

文章编号: 2095-4980(2013)02-0314-06

基于耿氏效应的太赫兹器件的研究进展

白 阳, 贾 锐*, 金 智, 刘新宇, 武德起

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 介绍基于耿氏效应的器件在太赫兹领域的研究, 详细地阐述耿氏二极管的原理、工艺流程、关键技术的解决和耿氏二极管频率和功率的提高等。重点介绍耿氏二极管的封装工艺和耿氏二极管腔体的具体结构。系统论述通过制备腔体需要的关键尺寸, 如腔体内部尺寸、波导型号, 从而提取基波与谐波, 并提出其提高频率和功率的途径。

关键词: 耿氏源; 太赫兹; 磷化铟; 耿氏管封装; 耿氏管腔体

中图分类号: TN387; O472^{+.4}

文献标识码: A

Development of terahertz device based on Gunn effect

BAI Yang, JIA Rui, JIN Zhi, LIU Xin-yu, WU De-qi

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Millimeter and submillimeter wave bears some specific characteristics, and plays very important roles in the terahertz field, especially in national defense, security, imaging, communication. This article describes the Gunn devices in the terahertz field. The principles, the process and key technologies of Gunn diode are described in detail, including material growth, Gunn diode package, and Gunn source cavity design. The package of Gunn diode and the specific structure of Gunn device cavity are highlighted. The critical cavity parameters are changed, such as the internal size of the cavity, the waveguide dimensions and models, in order to extract high-order harmonic. The ways to improve the frequency and output power are presented.

Key words: Gunn device; terahertz; InP; Gunn diode package; Gunn diode cavity

耿氏管可以用在毫米波和亚毫米波的频率源中, 其可被应用于机场的安检、物质成像与检测和环境的监控中。耿氏管的工作频率可以达到太赫兹范围, 国际上已有一百多研究组织进行着关于太赫兹相关领域的研究。美国的国家基金会、国家航天局、国防部和国家卫生学会, 日本、澳大利亚、韩国和中国等区域的研究机构进行着太赫兹波相关的研究。太赫兹波, 目前通常指 0.1 THz~10 THz 的电磁波, 也有人认为是 0.3 THz~3 THz。太赫兹波具有很强的穿透性, 可以穿透非金属和非极性材料, 也能穿透烟雾和浮尘。另外还具有其他的特性: a) 能量方面: 约 50% 的宇宙空间光子能量, 大量星际分子的特征谱线在 THz 范围^[1]; b) 安全性方面: THz 光子能量小, 不会引起生物组织的光离化, 适合于生物医学成像^[2]。

太赫兹辐射主要特征^[3]: a) 量子能量和黑体温度很低; b) 许多生物大分子, 如有机分子的振动和旋转频率都在 THz 波段, 所以在 THz 波段表现出很强的吸收和谐振; c) THz 辐射能以很小的衰减穿透物质, 如陶瓷、脂肪、碳板、布料和塑料等, 因此可用其探测低浓度极化气体, 适用于控制污染。THz 辐射可无损穿透墙壁和布料, 使得其能在某些特殊领域发挥作用。本文主要关注的是磷化铟化合物半导体耿氏器件作为太赫兹源方面的研究。

太赫兹技术主要应用在成像技术、物质分析和通信领域。太赫兹成像技术分为主动成像技术和被动成像技术, 主动成像技术是太赫兹源发出一定频段的太赫兹波, 接收反射波或者透射波, 通过电脑成像。可应用在航天材料检查、药品检测和机场安检。被动成像技术是接收空间中太赫兹波或者利用物体本身发出的太赫兹波成像^[4]。物质分析方面主要是利用太赫兹源发射一定的连续波, 由于样品的化学成分和分子结构不同, 对太赫兹波的吸收率

收稿日期: 2012-11-13; 修回日期: 2012-12-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程太赫兹成像关键技术研究资助项目(2A2011YYJ-1123); 国家自然科学基金资助项目(No.11104319; No.51172268; 2009CB939703)

