

# 垂直流芦苇床过滤器在改善地表水质中的表现

## Performance of the Vertical Flow Reed-Bed Filter in Improving Surface Water Quality

黄 翀

HU AN G Chong

(南宁市环境保护局,广西南宁 530022)

(Nanning Environmental Protection Bureau, Nanning, Guangxi, 530022, China)

**摘要:** 2007年8月在荷兰莱顿赖恩市垂直流芦苇床过滤器改善地表水水质试验系统,选定1个大型过滤器(ZFLR-1)和2个小型过滤器(ZFLR-3h和ZFLR-4h)实地采集10个水份样本和36个土壤样本分析其中总磷和正磷酸盐含量变化,了解垂直流芦苇床过滤器对磷有效去除产生的直接影响。结果表明,所有水样经过滤器处理后总磷和正磷酸盐系数都比进入过滤器前的水样降低,过滤器对磷有较高的去除率。在采集水样的3个过滤器中,过滤器ZFLR-3h有最高的总磷和正磷酸盐去除率。土壤样本分析得出芦苇床过滤器主要通过吸附作用去除水中的磷成分,过滤器不同吸附物质组成对磷去除有直接影响。

**关键词:** 过滤器 芦苇 水质 磷 正磷酸盐 土壤分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2009)04-0460-05

**Abstract** A full scale experimental vertical flow reed bed filter was designed to undertaken in Leidsche Rijn for three years. In Aug. 2007, ten water samples were collected from one big filter (ZFLR-1) and two small filters (ZFLR-3h, ZFLR-4h) on the field. Those filters were selected before sample collection. At the same time, thirty-six soil samples were also collected. The purpose of this project is aim to analyze change of TP and Ortho-phosphate concentration from influent to effluent and to understand that filters have influence on phosphorus removal. The laboratory analyses assume the phosphorus removal that has been controlled effectively as the concentration of TP and Ortho-phosphate of effluent is smaller than influent in filters. Filter ZFLR-3h has the highest phosphorus removal percentage on three chosen filters. The objectives of soil sample analysis are to measure phosphorus removal through vertical flow reed bed filter mainly by adsorption. The concentration of iron and calcium is crucial to phosphorus removal because they are added as adsorbent media.

**Key words** filter, reed-bed, water quality, phosphorus, ortho-phosphate, soil sample analysis

垂直流芦苇床过滤器是一种用砾石、铁、砂石、碳酸钙等物质组成的人工湿地,最上层的土壤种植根系发达的芦苇植物。芦苇植物将它们的匍匐根状茎深深地扎入地下,并在地下纵横交错出一张密密麻麻的细网。这张细网和芦苇床的分层就组成一个最好的过滤器。污水经过芦苇床过滤器的层层过滤后,就变成了清澈的净水了。垂直流芦苇床过滤器不但能够净化污水提高水的质量,而且能够有效去除水中含量过高的磷成份,避免富营养化发生。垂直流芦苇床已经在人工湿地中广泛使用,它能够有效减少城镇生活污水

中富营养化现象<sup>[1]</sup>。

莱顿赖恩是荷兰西部一个新兴城镇,采用自给的供水系统。城镇饮用水源主要是江河地表水,当枯水期来临时,可以通过雨水和地下水补充,通常只有在极干旱的时候,才会从阿姆斯特丹赖恩运河抽水补充<sup>[2]</sup>。为了改善运河地表水的水质,英国伦敦大学帝国理工学院和荷兰皇家Haskoning水务公司建立为期3年(2005-2007)的垂直流芦苇床过滤器改善地表水水质试验,已建成包括12个小型过滤器和1个大型的过滤器,1个中控站的水处理系统过滤器。12个小型过滤器的面积分别为62.5m×32.5m,通过手动控制水泵,抽入试验点周边城镇的运河水。大型过滤器的面积为170m×10m,还包括1个水库流域缓冲区,主

收稿日期: 2009-10-08

修回日期: 2009-10-30

作者简介: 黄翀(1982-),男,工程师,主要从事水污染治理研究。

要从大水库流域缓冲区取水,以降低直接从运河抽水的成本。中控站主要控制周边管网,通过水泵从运河抽水进入过滤器处理。操作过程中为了避免缓冲区内因蓄水过多而溢出的问题,可通过中控室设定,当缓冲区内水位到达指定高度时,大型过滤器会自动进行抽水。所有过滤器当水量满负荷后,会自动停止抽水,确保设备能够高效运行。本文通过与荷兰皇家水务公司共同合作,实地采集水份和土壤样本,分析样本中总磷和正磷酸盐含量的变化,了解垂直芦苇床过滤器对磷有效去除产生的直接影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 垂直流芦苇床过滤器结构

