

文章编号: 2096-1618(2023)06-0656-05

一种石墨烯基宽带可调衰减器

唐金平, 陈昌明, 李一庚

(成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:提出了一种工作在频带 2 ~ 6 GHz 的小步进、宽动态范围的石墨烯可调衰减器。衰减器采用微带线两边并接石墨烯电阻的结构。通过两组直流电压调节多层石墨烯的阻抗, 可实现对衰减量的控制。利用 HFSS 软件对石墨烯方块电阻尺寸优化仿真, 采用滴涂工艺沉积得到精确的石墨烯电阻值, 实现了小步进衰减。测试结果表明, 在工作频带内衰减器能够实现 4.5 ~ 55.8 dB 的动态范围衰减, 能够达到的最小衰减步进值为 0.4 dB, 回波损耗优于 10 dB。研究成果为射频宽带可调衰减器的设计提供了可供选择的一种方案。

关键词:石墨烯; 宽带; 动态范围

中图分类号: TN715

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2023.06.006

为增加接收机的动态范围, 防止强信号引起的接收机饱和, 可调衰减器在通信系统中具有广泛的应用^[1]。为适应现代通信系统的发展, 目前对结构简单、调试方便、具有小衰减步进的射频衰减器需求日益增加。近来, CMOS 工艺技术、铁氧体及纳米材料已被用于射频可调衰减器及移相器的设计^[2-6], 并展现了优异的电磁性能。Pierantoni L 等^[7]将石墨烯纳米片沉积电阻嵌入微带线, 设计了工作在频带 1 ~ 20 GHz 的石墨烯宽带可调衰减器。M. Yasir 等^[8-10]通过在传输线两侧并接石墨烯纳米片沉积电阻, 提出了几种大动态范围可调衰减器, 为设计大动态范围的石墨烯可调衰减器提供了一种可行的方案。Zhang 等^[11-12]采用石墨烯三明治结构(GSS)设计了基于基片集成波导的可调衰减器, 该结构具有低反射系数, 但结构相对复杂, 动态范围较小。吴边等^[13]通过在谐振器上加载石墨烯, 完成了一种具有双通带的衰减器设计。但上述研究中的大部分衰减器未对衰减器可实现的最小步进精确值做进一步研究, 使其应用受到限制。

为此, 本文提出一种工作在频带 2 ~ 6 GHz, 具有小步进、大动态范围的石墨烯可调衰减器。通过优化石墨烯电阻尺寸, 采用两组直流偏置电压对石墨烯阻抗进行精细调节, 获得了衰减步进值最小可达到 0.4 dB 的大动态范围石墨烯可调衰减器。

1 石墨烯衰减器结构设计

衰减器结构如图 1 所示, 由沉积的石墨烯电阻、基

板、微带线和接地通孔构成。衰减器结构关于 a-a' 对称, 所有石墨烯电阻间距均为 $\lambda_0/4$, λ_0 为中心频率 (4 GHz) 的信号在传输线上的波长。接地通孔直径均为 0.6 mm。介质基板为 0.6 mm 厚的 FR4, 相对介电常数 ϵ_r 为 4.7, 损耗角正切 $\tan\delta$ 为 0.02。为获得最佳的电磁性能, 采用 HFSS 优化后的几何尺寸参数如表 1 所示。

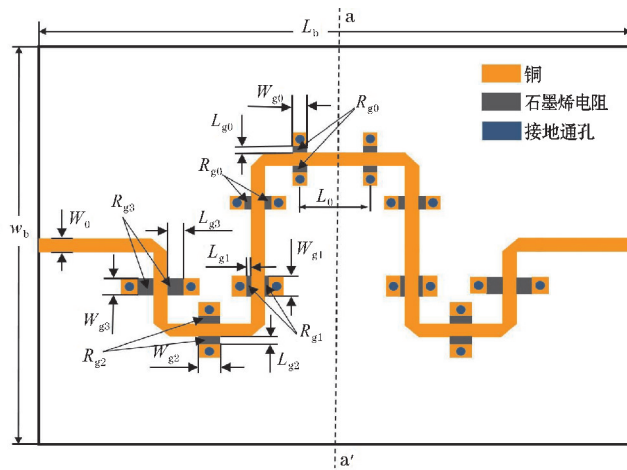


图1 石墨烯衰减器结构

表1 石墨烯衰减器仿真模型尺寸参数表 单位: mm

参数	数值	参数	数值
W_b	500	W_{g2}	2
L_b	700	W_{g3}	1.5
W_0	1.1	L_{g0}	0.66
L_0	10	L_{g1}	0.5
W_{g0}	1.4	L_{g2}	1
W_{g1}	2	L_{g3}	1.5

