

# GAT 栅屏蔽效应二维解析模型<sup>\*</sup>

庄宝煌 黄美纯 朱梓忠 李开航

(厦门大学物理学系, 361005)

19990430 收稿, 19990914 收改稿

**摘要:** 建立了 GAT 器件集电结耗尽层电位分布和电场分布的二维解析模型, 定量研究了 GAT 的栅屏蔽效应的解析表达式, 并借助计算机对栅屏蔽效应给以证实。该模型可供优化设计双极型高频、高压、低饱和压降功率器件参考。

**关键词:** 功率器件; 联栅晶体管; 屏蔽效应; 解析模型

中图分类号: TN323.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3819(2000)01-0053-07

## A Two-dimensional Analytical Model to GAT's Gate Shielding Effect

Zhuang Bao Huang Huang Meichun Zhu Zizhong Li Kaihang

(Dept. of Phys., Xiamen Univ., 361005, CHN)

**Abstract:** A two-dimensional analytical model of the electric potential and field distribution in GAT's collector depletion space in the cut-off state is derived for the first time. The formula for GAT's gate shielding effect is derived and the gate shielding effect is proved by aid of computer quantitatively. This model will provide assistance to the optimal design of bipolar power transistor with high frequency and high breakdown voltage.

**Key words:** power device; GAT; gate shielding effect; analytical model

EEACC: 2560

### 1 引言

众所周知, 常规双极型功率器件和高压开关器件由于基区宽度受高反压的限制, 设计上做不薄, 因此其工作频率或基区宽度和工作电压设计上互不兼容。1980年, Kondo H 和同事 Yukimoto Y 发明了一种被称为 GAT (Gate associated transistor) 的晶体管<sup>[1]</sup>。与常规器件相

\* 本文得到国家自然科学基金 (No. 69896260-06) 和国家高技术研究发展计划 (863-715-010) 的资助

比, GAT 除了芯片面积较大这一缺点外, 由于它具有所谓的“栅屏蔽效应”, 因此实现了高频率与高电压的兼容。1983年, 浙江大学教授陈启秀受 H Kondo 的设计思想的启发, 设计并研制了 GAT 器件<sup>\*</sup>。1996年, 北京工业大学与北京腾达公司采用新型网格结构等技术批量生产了 GAT 器件<sup>[2]</sup>, 若采用双层硅外延片技术<sup>[3]</sup>, GAT 将更有应用前景。必须指出, GAT 具有很强的抗核辐照性能, 文献[4]所研究的所谓新型抗核辐照高压功率晶体管 SEBISIT 实际上就是 GAT。虽然 GAT 算不了新器件, 然而由于至今为止关于 GAT 的理论都采用一维分析或者定性分析, 这对于定量优化设计 GAT 或深刻理解 GAT 的物理实质很不够。为了 GAT 理论的科学性和完整性以及为了今后提供定量优化设计 GAT 的方案, 本文将通过二维解析方法尝试分析 GAT 的栅屏蔽效应。

## 2 GAT 的基本结构单元和工作机理定性分析

GAT 是把 JFET (Junction field effect transistor) 的栅置入普通 BJT (Bipolar junction transistor) 的基区, 形成: 横向, 发射极被基极包围的覆盖式结构; 纵向, 基区的一部分伸展到集电区中, 构成与基极并联的栅墙作用, 如图 1 所示。

