

文章编号: 1000-4734(2001)03-0345-06

隐身材料研究开发现状与矿物材料在其中的应用

王宁¹ 朱俊¹ 冯俊明¹ 张强²

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002;

2. 广西贵港市广西东山建材厂, 广西 贵港 537100)

摘要: 本文简要介绍了隐身技术中的电磁波吸收材料及矿物材料的研究开发现状。并针对日益严重的电磁波环境污染等问题, 讨论了矿物材料在电磁波污染防治、隐身技术和远红外吸收制品等方面的应用前景及应注意的问题。

关键词: 隐身材料; 矿物材料; 环境电磁学

中图分类号: P579; TB34; V254.3

文献标识码: A

作者简介: 王宁, 男, 1964 年生, 副研究员, 博士, 矿物材料、环境矿物学。

隐身技术是通过控制武器系统的信号特征, 使其难以被发现、识别和跟踪打击的技术, 主要包括雷达隐身、红外隐身、声隐身以及视频隐身等。在现代战争中, 雷达是探测目标最可靠的手段, 因此隐身技术的研究是以雷达特征信号控制为重点。隐身技术的研究始于 1945 年, 但是直到 1977 年美国洛克希德公司才研制出了隐身战斗机 F-117A^[1]。目前隐身技术已经被广泛用于运动军事目标(飞机、导弹、坦克、潜艇等)和非运动军事目标(如雷达站、军用机场等)。隐身技术中使用的材料主要是电磁波吸收材料。这种材料除了用于军事上外, 在当今电磁波环境污染日益严重的情况下^[2], 在防治电磁波污染方面也具有广阔的应用前景。

制约电磁波吸收材料应用范围的一个关键问题是其费用高昂。利用天然矿物中某些矿物具有良好吸收电磁波能力的特性, 开发吸波材料, 不仅可以扩大矿物学的研究领域, 还能将丰富的矿产资源利用起来, 用于隐身技术和环境保护等方面。本文首先对隐身材料的研究现状, 以及矿物材料在其中的应用进行简单的介绍, 并指出了矿物材料在电磁环境学中的应用前景和应注意的问题。

1 雷达隐身材料的研究发展现状

隐身技术主要包括有雷达隐身、红外隐身、声隐身以及视频隐身等, 但是由于在现代及未来战争中, 雷达仍是探测目标最可靠的手段, 因此隐身技术的研究重点一直是以雷达隐身技术, 特别是厘米波(2~18 GHz)及毫米波(30~300 GHz)雷达隐身技术为研究重点。伴随着先进的探测设备的相继问世(如俄罗斯的“高王”米波探测雷达, 荷兰的“翁鸟”毫米波雷达以及先进红外探测雷达等), 今后的研究还将开展红外、声、视频及其它隐身技术的研究, 最后向多功能、高性能的隐身方向发展^[3], 使其具有对米波、厘米波、毫米波以及红外、激光等多波段电磁波为一体的多频谱隐身能力。

智能型隐身材料是一种具有感知功能、信息处理功能、自我指令并对信号作出最佳响应的功能材料。美国制定的隐身材料研究目标是 2005 年研制出可单独控制的辐射率/反射率涂层, 2010 年研制出能自动对背景和威胁作出反应的自适应涂层体系。

雷达隐身技术的核心是降低雷达散射截面(RSC), 其技术途径主要包括外形技术和雷达吸波材料(RAM: radar absorption materials)技术。雷达吸波材料又称为微波隐身材料或微波吸收材料, 它是能够将吸收衰减入射的电磁波, 并将其电磁能转为其它形式能量耗散掉或使电磁波因干涉而消失, 从而减弱电磁波反射的一种材料。对其主要技术要求是吸收频带宽、质量轻、多功能和厚

收稿日期: 2000-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(49902004); 2001 年贵州省自然科学基金项目

度薄等。

RAM 技术按功能可分为涂覆型和结构型, 结构型是将吸收材料分散在特种纤维(如玻璃纤维、石英纤维、碳纤维等)增强的结构材料中所形成的结构复合材料, 它具有承载和吸收雷达波的双重功能⁴; 涂覆型 RAM 是将吸收剂与粘合剂混合后涂覆于目标表面形成吸波涂层。

