文章编号：1000-5773(2013)01-0113-06

超高速碰撞 2024-T4 铝靶产生的等离子体对逻辑芯片的干扰*

唐恩凌[1]，张庆明[2]，王　猛[1]，相升海[1]，张　薇[1]，
杨明海[1]，李乐新[1]，于　辉[1]，罗荣梅[1]，赵新颖[1]

（1.沈阳理工大学装备工程学院，辽宁沈阳　110159；
2.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081）

摘要：为了掌握超高速碰撞产生等离子体对航天器上常用典型逻辑芯片产生的干扰，利用自主设计的朗缪尔三探针诊断系统，进行了弹丸（入射速度为 6.10 km/s，入射角度为 30°）超高速碰撞 2024-T4 铝产生等离子体的特征参量诊断，测量了给定位置和方位角处等离子体的电子密度，利用数据采集系统对实验给定位置和方位角处逻辑芯片的干扰情况进行了评价。实验结果表明，超高速碰撞产生的等离子体对航天器上常用的逻辑芯片将产生严重干扰。

关键词：超高速碰撞；等离子体；逻辑芯片；电磁干扰
中图分类号：O383.3；O531　　**文献标识码**：A

1　引　言

在超高速碰撞过程中，弹丸与靶板接触的界面处会产生瞬态电磁场，电磁场的性质与弹丸的侵彻成坑、成腔和后期膨胀 3 个阶段有关[1-7]。2002 年，Takano 等人[8]首次报道了关于超高速碰撞产生微波辐射的研究，并解释了产生微波辐射的两个主要原因：其一，金属晶格发生破坏，电子或分子的不稳定态所传递的能量以及产生的热量以微波形式释放出来；其二，当碰撞动能足够大时，碰撞材料吸收能量发生部分电离，产生等离子体，等离子体在膨胀过程中产生瞬态电磁场。由于碰撞过程持续时间短暂，并且金属晶格破坏时产生的电磁场是任意的，所以很难区分这两部分电磁场。2005 年，Putzar 等人[9]开展了超高速碰撞对电子线路盒的易损性研究，结果表明，空间碎片或微流星体超高速碰撞航天器诱生的电磁效应会对航天器构成严重的电磁威胁。超高速碰撞产生的等离子体对电子设备除了产生电磁辐射干扰外，等离子体中的带电粒子还会沉积到半导体器件中，沉积到器件中的带电粒子会在半导体内产生新的电子-空穴对。当半导体没有外加电压时，这些新的电子-空穴对会很快复合；但是当半导体器件处于工作状态时，器件内部会产生电场，这些新的电子-空穴对在电场力的作用下朝电压的正、负两极运动，产生附加电流，当该附加电流达到一定值时，就会影响器件的正常工作。对于不同类型的芯片，等离子体的影响方式是不同的。如果等离子体密度比较大，且被器件吸附在管脚周围时，等离子体中的带电粒子的导电性会使元器件管脚之间发生电压击穿，从而产生电磁脉冲干扰。然而，关于超高速碰撞产生等离子体的粒子密度对航天器上常用逻辑芯片模块的干扰分析尚未见到成熟的报道。

* **收稿日期**：2011-10-05；**修回日期**：2011-11-02
基金项目：国家自然科学基金（10972145，11272218）；国家自然科学基金重点项目（11032003）；辽宁省兵器科学与技术重点实验室开放基金
作者简介：唐恩凌（1971－），男，博士，教授，主要从事超高速碰撞产生等离子体、超高速碰撞产生闪光等深空探测研究. E-mail：tangenling@126.com

针对上述原因，本研究通过超高速碰撞产生等离子体实验，结合自主设计的朗缪尔三探针诊断系统，测量给定位置和方位角处等离子体的特征参量；在靶室内安装逻辑芯片模块，根据示波器采集的数据，分析给定位置和方位角处等离子体对逻辑芯片模块的干扰情况。

2 实 验

2.1 实验基本参数

实验在二级轻气炮上完成。2024-T4 铝弹丸为实心球体，直径为 6 mm；靶板为 2024-T4 铝靶板，厚 25 mm。弹丸的入射速度为 6.1 km/s，入射角度（弹道与靶板平面的夹角）为 30°。靶室压力为 20 Pa。

