

330 GHz 砷化镓单片集成分谐波混频器

刘戈^{1,2}, 张波^{1,2}, 张立森², 王俊龙², 邢东², 樊勇¹

(1. 电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731;

2. 中国电子科技集团第十三研究所 集成电路国家重点实验室, 河北 石家庄 050000)

摘要: 在太赫兹频段, 二极管尺寸与波长相比已不能忽略, 二极管的封装会引入很大的寄生参量, 因此需建立二极管三维模型提取寄生参数。同时人工装配难度增大, 会增加电路不确定性。采用 12 μm 砷化镓单片集成悬置微带线结构, 基于电子科技大学与中国电子科技集团第十三研究所自主联合设计的肖特基二极管研制 330 GHz 砷化镓单片集成分谐波混频器。实测结果显示在 5 mW 本振功率的驱动下, 在 328 GHz 可得到最小变频损耗 10.4 dB, 在 320 ~ 340 GHz 范围内, 单边带变频损耗小于 14.7 dB。

关键词: 太赫兹; 单片集成分谐波混频器; 肖特基二极管; 砷化镓; 变频损耗

中图分类号: TN773.2 **文献标识码:** A

330 GHz GaAs monolithic integrated sub-harmonic mixer

LIU Ge^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, ZHANG Li-Sen², WANG Jun-Long², XING Dong², FAN Yong¹

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, China;

2. National Key Laboratory of Application Specific Integrated Circuits,
Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In the terahertz band, diode size can no longer be ignored compared with the wavelength, significant parasitic parameters will be introduced due to diode package. So it is very necessary to establish three-dimensional model to extract parasitic parameters. Meanwhile manual assembly becomes more difficult, circuit uncertainty will increase. Based on planar Schottky barrier diode designed by China Electronics Technology Group Corporation-13 (CETC-13) and University of Electronic Science and Technology of China (UESTC) fabricated on 12 μm thick suspended GaAs substrate a 330 GHz GaAs monolithic integrated sub-harmonic mixer is presented. Test results show that the minimum conversion loss is 10.4 dB at 328 GHz. SSB conversion loss is less than 14.7 dB from 320 ~ 340 GHz when the LO power is 5 mW.

Key words: terahertz, monolithic integrated sub-harmonic mixer, Schottky diode, GaAs, conversion loss

PACS: 07.57.Kp

引言

太赫兹波是指位于微波与光波之间的电磁波谱, 国内一般定义为 0.1 ~ 10 THz^[1]。由于其在光谱中的特殊位置, 使其具有很多特性, 如穿透性, 太赫兹波对于某些介质材料具有强穿透性, 可用于新型

机场安检^[2]; 对人体某些组织成像对比率高, 能量低, 不会对人体组织造成电离辐射, 在医疗检测中有广阔的应用前景^[3]; 由于氧分子和水分子在特定频段会形成太赫兹波吸收峰, 可将太赫兹波用于气象监测^[4]; 存在多个大气窗口, 在太赫兹高速通信方面潜力巨大^[5]。

收稿日期: 2016-09-19, 修回日期: 2016-12-13

Received date: 2016-09-19, revised date: 2016-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(61301051), 中央高校基本业务费(ZYGX2015J017), 国家国际合作专项(2014DFA111110)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61301051), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(ZYGX2015J017), International Cooperation Program of China(2014DFA111110)

作者简介(Biography): 刘戈(1988-), 女, 辽宁海城人, 博士研究生。主要研究领域为毫米波、太赫兹器件。E-mail: liuge041314@163.com