按材料损耗机理, 雷达吸波材料可分为磁介型、电阻型和电介型⁵。磁介型吸波机理主要是磁滞损耗和铁磁共振损耗, 主要有铁氧体、羰基铁、多晶铁纤维等; 电阻型吸波材料主要依靠材料电阻来衰减电磁波, 种类有碳化硅纤维、导电高聚物、石墨等; 电介型的机理为介电极化弛豫损耗, 代表种类有钛酸钡等。

铁氧体、金属微粉、钛酸钡、碳化硅、石墨、导电纤维等为传统吸波材料, 它们具有吸收频带宽、密度大等不足之处。纳米材料、多晶铁纤维、手征材料、导电高聚物、电路模拟吸波材料是新型吸波材料。在这些材料中, 以铁氧体吸波材料和金属微粉吸波材料研究得最多, 而纳米材料和多晶铁纤维则是目前新型吸波材料中性能最好的两种。

1.1 铁氧体材料

铁氧体吸收电磁波的主要机理是自然共振⁶。根据微观结构铁氧体可分为尖晶石型和六角晶系铁氧体两类。铁氧体吸波材料具有吸收强、频带较宽及低成本的特点, 但是也具有密度大、高温性能差等缺点。天然矿物的吸波材料基本上都属于这一类。其中氧化铁是最早使用的吸波材料, 它能将入射的电磁波能量转换为热能, 这种材料除用于飞行器的隐身材料外, 还可用于建筑物的外涂层, 防止电磁波污染。

由于氧化铁只能用于 250 °C 以下, 而飞行器在飞行时与空气磨擦产生高温。因此西方国家研制出了锂镉铁氧体、锂镧铁氧体、镍镉铁氧体、陶瓷铁氧体等新类型的铁氧体材料。

1.2 金属微粉吸波材料

金属微粉吸波材料具有微波磁导率较高、温度稳定性好等特点。它主要通过磁滞损耗、涡流损耗等吸收损耗电磁波⁷, 主要有两类, 一是羰基金属微粉, 包括羰基铁、羰基镍、羰基钴, 粒度一般为 0.5 ~ 20 μm; 另一类是通过蒸发、还原、有机醇盐等工艺得到的磁性金属微粉, 种类有 Co、Ni、

CoNi、FeNi 等⁸。这当中羰基铁微粉是最常用的一种, 如美国 F/A-18C/D 大黄蜂隐身飞机就使用了羰基铁微粉吸波材料。

金属微粉吸波材料的缺点是抗氧化、耐酸碱能力差, 介电常数较大, 且频谱特性差, 低频段吸收性能较差, 密度大。

1.3 纳米材料

纳米材料是指材料组分的特征尺寸处于纳米量级(1 ~ 100 nm)的材料, 结构特征使其具有量子尺寸效应、宏观量子隧道效应、小尺寸和界面效应, 从而呈现奇特的电磁、光热、以及化学等特性。用作微波吸收材料具有频带宽、兼容性好、质量小、厚度薄的特点, 是一种有发展前途的雷达吸波材料⁹。

纳米吸波材料除了对微波有良好的吸波性能外, 对于红外等其它电磁波, 特别是高频电磁波也具有优良的吸收性能。它对电磁波能量的吸收机制尚不清楚, 通常认为是由晶格电场热运动引起的电子散射、杂质和晶格缺陷引起的电子散射, 以及电子与电子之间的相互作用三种效应决定。

目前被称作超黑色纳米材料的雷达吸波率高达 99%。法国最近研制成一种宽频微波吸收涂层¹⁰, 其厚度约为 8 nm, 磁导率的实部与虚部在 0.1 ~ 18 GHz 频率范围内均大于 6, 与粘合剂复合而成的 RAM 在 50 MHz ~ 50 GHz 频率范围内吸波性能较好。

1.4 多晶铁纤维吸波材料

多晶铁纤维是 20 世纪 80 年代中期开始研制的¹¹, 它包括 Fe、Ni、Co 及其合金纤维。它具有形状和向异性。粘结剂中多晶铁纤维定向排列, 可在很宽的频带内实现高吸收率。质量比传统金属微粉材料减轻 40% ~ 60%, 涂层质量仅为 1.5 ~ 2.0 kg/m²。是一种轻质磁性雷达吸波材料。

