

## 激光与光电子学进展

## 微通道板增益均匀性理论研究

邓珀昆, 林楷宣, 罗秋燕, 龙井华, 王东, 雷云飞, 黄峻堃, 王勇, 蔡厚智, 刘进元, 牛丽红\*

深圳大学物理与光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

**摘要** 门控分幅相机工作过程中, 选通脉冲传输衰减效应会大幅度削弱微通道板(MCP)微带线的增益, 影响相机性能。本文建立了选通电压脉冲在 MCP 微带线上的传输衰减模型, 对 MCP 增益均匀性进行了理论模拟。模拟结果表明, 电压脉冲在 MCP 微带传输时, 其幅值呈指数式衰减。当衰减系数为 0.0041 Np/mm 时, 电压幅值在 40 mm 处衰减至原来的 85%, MCP 增益衰减至原来的 29%。模拟了直流电压补偿、微带末端反射补偿及宽度渐变微带线补偿这三种方法对 MCP 增益均匀性的影响。结合三种补偿方法得到微带线补偿模型; 当微带线最小宽度取 4 mm 时, 电压传输幅值维持在 94% 以上, MCP 增益维持在 66%。

**关键词** 超快光学; 超快诊断; 微通道板; 增益均匀性; 脉冲衰减; 微带线

中图分类号 TL816.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2332001

## Study on Gain Uniformity of Microchannel Plate

Deng Pokun, Lin Kaixuan, Luo Qiuyan, Long Jinghua, Wang Dong, Lei Yunfei,

Huang Junkun, Wang Yong, Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Niu Lihong\*

Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province,  
College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China

**Abstract** When a gated framing camera is operating, the gating pulse transmission attenuation effect will greatly weaken the gain of microchannel plate (MCP) microstrip line and affect the camera performance. The attenuation model of gate voltage pulse transmitting on MCP microstrip line was established, and the gain uniformity of MCP was simulated. As the results, amplitude of voltage pulse decays exponentially in MCP microstrip. Under the attenuation coefficient of 0.0041 Np/mm, the voltage amplitude attenuates to 85% of the original value and the MCP gain attenuates to 29% of the original value at the position of 40 mm. Effects on MCP gain uniformity caused by three methods (voltage compensation, microstrip end reflection compensation, and width gradient microstrip line compensation) were simulated. The three compensation methods were combined to obtain a microstrip line compensation model. In the model, for the minimum width of microstrip is 4 mm, the voltage transmission amplitude is maintained above 94%, and the MCP gain is maintained at 66%.

**Key words** ultrafast optics; ultrafast diagnosis; microchannel plate; gain uniformity; pulse attenuation; microstrip line

## 1 引言

门控分幅相机具有良好的时间分辨率及二维空间分辨率, 被广泛应用于激光等离子体、惯性约束核聚变(ICF)等高速瞬变的物理实验中。微通道板(MCP)是相机的核心部件, 决定了相机的时间分辨率、空间分辨率和增益均匀性等重要指标。在 MCP 微带线上传输超快窄脉冲, 可用于对光电子进行选通, 从而获得高时

间分辨率<sup>[1-4]</sup>。选通脉冲在 MCP 微带线上传输时不断衰减, 幅值会逐渐降低, 而 MCP 增益与工作电压呈指数关系, 故选通脉冲幅值的变化会引起 MCP 增益的巨大变化<sup>[5]</sup>。

2005 年, 美国利弗莫尔实验室(LLNL)对 MCP 微带传输线衰减进行了理论模拟, 当选通脉冲在 MCP 上传输时, 工作电压幅值随脉冲传输距离的增加呈指数衰减。其中, 电压幅值衰减系数为 0.05 Np/cm 士

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-02-28; 录用日期: 2022-06-22; 网络首发日期: 2022-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(11775147)、广东省自然科学基金(2019A1515011474, 2019A1515110130)、深圳市科技计划项目(JCYJ20200109105201936, JCYJ20190808115605501, JCYJ20180305125443569)

通信作者: \*niulh@szu.edu.cn

20%<sup>[6]</sup>。为提高分幅相机增益均匀性,LLNL 提出了以下三种补偿方法:宽度渐变微带线补偿、直流电压补偿以及微带末端反射补偿<sup>[6]</sup>。1994年,Watt 等通过理论和实验验证了宽度渐变微带提高增益均匀性的可行性,但并未对渐变微带线宽度变化做定量分析。2005年,McCarville 等<sup>[6]</sup>尝试采用直流电压补偿和微带末端反射补偿对增益不一致性进行修正并取得一定的成果。本文对微带 MCP 结构与衰减模型进行了分析,模拟了高压选通脉冲在 MCP 微带上传输时的衰减情况以及对分幅相机增益的影响,并分别分析了三种补偿方法对增益不一致性的修正效果。

