

초소형 박막 인덕터 제작을 위한 레이저 미세가공 기술 개발

안성준

선문대학교 전자정보통신공학부 정보통신전공
충남 아산시 탕정면 갈산리 100, 336-708

안승준* · 김대욱 · 김호섭

선문대학교 자연과학부 신소재과학과/차세대반도체기술연구소
충남 아산시 탕정면 갈산리 100, 336-708

김철기

충남대학교 공과대학 신소재공학부
대전시 유성구 구성동 100, 336-708

(2003년 3월 24일 받음, 2003년 5월 10일 최종수정본 받음)

스퍼터링 방법으로 FM/M/FM의 다층박막을 증착한 다음 초소형 박막 인덕터를 제작하기 위하여 반도체 공정을 대체할 수 있는 레이저 미세가공 기술을 개발하였다. TEM₀₀ 모드로 발진하는 CW Nd:YAG 레이저를 active Q-switching 하여 펄스폭이 200 ns인 극 초단 레이저 펄스를 얻었다. 레이저 미세가공 조건을 반복을 5 kHz, 펄스 당 에너지 5 mJ/pulse로 최적화 하여 분해능이 20 μm인 line patterning을 얻었다.

주제어 : 레이저 미세가공, 초소형 박막 인덕터, active Q-switched Nd:YAG 레이저, FM/M/FM 다층박막, line patterning

I. 서 론

최근 반도체 산업이 급속히 발전하고 소자가 고 집적화 됨에 따라 퍼스컴, 평판 디스플레이, 비디오 기기 등과 같은 휴대형 전자기기들은 소형화, 경량화, 박막화가 급격히 추진되고 있으며 이와 더불어 능동소자에 전원을 공급하고 전기신호를 변조, 증폭시키는 인덕터와 같은 수동소자들에 대한 소형화가 요구되고 있다. 초소형 박막 수동소자는 1960년대에 처음 제안되었지만 1990년대에 이르러 많은 연구자들[1-5]이 관심을 가지게 되었으며 DRAM과 같은 반도체 소자산업이 발전됨에 따라 반도체 소자제조의 기본 공정인 lithography, etching, cleaning, thin film 등의 단위공정을 이용하여 연구가 활발히 진행되고 있다. 수동소자 중의 하나인 인덕터는 평면코일, 자성박막층, 그리고 절연층으로 구성되는데, 일반적으로 이러한 박막들은 부착력이 우수한 스퍼터링 방법으로 증착한다[6].

초소형 박막 인덕터는 lithography, etching, cleaning 등과 같은 단위공정을 도입하여 증착된 박막을 수~수십 μm의 분해능으로 미세 patterning하여 제작한다. 뿐만 아니라 FM(ferromagnetic)/M(metal)/FM(ferromagnetic)과 같은 다층박막의 경우, 각 layer 마다 위에서 언급한 단위공정들을 반복해

서(Fig. 1 참조) 수행해야 한다. 그러나 레이저 미세가공(micro-machining) 기술을 이용하는 경우, FM/M/FM의 다층박막을 한번의 공정으로 patterning을 할 수 있기 때문에 인덕터 제작에 있어서 공정을 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있다.

레이저 미세가공의 원리는 레이저 빔을 가공물질의 표면에 집중시키면 레이저 빔의 에너지가 가공물질에 흡수되어 여기 상태의 전자들을 형성하고 여기된 전자들이 10⁻¹¹~10⁻¹³ s의 짧은 시간동안 다른 전자들과의 충돌에 의하여 열에너지로 변환된다. 이렇게 흡수된 열에너지가 물질의 용융점(melting point)이나 기화점(vaporization point)보다 클 때, 상(phase)변화가 일어나 가공물질이 녹거나 ablation된다[7]. 레이저를 이용하여 박막이나 소재를 가공할 경우 반도체 공정을 이용하는 방법에 비해서 공정의 자동화가 용이하고, 공구의 소모가 없으며, 가공시간이 짧아서 단단하고 열에 의한 변형이 쉬운 물질을 쉽게 가공할 수 있는 장점이 있다[8]. 특히 Si₃N₄ 박막, 실리콘, 세라믹 등과 같이 단단하고 견고한 물질을 가공할 때 stress를 주는 문제가 발생하지 않으며, 가공물질과 직접 접촉하지 않으므로 가공과정에서 일어나는 오염문제를 피할 수 있다. 또 펄스형 레이저를 사용할 경우 열원(heat source)의 펄스폭이 짧아서 열에 민감한 element를 보호할 수 있으며 가공할 때 에너지가 전달되는 부분이 매우 작기 때문에 가공물질의 distortion이나 shrink를 방지할 수 있는 등 많은 장점들을 가지고 있다[9, 10].

