

砷化镓半导体材料与器件中高频场分布 研究的新方法——脉冲电光检测技术

朱 祖 华

(浙江大学信息与电子工程系)

提 要

介绍了砷化镓材料和器件中高频电场的分布测量的新方法——谐波混频脉冲电光检测: 它的原理、实验装置以及在砷化镓共平面波导中微波驻波场分布测量中应用的结果。在频率高达 20.10 GHz 及开路、短路和 $50\ \Omega$ 不同的负载条件下测得的结果与理论预计值符合很好。本文最后对方法的灵敏度和空间分辨率进行讨论。

关键词: 微微秒光脉冲; 谐波混频电光检测; 微波集成电路。

一、引 言

近年来, 线性电光效应作为测量的一种手段在超高速器件和集成电路瞬态特性的研究上, 已获得了广泛的应用^[1,2]。最近, 连续波电光检测技术已由作者及其合作者发展用于砷化镓材料和器件中低频和直流场分布的研究, 获得了很有意义的结果^[3~5]。然而, 许多高频电场的空间分布问题常常令人关注。例如, 在砷化镓微波集成电路中, 如果负载阻抗与波导特性阻抗不匹配, 则在波导中将建立起驻波电场。驻波比是表征电路传输特性的关键参数。常规的测量线技术对于高微波频率下的驻波测量已不适用; 而目前更缺乏有效的方法来测量单片砷化镓微波集成电路波导中的驻波场分布。

原则上, 连续波电光检测技术可应用于砷化镓微波波导中驻波场的测量。但是, 由于现有的光探测器没有足够的带宽以及高频下寄生效应严重, 以致用连续波电光检测方法直接进行高频的测量几乎不可能。为了克服这一困难, 我们应用了一种新的方法——脉冲电光检测^[6], 这种方法基于谐波混频的原理。由于利用了微微秒激光脉冲串作为探测光束而具有十分宽的探测频带。因此可以用来测量砷化镓波导中微波驻波场的分布。本文将介绍这种新方法的原理, 实验装置和最新实验结果。并对测量方法的空间分辨率和灵敏度进行讨论分析。

二、基本 原 理

当一台锁模 YAG 激光器发出的光脉冲串被砷化镓波导中的电场调制后照射在光探测器上, 其产生的光电流和光强度与调制电压的乘积成正比。因此, 可以将光调制器(在本实

验中为砷化镓波导样品)与光探测器的组合看成是一个混频器。

若设锁模光脉冲是脉宽为 τ , 周期为 $T(=1/f_0)$ 的方波序列, 利用傅里叶级数将其展开可得相应的谐波频谱。在未加调制电场的情况下, 该光脉冲序列在探测器中产生的周期性光电流为

$$\dot{i}(t) = \dot{i}_{\text{avg}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin n\pi f_0 \tau}{n\pi f_0 \tau} \right) \cos 2\pi n f_0 t \right] \quad (1)$$

式中 \dot{i}_{avg} 为平均光电流, n 为谐波分量的阶次, 因子 $\sin n\pi f_0 \tau / n\pi f_0 \tau$ 代表由光脉冲宽度 τ 所决定的频域包络; 当 $\tau \rightarrow 0$ 时, 该因子 $\rightarrow 1$ 。

如果加在波导中的调制电压为 $V(t) = V_m \sin 2\pi f_m t$, 其中 V_m 为调制电压的幅值, f_m 为射频调制信号的频率。由线性电光效应 $V(t)$ 所引起的光波两正交分量之间的相位移为

$$\Delta\Gamma = \pi \frac{V(t)}{V_\pi} = \pi \frac{V_m}{V_\pi} \sin 2\pi f_m t \quad (2)$$

式中 V_π 为砷化镓调制器的半波电压。被调制后的光脉冲在光探测器中产生的混频电流为^[7]

$$\dot{i}_{\text{mix}} = \dot{i}_{\text{avg}} \pi \frac{V_m}{V_\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \pi n f_0 \tau}{\pi n f_0 \tau} \right) [\sin 2\pi(nf_0 + f_m)t - \sin 2\pi(nf_0 - f_m)t] \quad (3)$$

