

亚毫米波高次谐波混频检测远红外激光*

周宝庆 张惠尔 顾旭昌 董永初 王彪 陈菊芬

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

用光学和微波技术设计了一种交叉波导结构的肖特基势垒二极管(S. B. D.)亚毫米波高次谐波混频器, 成功地应用于远红外激光检测及其谱线频率的精密测量, 并获得满意的结果。

关键词: 远红外, 高次谐波混频, 激光频率, 测量。

1 引言

鉴于亚毫米波领域缺乏合适可调谐的相干辐射源, 亚毫米波谐波混频接收方式特别受到重视。它采用较低频段的微波、毫米波可调振荡源对谐波混频器施以功率激励, 利用混频管的非线性, 以高次谐波与亚毫米波信号进行直接混频, 从而将接收频段扩展到亚毫米波范围。它的特点是可以灵活地选择合适的谐波次数并在宽带范围调谐频率。所以高次谐波混频技术为当前亚毫米波接收提供了一种实用而有效的外差探测手段, 而且, 亚毫米波高次谐波混频器在频率标准研究领域又是必不可少的基本部件之一, 有其特殊的应用价值。

肖特基势垒混频二极管(S. B. D.)是广泛应用于微波、毫米波波段的低噪声接收器件, 通过改进其制作工艺和结构, 可以提高它的截止频率。肖特基势垒的高频极限约在 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 的波长范围。当二极管检波响应到达亚毫米波段并显示出强烈的非线性特性时, 微波(毫米波)高次谐波与远红外辐射直接混频, 可产生大的信号电平, 即可实现谐波混频。早期的文献报道^[1~4]表明, 肖特基二极管具有快速响应、高次非线性和良好的机械稳定性并能室温应用等特点, 它们在亚毫米波段作为谐波混频器是颇有希望和有竞争力的混频元件。

我们设计制作了兼有光学、微波结构特色的 GaAs S. B. D. 亚毫米波高次谐波混频器, 并建立了以它为核心部件的远红外激光外差探测系统, 分别采用不同频段、不同类型的毫米波振荡源, 选择不同的谐波次数, 先后成功地对 $496\ \mu\text{m}$ 和 $432.6\ \mu\text{m}$ CO₂ 光泵激光、 $337\ \mu\text{m}$ HCN 激光、 $214\ \mu\text{m}$ 和 $184\ \mu\text{m}$ CH₂F₂ 激光等多种类型的远红外激光谱线进行了外差探测, 获得良好的结果。这些工作为建立我国国家频率标准的光频测量研究提供了必要的技术条件和手段。

本文 1991 年 7 月 27 日收到。

* 国家自然科学基金资助项目。

2 亚毫米波高次谐波混频器和远红外激光外差探测系统

我们用频率可调、业已成熟的短毫米波振荡源(速调管或固态源)与远红外激光辐射进行高次谐波混频的方案。运用光学、微波技术手段,设计研制了 GaAs S. B. D. 亚毫米波高次谐波混频器。它由毫米波 V 波段矩形波导和带圆锥形喇叭透镜系统的伸长圆波导相互

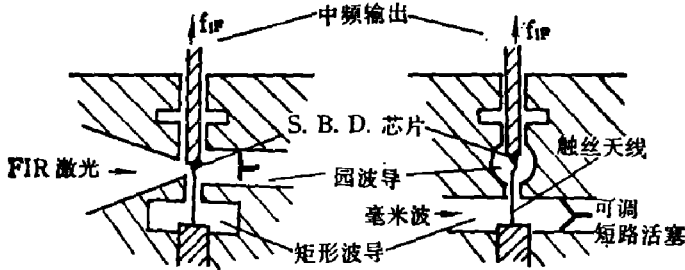


图1 S. B. D. 高次谐波混频器结构原理图
Fig. 1 Schematic diagram of the S. B. D. high-order harmonic mixer configuration

垂直组成交叉波导型装架结构,如图1所示。两种波导管的终端均设有可调短路器调节匹配。S. B. D. 蜂窝状管芯直接封装在两波导管交叉界面耦合孔下的管芯柱上,并置于圆波导内,由触丝天线作引出电极,不用管壳,以减小寄生参量和额外损耗。混频后的中频信号则通过与管芯柱做成一体的同轴低通滤波器予以提取。