*Tel: (041)530-2261, E-mail: sjan@sunmoon.ac.kr

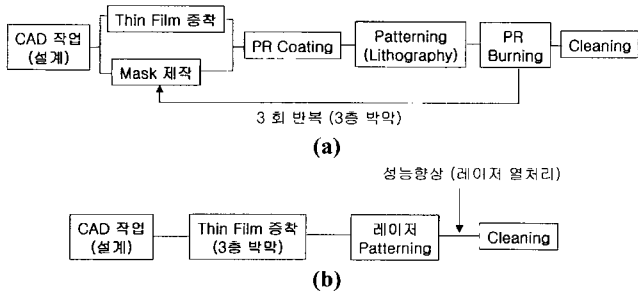


Fig. 1. Line patterning process for FM/M/FM thin film using the semiconductor fabrication technology (a) and laser micro-machining technology (b).

레이저를 이용한 미세가공에는 파장이 10.6 μm인 CO₂ 레이저와 파장이 1.06 μm인 Nd:YAG(Nd³⁺ doped yttrium aluminum garnet) 레이저가 많이 이용되는데, 세라믹은 ~10 μm의 파장영역에서 강한 흡수 분광선(spectrum)을 가지기 때문에 세라믹을 가공하기 위해서는 CO₂ 레이저가 Nd:YAG 레이저보다 더 적절하다. 반면 실리콘과 같이 ~1 μm의 파장영역에서 강한 흡수 분광선을 가지는 물질의 경우, CO₂ 레이저보다 오히려 Nd:YAG 레이저가 더 유용하다[11]. 그러나 가공 sample의 aspect ratio가 클 경우에는 세라믹이나 Mo과 같은 금속의 경우에도 레이저 빔에 대한 흡수도는 떨어지지만 파장이 짧고 반복율 특성이 우수한 Nd:YAG 레이저가 더 유리하다.

따라서 본 연구에서는 스퍼터링 방법으로 FM/M/FM의 다층박막을 증착한 다음, 레이저 미세가공 기술을 이용하여 초소형 박막 인덕터를 제작할 수 있는 선폭이 20 μm인 line patterning을 수행함으로써 레이저에 의한 새로운 patterning 기술을 확보하였다.

II. 실험 및 실험방법

본 실험에 사용한 FM/M/FM의 다층박막은 실리콘 웨이퍼 위에 CoNbZr(2 μm)/Cu(10 μm)/CoNbZr(2 μm)의 박막을 차례대로 스퍼터링 하여 증착하였다. 레이저를 이용한 미세가공에서 가장 중요한 인자 중의 하나는 레이저의 펄스폭과 에너지이다. 레이저의 펄스폭이 상대적으로 길(~수 백 μs 이상) 경우, 가공부위(spot)에 집속된 레이저의 에너지가 가공될 부분의 인접 영역까지 확산되어 가공부위의 가장자리 영역에 열변형력(thermal stress)을 발생시킨다. 확산된 열에 의한 열변형력의 접선(tangential)성분는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha E}{r^2} \left(\int_a^r Tr dr - Tr^2 \right) \quad (1)$$