太赫兹雷达及通信系统中,最重要的任务是实现频率的搬移,即将太赫兹频段信号下变频至兆赫兹或者吉赫兹进行信号处理. 太赫兹接收机一般采用超外差形式,混频器则是超外差式接收机中的核心器件^[6],而分谐波混频器的本振频率仅为基波混频器的一半,大大降低了对于太赫兹源的要求,因而在太赫兹频段得到广泛应用^[7]. 分谐波混频器的核心器件为二极管,目前主要有肖特基势垒二极管^[8], SIS (Superconductor Insulator Superconductor) 混频管^[9], 以及 HEB (Hot Electron Bolometer) 混频管^[10], 而 SIS 混频管及 HEB 混频管均要求低温工作,不适于常温工作. 在频率低端一般采用 flip chip 倒扣形式装配二极管,但随着频率的升高,尺寸将进一步减小,人工装配变得更加困难,同时引入的误差也将带来更大的不确定性,影响着分谐波混频器的性能,而采用砷化镓单片集成形式将二极管直接生成在基片上,将大大提高分谐波混频器的可靠性及一致性^[11],用 12 μm 砷化镓基片取代 50 μm 石英基片也将进一步减小电路尺寸,最终提高混频器的性能. 如此,本论文特采用 12 μm 砷化镓单片集成悬置微带线结构,并使用电子科技大学与中电 13 所自主联合设计的肖特基二极管进行 330 GHz 砷化镓单片集成分谐波混频器设计研究.

1 二极管建模

图 1 所示为肖特基二极管横截面图. 肖特基二极管由阳极金属桥、二氧化硅氧化层、低掺杂的外延层、高掺杂的缓冲层、砷化镓衬底以及金属阴极组成^[12],阳极金属结和低掺杂的外延层接触形成肖特基势垒,金属阴极和高掺杂的缓冲层形成欧姆接触,二氧化硅形成氧化层保护外延层和阳极结被空气氧化. 由于肖特基二极管是基于多数载流子机制,和基于少数载流子的 PN 结二极管相比不需要电荷积累,因此二极管的响应时间更快,适用于高频电

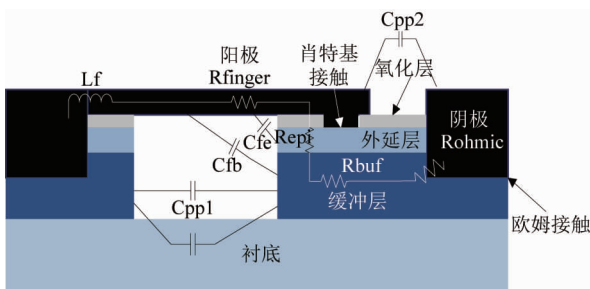


图 1 二极管的三维截面图

Fig. 1 Three-dimensional cross-sectional view of the diode

路^[13].

由图 1 可以看出,串联电阻 R_s 由四部分组成,如公式 1 所示^[14],外延层电阻 R_{epi} ,缓冲层电阻 R_{buf} ,欧姆接触电阻 R_{ohmic} ,空气桥电阻 R_{finger} ,其中外延层电阻 R_{epi} 可由公式 2 计算得出,外延层电阻是串联电阻中最主要的部分,因为掺杂浓度低,电阻率大,因此要尽可能的薄,同时又要大于耗尽层厚度,最后确定外延层参数为掺杂浓度 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,厚度 0.1 μm .

$$R_s = R_{\text{epi}} + R_{\text{ohmic}} + R_{\text{buf}} + R_{\text{finger}} \quad (1)$$

$$R_{\text{epi}}(V_j) = \frac{t_{\text{epi}} - W(V_j)}{eAN_{D,\text{epi}}\mu_{\text{epi}}} \quad (2)$$

其中 μ_{epi} 为外延层电子迁移率, t_{epi} 为外延层厚度, $W(V_j)$ 为耗尽层宽度, A 为阳极面积, e 为元电荷 (1.6×10^{19}), $N_{D,\text{epi}}$ 为外延层掺杂浓度.

缓冲层电阻可由式 (3)^[14] 计算得出,要降低缓冲层电阻就要提高缓冲层的掺杂浓度,但是高掺杂浓度不易实现,同时缓冲层厚度要至少大于一个趋肤深度,最后确定缓冲层参数为掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 2 μm .

$$R_{\text{buf}} = \frac{1}{2eN_{D,\text{buf}}\mu_{\text{buf}}D} \quad (3)$$

$N_{D,\text{buf}}$ 为缓冲层掺杂浓度, μ_{epi} 为缓冲层电子迁移率,为阳极直径.