式中方括号内的正弦函数项代表混频所产生的新频率分量。

将锁模光脉冲序列看作本地振荡, 那末要选择频率合适为 f_m 的射频信号与之混频, 可以在中频 $f_i = nf_0 - f_m$ 下容易地测量到混频电光信号, 它由下式给出

$$V_0 \propto \dot{i}_{\text{avg}} \pi \frac{V_m}{V_\pi} R_L \quad (4)$$

V_0 为负载电阻 R_L 两端的电光峰值电压, 它正比于调制电压幅值, 亦即波导中的微波电压幅值 V_{m0} 。

三、实验装置及实验结果

1. 实验装置

图 1 为谐波混频脉冲电光检测的实验装置示意图。从锁模 YAG 激光器发出波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 重复频率为 $f_0 = 82 \text{MHz}$ 的激光脉冲串, 其脉冲宽度约为 100ps , 当通过自制的脉冲压缩器后, 光脉冲宽度被进一步压缩到短于 3ps , 以便在高频下获得稳定和较强的谐波。自相关器用于测量光脉冲宽度。1/4 波片在两个正交感应主轴之间引入 $\pi/2$ 的相移, 因此使电光调制器工作在线性区。激光束被透镜聚焦在共平面波导的中央电极上, 光斑直径小于 $4 \mu\text{m}$ 。波导的中央电极, 边电极和两者的间隔分别为 $130 \mu\text{m}$, $590 \mu\text{m}$ 和 $65 \mu\text{m}$ 。衬底厚度为 $470 \mu\text{m}$ 。来自微波信号源频率为 f_m 的射频输出通过 SMA 型连接器馈入砷化镓波导。波导的另一端可以是开路、短路或 50Ω 。当阻抗不匹配时, 沿着波导将建立起驻波场。被驻波场调制的激光束从电极反射回来通过检偏器将光偏振的变化转化为光振幅的变化。锗光探测器用于接收混频后的光信号。使用 Tektronix 492 型频谱分析仪来检出频率为中频 f_i 的信号分量。频谱分析仪前的放大器用于优化信号噪声比。电视照相机用于精确监视测量的位置。当激光束沿着波导电极的纵向, 即图 1 中的 z 轴从一端扫向另一端时,

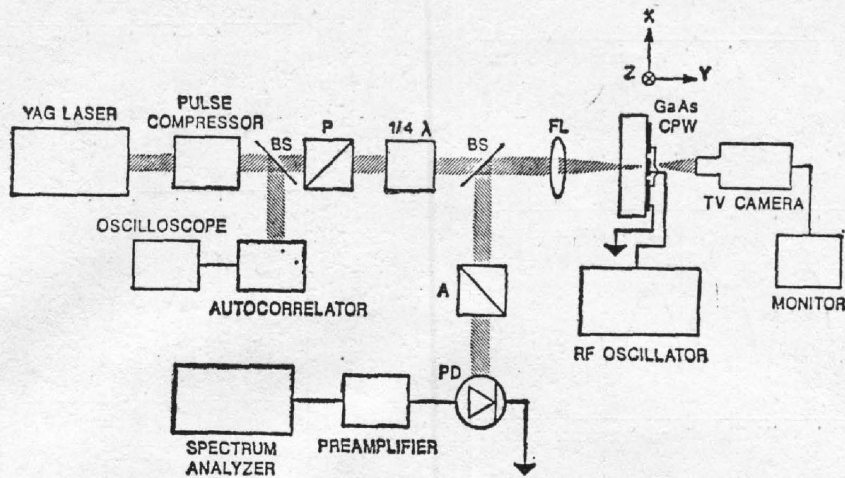


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for PEOP.

P—Polarizer; A—Analyzer; BS—Beamsplitter; FL—Focusing lens; PD—Photodetector.