合理的结构设计、选取有显著非线性特性和较高截止频率的 S. B. D. 管芯作混频元件是研制高性能谐波混频器的必要前提;同时混频器管芯和触丝天线的封装工艺亦直接影响和决定了混频器质量的优劣。需要通过分析研究触丝的几何形状对于它所引起的寄生阻抗的具体影响,来正确地选择、确定触丝的最佳长度、直径和触丝尖端的大小与形状,并从工艺上解决制作这种触丝的方法。此外,还要采取有效措施来提高可靠性,以确保谐波混频器具有良好的机械和电性能的稳定性的。

以 S. B. D. 亚毫米波高次谐波混频器为核心组成的远红外激光外差探测系统于 1980 年初在国内首次建立^[6],其方框图见图 2。来自毫米波振荡源的功率沿 V 波段波导输入,调节调配器和可调短路活塞对二极管施以最大激励。远红外激光辐射通过透镜喇叭系统聚焦并耦合到圆波导内的二极管芯片上。谐波混频器及波导系统置于三维可调的平台上,使混频器可以在激光焦平面内精确定位。调节混频器取向应使其触丝天线与激光辐射的电场

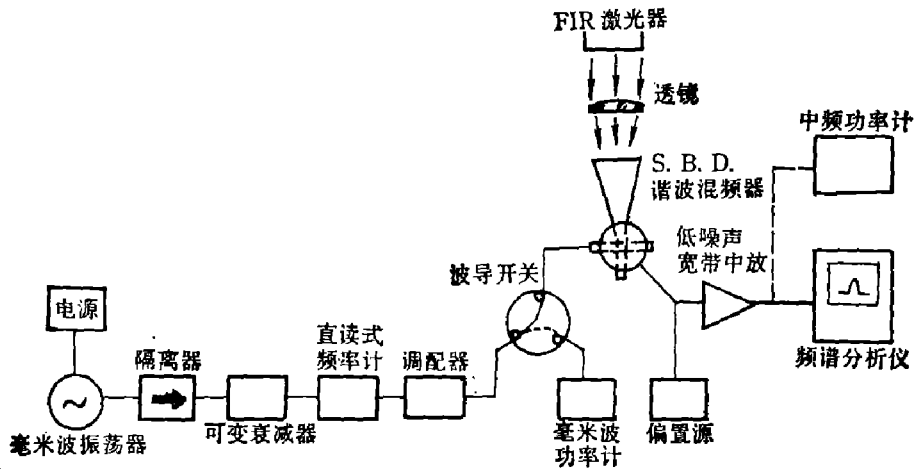


图2 远红外激光外差探测系统框图

Fig. 2 Block diagram of the heterodyne receiving system for FIR laser radiation

方向平行, 获得激光辐射能量的有效耦合^[5]. 通过 SMA 接头对混频器施加适当的正向偏置, 可减小毫米波激励功率并降低噪声. 中频信号由 SMA 接头输出通过低噪声宽带中送入频谱分析仪直接以谱线形式显示, 可直观地将系统调试到最佳工作状态, 并可以此确定获得中频谱线最佳信噪比所需施加的毫米波激励功率和正向偏置电压.

我们曾采用 4 mm 反射速调管对谐波混频器施以毫米波激励, 组成并应用这种系统进行了早期的试验, 先后以 9 次 10 次谐波混频分别接收 $496 \mu\text{m}$ 、 $432.6 \mu\text{m}$ HCOOHCO_2 光泵激光辐射谱线获得成功^[6]为远红外激光检测应用建立了基础.

3 远红外激光频率精测系统和 HCN 激光 $337 \mu\text{m}$ 谱线频率精密测量

光频测量研究在当今计量学科中具有重要地位, 其目的是用铯频率基准的频率值精密测量近红外直至可见光频段的稳定激光的频率值. 由于被测频率比基准频率的量值要高几万倍, 故从微波(毫米波)振荡源、远红外激光器、 CO_2 激光器、近红外激光器到达可见光频段, 必须通过一系列的谐波混频环节, 即建立一条光频测量链. 其中微波(毫米波)与远红外激光的谐波混频位居光频链之首, 所以远红外激光频率的精密测量是整个光频测量的技术基础, 具有明显的科学意义.

