

# 高频大功率晶体管

〔日〕入江俊昭、藤江明雄、山根博基 著

《高频大功率晶体管》翻译组 译

## 译者序

在无产阶级文化大革命的推动下，近几年我国的半导体技术获得飞跃的发展。半导体器件的品种日益增多，应用也日益广泛。高频大功率晶体管，是应用于通讯、雷达以及测试仪器等方面的一种重要器件，其实现高频大功率化，不仅能减小电子设备的体积和重量，而且又能提高设备的可靠性。因此，它成为各国研究的重要课题之一。

遵照毛主席“洋为中用”的教导，我们翻译了《高频大功率晶体管》一书，供有关人员参考。翻译中，我们对所发现的原书中的错误作了更正，但由于我们水平所限，原书中的错误以及我们翻译中的错误和不妥之处，在所难免，请读者批评指正。

# 目 录

一、高频大功率晶体管的技术展望 .....	7
1.1 高频大功率化是怎样发展起来的 .....	7
1.1.1 高频大功率化的基本器件结构 .....	7
1.1.2 制造技术的进展 .....	14
1.1.3 封装和寄生元件 .....	17
1.2 高频大功率晶体管特性将来的趋向 .....	22
二、晶体管的基本工作原理 .....	28
2.1 pn 结 .....	28
2.1.1 pn 结的能带结构 .....	29
2.1.2 空间电荷区电位和电场的分布 .....	32
2.1.3 pn 结的电压电流特性 .....	35
2.1.4 空间电荷层的电容 .....	36
2.1.5 扩散电容 .....	37
2.1.6 电子雪崩击穿 .....	38
2.2 晶体管的工作原理 .....	42
2.2.1 低注入电平直流电流放大系数 .....	44
2.2.2 高注入电平直流电流放大系数 .....	46
2.2.3 电流放大系数的频率特性和截止频率 .....	49
三、高频大功率晶体管的设计 .....	57
3.1 设计理论的基本概念 .....	57
3.1.1 小面积双重扩散型晶体管的基区渡越时间 .....	57
3.1.2 性能指数和等效电路 .....	59
3.2 大功率化的结构设计 .....	66
3.2.1 最佳设计问题 .....	66
3.2.2 改善性能指数的方法 .....	71
3.2.3 单元晶体管的并联连接 .....	72
3.2.4 寄生元件的减小 .....	76

3.2.5 单元晶体管的布置方法	77
3.3 制造技术的若干问题	80
<b>四、高频大功率晶体管的特性及其测量方法</b>	<b>83</b>
4.1 高频大功率晶体管设计项目概要	83
4.1.1 设计高频大功率晶体管放大器的必要条件	83
4.2 晶体管直流特性参数及其测量	85
4.2.1 击穿电压及其测量	85
4.2.2 最大电流额定值及其测量	89
4.2.3 直流电流放大系数 $h_{FE}$ 与电流的关系及其测量	91
4.2.4 集电极饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 及其测量	93
4.2.5 直流集电极电阻 $R_{SC}$ 的测量	94
4.3 高频参量及其测量	95
4.3.1 高频 $h_{fe}$ 的测量	95
4.3.2 集电极电容 $C_{ob}$ 的测量	100
4.3.3 高频大功率晶体管的输入输出阻抗的测量	100
4.4 高频大功率晶体管热阻的重要性及其测量	101
4.4.1 热阻的测量	102
4.4.2 使用红外线扫描技术测量热阻	104
4.4.3 计算结温的方法	105
4.4.4 高频大功率晶体管的二次击穿现象	110
4.5 输出特性及其限制的主要因素, 丙类放大器设计基础	115
4.5.1 高频大功率乙类放大器基础	115
4.5.2 高频饱和压降 $RFV_{CE(sat)}$ 的测量	116
4.5.3 丙类放大器基础	118
4.5.4 丙类放大器的图解法	121
4.5.5 高频大功率晶体管输出功率的测量	124
4.5.6 晶体管功率放大器的稳定性问题	128
4.5.7 丁类晶体管放大	128
<b>五、高频大功率晶体管的应用</b>	<b>133</b>
5.1 高频大功率晶体管	133
5.2 电路设计的基本事项	134
5.2.1 散热设计	134
5.2.2 耐压和电源电压的关系	135

