Journal of the Microelectronics & Packaging Society
Vol. 9, No. 3, p. 19-23. 2002

폐자로를 형성한 마이크로 플럭스게이트 자기 센서

최원열 · 황준식 · 강명삼* · 최상언

삼성종합기술원 MEMS Lab., *삼성전기(주) MLB R&D Center

A Micro Fluxgate Magnetic Sensor with Closed Magnetic Path

Won-Youl Choi, Jun-Sik Hwang, Myung-Sam Kang*, and Sang-On Choi

MEMS Laboratory, Samsung Advanced Institute of Technology (SAIT), Suwon, Korea
*MLB R&D Center, Samsung Electro-Mechanics Co., Yeongi-Gun, Chungnam, Korea

초 록: 본 논문은 인쇄회로 기판 (PCB)에 내장된 마이크로 플럭스게이트 자기센서 (micro fluxgate magnetic sensor)에 대한 것으로써, 센서의 제작과 폐자로 형성에 따른 자계 검출 특성 변화에 관한 것이다. 이를 위해 연자성 코아를 사각링 형태와 두개의 바 (bar)형태로 각각 구현하였다. 제작을 위해 모두 5층의 기판을 적층하였으며, 가운데 (3번째) 기판을 자성체 코아로, 자성체 코아 외부 (2번째와 4번째) 기판을 여자코일로, 최외부 (1번째와 5번째) 기판을 검출코일로 제작하였다. 연자성 코아로는 약 100,000의 큰 DC 투자율 (permeability)을 갖는 코발트 (Co)가 주성분인 아몰퍼스 재료를 사용하였으며, 여자코일과 검출코일은 구리를 사용하였다. 제작된 자기센서는 여자조건이 360 kHz, $3V_{p-p}$의 구형파일 경우에 사각링 형태의 연자성 코아를 갖는 자기센서에서는 540 V/T로 매우 우수한 감도를 보이고 있으며, −100 μT~+100 μT 영역에서 매우 우수한 선형특성을 보이고 있다. 자기 센서의 크기는 7.3×5.7 mm^2이며, 소비전력은 약 8 mW이다. 이런 초소형 자기센서는 휴대용 navigation 시스템, telematics, VR 게임기 등 다양한 응용분야에 적용할 수 있다.

Abstract: This paper presents a micro fluxgate magnetic sensor in printed circuit board (PCB). In order to observe the effect of the closed magnetic path, the magnetic cores of rectangular-ring and two bars were each fabricated. Each fluxgate sensor consists of five PCB stack layers including one layer magnetic core and four layers of excitation and pick-up coils. The center layer as a magnetic core is made of a Co-based amorphous magnetic ribbon with extremely high DC permeability of ~100,000. Four outer layers as an excitation and pick-up coils have a planar solenoid structure and are made of copper foil. In case of the fluxgate sensor having the rectangular-ring shaped core, excellent linear response over the range of −100 μT to +100 μT is obtained with 540 V/Tsensitivity at excitation square wave of $3V_{p-p}$ and 360 kHz. The chip size of the fabricated sensing element is 7.3×5.7 mm^2. The very low power consumption of ~8 mW was measured. This magnetic sensor is very useful for various applications such as: portable navigation systems, telematics, VR game and so on.

Key Words: Micro, Fluxgate, Magnetic, Sensor, Closed Magnetic

1. 서 론

플럭스게이트 자기 센서는 상온에서 사용할 수 있는 센서로서는 가장 고감도 및 고분해능의 특성을 가지고 있다. 또한 10^{-11}~10^{-4}T의 측정 영역에 있어서, 직류 및 저주파 교류 자계의 크기 및 방향을 검출할 수 있으며, 전류의 흐름 및 자성체 재료에 의해 발생하는 자장의 변화량을 검출하는 소자이다. 플럭스게이트 자기 센서의 기본 구성은, 고투자율 재료로부터 형성된 연자성 코아에 감겨져 있는 여자코일과 검출코일로 형성되어 있다. 기본 검출원리는 연자성 코아의 비선형 특성, 즉 포화특성을 이용한다. 여자코일에 충분히 큰 교류전류를 공급하여 자계를 발생시키면, 코아 내부의 자속 밀도는 주기적으로 포화한다. 이때 외부 측정자계가 주어지면 코아 내부의 자속 밀도를 변화시키며, 검출 코일은 이 자속의 변화량을

측정하므로써 외부 자계의 세기를 알 수 있다.