*通信作者: 贾 锐 email: jiarui@ime.ac.cn

不同,而呈现不同的谱线,通过和已存储的太赫兹谱线吸收的数据库相比较^[5],分析物质的成分。该技术已在某些大学实验室和机场等重要场合得到了应用。通信方面,可实现 1.5 km 以上的远距离信息传递,速度可达 10 Gbps,在 2008 年北京奥运会得到应用。

产生太赫兹的方法有多种^[6-9],其中微电子学方法实现相对容易,耿氏二极管是一个相对便宜且稳定的可行器件,是将直流(Direct Current, DC)转换成微波,并不需要添加复杂的电路。驱动电压很低的特点,使其具有广泛的应用范围,并且可应用于各种不同的环境中。耿氏源的频率和功率的提高是目前工作的研究重点,本文主要从 3 个方面介绍如何提高耿氏源性能,即耿氏二极管结构、耿氏二极管的封装和耿氏源腔体的设计。

1 耿氏源结构和模拟设计

1.1 耿氏效应与耿氏二极管

耿氏效应(Gunn effect)是 1963 年由耿氏(J B Gunn)发现的一种效应^[10]。

耿氏效应的现象:在耿氏二极管的两端加电压,当电压到达阈值时,其电流会降低。耿氏效应现象是由如 GaAs, InP 这样的半导体能带结构特殊性造成的,见图 1。图 2 中,在中心[000]处存在最低能谷,称作中心能谷(Γ -valley),大量的电子处于这个能谷中;在[111]方向存在次能谷,称为卫星能谷(Satellite L-valley)。畴在 GaAs 或者 InP 这样的 III-IV 族的半导体样品不同的能谷中,电子具有不同的漂移速度。电子在中心能谷漂移速度与卫星能谷中漂移速度是不同的,卫星能谷的电子有效质量(m^*)比较大,且速度较低。当电压被加载到一定值(此时电压通常称作阈值电压),电子从中心能谷跃迁到卫星能谷,进行导电,由于电子速度不同而引起在一个方向电子积累,在另一方向电子耗尽,生成一个耿氏畴。这个畴在通过从样品的阴极到阳极的过程中长大,在阳极会被吸收。这时一个新的耿氏畴又会生成,然后继续向阳极方向移动,耿氏畴周而复始地生成,这样便会形成振荡^[2]。电子有效质量为: $m^* = \frac{\hbar^2 k^2}{2E}$, 其中 $\hbar$ 为普朗克常数, k 为波矢, E 为电子能量。

1.2 耿氏二极管的结构

耿氏二极管的结构一般分为 3 层,中间为掺杂较低的传输区域,两边是掺杂较高的区域。形成 n+n-n+结构,见图 3。2000 年,美国密歇根大学 Heribert Eisele 教授和美国密歇根大学 George I Haddad 教授^[11]用分子束外延的方法生长和金属化学气相沉积的生长方式得到了这样的结构。

耿氏二极管的结构对耿氏二极管的频率和功率有着强烈的影响,其输出频率由耿氏畴从阴极到阳极的传输时间而定。阴极注入的电子大部分位于 Γ 能谷中,需要获得足够的能量而跃迁到 L 能谷,这过程对于畴的形成产生了延迟,电子在低能谷向高能谷跃迁的时间内,从阳极到阴极经过的距离称作耿氏管“死区”。由于“死区”的存在,畴渡越的长度缩短,即畴渡越的时间缩短了,因此导致输出功率降低。“死区”对输出的高频耿氏管影响很大,减少“死区”长度和适当的渡越区长度,能有效提高耿氏器件的频率和功率。

2003 年,美国纽约州立大学 Ridha Kamoua 教授和 Heribert Eisele 教授^[12]通过理论分析和实验证明,不同的掺杂层类型对提高 InP 耿氏源在 J 波段(225 GHz~350 GHz)或更高频率发射源的性能方面具有相当研究潜质,实验结果表明,在 280 GHz~300 GHz 波段,优化后的渐变掺杂层的耿氏源输出功率是当时常规技术工艺学水平的 2 倍。模拟结果表明,在阴极附近采用平台式掺杂的方法,有希望提高输出功率,如在 240 GHz 可达到 50 mW 左右。