2.2 探针及逻辑芯片的布局

朗缪尔三探针均垂直于靶板，探针材料均为钨丝，长度为 10 mm，直径为 0.28 mm，用于测量等离子体的特征参量。探针及逻辑芯片在靶室内的布局见表 1。

表 1 探针及逻辑芯片在靶板垫板上的布局

Table 1 Layout of probes and logic chips on experimental set-up plane

Center coordinate/(mm)	Component	Center coordinate/(mm)	Component
(−50,0,75)	Triple Langmuir probe	(50,185,180)	Triple Langmuir probe
(50,0,75)	Logic chip	(−50,185,180)	Logic chip

以弹丸着靶点作为坐标原点 $O(0,0,0)$，以指向弹道的方向作为 y 轴正方向，以垂直于靶板平面且方向向上为 z 轴正方向，x 轴方向满足右手定则。探针和逻辑芯片在等离子体产生及持续的整个过程中都会被干扰。大量的实验证明，超高速碰撞产生的等离子体在弹道两侧近似呈对称分布。因此，实验时将探针和逻辑芯片安装在弹道两侧的对称位置处。此外，选择探针及逻辑芯片的安装位置（坐标）时，应尽可能避免大量碰撞飞溅物对探针和逻辑芯片产生机械破坏，分析实验结果时便可仅考虑等离子体对逻辑芯片的干扰。

2.3 逻辑芯片的选择

MOS（Metal Oxide Semiconductor）器件是航天器上最常用的半导体器件。有研究表明，高能粒子可对 MOS、CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）等器件产生烧毁或闭锁等严重毁伤效应[10-12]。因此，本实验以 MOS 器件为主要研究对象，选择航天器上比较典型的与非门 54HC05 芯片进行实验。

2.4 逻辑芯片信号采集系统设计

逻辑与非门 54HC05 是由 PMOS 和 NMOS 管共同构成的互补型 MOS 器件，即 CMOS 型器件，主要作用是对信号进行逻辑运算，在航天、军事以及民用等领域有着广泛的应用。图 1 为与非门 54HC05 芯片内部结构的逻辑原理及测试电路图。54HC05 芯片共有 6 路与非门。实验时，分别对这 6 个门电路进行输入 0～5 V 方波直流电压扫描。该测试电路和探针系统采用外触发方式进行同步触发。

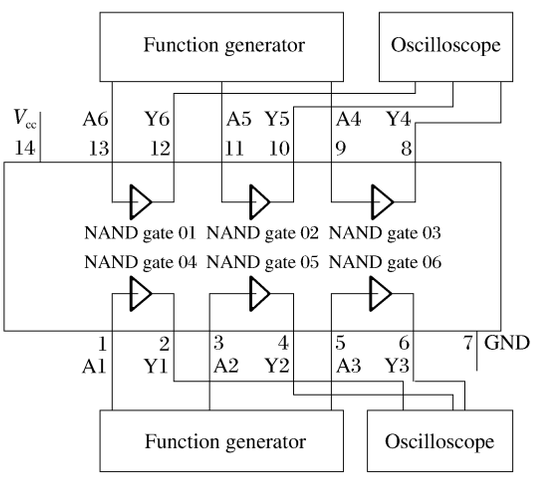


图 1 与非门 54HC05 的逻辑原理及测试电路

Fig. 1 NAND gate 54HC05 logical principle and measuring circuit

3 朗缪尔三探针理论

朗缪尔三探针阵列由 3 组平行的柱状钨丝组成,其余部分由 Al_2O_3 屏蔽。利用三探针结构测量等离子体特征参量时,Pin 2 和 Pin 3 为漂浮对称双探针,Pin 2 的电势 V_2 为正,相对于 Pin 3 的电压值为 $V_{Bias}=10$ V,采集 Pin 1 的漂浮电势 V_1,则 V_2 相对于 V_1 的电压值决定了等离子体的电子温度 T_e。T_e 遵循

$$\frac{1-e^{-\Phi_{d2}}}{1-e^{-\Phi_{d3}}}=\frac{1}{2} \tag{1}$$

式中:$\Phi_{d2}=eV_{d2}/kT_e$,$\Phi_{d3}=eV_{d3}/kT_e$,$V_{d2}=V_2-V_1$,V_{d3} 为外加固定电压,e 为电子电荷,k 为波尔兹曼常数。通过测量电压 V_{d2},可确定电子温度 T_e,即

