高功率电磁脉冲产生技术与应用

高怀林^{1,2*}, 张志强^{1,2*}, 高冬平^{1,2*}, 张兆传^{1,2}, 阴生毅^{1,2}, 丁耀根^{1,2}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 高功率微波源与系统发展部, 北京 100190;

2. 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190

*联系人, 高怀林, E-mail: ghlnetmail@sina.com; 张志强, E-mail: zhangzq@aircas.ac.cn; 高冬平, E-mail: dongpinggao@mail.ie.ac.cn

收稿日期: 2021-03-10; 接受日期: 2021-07-07; 网络出版日期: 2021-08-23

国家自然科学基金(编号: 10475081)资助项目

摘要 本文将近年来高功率电磁脉冲的产生技术、实验研究进展、辐射效应实验研究进展、未来发展趋势和潜在应用价值进行了总结与分析. 着重讨论了在这一研究领域内突破的重大核心关键技术与取得的重要进展. 因为基于这些先进的核物理技术与等离子体物理技术, 已经产生了脉冲前沿为75–300 ps、脉冲宽度为300 ps–2.5 ns, 峰值功率为450 MW–80 GW, 辐射频率为100 MHz–4 GHz的极端高功率超短超快电磁脉冲辐射, 并在辐射效应实验中得到了光电子器件与微控制器等不同目标的辐射损伤阈值10–107 kV/m. 这些基础科学技术研究成果对于国防尖端科学技术研究与国防装备研制具有重大的支撑作用.

关键词 电磁脉冲技术, 电磁脉冲辐射, 高功率微波技术, 脉冲功率技术

PACS: 84.40.-x, 52.27.Ny, 07.57.Hm, 52.77.Fv, 78.70.Gq

1 引言

高功率电磁脉冲辐射是当前人类在实验室可以产生的一种具有最短脉冲宽度、最快脉冲前沿、最大辐射功率的超宽带相对论型微波辐射脉冲. 其最小脉冲宽度已经达到 $\tau_0=300$ ps, 最快脉冲前沿已经达到 $\tau_r=75$ ps、最高辐射功率已经达到 $P_0=80$ GW、辐射频率已经可以覆盖 $f_0=50$ MHz–4 GHz的频率范围. 因此, 可以在实验室环境下模拟核爆产生的电磁辐射脉冲, 在实验室内模拟核爆电磁脉冲辐射效应. 所以, 在核科学技术研究领域一直为科学家所关注. 将这种实验室电磁脉冲产生技术称之为核电磁脉冲模拟技术, 将这种

产生电磁脉冲辐射的实验装置称之为核电磁脉冲模拟器(Nuclear Electromagnetic Pulse Simulator, NEMP Simulator). 当前, 不同国家与不同实验室已有的电磁脉冲辐射源已经达到了如下实验指标: $\tau_0=300$ ps–2.5 ns, $\tau_r=75$ –700 ps, $P_0=1.0$ –59 GW, $f_0=50$ MHz–4 GHz. 此外, 作为一种可能的潜在应用, 伴随电磁脉冲产生技术发展起来的先进脉冲功率技术(即皮秒开关技术与300 ps–2.5 ns超短脉冲成形线技术), 可以用来驱动冷阴极电子枪, 探索产生峰值电流为 10^2 kA数量级、脉冲宽度为 10^2 ps–2.5 ns数量级的超强超短电子束脉冲与超高分辨率X射线闪光照像, 这在核武器库存管理与国防装备应用研究工作中具有非常重要的应用价

引用格式: 高怀林, 张志强, 高冬平, 等. 高功率电磁脉冲产生技术与应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 092007

Gao H L, Zhang Z Q, Gao D P, et al. Generation of high-power electromagnetic pulses and its application to radiation effect research: A review (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 092007, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0060](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0060)

值. 所以, 相对论型高功率电磁脉冲产生技术研究一直为各国核技术领域的科学家所关注.

本文首先介绍相对论型高功率电磁脉冲产生技术与国际实验研究进展, 特别是最具代表性的美国空军实验室研究成果与未来发展方向; 然后, 简述国际辐射效应实验研究进展; 最后介绍国内的研究动态.

2 高功率电磁脉冲产生技术

产生相对论型电磁脉冲辐射的基本原理可以概括如下^[1]. 首先, 采用马克斯发生器产生一个 1 MV, 1 μ s 数量级的电压脉冲; 然后, 利用纳秒脉冲成形线技术将这个电压脉冲压缩到 1 MV, 10 ns 数量级; 最后, 利用皮秒脉冲成形线技术进一步将这个电压脉冲压缩到 500 kV–1 MV, 300 ps–2.5 ns 数量级, 并经过脉冲传输线与微波天线发射出去. 其物理模型示意图与工程结构示意图如图 1 所示^[2]. 在此脉冲压缩过程中, 通过采用布卢姆脉冲成形线技术(Blumlein Pulse Forming Line), 或采用脉冲成形线阻抗不匹配技术与电容不匹配技术, 以便最大限度地克服脉冲电压减小现象. 也就是说, 在脉冲压缩过程中, 脉冲的缩短是以牺牲脉冲能量为代价的.