便得到了驻波场分布图形。

2. 实验结果

测量中,我们选择了混频信号的频率为 $f_i=10\text{ MHz}$ 。例如,它就是 $f_m=20.10\text{ GHz}$ 的微波信号与锁模脉冲基波重复频率 $f_0=82\text{ MHz}$ 的第245次谐波($n=245$)相混频而得到的。图2所示为展示在频谱分析仪上的该混频电光信号的实际波形。

在不同的微波频率和三种不同波导终端条件下(开路,短路和 $50\ \Omega$)进行了相应的驻波测量。图3示出了在 12.31 GHz 、 16.41 GHz 以及 20.10 GHz 频率下终端开路的砷化镓共平面波导中驻波场分布图。在 16.41 GHz 频率下,短路,开路 and $50\ \Omega$ 三种不同终端条件下测量所得的驻波场分布图示于图4。应该指出,图3和图4中坐标的零点对应于测量的起始点,而波导终端位于原点的左方。为了比较起见,我们将图4中三条曲线的最小值位置作了对准。

由测量得到的驻波图估算对应的电压驻波比 ρ 和反射系数 Γ ,结果列于表1。由表可见,首先,电压驻波比 ρ 和反射系数 Γ 的值随着频率增高而减小,这是由于高频下较大的损耗和较强的寄生效应所致。其次,在 16.41 GHz 和 20.10 GHz 下,短路终端的 ρ 和 Γ 值大于开路终端的相应值,而在 4.11 GHz 时两者几乎没有什么差别。这表明在高频下理想的开路终端比理想的短路终端难以得到,这可能是由于高频下辐射损耗不同之故。而 $50\ \Omega$ 负载的 ρ 和 Γ 值合理地低于开路和短路的情况。

由测得的驻波图,我们也得到了从 4.11 GHz 到 20.10 GHz 频率范围内的驻波波长 λ_{SW} (等于微波信号的半波长)。由 λ_{SW} 值可根据下式算出有效折射系数 n_{eff} 和有效介电常数

ϵ_{eff} :

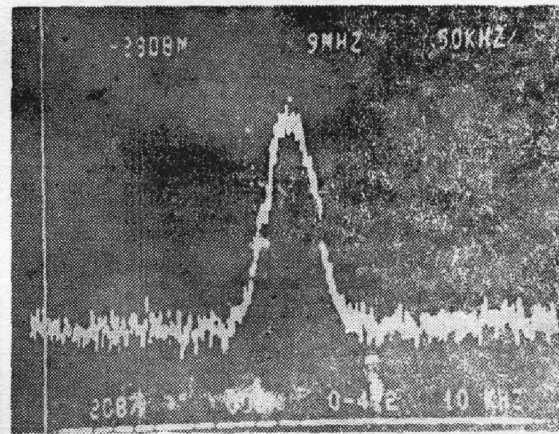


Fig. 2 Harmonic-mixing electro-optic signal ($f_m=20.10\text{ GHz}$, $f_0=82\text{ MHz}$, $n=245$, $f_i=10\text{ MHz}$)

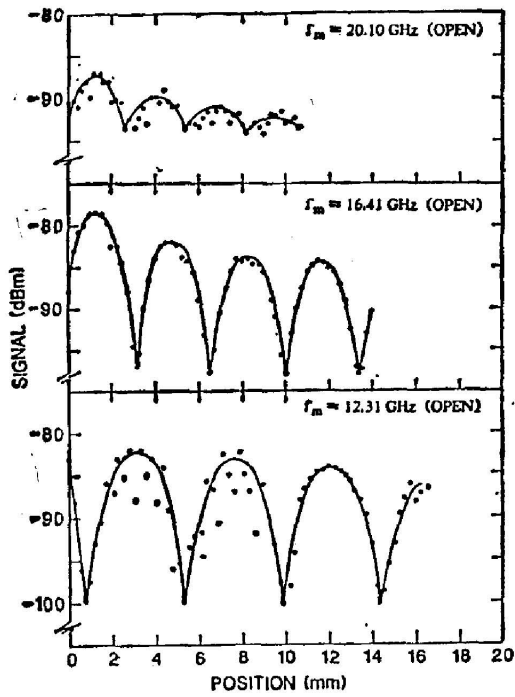


Fig. 3 Standing wave patterns in GaAs coplanar waveguide with open termination at frequencies of (a) 12.31GHz, (b) 16.41GHz and (c) 20.10GHz