GAT 的实质为: 向集电区突入的深阱浓基区栅相当于 JFET 的“栅”(Gate), 靠近淡基区的集电区相当于 JFET 的“源”(Source), 远离淡基区的外延层集电区相当于 JFET 的“漏”(Drain), 栅之间的集电区作为沟道。因此, 在 GAT 中, 集电结的耗尽层既垂直于淡基区-集电区界面扩展, 又在集电区的栅阱之间横向扩展。当耗尽层伸展的范围超过半栅间距时, 沟道夹断。当沟道夹断后, 集电区耗尽层靠近淡基区结处的电场随外加电压  $V_{cb}$  的进一步升高出现缓慢增大的现象(比起常规 BJT 在相同的工艺条件以及外加电压  $V_{cb}$  下的电场增大缓慢)——这就是所谓的“栅屏蔽效应”。因此, 在相同的结构、工艺设计以及外加电压条件下, GAT 集电结  $c-b$  界面的电场大大小于常规 BJT 器件的  $c-b$  界面电场, 从而使 GAT 集电结淡基区侧的空间电荷大大少于常规 BJT 器件的基区空间电荷, GAT 的基区穿透效应大大被抑制, 解决了常规 BJT 器件薄基区与高反压的矛盾。

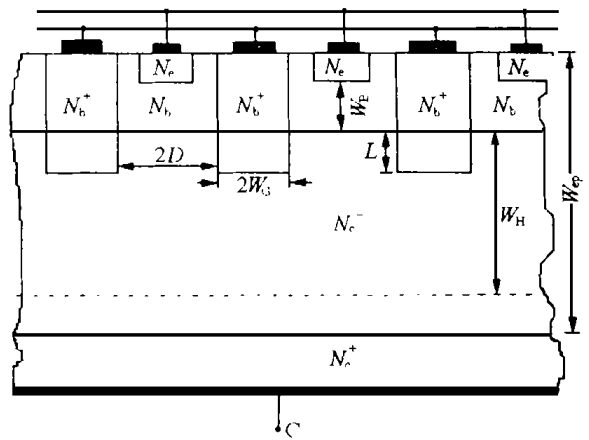


图 1 条型结构 GAT 集电结夹断后的耗尽层  
Fig. 1 The depletion space of the GAT with strip structure after the pinchoff of the channel occurs

### 3 条型结构 GAT 集电区耗尽层电位、电场分布二维分析

#### 3.1 泛定问题的解

如图 1 所示, 当集电结反偏电压  $V_{cb} = V_p = qN_c^- D^2 / 2\epsilon$  时, 集电区耗尽层夹断<sup>[1]</sup>, 以后随着反偏电压  $V_{cb}$  继续加大, 耗尽层边界几乎平行向衬底推进。这里,  $L$  为浓基区  $P^+$  阱突入集电区的深度,  $2D$  为两相邻单元阱之间的间距,  $2W_G$  为阱宽,  $W_H$  为集电区耗尽层厚度,  $W_\phi$  为外延层厚度。  $N_e, N_b^-, N_b^+, N_c^-, N_c^+$  分别为发射区、淡基区、浓基区、外延层以及衬底的掺杂浓度。它们满足  $N_e \gg N_b^-, N_b^+ \gg N_b^- \gg N_c^-, N_c^+ \gg N_c^-$ 。其数量级一般为,  $N_c^- \sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_b^- \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_b^+ \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_e \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_c^+ \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。这里,  $N_e, N_c^-, N_c^+$  为 n 型施主掺杂, 而  $N_b^-, N_b^+$  为 p 型受主掺杂。

假定: 1) 反偏电压  $V_{cb}$  充分大, 夹断后的集电结耗尽层下边界二维断面近似为直线; 2) 由于  $N_b^+ \gg N_b^- \gg N_c^-$ , 采用单边突变结近似, 假定  $V_{cb}$  几乎全部降落在集电结之集电区侧; 3) 整个集电结 c-b 界面二维断面可以认为是等位线; 4) 二维阱形状近似为矩形; 5) 外延层均匀掺杂, 即  $N_c^-$  为常数; 6) 在发射极电流密度较小的条件下忽略可动电荷。

因此, GAT 单元集电区耗尽层形状近似为“凸”字形, 选取平面直角坐标如图 2 所示。该“凸”字形区域的电位分布  $\phi(x, y)$  满足式 (1)

$$\frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial y^2} = - \frac{qN_c^-}{\epsilon} \quad (1)$$

