

# 具有场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 的直流特性\*

魏 珂<sup>1,†</sup> 刘新宇<sup>1</sup> 和致经<sup>2</sup> 吴德馨<sup>1</sup>

(1 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 研制成功具有场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 对源场板、栅场板器件的性能进行了分析. 场板的引入减小了器件漏电和肖特基漏电, 提高了肖特基反向击穿电压. 源漏间距  $4\mu\text{m}$  的 HEMT 的击穿电压由常规器件的  $65\text{V}$  提高到  $100\text{V}$  以上, 肖特基反向漏电由  $37\mu\text{A}$  减小到  $5.7\mu\text{A}$ , 减小了一个量级. 肖特基击穿电压由常规结构的  $78\text{V}$  提高到  $100\text{V}$  以上. 另外, 还初步讨论了高频特性.

**关键词:** AlGaIn/GaN; 高迁移率晶体管; 肖特基特性; 击穿电压; 场板结构

**PACC:** 7280 **EEACC:** 2570

**中图分类号:** TN325. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)03-0554-05

## 1 引言

近几年来, 基于 GaN 的功率器件 HEMT 和 HBT 已在高频、大功率、高温、高压等领域取得了巨大进展. GaN 的禁带宽度达到  $3.4\text{eV}$ , 其理论击穿场强可以达到  $10^7\text{V/cm}$  量级, 在高频大功率应用方面非常具有潜力<sup>[1,2]</sup>, 国内也有相关的报道<sup>[3,4]</sup>.

对 GaN 功率器件, 击穿电压是一个很重要的性能指标, 由于功率的输出和击穿电压有密切关系, 因此, 提高击穿电压是提高功率器件输出功率, 增大功率密度的重要措施.

场板结构(field plate)最早应用于 GaAs 器件<sup>[5]</sup>, 场板是用新增加的栅来改变栅极边缘耗尽层边界的弯曲程度, 改变耗尽层中电场分布, 以达到提高击穿电压的目的. 对于 GaN HEMT 器件而言, 采用场板结构能大幅度提高器件击穿电压, 又能一定程度抑制电流崩塌, 从而提高器件功率密度、功率附加效率(PAE); 另外场板结构在工艺上容易实现, 只需再增加一块场栅板. 近来, 将场板结构应用于 GaN 功率器件已经成为一个趋势. 目前, 采用场板结构的 HEMT 其输出功率密度已经达到  $30\text{W/mm}$ <sup>[6]</sup>.

虽然场板结构会引入更大的寄生参量, 对于功率器件并不有利, 但是优化场板结构以后, 可将其对截止频率的影响降至最小. 目前场板的研究已经成为一个热点.

本文报道了基于场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的研制情况. 与常规结构相比, 器件的直流特性得到明显的改善. 源漏间距  $4\mu\text{m}$  的 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 常规器件击穿电压仅  $65\text{V}$ , 采用场板结构的器件击穿电压超过了  $100\text{V}$ , 肖特基击穿特性得到了改善, 反

向漏电减小, 并对高频特性进行了初步测试, 这对以后的器件应用具有实际意义.

## 2 器件结构及工艺

器件采用的材料结构如图 1 所示, 二维电子气存在于 GaN 与 AlGaIn 的界面, 顶层为非掺杂的 AlGaIn, GaN 为缓冲层, 电子浓度大约为  $1.1 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ , 电子迁移率约为  $1200\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ . 材料由中国科学院半导体研究所和物理研究所提供.

AlGaIn/GaN HEMT 主要工艺包括: (1) 隔离、离子注入; (2) 欧姆接触(Ti/Al/Ti/Au), 接触电阻率约为  $6.2 \times 10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ; (3) 栅(Ni/Au)  $40\text{nm}/300\text{nm}$ ; (4) 钝化(SiN  $100\text{nm}$ ); (5) 场板制作; (6) 布线以及电镀等工艺.

