

文章编号: 2095-4980(2020)01-0165-05

## PbS/并五苯场效应晶体管红外光电探测器

杨 丹<sup>a</sup>, 范荣华<sup>b</sup>, 苗丽华<sup>a</sup>, 匡宝平<sup>a</sup>, 申笑颜<sup>a</sup>, 黄 和<sup>a</sup>

(沈阳医学院 a.计算机与数理教学部; b.公共卫生学院, 辽宁 沈阳 110034)

**摘 要:** 合成了尺寸均匀、分散性好, 且吸收峰在近红外光谱区的硫化铅(PbS)量子点(QDs), 并将其作为红外光吸收源与易于成膜且电学性能优良的有机化合物并五苯(Pentacene)相结合, 形成量子点/并五苯复合薄膜作为有源层, 采用顶栅底接触型水平场效应晶体管(FET)结构制备了红外光电探测器 Au(S,D)/PbS QDs/Pentacene/PMMA/Al(G)。测试了暗态和 980 nm 波长激光照射下器件的电学参数和探测参数; 探究了器件中载流子的传输机制; 得到了电学和探测性能优良的 PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器, 在辐照度为 0.1 mW/cm<sup>2</sup> 的红外激光照射下, 器件的响应度达到 49.4 mA/W, 对应探测率为 1.7 × 10<sup>11</sup> Jones。

**关键词:** 红外光电探测器; 场效应晶体管; 量子点; 并五苯

**中图分类号:** TN215

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019295

## PbS/Pentacene FET-based infrared photodetector

YANG Dan<sup>a</sup>, FAN Ronghua<sup>b</sup>, MIAO Lihua<sup>a</sup>, KUANG Baoping<sup>a</sup>, SHEN Xiaoyan<sup>a</sup>, HUANG He<sup>a</sup>

(a.Department of Computer Science, Mathematics and Physics;

b.School of Public Health, Shenyang Medical College, Shenyang Liaoning 110034, China)

**Abstract:** Size uniformed and well solution-dispersed lead sulfide(PbS) Quantum Dots(QDs) were synthesized, which were used as absorbing sources of the infrared illumination due to its absorption peak in the near-infrared spectral region. Pentacene was one of the popular organic compounds, which was easy to form films and had good electrical property. The two semiconductor materials were fabricated into a composite film as the active layer in the top-gate bottom-contact type Field-Effect Transistor(FET)-based infrared photodetectors Au(S,D)/PbS QDs/Pentacene/PMMA/ Al(G). In dark and under 980 nm illumination, the electrical and detecting parameters were measured, and the carriers transmission mechanism of the device was analyzed. A kind of PbS QDs/Pentacene composite film FET-based infrared photodetector with excellent electrical and detecting performances was obtained. Under the irradiation of a 0.1 mW/cm<sup>2</sup> infrared laser, the responsivity of the device reached 49.4 mA/W, and the corresponding detectivity was 1.7 × 10<sup>11</sup> Jones.

**Keywords:** infrared photodetector; Field-Effect Transistor(FET); Quantum Dots(QDs); Pentacene

光电探测器作为光电子器件的重要成员之一, 广泛应用于国民经济、军事、医疗等各个领域<sup>[1]</sup>, 在可见光或近红外波段主要用于光度计量、射线测量和探测、工业自动控制等方面, 在红外波段主要用于红外热成像、红外遥感、导弹制导等方面。随着光电子技术和红外技术的迅速发展, 近红外光谱在制药工业和临床医学中的应用日趋广泛<sup>[2-4]</sup>, 在制药方面可用于药物中活性组分的测定, 固体药剂的非破坏性表征, 药物生产过程各个阶段的在线监控, 原料和产品的鉴定等; 在临床医学方面可用于糖尿病血糖的检测, 人体大脑和其他器官氧合作的测定等。而作为近红外光谱仪的重要组成部分, 红外光电探测器的性能直接决定了光谱仪的测试精确度, 因此低成本、高性能的红外光电探测器一直被作为研究的焦点。