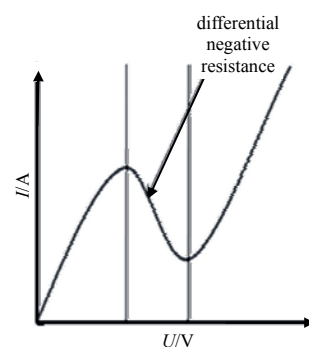


Fig.1 Negative resistance effect
图 1 负阻效应示意图

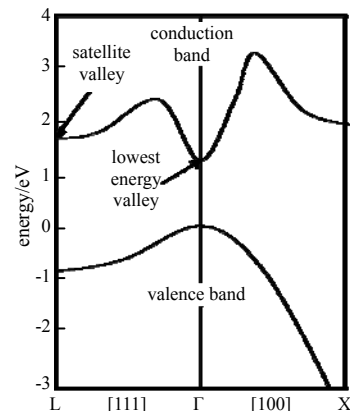


Fig.2 Band of structure of GaAs
图 2 GaAs 能带结构图

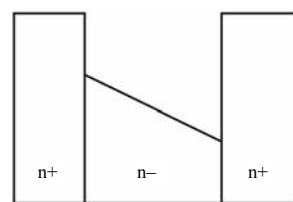


Fig.3 Structure of Gunn diode
图 3 耿氏二极管结构图

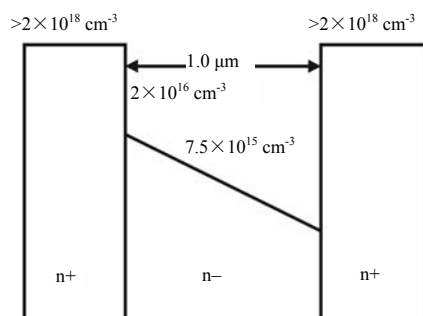


Fig.4 Doped structure
图 4 掺杂结构

2004 年, Heribert Eisele 教授^[13]采用了 V 型的结构如图 4 所示, 这种结构由 3 层组成, 两边是 n^+ 的 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂层, 中间采用渐变掺杂, 浓度从 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 到 $7.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 其输出频率可达到 195 GHz 左右。同一年, Heribert Eisele 和 Ridha Kamoua 等人^[14]提出采用宝石衬底做热沉, 可成倍提高输出功率。另外, Monte Carlo Harmonic Balance(MCHB) 模拟的结果显示, 当渐变层长度从 $1.1 \mu\text{m}$ 缩短到 $0.6 \mu\text{m}$, 耿氏源的基频 f_0 从 240 GHz 增大到 500 GHz, 见表 1。

2006 年, Heribert Eisele 和 Ridha Kamoua 等人^[15]采用 2 种不同的 3 层结构(见图 5), 靠近阴极和阳极, 两侧 n^+ 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 中间 n 型低掺杂层是渐变浓度, 从 $2.9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (见图 5(a)) 和 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (见图 5(b))。实验结果表明, 采用这种渐变掺杂类型, 可有效地提取 260 GHz 的二次谐波。其实验最好输出结果是: 在频率为 275 GHz 时, 功率

为 3.9 mW; 在频率为 297 GHz 时, 功率为 3.7 mW; 在频率为 329 GHz 时, 功率为 1.6 mW; 在频率为 333 GHz 时, 功率为 0.7 mW。为了提高腔体的输出功率, 他们在腔体方面做了改进, 采用 2 个耿氏二极管作为振荡源以提高输出功率, 在频率为 285 GHz 时, 功率可达到 6.1 mW。同一年, Heribert Eisele^[16]采用 InP 耿氏源的 WR-6 的腔体(见图 6), 并利用 WR-2 喇叭天线, 成功地提取三次谐波, 功率达到 400 GHz 以上, 耿氏二极管的结构和图 5 相同, 只是在腔体方面有所优化。其得到的最好实验结果是在频率为 409 GHz 时, 功率为 $45 \mu\text{W}$; 在频率为 412 GHz 时, 功率为 $40 \mu\text{W}$; 以及在频率为 422 GHz 时, 功率为 $40 \mu\text{W}$ 。实验中再次强调调用宝石衬底作为散热衬底来提高功率。