场板结构就是在做完栅以后采用厚度为  $100\text{nm}$  的 SiN 钝化, 再刻蚀通孔, 蒸发一次栅金属做为场板金属, 其厚度为  $30\text{nm}/300\text{nm}$  (Ni/Au). 场板结构如图 2 所示. 由于场板电势与 AlGaIn 耗尽层电势不等所以产生垂直表面的纵向电场, 可以改变 AlGaIn 耗尽层内电场分布.

场板按照连接方式有栅场板、源场板、漏场板 3 种

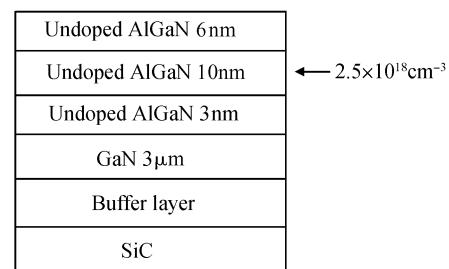


图 1 材料结构

Fig. 1 Layer structure of AlGaIn/GaN HEMT

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2002CB311903, G20000683) 和中国科学院重点创新(批准号: KGCX2-SW-107)资助项目

† 通信作者. Email: weike@ime.ac.cn

2007-06-15 收到, 2007-11-12 定稿

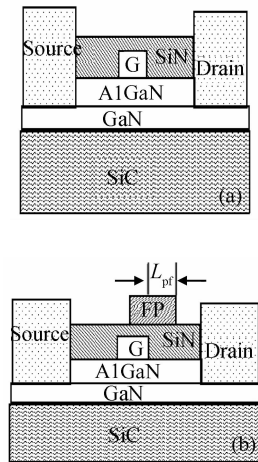


图 2 常规结构(a)与场板结构(b)示意图 场板长度为  $L_{pf}$ .

Fig.2 Schematics of gate field plate HEMT ( $L_{pf}$  is the length of overlapping gate) (a) Conventional HEMT; (b) Field plate HEMT

类型以及组合类型<sup>[7]</sup>. 栅场板在栅柄位置开孔与栅相连;源场板是场板通过不同的布线方式与源区连接. 常用的方式是在介质上直接布线或者采用空气桥,并尽可能避免大面积连线导致的寄生电容增大的问题.

本文报道了源场板和栅场板结构,并与常规结构进行了对比. 比较了不同场板栅长对于击穿特性的影响,并对高频特性进行了初步分析.

3 种结构基于同样的材料结构,采用完全相同的工艺流程. 最后进行了测试和数据分析,直流测试用 HP4155A 直流特性测试仪.

### 3 测试结果与讨论

#### 3.1 直流特性 ( $I-V$ )

用于测试的 HEMT 是栅宽为  $120\mu\text{m}$ ,栅长为  $0.8\mu\text{m}$  的 HEMT 单管. 3 种器件的结构和直流参数如表 1 所示

从表 1 可以看出,常规结构、源场板、栅场板的膝点电压存在差别. 这是因为场板在一定程度上可以抑制表面虚栅对沟道的调制,优化钝化介质的厚度和类型,对于消除电流崩塌作用更为突出<sup>[8]</sup>.

#### 3.2 器件击穿特性

场板结构可以有效提高器件的击穿电压,从而提高输出功率. 图 4 是 3 种器件的击穿特性比较. 从图中可以看出,相对于常规结构而言击穿特性有了明显的改

表 1 几种器件的结构参数和直流特性

Table 1 Device structure and DC characteristics

结构	栅源间距 / $\mu\text{m}$	栅漏间距 / $\mu\text{m}$	$L_{pf}$ / $\mu\text{m}$	$I_{dmax}/\text{mA}$ ( $V_g = 1\text{V}$ )	$V_{kcc}/\text{V}$	$G_m$ /( $\text{mS}/\text{mm}$ )	$V_{sch}/\text{V}$
常规	1.6	1.6		92	3.4	202	1.02
栅场板	0.6	1.6	0.4	97	3.0	204	1.1
源场板	0.7	1.6	0.7	96	2.76	216	1.03