$$\frac{kT_e}{e}\approx\frac{V_2-V_1}{\ln 2}\approx\frac{V_2-V_1}{0.7} \tag{2}$$

由电子温度 T_e 可计算电子密度 n_e,即

$$n_e=(M^{1/2}/A)If_1(V_{d2}) \tag{3}$$

$$f_1(V_{d2})=1.05\times10^9T_e^{-1/2}(e^{V_{d2}}-1)^{-1} \tag{4}$$

式中:A 为探针暴露部分的表面积,M 为原子或离子质量,I 为测量电路的电流。n_e、I 和 T_e 的单位分别为 cm^{-3}、μA 和 eV。图 2 为朗缪尔三探针诊断系统,该系统已成功应用于超高速碰撞产生等离子体诊断实验[13-14]。

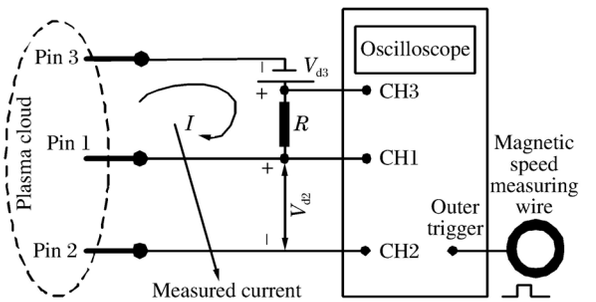


图 2 朗缪尔三探针诊断系统

Fig. 2 Diagnostic system of triple Langmuir probe

4 实验结果与分析

在超高速碰撞产生的等离子体[15-17]对逻辑芯片的干扰实验中,需要测量的主要参量包括等离子体电子密度、逻辑芯片受到等离子体辐射时信号的变化、逻辑芯片受到辐射后芯片的工作性能变化情况。等离子体的电子密度可利用朗缪尔三探针进行间接测量;通过实时观测实验过程中采集信号的变化,分析逻辑芯片信号的变化情况;实验结束后将芯片取出,再进行电压扫描,评估芯片是暂时的逻辑状态改变还是永久改变,以确定等离子体电子密度对逻辑芯片的干扰情况。

朗缪尔三探针测得的等离子体电子密度随时间的变化曲线如图 3、图 4 所示。可以看出:探针周围等离子体的持续时间为 4 ms 左右;等离子体的电子密度先快速增大,然后逐渐衰减,直至消失,探针 1(空间坐标为(−50,0,75))、探针 2(空间坐标为(50,185,180))测得的等离子体电子密度最大值分别为 12×10^{13} cm^{-3} 和 8×10^{13} cm^{-3}。

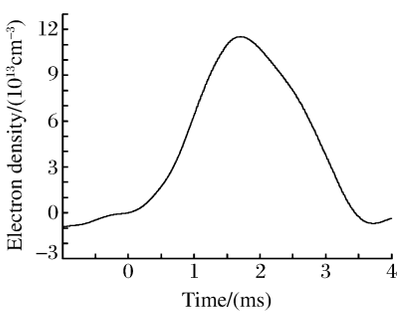


图 3 探针 1 的电子密度随时间的变化

Fig. 3 Variation of electron density with time at probe 1

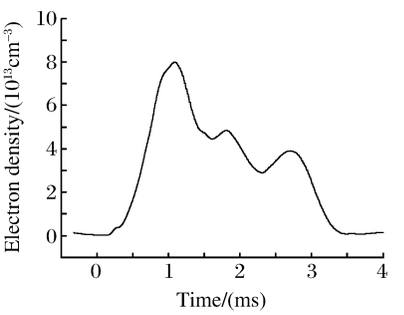


图 4 探针 2 的电子密度随时间的变化

Fig. 4 Variation of electron density with time at probe 2

图 5、图 6 分别为 54HC05 芯片受等离子体辐射后输入信号和输出信号的变化曲线。可以看出：芯片受到等离子体辐射后，输出的方波发生显著变化；在示波器的记录时间内，输出方波的周期变大，直到仅输出高电压；而信号幅值在 5 ms 左右发生变化，之后工作正常，持续 10 ms 后，芯片的输出电压再次发生变化，直到仅输出高电压。这说明芯片在受到等离子体辐射后，虽然没有立即损坏，仅造成了软毁伤，但是当继续工作一段时间后，芯片的输出信号就变成了持续高电平，不能完成与非门的逻辑运算，完全丧失工作能力。实验结束后对 54HC05 芯片进行测试时发现，芯片表面虽没有出现明显的机械毁伤，但确实已经毁坏。