场效应晶体管(FET)作为重要的电子元器件, 已被广泛应用于光电集成电路、数据存储电路、放大电路、整

收稿日期: 2019-08-14; 修回日期: 2019-11-14

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2019-ZD-0333, 20180550122); 沈阳医学院博士科研启动基金资助项目(20163044); 沈阳医学院大学生科研课题资助项目(20198033)

作者简介: 杨 丹(1985-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为医学物理学、医学纳米材料与应用。email: yang.dan1127@163.com

流电路和逻辑电路中<sup>[5-6]</sup>。在光电探测方面,将场效应晶体管应用于光电探测器,可通过栅压的调制作用,提高光生电子-空穴对的解离率,降低自由载流子的复合率,从而获得更大的增益、更高的响应度和良好的信噪比。刚好克服了常见光电二极管光电探测器激子快速湮灭、光增益较小等缺点,使其不但具有信号放大功能以实现优良的光电探测性能,而且更易于集成在光电子电路中。近年来,人们充分利用有机半导体材料廉价、轻质、与柔性基底兼容、可大面积制备等优势来制备有机光电探测器<sup>[7-8]</sup>。但由于大多数有机半导体材料的吸收范围都在可见光区,这在一定程度上限制了器件的应用范围和入射光的利用率。然而,硫化铅(PbS)、硒化铅(PbSe)和碲化铅(PbTe)等IV-VI族量子点(QDs)作为新一代红外光电子器件研究的热门材料<sup>[9-10]</sup>,由于具有较大的介电常数和玻尔半径,且吸收峰在 800~3 500 nm 的波长范围内可调,刚好可以弥补有机半导体材料在红外光谱区的不足。利用在红外光谱区具有较高吸收率和强量子限域效应的 PbS 量子点作为光敏材料,结合高载流子迁移率和易于成膜的有机化合物并五苯(Pentacene)作为载流子和能量的传输材料,二者复合得到 PbS 量子点/并五苯有源层;采用顶栅底接触型水平 FET 作为器件的基本结构;制备了红外光电探测器 Au(S,D)/PbS QDs/Pentacene/PMMA/Al(G)。在红外光谱区对器件性能进行研究,获得了相对较高的响应度和探测率,这为制备高灵敏度、低成本、微型、柔性红外光电探测器提供了实验基础,在医学红外技术领域也具有较大的应用前景。

## 1 实验部分

### 1.1 PbS 量子点的制备

将氧化铅(PbO)和六甲基二硅硫烷(Bis(Trimethylsilyl) Sulfide, TMS)分别作为铅源和硫源,使用油酸(Oleic Acid, OA)作为表面活性剂,通过热注入法制备 PbS 胶体量子点。首先,在盛有 13 mL 十八碳烯(1-Octadecene, ODE)的圆口烧瓶中加入 PbO 与 OA 混合物(摩尔比为 2:5),保持 150 °C 加热搅拌 60 min。充分溶解后,迅速注入 0.2 mL TMS、1.8 mL ODE 与 0.04 mL 的二苯基膦(Diphenyl Phosphine, DPP)的混合溶液,静置 90 s 后,加入正己烷淬灭反应,整个制备过程均在氮气保护下进行。待溶液冷却至室温后反复清洗量子点,并放入真空干燥箱中干燥备用。

### 1.2 器件的制备及光电测试

PbS 量子点/并五苯复合薄膜红外光电探测器采用顶栅底接触型水平 FET 结构,示意图及其测试电路如图 1 所示。将刻蚀有搭载电极的氧化铟锡(Indium Tin Oxides, ITO)导电玻璃片作为基底,在其上蒸镀厚度为 50 nm 的叉指状金源(Source, S)电极和漏(Drain, D)电极,形成导电沟道宽长比为 172。之后,旋涂 20 mg/mL 的 PbS 量子点溶液形成 40 nm 无机半导体薄膜,随后再蒸镀厚度为 50 nm 的有机并五苯薄膜以形成复合有源层。随后,将 80 mg/mL 的聚甲基丙烯酸甲酯(Poly(methyl methacrylate), PMMA)溶液旋涂于有源层之上形成 800 nm 的绝缘层。最后,在器件顶部蒸镀铝栅(Gate, G)电极,器件的有效面积为 4 mm<sup>2</sup>。测试中采用 980 nm 红外激光器作为入射光源,由器件底部透明玻璃垂直入射,所有测试均在室温、暗室条件下进行。