5.2.3	对于二次击穿现象的考虑	136
5.2.4	对电流额定值的考虑	137
5.2.5	公共端电感的影响	137
5.2.6	扼流圈	138
5.2.7	旁路电容器	140
5.2.8	去耦	140
5.2.9	电源容量	141
5.2.10	其他注意事项	141
5.3	乙类和丙类放大器	142
5.4	耦合电路	144
5.4.1	滤波作用	144
5.4.2	匹配电路的作用	147
5.4.3	耦合电路的一般表示	152
5.4.4	耦合电路实例	155
5.4.5	耦合电路设计中的注意事项	178
5.5	丙类功率放大电路的设计举例	193
5.5.1	使用 2SC320 的 150MHz、13.5V、1.5W 丙类放大电路	193
5.5.2	使用 2SC637 的 150MHz、13.5V、7W 丙类放大电路	197
5.5.3	使用 2SC638 的 150MHz、13.5V、12W 丙类放大电路	198
5.5.4	使用 2SC890 的 500MHz、13.5V、1W 丙类放大电路	201
5.5.5	多级放大电路举例	205
5.6	倍频	206
5.6.1	利用非线性电阻 (或电导) 倍频	206
5.6.2	利用变容二极管倍频	207
5.6.3	放大倍频	209
5.6.4	倍频电路实例	215
5.7	其他事项	219
5.7.1	负载不匹配时晶体管的保护	219
5.7.2	收发转换电路	220
5.7.3	调幅电路	221

# 高频大功率晶体管

〔日〕入江俊昭、藤江明雄、山根博基 著

《高频大功率晶体管》翻译组 译

## 内 容 简 介

本书系根据日本《高周波高出力トランジスタ》一书译出。主要介绍了高频大功率晶体管的基本原理、设计、性能参数及其测量；还通过实例介绍了高频大功率晶体管的应用以及应用电路中的注意事项。

本书主要读者对象是从事高频大功率晶体管设计和使用人员，亦可供制造人员以及大专院校有关专业师生参考。

高周波高出力トランジスタ

〔日〕入江俊昭、藤江明雄、山根博基 著

日刊工業新聞社 1970

\*

## 高频大功率晶体管

《高频大功率晶体管》翻译组 译

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 7 177 千字

1976年5月第一版 1976年5月第一次印刷 印数：00,001—38,600册

统一书号：15034·1458 定价：0.90元

## 译者序

在无产阶级文化大革命的推动下，近几年我国的半导体技术获得飞跃的发展。半导体器件的品种日益增多，应用也日益广泛。高频大功率晶体管，是应用于通讯、雷达以及测试仪器等方面的一种重要器件，其实现高频大功率化，不仅能减小电子设备的体积和重量，而且又能提高设备的可靠性。因此，它成为各国研究的重要课题之一。

遵照毛主席“洋为中用”的教导，我们翻译了《高频大功率晶体管》一书，供有关人员参考。翻译中，我们对所发现的原书中的错误作了更正，但由于我们水平所限，原书中的错误以及我们翻译中的错误和不妥之处，在所难免，请读者批评指正。



# 目 录

一、高频大功率晶体管的技术展望 .....	7
1.1 高频大功率化是怎样发展起来的 .....	7
1.1.1 高频大功率化的基本器件结构 .....	7
1.1.2 制造技术的进展 .....	14
1.1.3 封装和寄生元件 .....	17
1.2 高频大功率晶体管特性将来的趋向 .....	22
二、晶体管的基本工作原理 .....	28
2.1 pn 结 .....	28
2.1.1 pn 结的能带结构 .....	29
2.1.2 空间电荷区电位和电场的分布 .....	32
2.1.3 pn 结的电压电流特性 .....	35
2.1.4 空间电荷层的电容 .....	36
2.1.5 扩散电容 .....	37
2.1.6 电子雪崩击穿 .....	38
2.2 晶体管的工作原理 .....	42
2.2.1 低注入电平直流电流放大系数 .....	44
2.2.2 高注入电平直流电流放大系数 .....	46
2.2.3 电流放大系数的频率特性和截止频率 .....	49
三、高频大功率晶体管的设计 .....	57
3.1 设计理论的基本概念 .....	57
3.1.1 小面积双重扩散型晶体管的基区渡越时间 .....	57
3.1.2 性能指数和等效电路 .....	59
3.2 大功率化的结构设计 .....	66
3.2.1 最佳设计问题 .....	66
3.2.2 改善性能指数的方法 .....	71
3.2.3 单元晶体管的并联连接 .....	72
3.2.4 寄生元件的减小 .....	76