采用毫米波锁相稳频源作频率基准源, 通过谐波混频器与远红外激光进行高次谐波混频, 精测变频后的中频即可获得远红外激光频率的精确值.

建立的远红外激光频率精密测量系统框图见图 3, 该系统中毫米波锁相稳频单元原理框图如图 4 所示. 它是以频率长稳为 5×10^{-9} 、经铯频标校准的 5 MHz 高稳定度恒温晶振作为基准, 由 27 次阶跃倍频器输出信号注入锁定 1.25 cm Gunn 振荡器, 再经变容管三倍频器获得频率为 68.5061 GHz, 功率为 4 mW 的全固态化锁相稳频源, 其频率长稳为 5×10^{-9} .

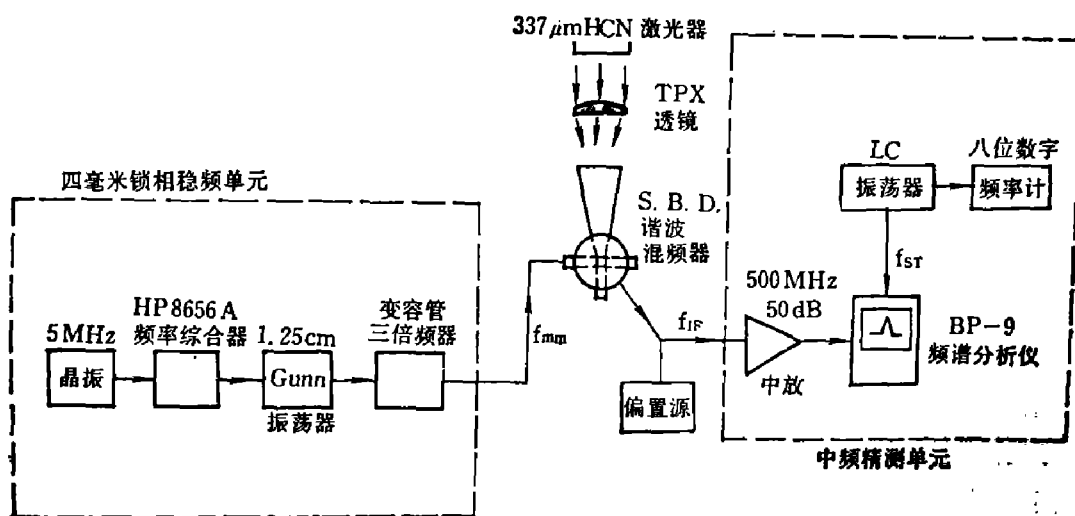


图 3 远红外激光频率精密测量系统框图

Fig. 3 Block diagram of the accurate heterodyne measuring system for FIR laser frequencies