根据 Kubo 公式,石墨烯在微波段主要呈现电阻特性^[14-16]。因此,为方便分析,可将沉积在微带线两侧的多层石墨烯等效为理想电阻。经过 HFSS 仿真优化发现,将图 1 中的石墨烯电 R_{g0} 、 R_{g1} 、 R_{g2} 、 R_{g3} 的阻值按 1:2:4:8 的比例设计时,可以使得整个衰减器的反射系数最小。石墨烯电阻的阻值计算公式如下:

$$R_{gi} = \frac{L_{gi}}{W_{gi}} R_{\square} \quad (i=0, 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中, L_{gi} 和 W_{gi} 分别为石墨烯电阻的长和宽, R_{\square} 为石墨烯方块电阻。因此,根据上述石墨烯电阻比值和式 (1) 可以得出石墨烯电阻几何尺寸。

图 2 是单节衰减单元的简化电路结构。图中 $R_g = R_{g0}/2$, 为微带线两侧石墨烯电阻的并联值。 Z_0 为微带线特征阻抗, θ 为微带线电长度, 在中心频率处 $\theta=90^\circ$ 。单节衰减单元的衰减量 L_1 的计算公式为^[17]

$$L_1 = 20 \lg \left| \cos \theta + j \frac{Z_0}{R_{g0}} \sin \theta + \sqrt{-\sin^2 \theta \left(1 + \frac{Z_0^2}{R_{g0}^2} \right) + j \frac{Z_0}{R_{g0}} \sin 2\theta} \right| \quad (2)$$

整个衰减器由 10 个衰减单元级联而成。因此其总衰减值为各衰减单元衰减值的总和。当 R_{g0} 取最小值为 33 Ω 时, R_{g1} 、 R_{g2} 和 R_{g3} 分别为 66 Ω 、132 Ω 和 264 Ω 。此时, 将各衰减单元的衰减值相加后可得, 整个衰减器的最大衰减值约为 63.66 dB。

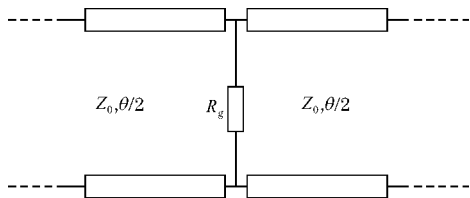
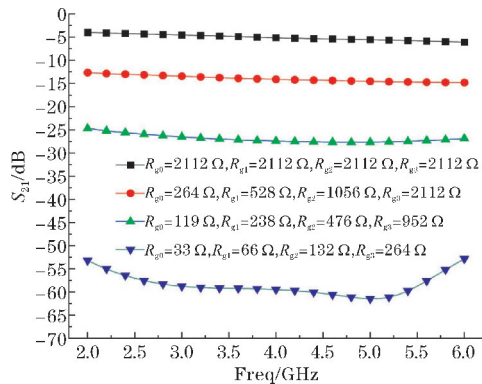


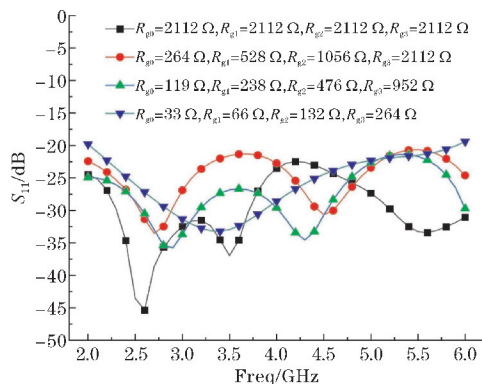
图2 单节衰减单元

通过实验发现,按照表 1 中的石墨烯尺寸参数来设计时,石墨烯电阻的阻值均在 2112 Ω 以下。因此,为使仿真更接近真实情况,仿真时所有石墨烯电阻的最大阻值均取 2112 Ω 。

图 3 (a) 为 S_{21} 的仿真结果,可以看出在频 2 ~ 6 GHz, 衰减量随石墨烯电阻减小逐渐增大, 其衰减动态范围为 4 ~ 61 dB。且 S_{21} 的频带内平坦度随着衰减量增大而不断恶化。当衰减器达到最大衰减时, S_{21} 波动达到 8 dB。因此在带内平坦度要求较高时, 应在较小的衰减范围内使用。图 3 (b) 给出了 S_{11} 的 HFSS 仿真结果。由图可知, 在整个工作频段内 S_{11} 优于 -18 dB, 表明该设计实现了电路的良好匹配。