플럭스게이트 자기 센서의 연구는 1930년대 초반부터 이루어졌으며, 1935년 Thomas에 의해 처음으로 특허 등록이 이루어졌다[1]. 또한, 원리 및 소자 구성은 Primdahl 및 Ripka에 의해서 종합 보고 되었다[2-4]. 산업의 발달과 더불어 항공기, 선박 및 차량의 위치 인식 시스템, 교통량 검출하는 소자로서이용되고 있으며, 가상현실 공간에서의 움직임 감지, HDTV의 지자기 보상 및 색번짐 보상, 의료용으로 심자도 측정 및 환자 재활용, 휴대용 위치 인식용 소자, ITS등 최근 다양한 응용을 모색하고 있다. 이러한 응용 범위의 확대에 있어서 소형, 경량 및 저가격화는 플럭스게이트 자기 센서에 있어서 필수적인 요건이다.

최근 이런 소형, 경량 및 저가격의 플럭스게이트 자기 센서를 제작하려는시도는 많이 이루어지고 있으며, 크게 두가지 제작 방법으로 구분할 수 있다. 첫째는 실리콘 집적회로 기술이 근간이 된 마이크로머시닝(micromachining) 방법이며, 둘째는 PCB기판의 적층기술을 이용한 방법이다. 먼저 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용한 것으로는, 1990년대 초에 Seitz에 의해서 자성박막 코아와 검출코일을 실리콘에 집적하여 미약자계 검출에 이용한 센서가 최초로 보고되었으며[5], 플럭스게이트 자기 센서의 구성요소 모두를 집적한 마이크로 자기 센서가 Kawahito를 비롯한 여러 연구자들에 의해 보고된 것을 계기로 신호처리 회로까지 동일 칩 위에 집적시킨 연구가 최초로 Choi에 의해 보고되는 등 상당한 진전이 이루어졌다[6-11]. 또한 PCB 적층기술을 이용한방법으로는 Dezuari 및 APlus Co.에 의해 보고 되고 있으며, 크기, 성능 및 가격 측면에서 많은 경쟁력을 가지고 있다[12-14].

본 논문에서는 새로운 PCB 적층기술을 이용한 방법으로 마이크로 플럭스게이트 자기 센서를 제작하였으며, 이의 새로운 센서 구조, 제작 방법 및 특성에 관하여 논하였다. 특히 폐자로 형성 효과를 관찰하기 위해 연자성 코아를 사각링 형태와 두개의 바(bar) 형태로 각각 구현하였다.

2. 설계 및 구조

플럭스게이트 자기 센서의 설계/제작에 있어서, 그림 1에 나타낸 차동 여자형 플럭스게이트 자기 센서의 기본구조를 이용한다. 이 구조는 연자성 코아, 여자코일 및 검출코일로 구성되어 있으며, 고투자율의 연자성 코아와 미소 선폭 (pitch)의코일을 사용하므로

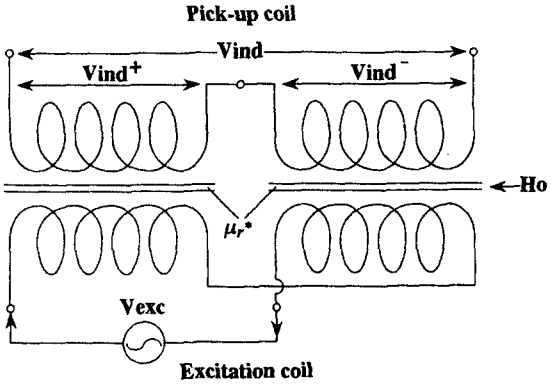

Fig. 1. The basic configuration of the differential fluxgate sensor.

써, 여자전압과 소비전력을 낮출 수 있다. 이 구조는 외부자계가없는 경우 , 검출코일에 유도된 펄스전압의 파형은기하학적으로 대칭성이 있다. 이 때문에, 퓨리에 변환에 의한 주파수 해석에서는 기수차 고조파 밖에 나타나지 않는다. 그러나, 외부자계가 인가되면, 검출된 펄스전압은 기하학적인 대칭성을 잃기 때문에 기수차 고조파 성분에 더하여 우수차 고조파 성분이 나타나게 된다. 이 우수차 (제n차(n=2, 4, 6.....))의 고조파 성분 중에서도 제2고조파에서 최대의 파고치를 갖게 되며, 이런 제2고조파를 검출하므로써, 오프셋(offset)이 없는 자계 검출이 가능해진다. 제2고조파 (Second Harmonics) 검출방식에 의한 감도(S_B)는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다[7].

$$S_B = 8NA\mu_{eff}f_{exc}\sin\left(\frac{\pi H_s}{H_m}\right) \quad (1)$$

여기서, N은 검출코일의 감은 횟수, A는 연자성 코아의 단면적, μ_{eff}는 연자성 코아의 실효 투자율 (effective permeability), f_{exc}는 여자 주파수, H_s는 연자성 코아의 포화자장, H_m는 최대 여자자장을 의미한다. 이 식에서 볼 수 있듯이, $H_m = 2H_s$의 경우에 최대의 감도를 얻을 수 있다.

