

毫米波段高灵敏快响应热释电型 激光能量计的研究

孟志葱 王明常 陆载通 张立芬 周复正

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 依据热释电原理,设计并研制了一种新型的高灵敏、快响应毫米波激光能量探测器。分别在不同工作频率下对器件进行能量标定,并给出主要性能参数。其灵敏度达几十 $\text{mV}/\mu\text{J}$,比传统器件高4~5个量级;时间响应小于 $1\ \mu\text{s}$,响应速度提高6~7个数量级。将该能量计应用于拉曼自由电子激光器检测系统,成功地测定了输出毫米波激光脉冲的典型参数。

关键词 热释电型能量计;毫米波测量,自由电子激光

1 引言

毫米波自由电子激光器的诞生与发展,填补了毫米波或亚毫米波段相干辐射源的空白,在科学研究和军事方面具有不可替代的广阔应用前景^[1]。然而,迄今为止,对其输出的高功率(兆瓦量级)毫米波激光脉冲能量绝对值的测量仍缺乏有效可靠的手段。

热释电探测器具有一系列光敏探测器和其他热敏探测器所无法比拟的优点,正成功地广泛应用于红外、紫外及X射线波段能量与功率的探测。

本文基于热释电原理,设计并研制了新型的室温毫米波激光能量探测器,分别在36.55 GHz和89.3 GHz对其进行了能量标定,主要性能参数的计算表明了实验结果与理论分析的一致性。

与传统的毫米波能量探测器件——锥形腔碳斗量热器相比^[2],这种热释电型毫米波能量计具有如下显著优点:1) 响应灵敏度达几十 $\text{mV}/\mu\text{J}$,比碳斗(灵敏度低于 $1\ \mu\text{V}/\mu\text{J}$)提高了4~5个数量级;2) 响应速度快,有效响应时间小于 $1\ \mu\text{s}$,而碳斗的响应时间长达几秒甚至几十秒;3) 响应率不受入射脉冲的时空分布影响^[3];4) 均匀的体吸收结构可以避免高功率激光脉冲在锥形腔顶部形成激光等离子体反射,从而保证了测量值的真实可靠。

这种新型的毫米波探测器具有十分宽广而平坦的频谱响应范围和很好的宽带线性响应特性,使用十分方便,它能够承受峰值功率高达兆瓦量级的强激光脉冲辐射,并可以大面积接收能量,性能稳定,便于精确标定,从而实现了二极管检波器所无法做到的对高功率的毫米

* 本课题为国家自然科学基金资助项目。

收稿日期:1993年8月5日,收到修改稿日期:1993年9月20日

波激光脉冲进行全能量绝对值测量。

本文将标定过的这种新型能量计与晶体二极管检波器的波形监测相配合,成功地测定了拉曼自由电子激光器(Raman FEL)输出毫米波激光脉冲的典型参数,为毫米波激光探测开辟了新的有效的途径,同时也大大扩展了常规热释电探测器的功能和波长使用范围。

2 基本原理与结构设计

热释电(Pyroelectric,简称PE)材料是一种快响应的热敏元件。当材料被光辐射加热或附加吸收体被加热时,产生温度变化,导致材料内部热电偶极子变化(潜在变化率高达皮秒量级),于是材料表面出现净电荷,从而产生了与温度变化有关的电场和相应的热释电电流。这就是热释电效应。

将PE晶体接入一个负载电路。当晶体接受入射脉冲辐射时,就产生相应的电压信号。如果入射信号脉冲宽度远小于PE材料的热弛豫时间和探测器电路的电时间常数,则此感应的峰值电压就正比于入射脉冲的总能量。因此,通过对探测器输出电压值的测量就可以测定辐射脉冲的总能量^[4]。