垂直芦苇床过滤器最上层的土壤种植根系发达的芦苇植物。床的顶层包括 100mm 砾石;中部是 800mm 沙层,沙层分为两部分,上层是由铁、砂石、碳酸钙等物质组成,厚度约 600mm;下层约 200mm,主要是砂、碳酸钙等物质;沙层下面有约 10mm 的排水垫,底部垫有些砂石。经处理后的水从底部安装的 200mm 排水管道排放<sup>[3]</sup>。

### 1.2 过滤器进水、停水和出水时间

实地采集水样前,选定在 1 个大型过滤器 (ZFLR-1) 和 2 个小型过滤器 (ZFLR-3h 和 ZFLR-4h) 中,利用 4 天时间采集 10 份水样。所有采样的过滤器进水时间都是 40min,水停留在过滤器 30min,唯一不同的是小型过滤器 ZFLR-3h 和 4ZFLR-4h 清空时间为 1.5h,而大型过滤器 ZFLR-1 则需要 4h 才能把水完全清空。

### 1.3 过滤器进水和清空效率

过滤器进水和清空效率可以通过水位的变化来说明。把 3 个压力传感器分别放进过滤器 ZFLR-3h, 4ZFLR-4h 和 ZFLR-1 中,记录下压力传感器在过滤器水位的高度和放置的时间,另 1 个压力传感器放置在中控室内。4 个压力传感器通过实验室分析,可以计算出绝对气压值 (水压和气压之和)<sup>[4]</sup>,比较水压和之前记录的过滤器水位高度。过滤器内水压大,水位高度降低,过滤器进水和出水效率提高。

### 1.4 过滤器去除磷的效率

过滤器去除磷的效率可以通过进水样本中溶解磷系数和出水样本总磷去除率体现<sup>[5]</sup>。有效去除率可以通过如下公式计算

$$RE(\%) = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100$$

其中,  $C_{in}$  和  $C_{out}$  分别代表进水和出水样本磷的系数,单位为  $mg/L$ 。

水样中磷成份主要是磷酸盐,一是包括水中溶解磷或者难溶解颗粒状的磷;另一种类型是正磷酸盐。进水样本溶解磷 ( $TP^D$ ) 和总磷 (TP) 比率  $TP^D/TP$ , 可以确定水中总磷成份主要通过过滤器中物质的吸附作用去除,少部分是过滤器直接过滤去除<sup>[6]</sup>。

### 1.5 总磷质量平衡

总磷质量平衡根据公式  $TP_{in} = TP_{out} + TP_{acc}$  计算<sup>[7]</sup>。公式中  $TP_{out}$  是出水样本总磷系数,  $TP_{in}$  是进水样本总磷系数,  $TP_{acc}$  为进水样本中溶解磷系数与其它形式的磷之和。当  $TP_{out} < TP_{in}$  时,证明过滤器有效去除水中磷成份。

### 1.6 样本采集

10 个水份样本于 2007 年 8 月 6 日至 2007 年 8 月 9 日从选定的 3 个过滤器 (ZFLR-1, ZFLR-3h, ZFLR-4h) 中采集。8 月 6 号在进水处理处采集 1 份水样; 8 月 7 号在 3 个过滤中各取 1 份水样; 8 月 8 日在进水口处采集 1 份水样,而另外 3 份水样从过滤器 ZFLR-3h 采集,过滤器 ZFLR-3h 重复进水和清空 3 次后采集;最后 1 天,从过滤器 ZFLR-3h 中采集 2 份水样。采集后的水份样本用空瓶装好,并贴上标签注明采集时间,带回实验室测定。水份样本测定分析总磷和正磷酸盐含量的变化,结合总磷的质量平衡计算方法,最终得出磷的有效去除率。