3.2.5	单元晶体管的布置方法	77
3.3	制造技术的若干问题	80
四、高频大功率晶体管的特性及其测量方法		83
4.1	高频大功率晶体管设计项目概要	83
4.1.1	设计高频大功率晶体管放大器的必要条件	83
4.2	晶体管直流特性参数及其测量	85
4.2.1	击穿电压及其测量	85
4.2.2	最大电流额定值及其测量	89
4.2.3	直流电流放大系数 $h_{FE}$ 与电流的关系及其测量	91
4.2.4	集电极饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 及其测量	93
4.2.5	直流集电极电阻 $R_{SC}$ 的测量	94
4.3	高频参量及其测量	95
4.3.1	高频 $h_{ie}$ 的测量	95
4.3.2	集电极电容 $C_{ob}$ 的测量	100
4.3.3	高频大功率晶体管的输入输出阻抗的测量	100
4.4	高频大功率晶体管热阻的重要性及其测量	101
4.4.1	热阻的测量	102
4.4.2	使用红外线扫描技术测量热阻	104
4.4.3	计算结温的方法	105
4.4.4	高频大功率晶体管的二次击穿现象	110
4.5	输出特性及其限制的主要因素, 丙类放大器设计基础	115
4.5.1	高频大功率乙类放大器基础	115
4.5.2	高频饱和压降 $RFV_{CE(sat)}$ 的测量	116
4.5.3	丙类放大器基础	118
4.5.4	丙类放大器的图解法	121
4.5.5	高频大功率晶体管输出功率的测量	124
4.5.6	晶体管功率放大器的稳定性问题	128
4.5.7	丁类晶体管放大	128
五、高频大功率晶体管的应用		133
5.1	高频大功率晶体管	133
5.2	电路设计的基本事项	134
5.2.1	散热设计	134
5.2.2	耐压和电源电压的关系	135

5.2.3	对于二次击穿现象的考虑	136
5.2.4	对电流额定值的考虑	137
5.2.5	公共端电感的影响	137
5.2.6	扼流圈	138
5.2.7	旁路电容器	140
5.2.8	去耦	140
5.2.9	电源容量	141
5.2.10	其他注意事项	141
5.3	乙类和丙类放大器	142
5.4	耦合电路	144
5.4.1	滤波作用	144
5.4.2	匹配电路的作用	147
5.4.3	耦合电路的一般表示	152
5.4.4	耦合电路实例	155
5.4.5	耦合电路设计中的注意事项	178
5.5	丙类功率放大电路的设计举例	193
5.5.1	使用 2SC320 的 150MHz、13.5V、1.5W 丙类放大电路	193
5.5.2	使用 2SC637 的 150MHz、13.5V、7W 丙类放大电路	197
5.5.3	使用 2SC638 的 150MHz、13.5V、12W 丙类放大电路	198
5.5.4	使用 2SC890 的 500MHz、13.5V、1W 丙类放大电路	201
5.5.5	多级放大电路举例	205
5.6	倍频	206
5.6.1	利用非线性电阻 (或电导) 倍频	206
5.6.2	利用变容二极管倍频	207
5.6.3	放大倍频	209
5.6.4	倍频电路实例	215
5.7	其他事项	219
5.7.1	负载不匹配时晶体管的保护	219
5.7.2	收发转换电路	220
5.7.3	调幅电路	221

# 一、高频大功率晶体管的技术展望

自1948年，美国贝尔实验室发明晶体管以来，有关晶体管的设计理论和制造技术都有了惊人的发展，到目前为止，其理论和技术已经确立。本章想以高频大功率晶体管为主，综述一下它们的发展过程，这将有助于对本章后面的内容，包括设计理论和应用电路等知识的掌握。