由于电磁辐射脉冲在理论上是一个矩形脉冲, 这种脉冲在数学上称之为冲击函数(Impulse Function)或狄拉克 $\delta(t)$ 函数(Dirac Delta $\delta(t)$ Function), 因此在核科学技术研究领域美国空军实验室有时也将这种超宽带微波辐射脉冲称之为冲击辐射(Impulse Radiation).

在实际的工程设计中, 有的实验室采用特斯拉脉冲变压器来替代马克斯发生器, 以便实现更高重复频率工作; 有的实验室采用布卢姆莱因脉冲成形线(Blumlein Pulse Forming Line, Blumlein PFL)以便提高电磁辐射脉冲的峰值电压和峰值功率. 例如, 在图 1(b)

中, 美国空军实验室所设计的 H-3 超宽带高功率电磁脉冲辐射源就采用了 500 kV、2 kHz 的特斯拉脉冲变压器技术, 皮秒脉冲成形线就采用了布卢姆莱因脉冲成形线技术^[2-5].

在图 1(a)所示的物理模型中, 由皮秒脉冲成形线所产生的电磁脉冲, 其峰值功率 P_0 、脉冲宽度 τ_{ps} 和脉冲上升前沿 τ_r 分别由方程(1)–(3)给出.

$$P_0 = \frac{V_{ps-PFL}^2}{Z_{ps-PFL}}, \quad (1)$$

$$\tau_{ps} = \frac{2l_{ps-PFL}}{C} \sqrt{\epsilon_r}, \quad (2)$$

$$\tau_r = 2.2 \times \frac{L_{ps-SW}}{Z_A}, \quad (3)$$

式中, Z_{ps-PF} , l_{ps-PFL} 和 ϵ_r 分别为皮秒脉冲成形线的阻抗、几何长度与同轴线绝缘介质的相对介电常数; L_{ps-SW} 为皮秒开关的短路电感, Z_A 为皮秒脉冲成形线负载的波阻抗. 正是由于这个电感的存在, 所以物理模型中的输出脉冲 $V_{ps}(t)$ 并不是理想的矩形脉冲, 而是一个具有一定上升前沿的脉冲波形. 其微波辐射脉冲的中心频率 f_c (GHz) 和频率分布与强度由方程(4)和(5)决定. 其中, 方程(5)是电磁脉冲输出功率的傅里叶变换.

$$f_c = 0.35 \times \frac{1}{\tau_r}, \quad (4)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{Z_{ps}} \int_{-\infty}^{\infty} V_{ps}^2(t) \times e^{-i\omega t} dt. \quad (5)$$

由方程(3)和(4)可见, 皮秒开关的短路电感不仅决定着微波脉冲的前沿上升时间, 而且决定着微波辐射频谱的中心频率. 例如, 100 ps 的脉冲上升时间就意味着皮秒开关的总电感 $L_{ps-SW} \approx 2$ nH. 现在的实验研究工作表明, 要满足 $L_{ps-SW} = 2$ –10 nH 的工程设计要求, 开关电极间距 $d = 0.7$ –1.5 mm. 但是, 此时开关电极的工作电

图 1 (网络版彩图)高功率电磁脉冲产生的物理模型(a)与工程结构示意图(b)^[2]. 图片已获得使用授权

Figure 1 (Color online) The physical model (a) and engineering structure (b) of high power electromagnetic pulse generation [2]. Reprinted from ref. [2], with permission of IEEE Publishing Copyright © 1998.

压却高达 $V_{ps}=300\text{ kV}-2\text{ MV}$. 这意味着开关电极之间的电场强度已经达到 $E_{ps-SW}=1.5-10\text{ MV/cm}$. 所以, 为了使皮秒开关能够承受住如此极端的高电场强度, 工作于开关内的绝缘气体(H_2 , N_2 , SF_6)的压强就得高达 $P_{res}=10-30\text{ MPa}$, 即 $100-300\text{ atm}$. 也就是说, 电磁脉冲工程结构同时要承受 $300\text{ kV}-2\text{ MV}$ 的极端高电压、 $1.5-10\text{ MV/cm}$ 的极端高电场强度、与 $100-300\text{ atm}$ 的极端高气体压强, 从而挑战着工程设计技术极限, 挑战着工程材料的应用极限. 下面的国际研究进展将会展示在这种极端前沿工程科学技术研究工作中所取得的技术突破、已经产生的最短脉冲宽度、最短脉冲上升时间和最高辐射功率以及辐射频谱分布.