여기서 α는 선형 열팽창계수, E는 Young's modulus, 그리고 a는 집속된 레이저 빔의 반경이다[8]. 반면에 펄스폭이 짧은

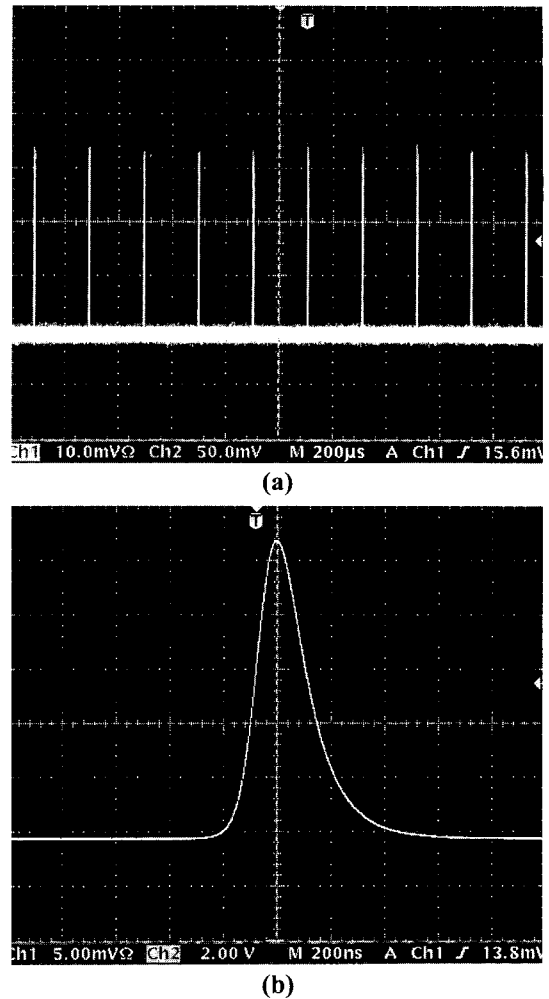


Fig. 2. The pulse train (a) and the pulse width (b) of the active Q-switched Nd:YAG laser.

레이저 빔의 경우에는 빛 에너지가 물체에 조사되는 시간이 짧기 때문에 긴 펄스보다 가공부위로부터의 열확산 길이가 짧게 되며 상대적으로 낮은 열변형력을 주게 된다[12]. 열변형력의 크기는 온도분포에 의존하므로 레이저를 이용한 박막의 바람직한 가공조건은 주어진 가공물질의 덩어리를 제거할 수 있는 최소시간 동안 충분히 높은 레이저 빔 강도를 유지해야 한다. 그러므로 레이저 가공의 quality를 향상시키기 위해서는 펄스폭이 짧은 고효율 레이저가 필요하다.

광원으로 실험에 사용된 레이저는 최대 출력이 25 W인 (주) Laser Physics사의 diode pumped CW(continuous wave) Nd:YAG 레이저이다. 본 연구에서는 가공부위에 대한 열확산 효과를 줄이고 펄스폭이 짧은 고효율의 레이저 빔을 얻기 위하여 TEM₀₀ 모드로 발진하는 CW Nd:YAG 레이저의 공진기에 EO(electro optic) modulator를 삽입하여 최대 반복율이 5 kHz가 되도록 active Q-switching 하였다. Active Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스폭은 ~200 ns이며 peak power는 ~25