36 个土壤样本从选定的过滤器 ZFLR-1, ZFLR-3h, ZFLR-4f 和 ZFLR-4g 采集,其中过滤器 ZFLR-4f 内含有较高铁成分的吸附物质,而过滤器 ZFLR-4g 内吸附物质所含铁成分较低。土壤样本采集采用方法: 每个过滤器采集 9 个样本,分别在过滤器的顶部、中部和底部的前方、中间和后方 3 个部位各采集 3 份,放入事先准备好的瓶子,贴好标签后注明日期和过滤器编号,带回实验室测定。土壤样本分析结合垂直流芦苇床过滤器内铁、磷化物和石灰石等物质通过吸附作用去除磷成分的原理<sup>[8]</sup>,了解吸附物质在过滤器中含量的变化对磷有效去除产生直接影响。

## 2 结果和分 析

### 2.1 总磷和正磷酸盐系数比较

#### 2.1.1 总磷系数比较

进水样本总磷是 2007 年 8 月 6 日采集的比 2007 年 8 月 8 日采集的约低 0.005  $mg/L$  (图 1)。经过 3 个过滤器处理后,出水样本总磷系数都比进水样本低,其中过滤器 ZFLR-3h 处理后出水样的总磷系数最低,特别是在 2007 年 8 月 8 日采集的水样,总磷系数 (0.013  $mg/L$ ) 比其它 2 个过滤器出水水样低了将近 1 倍 (图 2)。

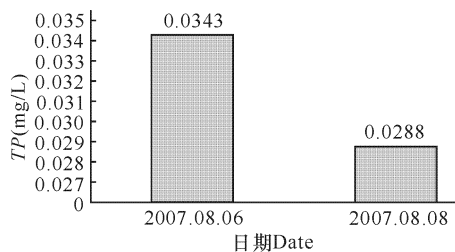


图1 进水样本总磷系数比较

Fig. 1 The concentration of TP in the influent

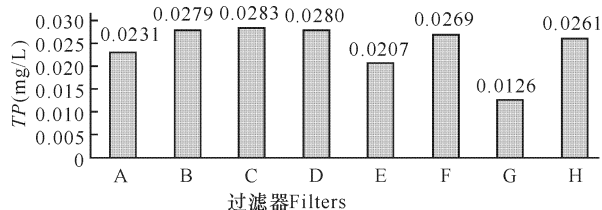


图2 出水样本总磷系数比较

Fig. 2 The concentration of TP in effluent in the filters

A ZFLR-3h, 2007. 08. 07; B ZFLR-4h, 2007. 08. 07; C ZFLR-1, 2007. 08. 07; D, E, F ZFLR-3h, 2007. 08. 08; G, H ZFLR-3h, 2007. 08. 09

### 2.1.2 正磷酸盐系数比较

进水样本正磷酸盐系数是2007年8月6日采集的比2007年8月8日采集的降低了1倍多(图3)。经过3个过滤器处理后,出水样本的正磷酸盐系数均比进水样本低,其中过滤器ZFLR-3h处理后出水样本的正磷酸盐系数最低,特别是在2007年8月9日采集的一份水样,正磷酸盐系数(0.0216 mg/L)比其它2个过滤器出水样本低了将近1倍(图4)。

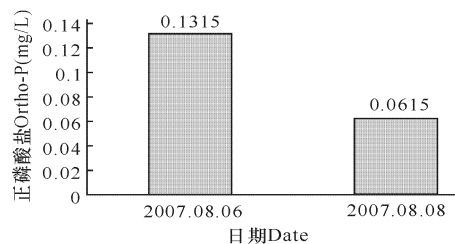


图3 进水样本正磷酸盐系数比较

Fig. 3 The concentration of Ortho-P in influent

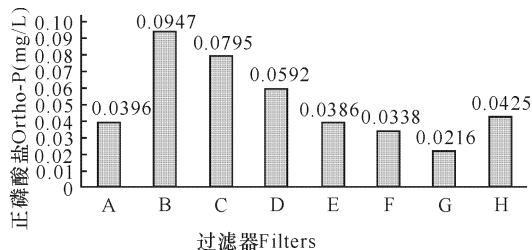


图4 出水样本正磷酸盐系数比较

Fig. 4 The concentration of Ortho-P in effluent

A ZFLR-3h, 2007. 08. 07; B ZFLR-4h, 2007. 08. 07; C ZFLR-1, 2007. 08. 07; D, E, F ZFLR-3h, 2007. 08. 08; G, H ZFLR-3h, 2007. 08. 09

## 2.2 磷的去除效果

### 2.2.1 总磷去除效率

从表1可以看出,2007年8月9号过滤器ZFLR-3h出水样本有最高的磷去除率,将近60%的总磷被有效去除,这表明过滤器ZFLR-3h比其它2个过滤器能更好地去除水样的总磷成分。