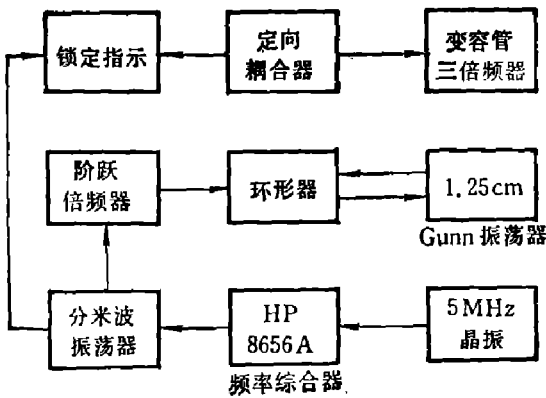


图4 4 mm 锁相稳频源原理图

Fig. 4 Schematic diagram of 4mm-band phase-locked source

中频精测单元用来测量谐波混频器输出频率约在 120~200 MHz 之间、功率约为 -80 dBm 的微波中频信号的频率。此信号经低噪声宽带中放后送入 BP-9 型频谱仪, 利用其高灵敏窄带可扫频的特性在频谱仪的荧光屏上得到信噪比较高的中频谱线。为提高测量精度, 采用谱线重合法, 即以一个频稳度不劣于 10^{-4} 的 LC 振荡器作为外频标送入频谱仪, 并调整外频标的谱线与被测中频谱线准确重合, 此时在八位数字频率计上读得 LC 振荡器的频率就是被测中频的频率。根据谐波混频的关系式即可算出被测激光的频率 $f_{smm} = Nf_{mm} \pm f_{IF}$ 。(式中 f_{mm} 是毫米波基准源频率, f_{IF} 是被测中频频率, N 是谐波次数)。系统的极限测量精度估算为 4×10^{-8} 。用该系统精密测量 HCN 激光 $337 \mu\text{m}$ 谱线频率时, 远红外激光辐射与毫米波基准源 ($f_{mm} = 68.5061 \text{ GHz}$) 进行 13 次谐波混频。对 HCN 激光器工作在气压为 1.10 Torr、电流为 0.70 A 状态时, 测得的中频频率为 181.4 MHz, 故被测激光谱线频率的精确值 $f_{smm} = 13 \times 68506.1 + 181.4 = 890761.3 \text{ MHz}$, 此结果与国外文献给出的数据相当吻合。

图 5 表示通过 13 次谐波混频在频谱仪上显示的中频谱线。系统调试到最佳状态时的信噪比可达 51.6 dB, 带宽约 300 kHz。通过分别测量激光功率 P_{smm} 和中频功率 P_{IF} 可决定混频器的变频损耗 L 。实验测得 P_{IF} 、 L 分别与毫米波基准源功率 P_{mm} 、正向偏压 U_d 的关系见图 6(a) 和 (b)。可见, 最小变频损耗 $L_{\min} \approx 49 \text{ dB}$ ($P_{mm} = 4 \text{ mW}$ 、 $U_d = 0.5 \text{ V}$), 正向偏压 U_d 取 0.5~0.6 V 为最佳。实验所用 S. B. D. 管芯参数如下: $R_s = 10 \Omega$ 、 $C_0 = 4 \text{ fF}$ 、 $U_d = 7 \text{ V}$ 、 $n = 1.17$ 。实验结果表明, 这种 S. B. D. 高次谐波混频器与国外采用准光耦合的谐波混频器在类似实验工作中的性能可相媲美^[7]。

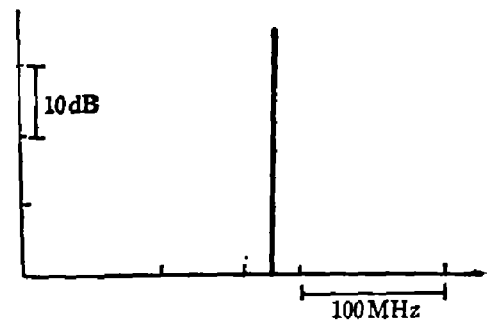
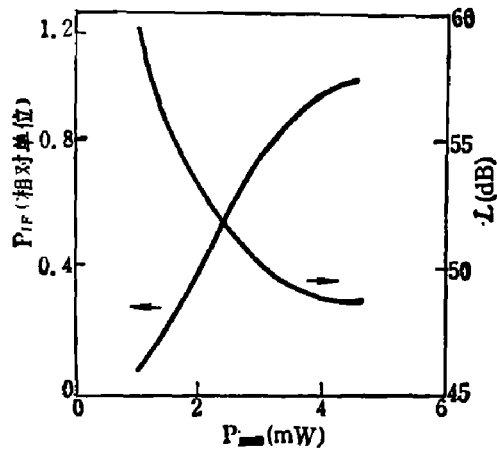
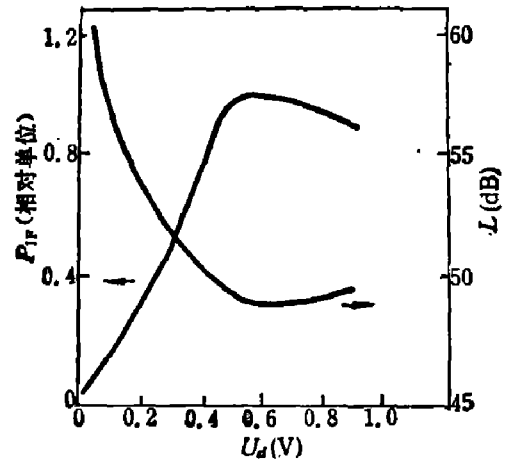