(a) S_{21}



(b) S_{11}

图3 S 参数仿真结果

2 测试结果及分析

图 4 为衰减器实物图。采用滴涂工艺,将购于南京先锋纳米公司的石墨烯纳米片分散液滴涂在 PCB 上,沉积成石墨烯电阻,如图 5 所示。为减小滴涂难度,设计时对石墨烯电阻 R_{g1} 、 R_{g2} 、 R_{g3} 的尺寸进行了调整,最终结果如表 1 所示。此时,若仍然采用同一控制电压,则石墨烯电阻的比值将不再符合反射系数最小的条件。因此采用了两组直流偏置电压 V_1 、 V_2 进行调节。不仅可以通过设置 V_1 和 V_2 为不同的电压值来获得低反射系数,还可以实现衰减量的精细化调节。

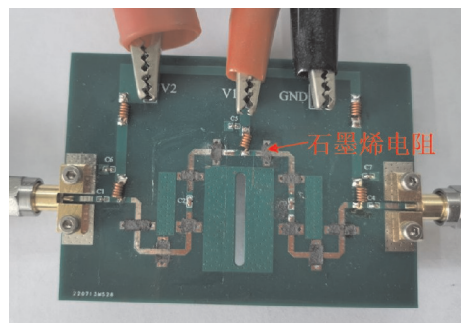


图4 衰减器实物图

衰减器 S 参数测试采用安捷伦 N5244A 矢量网络分析仪。测试时,通过对 V_1 端口的输出电流进行测量,得出了 R_{g0} 与电压 V_1 的关系,如图 5 所示。由图 5

可知, R_{g0} 随 V_1 增大而减小。当电压 V_1 从 0 V 上升到 3 V 时, R_{g0} 迅速下降, 而当 $V_1 > 3$ V 时 R_{g0} 则变化缓慢。当 $V_1 = 0$ V 时, 使用万用表测得 $R_{g0} = 1678 \Omega$ 。当 $V_1 = 5$ V 时, 测得 R_{g0} 为 47Ω 。

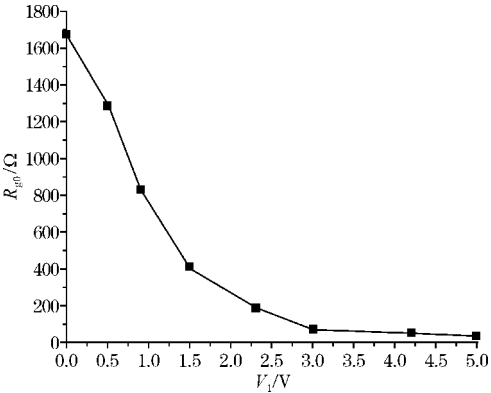


图5 R_{g0} 与 V_1 的对应关系

选取 4 组不同 V_1 、 V_2 电压取值下的 S_{21} 参数, 如图 6 所示。测试结果表明, 衰减量随 V_1 、 V_2 增大而逐渐增加。当 V_1 、 V_2 均为零时, 衰减器工作在直通状态, 不对射频信号进行衰减, 测得插入损耗为 4.5 dB。当 V_1 、 V_2 分别为 5 V 和 3 V 时, 测得的最大衰减为 55.8 dB。由此可知, 当 V_1 、 V_2 的调谐范围分别为 0 ~ 5 V 和 0 ~ 3 V 时, 衰减器衰减范围可达 4.5 ~ 55.8 dB。通过对控制电压的精确调节, 测得了 $V_1 = 1.5$ V、 $V_2 = 0.89$ V 和 $V_1 = 1.55$ V、 $V_2 = 0.93$ V 时的 S_{21} 参数, 如图 7 所示。经过对比分析可知, 衰减步进可达 0.4 dB。