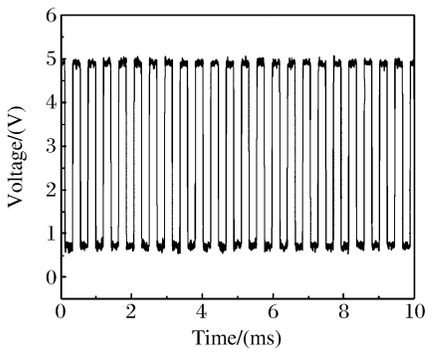


图 5 被测芯片的输入信号

Fig. 5 Input signals for measured chip

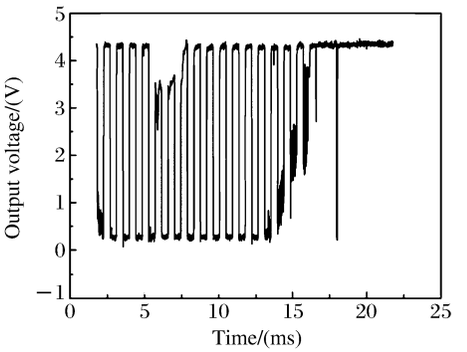


图 6 54HC05 芯片被等离子体辐射后信号的变化

Fig. 6 Variation of signals of 54HC05 chip after radiated by plasma

以探针 1 所测信号及其对应的芯片(空间坐标为(50,0,75))为例，进行详细分析。图 7 给出了位于(50,0,75)的与非门 54HC05 芯片输出电压 V_{out} 随扫描电压 V_{in} 的变化曲线。由图 7 可以看出：对于 01 号与非门，当输入信号为低电平时，输出端的输出信号经与非门运算后变为高电平，经过平滑的过渡区后，当输入信号为高电平时，经与非门运算后输出端的信号变为低电平，表明01号与非门电路功能完