그림 2(a)와 (b)는 PCB의 적층공정을 이용하여 제작된 사각링 형태의 연자성 코아를 가진 플럭스게이트 자기 센서와 두개의 바 형태의 연자성 코아를 가진 플럭스게이트 자기 센서에 대한 각각의 설계 구조도이다. 이 설계 구조도에서 플럭스게이트 자기 센서는 모두 5층으로 구성되며, 가운데인 3번째층에 연자성 코아의 구조를 형성하고, 그 외각으로 여자코일과 검출코일의 솔레노이드 코일 구조를 구현한다. 연자성 코아의 재료로는 약 100,000의 투자율을 갖는 아

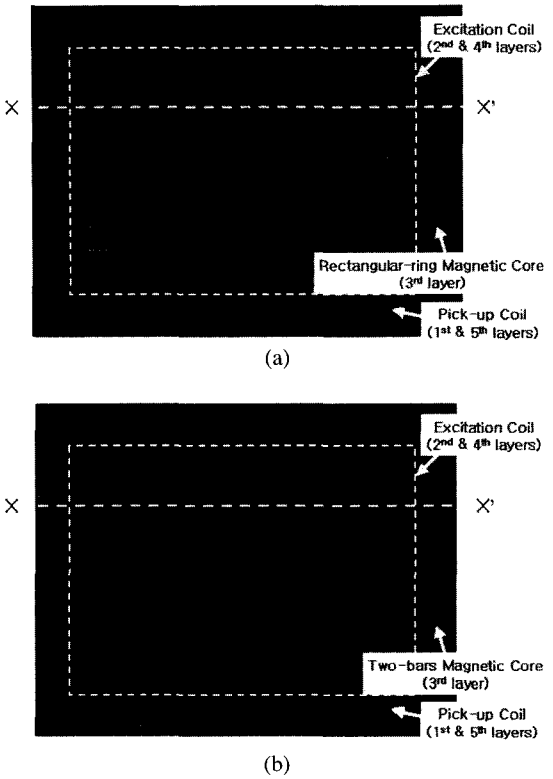

Fig. 2. New structure of the differential fluxgate sensor fabricated using printed circuit board (PCB) technology. (a) Rectangular-ring and (b) two bars.

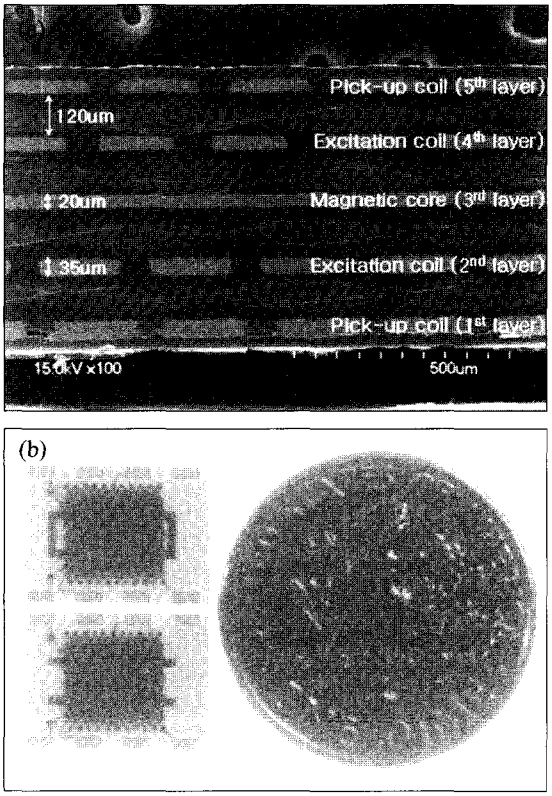

Fig. 3. SEM photographs of the micro fluxgate sensor fabricated by the new printed circuit board (PCB) technology. (a) Cross-sectional, (b) plan view of the sensor with rectangular-ring shaped and two bars shaped core.