## 2 MCP 微带衰减模型

### 2.1 MCP 传输等效电路

电压脉冲在 MCP 微带上传输时主要经历衰减特性和反射特性。其中,衰减主要是由辐射损耗、微带阻抗损耗和介质漏电导损耗引起的。下面将对电压的衰减特性进行分析。MCP 微带主要由导体带、填充介质和接地板三个部分组成。高压脉冲在微带线上传输时,将 MCP 微带传输线看作均匀有耗传输线,其单位长度传输线模型<sup>[7]</sup>如图 1 所示。

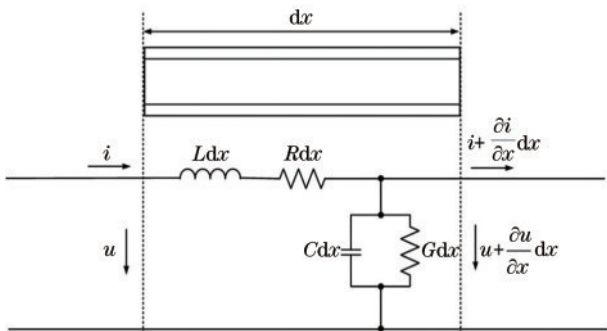


图 1 单位长度微带线传输等效电路

Fig. 1 Microstrip line transmission equivalent circuit per unit length

图 1 中, $R$ 为传输线单位长度电阻, $L$ 为单位长度电感, $C$ 为单位长度电容, $G$ 为单位长度的漏电导。根据基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律可得

$$\frac{dU(x)}{dx} = -(R + j\omega L)I(x), \quad (1)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -(G + j\omega C)U(x), \quad (2)$$

式中: $U(x)$ 、 $I(x)$ 分别为微带传输线某位置上的电压和电流; $\omega$ 为电信号角频率。设初始电压幅值为 $U_0$ ,解式(1)、式(2)微分方程可得

$$U(x) = U_0 e^{-(\alpha + j\beta)x}, \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为衰减系数,单位为 Np/m; $\beta$ 为相移常数,单位为 rad/m。其表达式<sup>[7]</sup>分别为

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} [(RG - \omega^2 LC) + \sqrt{(R + \omega^2 L^2)(G + \omega^2 C^2)}]}, \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} [(\omega^2 LC - RG) + \sqrt{(R + \omega^2 L^2)(G + \omega^2 C^2)}]}, \quad (5)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (6)$$

式中, $Z_c$ 称为特性阻抗。在微波范围内,在采用良导体作为传输线,且传输介质损耗小以及绝缘性好的情况下,可以认为 $\omega L \gg R$ , $\omega C \gg G$ ,则特性阻抗 $Z_c$ 和衰减常数 $\alpha$ 简化为

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{R}{Z_c} + GZ_c \right). \quad (8)$$

### 2.2 电压衰减模型

令 MCP 导体带的宽度、厚度和电阻率分别为  $W$ 、 $t$  和  $\rho$ ;填充介质的电导率和厚度分别为  $\sigma$  和  $h$ ,等效相对介电常数为  $\epsilon_c$ 。则  $R$ 、 $G$  可分别表示为

$$R = \frac{\rho}{Wt}, \quad (9)$$

$$G = \frac{\sigma W}{h}. \quad (10)$$

根据微波理论<sup>[8]</sup>,特性阻抗 $Z_c$ 可由微带线本身尺寸参数计算:

$$\left\{ \begin{array}{ll} Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_c}} \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h}\right) & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\epsilon_c \left[ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W}{h} + 1.444\right) \right]} & \frac{W}{h} > 1 \end{array} \right. \quad (11)$$

根据实际使用的分幅相机 MCP 微带参数进行模拟:导体带长 50 mm,宽度  $W$  为 6 mm、厚度  $t$  为 0.1  $\mu\text{m}$ 、电阻率  $\rho_1$  为  $2.4 \times 10^{-11} \Omega/\text{mm}$ ;填充介质电导率为 0.05 S/m、厚度为 0.5 mm、等效相对介电常数  $\epsilon_c$  为 3.8。将参数代入计算,得到电压幅值随微带线传输距离的变化曲线,如图 2 所示。

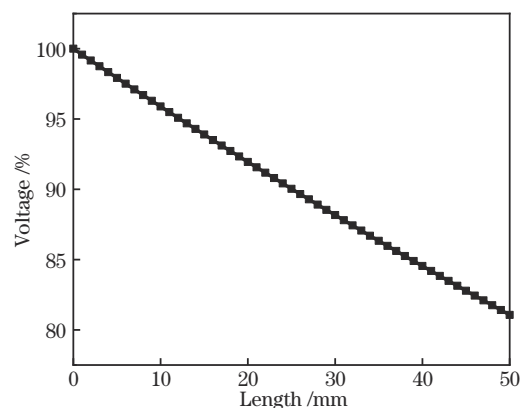


图 2 电压幅值随传输距离的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of voltage amplitude with transmission distance