3 实验研究进展

在电磁脉冲技术研究领域, 美国空军实验室不仅是这一研究领域的开拓者, 而且在这一研究领域具有当今世界最高研究水平, 其研究成果也最具代表性. 所研制的H-系列^[1-5]、IRA-系列^[6,7]、UWB-HPTS-系列电磁脉冲辐射源^[8,9], 代表着不同的核心技术突破, 与产生GW级高功率电磁脉冲的可行性. 其中, H暗示其等离子开关采用 300 atm 的 H_2 作为绝缘气体, 其发射

天线是TEM喇叭天线; IRA表示其系统是冲击辐射源与反射天线组合系统, 系统仍然采用 H_2 等离子体开关; UWB-HPTS表示其电磁脉冲辐射源为超宽带辐射频率的高功率试验系统.

在图2所示的H-系列电磁脉冲辐射源的研究工作中, 美国空军实验室首次证实了利用氢气等离子体开关技术, 在 100 atm 条件下, 可以产生脉冲上升前沿小于 1 ns 的可能性; 利用纳秒脉冲成形线技术产生超宽带频带高功率电磁脉冲的可能性. 因为在 500 kV 特斯拉脉冲变压器的驱动下, H-1产生了峰值电压为 150 kV 、峰值功率为 450 MW 的相对论型高功率电磁脉冲辐射. 从文献中仅有的几个参数(表1), 可以推算出此时的皮秒开关等离子体开关的电极间距只有 $d_{A-K}=1.25\text{ mm}$, 开关工作电场强度却高达 $E_{SW}=1.2\text{ MV/cm}$. 正是由于皮秒开关采用的是 H_2 等离子体, 所以将此装置取名为H-1. 在此基础上, 美国空军实验室相继研制了H-2, H-3, H-4, H-5系列超宽带电磁脉冲源, 如表1所示. 其中, H-2, H-5和H-1一样, 采用 $100\text{ atm}-H_2$ 的等离子体开关技术、 500 kV 的特斯拉脉冲变压器和同轴脉冲成形线技术. 由于H-5与H-2微波源相同, 只是H-5的发射天线尺度较大, 所以在美国空军实验室的文献中, 只有H-2实验装置、工程结构模型和实验测量结果. 和

图2 (网络版彩图)美国空军实验室研制的H-2和H-5高功率电磁脉冲辐射源. (a) 辐射源、工程结构模型与发射天线; (b) 近场辐射脉冲测量结果; (c) 远场辐射脉冲测量结果; (d) 电磁辐射脉冲的频谱^[3]. 图片已获得使用授权

Figure 2 (Color online) USA AFRL developed H-2 and H-5 electromagnetic pulse source. (a) Source, 3D model, and transmitting antenna; (b) radiation pulse measured at near field; (c) radiation pulse measured at far field; (d) frequency spectra of the radiation pulse^[3]. Reprinted from ref. [3], with the permission of IEEE Publishing Copyright © 1999.

H-1不同的是, 在H-2与H-5工程结构设计中, 采用了直径为 $\Phi_{\text{ns}}=101.6\text{ mm}$ 的尺寸更大的脉冲成形线, 以便提高脉冲成形线耐压与工作电压. 最终产生了脉冲前沿为 $\tau_{\text{r}}=250\text{ ps}$ 、脉冲宽度为 $\tau_{\text{o}}=2.5\text{ ns}$ 、峰值电压为 $V_{\text{ns}}=500\text{ kV}$ 、峰值功率为 $P_{\text{ns}}=6.25\text{ GW}$ 的极端高功率超宽带电磁脉冲辐射, 辐射场参数测量结果如图2(b)所示.

不同于H-1, H-2, H-5的工程结构设计, H-3和H-4采用了布鲁姆莱因脉冲成形线作为纳秒脉冲成形线, 以求获得更高的脉冲峰值电压; 同时, 增加了皮秒脉冲成形线, 以求得到更短的辐射脉冲宽度、更宽的频率分布. 第三个不同点在于, 将纳秒开关与皮秒开关的 H_2 压强由先前的 100 atm 提高到 300 atm , 以便最大限度地提高等离子体开关的绝缘强度与最大限度地减小开关电极间距, 以便最大限度地减小脉冲上升前沿时间, 探索可以产生的最高辐射脉冲中心频率. 但是, 在

后期实验结果的报道文献[2,4,5]中, 纳秒脉冲成形线仍然采用了图1(b)中的脉冲成形线, 而没有采用布鲁姆莱因脉冲成形. 可能的原因是布鲁姆莱因脉冲成形的开关设计过于困难所致. 当前的实验结果表明, H-3与H-4的电磁辐射脉冲前沿上升时间已经减小到了 $\tau_{\text{r}}=130\text{ ps}$, 比H-2与H-5减小一倍; 电磁辐射脉冲宽度压缩到 $\tau_{\text{o}}=250\text{--}300\text{ ps}$, 较H-2与H-5减小一个数量级; 电磁辐射脉冲的峰值功率提高到了 $P_{\text{ps}}=20\text{ GW}$, 是H-2与H-5的三倍; 尽管辐射频率带宽无明显变化, 但是高频端却由 4 GHz 扩展到了 10 GHz , 见图2(d)与图3(b). 更为详细的参数比较见表1.