其中,  $(x, y)$  “凸”字形区域,  $\epsilon$  为其中的介电常数。

显然, 没有边界条件时式 (1) 的解是无穷多的。只有较为合理齐全的边界条件与式 (1) 才构成“定解问题”<sup>[5]</sup>。这里, 特别关心矩形区域  $ABC_1D_1$  的电位、电场分布。选取基极为参考电位“0”, 因此按上述假定有

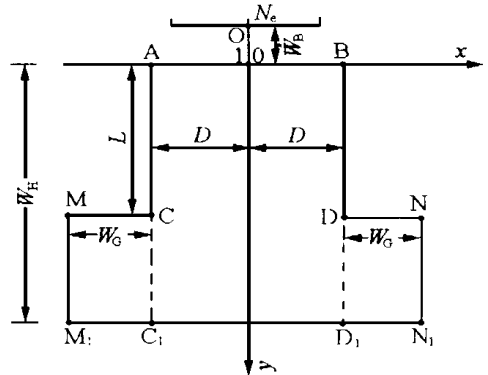


图 2 二维“凸”字形 GAT 单元集电结耗尽层及坐标选择

Fig. 2 The two-dimensional convex shape of a unit of GAT's collector depletion layer and the choice of coordinate axis

图 2 AB 边界:  $\phi(x, 0) = 0$

$$(-D \leq x \leq D) \quad (2)$$

AC 边界:  $\phi(-D, y) = 0$

$$(0 \leq y \leq L) \quad (3)$$

BD 边界:  $\phi(D, y) = 0$

$$(0 \leq y \leq L) \quad (4)$$

$C_1D_1$  边界:  $\phi(x, W_H) = V_{cb}(-D \leq x \leq D)$

$$(5)$$

其中  $W_H$  为 GAT 集电区耗尽层厚度。令

$$W_c = \frac{2\epsilon V_{cb}}{qN_c^-} \quad (6)$$

显然边界条件式 (2) ~ (5) 关于  $x$  坐标对称, 虽然未知图 2 中边界  $CC_1$  或  $DD_1$  的情况, 但它们也是对称的, 所以有  $\phi(-x, y) = \phi(x, y)$  ( $-D \leq x \leq D, 0 \leq y \leq W_H$ )。

由于缺少  $CC_1$  或  $DD_1$  边界条件, 故式 (1) ~ (5) 尚不能唯一确定矩形区域  $ABC_1D_1$  的电位分布  $\phi(x, y)$ 。假定  $\phi(-D, y) = \phi(D, y) = f(y)$  ( $0 \leq y \leq W_H$ )

这样,式(1)~(5)及(7)就构成 $\phi_{x,y}$ 在矩形区域 $ABC_1D_1$ 的泛定问题。可以证明

$$\phi_{x,y} = V_{cb} \left[ -\frac{y^2}{W_c^2} + \frac{y}{W_c} \left( 1 + \frac{W_H^2}{W_c^2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{\text{ch} n\pi x / W_H}{\text{ch} n\pi D / W_H} \sin \frac{n\pi y}{W_H} \right] \quad (-D \leq x \leq D, 0 \leq y \leq W_H) \quad (8)$$

其中无量纲系数 $a_n$ 为 $f(y)$ 的泛函,由式(9)确定。

$$a_m = \frac{W_H}{L} \frac{2f(y)}{W_H V_{cb}} \sin \frac{m\pi y}{W_H} dy - \int_0^{W_H} \frac{2}{W_H} \left[ -\frac{y^2}{W_c^2} + \frac{y}{W_H} \left( 1 + \frac{W_H^2}{W_c^2} \right) \right] \sin \frac{m\pi y}{W_H} dy \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

$$\text{区域 } ABC_1D_1 \text{ 的电场为, } E(x,y) = -\nabla \phi_{x,y} \quad (-D \leq x \leq D, 0 \leq y \leq W_H) \quad (10)$$