设计一个有效接收口径为 $\phi 6\text{ mm}$ 的热释电型能量计。灵敏元材料为PE晶体 LiTaO_3 ,厚约 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。 LiTaO_3 的居里温度高达 $618\text{ }^\circ\text{C}$,在强激光脉冲辐射下不会丧失其热释电特性。而且,实验发现, LiTaO_3 对毫米波辐射具有较好的吸收响应特性,因此适合于高功率毫米波激光脉冲的测量。

为了增强灵敏元对毫米波的吸收,在晶体表面涂敷一层Ni-Cr合金作为附加吸收体^[5]。Ni-Cr合金层同时也作为前电极以取出响应电信号,后电极制成全反射金电极。

镀有电极的 LiTaO_3 晶体粘贴在铜衬底上以抑制压电干扰。选用高密度聚乙烯为能量计窗口材料,从而限定了器件的工作波长范围。以场效应管实现阻抗交换,并采用低噪声前置放大器对响应电信号加以放大。整个器件屏蔽在铜制管壳中。

3 能量计的标定与参数计算

探测器吸收体被入射脉冲辐射加热后,如果忽略热辐射损耗,在理想热传导情况下,PE晶体的温升和电压变化为^[4]

$$T_t = \eta A / C_T \int_0^t P(t) dt \quad (1)$$

$$V_t = \eta A^2 \lambda / C C_T \int_0^t P(t) dt \quad (2)$$

式中 C_T 为PE晶体热容量, A 为电极面积, C 是热电元件极间电容和负载电容的总和, λ 为PE晶体自发极化强度的温度变化率,称为热释电系数,它是一个与晶体几何尺寸无关的常数, $P(t)$ 为辐射功率, η 为入射辐射被探测器吸收的百分率。最高温升和峰值电压可以表示为^[4]

$$\Delta T = \eta E / C_T \quad (3)$$

$$U_{\max} = \eta \xi E C_S / A C \quad (4)$$

式中 $\xi = \lambda / \varepsilon C_P$ 为PE材料常数,又称标定常数, $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ 为材料的介电常数, C_P 为体比热, E 为入

射总能量, C_s 为热电元件极间电容。

由(3)式和(4)式可见,最高温升和峰值电压与入射总能量成正比。此后,温度和电压按下式衰减^[4]

$$T_t = \frac{\eta E}{C_T} e^{-(t/\tau_r)/a_r} \quad (5)$$

$$V_t = \frac{\eta A \lambda E}{C C_T} \frac{1}{\tau_r - \tau_e} \left[\frac{\tau_r}{a_r} e^{-(t/\tau_r)} - \frac{\tau_e}{a_r} e^{-(t/\tau_e)} \right] \quad (6)$$

式中 $a_r = 1 - e^{-(\tau_r/\tau_e)}$, $a_e = 1 - e^{-(\tau_e/\tau_r)}$, T_t 为辐射源的重复频率, τ_r 和 τ_e 分别为器件的热时间常数和电时间常数。

热释电探测器附加吸收体的热时间常数决定了器件的响应时间^[4]

$$\tau_{th} = \rho C_p d^2 / K_p \quad (7)$$

式中 ρ , K_p 和 d 分别为附加吸收体的密度、热导率和厚度, C_p 为 PE 晶体的体积比热。根据能量计灵敏元的设计与特性参数计算得

$$\tau_{th} \approx 320 \text{ ns} \quad (8)$$

可见,该能量计的有效响应时间小于 $1 \mu\text{s}$, 达到了快速响应。

在毫米波段对这种热释电型能量计进行标定。

微波标准源作为入射信号源,输出频率为 36.55 GHz 和 89.3 GHz 的连续毫米波信号经可变衰减器后,用快门斩波,成为脉宽约 $1/125 \text{ s}$ 的方波脉冲。GX2B 小功率计作输出功率监测。