몰퍼스(amorphous) 재료를 사용하였다. 여자코일과 검출코일의 재료로는 전기전도도가좋은 구리(copper)를 사용하였다.

3. 실 험

마이크로 플럭스게이트 자기 센서를 제작하기 위한 PCB의 적층 공정은 3번째 층인 연자성 코아의 형성에서 시작된다. 2번째 층인 구리 호일(foil)과 3번째 층인 20 μm 두께의 코발트(Co)가 주성분인 아몰퍼스 연자성체 리본을 에폭시 보드(epoxy board)와 함께 hot pressing을 이용하여 적층시킨다. 적층시 사용되는 에폭시 보드는 접합층 및 절연층의 두가지 역할을 한다. 적층된 연자성 코아를 사각링 형태 및 두개의 바 형태로 구현하기 위해 wet etching하고, 그 위에 다시 4번째 층인 구리 호일을 적층, 패턴닝 (patterning)하고, 2번째 층과 뜨루홀 (through hole)로 통전시켜서 솔레노이드 형태의 여자코일을 형성한다. 뜨루홀의 형성은 드릴링 (drilling)으로 홀 (hole)을 만든 후에 동도금으로 홀을 채워 통전시킨다. 그 후에 최외층으로 1번째와 5번째 층을 여자코일 형성시와 같은 방법으로 적층, 패턴닝, 드릴링, 동도금하여 검출코일을 형성한다. 최종적으로 pad를 형성한다.

그림 3(a), (b)는 각각 새로운 PCB 적층공정을 이용하여 제작된 플럭스게이트 자기센서의 단면, 사각링 형태의 연자성 코아를 가진 플럭스게이트 자기 센서의 평면, 두개의 바 형태의 연자성 코아를 가진 플럭스게이트 자기 센서의 평면 전자현미경(SEM) 사진이다. 그림에서 보여주는 것처럼 여자코일과 검출코일은 180 μm width와 80 μm space로 260 μm의 선폭(pitch)을 보여주고 있다. 여자코일과 검출코일의두께는 약 35 μm이고, 이렇게 코일의 단면적이 커지면 코일의 저항이 감소하여 소비전력을 감소시킬 수 있다. 절연층인 에폭시 보드 두께는 120 μm이고, 연자성 코아의 두께는 20 μm이다. 플럭스게이트 칩(chip)크기는 연자성 코아의 형태와는 무관하게 모두 7.3×

5.7 mm^2로 매우 작다.

플럭스게이트 자기 센서에 여자전류를 인가하기 위해서 function generator (HP33120A)를 사용하였고, DC power supply (Agilent E3642A)로 magnetic shield box에 전류를 흘려 원하는 자기장을 형성하였다. 또한 제2고조파 신호를 검출하기 위해 spectrum analyzer (Agilent 4395A)를 이용하였으며, 상기의 계측기들은 GPIB interface를 사용하여 컴퓨터에 의해 제어 되었다.

4. 결과 및 고찰

제작된 마이크로 플럭스게이트 자기 센서는 각각 21턴씩의 여자코일 및 검출코일로 구성되어 있으며, 연자성 코아는 사각링 형태와 두개의 바 형태로 각각 구성하였다. 사각링 형태의 연자성 코아는 500 μm 폭으로 형성된 크기 7230 μm×2740 μm의 사각링으로 제작되었으며, 두개 바 형태의 연자성 코아는 500 μm 폭으로 형성된 길이 7230 μm의 두개의 바로 제작되었다. 연자성 코아의 재료로는 DC 투자율이 약 100,000 정도이고, 보자력(coercive field)이 0.01 Oe 이하의 코발트가 주성분인아몰퍼스 연자성체가 사용되었다.

그림 4는 여자 전압 변화에 따른 유도된 제2고조파 전압 변화를 보여주며, 측정 조건은 여자 주파수가 360 kHz이고 인가 자계가 1 gauss이다. 그림에서 보듯이 사각링 형태의 연자성 코아를 가진 센서에서는 약 2 V_{p-p}의 낮은 여자 전압에서 65 mV의 최대 제2고조파 전압을 가지며, 보다 높은 여자 전압 영역에서는 점차 포화 되어 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 한편 두개의 바 형태의 연자성 코아를 가진 센서에서는 약 4 V_{p-p}의 높은 여자 전압에서 22 mV의 최대 제2고조파 전압을 보여주고 있다. 이렇게 두개의 바 형태의 연자성 코아를 가진 센서에서 높은 여자 전압을 요구하는 것과 제2고조파 전압이 낮은 것은 연자성 코아가 폐자로를 형성하지 못하여 플럭스(flux)가 누설 되기 때문이며, 이는 폐자로를 형성한 사각링 형태의 연자성 코아를 가진 센서보다 큰 여자 전압을 요구하게 된다.