近年来, 在H-系列高功率电磁脉冲辐射源研究工作的基础上, 美国国防部牵头, 联合美国空军实验室、新墨西哥大学等研究单位开展了新一代电磁脉冲辐射源的源设计与研制工作. 微波源取名为HPM-

表 1 美国空军实验室研制的H系列电磁脉冲辐射源设计参数与实验测量结果

Table 1 The design parameters and experimental results of H-series electromagnetic pulse sources developed by USA-AFRL

参数	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5
设计参数	$\Phi_{\text{ns}}=50.8\text{ mm}$	$\Phi_{\text{ns}}=101.6\text{ mm}$	$\Phi_{\text{ps}}=150\text{ mm}$	$\Phi_{\text{ps}}=150\text{ mm}$	$\Phi_{\text{ns}}=101.6\text{ mm}$
	$Z_{\text{ns}}=50\ \Omega$	$Z_{\text{ns}}=40\ \Omega$	$Z_{\text{ns}}=40\ \Omega$	$Z_{\text{ns}}=40\ \Omega$	$Z_{\text{ns}}=40\ \Omega$
	$P(\text{H}_2)=100\text{ atm}$	$P(\text{H}_2)=100\text{ atm}$	$P(\text{H}_2)=300\text{ atm}$	$P(\text{H}_2)=300\text{ atm}$	$P(\text{H}_2)=100\text{ atm}$
Output pulse	$V_{\text{ns}}=150\text{ kV}$	$V_{\text{ns}}=300\text{ kV}$	$V_{\text{ps}}=1\text{ MV}$	$V_{\text{ps}}=2\text{ MV}$	$V_{\text{ns}}=500\text{ kV}$
		$\tau_{\text{r}}=250\text{ ps}$	$\tau_{\text{r}}=100\text{ ps}$	$\tau_{\text{r}}=130\text{ ps}$	$\tau_{\text{r}}=250\text{ ps}$
		$\tau_{\text{o}}=1.5\text{--}2\text{ ns}$	$\tau_{\text{o}}=300\text{ ps}$	$\tau_{\text{o}}=250\text{ ps}$	$\tau_{\text{o}}=2.5\text{ ns}$
Radiated field	—	$R=10\text{ m}$	$R=5\text{ m}$	—	$R=10\text{ m}$
		$E=43\text{ kV/m}$	$E=100\text{ kV/m}$		$E=43\text{ kV/m}$
					$\tau_{\text{r}}=238\text{ ps}$

图 3 美国空军实验室研制的H-3与H-4电磁脉冲辐射源实验测量结果. (a) 辐射脉冲波形; (b) 辐射频谱[4]. 图片已获得使用授权

Figure 3 Experimental results from H-3 and H-4 developed by USA AFRL. (a) Waveform of the radiated pulse; (b) frequency spectra [4]. Reprinted from ref. [4], with permission of IEEE Publishing Copyright © 1997.

UWTS^[8,9], 其物理之意是要研制一个高功率超宽带微波实验系统, 实验装置如图4所示. 其总体设计方案与目标为采用一个马克斯发生器驱动4条脉冲成形线, 每条脉冲成形线驱动2个或3个螺旋微波发射天线, 使微波辐射频率可以覆盖 $f=200\text{ MHz}-6\text{ GHz}$, 远场辐射强度达到 $20-110\text{ V m}^{-1}\text{ Hz}^{-1}$; 其研究目的是进一步提高

微波发射天线的增益系数, 提高电磁脉冲发射的定向性, 以便实现更远的辐射作用距离.

为此, 在工程技术设计中, 采用了以下6条技术路线: (1) 放弃先前的特斯拉脉冲变压器技术, 采用更为先进的马克斯发生器技术, 以便产生更高的电磁辐射源驱动电压. 马克斯发生器共32级储能电容、16级等

图 4 (网络版彩图)美国研制的新一代相对论型超宽谱高功率电磁脉冲辐射源与实验测量结果. (a) 系统组成单元示意图; (b) 工程物理模型; (c) 马克斯发生器工程样机; (d) 脉冲成形线工程样机; (e) 纳秒脉冲成形线和皮秒脉冲成形线系统结构; (f) 输出脉冲测量结果与模拟结果^[7]. 图片已获得使用授权

Figure 4 (Color online) HPM-UWTS developed recently by USA-AFRL and the primary experimental results. (a) Schematic of UWTS system; (b) physical model and engineering structure; (c) prototype of Marx generator; (d) prototype of ns-PFL and ps-PFL unit; (e) detail engineering structure of HPM-UWTS: ns-PFL, ps-PFL, tapered PTL, and switch form; (f) the measured pulse waveform radiated from HPM-UWTS. Reprinted from ref. [7], with the permission of IEEE Publishing Copyright © 2010.