典型肖特基结的非线性结电荷函数 $Q_j(V_j)$ 与非线性结电容函数 $C_j(V_j)$ 可由式 (4)^[15] 得出:

$$Q_j(V_j) = -2C_{j0}v_{bi} \sqrt{1 - \frac{V_j}{v_{bi}}} \quad (4)$$

$$C_j(V_j) = \frac{dQ_j(V_j)}{dV_j} = C_{j0} \sqrt{\frac{v_{bi}}{v_{bi} - V_j}}$$

其中 v_{bi} 为肖特基结内建电势, C_{j0} 为零偏置结电容.

而针对平面二极管的三维结构,结电容可以被等效为一个平行板电容器. 对于阳极接触面积为 A 的肖特基结,其结电容由式 (5) 得出:

$$C_j(V_j) = \frac{\epsilon_s A}{W(V_j)} + \frac{3\epsilon_s A}{D} \quad (5)$$

其中 ϵ_s 为 n 型半导体的介电系数,式中第二项为对于直径为 D 的实际肖特基接触边缘效应的修正. $W(V_j)$ 为耗尽层宽度,由式 (6) 得出:

$$W(V_j) = \sqrt{\frac{2(V_{bi} - V_j)\epsilon_s}{eN_{d,\text{epi}}}} \quad (6)$$

C_{j0} 是二极管非线性模型中的重要参数,决定了二极管的最佳工作频段,根据式 (7) 可得:

$$C_{j0} = \frac{\epsilon_s A}{W(0)} + \frac{3\epsilon_s A}{D} = A \left(\sqrt{\frac{eN_{d, \text{epi}} \epsilon_s}{2V_{bi}}} + \frac{3\epsilon_s}{D} \right) \quad (7)$$

最终确定零偏置结电容 2 fF, 而串联电阻 7 Ω, 根据式(8)可得二极管截止频率为 11.3 THz, 远远大于二极管的工作频率.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_{j0}} \quad (8)$$

寄生电容 C_{total} 由三部分组成如式(9)所示:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{pp}} + C_{\text{fe}} + C_{\text{fb}} \quad (9)$$

C_{pp1} 、 C_{pp2} 分别代表了通过空气和衬底的阳极和阴极之间的电耦合. C_{fb} 为空气桥和缓冲层间的电耦合, C_{fe} 为空气桥和外延层之间的电耦合. 其他重要参数值如表 1 所示, 反向饱和电流如式(10)所示

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{B0}}{k_B T}\right) \quad (10)$$

I_s 为 80 fA, 其中, A^* 为有效理查森常数, T 为温度, ϕ_{B0} 为肖特基势垒高度, k_B 为玻尔兹曼常数 (1.37×10^{-23}).

目前肖特基二极管主要有两种装配方式: 一种是混合集成形式, 即 flip chip 倒扣型^[16], 如图 2 所示, 将二极管用导电胶倒扣粘贴在悬置微带线上, 再用烘箱进行烘烤; 一种是 GaAs 单片集成形式, 如图 3 所示, 即二极管与电路一起生成在砷化镓基片上, 省去人工装配二极管的过程, 减小了装配误差与引入的不确定性. 图 4 为二极管在高倍数放大显微镜下的高清实物图.

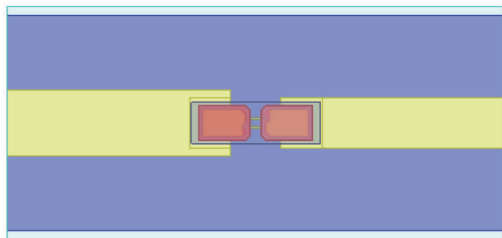


图 2 倒扣型二极管的俯视图
Fig. 2 Top view of the flip chip diode

2 整体仿真

仿真采用场路结合的方式, 将分谐波混频器的无源线性部分与二极管非线性模型结合. 先将混频器的无源结构分成以下几个部分: 射频波导到悬置微带的过渡, 肖特基势垒二极管封装结构, 本振低通滤波器和本振中频双工器, 然后分别在仿真软件 HFSS 中进行优化仿真, 再将得到的 SNP 文件导入

