

MEMS-based SAW Devices for Wireless Sensing

著者	JAN HENRIK KUYPERS
号	52
学位授与番号	3862
URL	http://hdl.handle.net/10097/37578

氏名	やん へんりっく こいばす
授与学位	JAN HENRIK KUYPERS 博士 (工学)
学位授与年月日	平成19年9月12日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) ナノメカニクス専攻
学位論文題目	MEMS-based SAW Devices for Wireless Sensing (無線センシングのためのMEMS技術によるSAWデバイス)
指導教員	東北大学教授 江刺 正喜
論文審査委員	主査 東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 桑野 博喜 教授 橋本 研也 東北大学准教授 田中 秀治 (千葉大学)

論文内容要旨

We have developed a wireless temperature sensing system operating in the 2.45 GHz ISM band featuring the parallel interrogation of up to 10 sensors using TDMA (time division multiple access). The sensors are based on one port reflective delay line devices, as illustrated in Fig. 1. These devices do not require any power supply, as e.g. batteries or inductive powering. The sensor information is contained in the reflected time response and phase, similar to a radar echo. The developed system achieves a temperature accuracy of 0.19 K (6σ) at a transmission power of +2 dBm (1.59 mW), for a distance between the transceiver and sensors of about 1.4 m. Close agreement of fabricated sensors (Fig. 2) and simulation was obtained. The proposed signal-to-noise ratio (SNR) relation of the sensor accuracy was demonstrated using Monte Carlo simulation and experimental results. This allows for an in-situ accuracy evaluation of each measurement of the parallel sensors. The proposed multi-step evaluation scheme based on this SNR relation lead to an accuracy improvement of the sensor of factor 200. At the same time this evaluation scheme prevents

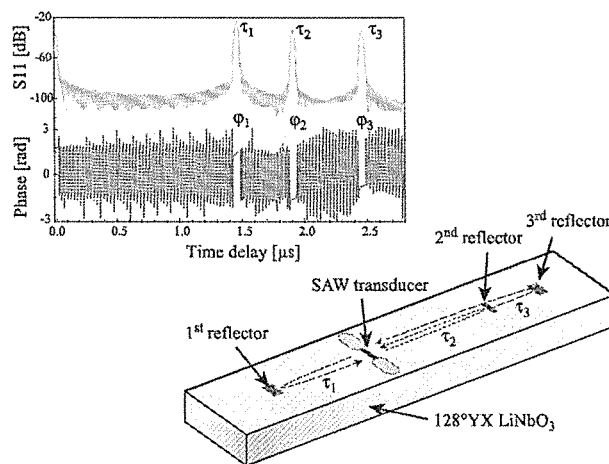


Fig. 1. Layout of the one port reflective delay line sensor and its time response and phase. This device was applied in this thesis to passive wireless sensing using the 2.45 GHz ISM band.

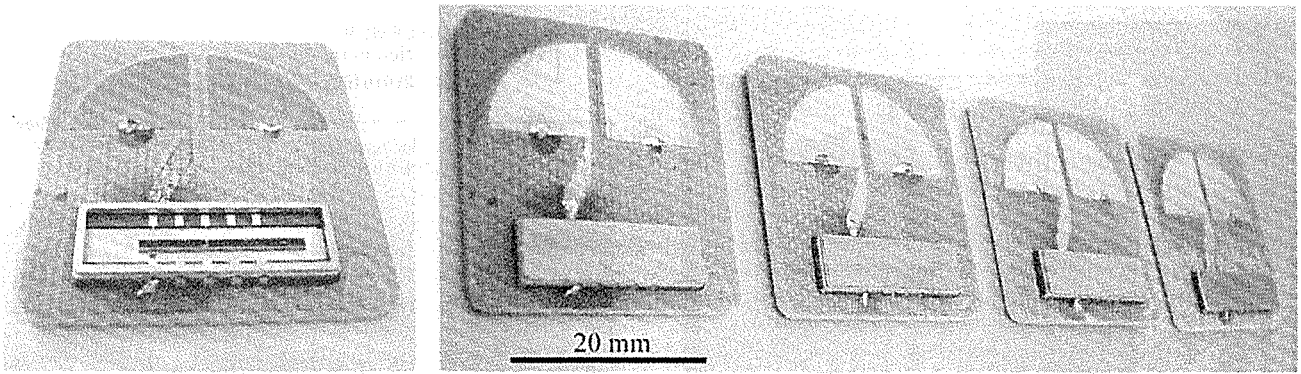


Fig. 2. Fabricated SAW delay line sensor mounted in SMD ceramic package and assembled sensor tags on the microstrip antennas.