离子体开关. 每级电容充电电压为25–50 kV, 最大输出电压为 $V_{MG}=1.6$ MV; (2) 放弃先前的超宽带TEM发射天线技术, 采用发射频带较窄但增益系数更高、辐射方向性更好的轴向螺旋发射天线技术, 以便实现更大的天线因子(辐射电场强度与距离的乘积). 发射天线设计参数至今仍然没有报道; (3) 为了弥补轴向螺旋天线发射频率较窄的固有特性, 在总体工程物理设计中, 采用了发射天线组合技术, 9个天线分为4组(2+3+2+2), 每组与一个皮秒脉冲成形线的输出端相连接; (4) 除了峰化电容的转移开关采用5 atm的 SF_6 气体等离子体开关外, 纳秒开关与皮秒开关采用变压器油绝缘技术替代先前的100–300 atm氢气等离子体开关技术, 以便减小工程技术难度; (5) 纳秒脉冲成形线与皮秒脉冲成形线采用同轴脉冲成形线. 其特征阻抗分别等于22与50 Ω ; 其物理长度相同, 等于1 ns; (6) 轴向螺旋发射天线采用玻璃纤维压力腔与 SF_6 高压气体绝缘技术, 如图4所示.

当前, 已经完成了单路输出实验测量工作. 初步的实验测量结果表明: (1) 在45 kV充电条件下, 微波辐射脉冲的峰值电压最高可以达到 $V_{ps}=2$ MV; (2) 微波辐射脉冲的前沿上升时间可以达到 $\tau_r=300$ ps, 微波辐射脉冲的宽度为 $\tau_o=2$ ns, 如图4所示; (3) 纳秒开关与皮秒开关的击穿电场强度可以分别达到4.7与8.0 MV/cm; (4) 由此可以估算出, 其开关间隙设计在 $1.7 \text{ mm} \leq d_{A-K} \leq 2 \text{ mm}$, 微波辐射脉冲的峰值功率为 $P=80$ GW.

相对于H-系列和UWB HPTS-系列超宽带高功率电磁脉冲辐射源研究进展, IRA-系列工作电压较低、辐射功率也较低, 见表2, 本文不再讨论. 总之, 当前的主要研究成果可以总结为三点: (1) 利用100–300 atm的 H_2 等离子体开关技术, 可以产生脉冲上升前沿为 $\tau_r=75\text{--}300$ ps、脉冲宽度为 $\tau_o=105$ ps–2 ns的超快前沿、超短脉冲宽度的微波辐射脉冲; (2) 微波脉冲的峰值功率可以达到 $P_o=450$ MW–80 GW、辐射频率可以覆盖100 MHz–6 GHz; (3) 聚碳酸酯、聚酰亚胺和PA-66尼

龙由于同时兼具极端高应力强度、高绝缘强度与低微波损耗特性, 所以可以用来研制皮秒开关腔体.

当前的发展方向可以概括为四点: (1) 在基础科学技术研究方面, 发展马克斯发生器技术, 以便产生更高的驱动电压、更高的辐射峰值功率. 即 $V_{MG} \geq 2$ MV, $P_{HPM} \geq 80$ GW; (2) 基于实际应用需求, 在提高微波辐射功率的同时, 为了提高辐射脉冲能量, 电磁脉冲的宽度增大到2 ns数量级更好; (3) 基于实际应用需求, 为了提高发射天线的增益与定向发射的方向性, 采用一组螺旋天线组合技术更好; (4) 极端高压强 H_2 等离子体开关技术依然是开关技术首选, 仍然是未来追求更快脉冲前沿的最佳选择. 此外, 韩国^[10–12]、法国^[13]、德国^[14]、俄罗斯^[15]、中国^[16–18]等国家在这一领域也积极采用美国空军实验室的技术路线开展了跟踪与创新研究工作, 有待进一步的调研与分析.

4 电磁脉冲应用研究进展

在电磁辐射效应研究领域, 虽然美国、德国、俄罗斯和韩国^[2–24]等国家皆开展了辐射效应试验研究工作与装备应用研究工作. 相对来说, 在辐射效应实验研究领域, 韩国国防研究署的研究工作最具代表性; 在国防装备应用研究领域美国空军实验室的研究工作最具代表性; 在反恐装备应用研究领域, 德国武器装备供应集团的研究工作最具代表性. 下面主要总结电磁辐射作用的物理模型与数学方程、单元物理器件可逆性损伤与永久损伤的辐射阈值测量结果. 最后, 简述一些典型装备应用.