图5 13次谐波混频中频信号频谱
Fig. 5 The IF signal of the 13rd harmonic mixing on a spectrum analyzer

4 高次谐波混频检测光抽运二氟甲烷(CH_2F_2)远红外激光

在光频测量研究的较长时期内, 频率链中从微波(毫米波)频率到达 CO_2 激光频率(约 30 THz)的过渡通常需采用两台远红外激光器(如用放电激励的 HCN 和 H_2O 激光器)。七十年代末出现了光抽运远红外激光器, 它以体积小、噪声低、功率稳定而优于放电激励的激光器, 在光频链中逐渐取代了后者的地位^[8]。近年来新的发展趋势是将光频测量方案中的远红外激光器从原来的两台改为一台, 并均采用二氟甲烷(CH_2F_2)作为光频链中唯一的远红外激光器, 可以消除放电噪声、提高测频精度并降低测频系统的研制成本。因此研究

图 6 (a) P_{IF} 、 L - P_{mm} 关系 ($U_d=0.5$ V)Fig. 6 (a) P_{IF} and L versus P_{mm} 图 6 (b) P_{IF} 、 L - U_d 关系 ($P_{mm}=4$ mW)Fig. 6 (b) P_{IF} and L versus U_d

CH_2F_2 激光检测在当前具有现实意义。

为适应光频链简化方案的需要, 以更高的谐波次数检测更高频率的 CH_2F_2 激光谱线, 近年来我们进一步研制出超宽带、高性能的 GaAs S. B. D. 高次谐波混频器, 同时为了能灵活地选择合适的谐波次数并在较宽范围内调谐频率, 又分别研制了短毫米波宽带机械调谐的 GaAs Gunn 振荡器和电调谐 InP Gunn 振荡器, 作为毫米波功率源, 建立了新的远红外 CH_2F_2 激光检测系统。已对几条 CH_2F_2 激光谱线进行了检测。取得如下新的结果:

4.1 以 15 次谐波混频检测 1.397 THz (波长为 214 μm) CH_2F_2 激光谱线

采用 W 波段宽带机调 GaAs Gunn 振荡器输入毫米波功率, 将频率调谐在 93.16 GHz, 以其 15 次谐波与 1.397 THz CH_2F_2 激光谱线混频, 中频信号经低噪声宽带场效应放大器 (带宽 $\Delta F=500$ MHz, 增益 $G \geq 50$ dB), 送入 TK 2373 频谱仪获得信噪比 >20 dB 的中频谱线, 并能重复显示 (激光功率 $P_{smm}=2$ mW、毫米波功率 $P_{mm}=1$ mW)。

4.2 以 19 次谐波混频检测 1.397 THz (波长 214 μm) CH_2F_2 激光谱线

采用 V 波段宽带电调谐 InP Gunn 振荡器输入毫米波功率, 将频率调谐在 73.54 GHz, 以其 19 次谐波与 1.397 THz CH_2F_2 激光谱线混频, 在同一检测系统 TK 2373 频谱仪上获得可重复的信噪比 ≥ 25 dB 的中频谱线 ($P_{smm}=2$ mW, $P_{mm}=1.5$ mW)。

4.3 以 22 次谐波混频检测 1.626 THz (波长 184 μm) CH_2F_2 激光谱线

仍采用 V 波段宽带电调谐 InP Gunn 振荡器输入毫米波功率, 但将频率调谐在 73.19 GHz, 以其 22 次谐波与 1.626 THz CH_2F_2 激光谱线混频, 在 TK 2373 频谱仪上获得可重复的信噪比 ≥ 20 dB 的中频谱线 ($P_{smm}=2$ mW, $P_{mm}=1.5$ mW)。上述实验所观测到的中频谱线如图 7 所示, 实验用 S. B. D. 管芯参数: $R_s=10$ Ω , $C_0=2$ fF, $U_b=6.7$ V, $n=1.17$ 。