令

$$E_{oc} = \frac{2V_{cb}}{W_c} = \frac{2qN_c^- V_{cb}}{\epsilon_s} \quad (11)$$

这里, $W_c$ 和 $E_{oc}$ 分别为相同工艺及反偏下GAT所对应的BJT的集电区耗尽层厚度和一维集电结最大电场的绝对值。设 $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的单位矢量,则由式(8)、(10)、(11)得

$$E(x,y) = -\hat{x} E_{oc} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \alpha_n \cdot \frac{n\pi}{2} \cdot \frac{W_c}{W_H} \cdot \frac{\text{sh} \frac{n\pi x}{W_H}}{\text{ch} \frac{n\pi D}{W_H}} \cdot \sin \frac{n\pi y}{W_H} \right) - \hat{y} E_{oc} \left( \frac{W_c^2 + W_H^2}{2W_c W_H} - \frac{y}{W_c} \right) - \hat{y} E_{oc} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \alpha_n \cdot \frac{n\pi}{2} \cdot \frac{W_c}{W_H} \cdot \frac{\text{ch} \frac{n\pi x}{W_H}}{\text{ch} \frac{n\pi D}{W_H}} \cdot \cos \frac{n\pi y}{W_H} \right) \quad (-D \leq x \leq D, 0 \leq y \leq W_H) \quad (12)$$

$$\text{必须指出,待定常数 } W_H \text{ 由式(9)和边界条件式(13)给出, } E(0, W_H) = 0 \quad (13)$$

### 3.2 近似定解问题以及GAT的电场屏蔽因子 $\mu$

图2  $CC_1$ 或 $DD_1$ 边界,必须满足电位连续性条件 $\phi(D,L) = 0$ ,  $\phi(D, W_H) = V_{cb}$ 以及空间电荷区边界条件 $\left. \frac{\partial \phi(D,y)}{\partial y} \right|_{y=W_H} = 0$ ,满足这些条件的图2中 $CC_1$ 或 $DD_1$ 边界条件为:

$$f(y) = \phi(D,y) = V_{cb} \left( \frac{y-L}{W_H-L} \right)^2 + 2V_{cb} \frac{y-L}{W_H-L}, \quad (L \leq y \leq W_H) \quad (14)$$

由式(9)和(14)经定积分运算后整理得

$$a_m = \frac{-4}{(m\pi)^3} \left\{ \frac{W_H^2}{W_c^2} + (-1)^m \left[ \frac{W_H^2}{(W_H-L)^2} - \frac{W_H^2}{W_c^2} \right] \right\} + \frac{4}{(m\pi)^3} \cdot \frac{W_H^2}{(W_H-L)^2} \cos \frac{m\pi L}{W_H} - \frac{4}{(m\pi)^2} \cdot \frac{W_H}{W_H-L} \sin \frac{m\pi L}{W_H} \quad (\text{将 } n \text{ 代替 } m \text{ 即可得 } a_n, m \text{ 或 } n = 1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

$$\text{另一方面,由式(12)和(13)有} \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n n\pi (-1)^n}{\text{ch} \frac{n\pi D}{W_H}} = \frac{W_H^2 - W_c^2}{W_c^2} \quad (16)$$

这样,式(15)和(16)就完全确定了常量 $W_H$ 和 $a_n$ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),采用式(14)近似,就给出了图2中GAT结构单元沟道区耗尽层的二维电位和电场分布。必须指出,当 $L = 0$ 时,由于

$W_H = W_c$ , 故由式(15)知,  $a_n = 0$ , 此时 GAT 的二维解自然退化为常规 BJT 器件的一维解!