从图 2 中可以得出,电压传输衰减系数为 0.0041 Np/mm 时,当电压信号传输到 40 mm 处,其幅值衰减至原来的 85%。

### 2.3 增益衰减模型

由于 MCP 的增益与工作电压呈指数关系,故电压的衰减会对 MCP 以及分幅相机的增益产生巨大影响。MCP 增益  $G(x)$  与电压的关系<sup>[9]</sup>可以表示为

$$G(x) = C(U_0 e^{-\alpha x})^n, \quad (12)$$

式中: $x$ 为电压在微带线上传输的距离; $C$ 为增益常数; $n$ 为 MCP 打拿极数,一般取 7~9。其中, $n\alpha$ 为 MCP 增益的衰减因子。当增益常数  $C$  为  $1.7 \times 10^{-16}$ ,且  $n$  取 7、电压脉冲幅值  $U_0$  为 800 V 时,得到 MCP 增益随传输距离的变化曲线,如图 3 所示。

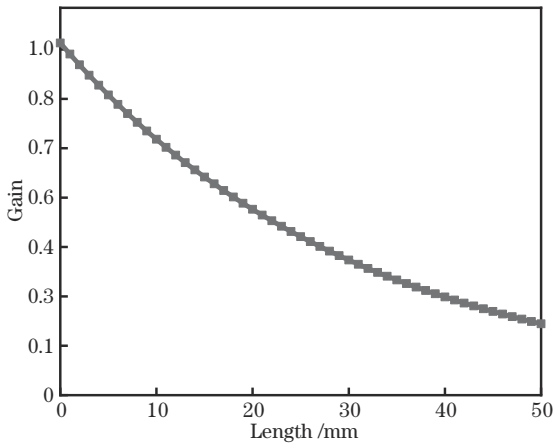


图 3 MCP 增益随传输距离的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of MCP gain with transmission distance

从图 3 中可以得到,当电压传输到 40 mm 处时,增益损失比例为 71.3%,从初始位置的  $3.5 \times 10^4$  衰减为  $1.02 \times 10^4$ 。

改变电压幅值大小,得到不同电压条件下,MCP 增益损耗随传输距离衰减的变化曲线,如图 4 所示。

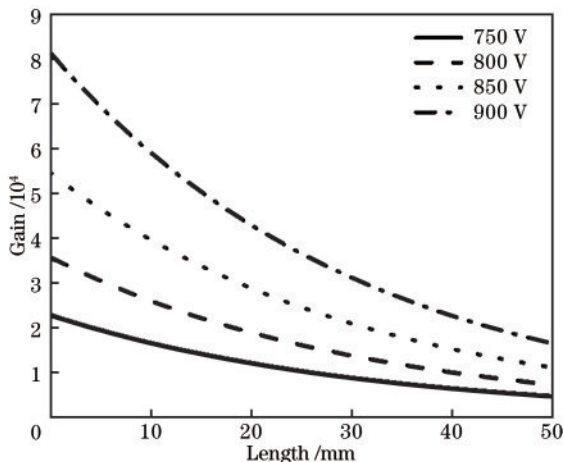


图 4 不同电压下 MCP 增益随传输距离的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of MCP gain with transmission distance under different voltages

由图 4 可知,随着电压在微带线上传输,所有曲线都呈现下降趋势,当电压脉冲传输到 40 mm 处,增益衰减为原来的 29%。

## 3 增益均匀性补偿

目前 MCP 增益均匀性补偿的方法主要有三种:直流电压补偿、微带末端反射补偿以及宽度渐变微带线补偿。

### 3.1 直流电压补偿

直流电压补偿法是指降低 MCP 高压选通脉冲的一部分幅值,并使用直流电压补偿的方式提供工作电压的方式。由式(3)可以得到 MCP 工作电压的幅值随传输距离衰减表达式为

$$U(x) = U_0 e^{-\alpha x}. \quad (13)$$

取比例系数  $\varphi$ ,且  $0 < \varphi \leq 1$ ,设高压脉冲幅值下调为原来的  $(1 - \varphi)$ ,并将下降的部分用直流电压代替,补偿后的电压表达式<sup>[6]</sup>为

$$U(x) = (1 - \varphi)U_0 e^{-\alpha x} + \varphi U_0, \quad (14)$$

则补偿后的传输比例系数为

$$f(x) = (1 - \varphi)e^{-\alpha x} + \varphi = e^{-\alpha x} + \varphi(1 - e^{-\alpha x}). \quad (15)$$

因为  $(1 - e^{-\alpha x}) > 0$ ,故使用该方法能使电压在一定程度上得到补偿。从式(15)可知,随着补偿比例  $\varphi$  增长,电压幅值补偿也逐渐变大。因门控分幅相机的 MCP 选通脉冲用于成像曝光,引入过大的直流电压将会导致成像本底增益过高,不利于图像的获取,故补偿直流电压需低于 500 V。本次模拟采用衰减系数为 0.0041 Np/mm,电压脉冲峰值为 800 V,补偿比例系数需小于 0.625。取不同的比例系数代入式(14),得到补偿后的电压随传输距离的变化曲线,如图 5 所示。

