

学校编码: 10384
学号: 32020121152697

分类号__密级__
UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于电子束曝光技术的 L-波段高频声表面波传感器的研究
Study of L-band High Frequency Surface Acoustic Wave
Sensors Based on E-Beam Lithography

张 鸿

指导教师姓名: 伞海生 教授
专 业 名 称: 航空宇航制造工程
论文提交日期: 2015 年 6 月
论文答辩时间: 2015 年 5 月
学位授予日期: 2015 年 6 月

答辩委员会主席: _____
评阅人: _____

2015 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 张鸿

2015 年 5 月 27 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

()1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

()2. 不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：张鸿

2015年5月27日

摘要

谐振型声表面波传感器因具有体积小、测量精度高、易于无线无源化等特点,能够胜任封闭狭窄环境及高速转部件等复杂条件下的温度、压力、振动、湿度、应变等环境参数的测量。目前,谐振型声表面波传感器多工作在 P 波段,器件和天线的尺寸相对较大,灵敏度相对较低。为满足无线传感网络对传感器件微型化和无线无源化的需求,有必要对工作频段更高、特征尺寸为亚微米量级的谐振型声表面波传感器的设计和制造开展深入研究。

本文首先阐述了谐振型声表面波传感器的核心部件——声表面波谐振器 (SAWR) 的工作原理。针对高频 SAWR 中存在显著二阶效应的特点,借助包含多种二阶效应的 COM 模型和两种有限元模型对 128 °Y-X LiNbO₃ 和 42 °Y-X LiTaO₃ 基底上的 L 波段 SAWR 进行设计和模拟,研究了二阶效应对器件响应的影响。为了使 SAWR 更易于集成,并进一步提高灵敏度,本文采用电子束曝光图形化方法,配合电子束蒸发和剥离工艺,开展亚微米特征尺寸的微型 SAWR 器件的制作。通过大量对比实验研究了抗蚀剂厚度、金属沉积、扫描方式、曝光剂量等关键参数对高质量栅状电极制备的影响,并对邻近效应的校正进行了研究,成功地在 128 °Y-X LiNbO₃ 和 42 °Y-X LiTaO₃ 基底上制作了 L 波段 SAWR (整体尺寸小于 0.5mm² 和 1mm²), 掌握了制作亚微米特征尺寸 SAWR 的工艺方案。最后,用矢量网络分析仪对上述器件进行了测试,并开展了初步的温度和应变传感研究。测试表明,128 °Y-X LiNbO₃ 上 SAWR 的谐振频率为 1.56GHz, 温度灵敏度为 125.4kHz/°C, 是 433MHz 频段类似器件的 4 倍, 应变灵敏度为 831Hz/με。42 °Y-X LiTaO₃ 上 SAWR 的谐振频率为 1.03GHz, 温度灵敏度为 25.3kHz/°C。在室温到 +250°C 的范围内, 两者温度-频率特性的线性度良好。

本文设计了两种压电基底上的 L 波段 SAWR, 用包含二阶效应的有限元模型和 COM 模型的相结合方法对器件进行了模拟和优化; 工艺方面, 解决了 SAWR 图形的精确曝光与密集栅状结构的可靠剥离问题, 总结的工艺流程对用电子束曝光技术制作密集亚微米平面结构具有一定的借鉴意义。

关键字: 声表面波传感器; 高频; 电子束曝光

Abstract

Due to its characteristics of small size, high accuracy and wireless passive detection, resonator-type surface acoustic wave sensors (RSAWS) are suitable for the applications of temperature, pressure, vibration, humidity, strain sensing in inaccessible regions and rotatable components. For now, the operating frequency of most RSAWS are on P band, which results in a large dimension and low sensitivity relatively. To meet the requirements of wireless sensor networks in micro and passive device, it's necessary to study the design and fabrication of RSAWS with high operating frequency and sub-micro feature size.