2007 年 Heribert Eisele^[17]增大了中间 n - 的渐变层浓度差, 掺杂浓度的梯度由 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 渐变到 $7.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 并且采用双耿氏管腔体, 使其二次谐波达到 280 GHz, 功率达到 10.5 mW。通过增大中间渐变层的浓度差, 减少渐变层的宽度, 提高了耿氏二极管的频率和功率。A Khalid^[18]等人提出一种平面结构的耿氏二极管, 将阳极和阴极制备在同一面上, 采用砷化镓材料制备, 其频率可以达到 108 GHz, 这种结构的耿氏二极管可使耿氏二极管集成在亚毫米波和太赫兹集成电路上, 具有很大的集成优势, 将促进太赫兹源的发展。在 2011 年, 其制备的耿氏管, 从工艺到测量已呈现出比较成熟的技术。

目前, H Eisele 教授^[19]等人采用磷化铟基制备的耿氏二极管, 用宝石衬底散热, 耿氏源腔体使用 WR-6 波导腔和 2 个背靠背的转接渐变波导 WR-3 到 WR-1.5 和 WR-1.7 到 WR-3, 这样的腔体结构阻挡了基波和二次谐波输出, 并且 WR-6 是与基频匹配最佳的波导内腔, 提取的三次谐波可以达到 480 GHz, 功率达到 $80 \mu\text{W}$ 。随着频率的提高, 耿氏源腔体的加工尺寸就会缩小, 其加工的表面精确度需要提高, 这给腔体的加工带来了巨大挑战。

表 1 MCHB 模拟结果

Table 1 Results of simulation

device structure	$L/\mu\text{m}$	$N_{\text{cathode}}/(10^{16} \text{ cm}^{-3})$	$N_{\text{anode}}/(10^{16} \text{ cm}^{-3})$	U/V	f/GHz	P_{RF}/mW
Graded	1.10	1.0	3.0	5.0	240	43.0
	0.75	0.9	5.7	3.7	360	9.3
	0.65	0.9	11.0	2.9	450	4.8
	0.60	0.9	11.0	2.9	500	2.6
Notch	1.00	2.3	2.3	5.0	240	50.0
	0.70	4.0	4.0	3.5	360	12.0
	0.60	4.0	4.0	3.5	400	11.0
	0.50	6.0	6.0	3.0	450	8.0