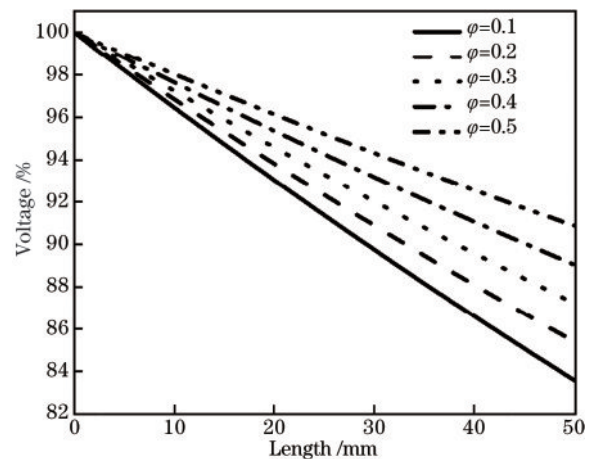


图 5 不同补偿系数下电压随传输距离的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of voltage with transmission distance under different compensation coefficients

从图 5 中可以看出,当补偿系数越大时,直流电压补偿越大,衰减比例越小,电压衰减幅度越小,衰减趋势平缓,符合理论分析结果。当补偿系数高于 0.4 时,

在 40 mm 处衰减比例小于 10%。

取电压脉冲幅值为 800 V, 计算直流补偿法对 MCP 增益的修正, 得到不同补偿系数下增益随传输距离的变化曲线, 如图 6 所示。

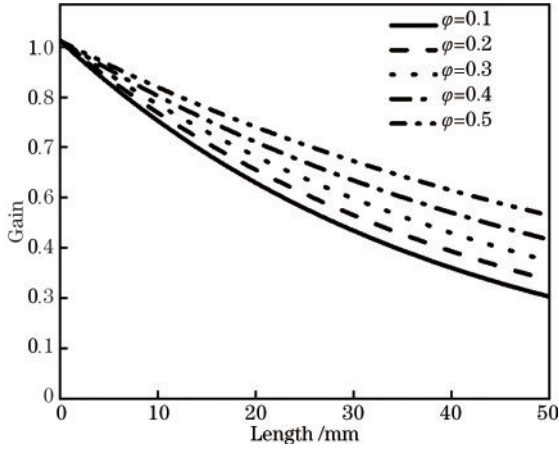


图 6 不同补偿系数下 MCP 增益随传输距离的变化曲线  
Fig. 6 Variation curves of MCP gain with transmission distance under different compensation coefficients

当补偿比例系数为 0.1 时, 微带线 40 mm 处的增益为  $1.33 \times 10^4$ , 衰减比例为 62.6%; 而补偿比例系数为 0.5 时, 40 mm 处的增益为  $2.1 \times 10^4$ , 衰减比例减少至 41.0%。从图 6 中可以看出, 当直流补偿比例越大时, 增益衰减越少, 补偿效果越明显。

### 3.2 微带末端反射补偿

在微带线上传输的电压脉冲为正向波与反射波的叠加。末端反射补偿主要是通过微带末端的反射波向反方向传输, 从而增大末端位置的电压来补偿传输过程中的电压损耗。假设微带线和末端耦合的传输线特性阻抗分别为  $Z_0$  和  $Z_1$ , 电压脉冲到达末端时从  $Z_0$  向  $Z_1$  传输。若反射系数为  $T$ , 反射前电压幅值为  $U$ , 则反射电压幅值  $U_1$  与传输后电压幅值  $U_2$ <sup>[6]</sup> 可表示为

$$U_1 = TU, \quad (16)$$

$$U_2 = (1 - T)U. \quad (17)$$

根据能量守恒, 反射前功率与反射后功率相等, 则有

$$\frac{U^2}{Z_1} = \frac{U_1^2}{Z_1} + \frac{U_2^2}{Z_2}. \quad (18)$$

由式(16)~(18)可得

$$T = \left| \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right|. \quad (19)$$

假设 MCP 上施加的电压脉冲是峰值为  $U_m$ 、半峰全宽为  $t_n$  的高斯负高压脉冲, 则电压的传输波形<sup>[10]</sup> 可表示为

$$U_t = U_m \exp \left\{ -4 \left[ \frac{(t - t_n)}{t_n} \right]^2 \ln 2 \right\}, \quad (20)$$

式中,  $t$  为脉冲的传输时间。电压脉冲在微带传输的速度为  $1.8 \times 10^8$  m/s, 取电压脉冲的半峰全宽为 300 ps,

得到电压脉冲随传输距离变化的波形为

$$U(x) = U_m \exp \left\{ -4 \left[ \frac{(x - x_0)}{0.054} \right]^2 \ln 2 \right\}. \quad (21)$$