2 隐身材料中的矿物材料

由于隐身技术开发的费用高昂, 限制了其在军事上的应用, 例如美国在开发 F/A-18E 超大黄蜂新型战机时¹², 选择了在性能与成本之间平衡的方案。因此在民用上应用范围极小, 目前对于民用电子器件的电磁波防护, 通常是采用金属屏蔽方式, 但这种方式只是将电磁波反射, 并不能对其进行消减, 所以对于不能采用金属屏蔽方式防

护的电子器件,如何进行防护一直是要加以解决的问题。

通过对天然矿物的微波电磁性能研究,可以筛选出具有良好电磁波吸收性能的材料,用于电磁波的防护方面,这是近十多年来矿物物理学发展起来的一个新领域。天然产物具有储量大、加工简单、价格低廉、使用方便的特点,是一种具有广阔应用前景的电磁波吸收材料。目前已经在微波介质材料和微波吸收材料方面取得了比较成功的成果^[13]。

2.1 微波吸收材料

冯俊明等人^[13]利用谐振腔微波波法,在三公分频段(中心频率9 370 MHz)对近200种矿物微波复介电常数进行了系统测量。结果表明各类矿物之间微波电磁特性差异很大, ϵ' 为4.0~600, ϵ'' 为0.005~90,相差5~6个数量级。虽然其中绝大多数矿物仅有电损耗,而无磁损耗,但是有些多元型铁氧体系列,具有良好的微波吸收特性。

利用这类铁氧体材料经过特殊加工工艺制成的微波吸收材料,其电磁性能可达到在8~12 GHz频率范围内 $\epsilon' \approx 60$, $\epsilon'' \approx 10.0$, $\mu' \approx 1.2 \sim 1.5$, $\mu'' \approx 1.0 \sim 1.2$,属具有一定磁导率、低介电常数、高电磁损耗磁性材料。该材料的吸波频宽 ≥ 5 GHz,吸波率为-10 dB,已经成功地用作某种国产飞机的吸波片材。

矿物学的研究工作表明,该种铁氧体是一个典型的多种掺杂多元系列的复合铁氧体,具有网状结构。其中一部分矿物呈现出极小的晶体($< 1 \mu\text{m}$)。这表明在这种铁氧体中可能存在有纳米级微结构。

娄明连等^[14,15]对大别山区河床中产出的主要成分为尖晶石型铁氧体河铁砂的微波电磁特性进行了研究,并采用聚氨脂做粘结剂,研制出了一种电波吸收涂料,发现其涂层厚度在0.6 mm时,其8.6 GHz和10 GHz两个吸收峰的吸收率最大可达-12 dB。

2.2 微波介质材料

对天然矿物电磁学特征研究,不仅可以得到吸波材料,而且还可以得到微波介质材料。与微波吸收材料相反,微波介质材料要求的是高介电常数($\epsilon' \geq 10$),低介电损耗($\text{tg } \delta \leq 3.0 \times 10^{-3}$),低密度等高性能,要求能透过电磁波。在军事上主

要用于微带电路基片、介质天线和雷达罩等的制做^[16]。微波介质材料在20世纪60~70年代主要有陶瓷系列和工程塑料系列两大类。由于二者在性能上的不足,80年代以来逐步被有机-无机多相复合材料技术方案所代替,在复合材料中介电功能材料起着十分重要的作用。根据文献资料的分析,对于介质材料的研究主要集中在采用人工合成的金红石、磷酸铝、磷酸铬、碳纤维镀金属膜、超细金属粉等材料及其复合材料等方面。

利用筛选出的天然金红石等原料制备的复合微波介质材料,具有介电常数选择范围宽($\epsilon: 3 \sim 20$)、介质损耗低($\text{tg } \delta \leq 3.0 \times 10^{-3}$)、低温度系数($\Delta E/E: -2 \times 10^{-6}$)、低密度、机械性能好的优点,目前已经应用在介质基片、介质天线等产品中,取得了良好的结果,同时还制订了微波介质金红石^[17]与复合微波介质片^[18]两个电子工业行业标准。