Firstly, this paper expounded the operating principle of RSAWS and its key component---surface acoustic wave resonator (SAWR). Considering the presence of significant second order effect in high frequency SAW device, coupling-of-modes (COM) model and finite element model were employed to design and simulate the L-band SAWR on 128 °Y-X LiNbO₃ and 42 °Y-X LiTaO₃ substrate. Secondly, E-beam lithography (EBL), E-beam evaporation (EBE) and lift-off process were used to fabricate the SAWRs with sub-micron feature size. The influences of resist thickness, metallization, scan strategy, exposure dose and proximity effect were study by a large number experiments. Finally, optimized parameters and process flows were summarized, which were succeeded in fabricating L-band SAWRs on piezoelectric substrate mentioned above, with a dimension of 0.5mm² and 1mm² respectively. At last, A vector network analyzer was used to figure the return loss and admittance of the SAWRs mentioned above. A primary sensing research was carried out on temperature and strain at the same time. The test results are as follows: the Rayleigh mode SAWR on 128 °Y-X LiNbO₃, with a resonant frequency of 1.56GHz, showed a rather high temperature sensitivity of 125.4kHz/°C, which was 4 times of the similar device's on 433MHz. In addition, a strain sensitivity of 831Hz/με was observed. A leaky SH-SAW mode resonance was observed on 42 °Y-X LiTaO₃ SAWR at 1.03GHz, which was demonstrated a temperature sensitivity of 25.3kHz/°C. Both SAWRs showed good linearity on temperature-frequency response characteristics from room temperature to +250°C.

The process summarized above is also of significance to fabricate large scale concentrated sub-micron plane structures by EBL.

Key words: surface acoustic wave sensor; high frequency; E-beam lithography (EBL)

目 录

第一章 绪论	1
1.1 压电效应和声表面波技术简介	1
1.2 无线无源 SAW 传感器及其国内外发展现状	2
1.3 高频 SAW 器件的国内外发展现状	6
1.4 研究方向的确定和论文安排	6
第二章 单端口 SAW 谐振器的原理、设计方法和等效模型	8
2.1 SAW 谐振器的工作原理	8
2.2 单端口 SAWR 的结构组成和设计参数	9
2.2.1 叉指换能器(IDT)	9
2.2.2 反射栅	10
2.2.3 叉指换能器和反射栅间距 L_n	11
2.2.4 压电基底、IDT、反射栅材料的选择	12
2.2.5 单端口谐振器的等效模型	13
2.3 二阶效应	15
2.4 SAW 器件的耦合模模型	18
2.4.1 耦合模模型的发展	18
2.4.2 有限长 IDT 的 COM 方程和 COM 参数	19
2.4.3 COM 方程解的 P 矩阵表示	20
2.4.4 P 矩阵的级联	22
2.5 本章小结	23
第三章 基于有限元和 COM 模型的 SAWR 设计和模拟	24
3.1 引言	24
3.2 各向异性压电固体中的弹性表面波的数值解	24
3.3 基于 Visual Basic 的材料参数坐标变换软件	27
3.4 周期性二维有限元模型和部分 COM 参数的提取	28
3.4.1 周期性二维有限元模型的原理	28
3.4.2 模态分析以及等效波速和反射系数的提取	30

3.4.3	稳态分析以及静电容的提取	35
3.4.4	频响分析	37
3.5	缩减型二维 SAWR 有限元模型.....	39
3.5.1	周期性二维模型的局限和缩减型二维 SAWR 模型的建立.....	39
3.5.2	缩减型二维 SAWR 有限元模型的频响分析.....	39
3.6	SAWR 设计参数的确定和完整器件的 COM 模拟.....	41
3.6.1	其余 COM 参数的提取	41
3.6.2	反射栅的设计和 COM 模拟	42
3.6.3	IDT 的设计和 COM 模拟	43
3.6.4	L_r 的设计和 SAWR 的 COM 模拟.....	45
3.7	本章小结.....	47
第四章	电子束曝光制作 L 波段 SAWR 的研究.....	49
4.1	电子束曝光系统和原理.....	49
4.1.1	光刻技术的发展	49
4.1.2	电子束曝光的原理和系统组成	49
4.2	工艺参数的优化.....	52
4.2.1	抗蚀剂厚度选择	52
4.2.2	金属薄膜沉积方式的选择	54
4.2.3	电荷积累(charging effect)的消除	55
4.2.4	扫描模式和剂量测试	56
4.2.5	邻近效应的校正	59
4.3	电子束曝光制备 SAWR 的标准工艺流程.....	62
4.4	SAWR 的镜检和封装.....	64
4.5	本章小结.....	65
第五章	L 波段 SAWR 的表征和传感研究	66
5.1	SAWR 的性能表征.....	66
5.1.1	网络分析仪的校准	66
5.1.2	128 °Y-X LiNbO ₃ 上 SAWR 的表征.....	66
5.1.3	42 °Y-X LiTaO ₃ 上 SAWR 的表征	67
5.2	温度传感实验.....	68