电磁辐射效应研究, 在理论上就是要研究距离辐射源一定距离处的辐射场电场强度与辐射功率和天线增益的关系; 在实验上, 就是要测量一个物理器件在多大的辐射功率或辐射电场强度下, 可以致使其失去功能, 永久损坏或暂时性损坏. 在电磁辐射效应物理模型中, 若电磁脉冲辐射源的辐射功率为 P_{EMP} 、发射天

表2 美国空军实验室主持研制的一系列相对论型超宽带高功率微波源核心技术实验测量结果与比较

Table 2 The typical experimental results of the electromagnetic pulse sources developed by USA-AFRL

系列名称	V_{ps-PFL} (kV)	τ_r (ps)	τ_o (ps)	$P_{peaking}$ (GW)	Δf (MHz)
H-series	150–2000	130	250–2500	3.9–20	100–2500
IRA-series	150	75–99	105–130	0.450	100–4000
UWB HPTS	500–2000	300	2000	80	200–6000

线的功率增益为Gain, 则在中心轴线上 R 处的辐射电场强度 $E(R)$ 与辐射功率 $P(R)$ 的大小分别由方程(6)和(7)决定:

$$P(R) = \frac{P_{\text{HPM}}}{4\pi R^2} \times \text{Gain}, \quad (6)$$

$$E(R) = \sqrt{\frac{P_{\text{ant}}}{4\pi R^2} \times \text{Gain} \times \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}\right)^{1/2}}. \quad (7)$$

基于以上辐射效应物理模型, 韩国科学家对光电核心器件与计算机核心器件进行了损伤阈值实验测量研究^[22-24]. 研究对象包括CCD, CMOS, RAM, ROM, I/O数据线、PC机等; 主要研究的物理参数包括摧毁阈值、功能错乱概率、电路耦合电流等物理参数. 试验测量装置如图5所示. 其电磁辐射的脉冲宽度 $\tau_0=1$ ns、脉冲上升前沿 $\tau_r=200$ ps、微波辐射频率 $\Delta f=100$ MHz–2.5 GHz.

辐射效应实验结果表明: (1) 对于各种微处理器来说, 在电磁脉冲辐射强度达到6.5–37 kV/m时, 物理器件将发生瞬间物理功能丧失, 导致系统瘫痪. 但是, 通

过重新设置或者重新启动电源之后, 器件的物理功能可以得到恢复(表3). 这种软损伤概率随电磁脉冲辐射电场强度的变化如图6(a)所示; (2) 在电磁脉冲照射强度达到 97.5 kV/m时, 一个电磁脉冲就会造成器件的永久性物理损坏. 这种永久性物理损伤概率随电磁脉冲辐射电场强度的变化如图6(b)所示; (3) 不论照射功率多大, 在被照射的器件内部都会有耦合电流产生. 例如, 在摧毁阈值条件下, 耦合电流可以达到2 A数量级, 见图6(c); (4) 俄罗斯和德国的联合辐射效应实验结果表明, 对于计算机系统, 在照射强度达到2.5–4.8 kV/m时, 系统将会发生瘫痪; 在照射强度达到5.1 kV/m时, 计算机系统就被彻底损坏; (5) 尽管美国空军实验室开展了多次攻击空间飞行器的外场试验, 但是实验结果至今未公开, 只是泛泛地讲到不同车辆摧毁阈值在25–50 kV/m.

此外, 在装备应用领域, 美国空军实验室在2019年6月公开演示了电磁脉冲摧毁无人机群的辐射效应实验, 一个电磁脉冲将50架小型无人机从空中击落. 所用

图 5 (网络版彩图)电磁脉冲辐射效应试验测量装置(a)与测试样品(b)^[21]. 图片已获得使用授权

Figure 5 (Color online) Experimental setup to measure the damage threshold of the physical targets under irradiation with electromagnetic pulse. (a) Experimental setup; (b) tested samples ^[21]. Reprinted from ref. ^[21], with the permission of IEEE Publishing Copyright © 2009.

图 6 (网络版彩图)计算机微控制器与光电器件的辐射伤概率与损伤阈值测量结果. (a) 可恢复性损伤; (b) 永久性损伤; (c) 耦合电流测量结果^[21]. 图片已获得使用授权

Figure 6 (Color online) Experimental results of the damage probability and the damage threshold induced by high power electromagnetic pulse. (a) Damage probability in malfunction; (b) damage probability in destruction; (c) coupling current ^[21]. Reprinted from ref. ^[21], with the permission of IEEE Publishing Copyright © 2009.

表 3 计算机微控制器与光电元器件的辐射损伤阈值测量结果

Table 3 Experimental results of the malfunction and destruction thresholds of microcontrollers induced by electromagnetic pulse

Level	Malfunction		Damage
Threshold	10 V/m	25–40 kV/m	97.5–107 kV/m
Recovery condition	reset on-line	turn-on/off	damage forever

的电磁脉冲辐射源就是图4中的HPM-UWTS电磁脉冲辐射源; 在德国, 将所研制的DS-110系列电磁脉冲辐射源装备到扫雷车, 为战场运输车队开道. 对于所有型号的地雷, 其扫雷效率已经可以达到82%. 此外, 在反恐应用中, 可以远距离摧毁建筑物内的电子通讯系统与定时炸弹电子引信.