优质天然金红石的微波介质指标优于人造金红石,即使是在相结构和主要成分含量相近时,其介电常数仍相差20%~30%,介电损耗也有变化^[19],这一特点在人工介质材料制备中有重要意义。矿物学研究表明其原因是由于晶体中的杂质和缺陷所致。金红石的主要化学成分为 TiO_2 ,常含有Fe、Al、Cr、V、Nb、Ta、Mg等杂质元素。近年来又发现金红石含有氢或羟基,并且含量与形成条件有关^[20]。这些杂质以成对置换形式对金红石中的钛和氧进行异价类质同象置换,从而造成晶格缺陷。这些缺陷由于其固有的偶极子,将影响其介电常数和介电损耗^[21]。晶体缺陷通过局部的Lorentz有效场同晶体的介电常数相联系。Parker^[22]计算了金红石的Lorentz场,Hill^[23]研究了氢对金红石性能的影响。冯俊明等^[24]提出金红石中氧空位造成介电损耗升高,同时认为金红石中三价杂质离子可增强金红石的抗还原性,减少氧空位的产生,并据此解释人工金红石杂质含量比天然金红石低,而其介电损耗高、介电常数低的现象。

3 红外隐身材料的地物背景——岩石土壤矿物的发射率研究

红外探测系统采用的红外线波长范围为2~14 μm ,通过探测目标与其所处背景之间的温度差而探测和跟踪目标^[25]。探测跟踪目标主要以尾喷管的红外辐射为主,其次是武器系统表面由

于气动加热、阳光辐射或地球辐射的反射作用引起的红外辐射。因此被动式红外隐身是采用一定的技术措施与手段,最大限度地减少目标与背景之间的红外对比度,抑制目标的红外特征信号,使目标不易被红外探测器发现。

由此可以看出红外隐身技术的基础是背景的红外辐射,所以研究岩石土壤的红外辐射,不仅可以了解物体在自然环境中红外辐射背景,而且可以通过对矿物的红外辐射特性研究,寻找可用于制作红外隐身涂层的材料和进行红外隐身设计。

目前我们已对 98 种矿物、34 种岩石、19 种土壤约 200 个样品的光谱发射率、全波长积分发射率和 50 余种单矿物的光谱发射率曲线进行了测定。

4 隐身材料在环境保护方面的应用前景

4.1 电磁波吸收材料

随着城市人口的增加,汽车、通讯、计算机与

电子、电气设备大量进入家庭,特别是信息时代的到来,人类生存环境中的电磁污染已成定局。为了防止电磁环境恶化给通讯、各种电子设备以及人类带来灾难性的危害,环境电磁学及电磁相容技术成为一个迅速发展的新学科。

根据频率电磁波分为长波(100 ~ 300 kHz)、中波(300 kHz ~ 3 MHz)、短波(3 ~ 3 MHz)、超短波(30 ~ 300 MHz)和微波(300 MHz ~ 300 GHz)等。目前对于电磁波与生物组织的作用研究得最多的一是电力工业频率(50 Hz ~ 60 Hz),二是无线电波段(射频)和微波。虽然近年来在这一领域取得了很大进展,但还缺乏长期系统的测试结果,甚至有些结果互相矛盾,例如移动通讯对人体的影响问题^[26]。现代医学已经证实电磁波对有机体确实具有热作用、非热作用和刺激作用等不良影响^[27]。我国制订的环境电磁波卫生标准^[28]中允许地电磁波辐射如表 1 所示,并且国家环保局还多次呼吁公众要警惕电磁波污染,防止其对人们健康的危害。

表 1 环境电磁波容许辐射强度分级标准

Table 1. The grade standards of the permitting irradiation intensities of environmental electromagnetic waves

波长	单位	容许场强	
		一级(安全区)	二级(中间区)
长、中、短波	V/m	< 10	< 25
超短波	V/m	< 5	< 12
微波	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$	< 10	< 40
混合	V/m	按主要波段场强;若各波段场分散,则按复合场强加权确定	

对于电磁波的防护,目前主要采用对产生的污染源进行电磁屏蔽的方式^[29]。但是随着个人电脑、移动通讯设备等各种家用电器进入人类的日常生活中,由于它们独自的辐射量很小,难以屏蔽,而且像移动电话这类不能进行屏蔽的设备来说,采用电磁屏蔽的方法就不行了。此时采用吸波材料吸收电磁波的方法是一个可行的途径。历史上,在闭路电视尚未普及时,就有过在建筑物上涂掺加了氧化铁的涂料,吸收电磁波,降低电视信号中的重影的成功例子。