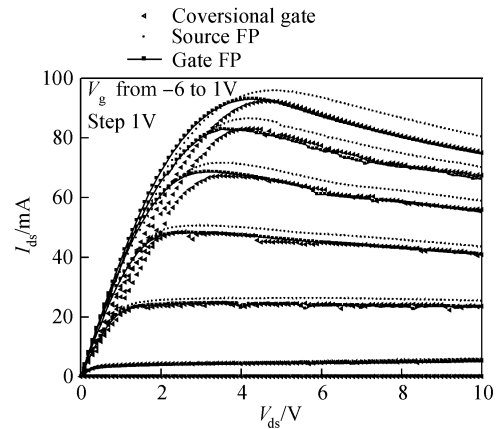


图 3 3 种器件的直流特性 栅长为  $0.8\mu\text{m}$ ;栅宽为  $120\mu\text{m}$

Fig.3  $I-V$  characteristics of AlGaIn/GaN HEMT

善. 源漏间距为  $4\mu\text{m}$  的器件,常规结构的击穿电压只有  $65\text{V}$ ,而源场板和栅场板的击穿电压大于  $100\text{V}$ ,有了明显提高.

从图 4 还可以看出,同样条件下,在  $V_g = -6\text{V}$ ,  $V_{ds} = 100\text{V}$  时,栅场板器件漏电为  $0.36\text{mA}$ ,源场板器件漏电为  $0.057\text{mA}$ ,相差约一个量级.

在 AlGaIn/GaN HEMT 存在表面电场曲率效应<sup>[9]</sup>,即在栅极边缘处,耗尽层边界发生弯曲,相同偏压下,栅极边缘耗尽层峰值电场远大于栅极下方耗尽层峰值电场,器件击穿一般发生在栅漏之间靠近栅的耗尽层边缘.

场板一般与栅极或源极相连,电势为负或零,小于空间电荷层电势. 没有场板时电场线由正电荷指向栅极;加入场板后,有一部分电场线从势垒层指向场板,等效于在场板下方耗尽层表面引入了额外的固定负电荷. 这些负电荷削弱了耗尽层中正电荷产生的电场,减小了栅边缘电场峰值. 峰值电场减小,电场分布面积增大,击穿电压会相应提高<sup>[10]</sup>.

图 5 给出了不同场板尺寸  $L_{pf}$  对击穿电压的影响. 这是因为不同尺寸的  $L_{pf}$  对于局部强电场的分散作用是不同的,如表 2 所示.

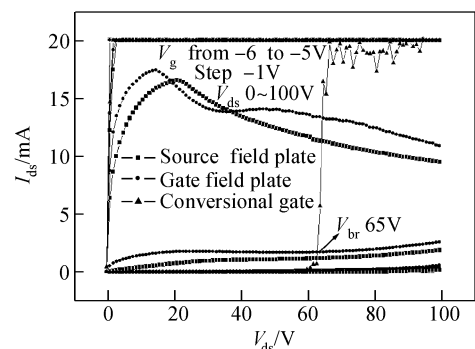


图 4 常规结构、源场板、栅场板的击穿特性比较 源漏间距为  $4\mu\text{m}$ .

Fig.4 Comparisons of broken characteristics between conventional HEMT source-FP and gate-FP Space between source and drain is  $4\mu\text{m}$ .

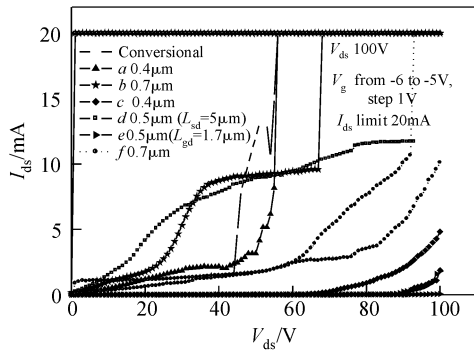


图 5 不同  $L_{pt}$  的击穿特性比较(曲线  $a, b, f$  为栅场板;  $c, d, e$  为源场板)

Fig.5 Comparisons of broken characteristics among HEMTs with different  $L_{pt}$  (Curve  $a, b$  and  $f$  are belong to gate-FP structure, Curve  $c, d, e$  are belong to source-FP structure)

从测试结果来看,同样尺寸的器件,栅场板(曲线中的  $a, b, f$ )的击穿电压低于源场板(曲线中的  $c, d, e$ ) (见表 2). 这是因为栅场板和栅是等电位的,一般为负值,而源场板接地,电势为 0,所以源场板对 AlGaIn 耗尽层来说电势更高. 因此对 AlGaIn 中横向的场强更为分散,临界场强更大,击穿电压更高. 从击穿特性的测试结果来看,源场板比栅场板更为有效.