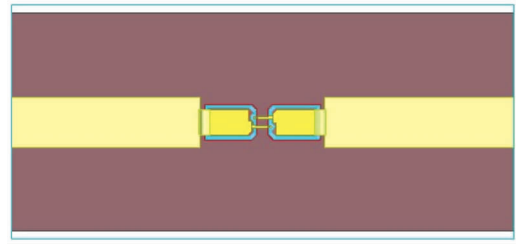


图 3 单片集成二极管的俯视图
Fig. 3 Top view of the monolithic integrated diode

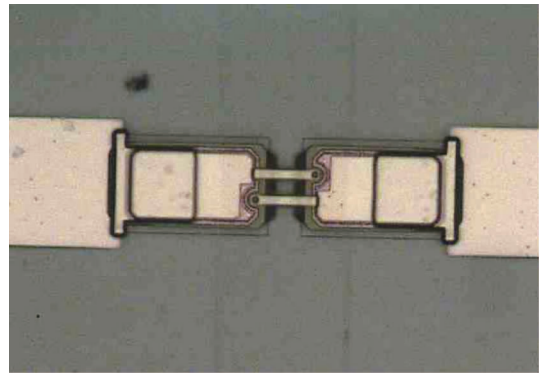


图 4 二极管实物图
Fig. 4 Photograph of the diode

进仿真软件 ADS 中进行整体优化, 将最小变频损耗作为最终的优化目标. 由于仿真软件 HFSS 不支持封闭的波端口, 需要对二极管模型进行处理, 打穿外延层将阳极金属结延伸至缓冲层, 如图 5 所示, 在仿真软件 ADS 中添加管芯模型进行联合仿真, 二极管的主要参数如表 1 所示.

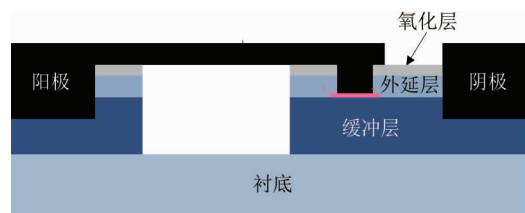


图 5 二极管的端口设置
Fig. 5 Diode port setting

表 1 二极管的主要参数
Table 1 parameters of the diode

参数	外延层 掺杂浓度	缓冲层 掺杂浓度	C_{j0}	R_s	I_s
数值	$2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	2 fF	7 Ω	80 fA

330 GHz 分谐波混频器采用的结构如图 6 所示, 包括射频波导到悬置微带的过渡, 肖特基势垒二极管, 本振低通滤波器, 本振中频双工器及匹配电

路. 射频波导尺寸为 $0.711\text{ mm} \times 0.356\text{ mm}$, 本振波导尺寸为 $1.295\text{ mm} \times 0.648\text{ mm}$, 射频端涂导电胶接地. 仿真结果如图 7 所示.

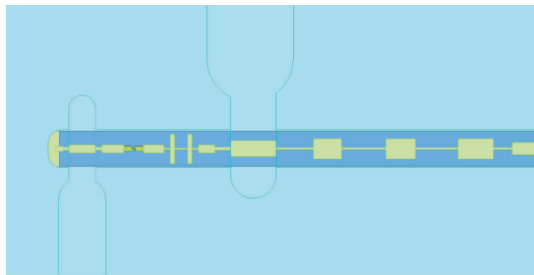


图 6 330 GHz 分谐波混频器整体图
Fig. 6 Topology of the 330 GHz sub-harmonic mixer

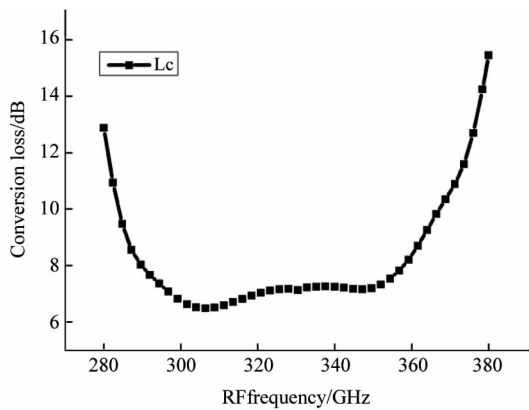


图 7 330 GHz 分谐波混频器变频损耗仿真图
Fig. 7 Simulation result of the 330 GHz sub-harmonic mixer

