})}{1 + R_{bb}[(1 - \alpha)Y_{be}] + Y_{bc}}, \quad (38)$$

其中

$$Y_b = j\omega C_{ex}, \quad (39)$$

$$Y_{bc} = \frac{1}{R_{bc}} + j\omega C_{bc}, \quad (40)$$

$$Y_{be} = \frac{1}{R_{be}} + j\omega C_{be}. \quad (41)$$

表 1 本文方法提取的参数值 ($V_{ce} = 2V, I_c = 2.5mA$)

参数	参数	参数	参数
R_b/Ω	2.2	R_{bb}/Ω	9.6
R_c/Ω	3.8	R_{bc}/Ω	1562
R_e/Ω	1.2	R_{be}/Ω	24
C_{bep}/fF	16.3	C_{ex}/fF	23.1
C_{bep}/fF	29.4	C_{bc}/fF	15.6
C_{cep}/fF	33.7	C_{be}/fF	2.1
L_b/pH	20.6	α_0	0.77
L_c/pH	35.1	τ/ps	1.6
L_e/pH	1.5		

将 α 和 Y''' 代入 (35)–(38) 式解出 Y_b, Y_{bc}, Y_{be} 和 R_{bb} , 再将 Y_b, Y_{bc}, Y_{be} 和 R_{bb} 代入 (39)–(41) (5) 式解出 C_{ex}, C_{bc}, C_{be} 和 R_b .

$$C_{ex} = Y_b/j\omega, \quad (42)$$

$$C_{bc} = \left(Y_{bc} - \frac{1}{R_{bc}} \right) / j\omega, \quad (43)$$

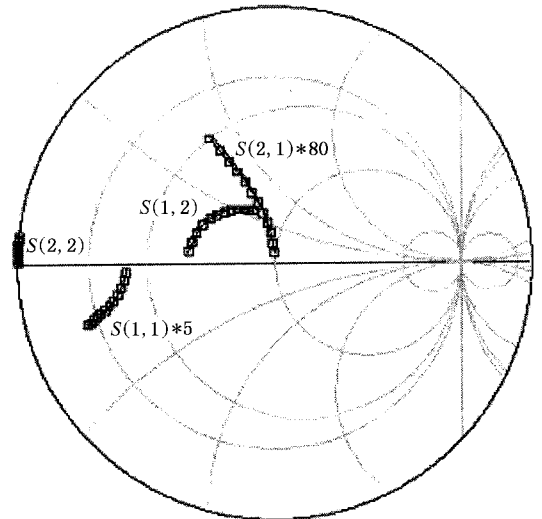
$$C_{be} = \left(Y_{be} - \frac{1}{R_{be}} \right) / j\omega, \quad (44)$$

$$R_b = R_{bT} - R_{bb}. \quad (45)$$

由以上计算, 得到 HBT 小信号等效电路模型各参数值列于表 1.

4. 结果分析

对 HBT 实测的 S 参数与本文方法提取参数建模后 HBT 的 S 参数对比结果见图 4, 发射机面积为 $3.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$. 测试设备: HP8722D 矢量网络分析仪 (工作频段为 0.5—40GHz) 与计算机主机、Cascade 探针台、XJ4810 图示仪. 建模后 HBT 的 S 参数是基于 Agilent 公司的 ADS2002 软件仿真得到.



频率 (1.000GHz—12.00GHz)

图 4 HBT 实测的 S 参数值 (小方块表示) 与本文方法提取的 S 参数 (曲线表示) 结果对比

本文定义误差函数是

$$\| \epsilon \| = \sum_{i,j=1}^2 \sum_{k=1}^N \delta_{pq} \left| \frac{S_{ij}^m(f_k) - S_{ij}^c(f_k)}{S_{ij}^c(f_k)} \right|^2 \quad (46)$$

式中 f_k 是测试的频率点, N 是测试的频率点总个数, $S_{ij}^m(f_k)$ 是对 HBT 测试的 S 参数数据, $S_{ij}^c(f_k)$ 是本文提取 HBT 参数理论计算的 S 参数数据, δ_{pq} 是权重. 计算结果表明, 本文方法参数提取误差小于 5%.