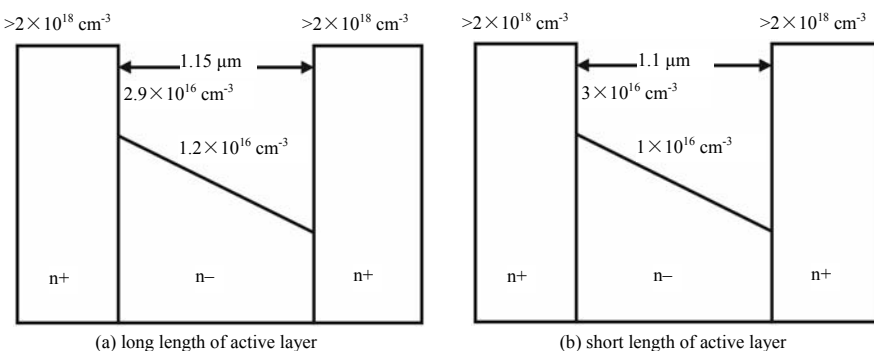


Fig.5 Grading doped structure of InP Gunn diode

图 5 磷化铟掺杂结构

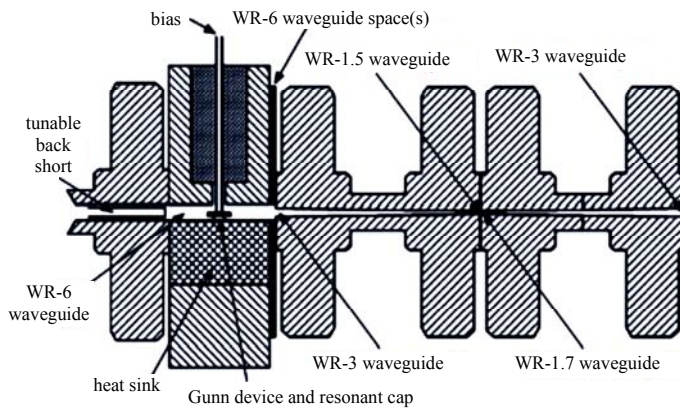


Fig.6 Gunn device operating at 480 GHz

图 6 480 GHz 耿氏源腔体

1.3 耿氏二极管的频率和功率特性分析

耿氏二极管主要关注的是频率和功率。在高频工作下,主要受以下时间所决定:a)在高电场下,中心电子能向卫星能谷的跃迁时间;b)电子跃迁到卫星能谷后,形成耿氏畴从阴极向阳极转移的时间。这2个时间越短,频率越高。这2个时间受到以下几个因素影响:a)渡越区的长度;b)材料及掺杂浓度;c)温度;d)电场的强度。当电场较强时,电子才能从场里获得更高的势能、动能,加速电子跃迁到高能谷。不同的材料,对电子的迁移率影响不同,目前同样是III-V族的化合物半导体,磷化铟要比砷化镓在高频段有较好的表现。温度对频率影响是能使它产生一定漂移,如果散热不良,对管子的寿命有很大影响。渡越区的长度,影响畴在耿氏二极管中渡越的时间和功率。如果渡越区的距离太长,渡越时间加长,频率将会降低;如果渡越区的距离太短,可能不利于耿氏畴的形成与长大,甚至无法产生耿氏畴。

通过分析影响耿氏二极管的因素,从而得出提高耿氏二极管的频率和功率的方法。

首先,在一定限度内减少中间渐变区的长度。通过MCHB模拟结果(见表1),可看出渐变层长度从 $1.1\text{ }\mu\text{m}$ 到 $0.6\text{ }\mu\text{m}$,基频 f_0 从 240 GHz 增大到 500 GHz 。另外,解决好散热问题,也可以提高耿氏二极管的性能,通常采用宝石散热衬底。用宝石做散热衬底且适当地渐变层的宽度,可以提高2倍到3倍的输出功率。

其次,在一定限度内增加阳极到阴极方向的中间渐变层的浓度差,或者是提高接近阳极一侧的渐变层的浓度,通过模拟结果看出(见表1),靠阴极渐变层一侧的掺杂浓度在 $1.0\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 左右比较理想,提高中间靠近阳极一侧的渐变层的浓度,耿氏源的基频 f_0 从 240 GHz 增加到 500 GHz ,有明显提高。

再次,用InP材料比GaAs能得到更高的频率和功率,见图7^[2]。尽管GaAs和InP很相似,但是它们性质有些不同(图中的坐标轴为对数坐标轴)。从图7看出,在相同的输出功率下,它们的最大频率不同。相同的频率下,磷化铟的输出功率要高。从图7中看出磷化铟耿氏二极管的输出基频比砷化镓的二谐波频率要高。另外,在III-IV族化合物半导体中,氮化镓(GaN)也可以用来制备固态太赫兹源。GaN化合物半导体具有独特的能带结构,载流子密度高,抗击穿强和抗辐照的能力较强,也可以用作耿氏管的制备。但是其成本过于昂贵,目前研究较少,不过将来随着成本的下降,相信会有很好的研究前景。