## 1.1 高频大功率化是怎样发展起来的

众所周知，最初发明的晶体管结构是点接触型的，一经试用，可靠性与互换性都不如电子管及其它器件，频率特性和功率特性也较差。此后，1951年，由肖克莱（Shockley）发明了pn结型晶体管，从而使这些问题得到了大幅度的改善。尔后，由于坦南鲍姆（M. Tanenbaum）开创了用杂质扩散形成结的技术，以及伴随而来的有关技术，例如材料提纯技术，外延晶体生长技术和光刻技术等等的发展，晶体管的特性获得迅速的提高，其应用范围也显著扩大，并正在超过电子管。因此可以说，今天晶体管的进展的基础，是由于用杂质扩散做成pn结技术的开创。

但是，伴随着这些技术的显著发展，也还留下很多问题。其代表性的有：表面钝化问题，如何提高截止频率并获得大功率输出的问题，以及高频特性参数的测量问题等。

本节首先阐述一下对高频大功率晶体管的基本要求，至于为了解决这个问题，以前进行了哪些结构和制造技术上的改进，打算以器件结构的演变为主加以叙述。

### 1.1.1 高频大功率化的基本器件结构

这里考虑的晶体管，只是指利用极普通的少数载流子的运动进行工作的具有发射区、基区和集电区的器件，而没有考虑利用

场效应和体效应现象的器件。

首先要求在大功率晶体管内部能承受大的耗散功率，并尽可能高效率地把大的功率输送到外部电路。其次，为了达到高频化，在尽量获得大功率输出的条件下提高截止频率性能。

因为晶体管集电极电压比电子管相应的低，所以为了获得大功率，主要的是在大电流条件下工作。

因此，要求高频大功率晶体管内部产生的热量能迅速地传到外界，而且在高频和大电流区域内，电流放大系数和功率增益都要足够高。

### (1) 热阻

如能提高集电极到外界的传热性能，即能够减小热阻  $R_{th1}$ ，就不会造成集电极结温的上升，从而能使晶体管承受较大的耗散功率。

现在常用的功率晶体管的散热途径，其等效电路如图 1-1 所示。

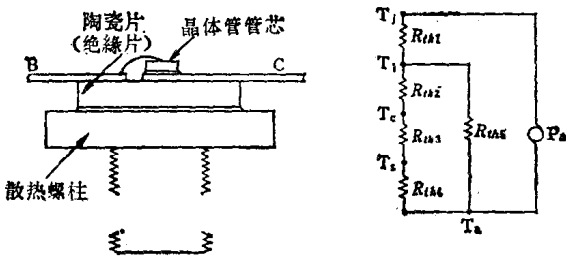


图1-1 大功率晶体管的结构和热阻的等效电路

高频用管壳的一个典型例子

$R_{th1}$ —由结到集电极引线的热阻；  $R_{th2}$ —由集电极引线到陶瓷片的热阻；

$R_{th3}$ —由陶瓷片到散热螺柱的热阻；  $R_{th4}$ —由散热螺柱到外界的热阻；

$R_{th5}$ —由集电极引线到外界的热阻。

在这些热阻中，从结到集电极引线之间的热阻  $R_{th1}$  最重要，也是设计的关键。

合金结型晶体管，由于可使集电极合金材料固定在晶体管管壳上，所以可把热阻做得非常小。另一方面，在扩散结型晶体管

中，因为作为高频用时一般采用浅的结深，所以，即使也使管壳与集电极紧连，但从结到电极间的距离远比结深长。此外也考虑过利用晶体外延生长法把大部分集电极区域做成低电阻率层，以改善传热性能，但是，在高频器件中，纵然这样作，高电阻率层的厚度仍比结深大得多。

因为一般高频大功率晶体管的结构大部分是扩散结，所以如何减小从结到管壳的热阻  $R_{th}$  就成了重要课题。

近年来，为了增大碰撞雪崩渡越时间二极管的功率，提出了所谓倒装结构<sup>(1)</sup>的方案，这种结构是在离结最近的地方安装散热片。

因为扩散结晶体管的发射极和基极一般在表面上，所以不能简单利用二极管那样的结构，要解决这个问题不得不等待新工艺的出现。

## (2) 晶体管的结构和电流放大系数与电流的关系

合金结晶体管现在仍被广泛使用，但它的频率上限最高是10MHz，因为这里探讨的频率范围是从甚高频（VHF）到微波，所以它不在考虑之列。另外，扩散结型晶体管出现以后，能承受高结温的硅晶体管占了优势，考虑到现在的高频大功率器件几乎都是硅外延平面结构，所以主要探讨这种结构。