将式(21)结合式(13), 得到在末端反射补偿条件下, 电压脉冲在微带线上传输的幅值变化<sup>[11]</sup> 为

$$U(x) = U_0 \exp(-\alpha x) + TU_0 \exp \left\{ -4 \left[ \frac{2(L - x)}{0.054} \right]^2 \ln 2 \right\} \exp[-\alpha(2L - x)], \quad (22)$$

令式中微带线长度  $L = 50$  mm,  $x$  为电压脉冲的传输距离, 衰减系数  $\alpha$  为 0.0041 Np/mm。模拟不同末端反射系数下, 电压脉冲在微带线传输的变化曲线, 如图 7 所示。

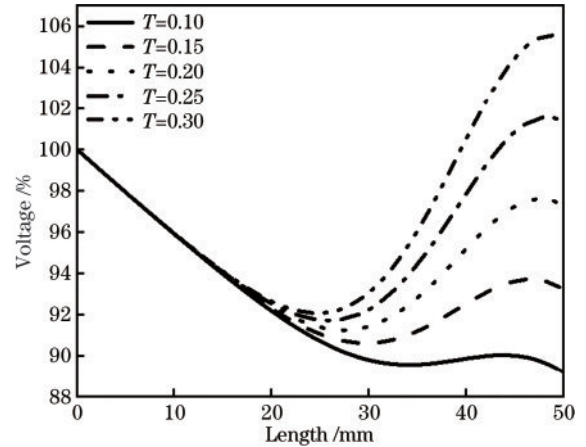


图 7 不同末端反射系数下电压随传输距离的衰减  
Fig. 7 Voltage attenuation with transmission distance under different end reflection coefficients

图 7 中, 所有反射比例下, 微带线末端电压幅值都具有一定程度的修正。反射比例越大时, 补偿比例越大。在 45 mm 处, 所有曲线的衰减比例都小于 10%, 其中, 反射比例为 0.3 时, 电压幅值修正到原来的 103.8%, 且最高达到 105.5%。而在微带线中间部分修正效果不明显。根据图 2 结果, 在 20 mm 处未修正前, 电压幅值衰减为原来的 92.33%; 而修正后电压幅值为原来的 92.89%, 修正比例较小。

计算在不同末端反射系数下, 微带线不同位置的增益变化, 得到增益变化曲线如图 8 所示。

对比图 7 的结果, 图 8 所示增益变化趋势与电压变化趋势相似。未补偿前, 40 mm 处增益为  $1.02 \times 10^4$ , 末端补偿后总体增益保持在 40% 以上。且反射比例越大, 增益补偿量越大。反射系数为 0.2 时, 40 mm 处增益为  $2.43 \times 10^4$ , 衰减比例从原来的 71.3% 下降到 32.0%, 增益得到较大的修正; 而中间位置修正比例较少, 在 25 mm 处, 原衰减比例为 53.6%, 修正后为 46.2%, 衰减比例仅下降了 7.4 个百分点。

对比上述结果, 末端发射补偿法对 MCP 增益衰减有较为明显的修正效果。经过补偿后, 末端位置电压

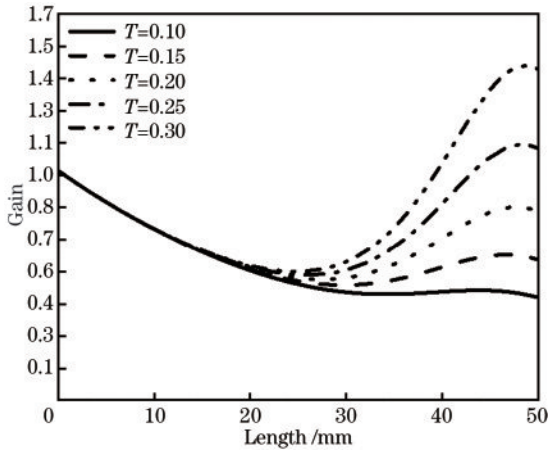


图 8 不同反射系数下微带线增益衰减变化曲线

Fig. 8 Gain attenuation curves of microstrip lines with different reflection coefficients

幅值衰减比例总体低于 11%，增益高于  $1.5 \times 10^4$ 。但中间位置衰减修正不明显，并未完全解决 MCP 增益不均匀的问题。

### 3.3 宽度渐变微带线补偿

宽度渐变微带线补偿法最早于 1994 年由 Watt 等<sup>[12]</sup>提出，并建立了实物模型进行仿真实验。实验结果显示，通过提高 10% 的微带线特性阻抗，即可降低 5% 的电压幅值衰减。实验证明了方法的可行性，但并未给出渐变微带线模型的定量分析。

使微带线的宽度呈指数型下降变化，即

$$W_2(x) = W_0 \exp(-kx), \quad (23)$$

式中： $x$  为电压脉冲的传输距离； $W_0$  为微带线的初始宽度； $k$  为指数衰减系数。令微带线初始宽度  $W_0$  为 6 mm，长度为 50 mm，末端位置宽度为 2 mm。根据式(23)，改变衰减系数，得到不同衰减系数渐变微带线的宽度变化，如图 9 所示。