定义: GAT 的电场屏蔽因子  $\mu_s$  为图 2 中 O 点处的电场  $(-E_{OH} \cdot \hat{y})$  与 GAT 所对应的常规 BJT 器件在相同的工艺、外加电压条件下的一维集电结最大电场  $(-E_{oc} \cdot \hat{y})$  的比值。

因此, 由式(12)并利用式(16)容易得

$$-E_{OH} \cdot \hat{y} = -\hat{y} E_{oc} \frac{W_c}{W_H} \cdot \left[ 1 + \sum_{k=1} \frac{\alpha_{2k} \cdot 2k\pi}{\text{ch} \frac{2k\pi D}{W_H}} \right] \text{ 即 } E_{OH} = E_{oc} \frac{W_c}{W_H} \cdot \left[ 1 + \sum_{k=1} \frac{\alpha_{2k} \cdot 2k\pi}{\text{ch} \frac{2k\pi D}{W_H}} \right] \quad (17)$$

因此按定义有 
$$\mu_s = \frac{E_{OH}}{E_{oc}} = \frac{W_c}{W_H} \cdot \left[ 1 + \sum_{k=1} \frac{\alpha_{2k} \cdot 2k\pi}{\text{ch} \frac{2k\pi D}{W_H}} \right] \quad (18)$$

## 4 GAT 栅屏蔽效应的计算机辅助分析

### 4.1 $E(\pm D, 0)$ 及曲线 “ $-E(x, 0) \cdot \hat{y} \sim x$ ” 和曲线 “ $-E(0, y) \cdot \hat{y} \sim y$ ”

由式(12)有 
$$E(\pm D, 0) = -\hat{y} E_{oc} \left[ \frac{W_c^2 + W_H^2}{2W_c W_H} + \sum_{n=1} (a_n \cdot \frac{n\pi}{2} \cdot \frac{W_c}{W_H}) \right] \quad (19)$$

又按式(10)有 
$$E(\pm D, 0) = -\frac{\partial \Phi(x, 0)}{\partial x} \Big|_{x=\pm D} \cdot \hat{x} - \frac{\partial \Phi(\pm D, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} \cdot \hat{y} \quad (20)$$

比较式(19)和(20)得  $\frac{\partial \Phi(x, 0)}{\partial x} \Big|_{x=\pm D} = 0$ , 又按式(3)和(4)有  $\Phi(\pm D, y) = 0$  ( $0 < y < L$ )

从而有  $\frac{\partial \Phi(\pm D, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0$ , 故有  $E(\pm D, 0) = 0$  ( $L > 0$ ) (21)

这说明由于栅墙的屏蔽作用, 图 2 中 A、B 两点的电场为零, 这个结论与下面的计算机辅助分析相一致。又由式(12)有式(22)和(23) (由于图 2 中  $y$  坐标方向与电场方向相反, 故加负号)

$$-E(x, 0) \cdot \hat{y} = E_{oc} \frac{W_c}{2W_H} \left( \frac{W_c^2 + W_H^2}{W_c^2} + \sum_{n=1} \frac{a_n \cdot n\pi \cdot \text{ch} \frac{n\pi x}{W_H}}{\text{ch} \frac{n\pi D}{W_H}} \right) \quad (-D < x < D) \quad (22)$$

$$-E(0, y) \cdot \hat{y} = E_{oc} \left[ \frac{W_c^2 + W_H^2}{2W_c W_H} - \frac{y}{W_c} + \sum_{n=1} (\alpha_n \cdot \frac{n\pi}{2} \cdot \frac{W_c}{W_H} \cdot \cos \frac{n\pi y}{W_H} \cdot 1/\text{ch} \frac{n\pi D}{W_H}) \right] \quad (0 < y < W_H) \quad (23)$$

通过计算机辅助分析给出了式(18)的函数曲线[图 3 之(A)], 式(22)的函数曲线[图 3 之(B)]和式(23)的函数曲线[图 3 之(C)和(D)], 如图 3 所示。图 3 形象地说明了 GAT 的“栅屏蔽效应”, 即由于栅墙的作用, GAT 夹断后集电结沟道区之电场  $E(0, 0) = -E(0, 0) \cdot \hat{y}$  比相同工艺及外偏电压下的常规 BJT 器件的电场  $E_{oc}$  小得多! 图 3 中  $E(x, 0) = -E(x, 0) \cdot \hat{y}$  ( $-D < x < D$ ), 而  $E(0, y) = E(0, y) \cdot \hat{y}$  ( $0 < y < W_H$ )。