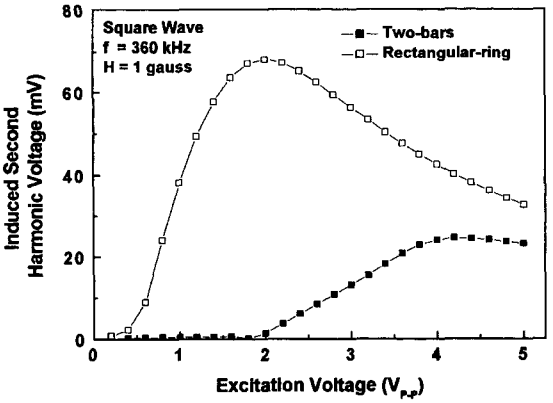

Fig. 4. The induced second harmonic voltage as a function of excitation voltage.

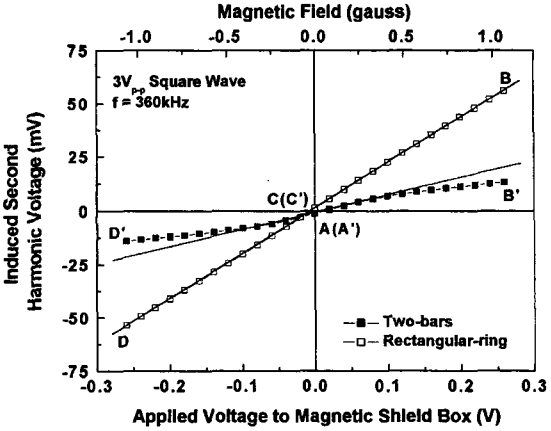

Fig. 5. The linearity characteristics measured with excitation square wave of 3 V_{p-p} and 360 kHz.

그림 5는 여자전압이 3 V_{p-p}이고 주파수가 360 kHz인 구형파가 인가될 때, 측정된 선형특성 결과이다. 연자성 코아의 두개 형태에 대해서 외부자계 인가는 A-B-C-D-A 및 A'-B'-C'-D'-A' 순으로 이루어졌으며, 외부자계에 따른 이력현상은 거의 없었다. 그림에서 보여주는 것처럼, 사각링 형태의 연자성 코아를 가진 센서에서는 −100 μT에서 +100 μT까지의 외부자계 영역에서 매우 선형적인 특성을 보여주고, 540 V/T의 고감도를 보여준다. 그러나 두개의 바 형태의 연자성 코아를 가진 센서에서는 선형특성이 매우 저하되어, −30 μT에서 +30 μT까지의 매우 좁은 외부자계 영역에서 선형특성을 보이며, 감도도 190 V/T로 사각링 코아에 비해 작은 값을 나타낸다. 사각링 형태의 연자성 코아를 가진 센서의 소비전력은 약 8 mW로 매우 작은 값이 측정되었다.

여자주파수 변화에 따른 자계 감도는 그림 6에서 보여주고 있다. 이 그림에서처럼, 연자성 코아의 형태에 무관하게 여자주파수가 증가할수록 자계 감도는 모두 증가하고 있으며, 이런 결과는 식 (1)과 잘 일치하고 있다. 또한, 사각링 형태의 연자성 코아를

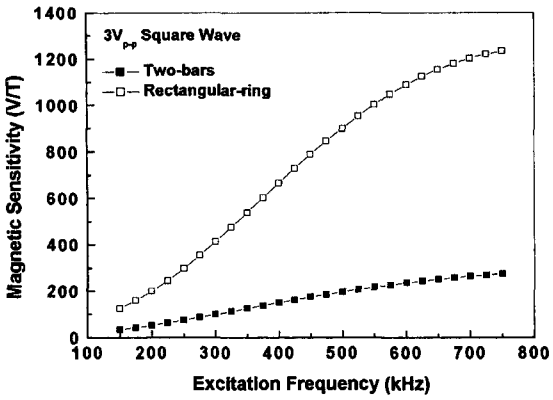

Fig. 6. The magnetic sensitivity as a function of excitation frequency.