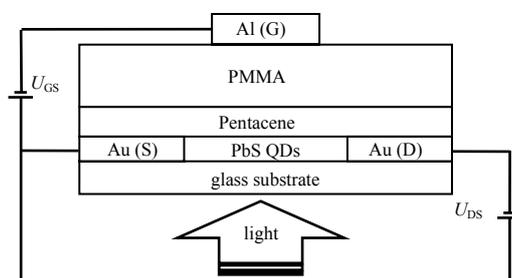


Fig.1 Configuration and test circuit of PbS QDs/Pentacene composite film FET-based infrared photodetector

图 1 PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器结构示意图及其测试电路

## 2 结果与讨论

### 2.1 PbS 量子点的表征

PbS 量子点的吸收光谱如图 2 所示,可以看出, PbS 量子点在波长 1 150 nm 左右出现明显的吸收峰,表现出良好的红外光学特性。图 2 中,插图为 PbS 量子点的透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)图,可以看出, PbS 量子点形状近似球形,粒径大小分布均匀且分散性好,测量直径约为 3 nm 左右,这为制备红外光电探测器提供了良好的材料基础。

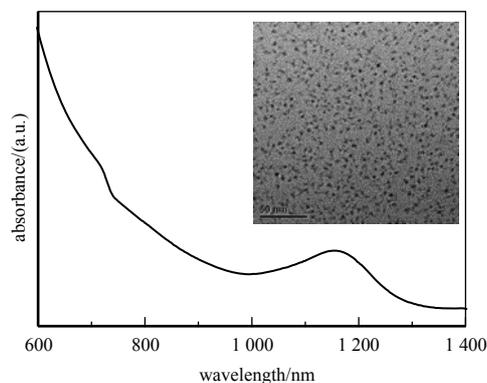


Fig.2 Absorption spectra of PbS QDs (The inset gives the TEM image)

图 2 PbS 量子点的吸收光谱(插图为其 TEM 图)

2.2 器件的电学性能

在无光照时，PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器的输出和转移特性曲线如图 3 所示。从图 3(a)输出特性曲线可以看出，源-漏电流( $I_{DS}$ )随着源-漏电压( $U_{DS}$ )和栅极电压( $U_{GS}$ )的负向增大而增大，且出现了明显的线性区和饱和区，器件“开”、“关”状态显著。同时进一步由图 3(b)转移特性曲线可知，在  $U_{DS}=-40\text{ V}$  时，由  $|I_{DS}|^{1/2}-U_{GS}$  曲线的斜率可得器件阈值电压( $U_{th}$ )为 1.4 V。

器件的载流子迁移率( $\mu$ )可由饱和区电流公式得到<sup>[11]</sup>：

$$I_{DS} = \frac{W}{2L} C \mu (U_{GS} - U_{th})^2 \tag{1}$$

式中： $W$  和  $L$  分别为导电沟道的宽度和长度； $C$  为 PMMA 绝缘层的单位电容值，通过测量为  $2.6\text{ nF/cm}^2$ ；则计算可得  $\mu$  为  $7.2 \times 10^{-4}\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，说明器件具有良好的 P 型 FET 电学特性，利于进一步实现探测。