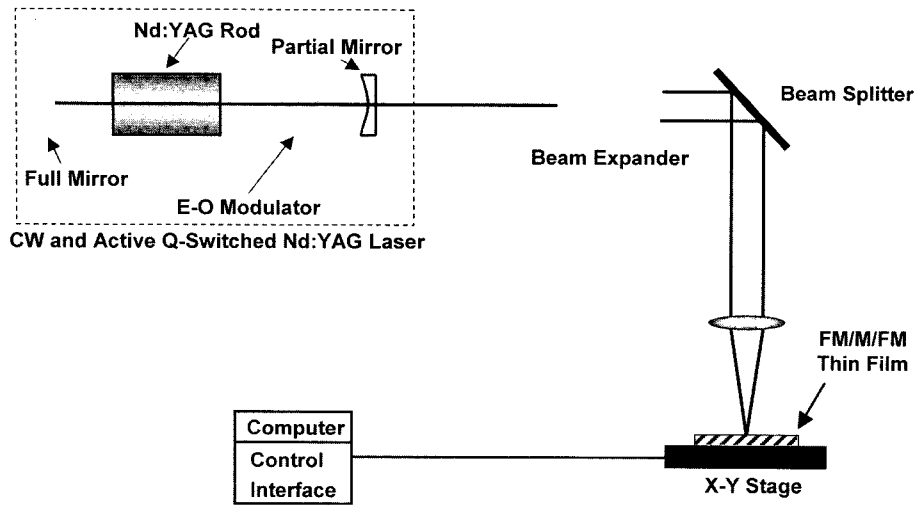


Fig. 3. Schematic diagram of the laser micro-machining experimental set-up.

kW까지의 출력을 얻을 수 있었다. Fig. 2는 active Q-switched Nd:YAG 레이저의 레이저 펄스열(a)과 레이저의 펄스폭(b)을 Tektronix사의 TDS 3012 digital phosphor oscilloscope를 이용하여 관찰한 사진이다.

Fig. 3은 스퍼터링 방법으로 증착된 다층박막을 레이저 미세가공하기 위한 실험장치도이다. 다층박막에 대한 가공조건을 최적화하기 위하여 에너지를 1~5 mJ/pulse(반복율을 5 kHz로 동작)까지 변화시키며 modulator(빔 확대기, aperture, pin-hole 등)를 사용하여 레이저 빔의 quality를 개선하였다. Active Q-switched Nd:YAG 레이저 펄스를 배율이 10배인 빔 확대기를 사용하여 레이저 빔의 spot 크기를 확대하였다. 빔 단절기(beam splitter)와 프리즘을 사용하여 x-y stage 위에 놓여있는 가공물질에 레이저 빔을 정렬한 다음 초점거리가 5 cm인 볼록렌즈로 집속시켰다. 집속된 레이저 빔의 spot 크기는 직경이 5~10 μm, 펄스 당 에너지는 ~5 mJ이다.

III. 실험결과 및 토의

다층박막을 수~수십 μm의 미세한 선폭으로 가공하기 위해서는 열전도도, 녹는점, 끓는점 등과 같은 가공물질의 물성과 레이저 펄스폭, 빔 spot의 직경과 같은 레이저 인자들을 고려해야 한다. 레이저 빔과 실리콘이나 금속과 같은 물질들 사이의 상호작용에 있어서 레이저 빔의 강도가 $\sim 5.0 \times 10^{10}$ W/cm² 정도 이상이 되면 레이저빔은 금속이나 실리콘과 같은 가공물질을 녹이기보다 가공물질의 표면에 플라즈마를 형성하여 가공물질을 기화시키는 현상이 주된 현상으로 일어나게 된다. 강한 강도의 레이저 빔을 위하여 레이저 빔의 spot 크기를 가능한 작게 집속해야 한다[13]. 모드가 TEM₀₀인 레이저 빔의 강도분포를 Gaussian으로 가정할 때, 집속된 레이저 빔의

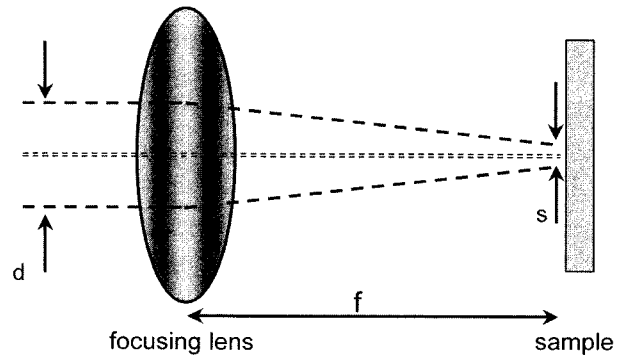


Fig. 4. The diameter of the focused laser beam at the sample surface (FM/M/FM thin film) with relation to the beam diameter at the focusing lens.

spot 크기, s 는 다음과 같이 표현된다.