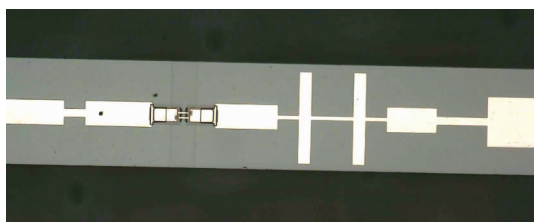


图 8 内部细节图
Fig. 8 Internal details of the 330 GHz sub-harmonic mixer

3 实验测试

混频器电路生成在 $12\text{ }\mu\text{m}$ 厚的砷化镓基片上, 电路细节如图 8 所示. 由于砷化镓基片属于软基片, 制作过长会发生卷翘不易于装配, 在中频低通滤波器后连接一段 $50\text{ }\Omega$ 的 Rogers 5880 软基片, 其中基片厚度 0.127 mm , 金属厚度 0.017 mm , 通过 K 接头

连接至频谱仪进行测试. 腔体实物图如图 9 所示, 采用铜腔体外覆几微米的金层防止氧化. 测试框图如图 10 所示, 信号源提供 9.166 GHz 信号, 经由 6 倍频放大器后接 3 倍频器, 为分谐波混频器提供本振信号, 信号源提供 Ku 波段信号经由 $3 \times 3 \times 3$ 倍频放大后为分谐波混频器提供射频信号, 产生的中频信号经由 K 接头输出至频谱仪, 测试平台如图 11 所示. 当本振信号为 165 GHz , 最佳驱动功率为 5 mW 时, 在 $320\text{ ~ }340\text{ GHz}$ 范围内, 单边带变频损耗小于 14.7 dB , 在 328 GHz 有最小值 10.4 dB , 具体测试曲线如图 12 所示. 变频损耗实测与仿真有差距是由于管芯参数是理论计算得到的, 只是一定程度上的近似值, 要经过多次加工测试重新提取管芯参数才能更接近实际值, 目前还只是第一版电路, 后续工作还在进行中. 国内太赫兹频段腔体、基片加工精度方面, 人工装配方面也存在一定差异. 图中变频损耗起伏较大, 是由于混频器输入驻波的原因, 造成测试用的倍频链射频源来回反射, 从而引起较大的波动, 使用衰减器后, 会大大改善.

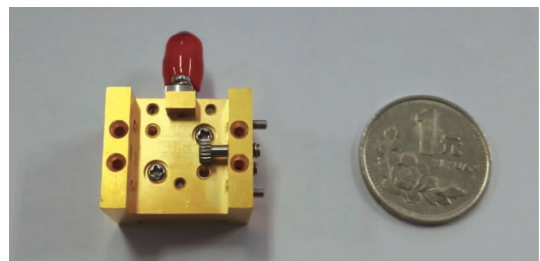


图 9 330 GHz 单片集成分谐波混频器实物图
Fig. 9 Photography of 330 GHz GaAs monolithic integrated sub-harmonic mixer