这些器件的用途，从车载无线电设备开始，已遍及机载通信设备、雷达等等广泛的领域。工作电压大致有28V和12V两种，与电子管式比较，电压均较低，主要是电流工作的器件，因此，电流放大系数的电流特性的线性对饱和功率、失真和频率特性有显著的影响。

以硅平面型晶体管为例，由于在极低注入电平的情况下，邻近发射极-基极结耗尽层表面部分的复合率起支配性的作用，它给电流放大系数带来显著的影响。所以，为了提高在大电流密度时的线性而把发射极周长尽量延长的大功率器件，在小电流范围内的电流放大系数一般并不太高。但是，在最新的表面处理技术发

展的今天，这个问题也得到了—定程度的解决。

随着电流密度的增大，上述的表面复合的影响减小，如图1-2所示，放大系数开始增加，而后又下降。关于这一现象的详细情况将在第二章说明，而其原因之一是从发射极注入的少数载流子的浓度，同本来存在于基区的多数载流子的浓度相比已变得不能忽略。另外，由于流入基区的复合电流在基区扩展电阻上引起压降，它使加在发射极-基极结上的电压在靠近基极的地方较高，随着距基极变远而变低，所以电流就偏于最邻近基极的发射极-基极结处流动。在形成局部电流密度高的区域，放大系数的下降较快，而在距基极最远的发射极-基极结区域就变得不起什么作用了，结果电流集中沿发射极边缘流动。这种现象也称为边缘效应<sup>(3),(4)</sup>。

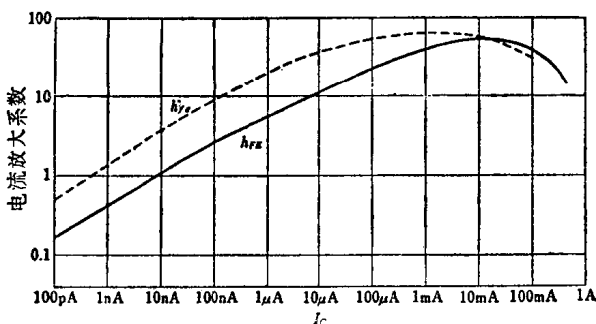


图1-2 共发射极电流放大系数的电流特性

上述主要是直流工作，而高频电流放大系数与电流的关系如图1-3所示，与直流工作略有差别。在小电流范围，放大系数受发射极的时间常数支配，这个常数就是给发射极-基极结充电所需的时间，它与发射极电流成反比。随着电流增大，这种影响就减小，放大系数先是增大，而后再下降。关于下降原因的分析有各种各样，具有代表性的可举出柯克(Kirk)<sup>(5)</sup>和范德齐耳(Van der Ziel)<sup>(6)</sup>二人，但不论那种分析都认为起因于载流子漂移速度相对于电场的非线性。当电流密度超过某一容许值时，放大系数就急剧下降，开始下降的电流数值对于同一器件来说也比直流

时的小。

根据上述，为得到电流放大系数线性良好的器件，要使发射极有效地工作，应尽可能减窄发射极，也就是要使发射极面积  $A_E$  和其周长  $L_E$  的比  $A_E/L_E$  尽可能缩小。另外为了减小成为边缘效应主要原因的基极电阻，必须设法使发射极和基极尽可能靠近。另一方面，为得

到高频大功率增益，就像后面所讲的那样，由于必须减小输出电容，故  $L_E$  与集电极结面积  $A_C$  之比值  $L_E/A_C$  最好大些。

弗莱彻 (Fletcher)<sup>(5)</sup> 最早提出了如图 1-4 (a) 所示称之为高频大功率晶体管的基本结构，此后为得到更高的输出功率，又出现了把几个这样的单元晶体管并联连接式的结构，如图 1-4 (b) 所示，通称之为梳状结构。随着高频大功率化的发展，梳的间隔越加狭窄，并联的数目也增多，为避免这一点，在同一基区内先制作许多发射区，再把若干个发射极连通，并制作公共电极，于是这种所谓覆盖式晶体管就出现了，如图 1-4 (c) 所示。这种结构由于距基极近的发射区部分效能好，而远的部分发射极-基极结的电位下降，发射区的数目必须做得相当多。为弥补这一缺点，在发射区的近处，设计成杂质浓度极高的特别基区，于是，出现了格状基区覆盖的结构，如图 1-4 (d) 所示<sup>(7)</sup>。