因此对于不同的电磁波污染源,应采取不同的技术途径,达到有效降低电磁辐射污染的目的。隐身材料研究中形成的技术和材料对于开发用于环境保护的吸波材料具有重要的借鉴意义。而且

这种产品具有广泛的市场前景。

4.2 天然远红外纺织品的研制

天然远红外纺织品具有吸收和发射远红外线的功能,它是 20 世纪 90 年代发展起来的高新技术产品之一,具有防水、透湿、保暖、抑菌等功能,该类纺织品有两种类型,一是由高发射率远红外粉加入到纤维内部,再将纤维加工成纺织品,称远红外纤维纺织品;另一类是采用后整理的方法,将高发射率远红外粉末均匀地分散到粘合剂中,然后在纺织品上作成涂层,称为远红外涂层纺织品。此种纺织品能吸收人体或环境中辐射出来的 8 ~ 25 μm 的红外线,也能吸收太阳、电炉等其它热源发射的短波红外线,将其转换为热,产生温热效

应,对人体有一定的保健作用。

目前,姜泽春等人利用从天然矿物等原料的筛选矿物材料,已经开发出了远红外涂层纺织品。

4.3 微波电热材料

某些微波吸收材料在吸收微波将其能量转化热能方面效率很高,可以用作微波电热材料。研究表明某些天然产出的铁氧体材料在2 540 MHz(微波炉工作频率)微波辐射下,在不到10 s内温度可以迅速达升到100~300℃。同样人工合成的针状氧化锌晶体,也具有好的吸波性,在5~18 GHz波段内,其吸波量可达16~68 dB。盛满氧化锌晶须的烧杯在微波炉内,10 s多就可以达到赤热状态^[30]。这些材料性能稳定,可以反复使用,是良好的微波加热器发热体。除了在工业微波加热方面有好的应用前景外,在目前微波炉日益普及的情况下,以其研制开发微波炉用品,也具有好的市场前景。

5 结束语

随着军事上对多功能隐身技术的要求,以及

电磁波环境污染问题日益受到关注,电磁波吸收材料越来越受到人们的重视。降低吸波材料的成本是扩大微波吸波材料使用范围的一个关键问题。开发利用我国丰富的天然矿物资源是一个大有希望的研究领域。在这方面应该注意的问题是:

(1) 根据隐身材料及其它电磁波材料发展趋势,继续开展对天然矿物和人工合成矿物的矿物学、电磁学特征研究,从中筛选出更多在电磁波技术方面有应用前景的新型矿物材料。

(2) 利用纳米材料科学、表面科学等材料科学的新理论、新知识和研究手段,对矿物的物质组分、晶体结构、杂质种类、结构缺陷等,特别是纳米尺度上的矿物结构和性能研究,探讨其与矿物电磁波性能之间的关系。