击穿电压受场源漏间距影响,对源漏间距为  $5\mu\text{m}$  的器件,其击穿电压大于 100V. 但是对于高频器件来说,通过增加源漏间距提高击穿电压是得不偿失的,因为这样会增加沟道电阻和寄生电容,降低截止频率.

### 3.3 肖特基击穿特性

器件工作状态下是通过肖特基结构来调制沟道的二维电子气来实现的. 栅漏电对器件来说相当于输出端有负反馈,这一反馈会降低功率的效率,对器件来说是致命的. 图 6 给出了肖特基特性的比较,结果表明,正向的势垒高度基本相同,  $V_{sch}$  为 1.05V, 但是器件的肖特基结构的反向漏电存在明显差别.

常规结构的肖特基击穿电压是 78V, 栅场板结构的达到 90V, 而源场板结构的已经大于 100V (测试设备所限).

击穿特性的差别主要是反向漏电存在差异造成的. 当栅的漏电从 0.1 增加  $10^5 \mu\text{A}/\text{mm}$  时, 器件的击穿电压将由 500V 下降到 100V 左右<sup>[11,12]</sup>. 这是由于器件的表面因等离子损伤、高温而导致出现 N 空位等缺陷, 这些缺陷减小了表面电场的势垒, 增大了电子隧穿的几率, 降低了击穿电压. 场板结构可以有效压缩表面态, 屏蔽表面缺陷. 因此能有效减小肖特基反向漏电, 提高击

表 2 两种场板结构的击穿特性

Table 2 Broken characteristics of gate-FP and source-FP structure

$L_{pt}/\mu\text{m}$	栅场板			源场板			
	0.4	0.7	0.7	0.5	0.5	0.7	1
S-D space/ $\mu\text{m}$	4	4	5	4	4.6	4	4
Broken voltage /V	48	80	>100	52	100	>100	>100

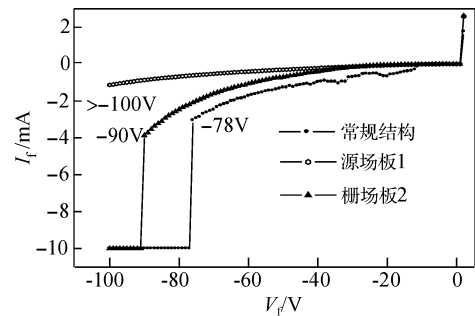


图 6 3 种结构的肖特基击穿特性比较

Fig.6 Schottky broken characteristics comparison among conventional HEMT, source FP and gate FP

表 3 不同尺寸的  $L_{pt}$  与肖特基反向漏电及击穿的关系

Table 3 Schottky characteristics of HEMTs with difference  $L_{pt}$  size

$L_{pt}/\mu\text{m}$	栅场板		源场板		
	0.4	0.7	0.5	0.7	1
反向漏电/mA	2.4	6	3	2.4	1.1
击穿电压/V	74	80	81	90	> 100

穿电压. 即使肖特基方向漏电很大的情况下也可以使得器件不会击穿.

常规结构的反向漏电普遍大于栅场板结构以及源场板结构. 从图 6 也能说明, 在消除表面态上, 场板结构比常规结构有效, 而源场板比栅场板更有效.

不同尺寸的  $L_{pt}$ , 对于表面缺陷的抑制效果存在差别. 这也就是击穿电压存在差异的主要原因, 如表 3 所示.