phase ambiguity problems in previous work with SAW sensors and can cover an arbitrary measurement range. Based on combining the estimation theory of the Cramer Rao Lower Bound (CRLB) concerning the sensor accuracy we have shown that an optimum design of the sensor time delays exists. This optimum depends on the propagation loss of the used substrate material. By reviewing the modified radar equation concerning the SNR of wireless SAW delay line sensors and the fundamental relation of SNR and sensor accuracy we have been able to complete the chain of the sensor simulation. It is now possible to predict the exact sensor accuracy for a given system and measurement environment. This has enabled the precise design of sensor systems for specific applications.

The integration of MEMS switches with 2-port SAW delay line devices has lead to the development of miniature monolithic phase shifters (Fig. 3). In the thesis we propose several novel sensor structures and tunable SAW devices based on the surface shorting effect. This novel effect proposed by the author is based on the phase velocity of a SAW being sensitive to the electrical boundary condition at the substrate surface. By mechanically actuating a conductive sheet above the substrate surface the velocity can be controlled and has been applied to acoustic phase shifters. Due to the small wavelength of an acoustic wave compared to an electromagnetic wave the size of acoustic phase shifters is reduced by a factor of 50~500. This technology is promising to achieve phased array antennas (PAA) with the phase-shifting elements directly integrated into the antenna. The use of PAA is very promising to enhance the sensor accuracy and operating range of the developed wireless temperature sensing system.

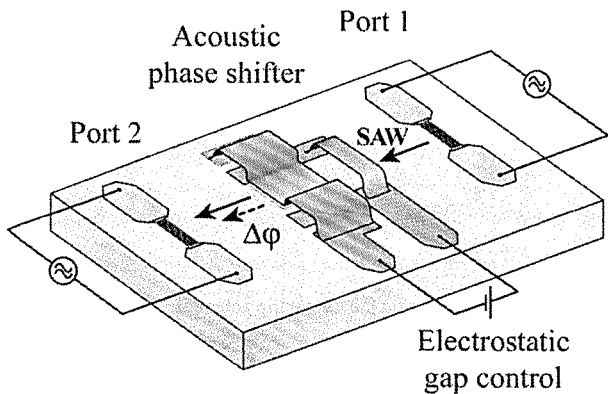


Fig. 3. Structure of the acoustic phase shifter based on controlling the phase velocity of the SAW by electrostatically setting the gap height.

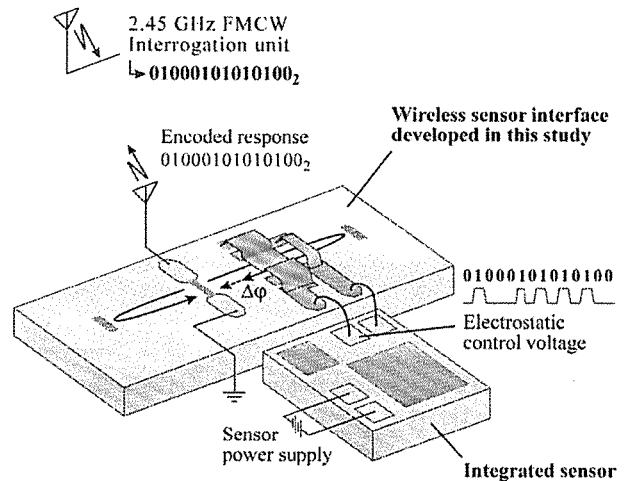


Fig. 4. Application of the developed interface for the wireless operation of existing integrated sensors without RF front-end. The information is transmitted by a serial binary low voltage output of the sensor which in turn causes a phase encoding by actuation of the MEMS switch.