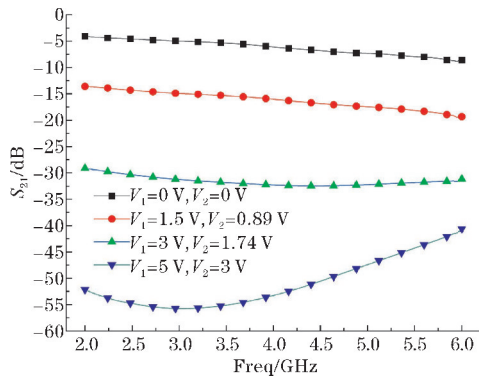


图6 S_{21} 测试结果

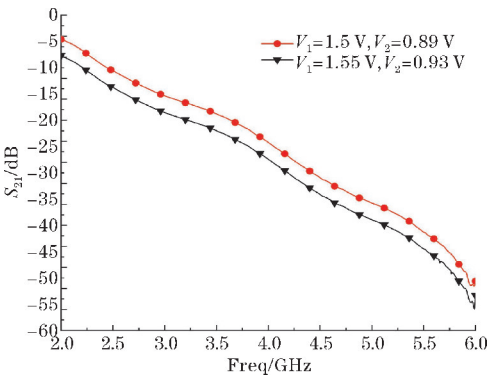


图7 衰减步进

图 8 为 S_{11} 测试结果。由图 8 可知, S_{11} 随控制电压 V_1 、 V_2 的变化不大, 且低于 -10 dB。表明衰减器在不同衰减状态下具有稳定的、较低的反射系数。 S_{11} 随频率升高而增大。当频率高于 3.5 GHz 时, $S_{11} > -15$ dB。高频段匹配性能变差的主要原因是 FR4 板材的高频性能欠佳。并且装配误差和元件的焊接质量等因素也会导致射频信号的反射。

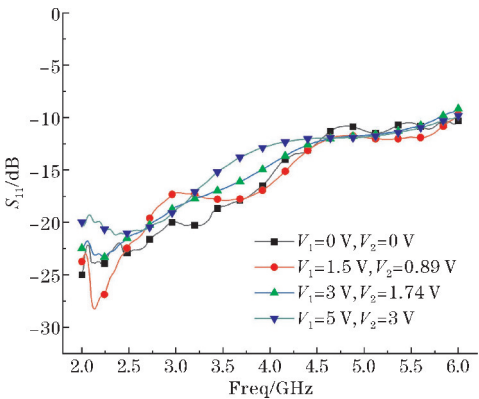


图8 S_{11} 测试结果

为考察衰减器的相位特性, 对衰减器的相位特性进行了测试。在 $V_1 = 5$ V、 $V_2 = 3$ V 的最大衰减条件下测得的结果如图 9 所示。测试频率范围为 1 ~ 7 GHz。从图 9 可以看出, 该衰减器具有良好的相位线性度。

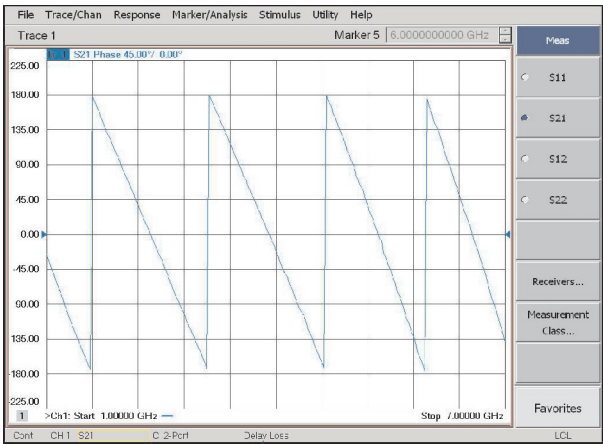


图9 相位测试结果

提出的衰减器和相关文献部分性能对比如表 2 所示。该衰减器采用了非等值衰减单元级联结构, 与等值衰减单元级联结构相比^[8], 在衰减单元数相同的情况下, 最大衰减有所减小, 但具有较低的反射系数, 匹配性能良好。与采用基片集成波导结构的衰减器相比^[11-12], 本文提出的衰减器结构更容易获得大动态范围。因此, 本文提出的衰减器具有动态范围大、衰减步进小和反射系数低的优势。

表 2 本设计衰减器和相关文献性能对比

文献	最小衰减/dB	最大衰减/dB	最大 S ₁₁ /dB	工作频带/GHz	偏置电压/V
文献[8]	3.9	48	-5	1~10	0~7
文献[11]	2	15	-15	7~14.5	0~4
文献[12]	3	14	-20	7.7~19	0~4
文献[18]	3	20	-14	6~9	0~4
本文	4.5	55.8	-10	2~6	0~5

3 结束语

提出了一种工作在频带 2~6 GHz 的小衰减步进、大动态范围石墨烯可调衰减器。通过增加级联的石墨烯电阻衰减单元,获得了 4.5~55.8 dB 的大动态衰减范围。采用两组直流偏置电压对衰减量进行精细化调节,实现了 0.4 dB 的最小衰减步进值。解决了石墨烯可调衰减器难以兼顾大动态范围和小衰减步进的问题。为射频宽带可调衰减器的设计提供了可供选择的一种方案。

参考文献:

[1] 谷涛. 数控衰减器在雷达 DAGC 系统中的应用[J]. 现代电子技术,2009,32(16):2.