5 国内研究动态

在国内, 西北核技术研究所^[16]、中国工程物理研

究院^[17]和中国科学院空天信息创新研究院^[18]皆开展了跟踪与创新研究工作. 其中, 空天信息创新研究院完成的工作电压为700 kV、发射功率为1.68 GW的电磁辐射脉冲源如图7所示, 其辐射脉冲与频谱测量结果如图8所示. 整个系统由马克斯发生器、纳秒脉冲成形线、皮秒脉冲成形线与发射天线四部分构成.

其中, 马克斯发生器采用当前最先进的全固态与气体绝缘技术, 如图7(b)所示. 工作电压为700 kV、脉冲能量为250 J, 整个系统由15级储能电容、级间隔离电感和等离子体开关构成. 每级由8个1.72 nF/50 kV高压陶瓷无感电容组成, 级间隔离与耦合电感采用自主研制的耐压100 kV、电感量为190 μ H的高压空芯电感; 级间环形开关电极的内半径为100 mm、电极宽度为5 mm、开关间隙为2.0–2.5 mm、工作气压为7–15 atm的高纯N₂. 纳秒脉冲成形线与皮秒脉冲成形线采用50 Ω 同轴脉冲成形线设计方案. 其物理长度为1.6 ns, 外径为100 mm, 等离子体开关采用150 atm N₂, 开关电极间隙可以在1–1.7 mm之间自由调节. 纳秒等离子

图 7 (网络版彩图)中国科学院高功率微波源与技术重点实验室研制的输出功率为1.68 GW的电磁脉冲辐射源. (a) 电磁脉冲辐射源; (b) 马克斯发生器内部结构照片; (c) 150 atm的N₂等离子体开关照片

Figure 7 (Color online) 1.68 GW relativistic electromagnetic pulse source developed at Key Laboratory of High Power Microwave Source and Technology of Chinese Academy of Sciences. (a) Electromagnetic pulse source; (b) the photo of Marx generator; (c) the photo of 150 atm-N₂ plasma switch.

图 8 (网络版彩图) 1.68 GW电磁脉冲源的发射脉冲波形与辐射频谱测量结果. (a) 辐射脉冲波形; (b) 功率波形; (c) 辐射频谱分布

Figure 8 (Color online) The experimental results of radiated pulse and its FFT spectrum from 1.68 GW electromagnetic pulse generator. (a) Waveform of electromagnetic pulse; (b) waveform of power pulse; (c) spectra of electromagnetic pulse.

体开关与皮秒等离子开关采用相同的结构设计, 工程结构如图7(c)所示. 其中的绝缘材料选用德国进口的PA-66尼龙材料, 等离子体开关工作气体为150 atm的高纯氮气.

本项目当前的实验测量结果表明: (1) 皮秒开关的最高击穿气体压强为75 atm, 在50 atm下电磁脉冲辐射源可以实现重复稳定工作; (2) 所产生的电磁脉冲峰值电压为 $V_p=290$ kV、峰值辐射功率为 $P_{\max}=1.68$ GW、半高宽为 $\tau_0=1.0$ ns、脉冲前沿上升时间 $\tau_r=320$ ps; 辐射频率分布范围为 $f=100$ MHz–1.4 GHz; (3) 由于 N_2 等离子体开关击穿电压的分散性, 微波辐射脉冲的峰值功率具有一定的涨落. 其中, 最小微波辐射功率只有 $P_{\min}=1.41$ GW; (4) 相对于国际研究进展, 仍然有较大差距. 所以, 下一步研究工作计划为将马克斯发生器的驱动电压由现在的700 kV提高到2 MV^[18], 并采用轴向

螺旋天线, 以便达到当前美国空军实验室的研究水平.

6 结论

从当前的国际研究进展可见: (1) 基于极端高气压(100–300 atm) H_2 等离子体开关技术与同轴脉冲成形线技术, 已经可以产生脉冲前沿上升时间为75–300 ps、脉冲宽度为105 ps–2.5 ns、辐射频率为100 MHz–4 GHz、峰值功率为450 MW–80 GW的极端高功率电磁脉冲; (2) 辐射效应实验结果表明各种集成电路的软损伤阈值分布在10–40 kV/m, 永久损伤阈值分布于97.5–107 kV/m; (3) 未来发展趋势为一个马克斯发生器驱动多个电磁脉冲辐射源与轴向螺旋天线发射阵列, 以便将辐射频率上限扩展到6 GHz.