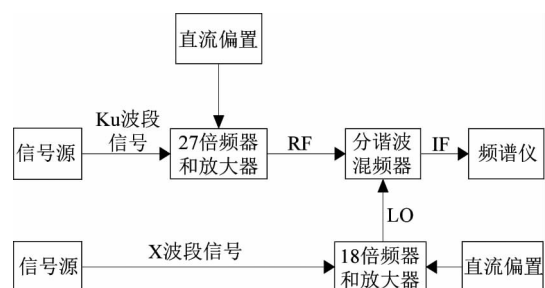


图 10 测试框图
Fig. 10 Block diagram of the test platform

4 结论

采用电子科技大学和中国电子科技集团第十三研究所自主联合设计的肖特基二极管设计了

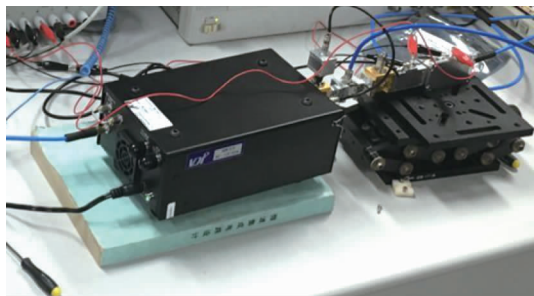


图 11 测试平台
Fig. 11 The test platform

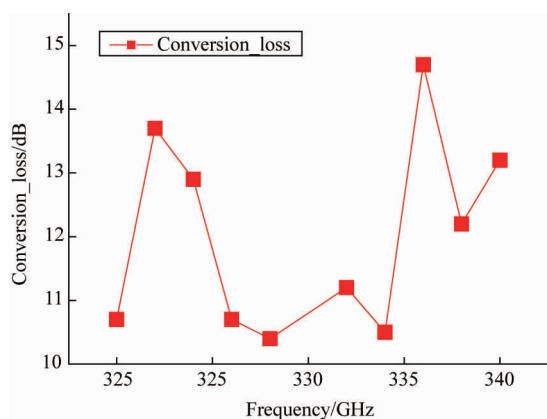


图 12 330 GHz 砷化镓单片集成混频器测试结果
Fig. 12 Test results of the 330 GHz GaAs monolithic integrated sub-harmonic mixer

330 GHz 砷化镓单片集成分谐波混频器, 首先建立二极管的三维模型, 分析了一些重要的影响因素, 详细阐述了整个电路的设计过程, 加工实物并得到了最小单边带 10.4 dB 的变频损耗. 国内的太赫兹频段分谐波混频器大部分采用混合集成即 flip chip 形式, 当频率进一步升高, 尺寸随之减小, 人工装配将变得更加困难. 而单片集成电路可大大降低人工装配误差, 减小电路不确定性, 是今后太赫兹电路的发展趋势, 本文的结果具有一定的意义. 本文中仿真和测试还具有有一些差距, 今后的研究方向将集中于实测与仿真结果拟合分析, 进一步提取二极管管芯参数, 使实测与仿真更加一致, 并向太赫兹更高频段发展.

References

[1] LIU Sheng-Gang, ZHONG Ren-Bin. Recent development of terahertz science and technology and its application [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of*

China, (刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展. *电子科技大学学报*), 2009, **38**(5): 481 - 486.

- [2] Appleby R, Wallace H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1THz region [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, **55**(11): 2944 - 2956.
- [3] Peter H Siegel. Terahertz technology in biology and medicine [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, **52**(10), 2438 - 2447.
- [4] Siegel P H, THz Instruments for Space [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, **55**(11): 2957 - 2965.
- [5] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A Review on Terahertz Communications Research [J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, **32**(2): 143 - 171.
- [6] Schlecht E, Siles J V, Choonsup Lee, et al. Schottky diode based 1.2 THz receivers operating at room-temperature and below for planetary atmospheric sounding [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, **4**(6): 661 - 669.
- [7] Schlecht E, Gill J, Dengler R, et al. A unique 520 ~ 590 GHz biased subharmonically-pumped Schottky mixer [J]. *IEEE Microwave Wireless Component Letter*, 2007, **17**(12): 879 - 881.
- [8] Alderman B, Henry M, Sanghera H, et al. Schottky diode technology at rutherford appleton laboratory [C]. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics*, 2011: 4 - 6.
- [9] Shewchun J, Clarke R A, Temple V A, et al. Experimentally observed admittance properties of the semiconductor-Insulator-Semiconductor (SIS) diode [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1972, **19**(9): 1044 - 1050.
- [10] Gerecht E, Musante C F, Zhuang Y, et al. NbN hot electron bolometric mixers, a new technology for low-noise THz receivers [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(12): 2519 - 2527.
- [11] Thomas B, Maestrini A, Matheson D, et al. Design of an 874 GHz biasable sub-harmonic mixer based on MMIC membrane planar schottky diodes [C]. *33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2008: 1 - 2.
- [12] Gelmont B, Woolard D, Hesler J, et al. A Degenerately-Doped GaAs Schottky Diode Model Applicable for Terahertz Frequency Regime Operation [J], *IEEE Transactions on Electron Device*, 1998, **45**(12): 2521 - 2527.
- [13] Henisch H K. Rectifying semiconductor contacts [M]. Oxford: Clarendon, 1957.
- [14] Tang A Y, Stake J. Impact of eddy currents and crowding effects on high-frequency losses in planar Schottky diodes [J], *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(10): 3260 - 3269.
- [15] Penfield P, Rafuse R P. *Varactor applications* [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1962.
- [16] Lau J H. *Flip chip technologies* [M]. USA: McGraw-Hill Professional, 1996.