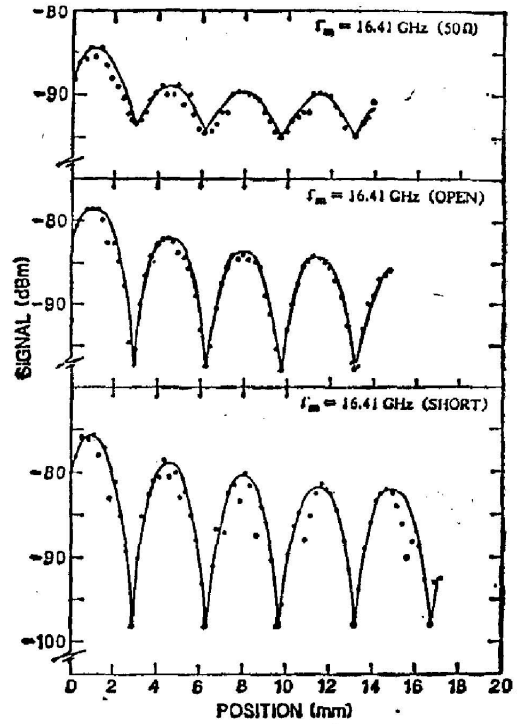


Fig. 4 Standing wave patterns in GaAs coplanar waveguide with (a) short, (b) open and (c) 50Ω terminations at 16.41GHz

Table 1 Voltage standing wave ratio ρ and reflection coefficient Γ at frequencies up to 20.10GHz

$f_m(\text{GHz})$	ρ	Γ	termination
4.11	12.4	0.85 ^[1]	open
	12.6	0.85 ^[3]	short
8.21*	5.97	0.71	open
12.31	7.94	0.78	open
16.41	5.95	0.71	open
	9.41	0.81	short
	1.90	0.31	50.2
20.10	2.12	0.36	open
	4.0	0.60	short

* Data obtained from another sample with same geometry

Table 2 Standing wavelength λ_{sw} , effective dielectric constant ϵ_{eff} and index of refraction n_{eff} at frequencies from 4.11 GHz to 20.10 GHz

$f_m(\text{GHz})$	4.11	8.21	12.31	16.41	20.10
$\lambda_{sw}(\text{mm})$	13.6	6.90	4.60	3.45	2.80
ϵ_{eff}	7.20	7.01	7.02	7.02	7.10
n_{eff}	2.68	2.65	2.65	2.65	2.67
n'_{eff}	2.616	2.617	2.619	2.622	2.625

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \frac{c}{2\lambda_{\text{gw}} f_m} \quad (5)$$

结果列于表 2 中。由表可见, 测量所得的有效折射率 n_{eff} 的变化约为 1%, 在测量误差范围之内。按下列公式计算可获有效折射率的理论值 n'_{eff} ^[8],

$$n'_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon'_{\text{eff}}(f)} = \sqrt{\epsilon_q + \frac{(\sqrt{\epsilon_r} - \sqrt{\epsilon_q})}{(1 + aF^{-b})}}, \quad (6)$$

式中 ϵ_q 为准静态理论限制下的有效介电常数, ϵ_r 为砷化镓的介电常数, 以及

$$F = f/f_{TE}, \quad f_{TE} = C/4h \sqrt{\epsilon_r - 1}.$$

a 和 b 为与样品的电极安排和尺寸有关的常数。在本实验中, 这些参数分别为:

$$\epsilon_r = 13, \quad \epsilon_q = 6.840, \quad f_{TE} = 43.3 \text{ GHz}, \quad a = 24.81, \quad b = 1.8, \quad h = 470 \mu\text{m}$$

以及

$$C = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}.$$

比较有效折射率的测量值与理论值, 两者符合得相当好。由此可得出结论, 在测量的频率范围内, 对于我们的样品而言, 共平面波导的色散可以忽略不计, 而有效折射率值约为 2.66。

四、讨 论

下面将对谐波混频脉冲电光检测的空间分辨率和灵敏度进行讨论。

A. 空间分辨率

用于实验装置中的聚焦透镜焦距为 14.5 mm, 孔径为 8 mm。可获的最小光斑半径对于 1.06 μm 的激光而言约为 1.1 μm 。然而, 准直激光束的实际直径为 6 mm, 所以实际可获得的最小光斑半径约为 1.5 μm 。这样大小的激光光斑对于许多应用而言足够小了, 但对某些亚微米尺寸的半导体器件而言可能仍然稍大些。可以选择更短焦距(较大的数值孔径)的透镜将光斑尺寸进一步减小。但应注意到, 这样的透镜有很短的工作距离, 在使用时可能会带来不便。