表1 总磷去除效率

Table 1 Efficiency of TP removal

日期 Date	$C_{in}$ (mg/L)	$C_{out}$ (mg/L)	RE (%)
2007. 08. 07	0.034	0.023 (ZFLR-3h)	32.4
2007. 08. 07	0.034	0.028 (ZFLR-4h)	17.6
2007. 08. 07	0.034	0.0283 (ZFLR-1)	16.8
2007. 08. 08	0.0288	0.028 (ZFLR-3h 1 <sup>st</sup> test)	2.8
2007. 08. 08	0.0288	0.0207 (ZFLR-3h 2 <sup>nd</sup> test)	28.1
2007. 08. 08	0.0288	0.0269 (ZFLR-3h 3 <sup>rd</sup> test)	6.6
2007. 08. 09	0.0288	0.0126 (ZFLR-3h 1 <sup>st</sup> test)	56.2
2007. 08. 09	0.0288	0.0261 (ZFLR-3h 3 <sup>rd</sup> test)	9.4

### 2.2.2 正磷酸盐去除效率

表2显示,过滤器ZFLR-3h在2007年8月7号和2007年8月9号采集的水样都有较高的正磷酸盐去除率,超过60%正磷酸盐通过过滤床处理后均被去除。除过滤器ZFLR-3h之外,其它2个过滤器也都有较高的正磷酸盐去除率。

表2 正磷酸盐去除效率

Table 2 Efficiency of Ortho-phosphate removal

日期 Date	$C_{in}$ (mg/L)	$C_{out}$ (mg/L)	RE (%)
2007. 08. 07	0.13	0.039 (ZFLR-3h)	70.0
2007. 08. 07	0.13	0.094 (ZFLR-4h)	27.7
2007. 08. 07	0.13	0.079 (ZFLR-1)	39.2
2007. 08. 08	0.061	0.059 (ZFLR-3h 1 <sup>st</sup> test)	3.3
2007. 08. 08	0.061	0.038 (ZFLR-3h 2 <sup>nd</sup> test)	37.7
2007. 08. 08	0.061	0.034 (ZFLR-3h 3 <sup>rd</sup> test)	44.3
2007. 08. 09	0.061	0.021 (ZFLR-3h 1 <sup>st</sup> test)	65.6
2007. 08. 09	0.061	0.042 (ZFLR-3h 3 <sup>rd</sup> test)	31.1

### 2.2.3 总磷和正磷酸盐平均去除率

表1中2007年8月7号过滤器采集水样的总磷平均有效去除率为22%,而2007年8月8号采集水样的总磷平均有效去除率为13%,减少了9%,当天所有3份水样都是在过滤器ZFLR-3h采集,平均去除率为3份水样总和的平均值。2007年8月9号仅在过滤器ZFLR-3h采集了2份水样,而总磷平均去除率却提高到32%。

表2中2007年8月7号过滤器采集水样的平均正磷酸盐有效去除率达到46%,而2007年8月8号在过滤器ZFLR-3h采取的3份水样正磷酸盐平均有效去除率

减少到28%。2007年8月9号仅在过滤器 ZFLR-3h采集了3份水样,但是正磷酸盐平均有效去除率达到3天最高的比率(48%)。

过滤器去除率的平均值也能够说明过滤器去除水样里总磷和正磷酸盐的表现<sup>[9]</sup>,但是实际中此方法缺乏相应的准确性,最终得出的平均值误差也较大。

### 2.3 总磷质量平衡

根据总磷质量平衡计算公式,从表3中可以看到所有出水样本的总磷系数都小于进水的总磷系数( $TP_{out} < TP_{in}$ ),大部分总磷通过过滤床处理后能够有效去除,仅有少量其它形式的磷成分,如进水样本中的溶解磷等未经处理排放。