从图 9 可以看出，指数衰减系数越大时，微带线宽

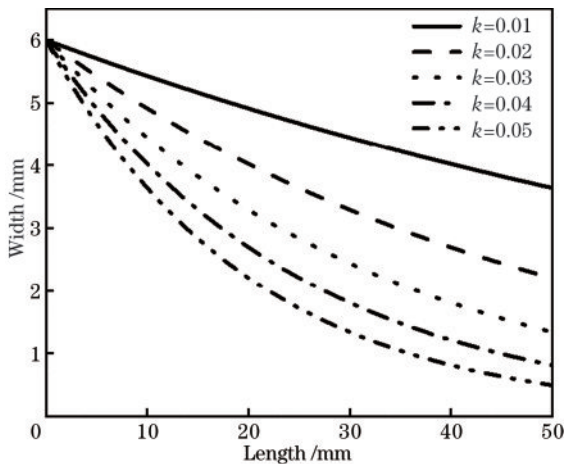


图 9 不同衰减系数指数型渐变微带线的宽度变化

Fig. 9 Width variation of exponentially tapered microstrip lines with different attenuation coefficients

度减少得越多；在 50 mm 处， $k=0.01$  的渐变微带线宽度衰减至 3.6 mm，而  $k=0.05$  的渐变微带线宽度衰减至 0.5 mm。将图 9 数据代入电压传输衰减模型以及 MCP 增益衰减模型，得到指数型渐变微带线上电压脉冲传输变化以及 MCP 增益补偿变化曲线，如图 10 和图 11 所示。

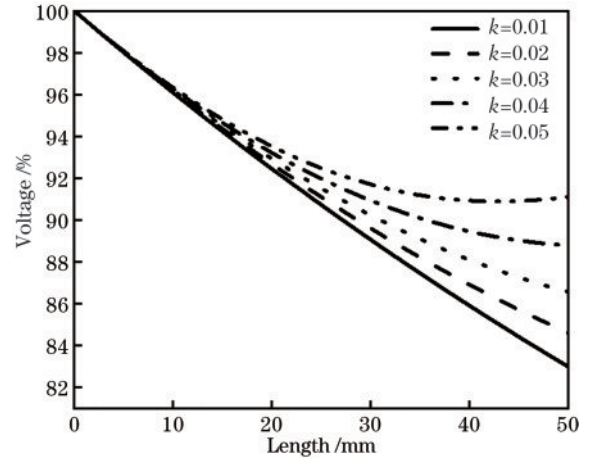


图 10 不同衰减系数指数型渐变微带线的电压变化

Fig. 10 Voltage variation of exponentially tapered microstrip lines with different attenuation coefficients

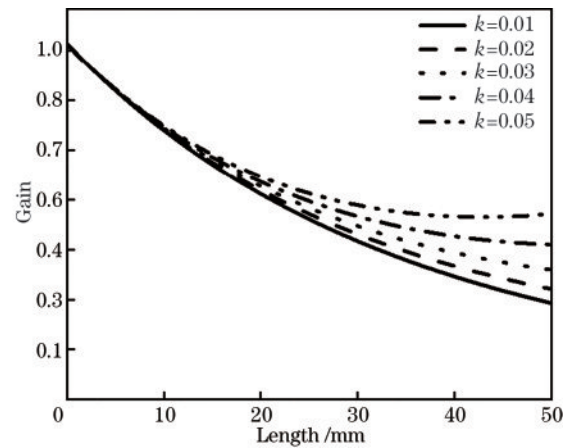


图 11 不同衰减系数指数型渐变微带线的增益变化

Fig. 11 Gain variation of exponentially tapered microstrip lines with different attenuation coefficients

图 11 说明，随着衰减系数的增加，指数型渐变微带线对电压衰减的补偿越大；当衰减指数为 0.05 时，电压传输幅值总体能维持在 90% 以上，增益衰减控制在 48% 以内。指数型渐变线在中间位置对于电压的补偿效果较好，且在末端能保持较高的电压。但模型对微带线宽度的减小过大，MCP 面积过小，反而削弱了末端位置的增益。

### 3.4 MCP 微带线补偿模型

根据上述分析，三种补偿方法对 MCP 微带都有一定的补偿效果，但也各有不足。其中，直流电压补偿法提高电压的同时，会增强背景噪声，不利于获取图像信

息;而末端反射法中,反射系数难以控制,实际操作难度较高;渐变微带线法在减少宽度的同时,也降低了 MCP 增益<sup>[11]</sup>。以下将结合三种方法,提出一种 MCP 微带线补偿模型。