가진 센서에서 두개의 바 형태의 연자성 코아를 가진 센서 보다 더 큰 자계 감도를 보이고 있고, 이는 폐자로의 형성으로 플럭스(flux)의 누설을 감소시켰기 때문이며, 그림 5와 잘 일치하고 있다. 그리고, 여자주파수가 크게 증가함에 따라 감도의 증가폭이 감소하는 경향은 주파수가 증가함에 따라 연자성 코아의 투자율이 감쇄하는 것과 여자코일의 임피던스 증가에 의해 최적의 여자전압의 조건이 바뀌기 때문이다.

5. 결 론

Printed circuit board (PCB)에 내장된 초소형 플럭스게이트 자기 센서 (micro fluxgate magnetic sensor)를 설계 및 제작하였다. 플럭스게이트 자기 센서의 폐자로 형성에 따른 효과를 관찰하기 위해 사각링 형태 및 두개의 바 형태로 연자성 코아를 각각 제작하였으며, 솔레노이드 형태의여자코일 및 검출코일을 구현하였다. 연자성 코아는 약 100,000의 큰 DC 투자율을 갖는 아몰퍼스 재료를 사용하여, 고감도 및 저전력의 센서를 구현하였다. 여자조건이 360 kHz, 3V_{p-p}의 구형파일 경우, 폐자로를 형성한 사각링 형태의 연자성 코아를 가진 센서는 −100 μT에서 +100 μT까지의 자계 영역에서 우수한 선형특성과 540 V/T의 고감도를 갖으며, 약 8 mW의 작은 소비전력이 측정되었다. 이런 특성은 연자성 코아가 폐자로를 형성하므로써 플럭스의 누설을 감소시켰기 때문이다. 제작된 자기 센서의 크기는 7.3×5.7 mm^{2}이며, 이런 초소형 센서는 50 μT 이하의 미약자계를 간단히 검출할 수 있고, 특히 초소형, 저전력화, 저생산비가 가능하므로 절대방향 정보를 필요로 하는 휴대용 navigation 시스템, telematics, VR 게임기 등 다양한 응용분야에 적용할 수 있다.

참고문헌

1. H. Thomas, "Direction responsive system", US Patent No. 2016977 (1935).
2. F. Primdahl, "The fluxgate mechanism", IEEE Trans. on Magnetics, 6, 376 (1970).
3. F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer", J. Phys. E: Sci. Instrum., 12, 241 (1979).
4. P. Ripka, "Review of fluxgate sensors", Sensors and Actuators, A33, 129 (1992).
5. T. Seitz, "Fluxgate sensor in planar microtechnology", Sensors and Actuators, A21-A23, 799 (1990).
6. S. Kawahito, Y. Sasaki, M. Ashiki and T. Nakamura, "Micromachined Solenoids for Highly Sensitive Magnetic Sensor", The 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, 1077 (1991).
7. S. Kawahito, H. Sato, M. Sutoh and Y. Tadokoro, "High-resolution micro fluxgate sensing elements using closely coupled coil structures", Sensors and Actuators, A54, 612 (1996).
8. R. Gottfried-Gottfried, W. Budde, R. Jahne, H. Kuck, B. Saue r, S. Ulbricht and U. Wende, "A miniaturized magnetic field sensor system consisting of a planar fluxgate sensor and a CMOS readout circuitry", Transducers95, Eurosensor IX, 229 (1995).
9. S. Choi, S. Kawahito, K. Takahashi, Y. Matsumato, M. Ishida and Y. Tadokoro, "A planar fluxgate magnetic sensor for on-chip integration", Sensors and Materials, 9(4), 241 (1997)
10. T. Liakopoulos and C. Ahn, "A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils", Sensors and Actuators, 77, 66 (1999).
11. P. Ripka, S. Choi, S. Kawahito, A. Tipek and M. Ishida, "Micro-fluxgate sensor with double-sided core", EMSA 2000 (Third European Conference on Magnetic Sensors and Actuators), Dresden, 167 (2000).
12. O. Dezuari, E. Belloy, S. Gilbert and M. Gijs, "New hybrid technology for planar fluxgate sensor fabrication", IEEE Trans. on Magnetics, 35(4), 2111 (1999).
13. O. Dezuari, E. Belloy, S. Gilbert and M. Gijs, "Printed circuit board integrated fluxgate sensor", Sensors and Actuators, 81, 200 (2000).
14. Y. Tamura, "Weak-field magnetic field sensor having etched circuit coils", US Patent No. 5936403A (1999).