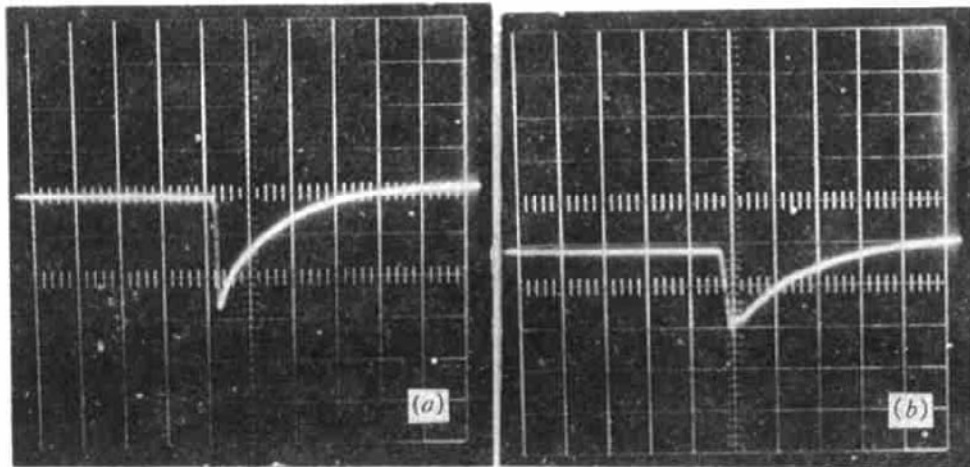


Fig. 1 Typical PE signal of the millimeter wave energy meter (0.5 V/vertical div., 50 ms/horizontal div.)

(a) Operating frequency is at 36.55 GHz, incident energy is $80 \mu\text{J}$;

(b) operating frequency is at 89.3 GHz, incident energy is $40 \mu\text{J}$

示波器观察能量计对毫米波辐射的电压响应,得到图 1 所示典型波形。响应电压上升时间约为 8 ms,下降时间约 120 ms,完全恢复时间约 400 ms。由于信号脉冲作用时间($1/125 \text{ s}$)大于能量计的有效响应时间(320 ns),因此,如波形显示,在脉冲作用时间内,响应电压一直随时间线性增加,脉冲结束时达最大值,然后随时间指数下降,与(6)式规律相符。

由于器件电时间常数远小于 PE 晶体的热弛豫时间 τ_{th} (170 s),所以能量计恢复时间取决于电路的放电时间。能量计的电时间常数

$$\tau_e = (R_1 // R_2) (C_1 // C_2) \quad (9)$$

式中 R_1 为 PE 材料电阻, $C_1 = \epsilon_r \epsilon_0 A/d$, 为电极电容, R_2 和 C_2 分别为电路的输入阻抗和容抗。通常 $R_2 \ll R_1, C_2 \ll C_1$, 所以

$$\tau_e \approx R_2 \cdot C_1 \quad (10)$$

由器件结构设计参数计算得 $\tau_e \approx 135$ ms, 与波形显示结果相吻合。

能量计标定的实验结果如图 2 中曲线 1 所示。对 36.55 GHz 和 89.3 GHz, 电压响应灵敏度 R_V 分别为 16 mV/ μ J 和 23.8 mV/ μ J。信噪比 $S/N \approx 120$ 。在实验所测入射能量从 4 μ J 到 160 μ J 范围内, 能量计对 3~8 mm 波辐射能量均有很好的线性响应特性, 其线性响应以能量与波长范围还可以进一步扩展。