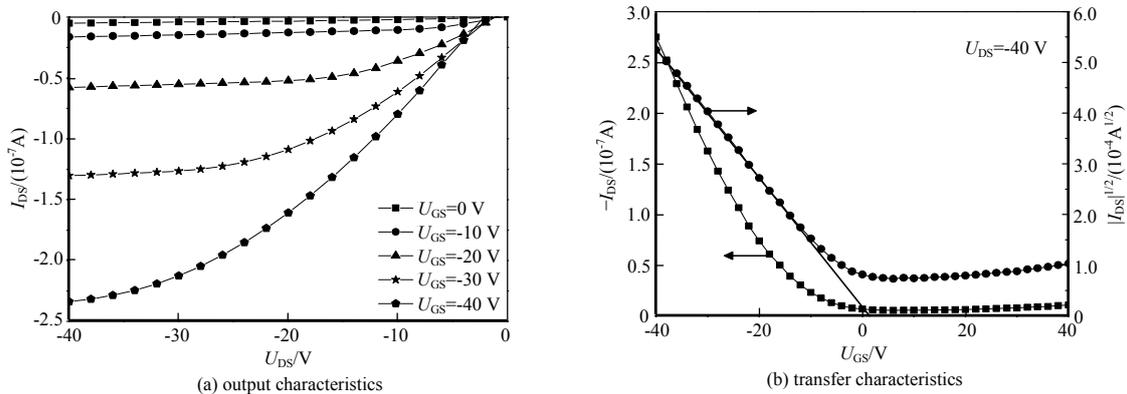


Fig.3 Output and transfer characteristics of PbS QDs/Pentacene composite film FET-based infrared photodetector  
图 3 PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器的输出和转移特性曲线

2.3 器件的探测性能

基于 PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器良好的电学性能，进一步对其红外探测性能进行深入研究，选择 980 nm 红外激光从玻璃基底直接照射器件，得到光照下器件的转移特性曲线，如图 4(a)所示。可以看出，红外光照后转移特性曲线发生了明显的正向移动，这是由于 PbS 量子点吸收光子而产生光生载流子，参与导电的空穴数目增加，使得电流  $I_{DS}$  显著增大。同时，随着栅压  $U_{GS}$  的负向增大，光生电流随之逐渐增大，这也体现了 FET 器件结构中特有的栅压调制作用。另外，随着  $U_{GS}$  的负向增大，光生电流并非直线增加，而随电压增大增幅变小，逐渐趋于饱和。这是由于 PbS 量子点吸收光子而产生光生电子-空穴对，光生空穴在  $U_{DS}$  作用下迅速转移至并五苯中，作为载流子参与导电，而光生电子则被束缚在 PbS 量子点表面，具体过程如图 4(b)所示。随着  $U_{GS}$  不断增大，PbS 量子点表面束缚的电子逐渐积累，则在 PbS 量子点与并五苯的界面处形成一个内建电场，从而阻碍了载流子在 PbS 量子点/并五苯间的传输，使得光生电流逐渐趋于饱和<sup>[12]</sup>。

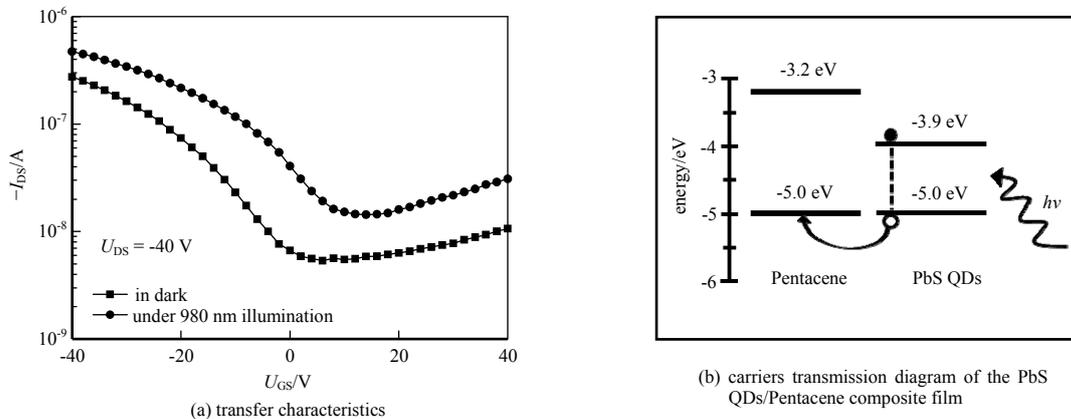


Fig.4 Transfer characteristics of PbS QDs/Pentacene composite film FET-based infrared photodetector and carriers transmission diagram of the PbS QDs/Pentacene composite film

图 4 PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器的转移特性曲线和 PbS 量子点/并五苯复合薄膜中载流子传输示意图

除用与一般 FET 相同的  $U_{th}$  和  $\mu$  等基本参数来表征器件的电学性能之外, 对于 PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器, 还可以通过响应度( $R$ )和探测率( $D^*$ )两个重要参数来定量表征探测性能, 计算公式<sup>[13-15]</sup>:

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = \frac{I_{illum} - I_{dark}}{E_{inc} \times A} \quad (2)$$

$$D^* = \frac{R}{(2qJ_{dark})^{1/2}} \quad (3)$$

式中:  $I_{ph}$  为光生电流值;  $I_{illum}$  和  $I_{dark}$  为器件在光照后和无光照时的电流值; 入射光功率  $P_{inc}$  可以写作入射光辐照度  $E_{inc}$  与器件有效面积  $A$  的乘积;  $J_{dark}$  为器件的“暗”态电流密度;  $q$  为电子电荷量。

当器件受到照度为  $0.1 \text{ mW/cm}^2$  的红外激光照射时, 通过上式可以计算出光生电流最大处( $U_{DS}=-40 \text{ V}$  且  $U_{GS}=-40 \text{ V}$ )的  $R$  和  $D^*$  分别为  $49.4 \text{ mA/W}$  和  $1.7 \times 10^{11} \text{ Jones}$ , 表明器件对于微弱的红外光易于响应, 利于探测。这种 PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器在电学性能和探测性能方面均表现优异, 可为进一步制备高灵敏度的医用微型红外传感器提供简便的技术手段。

### 3 结论

充分利用无机 PbS 量子点的光学特性和有机化合物并五苯的材料特性, 采用具有栅压调制作用的 FET 作为器件基本结构, 成功制备了一种 PbS 量子点/并五苯复合薄膜 FET 红外光电探测器 Au(S,D)/PbS QDs/Pentacene/PMMA/Al(G), 器件电学性能良好( $U_{th}=1.4 \text{ V}$ ,  $\mu=7.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 在近红外光谱区表现出优异的探测性能。在  $980 \text{ nm}$  红外激光照射下获得了相对较高的响应度和探测率;  $E_{ill}=0.1 \text{ mW/cm}^2$  时,  $R$  和  $D^*$  分别为  $49.4 \text{ mA/W}$  和  $1.7 \times 10^{11} \text{ Jones}$ 。这为进一步制备高灵敏度的柔性红外光传感器提供了一种简单、可靠的实验方法和参数选择, 为实现医用红外光谱技术的微型化、低成本化提供一种可能。

#### 参考文献:

- [1] 邓意峰,刘浩,贾卓,等. Al 掺杂 ZnO 紫外探测器的快速响应技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):771-774. (DENG Yifeng,LIU Hao,JIA Zhuo,et al. Rapid response technologies of aluminum doped zinc oxide ultraviolet detector[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):771-774.)
- [2] 黄林. 现代近红外光谱分析技术在制药工业及临床医学中的应用[J]. 生命科学仪器, 2004,2(6):52-53. (HUANG Lin. Application of the modern near-infrared spectroscopy in pharmaceutical industry and clinical medicine[J]. Life Science Instruments, 2004,2(6):52-53.)
- [3] 李文龙,瞿海斌. 基于近红外光谱技术的“过程轨迹”用于中药制药过程监控的研究进展[J]. 中国中药杂志, 2016,41(19):3506-3510. (LI Wenlong,ZHAI Haibin. Near infrared spectroscopy based process trajectory technology and its application in monitoring and controlling of traditional Chinese medicine manufacturing process[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016,41(19):3506-3510.)
- [4] 李泓邑,刘孝文,赵晶. 近红外光脑氧饱和度监测技术的临床应用及进展[J]. 中国医学科学院学报, 2017,39(6):846-850. (LI Hongyi,LIU Xiaowen,ZHAO Jing. Clinical application and development of near-infrared spectroscopy for monitoring regional cerebral oxygen saturation[J]. Acta Academiae Medicinae Sinicae, 2017,39(6):846-850.)
- [5] 王洪彬,刘长军. 一种基于 GaAs FET 的 S 波段功率放大和整流双向电路[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(2):239-242. (WANG Hongbin,LIU Changjun. An S-band microwave amplifier and rectifier bi-directional circuit based on GaAs FET[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):239-242.)
- [6] 高博,王立新,刘刚,等. 国产中高压抗辐照功率 MOSFET 单粒子效应[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1): 143-147. (GAO Bo,WANG Lixin,LIU Gang,et al. Single event effects for domestic radiation-hardened power MOSFET devices[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):143-147.)
- [7] YAN Y,WU X M,CHEN Q Z,et al. High-performance low-voltage flexible photodetector arrays based on all-solid-state organic electrochemical transistors for photosensing and imaging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019,11(22): 20214-20224.
- [8] WANG C R,CHEN X,CHEN F,et al. Organic photodetectors based on copper phthalocyanine films prepared by a multiple drop casting method[J]. Organic Electronics, 2019(66):183-187.
- [9] MA C F,SHI C W,LV K,et al. Gradient-band-gap strategy for efficient solid-state PbS quantum-dot sensitized solar cells[J]. Nanoscale, 2019(11):8402-8407.