5.2.1 谐振型 SAW 温度传感器的原理	68
5.2.2 测试方法和结果	69
5.3 应变传感实验	71
5.3.1 谐振型 SAW 应变传感器的原理	71
5.3.2 测试方法和结果	72
5.4 本章小结	73
第六章 总结与展望	74
致谢	76
硕士期间的科研成果	77
参考文献	78

厦门大学博硕士学位论文摘要

Constents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Piezoelectric effect and surface acoustic wave technology	1
1.2 Development of wireless and passive SAW sensor	2
1.3 Development of high frequency SAW device.....	6
1.4 The research significance and content	6
Chapter 2 The fundamental principles and design considerations one-port SAW resonator.....	8
2.1 The operating principle of SAW resonator	8
2.2 Design considerations of one-port SAWR.....	9
2.2.1 IDT.....	9
2.2.2 Reflectors.....	10
2.2.3 Gap between IDT and Reflectors	11
2.2.4 Piezoelectric substrate and IDT material.....	12
2.2.5 Simplified equivalent models of one-port SAWR.....	13
2.3 Second order effects	15
2.4 Couple-of-modes model of SAW device	18
2.4.1 Development of COM theory	18
2.4.2 COM equations and parameters of IDT	19
2.4.3 Solutions of COM equations and P-matrix.....	20
2.4.4 Cascade of P-matrix.....	22
2.5 Chapter Summary.....	23
Chapter 3 Design and Analysis of SAWR based on finite element model and COM model	24
3.1 Introduction	24
3.2 Numerical solutions of elastic surface wave in anisotropic piezoelectric solids	24

3.3 Coordinates transformation soft of material parameters based on Visual Basic.....	27
3.4 2D Periodic finite element model and extraction of some COM parameters	28
3.4.1 The priciple of 2D periodic finite element model	28
3.4.2 Modal analysis and extraction of wave velocity and reflectivity	30
3.4.3 Steady-state analysis and extraction of static capacitance.....	35
3.4.4 Harmonic response analysis	37
3.5 Reduced 2D finite element model of SAWR	39
3.5.1 Establishment of reduced 2D model.....	39
3.5.2 Harmonic response analysis of reduced 2D model	39
3.6 parameters design of SAWR and COM analysis	41
3.6.1 Extraction of remaining COM parameters	41
3.6.2 Design and COM analsis of reflectors.....	42
3.6.3 Design and COM analsis of IDT and COM analsis	43
3.6.4 Design of gap and COM analsis of SAWR	45
3.7 Chapter Summary	47
Chapter 4 Fabrication of L-band SAWR based on electron beam lithography.....	49
4.1 Introduction of EBL systems.....	49
4.1.1 Development of photolithography.....	49
4.1.2 The principle and system construction of EBL	49
4.2 Optimization of process parameters.....	52
4.2.1 Thickness of the resist	52
4.2.2 Metallization.....	54
4.2.3 Elimination of charging effect.....	55
4.2.4 Scan strategy and dose test	56
4.2.5 Calibration of proximity effect	59
4.3 Optimized fabrication process flow	62
4.4 Microscopy and packaging of SAWR.....	64
4.5 Chapter Summary	65

Chapter 5 Characterization and sensing experiment of SAW	66
5.1 Characterization of SAW	66
5.1.1 Calibration of vector network analyzer	66
5.1.2 Characterization of SAW on 128 °Y-X LiNbO ₃	66
5.1.3 Characterization of SAW on 42 °Y-X LiTaO ₃	67
5.2 Temperature sensing experiment	68
5.2.1 Principle of SAW temperature sensor	68
5.2.2 Testing scheme and results	69
5.3 Strain sensing experiment	71
5.3.1 Principle of SAW strain sensor	71
5.3.2 Testing scheme and results	72
5.4 Chapter Summary	73
Chaper 6 Conclusions and prospects	74
Acknowledgement	76
Publication	77
References	78

第一章 绪论

1.1 压电效应和声表面波技术简介

声学技术的发展很大程度依赖于压电现象的发现。1880年, Pierre 和 Jacques Curie 兄弟在 α -石英晶体上发现了压电效应, 并由 Hankel 在 1881 年命名。1921 年, Cady 在石英晶体振荡器中首次使用了这个名称^[1]。压电体受到外机械力作用而发生电极化, 并导致压电体两端表面内出现符号相反的束缚电荷, 其电荷密度与外机械力成正比, 这种现象称为正压电效应。压电体受到外电场作用而发生形变, 其形变量与外电场强度成正比, 这种现象称为逆压电效应。具有正压电效应的固体, 也必定具有逆压电效应, 反之亦然。晶体是否具有压电效应, 是由晶体结构的对称性所决定的^[2]。