因此, 实现相同的工作电压时, GAT 的基区宽度可以设计得更薄一些, 从而达到高频与高压的兼容。必须指出, 对器件性能设计最有参考价值的是屏蔽因子  $\mu_s$  (无量纲常数), 这由式(18)给出。图 3 说明设计 GAT 的基区宽度时只要考虑峰值电场  $E(0, 0)$  或  $\mu_s$  就够了。

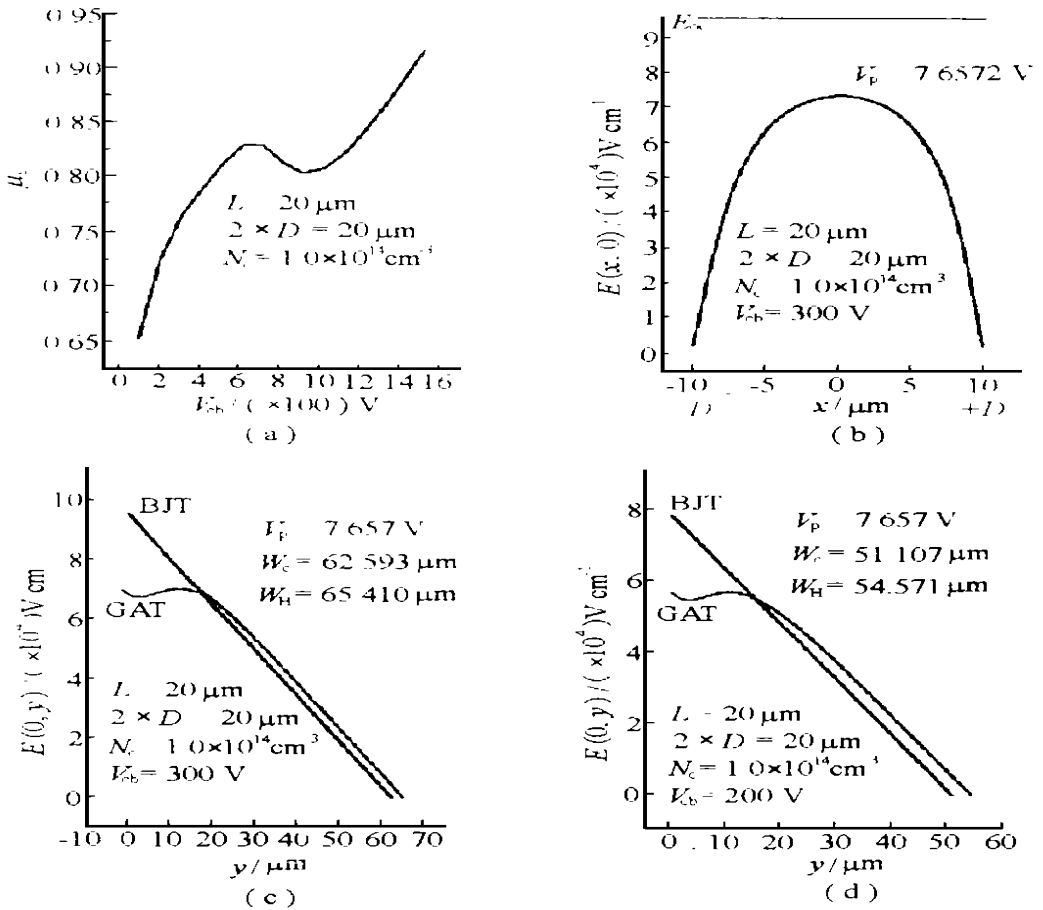


图 3 GAT 栅屏蔽效应二维解析模型的 CAD 结果

Fig.3 The CAD results of the two-dimensional analytical model to GAT's gate shielding effect