- [10] NAM M, KIM S, KIM T, et al. Broadband energy-harvesting hybrid solar cells employing nanocomposites of polythiophene: ternary PbSSe nanocrystals[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(23):233115.
- [11] GUO Y, YU G, LIU Y. Functional organic field-effect transistors[J]. Advanced Materials, 2010, 22(40):4427-4447.
- [12] MOK S M, YAN F, CHAN H L W. Organic phototransistor based on poly(3-hexylthiophene)/TiO<sub>2</sub> nanoparticle composite[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(2):023310.
- [13] HAMILTON M C, KANICKI J. Organic polymer thin-film transistor photosensors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(4):840-848.
- [14] SARASQUETA G, CHOUDHURY K R, SUBBIAH J, et al. Organic and inorganic blocking layers for solution-processed colloidal PbSe nanocrystal infrared photodetectors[J]. Advanced Functional Materials, 2011, 21(1):167-171.
- [15] GONG X, TONG M, XIA Y, et al. High-detectivity polymer photodetectors with spectral response from 300 nm to 1 450 nm[J]. Science, 2009, 325(5948):1665-1667.

## 关于举办“第三届雷达系统电子威胁与防护研究”培训研讨班的通知

雷达系统是实现精确感知、精确打击的基础,对于信息化战争下的进攻和防御都具有极其重要的战略地位。随着雷达系统所处电磁环境的不断恶化,其生存能力和作战能力受到了严重挑战,进而影响到相关作战进程甚至胜负结局。因此,充分认清雷达系统在当前和今后未来一段时期面临的“侦扰毁”威胁并同步发展相应的防护措施,成为相关整机厂所、论证管理和使用维护等单位亟需面对的一项重要课题。

为此,《现代雷达》编辑部特别邀请了长期在该领域从事研究工作的空军研究院专家拟于2020年4月15日-17日在四川省成都市举办“第三届雷达系统电子威胁与防护研究”培训研讨班,这是接力2018年苏州第二届《地面雷达复杂电磁环境效应研究》培训研讨班的系列雷达专题学术活动,主要围绕雷达系统“防侦反扰抗毁”等相关内容进行交流分享。欢迎广大军工科研院所、企业和使用维护单位的中高级专业技术人员前来交流和研讨,共同推动雷达系统复杂电磁环境适应能力的提升。

主办单位:《现代雷达》编辑部

协办单位:《雷达学报》、《中国雷达》、《太赫兹科学与电子信息学报》

承办单位:华讯方舟科技有限公司、中电华新(北京)科技有限公司

### 一、课程设置:

- (一) 雷达系统防侦反扰研究(王华彬)
- (二) 雷达阵地面临的高技术侦察威胁与对策(贾治勇)
- (三) 地面雷达系统空基威胁及防护研究(冀鑫炜)
- (四) 雷达系统抗干扰能力考核试验方法研究(李增辉)
- (五) 雷达反隐身反干扰技术发展(傅有光)

### 二、培训和食宿费用

收费标准:学费3000元/人,包括专家授课、教材资料,食宿统一安排,费用自理。

联系人:孔德胜139 2373 3042 电话:028-61838891 传真:028-61838893

邮箱:chengdu0415@163.com

### 三、注意事项

请认真填写《报名回执表》,并以邮件发送至会务组,截止日期为4月5日前。随后发出《报到通知》,请提前安排订票事宜。

其他详情可参看《太赫兹科学与电子信息学报》网站([www.iaeej.com](http://www.iaeej.com))。