波的本质是能量从一点到另一点的传播。在介质中通过弹性变形传播的波称为弹性波。根据波的振动方向和传播方向的关系, 弹性波可以统分为两类: (1) 振动方向与传播方向垂直, 为横波(或称剪切波); (2) 振动方向与传播方向平行, 为纵波(或称压缩波)。然而, 在真实情形中, 单纯的横波或者纵波是不存在的, 更多的是这两种振动形式的复杂组合^[3]。英国物理学家 Lord Rayleigh 在 1885 年指出^[4], 在固体中, 除了体横波和体纵波外, 还存在着一种沿着无限弹性介质表面传播的波, 称为声表面波(Surface Acoustic Wave, 简称 SAW)。他所发现的 SAW 后来被称为瑞利波, 之后人们又陆续发现了 Love 波、Lamb 波、STW 波等其他模式的 SAW。

由于压电晶体本身是换能介质, 电声之间存在耦合, 因此在传播声表面波的压电晶体表面可以制作电声换能器, 使电能和声能互相转。SAW 器件的工业和商业应用始于二十世纪五十年代, 由于 SAW 的典型波速比电磁波小 5 个数量级, 人们首先将其应用于延迟线, 只需很小的一段 SAW 延迟线就可实现很大的时间延迟。但由于缺乏高效的 SAW 激励和接收手段, 器件的性能不甚理想。1965 年, 美国的 R.M.White 和 F.M.Voltmer 发明了金属叉指换能器(interdigital transducer, 简称 IDT), 如图 1.1 所示。这种结构的电极能在压电介质表面稳定激励 SAW, 并利用逆压电效应将 SAW 转换成电信号输出^[5]。这项发明大大加速了声表面波技术的发展。之后, 出现了性能优越的延迟线、滤波器、振荡器、放大器、非线性

性器件、声光器件等形形色色的 SAW 器件，这门学科逐步发展成由声学、电子学和材料科学相结合的新兴边缘学科。现在，SAW 技术的应用涉及地震学、天文学、雷达通讯及广播电视中的信号处理、航空航天、汽车工业、石油勘探、无损检测等领域^[6]。

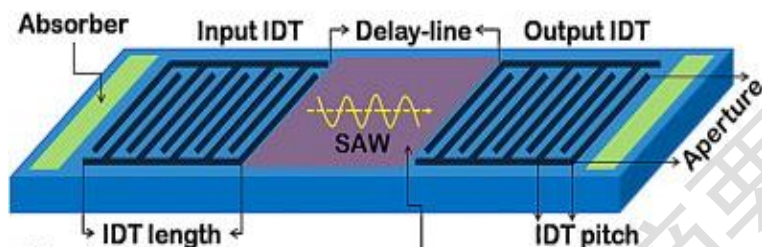


图 1.1 叉指换能器

声表面波传感器的研究起源于 20 世纪 70 年代，人们在研究声表面波电子器件时发现，表面沉积物、应力、温度、电场、磁场等外界因素会对器件的特性产生较大的影响，这些影响是电子器件所不希望的，但是却十分适合于传感器的研究。声表面波器件的谐振器频率的改变随外界扰动的改变在一定范围内呈线性关系，利用这种线性关系就可以通过获取声表面波的谐振频率的变化，得到精确的外界扰动量的变化。SAW 传感器是 SAW 技术的一个新的重要分支，是电子技术与材料科学相结合的产物，因其具有灵敏度高，准数字量输出，器件体积小，与 MEMS 工艺兼容，耐冲击，易于无线无源化等特点，在民用和军用传感领域，有广阔的应用前景，受到各国的广泛关注^{[7]-[13]}。目前，在温度、压力、湿度、气体、加速度、角速度、扭矩、紫外探测、生物检测、和超灵敏微天平等传感领域，均有大量 SAW 传感器的研究报道^{[14]-[19]}。

1.2 无线无源 SAW 传感器及其国内外发展现状

SAW 器件大多工作在射频波段，输出的是准数字化的频率或相位信号，与输出模拟信号的传感器相比，在传感器端可省去的 AD 转换模块和射频调谐解调模块，这使得 SAW 传感器在小型化、无线无源化上有着得天独厚的优势。同时，其还能胜任恶劣工作条件(如高温，强电磁辐射)、高速转动物体、难以触及或密封物体内部等各种条件下的物理化学参数的检测，具体可归纳为：