对比图 5 和图 7 模拟结果可知,直流电压补偿法对微带线末端的补偿效果不及末端反射法。故在直流电压补偿的基础上引入末端发射传输系数,结合式(14)及式(22),得到直流电压补偿法结合末端反射法的电压传输表达式为

$$U(x) = (1 - \varphi)U_0 \exp(-\alpha x) + T(1 - \varphi)U_0 \cdot \exp\left\{-4\left[\frac{2(L-x)}{0.054}\right]^2 \ln 2\right\} \cdot \exp[-\alpha(2L-x)] + \varphi U_0, \quad (24)$$

式中: $\varphi$ 为直流电压补偿系数; $T$ 为末端反射系数。根据 3.2 以及 3.3 节仿真结果可知,取  $\varphi$  为 0.25、 $T$  为 0.2 时,可在不引入过大背景噪声的同时减少末端电压衰减幅值。根据式(24),得到结合两种补偿方法下,电压幅值随传输距离的变化曲线,如图 12 所示。

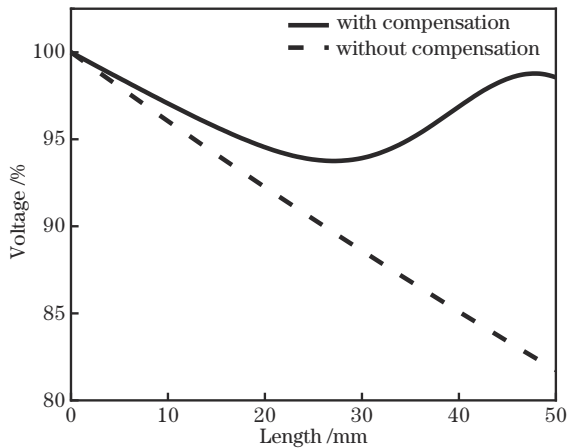


图 12 直流电压及末端反射补偿法电压随距离的变化  
Fig. 12 Voltage variation with distance under voltage and end reflection compensations

由图 12 可知,采用直流电压补偿结合末端反射补偿法对微带前端以及末端都有较明显的补偿效果。在中间部分 27 mm 处,有电压峰值最低点,为电压初始峰值的 93.7%。

上述方法对微带中间位置补偿仍然不足。引入渐变微带线法,通过牺牲微带中间位置的宽度,降低衰减系数,从而提高中间位置的电压幅值。令微带宽度随传输距离呈幂次减小,其结构如图 13 所示。

图 13 中, $a$ 为微带线最小宽度时的位置, $b$ 为微带线最小宽度, $c$ 为微带线初始宽度, $l$ 为微带线长度。令前半段和后半段的幂次分别为  $k_1$ 、 $k_2$ ,则微带宽度与传输距离的关系可表示为

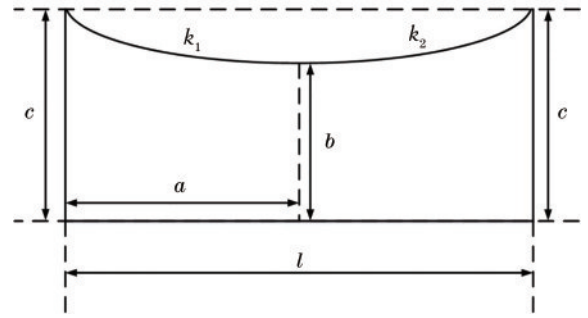


图 13 中间渐变微带线结构  
Fig. 13 Structure of intermediate tapered microstrip line

$$W(x) = \begin{cases} \frac{c-b}{(-a)^{k_1}}(x-a)^{k_1} + b & x < a \\ \frac{c-b}{(l-a)^{k_2}}(x-a)^{k_2} + b & x \geq a \end{cases}. \quad (25)$$

由图 12 可得,在微带线 27 mm 处补偿效果最弱。故取  $a$  为 27 mm、 $c$  为 6 mm、 $l$  为 50 mm、 $k_1$  和  $k_2$  都为 2。令  $b$  取不同宽度,得到结合三种补偿方法时,电压峰值随传输距离的变化曲线,如图 14 所示。

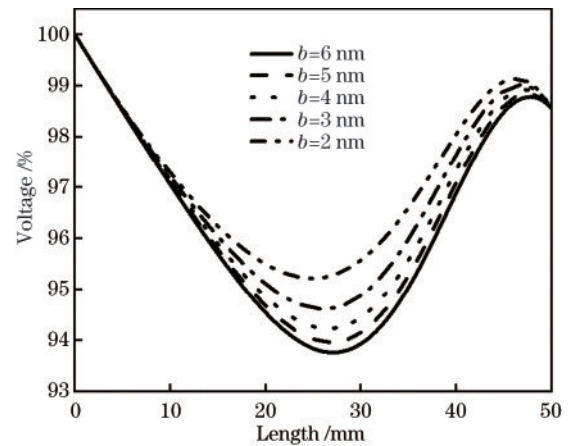


图 14 补偿模型下电压衰减随传输距离的变化  
Fig. 14 Variation of voltage attenuation with transmission distance in compensation model