$$s = \frac{\lambda f}{\pi d} \quad (2)$$

여기서 d 는 집속렌즈에 입사하는 레이저 빔의 직경, f 는 집속렌즈의 초점거리이고 λ 는 레이저 빔의 파장으로 1.06 μm이다. Fig. 4는 가공물질의 표면에 집속된 레이저 빔의 spot 크기와 집속렌즈에 입사한 레이저 빔의 직경사이의 상관관계를 보여준다. 따라서 집속된 레이저 빔의 spot 크기를 작게 하기 위해서는 집속렌즈에 입사하는 레이저 빔의 직경을 크게 해야 한다.

실리콘의 기화 잠열(Co, Nb, Zr과 거의 비슷함)은 1.06×10^7 J/kg[14]으로 Mo이나 Ta보다는 낮지만 다른 금속보다는 대부분 높다. 본 실험에서 사용한 레이저 빔(spot 크기는 직경이 5~10 μm, 펄스 당 에너지는 ~5 mJ)의 power 밀도 영역은 $1.0 \times 10^{11} \sim 1.0 \times 10^{12}$ W/cm²으로 실리콘이나 금속에 대한 기화 잠열을 고려해 볼 때, 본 실험의 power 밀도 영역

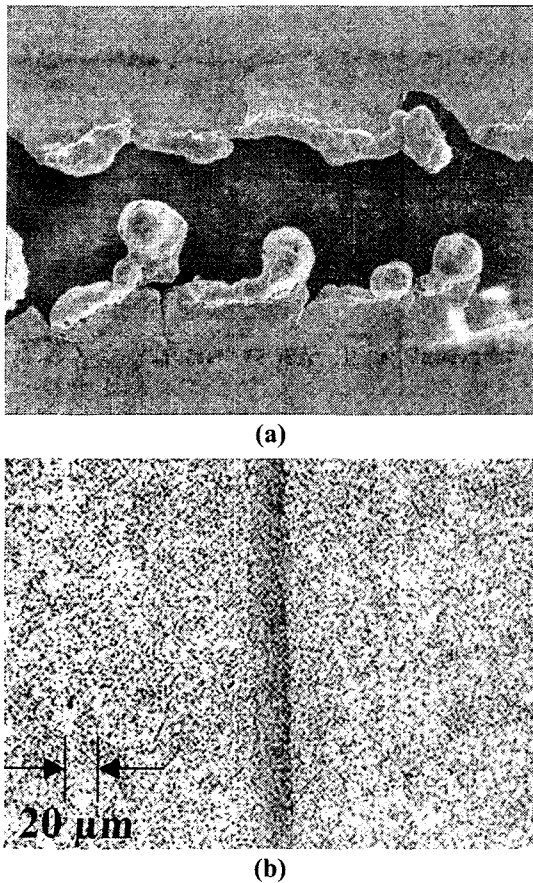


Fig. 5. Scanning electron micrographs of the line patterning in FM/M/FM thin film using the CW Nd:YAG laser (a) and active Q-switched Nd:YAG laser (b).

에서는 시료의 표면이 용융(melting)보다 기화현상이 주된 상호작용으로 작용하게 됨으로 Q-switching을 하지 않은 CW 레이저를 사용하여 line patterning을 한 경우보다 가공부위가 훨씬 정교하게 된다.

Fig. 5(a)는 FM/M/FM의 다층박막을 정밀도 0.1 μm, 1 m/s의 속도로 움직이는 x-y stage 위에 장착한 다음, Q-switching을 하지 않은 CW Nd:YAG 레이저(평균출력이 20 W로 동작)를 사용하여 line patterning(선폭 : ~60 μm)을 한 것인데 line의 가공부위가 용융되어 제거된 것을 볼 수 있다. 이것은 레이저가 CW 모드로 동작할 경우, 짧은 펄스를 방출하는 active Q-switched Nd:YAG 레이저와 달리, 레이저 에너지가 연속적으로 가공물질에 공급되지만 가공물질의 표면에 형성된 레이저 빔의 power 밀도 영역이 ~5.0×10¹⁰ W/cm² 보다 훨씬 낮아져 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용은 기화현상보다 용융현상이 우세하게 된다. CW로 발진하는 레이저의 경우, power 밀도가 아주 낮기 때문에 레이저 미세가공의 seed를 형성하기 위하여 다층박막의 위층에 polymer를 수 μm 도포하여 박막으로의 에너지 흡수율을 증가시켰다.