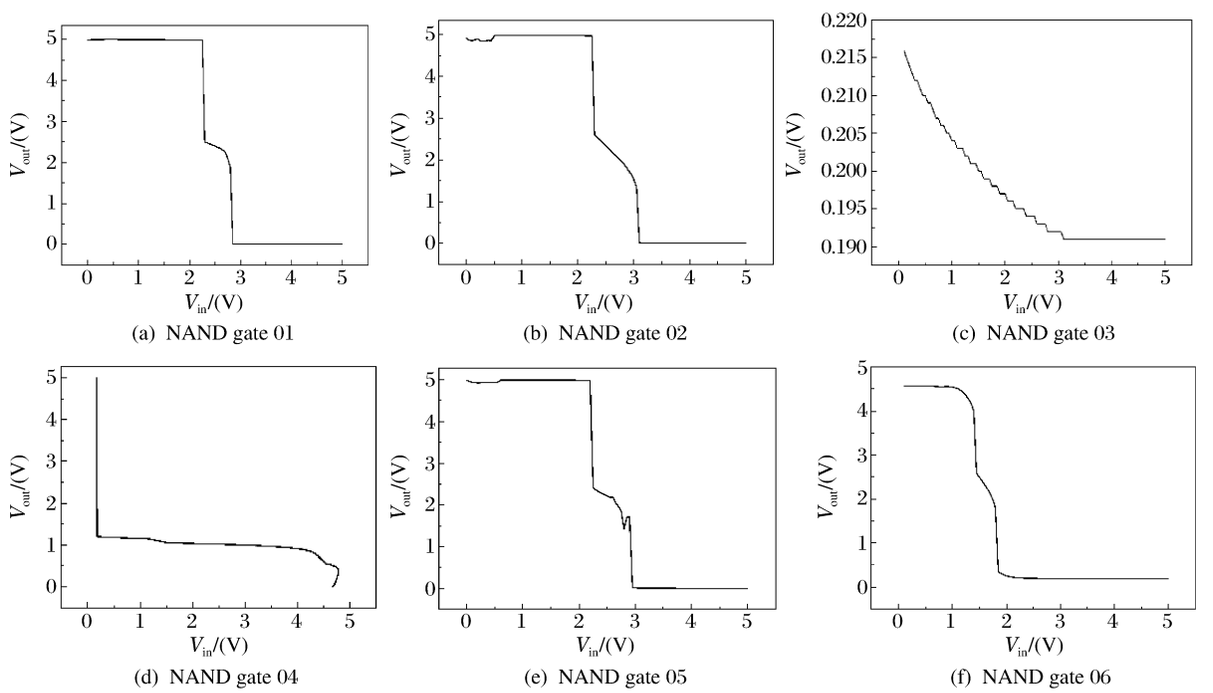


图 7 与非门 54HC05 芯片输出电压随扫描电压的变化关系

Fig. 7 Relationship between output voltage and sweep voltage of NAND gate chip 54HC05

好,可以继续工作;对于 02 号与非门,扫描电压经过与非门运算后仅能将低电平转换为高电平,而不能将输入的高电平正确地转换为低电平,说明 02 号与非门电路仅可以对低电平进行响应,在高电平状态下得不到正确的逻辑结果,不能正常工作,扫描结果与实验过程中的信号输出结果(见图 6)一致;03 号与非门的扫描电压经过运算后变成奇异的曲线,经多次扫描后证实这一路与非门已经完全烧毁;04 号与非门已经不能进行正确的逻辑计算,逻辑运算功能已经丧失;05 号与非门与 02 号与非门得到的情况基本相同,说明 05 号与非门也不能完全正常工作;而 06 号与非门的扫描电压经过与非门运算后得到了与 01 号与非门类似的结果,即 06 号与非门的逻辑运算功能正常。从 6 路与非门分析结果可以看出,除了与芯片电源比较接近的 01 号与非门以及与芯片接地端比较接近的 06 号与非门没有毁坏外,中间的与非门均遭受了不同程度的毁坏。这是因为芯片遭受等离子体辐射后,芯片内部产生了新的电子-空穴对,电子-空穴对在外加电场的作用下分别向芯片的正、负两极运动,产生附加电流。由于电源正极附近吸附的电子较多,当新的电子运动到电源正极附近时,会受到原有电子的排斥,从而减慢电子的运动速度,致使芯片中间部位的附加电流比芯片电源正极附近的大。芯片接地端也存在同样情况。所以与芯片电源和接地管脚接近的功能管脚受到等离子体辐射后,其稳定性更好。

探针 2 对应的芯片(空间坐标为(−50,185,180))也有类似的毁伤结果,只不过等离子体的电子密度随着距碰撞点距离的增大而降低,对逻辑芯片的毁伤程度也有所降低。

5　结　论

利用朗缪尔三探针诊断系统,测量了弹丸(入射速度为 6.10 km/s,入射角度为 30°)超高速碰撞 2024-T4 铝产生等离子体的特征参量,得到了给定位置和方位角处等离子体的电子密度,结合数据采集系统,对实验给定位置和方位角处逻辑芯片的干扰情况进行了评价。实验结果表明,等离子体的电子密度与毁伤程度有直接关系。距碰撞点较近时,等离子体的电子密度较大,芯片的毁伤程度相对较重;距碰撞点较远时,电子密度相对减小,芯片的毁伤程度相对较轻。究其主要原因,可能是在等离子体电子密度较大处,大量粒子沉积在芯片插脚上,致使芯片内部形成附加电流。在实验室条件下,超高速碰撞产生的等离子体确实对逻辑芯片产生干扰,甚至会造成逻辑状态的永久改变。研究方法可作为空间超高速碰撞产生等离子体对航天器上逻辑芯片毁伤评估的有效手段。

References:

[1] Hood L L, Sonnett C P, Srnka L J. Lunar magnetism [J]. Nature, 1984, 307: 661-662.

[2] Hood L L, Huang Z. Formation of magnetic anomalies antipodal to lunar impact basins: Two-dimensional model calculations [J]. J Geophys Res, 1991, 96: 9837-9846.