最后,提高耿氏二极管需要相匹配腔体。耿氏二极管腔体的关键尺寸要在加工之前做好精确的计算,加工精度、表面光洁度、波导尺寸、腔体内部尺寸等,都要根据耿氏二极管的频率不同而制备不同。

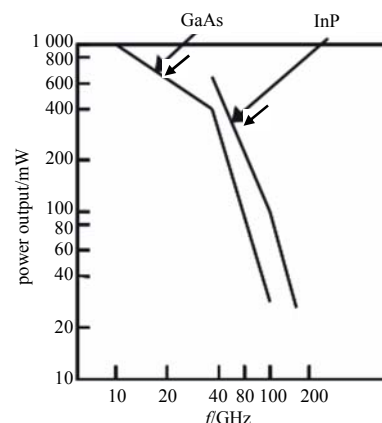


Fig.7 Output of GaAs and InP Gunn diode
图7 GaAs和InP材料的输出功率

2 耿氏二极管的封装与腔体

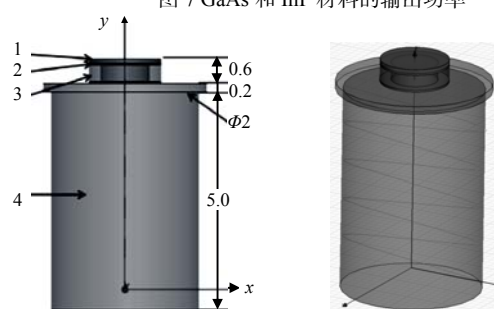
2.1 封装

耿氏管一般有2种封装方式:一种是半封装在腔体中,另一种是封装在一个管芯中。第2种封装方式替换较简便,目前应用较多。耿氏二极管的尺寸很小,一般大约是直径几十微米的圆片,厚度大约为几个微米,而且并不采用现在主流的封装芯片工艺,要封装在一个螺纹铜柱中,这就对封装和关键部件的加工带来了一定的挑战,图8(a)为封装后侧面图,图8(b)为封装后的立体图,“1”为共振帽,“2”为焊接层,“3”为陶瓷环,“4”为铜柱及散热衬底。

主要工艺流程:a)制作出螺纹无氧铜柱,其直径为 2 mm ;b)座台 $\Phi 0.6\text{ mm}$,厚度 0.05 mm ,镀金($1\text{ }000\text{ nm}$),做热衬;c)涂焊料,放耿氏二极管于中间位置,焊接;d)放石英或者陶瓷环,焊接;f)在石英环上点焊金丝一端,拉金丝到另外一侧,在石英环上焊点金丝,压金丝至耿氏二极管上,焊接;g)放镀金铜片,尺寸根据耿氏二极管而定,焊接。

2.2 腔体结构与波导设计

只有对腔体有一定的理解,才能设计与耿氏二极管相匹配的源,才能保证制造出来的耿氏二极管以理想状态工作。耿氏源腔体的结构主要分为可调短路滑块、偏压、热衬、波导和耿氏内腔等部件。



(a) structure sketch (b) three-dimensional figure
Fig.8 Sketch of Gunn diode package(unit:mm)
图8 封装后结构图

耿氏振荡腔体各部件的主要作用是:可调短路滑块主要用于调节输出功率,偏压提供 DC 电源,波导输出特定的波。其中最重要的是波导内腔设计。电磁波在传输过程受限于波导的物理尺寸,其电场需要垂直于导体表面。电磁波通过波导输出,首要的是对波导材料进行选取,铜对于电磁波的反射率比较高,而金的反射效果更好,但是金价格昂贵,并不适用于大规模生产,可以选用镀金的金属块。一般选用铜镀金,如果需要 100 GHz 的腔体时,要求其加工工艺的表面粗糙度小于 $0.02\text{ }\mu\text{m}$,加工尺寸精确度小于 $3\text{ }\mu\text{m}$,而如果需要更高频率的腔体,其加工精确度还需要提高。