5. 结 论

本文提出了一种直接提取 HBT 小信号模型的

新方法,并成功的应用于提取 HBT 小信号模型的 17 个参数.该方法直接从 HBT 的 S 参数入手,分析 HBT 的物理特性和等效电路结构,具有直观清晰的物理意义,且没有繁琐的数学推导和优化过程,参数

提取速度快.由于该方法分析起点是基于具有物理意义频段内的 S 参数测试数据,与所提取参数的初始值无关,避免了收敛于错误解的可能性.实验结果表明,测试值和理论计算值吻合较好,该方法是有效的.

-
- [1] Lu L W *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 372 [in Chinese] 卢励吾等 2002 物理学报 **51** 372]
- [2] Zhang X H *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 556 [in Chinese] 张兴宏等 1999 物理学报 **48** 556]
- [3] Liu X Q *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2340 [in Chinese] 刘雪芹等 2002 物理学报 **51** 2340]
- [4] Lin B and Prasad S 1995 *IEEE Tans. Microwave Theory Tech.* **47** 534
- [5] Uscola R and Tutt M 2001 *Proc. IEEE 2001 Int. Conference on Microelec. Test Structure* **14** 83
- [6] Schaper U and Hozapfl B 1995 *IEEE Tans. Microwave Theory Tech.* **43** 493
- [7] Lin B *et al* 1998 *IEEE Tans. Microwave Theory Tech.* **46** 1427
- [8] Gobert Y ,Tasker P J and Bachem K H 1995 *IEEE Tans. Microwave Theory Tech.* **45** 149
- [9] Wei C *et al* 1995 *IEEE Tans. Microwave Theory Tech.* **43** 2035
- [10] Rudolph M and Heymann P 1999 *IEEE Tans. Microwave Theory Tech.* **47** 82
- [11] Samilis A and Pavlidis D 1997 *IEEE Tans. Microwave Theory Tech.* **45** 886
- [12] Costa D ,Liu W U and Harris J S 1991 *IEEE Tans. Electron Device* **38** 2018
- [13] Bousnina S ,Mandeville P *et al* 2002 *IEEE Tans. Microwave Theory Tech.* **50** 529
- [14] Cheng Z Q 1998 *Dissertation* (Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology ,Chinese Academy of Sciences) [程知群 1998 博士学位论文(中国科学院上海微系统与信息技术研究所)]
- [15] Cheng Z Q *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 375 [in Chinese] 程知群等 2000 物理学报 **49** 375]

A novel ,yet direct ,parameter-extraction method for heterojunction bipolar transistors small-signal model^{*}

Liu Hai-Wen^{1,2)} Sun Xiao-Wei¹⁾ Cheng Zhi-Qun¹⁾ Che Yan-Feng¹⁾ Li Zheng-Fan²⁾

¹⁾ Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology ,Chinese Academy of Sciences ,Shanghai 200050 ,China)

²⁾ Department of Electronic Engineering ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai 200030 ,China)

(Received 25 November 2002 ; revised manuscript received 22 December 2002)

Abstract

An accurate and broad-band method for heterojunction bipolar transistors (HBT) small-signal model parameters is presented in this paper. This method differs from previous ones by extracting the equivalent-circuit parameters without using special test structure or global numerical optimization techniques. The main advantage of this method is that a unique and physically meaningful set of intrinsic parameters is extracted from impedance and admittance representation of the measured S -parameters in the frequency range of 0.5—12GHz under different bias conditions. An equivalent circuit for the HBT under a forward-bias condition is proposed for extraction of access resistance and parasitic inductance. The method yields a deviation of less than 5% between measured and modeled S -parameters.

Keywords : GaInP/GaAs HBT , parameter extraction , small-signal model

PACC : 7340L , 3620K , 5270G

^{*} Project supported by AM Foundation of Shanghai Municipal Science & Technology Commission ,China(Grant No.0109).