### 3.4 高频特性

引入场板结构之后, 对于栅场板来说, 等效于加宽栅长度, 所以栅源电容  $C_{gs}$  会增大; 对于源场板, 由于  $C_{gs}, C_{gd}$  都会增大这样导致了  $f_T$  必然下降, 如表 4 所示. 图 7~9 分别给出了常规结构、源场板、栅场板的高频特性.

表 4 相同  $L_{pt}$  的 3 种结构的高频特性

Table 4 High frequency characteristics of three structures

	常规	S-FP	G-FP
器件尺寸	$L_g = 0.8\mu\text{m}, W = 120\mu\text{m}, L_{pt} = 0.4\mu\text{m}$		
$f_T/\text{GHz}$	18.5	12.7	13.9
$f_{max}/\text{GHz}$	22.4	22.8	23.4

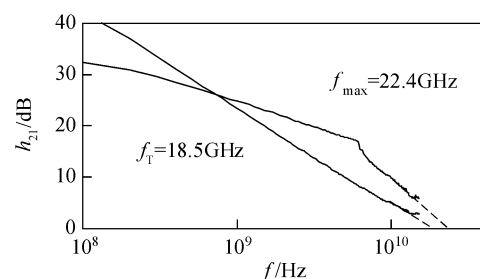
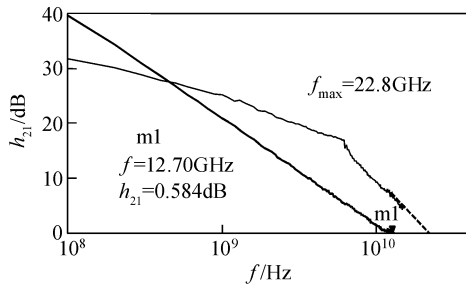
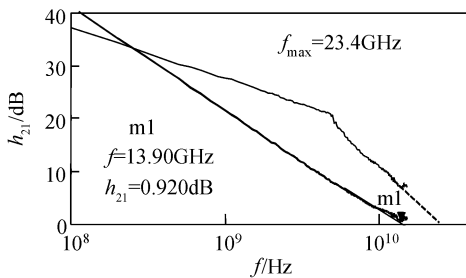


图 7 常规结构的高频特性

Fig. 7 High frequency characteristics of conventional HEMT

图8 源场板结构的高频特性( $L_{pf} = 0.4\mu\text{m}$ )Fig. 8 High frequency characteristics of S-FP structure ( $L_{pf} = 0.4\mu\text{m}$ )图9 栅场板结构的高频特性( $L_{pf} = 0.4\mu\text{m}$ )Fig. 9 High frequency characteristics of G-FP structure ( $L_{pf} = 0.4\mu\text{m}$ )

场板结构改善了直流特性,但同时对于高频造成不利影响.所以场板的设计既要考虑对于击穿特性的提高,还要考虑其对高频以及功率特性的影响.

为了进一步提高击穿电压,场板结构可以采用偏栅结构,即栅偏向源,增加栅源间距.本文对于场板的栅长进行了优化,击穿电压最高的是  $L_{pf} = 0.7\mu\text{m}$  的结构,击穿电压超过 100V,而它的  $f_T$  和  $f_{max}$  下降为 12.3 和 21.2GHz.较常规结构的 18.5GHz 下降比较明显;此外,钝化介质的种类和厚度对于场板性能也有很大影响,需要进一步优化.

高频以及功率方面的详尽结果将在后续相关论文中予以报道.

## 4 结论

本文报道了具有场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 器件.增加场板以后,削弱了栅漏之间局部的强电场,提高了击穿场强.同时场板削弱了表面虚栅对沟道的调制,改善了肖特基击穿电压和漏电.测试结果表明,该器

件的直流特性明显得到改善,击穿电压由常规结构的 65V,提高到 100V 以上.肖特基结构的反向漏电减小约一个量级,肖特基结构的反向击穿电压由 78V 增加到 100V 以上.

场板在提高击穿电压的同时,引入更大的寄生电容,导致截止频率  $f_T$  的下降.这主要因为场板栅和器件栅之间因介质的引入而导致寄生电容增大.