Combining the sensor technology of the reflective one port SAW delay line devices with the tunable MEMS switch technology we have developed 2.45 GHz SAW-based passive binary transponders for wireless interfaces of integrated sensors. This technology allows an integrated sensor to be interrogated wirelessly in a range of several meters. A MEMS switch is used to modulate the SAW according to the binary sensor output (Fig. 4). The component itself requires no power for the wireless communication, as the principle is based on evaluating the reflected signal similar to a radar echo. The encoding solely requires an electrostatic tuning voltage of as low as 3 V for the MEMS switch. We successfully demonstrated that the device assembled on a microstrip antenna wirelessly transmitted ASCII characters over a distance of up to 2 m. This first proof of the tuning ability of MEMS switches integrated into SAW devices demonstrates the possibility of tunable filters, programmable matched filters, programmable SAW ID tags and other promising novel devices discussed in the thesis.

Finally, we have developed a novel wafer-level packaging technology and applied it to the encapsulation of SAW devices and sensors operating at 2.45 GHz (Fig. 5 and Fig. 6). The packaging is based on using photosensitive epoxy resin which has been demonstrated to withstand the harsh conditions encountered during plastic mold injected packaging. The photosensitive epoxy is prepared as a dry film resist (DFR) and imprinted. The imprinted regions in the DFR are

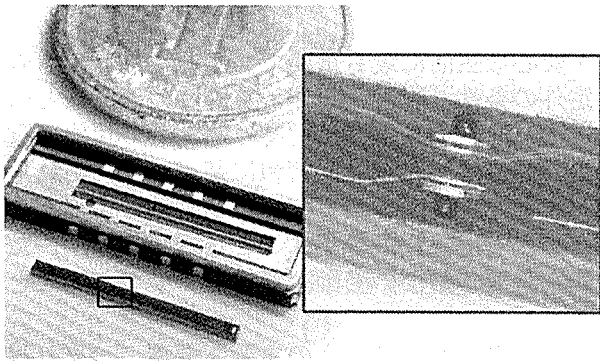


Fig. 5. Size of a SAW delay line sensor packaged in a ceramic SMD SAW package compared to a wafer-level packaged sensor.

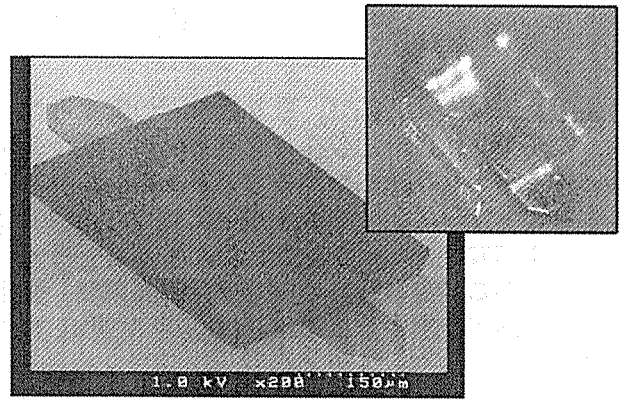


Fig. 6. SEM of packaged SAW device using imprinted SU-8 dry film resist and optical microscope image revealing the contained cavity.

aligned to the device to be packaged. After lamination to the device wafer the imprinted sections form cavities above the RF devices. By lithographically structuring this epoxy layer, miniature packages are formed, allowing for a direct access to metal feed-throughs extending from beneath the package. Our results prove the advantage of using such miniature packages, as no RF parasitics due to packaging could be observed. This approach enables the wafer-scale encapsulation and subsequent evaluation of packaged components on wafer-level. This novel packaging technology has the main advantages of being a low temperature process and of no liquid getting in contact with the device to be packaged, and thus prevents contamination and stiction of movable parts. For these reasons this technology has recently been applied to the packaging of RF MEMS switches. Methods of how to extend the current package to be hermetic in the future are also discussed.