我们设计研制的 S. B. D. 亚毫米波高次谐波混频器和远红外激光检测系统, 已在几种不同类型的远红外激光检测和 HCN 激光 337 μm 谱线频率精密测量中获得良好应用。实验结果表明: 这种谐波混频器和激光检测系统具有足够的灵敏度和信噪比, 结构紧凑, 稳定可靠, 调试方便等优点, 并有很大的潜力, 可望以更高的谐波次数检测更高频率的远红外激光谱线, 为在光频测量研究中实现光频链简化新方案提供必要的条件, 亦为我国远红外接收研究开辟了新的技术途径。

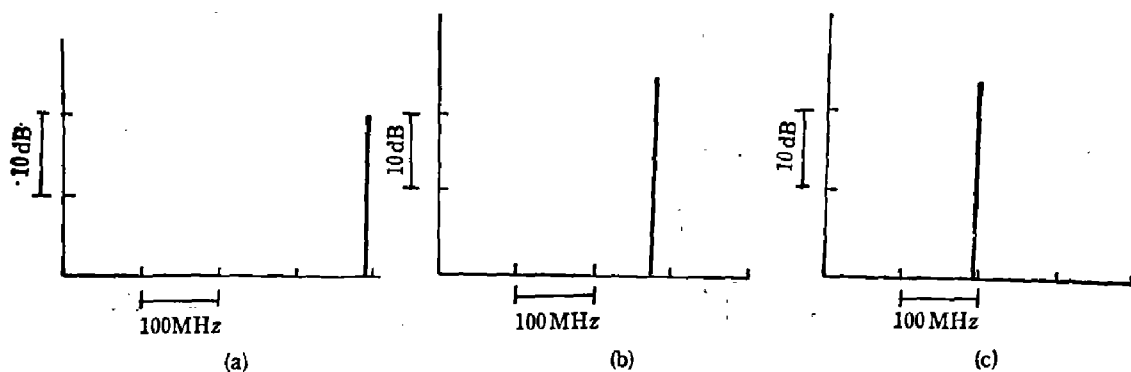


图7 三种亚毫米波高次谐波混频的中频频谱

(a) $n=15$, (b) $n=19$, (c) $n=22$

Fig. 7 The IF signal of the submillimeter high-order harmonic mixing on a spectrum analyzer for different harmonic numbers n

致谢: 本实验得到中山大学电子系和国家计量科学研究院时频处的合作, 在此一并致谢.

参 考 文 献

1. Fetterman H R et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1974; **24**:70
2. Fetterman H R et al. *IEEE Trans.*, 1974; **MTT-22**:1013
3. Mizuno K, Kuwahara R, Ono S. *Appl. Phys. Lett.*, 1975; **26**:605
4. Zuidberg B F J, Dymanus A. *Appl. Phys.*, 1976; **29**:643
5. Matarrese L M, Evenson K M. *Appl. Phys. Lett.*, 1970; **17**:8
6. Baoging Z. et al *9th International Conference on Infr. and Mm-waves (1984, Japan) Conf. Digest* 316
7. Tetsu Suzuki et al. *9th International Conference On Infr. and Mm-waves (1984, Japan) Conf. Digest* 310
8. 阎寒梅, 辛明德, 倪育才. *计量学报*, 1989; **10**:87

THE RECEIVING OF FIR LASER RADIATION BY HIGH-ORDER HARMONIC SUBMILLIMETER MIXING

ZHOU BAOQING, ZHANG HUI'ER, GU XUCHANG, DONG YONGCHU,
WANG BIAO, CHEN JUFEN

A cross-guide high-order harmonic mixer, which uses Schottky barrier diodes (S. B. D.), has been designed by means of optical and microwave techniques. It has been successfully applied in submillimeter wave heterodyne receiving and accurate measurements of FIR laser frequencies.

Key words: far infrared, high-order harmonic mixing, laser frequency measurement.