### 4.2 $\mu_s$ 的简化以供工程上设计 GAT 参考

若在式 (18) 中作近似  $W_H \approx W_c + L$  并取一级近似, 则有

$$\mu_s \approx \frac{W_c}{W_c + L} - \left\{ \frac{2 \sin^2 \frac{\pi L}{W_c + L}}{\pi^2 \text{ch} \frac{2\pi D}{W_c + L}} + \frac{2 \sin \frac{2\pi L}{W_c + L}}{\pi \cdot \text{ch} \frac{2\pi D}{W_c + L}} \right\} \quad (24)$$

计算机辅助分析表明式(24)近似是合理的, 尤其对于浅栅阱高压器件。还可以通过二维近似解计算 GAT 的雪崩击穿电压  $BV_{d0}$ 、 $BV_{e0}$  以及基区穿通电压  $V_{PI}$  等等 GAT 的物理参数并研究供 GAT 优化设计的条件, 这些应用将在另外的文章中详细讨论。

### 参 考 文 献

- 2 邹德恕, 亢宝位, 杜金玉等. 一种优化设计的高频高压电力半导体器件. 半导体技术, 1996; 21(6): 29 ~ 32
- 3 谢夏云. 双层硅外延片在大功率器件中的应用. 半导体技术, 1998; 23(4): 40 ~ 43
- 4 蔡树军, 王长河, 黄忠升等. SEBISIT —— 一种新型抗核辐射高压功率晶体管的研究. 半导体技术, 1987; 22(6): 7 ~ 15
- 5 胡嗣柱, 倪光炯. 数学物理方法. 上海: 复旦大学出版社, 1989



庄宝煌 (Zhuang Baohuang) 男, 1963 年生, 厦门大学博士生, 1989 年浙江大学硕士毕业, 主要从事半导体物理与器件物理研究。

黄美纯 (Huang Meichun) 男, 1937 年生, 厦门大学教授, 博士生导师, 主要从事半导体物理与器件物理以及凝聚态物理领域的研究。

朱梓忠 (Zhu Zizhong) 男, 1963 年生, 博士后, 厦门大学副教授, 主要从事半导体物理与器件物理以及凝聚态物理领域的研究。

## 研究简讯

# X 波段 T/R 组件

齐国华 罗运生 任海玉 叶明

(南京电子器件研究所, 210016)

19991022 收稿

## X Band T/R Module

Qi Guohua Luo Yunsheng Ren Haiyu Ye Ming

(Nanjing Electronic Devices Institute, 210016, CHN)

南京电子器件研究所承担的“九五”预研课题“X 波段 T/R 组件”项目于 1999 年 3 月取得重大进展。成功地研制出尺寸为  $13 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , 重量为 21 g, 发射功率大于 5 W, 接收噪声系数小于 2.6 dB 的微波全功能 X 波段 T/R 组件, 具有尺寸小、重量轻、频率宽、发射功率大、接收噪声低、移相精度高等特点, 适用于 X 波段固态相控阵雷达系统中。

该组件包括收发双工器、限幅器、低噪声放大器、脉冲功率放大器、5 位数字移相器、介质基板、壳体和偏置等。利用 Touchstone 和 Libra 软件对组件收发通道的微波电路性能进行仿真设计, 降低收发干扰, 消除收发环路自激; 利用 HFSS 软件对壳体结构及微波性能的影响分析。制作部分的工作主要是解决多芯片、单片的微波微组装工艺技术问题, 如大功率单片电路的安全焊接, 组装温度控制等。测试部分的工作主要解决发射支路在脉冲工作状态下相移精度的测试等。

该组件在 9.2 GHz 到 10.3 GHz 范围内, 发射支路的输出脉冲功率大于 5 W, 发射增益大于 26 dB, 接受支路噪声系数不大于 2.6 dB, 接受增益约 30 dB, 两端 VSWR 小于 2, 32 态绝对相位误差小于 10 度。