Besides the development of novel sensors and related technology great care has been taken to cover the related fundamentals related to the thesis. The fundamental theory of acoustic wave propagation is introduced in the first section of the thesis. This is followed by a chapter on sensor effects applicable to SAW based sensors. Next, the actual simulation of high frequency SAW devices and their fabrication are introduced. Fundamental antenna theory and the development of a miniature sensor antenna for the 2.45 GHz ISM band are covered towards the end of this very extensive first chapter. The final section of this first chapter is dedicated to wireless technology, the principle of frequency modulated continuous wave (FMCW) radar and estimation theory related to the sensor accuracy.

論文審査結果の要旨

住宅、工場、社会基盤、乗り物などの安全性は、安全・安心な生活に最も重要である。これらのものは、安全第一に設計・製作されるものの、経時変化、想定外の条件、設計・製作・整備時の瑕疵などによって、重大な事故に繋がることもある。これらのものにセンサを取り付け、常時、それらの状態を監視することは、故障や事故を未然に防ぐために有効である。さらに、センサの情報に基づいて、これらのものを適宜整備し、長期間、使用することは、省資源、省エネルギー、および廃棄物削減の視点からも重要である。そのためのセンサは、長期間、使用され、しかも配線を取り出すことが困難な場所、たとえば、高压電線や電車の車軸にも用いられるので、電池を必要としない受動型無線センサであることが望まれる。

本論文は、SAW (surface acoustic wave) を用いた受動型無線センサシステムの主要3要素、つまり温度センサと通信システム、電波走査のための可変位相シフタ、およびウエハレベルセンサパッケージングに関して、設計、試作、評価、および考察した結果をまとめたものであり、全編6章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景と論文構成とが述べられている。

第2章では、本論文に関連する物理と技術とが詳細にまとめられている。具体的には、SAWの物理、SAWセンサの原理、SAWデバイスのシミュレーション法、SAWデバイスの作製法、アンテナの物理と設計、および無線通信の物理が述べられている。SAWを用いた受動型無線センサシステムを設計・製作するために必要な理論や技術が体系付けられている。

第3章では、温度センサシステムに関して述べられている。本センサは、センサ中をSAWが往復する時間が温度によって変化する効果を用いたものであり、SAW遅延ラインセンサと呼ばれる。温度を高精度に計測する方法として、遅延時間評価と位相評価とを組合せたMulti-step Evaluation Methodが提案され、その設計法、実現可能な精度などが詳細に検討されている。実際に2.45 GHzで動作するセンサを試作し、本研究で開発したパッチアンテナと通信システムとを組み合わせ、提案した方法の有効性が実証されている。Multi-step Evaluation Methodによって、センサの精度は単に遅延時間評価する場合より200倍向上した。また、複数点の温度を1つの帯域で同時計測する方法としてTDMA (time division multiple access) 法があるが、4つの温度センサを用いてTDMAが実証されている。

第4章では、SAWを用いた可変位相シフタに関して述べられている。SAWデバイス表面に導体を波長以下の距離まで近接させると、表面短絡効果によってSAWの伝播速度が変化する。MEMS技術による静電アクチュエータを用いて、金属薄膜をSAWデバイス表面に距離を制御して近接させることで、SAWがデバイスを通る時間を制御でき、可変位相シフタを実現できる。本章では、試作したデバイスを詳細に評価した結果がまとめられ、位相変化量が大きく、しかも小形の可変位相シフタを実現するため重要な知見が述べられている。

第5章では、SAWデバイスのウエハレベルパッケージングに関して述べられている。SAWデバイスを低コストにパッケージングする方法として、型押しした感光性樹脂フィルムをウエハにラミネーションし、露光によって形状定義と硬化とを行う方法が提案され、第3章で述べられた温度センサに適用されている。パッケージング前後のセンサ特性を評価し、パッケージング工程がセンサに悪影響を及ぼさないことが実証されている。

第6章は結論である。

以上、本論文は、SAWを用いた受動型無線センサシステムの主要3要素、つまり温度センサと通信システム、電波走査のための可変位相シフタ、およびウエハレベルセンサパッケージングに関して、理論・技術の体系的整理、理論検討、シミュレーション、設計、試作、評価、および考察と総合的に研究し、新たに提案した技術の有効性を実証し、多くの有効な成果を得たものであり、ナノメカニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。