[3] Schultz P H. Impact vaporization of easily volatized targets: Experimental results and implications [J]. Lunar Planet Sci, 1988, 19: 1039-1040.

[4] Crawford D A, Schultz P H. Laboratory investigations of impact-generated plasma [J]. J Geophys Res, 1991, 96: 18807-18817.

[5] Gault D E, Heitowit E D. The partition of energy for hypervelocity impact craters formed in rock [C]//Proceedings of the Sixth Symposium on Hypervelocity Impact, Cleveland, USA, 1963: 419-456.

[6] Gold T, Soter S. Cometary impact and the magnetization of the moon [J]. Planet Space Sci, 1976, 24: 45-54.

[7] Hood L L, Schultz P H, Srnka L J. Cometary collisions on the moon and Mercury [J]. Nature, 1980, 287: 86-87.

[8] Takano T, Murotani Y, Maki K, et al. Microwave emission due to hypervelocity impacts and its correlation with mechanical destruction [J]. J Appl Phys, 2002, 92(9): 5550-5554.

[9] Putzar R, Schäfer F, Lambert M. Vulnerability of spacecraft harnesses to hypervelocity impacts [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35: 1728-1734.

[10] Binder D, Smith E C, Holman A B. Satellite anomalies from galactic cosmic rays [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1975,

22(6):2675-2680.

[11] Kolasinski W A,Blake J B,Anthony J K,et al. Simulation of cosmic-ray induced soft errors and latchup in integrated-circuit computer memories [J]. IEEE Trans Nucl Sci,1979,26(6):5087-5091.

[12] Waskiewicz A E,Groninger J W,Strahan V H,et al. Burnout of power MOS transistors with heavy ions of californium-252 [J]. IEEE Trans Nucl Sci,1986,33(6):1710-1713.

[13] Tang E L,Zhang Q M,Xiang S H,et al. Triple Langmuir probe diagnosis of transient plasma created by hypervelocity impact [J]. Int J Appl Electromagn Mech,2012,38(2):117-125.

[14] Tang E L,Xiang S H,Yang M H,et al. Sweep Langmuir probe and triple probe diagnostics for transient plasma produced by hypervelocity impact [J]. Plasma Sci Technol,2012,14(8):747-753.

[15] Tang E L,Tang W F,Xiang S H,et al. Coil measurement system for weak magnetic field generated by hypervelocity impact [J]. High Power Laser and Particle Beams,2010,22(5):1132-1136. (in Chinese)
唐恩凌,唐伟富,相升海,等. 超高速碰撞产生弱磁场线圈测量系统 [J]. 强激光与粒子束,2010,22(5):1132-1136.

[16] Tang E L,Zhang Q M,Zhang J. Preliminary study on magnetic induction intensity induced by plasma during hypervelocity impact [J]. Chinese Journal of Aeronautics,2009,22(4):387-392.

[17] Tang E L,Zhang Q M,He Y H,et al. Preliminary study on diagnostic techniques for transient plasma generated by hypervelocity impact [J]. Plasma Sci Technol,2008,10(6):735-738.

Interference on Logic Chips due to Plasma Created by Hypervelocity Impact on 2024-T4 Aluminum Target

TANG En-Ling[1],ZHANG Qing-Ming[2],WANG Meng[1],
XIANG Sheng-Hai[1],ZHANG Wei[1],YANG Ming-Hai[1],
LI Le-Xin[1],YU Hui[1],LUO Rong-Mei[1],ZHAO Xin-Ying[1]

(1. *School of Equipment Engineering,Shenyang Ligong University,Shenyang* 110159,*China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,*
Beijing Institute of Technology,Beijing 100081,*China*)

Abstract: To acquire the interference status of typical logic chips in spacecraft caused by plasma generated from a hypervelocity impact,the triple Langmuir probe system established by selfishness is used for diagnostics of plasma characteristic parameters created by 2024-T4 aluminum projectile hypervelocity impact on 2024-T4 aluminum target,with the impact velocity and incidence angle of 6.10 km/s and 30°,respectively. The plasma electron density is measured at a given position with a given azimuth,and the interference estimation is performed for logic chip by data acquisition system. The experimental results show that the logic chips in spacecraft will be seriously influenced by plasma generated at hypervelocity impact.

Key words: hypervelocity impact; plasma; logic chip; electromagnetic interference