3 结论

太赫兹应用在成像、频谱分析和通信方面,涉及面广,技术含量高。很多国家和组织都在进行太赫兹源的研究,其中耿氏源在太赫兹领域的应用研究日益得到重视。本文深入分析了耿氏二极管的原理以及耿氏二极管的频率和功率特性,通过适当减少中间渐变层的宽度,频率可以从 240 GHz($1.1\text{ }\mu\text{m}$)提高到 500 GHz($0.6\text{ }\mu\text{m}$)左右,同时要适当增加渐变层掺杂的浓度差,提高阳极一侧掺杂浓度。通过 2 种材料的对比,选取 InP 半导体材料,能得到更高的频率和输出功率。为使耿氏二极管工作在更高的频率下,满足太赫兹的工作要求,需要选取 InP 材料,改善耿氏二极管结构,提高封装水准,优化腔体结构,并采取有效的散热措施。相信随着太赫兹器件研究和发展,耿氏源必将向越来越高的频率和功率迈进。

参考文献

- [1] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用前景[R]. 2008 中国光电产业高层论坛(COEIC2008),中国—深圳会展中心, 2008.
- [2] Michael Gaskill, David Headland, Jamie Higginbotham, et al. High power Gunn diode[R]. UMIST Fourth Year Project Interim Report, 2004.
- [3] 金智. 太赫兹微电子器件和电路[R]. 2011 科技北京国际论坛—城市安全交流会, 2011.
- [4] 姚建铨,路洋,张宝钢. THz 辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子·激光, 2005,16(4):503–508.
- [5] SUN Jinhai, SHEN Jingling, LIANG Laishun, et al. Experimental investigation on terahertz spectra of amphetamine type stimulants[J]. Chinese Physics Letters, 2005,22(12):3176–3178.
- [6] 许景周,张希成. THz 科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2007.
- [7] Carr G L, Michael C Martin, Wayne R McKinney, et al. High-power terahertz radiation from relativistic electrons[J]. Nature, 2002,420(6912):153–156.
- [8] 谢春燕,袁明辉. THz 波产生技术[J]. 激光杂志, 2010,31(1):7–9.
- [9] Adrian Dobroiu, Masatsugu Yamashita, Yuichi N Ohshima, et al. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator[J]. Applied Optics, 2004,43(10):5637–5646.
- [10] 刘恩科,朱秉生,罗晋生. 半导体物理学[M]. 4 版. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [11] Heribert Eisele, George I Haddad. State of the Art of Two-Terminal Devices as Millimeter-and Submillimeter-Wave Sources[C]// 11th International Symposium on Space Terahertz Technology. Ann Arbor, Michigan:[s.n.], 2000:139–152.
- [12] Ridha Kamoua, Heribert Eisele. Theoretical and Experimental Comparison of Optimized Doping Profiles for High-Performance InP Gunn Devices at 220–500 GHz[C]// 2003 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Philadelphia, USA: [s.n.], 2003,2:907–910.
- [13] Eisele Heribert. High performance InP Gunn devices with 34 mW at 193 GHz[J]. Electronics Letters, 2002,38(16):923–924.
- [14] Eisele Heribert, Ridha Kamoua. Submillimeter-Wave InP Gunn Devices[J]. Microwave Theory and Techniques, 2004,52(10):2371–2378.
- [15] Eisele Heribert, Ridha Kamoua. High-Performance Oscillators and Power Combiners With InP Gunn Devices at 260–330 GHz[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006,16(5):284–286.
- [16] Eisele Heribert. InP Gunn devices for 400 GHz–425 GHz[J]. Electronics Letters, 2006,42(6):358–359.
- [17] Eisele Heribert. Dual Gunn device oscillator with 10 mW at 280 GHz[J]. Electronics Letters, 2007,43(11):636–638.
- [18] Eisele Heribert. 480 GHz oscillator with an InP Gunn device[J]. Electronics Letters, 2010,46(6):422–423.
- [19] Khalid A, Pilgrim N J, Dunn G M, et al. A Planar Gunn Diode Operating Above 100 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 2007,28(10):849–851.