(1)、由于采用压电基片上的叉指换能器，不需要另外能量即可完成电磁波—声表

面波—电磁波能量转换过程，而且声表面波换能没有阈值，效率极高，极少电磁波能量就能完成电磁波的收发过程。因此，SAW 传感器不需额外能量，即它是真正无源元器件。由此，它具有不需维护，使用寿命长等优点，特别适合用于难以维护或需要长期工作的场合。

(2)、由于叉指换能器可与射频辐射天线直接相连，达到收发射频信号的目的，所以能直接完成无线应用，大大简化了 SAW 传感器节点的结构。最简单的 SAW 传感器节点仅由声表面波压电编码传感单元芯片和直接相连的天线组成，成本低，适于推广应用。

(3)、由于声表面波声速比电磁波光速低许多，声表面波传播 4mm 距离，即可延时一微秒左右。一微秒延迟时间，足以避免近距(<100 米)内射频多次反射杂波的干扰，大大提高了有效回波的信噪比，有利于增加反射延迟型 SAW 传感器的读写距离或减小读写器的射频辐射功率。

(4)、由于声表面波换能过程中没有载流子参与，所以 SAW 传感器耐辐射，抗干扰能力较强，可以用于多种恶劣环境。

(5)、SAW 传感器可工作于较宽的环境温度范围。采用常用的压电晶体，器件最高工作温度可大于 200℃。采用特别的封装，已证实能较长期工作在 300℃环境中。若采用特种压电材料，传感器的工作温度可更高。

目前，广泛使用的无线无源 SAW 传感器结构有两种：谐振型和延迟线型(也称 SAW-RFID 型)，如图 1.2 所示。两者的传感器端都由一个激励兼检测 SAW 信号的 IDT 以及若干反射栅组成。问询电路发射的射频问询信号通过天线耦合进 IDT，在压电基底表面激发 SAW，SAW 在传播过程中遇到反射栅发生反射，在 IDT 处又转换成电信号，由天线发射回问询电路。单端口谐振型 SAW 传感器通过测量谐振频率的偏移来得到传感信号。谐振型 SAW 传感器可以实现很高的 Q 值和很小的损耗，有利于高精度远距离无线无源传感，但是设计和制作时需对反射栅和 IDT 的相对位置进行精确控制，工艺难度和成本较高。SAW-RFID 型 SAW 传感器通过测量相位差可以得到反射波的时间延迟，并以此来敏感外界扰动。由于每个反射栅都对应一个回波信号，通过对反射栅的位置和排列间隔进行设计，能够实现多物理量传感和二进制编码功能。但是由于反射的 SAW 能量相对较少，造成器件插入损耗较大，在一定程度上限制了无线收发距离。

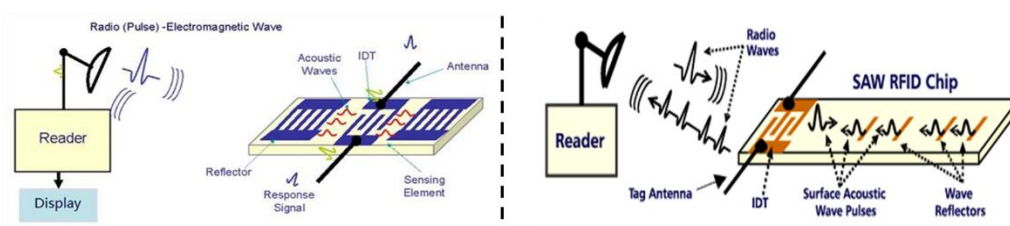


图 1.2 谐振型(左); 延迟型(右)

二十世纪 80 年代起, SAW 传感器在欧美日的发展非常迅速, 无线无源型 SAW 传感器也在 90 年代初投入到实际应用。如西门子公司开发的 SAW 射频标签, 应用在德国慕尼黑火车进站定位系统, 控制列车进站停靠位置。挪威奥斯陆的汽车过桥收费系统也是使用了 SAW 射频标签技术, 通过贴在汽车特定部位的 SAW 射频标签, 实现了不停车收费^[20]。

Vectron 旗下 SenGenuity 公司开发无线无源谐振型 SAW 温度传感器系统^[21], 可对环境温度进行实时监测, 其工作频率为 428-433MHz, 在 -20°C ~ $+120^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 能够实现 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的传感精度, 无线收发距离可达 3m, 如图 1.3 所示。