因为激光束聚焦在样品的前表面, 所以事实上激光束在样品中扫过了一个圆锥状的区域。此时, 如果入射激光束相对于样品表面的法线有一个角度的话, 则在入射光束与反射(或透射)光束之间存在一横向的位移。所有这些因素将导致空间分辨率降低。前一问题较难避免而横向位移问题则可排除。总的说来, 我们可以获得微米量级的空间分辨率。

B. 灵敏度

连续波电光检测应用了锁相技术, 由于器件噪声电平的限制, 最小可探测电压约为 $\pm 1 \mu\text{V}$ 。脉冲电光检测使用了谐波混频技术, 在系统中利用一前置放大器改进了信号噪声比, 使之提高 15 dB 以上。测量中, 一般噪声电平约为 -100 dBm。若在分辨率带宽为 10 kHz 时取 -95 dBm 为最小可探测信号, 计算 50 Ω 负载和 1 Hz 带宽时的最小可探测电压, 得到 $V_{\text{min}} = 1.58 \times 10^{-7} \mu\text{V}$ 。如果使用单频工作的前置放大器和性能更好的频谱分析仪, 可以期望测量灵敏度会得到进一步的提高。

五、结 语

业已发展了脉冲电光检测技术用于研究砷化镓半导体材料和器件中的高频场分布。砷

化镓共平面波导中微波频率下驻波测量的结果证实了方法的可靠性和普遍适用性。这种高频场分布测量的新技术象连续波电光检测技术一样,具有非破坏和非干扰性,并且空间分辨率好,测量灵敏度高,以及除砷化镓外还可应用于磷化铟、铌酸锂等其他电光材料和器件的特点。此外,特别是脉冲电光检测具有高达 100 GHz 以上的可应用带宽,因此可以预期,它将成为检测微波与毫米波集成电路特性的一种十分有用的方法。

谨向支持和关怀我研究工作的美国加利福尼亚大学伯克利分校电工程与计算机科学系 S. Wang 教授和 T. K. Gustafson 教授,以及曾与我共事的 H-P 公司 S. Y. Wang 博士和 C. L. Pan, Y. H. Lo 和 M. C. Wu 诸博士以及 Mr. J-P, Weber 致以深切谢意。

参 考 文 献

- [1] J. A. Valdmanis, G. A. Mourou; *IEEE J. Q. E.*, 1986, **QE-22**, No. 1 (Jan), 69~78.
- [2] B. H. Kolner, D. M. Bloom; *IEEE J. Q. E.*, 1986, **QE-22**, (Jan), 79~93.
- [3] Z. H. Zhu, J-P. Weber *et al.*; *A. P. L.*, 1986, **49**, No. 8 (Aug), 432~434.
- [4] Y. H. Lo, Z. H. Zhu *et al.*; *A. P. L.*, 1987, **50**, No. 17 (Apr), 1125~1127.
- [5] Y. H. Lo, M. C. Wu *et al.*; *A. P. L.*, 1987, **50**, No. 25 (Jun), 1791~1793.
- [6] Z. H. Zhu, C. L. Pan *et al.*, *A. P. L.*, 1987, **50**, No. 18 (May), 1228~1230.
- [7] B. H. Kolner, Ph. D. Thesis, Stanford University, 1985.
- [8] G. Hasnain, A. Dienes *et al.*; *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1986, **MTT-34**, 738~741.

A new method——pulse electro-optic probing for studying the distribution of high frequency electric field in GaAs material and devices

ZHU ZUHUA

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 5 April 1988; revised 12 June 1989)

Abstract

This paper presents a new method——Harmonic-Mixing Pulse Electro-Optic Probing for measuring the distribution of high frequency electric field: its principle, experimental apparatus, and its application to the measurement of standing-wave in GaAs coplanar waveguide. Experimental results gotten from measurements at frequencies up to 20.10 GHz and with different terminations (short, open and 50 ohms) are in good agreement with that predicted by theory. A discussion on the sensitivity and spatial resolution of this measurement method is given.

Key words: ps optic pulse; harmonic-mixing electro-optic probing; microwave integrated circuit.