表3 总磷质量平衡

Table 3 Mass balance of TP in three test filters

日期 Date	过滤器 Filters	$TP_{in}$ (mg/L)	$TP_{out}$ (mg/L)	$TP_{acc}$ (mg/L)
2007.06.08	进水 Influent	0.034	0	0
2007.07.08	ZFLR-3h	0.034	0.023	0.011
2007.07.08	ZFLR-4h	0.034	0.028	0.006
2007.07.08	ZFLR-1	0.034	0.0283	0.0057
2007.08.08	进水 Influent	0.0288	0	0
2007.08.08	ZFLR-3h 1 <sup>st</sup> test	0.0288	0.028	0.0008
2007.08.08	ZFLR-3h 2 <sup>nd</sup> test	0.0288	0.0207	0.0081
2007.08.08	ZFLR-3h 3 <sup>rd</sup> test	0.0288	0.0269	0.0019
2007.09.08	ZFLR-3h 1 <sup>st</sup> test	0.0288	0.0126	0.0162
2007.09.08	ZFLR-3h 3 <sup>rd</sup> test	0.0288	0.0261	0.0027

### 2.4 土壤样本分析结果

表4结果显示,4个过滤器内采集的土壤样本的所有磷系数均小于1,过滤器内吸附物质所含的铁、石灰石成分有所不同。过滤器 ZFLR-4g 含有最高的铁和石灰石系数,比较而言,过滤器 ZFLR-4f 所含铁和石灰石成分较低。过滤器 ZFLR-3h 比过滤器 ZFLR-1 能够更好去除磷,因为其所含的铁和石灰石成分较高。铁和石灰石系数越高,过滤器去除磷的效率越好<sup>[10]</sup>。结合前两年分析成果,我们研究发现随着过滤器土壤中铁和石灰石含量的降低,过滤器去除磷效率也随之降低。

### 3 结论

(1)在荷兰莱顿赖恩小城镇实地采集样本分析的最终结果显示,垂直流芦苇床过滤器能够有效地改善小城镇中地表水的水质,特别是能够有效的去除水中的磷成份。

(2)比较进水和出水样本的总磷和正磷酸盐系数,所有出水样本比进水样本的磷成分都有所降低,说明过滤器能较好运行,有较高的磷去除率。在采集水样的过滤器(ZFLR-3h, ZFLR-4h 和 ZFLR-1)中,

表4 土壤样本分析结果

Table 4 Soil samples analysis result

过滤器 Filters	采集地点 Location	P (g/kg d. s.)	Fe (g/kg d. s.)	CaCO <sub>3</sub> (%, m/m)	
ZFLR-1	顶部前方 Front-Top	< 1	30	7	
	中部前方 Front-Middle	< 1	40	8	
	底部前方 Front-Deep	< 1	40	6	
	顶部中间 Middle-Top	< 1	30	7	
	中部中间 Middle-Middle	< 1	25	8	
	底部中间 Middle-Deep	< 1	35	6	
	顶部后方 Back-Top	< 1	25	6	
	中部后方 Back-Middle	< 1	30	7	
	底部后方 Back-Deep	< 1	25	6	
	ZFLR-3h	顶部前方 Front-Top	< 1	25	8
		中部前方 Front-Middle	< 1	25	9
		底部前方 Front-Deep	< 1	40	9
顶部中间 Middle-Top		< 1	40	8	
中部中间 Middle-Middle		< 1	50	6	
底部中间 Middle-Deep		< 1	60	6	
顶部后方 Back-Top		< 1	35	9	
中部后方 Back-Middle		< 1	35	7	
底部后方 Back-Deep		< 1	35	7	
ZFLR-4f		顶部前方 Front-Top	< 1	25	9
		中部前方 Front-Middle	< 1	25	8
		底部前方 Front-Deep	< 1	25	10
	顶部中间 Middle-Top	< 1	20	9	
	中部中间 Middle-Middle	< 1	25	8	
	底部中间 Middle-Deep	< 1	20	9	
	顶部后方 Back-Top	< 1	20	8	
	中部后方 Back-Middle	< 1	20	10	
	底部后方 Back-Deep	< 1	25	9	
	ZFLR-4g	顶部前方 Front-Top	< 1	40	7
		中部前方 Front-Middle	< 1	45	10
		底部前方 Front-Deep	< 1	40	5
顶部中间 Middle-Top		< 1	45	9	
中部中间 Middle-Middle		< 1	50	9	
底部中间 Middle-Deep		< 1	55	6	
顶部后方 Back-Top		< 1	40	8	
中部后方 Back-Middle		< 1	35	8	
底部后方 Back-Deep		< 1	45	7	

过滤器 ZFLR-3h 有最高的总磷和正磷酸盐去除率。

(3) 进水样本溶解磷 ( $TP^*$ ) 和总磷 ( $TP$ ) 比率  $TP^*/TP$ , 可以确定水中总磷成份主要通过过滤器中物质的吸附作用去除, 其余的少部分是过滤器直接过滤去除