图 1.3 SenGenuity 公司的无线无源 SAW 温度传感器

英国 Transense 公司开发了 433MHz 的无线无源谐振型 SAW 压力、温度和扭矩传感器^[22]。通过在石英基底上布置三个 SAW 谐振器, 可同时对压力和温度进行监测, 测压精度达到 0.1Psi, 收发距离 0.5m。已经用于汽车胎压监测系统, 如图 1.4 所示。该公司还提出了基于 SAW 的车载无线无源传感网络, 如图 1.5 所示。该系统旨在通过对轮胎压力的监测, 提高汽车的安全性能, 并通过对传动系统中传动轴扭矩的实时监测, 调整动力系统的功率输出, 可降低 10% 的燃油消耗。

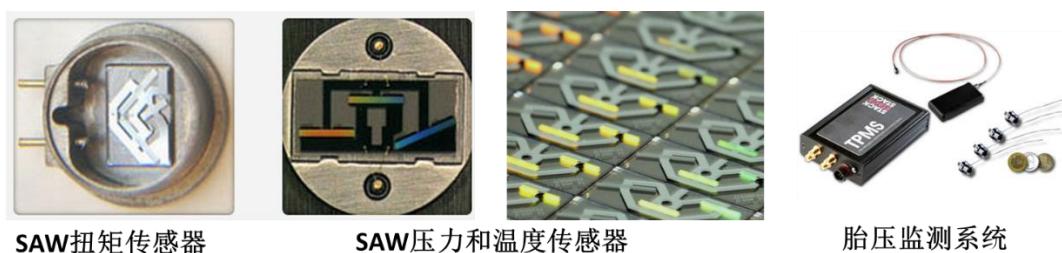


图 1.4 Transense 公司的扭矩、压力和温度传感器

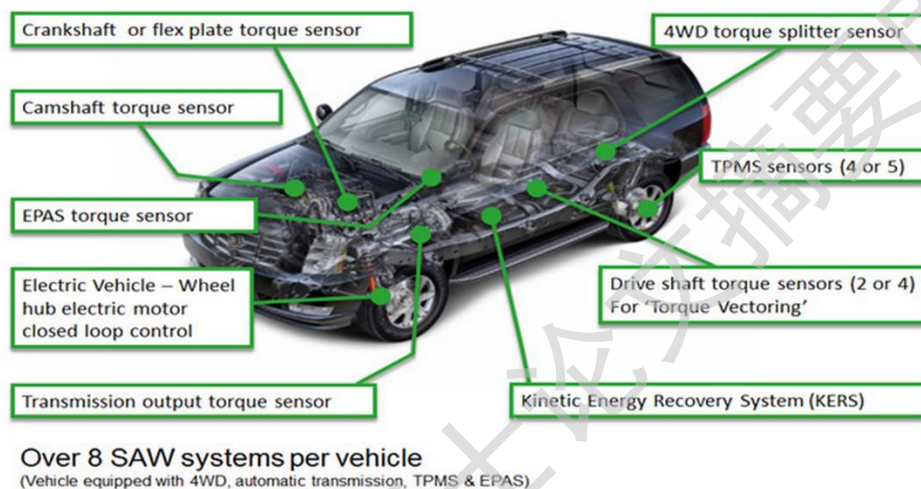


图 1.5 基于 SAW 的车载无线无源传感网络

国内无线无源 SAW 传感器的研究起步较国外晚十年左右，上世界 90 年代中后期，清华大学精密仪器与机械学系的李源和王生江等人研究了 SAW 无源传感系统和 SAW 无源温度遥测系统^{[23][24]}。西北工业大学的范东远，陈明等人，对谐振型 SAW 压力传感器和压力遥测系统进行了理论研究和设计^{[25][26]}。进入新世纪，在 SAW 无线无源传感系统诱人的工程应用前景面前，国内更多院校开展了无线无源 SAW 传感器的研究，并取得了许多成果。除前所述外，上海交通大学的施文康等人，开展了 SAW-RFID 型无线无源 SAW 传感器的理论和实验研究^{[27][28]}。重庆大学的李平，刘双临等人，提出了一种谐振延迟型无源无线声表面波传感器的设计，能够实现远距离传感和编码功能，并对遥测信号处理进行了研究^{[29][30]}。华中科技大学的谭六喜研究了用于汽车胎压检测系统(TPMS)的无线无源 SAW 压力传感器^[31]。哈尔滨工业大学，浙江大学，山东大学等高校也有课题组对无线无源 SAW 传感系统进行了研究和实验。

国内的无锡华普微电子，德清华莹，声立传感技术有限公司等单位，已经开

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.