반면에 Fig. 5(b)는 EO 변조기를 공진기에 삽입하여 active Q-switching한 레이저(반복율 5 kHz, 평균출력 20 W)를 이용하여 다층박막을 line patterning한 것인데 (a)의 경우보다 line patterning의 가장자리가 정교하고 용융된 흔적이 훨씬 적음을 알 수 있다. 레이저를 active Q-switching하게 되면 레이저의 펄스폭이 ~200 ns인 극초단 펄스를 얻을 수 있다. 이 경우에 반복율이 5 kHz, 평균 power가 20 W가 되도록 레이저를 동작시키면 가공물질의 표면에 형성된 레이저 빔의 power 밀도 영역이 ~5.0×10¹⁰ W/cm² 보다 높아지게 되므로 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용은 용융현상보다 기화현상이 우세하게 된다. 그리고 레이저 미세가공의 품질을 향상시키기 위하여 레이저의 공간분포는 레이저가 CW로 발진할 때부터 TEM₀₀ 모드만 선택하였다.

본 연구에서는 5 kHz로 발진하는 active Q-switched Nd:YAG 레이저를 이용하여 레이저 미세가공 조건을 최적화한 다음, 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 FM/M/FM의 다층박막을 레이저 미세가공 하여 초소형 박막 인덕터를 제작할 수 있는 선폭이 20 μm인 line patterning을 수행하였다. 레이저에 의한 미세가공은 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용이 용융작용보다 기화작용이 더 우세할 경우 가공부위가 더욱 정교하게 되므로 레이저의 펄스폭이 짧은 mode-locked 레이저(펄스폭이 ~100 ps)나 CPA(chirped-pulse amplification) 기술[15, 16]에 의한 수 백 fs의 레이저 펄스를 레이저 미세가공의 광원으로 사용한다면 선폭의 분해능이 m인 미세한 line patterning도 가공이 가능할 것으로 생각되며, 반응시간이 짧기 때문에 substrate의 손상을 최소화시킬 수 있으므로 실리콘 웨이퍼 위에 식각되어 있는 다이오드, 트랜지스터, 축전기 등과 같은 개별소자들을 전기적으로 분리시키는데 유용한 tool로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

최근 반도체 산업이 발전됨에 따라 thin film, lithography, etching, cleaning 등과 같은 반도체 단위공정을 사용하면 분해능이 ~0.1 μm 되는 정교한 line patterning을 얻을 수 있다. 그러나 반도체 장비가 고가이기 때문에 제조 단가가 비싸고 공정이 복잡한 단점이 있다. 반면에 레이저를 이용한 미세가공 방법은 분해능은 떨어지지만 제조 단가가 싸고 공정이 단순한 장점이 있다. 레이저에 의한 미세가공은 가공될 물질과 레이저 빔과의 상호작용이 용융현상보다 기화현상이 더 우세할 경우 가공부위가 더욱 정교하게 됨을 알았다.

본 연구에서는 초소형 박막 인덕터를 FM/M/FM의 다층박막을 레이저 미세가공하기 위하여 TEM₀₀ 모드로 발진하는 CW Nd:YAG 레이저를 active Q-switching 하였다. Active

Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스폭은 ~200 ns이고 펄스 당 에너지를 ~5 mJ, 빔의 spot 직경이 5~10 μm가 되도록 정렬하여 레이저를 동작하였을 때 $1.0 \times 10^{11} \sim 1.0 \times 10^{12}$ W/cm²의 레이저 빔 강도를 얻을 수 있었다. 실리콘보다 용융점과 기화점이 낮은 물질들을 가공할 경우에, 이와 같은 조건에서는 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용시 용융현상보다 기화현상이 더 우세하게 된다. 본 연구에서는 위에 언급된 기화현상이 우세한 가공조건으로 active Q-switched Nd:YAG 레이저를 5 kHz의 반복율로 동작시킨 다음 스퍼터링 방법으로 증착된 FM/M/FM의 다층박막을 레이저 미세가공 하여 초소형 박막 인덕터를 제작할 수 있는 선평이 20 μm인 line을 patterning 하였다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 선문대학교 교내학술연구비 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

[1] 이창호, 신동훈, 남승의, 김형준, 한국자기학회지, **8**, 241 (1998).
 [2] 김현식, 송재성, 오영우, 전기전자재료학회지, **10**, 813 (1997).

[3] T. Saito, K. Tsutsui, S. Yahagi, *IEEE. Trans. on Magnetics*, **35**, 3187 (1999).
 [4] J. M. Lopez-Villegas, J. Samitier, C. Cane, P. Losantos, and J. Bausells, *IEEE. Trans. on Microwave Theory and Tech.*, **48**, 76 (2000).
 [5] M. Park, C. H. Kim, C. S. Kim, M. Y. Park, S. D. Kim, Y. S. Youn, and H. K. Yu, *IEEE. Microwave and Guided Wave Lett.*, **9**, 514 (1999).
 [6] H. S. Kim, Y. W. Oh, J. S. Song, B. K. Min, *J. of Mag. and Mag. Mat.*, **177-181**, 907 (1998).
 [7] X. Liu, D. Du, and G. Mourou, *IEEE. J. of Quantum Electronics*, **QE-33**, 1706 (1997).
 [8] S. S. Charschan, *Laser in Industry*, Van Nostrand Reinhold Company (1972).
 [9] H. Beyer, W. Ross, R. Rudolph, A. Michaelis, J. Uhlenbusch, and W. Viol, *J. Appl. Phys.*, **70**, 75 (1991).
 [10] V. Oliveira and R. Vilar, *J. Mater. Res.*, **12**, 3206 (1997).
 [11] Kunihiko Washio, *SPIE*, **3618**, 230 (1999).
 [12] U. C. Paek and F. P. Gagliano, *IEEE. J. of Quantum Electronics*, **QE-8**, 112 (1972).
 [13] D. Du, X. Liu, G. Korn, J. Squier, and G. Mourou, *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 3071 (1994).
 [14] J. F. Ready, *Industrial Application of Lasers*, Academic Press (1997).
 [15] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
 [16] S. J. Ahn and H. W. Kwak, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, L789 (1998).

Laser Micro-machining Technology for Fabrication of the Micro Thin-Film Inductors

Seong Joon Ahn*

*Division of Electronics, I&C Engineering, Sunmoon University, 100, Kalsan-ri,
Tangeong-myeon, Asan-si, Chungnam 336-708, Korea*

Seungjoon Ahn, Dae-Wook Kim and Ho Seob Kim

*Department of Physics/Center for Next Generation Semiconductor Technology,
Sunmoon University, 100, Kalsan-ri, Tangeong-myeon, Asan-si, Chungnam 336-708, Korea*

Cheol Gi Kim

*Division of New Materials Engineering, Chung-nam National University,
220, Gung-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-764, Korea*

(Received 24 March 2003, in final form 10 May 2003)

We have developed laser micro-machining technology for fabrication of the micro thin-film inductors. After the thin layers of FM/M/FM films were coated to the silicon substrate by using the conventional sputtering method, the new laser machining was applied to the patterning process that used to be carried out by the semiconductor lithography procedure. A CW Nd:YAG laser operating in TEM₀₀ mode was actively Q-switched to obtain the very short pulse of 200 ns. The laser micro-machining process with pulse energy and repetition rate have been optimized as 5 mJ/pulse and 5 kHz, respectively, to obtain the line resolution as fine as 20 μm.

Key words : Laser micro-machining, Micro thin-film inductors Active Q-switched Nd:YAG laser, FM/M/FM multi-layer thin film Line patterning