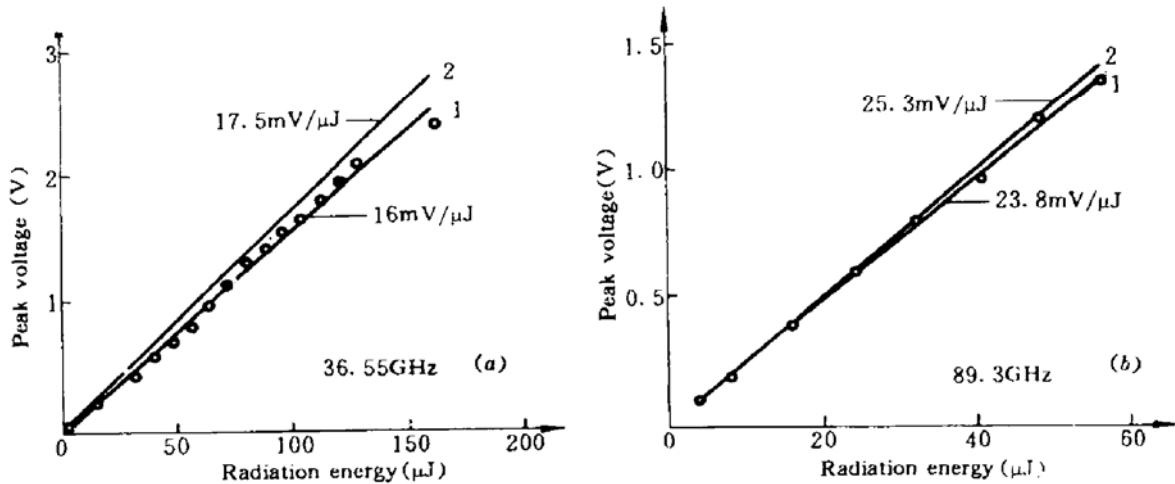


Fig. 2 Calibration curve of the PE millimeter wave energy meter.

Operating frequency is at (a) 36.55 GHz and (b) 89.3 GHz

由(4)式,并考虑到能量计响应电压与入射信号频率 f 成反比, $C_e \approx C$, 同时我们对响应电信号放大了 10^3 倍, 所以

$$V = 10^3 (\xi/fA) (\eta E) \quad (11)$$

实验测得该能量计对入射毫米波的吸收效率 η 为 45% (36.55 GHz) 和 65% (89.3 GHz), 此时 $\xi = 1375$, $f = 125$ Hz, $A \approx 0.28$ cm², 因此, 该能量计电压响应灵敏度 R_V 的理论值为 17.5 mV/ μ J (36.55 GHz) 和 25.3 mV/ μ J (89.3 GHz), 如图 2 中曲线 2。可见, 在实验误差范围内, 实验结果与理论计算吻合得很好。

将外界干扰屏蔽, 测得探测器自身的热电噪声等效电压 ΔV_N 约 0.1 mV, 由此, 可计算该能量计可探测能量的理论极限值

$$W_N = \Delta V_N / R_V \quad (12)$$

36.55 GHz 下, $W_N = 5.7 \times 10^{-3}$ μ J; 89.3 GHz 下, $W_N = 3.9 \times 10^{-3}$ μ J。

表 1 给出了这一热释电型毫米波激光能量计主要性能参数的计算结果。

应当注意, 虽然标定常数 ξ 与 PE 晶体的几何尺寸无关, 但由于不同晶片物理常数的非重要性, 热释电探测器通常需要分别标定^[5]。

4 拉曼自由电子激光器的输出检测

用标定过的热释电型毫米波激光能量计接收 Raman FEL 的输出激光脉冲。工作波长为 8

mm, 为将测量值限制在所标定的能量计线性响应范围内, 使输出激光脉冲经 1/70 预衰减后, 入射到能量计上。示波器观察能量计电压响应的典型波形如图 3 所示。响应电压峰值为 2.5 V, 响应灵敏度的标定值为 16 mV/ μ J, 因此, 能量计所吸收的入射脉冲能量为 0.15 mJ。考虑到能量计本身吸收效率约 45% 及 1/70 的预衰减, 则 Raman FEL 输出的毫米波激光脉冲能量约为 24 mJ。

Table 1 Parameters of the PE energy meter

Absorption efficiency (η)	45% (36.55 GHz); 65% (89.3 GHz)
Response sensitivity (R_v)	Theoretical value
	Experimental value
Thermal time constant of absorption body (τ_{th})	320 ns
Electrical time constant (τ_e)	135 ms
Signal-to-noise ratio (S/N)	120
Minimum detectable energy (W_n)	$5.7 \times 10^{-3} \mu\text{J}$ (36.55 GHz); $3.9 \times 10^{-3} \mu\text{J}$ (89.3 GHz)
Thermal relaxation time of the PE crystal (τ_{thPE})	170 s
Calibration constant (ξ)	1375