[2] Abdalla I L, Allam A, Pokharel R, et al. A DC-2.5 GHz voltage variable attenuator in 0.18-μm CMOS technology[C]. IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems(APCCAS).0,2014.

[3] T Zhao,Q Li,L Xu,et al. A Ka-band 7-bit Digital Attenuator with Temperature Compensation Technique in 40nm CMOS[C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT),2021:1-3.

[4] Munk B A. Frequency Selective Surfaces[M]. New York:Wiley Press,2000:401-404.

[5] 杨士成,林卓,徐美娟,等. 频率和幅度双可调铁氧体 LTCC 衰减器[J]. 微波学报,2018,34(6):7.

[6] 张安琪. 基于石墨烯的动态可调微波衰减器,移相器研究[D]. 南京:东南大学,2019.

[7] Pierantoni L,Mencarelli D,Bozzi M,et al. Broadband Microwave Attenuator Based on Few Layer Graphene Flakes[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory

and Techniques,2015,63(8):2491-2497.

[8] Yasir M,Bistarelli S,Cataldo A,et al. Voltage-Controlled and Input-Matched Tunable Microstrip Attenuators Based on Few-Layer Graphene[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2020,68(2):701-710.

[9] Yasir M,Bozzi M,Perregrini L,et al. Highly tunable and large bandwidth attenuator based on few-layer graphene[C]. IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). IEEE,2017.

[10] Yasir M,Bistarelli S,Cataldo A,et al. Enhanced Tunable Microstrip Attenuator Based on Few Layer Graphene Flakes[J]. Microwave and Wireless Components Letters,IEEE,2017,27(4):332-334.

[11] Zhang A Q,Lu W B,Liu Z G,et al. Dynamically Tunable Substrate-Integrated-Waveguide Attenuator Using Graphene[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2018:1-9.

[12] Zhang A,Liu Z,Lu W,et al. Graphene-based dynamically tunable attenuator on a half-mode substrate integrated waveguide[J]. Applied Physics Letters,2018,112(16):161903.

[13] 樊炽,吴边. 谐振器加载石墨烯的双通带可调滤波衰减器设计[J]. 微波学报,2022(4):038.

[14] Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene[J]. Journal of Applied Physics,2008,103(6):064302.

[15] Gusynin V P,Sharapov S G,Carbotte J P. Magneto-optical conductivity in graphene[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2006, 19 (2): 026222.

- [16] Gan C H, Chu H S, Li E P. Synthesis of highly confined surface plasmon modes with doped graphene sheets in the midinfrared and terahertz frequencies[J]. Physical Review B, 2012, 85(12): 125431.
- [17] 顾其铮, 项家桢, 袁孝康. 微波集成电路设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1978: 615.
- [18] Tian D, Kianinejad A, Zhang A, et al. Graphene-Based Dynamically Tunable Attenuator on Spoof Surface Plasmon Polaritons Waveguide[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(6): 388–390.

A Graphene-based Broadband Tunable Attenuator

TANG Jinping, CHEN Changming, LI Yigeng

(College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A graphene-based tunable attenuator with a small step and wide dynamic range operating in the frequency range of 2 to 6 GHz is proposed in this paper. The attenuator consists of several groups of multilayer graphene resistors attached to both sides of the microstrip line. Two DC voltages are used to adjust the impedance of the multilayer graphene, thus realizing the control of the attenuation. The size of the graphene square resistance is optimized using HFSS software, and the precise graphene resistance values are ensured by a drop-coating deposition process, thus achieving a small step attenuation. The experimental results show that the return loss of the attenuator is better than 10 dB in the operating frequency band, and its minimum attenuation step value can reach 0.4 dB and attenuation dynamic range is 4.5–55.8 dB. The research results provide an idea for the design of an RF broadband adjustable attenuator.

Keywords: graphene; broadband; dynamic range