由图 14 可知,中间宽度越低,对电压的补偿量越高。在 27 mm 处宽度取 2 mm 时,电压幅值总体高于 95%;在 27 mm 处宽度取 4 mm 时,电压幅值总体高于 94%。

补偿后,MCP 增益随传输距离的变化如图 15 所示。对比图 14 和图 15,MCP 增益与电压随传输距离的变化趋势相似。当最小宽度为 4 mm 时,增益总体维持在 66% 以上,补偿效果明显。

## 4 结 论

从微波通信的角度,对电压脉冲在 MCP 微带线的传输模型进行了理论分析和验证。模拟了在长度为

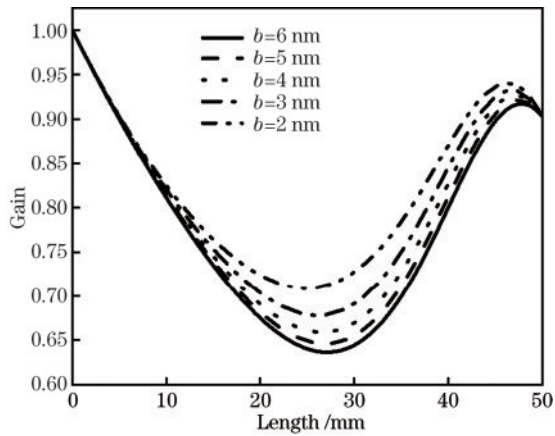


图 15 补偿模型下 MCP 增益随传输距离的变化

Fig. 15 Variation of MCP gain with transmission distance in compensation model

50 mm、宽度  $W$  为 6 mm、厚度  $t$  为  $0.1 \mu\text{m}$ 、电阻率  $\rho_1$  为  $2.4 \times 10^{-11} \Omega/\text{mm}$  的微带线上电压脉冲传输的幅值以及增益衰减模型。结果显示,电压脉冲幅值呈指数式衰减,且衰减系数为  $0.0041 \text{ Np/mm}$  时,在微带线 40 mm 处,电压幅值衰减至原来的 85%,MCP 增益衰减至原来的 29%。分析了目前三种 MCP 增益均匀性补偿方法的原理,并对其进行模拟验证。其中,直流电压补偿法不需要改变微带线的结构,实现简单;但由于 MCP 选通脉冲电压用于曝光成像,直流补偿电压量不能过大,有一定的限制。而末端反射补偿法对于末端部分的微带线增益补偿较大,但中间部分增益仍然不足,无法应用于长微带线。渐变微带线补偿法对于微带线的各部分都有补偿,但需要牺牲末端微带线的宽度,从而降低微带线增益。最后,结合三种补偿方法的特点,得到一种增益均匀性补偿模型。当微带线最小宽度取 4 mm 时,电压传输幅值维持在 94% 以上,MCP 增益维持在 66% 以上。

### 参 考 文 献

[1] 田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(11): 112003.  
Tian J S. Introduction to development of streak and framing cameras[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112003.

[2] 张小东, 欧阳晓平, 何军章, 等. 微通道板的增益研究[J]. 核技术, 2019, 42(10): 50-54.  
Zhang X D, Ouyang X P, He J Z, et al. The study on the gain of microchannel plate[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(10): 50-54.

[3] Kilkenny J D. High speed proximity focused X-ray cameras[J]. Laser and Particle Beams, 1991, 9(1): 49-69.

[4] 李云峰, 陈韬, 袁铮, 等. 门控分幅相机增益均匀性优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1459-1462.  
Li Y F, Chen T, Yuan Z, et al. Optimization of framing camera gain uniformity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1459-1462.

[5] Rochau G A, Wu M, Kruschwitz C, et al. Measurement and modeling of pulsed microchannel plate operation (invited)[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 10E902.

[6] McCarville T, Fulkerson S, Booth R, et al. Gated X-ray intensifier for large format simultaneous imaging[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(10): 103501.

[7] 闫润卿. 微波技术基础[M]. 5版. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.  
Yan R Q. Fundamentals of microwave technology[M]. 5th ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020.

[8] (美) David M. Pozar. 微波工程[M]. 4版. 谭云华, 周乐柱, 吴德明, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2019.  
Pozar D M. Microwave engineering[M]. 4th ed. Tan Y H, Zhou L Z, Wu D M, et al., Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.

[9] Oertel J A, Archuleta T N, Schrank L S. The large format X-ray imager[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 701-704.

[10] 杨文正, 白永林, 秦君军, 等. 软 X 射线皮秒分幅相机的增益压窄效应[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(5): 755-760.  
Yang W Z, Bai Y L, Qin J J, et al. Gain narrowing effect of soft X-ray picoseconds framing camera[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(5): 755-760.

[11] 李云峰. 门控分幅相机增益特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
Li Y F. Study on gain character of gated framing camera [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[12] Watt R G, Oertel J, Archeluta T. Gated X-ray imager gain correction using a tapered microchannel-plate stripline [J]. Review of Scientific Instruments, 1994, 65(8): 2585-2586.