采用二极管检波器监测 Raman FEL 的输出激光脉冲波形(见图 4), 波形显示出毫米波激光脉冲的半高宽约 30 ns。因此, Raman FEL 输出平均功率为 0.8 MW。

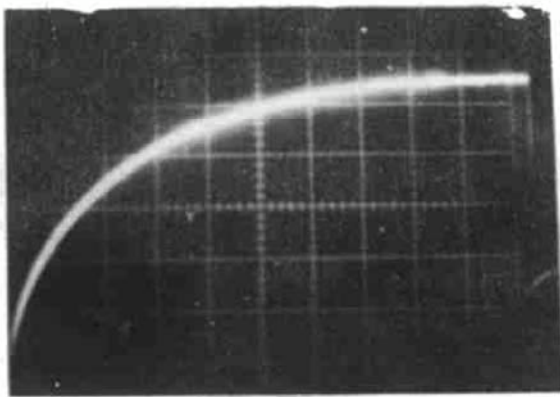


Fig. 3 PE energy meter signal of Raman FEL pulse
(0.5 V/vertical div., 10 ms/horizontal div.)

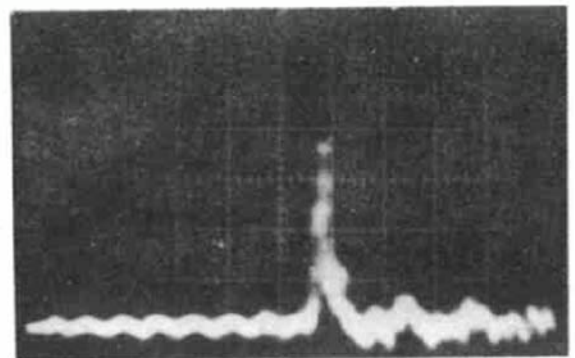


Fig. 4 Output laser pulse waveform of Raman FEL
(200 mV/vertical div., 100 ns/horizontal div.)

5 结论

本论文设计并研制的热释电型毫米波激光能量探测器不仅适合于对毫米波段高功率的激光脉冲进行全能量绝对值测量, 而且以其高灵敏度适用于微弱毫米波信号的能量探测, 具有重要的实际应用与推广价值。

致谢 本文的实验工作得到上海科技大学苏勇老师的热诚帮助, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 王明常. 强激光技术进展, 1991, (1): 12
- 2 褚 成, 陆载通等. 中国激光, 1986, 13(8): 482
- 3 Robert W. Astheimer, Robert E. Buckley. *The Review of Scientific Instruments*, 1967, 38(12): 1764
- 4 周复正, 沈丽青. 中国激光, 1991, 18(10): 743
- 5 Blaney T. G.. *J. Phys. E.*, 1978, 11: 856
- 6 Jean-Louis Lachambre. *The Review of Scientific Instruments*, 1971, 42(1): 74

Pyroelectric Energy Meter with High Sensitivity and Fast Response for Millimeter Wave Laser

Meng Zhicong Wang Mingchang Lu Zaitong Zhang Lifen Zhou Fuzheng

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

Abstract Basing on pyroelectric theory, a novel millimeter wave laser energy detector with high sensitivity and fast response has been proposed and designed. We calibrated it at different operating frequencies separately. Its main property parameters have been given. Sensitivity of this energy meter is about several ten $\text{mV}/\mu\text{J}$, which is four to five orders higher than traditional detector. Its time response is less than $1 \mu\text{s}$. The speed of response has been improved by six to seven orders. This energy meter has been used in detective system of Raman free-electron laser. We successfully measured the typical parameters of the output millimeter wave laser pulse.

Key words pyroelectric energy meter, millimeter wave measurement, free-electron lasers