此后，将图 1-4 (d) 的发射区和基区进行交换，又制出了一种所谓网状发射极结构晶体管。它的基极电极孔开在网眼的中心，发射极电极孔开在其交点上，从那里可引出电极。这种结构如图

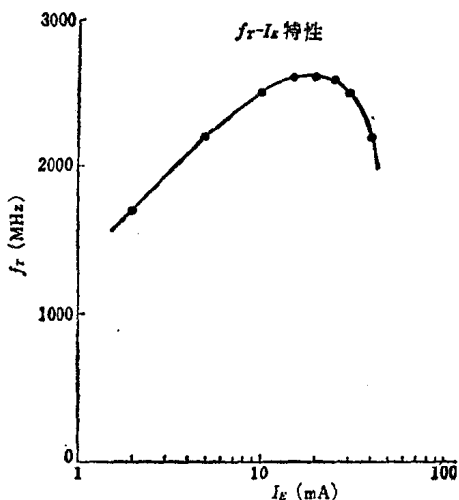


图1-3 截止频率 $f_T$ (根据 $f_T = 200\text{MHz}$ 时的 $h_{fe}$ 计算)与电流的关系( $f_T - I_C$ 特性)



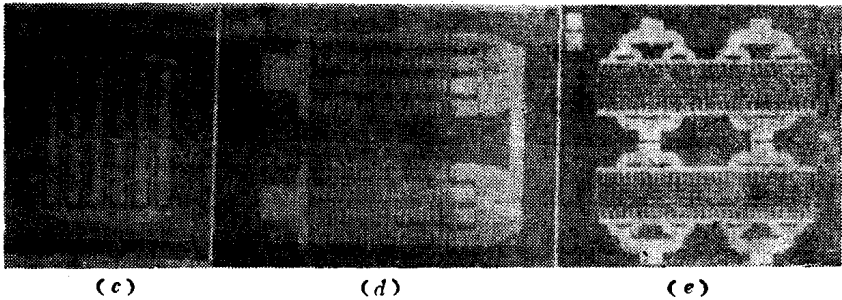
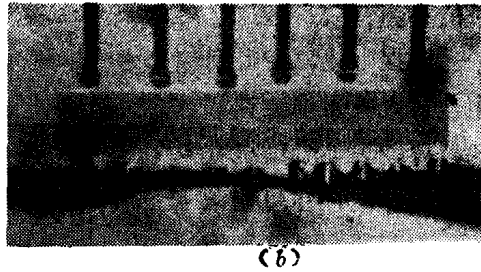
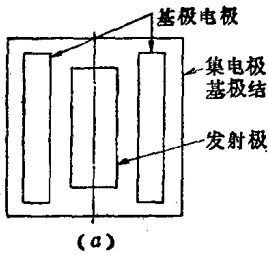


图1-4 高频大功率晶体管的各种结构

(a) 高频大功率晶体管的基本结构；(b) 梳状结构；(c) 覆盖式结构；  
(d) 格状基区覆盖式结构；(e) 网状发射极结构。

1-4(e)所示<sup>(8)</sup>。

这几种结构都是为了改善在大电流密度时的工作特性而精心设计的。哪种结构好呢？应考虑其电性能以及制造技术的难易程度等，经过全面分析来确定。

### (3) 晶体管的结构和高频特性

作为表示高频性能优劣的指标，从来都是使用高频优质这一性能指数。这个指数可用下式表示：

$$F = \alpha_0 f_T / 8\pi r'_b C_c \quad (1.1)$$

式中  $\alpha_0$ ——共基极电流放大系数  $\alpha$  的直流值；

$f_T$ ——共发射极电流放大系数  $h_{fe}$  的绝对值为 1 时的频率，称为特征频率或者截止频率；

$r'_b C_c$ ——共基极时用  $2\pi f$  除以反馈电压比所得的量，它经常用来作为表示晶体管本征反馈比的大小。

因此，要提高高频优质，就归结到提高  $f_T$ ，减小  $r'_b C_c$ 。要