(4) 通过总磷质量平衡计算, 可以比较过滤器进水前和经处理后出水样中磷成份的变化。出水样本总磷系数均小于进水样本, 水中大部分总磷已去除, 剩下的如进水样本中含有少量的溶解磷未经处理排放。

(5) 本文主要是针对水中所含磷成分的有效去除进行分析, 但是在样本分析过程中发现, 水中的含氮成份也可以通过在垂直流芦苇床过滤器中停留较长时间后有效去除

(6) 实验室分析采集水样的结果可能有些误差, 主要因为分析样本前, 首先要采用酸消化混合水样来稀释水样。由于采集过滤器进水样本中所含磷系数较低, 因此分析结果也可能导致磷去除率偏低。

(7) 过滤器所含铁和石灰石成分通过吸附作用去除水中的磷, 经采集土壤样本分析, 过滤器所含铁和石灰石较项目刚开始运行前减少, 导致过滤器处理效率降低。建议今后加大对土壤样本分析次数, 及时了解过滤器中铁和石灰石含量的变化, 确保过滤器能够以最佳效果运行。

#### 参考文献:

- [1] Brix H. Wastewater treatment in constructed wetlands system design, removal processes and treatment performance [M]. Lewis Publishers In constructed wetlands for water quality improvement, 1993.
- [2] De Burger. Website update. <http://www.utrecht.nl/smartsite.dwg?id=215320>, 2005.
- [3] Blom A B M, Heesink H, Maat. Deep removal of phosphate from surface water using a vertical-flow

constructed wetland [M]. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, 2003.

- [4] Kadlec R H, Watson J T. Hydraulics and solid accumulation in a gravel bed treatment wetlands [M]. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, 1993.
- [5] Aleksandra J. Results on testing of the initial performance of the reed bed filters in Leidche Rijn experimental facility [C]. Center for Urban Water EU Life project VERBAL Vertical flow reed bed system for surface water, 2005.
- [6] Douglas G B, Robb M S, Coad D N, et al. A review of solid phase adsorbents for the removal of phosphorus from natural and waste waters [M]. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, 2004.
- [7] Richardson C J, Craft C B. Effective phosphorus retention in wetlands, fact or fiction [M]. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, 1993.
- [8] Brix H, Arias C A, Bubba M. Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 2001, 44(11-12): 47-54.
- [9] Kadlec R H. Transport of phosphorus in wetlands [M] // Reedy Publishers. Phosphorus Biogeochemistry in Subtropical Ecosystems, 1999.
- [10] Rosolen S. An evaluation of adsorptive material for improvement of phosphorus in constructed treatment systems [C]. Queens University Kingston Ontario Canada M Sc thesis, 2000.
- [11] Gersberg R M, Elkins B V, Goldman C R. Use of artificial wetlands to remove nitrogen from wastewater [J]. Journal of water pollution control federation, 1984, 56(2): 152-156.

(责任编辑: 邓大玉)

## 高性能双极型晶体管器件研制成功

毫米波频段是满足日益强烈的高精度探测及高速率数据通信要求的关键资源。继 8 毫米波段 (26.5~40GHz) 之后, 3 毫米波段 (75~111GHz) 成为世界各国高频技术竞争的制高点。基于固态半导体技术的毫米波单片集成电路 (MMIC) 由于具有体积小、重量轻、高性能及低成本等优势而被广泛应用于军事和民用领域。InP 基异质结双极型晶体管是实现 3 毫米波段 MMIC 应用最主要的固态半导体器件, 是国际工业界和学术界研究的热点。但是由于其高技术门槛, 所以目前只有美国和日本等少数发达国家掌握了相关工艺技术。

最近中国科学院微电子研究所的科研人员深入研究 InGaAs/InP 双异质结双极型晶体管 (DHBT), 采用 InGaAs 和双层 InGaAsP 复合结构对器件的能带结构进行创新设计, 开发出全套的亚微米 InGaAs/InP DHBT 工艺。研制成功的 DHBT 器件击穿电压大于 6V, 最高电流增益截止频率达到 176GHz, 最大振荡频率高达 253GHz, 均创造了国内记录, 并且满足了进行 3 毫米波段 MMIC 电路设计的要求。高性能 DHBT 器件的研制成功, 对于推进我国 3 毫米波段器件和电路的应用和发展具有重要意义。

(据科学网)