通过优化场板结构,可以使得这一寄生电容的影响减小.场板结构的设计以及工艺仍然需要进一步优化.

## 参考文献

- [1] Ozgur A, Kim W, Fan Z, et al. High transconductance normally-off GaN MODFETS'. *Electron Lett*, 1995, 31: 389
- [2] Khan M K, Chen Q, Shur M S, et al. CW operation of short-channel GaN/AlGaIn doped channel heterostructure field effect transistors at 10GHz and 15GHz. *IEEE Electron Device Lett*, 1996, 17: 84
- [3] Luo Weijun, Chen Xiaojuan, Li Chengzhan, et al. Fabrication of a high-performance 1mm AlGaIn/GaN HEMT on SiC substrate. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(11): 1981 (in Chinese)[罗卫军, 陈晓娟, 李诚瞻, 等. 高性能 1mm SiC 基 AlGaIn/GaN 功率 HEMT 研制. *半导体学报*, 2006, 27(11): 1981]
- [4] Zheng Yingkui, Liu Xinyu, He Zhijing, et al. 0.25 $\mu\text{m}$  gate length AlGaIn/GaN power HEMTs on sapphire with  $f_T$  of 77GHz. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(6): 963
- [5] Wakejima A, Ota K, Matsunaga K, et al. A GaAs-based field-modulating plate HFET with improved WCDMA peak-output power characteristics. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50: 1983
- [6] Wu Y F, Saxler A, Moore M, et al. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25: 117
- [7] Saito W, Kuraguchi M, Takada Y, et al. Design optimization of high breakdown voltage AlGaIn-GaN power HEMT on an insulating substrate for RONA-VB tradeoff characteristics. *IEEE Trans Electron Devices*, 2005, 52: 106
- [8] Koudymov A, Adivarahan V, Yang J, et al. Mechanism of current collapse removal in field-plated nitride HFETs. *IEEE Electron Device Lett*, 2005, 26: 704
- [9] Zhang B. *Power semiconductor devices and smart power ICs*. Chengdu: UESTC Press, 2001
- [10] Mo Jianghui, Cai Shujun. Summarize for the investigation of the filed-plate structure in GaN-based HEMT. *Semiconductor Technology*, 2006, 31(6): 402 (in Chinese)[默江辉, 蔡树军. GaN 基 HEMT 场板结构研究进展. *半导体技术*, 2006, 31(6): 402]
- [11] Saito W, Kuraguchi M, Takada Y, et al. Influence of surface defect charge at AlGaIn-GaN-HEMT upon Schottky gate leakage current and breakdown voltage. *IEEE Trans Electron Devices*, 2005, 52(2): 159
- [12] Suh C S, Dora Y, Fichtenbaum N, et al. High breakdown voltage achieved on AlGaIn/GaN HEMTs with integrated slant field plates. *IEDM '06 International*, 2006

## DC Characteristics of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs with a Field Plate Gate<sup>\*</sup>

Wei Ke<sup>1,†</sup>, Liu Xinyu<sup>1</sup>, He Zhijing<sup>2</sup>, and Wu Dexin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> *Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

(<sup>2</sup> *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** This paper reports two kinds of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs with the field plate gate. In contrast with a conventional HEMT structure, their DC characteristics are improved and the broken voltage is over 100V. The reverse leakage current of the Schottky gate is reduced from 0.037 to 0.0057mA with a 100V voltage between gate and drain using a field plate. Its broken voltage is increased from 78 to over 100V. The HEMTs with the gate field plate structure and the source field plate structure are compared and their high frequency characteristics are also discussed.

**Key words:** AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>; HEMT; broken voltage; Schottky characteristics; field plate structure

**PACC:** 7280M      **EEACC:** 2570

**Article ID:** 0253-4177(2008)03-0554-05

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos.2002CB311903,G20000683) and the Funds of the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (No. X2-SW-107)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: weike@ime.ac.cn

Received 15 June 2007, revised manuscript received 12 November 2007

©2008 Chinese Institute of Electronics