参考文献

- 1 O'Loughlin J P, Copeland R P. Subnanosecond power conditioning technique using transmission line to transmission line charging. In: Proceeding of the 20th Power Modulator Symposium. Myrtle Beach, 1992. 351–354
- 2 Agee F J, Baum C E, Prather W D, et al. Ultra-wideband transmitter research. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, 26: 860–873
- 3 Prather W D, Baum C E, Agee F J, et al. Ultra-wide band source and antennas. In: Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetic. Boston: Elsevier, 1999. 119–130
- 4 Wells J, Baum C E, Keator N, et al. A radiating structure incorporating an extended ground plane and a Brewster angle window. In: Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetic. Boston: Elsevier, 1997. 107–112
- 5 Prather W D, Baum C E, Lehr J M, et al. Recent development in ultra-wideband source and antennas. In: Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetic. Boston: Elsevier, 2002. 393–397
- 6 Agee F J, Gaudet J A, Prather W D. Focus on current topics in air force high power microwave (HPM) research. In: Proceedings of SPIE. Los Angeles, 2001, 4371: 1–10
- 7 Morton D, Banister J, Levine J, et al. A 2 MV, 300 ps rise-time, 100 Hz pulser for generation of microwave. In: Proceedings of 2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. New York: IEEE, 2010. 361–364
- 8 Prather W D, Baum C E, Torres R J, et al. Survey of worldwide high-power wideband capabilities. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2004, 46: 335–344
- 9 Ryu J, Kim K, Lim T H, et al. Integrated-antenna-source of directive peak electric-field patterns for high-power ultrawideband parabolic reflector system. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2019, 18: 727–731
- 10 Lim S W, Katsuki S, Jin Y S, et al. Nanosecond high-voltage pulse generator using a spiral Blumlein PFL for electromagnetic interference test. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42: 2909–2912
- 11 Jin Y S, Lim S W, Cho C H, et al. High voltage ultrawide band pulse generator using Blumlein pulse forming line. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 044704
- 12 Bischoff R, Duperoux J P, Pinguet S. Modular, ultra-compact marx generators for repetitive high-power microwave systems. *J Korean Phy Soc*, 2011, 59: 3522–3525
- 13 Cadilhon B, Pecastaing L, Reess T, et al. High pulsed power sources for broadband radiation. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2010, 38: 2593–2603
- 14 Novac B M, Wang M, Smith I R, et al. A 10 GW Tesla-driven Blumlein pulsed power generator. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42: 2876–2885

- 15 Yalandin M I, Shpak V G. Compact high-power subnanosecond repetitive-pulse generators (Review). *Instrum Exp Tech*, 2001, 44: 285–310
- 16 Sitao Z, Guozhi L, Chaolong Y, et al. Design and experiment of an ultra-wideband dual-pulse radiation antenna. In: *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetic*. Boston: Elsevier, 2010. 225–231
- 17 Meng F B, Yang Z B, Ma H G, et al. Experimental investigation of half parabolicd impluse radiating antenna (in Chinese). *High Pow Las Part Beam*, 1999, 11: 725–728 [孟凡宝, 杨周炳, 马弘舸, 等. 高功率半抛物面冲击脉冲辐射天线系统实验研究. *强激光与粒子束*, 1999, 11: 725–728]
- 18 Gao H L, Zhang Z Q, Zhang Z C, et al. Research and development of compact Marx generator for driving high power microwave source. In: *Proceeding of IEAPPC & Beams-2018, 7th Euro-Asian Pulsed Power Conference, 22th International Conference High-Power Particle Beams*. Changsha: IEEE, 2018. 100–104
- 19 Giri D V, Tesche F M. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME). *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2004, 46: 322–328
- 20 Radasky W A, Baum C E, Wik M W. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI). *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2004, 46: 314–321
- 21 Hwang S M, Hong J H, Han S M, et al. The susceptibility of microcontroller device with coupling caused by UWB-HPEM. In: *Proceedings of Progress in Electromagnetic Research Symposium*. Moscow, 2009. 1269–1274
- 22 Hwang S M, Hong J I, Huh C S. Characterization of the susceptibility of integrated circuits with induction caused by high power microwaves. *PIER*, 2008, 81: 61–72
- 23 Kim K, Iliadis A A. Critical upsets of CMOS inverters in static operation due to high-power microwave interference. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2007, 49: 876–885
- 24 Mansson D, Thottappillil R, Backstrom M, et al. Vulnerability of european rail traffic management system to radiated intentional EMI. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2008, 50: 101–109

Generation of high-power electromagnetic pulses and its application to radiation effect research: A review

GAO HuaiLin^{1,2*}, ZHANG ZhiQiang^{1,2*}, GAO DongPing^{1,2*}, ZHANG ZhaoChuan^{1,2},
YIN ShengYi^{1,2} & DING YaoGen^{1,2}

¹ *Department of High Power Microwave Source and System Development, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

² *Key Laboratory of High Power Microwave Source and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

This study reviews the research progress of high-power electromagnetic pulse generation. It introduces the physical model, different technologies, and the experimental generation of ultrafast, ultrashort, and ultra-high-power electromagnetic pulses. Progress on the radiation effects of electromagnetic pulses and the measured damage thresholds of microcontroller and photo-electronic devices are also discussed. Finally, future research prospects in this field are suggested.

electromagnetic pulse technology, electromagnetic pulse radiation, technology of high power microwave, pulsed power technology

PACS: 84.40.-x, 52.27.Ny, 07.57.Hm, 52.77.Fv, 78.70.Gq

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0060](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0060)