(3) 在研究中应该利用已有的测试数据和现代计算机技术,建立矿物性能定量模型、模式,并与人工合成矿物学结合,合成新型材料。

(4) 加强对矿物深加工和材料制备工艺技术的研究,研制开发市场的需要产品,将资源优势,转化为现实产品。

参 考 文 献

- [1] 曹克广. 国外微波隐身材料的发展及现状[J]. 抚顺石油学院学报, 1997, 17(2): 29~32.
- [2] 高攸纲, 刁庆安. 展望 21 世纪的环境电磁学及电磁兼容技术(上)[J]. 邮电设计技术, 1999(5): 1~5; 19.
- [3] 王海. 雷达吸波材料的研究现状与发展方向[J]. 上海航天, 1999(1): 55~59.
- [4] Thmos K D, Playa D R and Norman H H, *et al.* Broadband absorber of electromagnetic radiation based on aerogel materials and method of making the same [P]. *US patent* 5381149, 1995.
- [5] 橘本 修. 新电波吸收体の最新技術と应用[M]. 日本シーエムシー(株), 1999.
- [6] 方亮, 龚荣洲, 官建国. 雷达吸波材料的现状与展望[J]. 武汉工业大学学报, 1999, 21(6): 21~24.
- [7] 王智勇, 刘俊能. 超细金属粉微波电磁性能的研究[J]. 航空材料学报, 1994, 14(3): 7~13.
- [8] Viau G, Ravel F and Acher P. Preparation and microwave characterization of spherical and monodisperse CoNi particles [J]. *J Appl Phys*, 1994, (4).
- [9] 孟凡文, 杨觉明, 严文, 刘卫国. 纳米复合隐身材料[J]. 西安工业学院学报, 1999, 19(4): 324~328.
- [10] 孟新强, 朱绪宝. 隐身技术和隐身武器的研究及应用现状[J]. 弹箭与制导学报, 1999(3): 59~64.
- [11] Charles E B, Eric J B and Richard J K, *et al.* Microwave absorber employing acicular magnetic metallic filaments [P]. *US patent* 5085931, 1992.
- [12] 朱宝明. 隐身技术与成本问题[J]. 飞航导弹, 1997, (7): 8~13.
- [13] 冯俊明. 矿物材料在微波与电子技术中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16: 199~202.
- [14] 姜明连, 阚涛, 姜天红. 一种廉价的电波吸收材料研究[J]. 功能材料, 1997, 28(4): 383~385.
- [15] 胡国光, 姚学标, 尹平, 李文凤. 用铁砂制备的铁氧体微波吸收剂的特性研究[J]. 磁性材料与器件, 1998, 29(5): 54~56.
- [16] 胡连成, 黎义, 于翹. 俄罗斯航天透波材料研究现状[J]. 宇航材料工艺, 1994, (1): 46~52.
- [17] SJ/T 10244-91. 中华人民共和国电子工业行业标准[S].
- [18] SJ/T 10245-91. 复合微波介质片[S].

- [19] 赖兆生, 冯俊明, 肖金凯. 天然金红石微波介质材料的研究[J]. 矿物学报, 1981, (3): 175~191.
- [20] Vlassopoulos G, *et al.* Coupled substitution of H and minor elements in rutile and the implications of high OH contents in Nb and Cr rich rutile from the upper mantle [J]. *Amer. Miner.*, 1993, 78: 1181~1191.
- [21] 廖绍彬, 等. 多晶铁氧体微波介质损耗的研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1979, (3): 52~65.
- [22] Parker. Lorentz corrections in rutile [J]. *Phys. Rev.*, 1961, 124(6): 1004~1010.
- [23] Hill G J. The effect of hydrogen on the electrical properties of rutile [J]. *British J. of Applied Physics*, 1968, (1): 1151~1162.
- [24] 冯俊明, 等. 复合微波介质材料的研制与金红石的矿物物理[A]. 第二届矿物物理矿物材料和宝石学会议论文集[C], 1987, 172~181.
- [25] 栾大龙, 等. 红外隐身技术与反红外隐身技术[J]. 红外与激光技术, 1995, 24(3): 18~21.
- [26] GB9175-88. 环境电波卫生标准[S].
- [27] 毛桦, 吴哲. 莫衷一是的移动电话辐射危害[J]. 山东电子, 1999, (1): 8~9; 20.
- [28] 高攸纲, 刁庆安. 展望 21 世纪的环境电磁学及电磁兼容技术(下)[J]. 邮电设计技术, 1999, (6): 1~7.
- [29] 张碧田, 李国勋, 翟俊英, 杨青. 电磁屏蔽织物的制备与应用[J]. 环境工程, 1995, 13(5): 38~39.
- [30] 周柞万, 彭卫明, 邓海. 氧化锌晶须及其复合材料应用[J]. 化工新型材料, 1998, 26(11): 13~17.

DEVELOPMENT OF CONCEALMENTAL MATERIAL AND THE APPLICATION OF MINERAL MATERIALS IN IT

Wang Ning¹ Zhu Jun¹ Feng Junming¹ Zhang Qiang²

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002;

2. Dongshan Building Material Factory, Guangxi, Guigang, 537100)

Abstract: The development of concealmental materials and the application of mineral materials in this field are introduced briefly. Considering the serious pollution of electric waves, the potential application of mineral materials in controlling electric wave pollution, and developing concealmental material and ultra-infrared ray absorber is also discussed.

Key words: concealmental materials; mineral materials; environmental electromagnetism