

고정밀 레이저 가공 기술을 이용한 PRT 제작 및 특성 분석

Fabrication and Analysis of Characteristics of PRT using High-fine Laser Trimming Technology

노상수*, 서정환*, 정귀상**, 김광호***

(S. S. Noh*, J. H. Seo*, G. S. Chung**, and K. H. Kim***)

Abstract

In this paper, we fabricated PRT(platinum resistance thermometers) with the trimming technology using high-fine laser system. U.V.(wavelength : 355nm) laser was mainly used for adjusting Pt thin films resistors to 100Ω at 0°C. Internationally, the accepted A-class tolerance of temperature sensor is ±0.06Ω at 0°C according to DIN EN 60751. The width of trimmed lines was about 10μm and the best trimming conditions of Pt thin films were power : 37mW, frequency : 200Hz and bite size : 1.5μm. And 96 resistors, fabricated by photolithography and etching process, have 79~90Ω and 91~102Ω as the proportion of 42.7% and 57.3%, respectively. As result of setting Pt thin films resistors to the target value(109.73Ω at 25°C), 82.3% of all resistors had the tolerance within ±0.03Ω and the others(17.7%) were within ±0.06Ω of A-class tolerance. The PRTs which were fabricated in this research had excellent characteristics as follows ; high accuracy, international standard TCR(temperature coefficient of resistance) value, long-term stability, wide temperature range, good linearity and repeatability, rapid response time, etc.

Key Words : PRT, U.V. Laser, Trimming technology, Photolithography, TCR

1. 서론

전자부품의 초소형화 추세에 따라 레이저는 전통적인 마이크로 제조기술의 한계를 해결할 수 있는 도구로 그 중요성이 계속 증가하고 있다[1-3]. 특히, 기능성 막의 trimming, ablating, drilling 그리고 일명 "micromachining" 기술을 이용한 microelectronics 제품들에 대한 레이저의 이용은

꾸준히 증가하고 있다. 물질을 선택적인 파장을 이용하여 원하는 형태 및 균일한 강도로 가공할 수 있는 레이저 가공기술은 제품의 질을 향상시켰을 뿐만 아니라 고신뢰성 및 고효율을 가능케 했다. 기존의 기계적 가공에 비해 아주 빠른 속도로 높은 에너지를 매우 좁고 국부적인 영역에 가할 수 있고 높은 유동성, 비접촉 특성 및 프로그램을 이용하여 원하는 형태의 가공이 쉽게 가능하기 때문에 마이크로 머시닝 분야에서 레이저가 효율적으로 이용될 수 있다. 그리고 새로운 공정기술을 개발함으로써 최근의 HIC (hybrid integrated circuits), DRAM (dynamic random access memories) 그리고 PWB (printed wiring boards) 같은 microelectronics에 이용되는 레이저 공정의 기술적인 진보가 이루어질 수 있었다[4,5]. 대부분의 이러한 발전들은 ND:YAG 레이

* : 대양전기(주) 부설기술연구소
(부산시 신평동 504,
Fax : 051-200-5249

Corresponding Author : nss003@hananet.net

** : 동서대학교 전자기계공학부

***: 부산대학교 무기재료공학부

2002년 6월 7일 접수, 2002년 8월 2일 1차 심사완료,
2002년 10월 24일 최종 심사완료

저 소스의 기본적인 파장을 이용함으로써 발전해 오고 있다. 과거에 레이저 가공장비의 설계자 및 제작자들은 그들의 시스템에 CO₂나 ND:YAG 레이저를 사용하였는데 CO₂ 레이저가 상대적으로 가격이 저렴함에도 불구하고 ND:YAG 레이저가 많이 이용되었다. 이는 Q-switched 모드로 동작하는 ND:YAG 레이저는 CO₂ 레이저에 비해 높은 power와 짧은 pulse의 특성을 갖고 있다. 따라서 소위 HAZ(heat affected zone)라는 가공시 kerf(trim path) 주위에 발생하는 과열영역 없이 가공이 가능한 장점이 있다[5-7].

본 연구에서는 국제 DIN 규격에 맞는 PRT 제작을 위해 1064 nm 파장을 갖는 적외선 레이저와 355 nm 파장을 갖는 자외선 레이저를 이용하였고 제작시 이용되는 레이저의 종류에 따른 제조 특성을 분석하였다. 또한, 제작된 PRT의 특성을 분석·평가하였다.

2. 실험

본 연구에 이용된 레이저는 1064nm 파장을 갖는 적외선 레이저와 355nm 파장을 갖는 자외선 레이저를 이용하였으며 주요 사양은 아래 표 1과 같다.

레이저를 이용한 백금박막의 저항체 가공은 항상습습(25℃, RH:45%)이 유지되는 공간에서 최대한 균일한 온도가 유지되는 조건하에서 이

루어 졌다. 백금은 온도센서에 자주 이용되는 물질로 온도에 상당히 민감하여 레이저 가공시 작은 온도 편차도 가공된 저항체의 오차로 존재하게 된다.

본 연구에 이용된 DC magnetron 스퍼터는 2" × 2" 기판이 동시에 24장 장착될 수 있는 batch-type으로 양산이 가능한 시스템이다. 기판의 cooling이 가능하고 기판의 loading과 unloading을 제외한 모든 기능이 자동화 되어있고 전체 한공정을 처리하는데 대략 5시간 정도 소요된다. 2" × 2" 기판내 증착 박막의 평탄도(uniformity)는 ±0.5% 이내이며 박막 증착에 이용되는 기판의 조도(roughness)는 3000Å 정도이다. 소자 제작후, 쉬운 기판 커팅을 위해 4×24로 scribing된 96%의 알루미늄 기판을 이용하였다.

그림 1은 사진공정기술로 제작된 백금박막 저항체 사진을 보여주고 있다. 2" × 2" 세라믹 기판에 제작된 저항체는 4×24로 총 96개가 형성되어 있으며 레이저 가공을 통해 일정한 저항값으로(0℃, 100Ω) 맞추기 위해 link-cut과 final-cut이 가능한 구조로 설계 및 제작되어 있다. link-cut과 final-cut을 이용하여 최대 45%의 저항을 상승시킬 수 있어 박막의 증착 및 저항체 형성에서 발생할 수 있는 각종 저항편차 문제를 해결할 수 있으며 레이저 성능만 충분하다면 100%가까운 수율을 올릴 수 있도록 설계되어 있다.

표 1. 레이저의 주요사양.

Table 1. Main specifications of laser.

Laser type	• Lamp pumped YAG	• Diode-pumped YAG
Wavelength	• 1064nm	• 355nm
Spot size	• 70 μ m 이상	• 10~12 μ m
R measurement	• 0 ~ 100M Ω • basic accuracy 0.02%	• 0 ~ 100M Ω • basic accuracy 0.01%
Matrix card	• Kelvin matrix, 24 point	• Kelvin matrix, 24 point
Step & Repeat handler system	• 2.5" × 2.5" travel • 10 μ m resolution	• 6" × 6" travel • 1 μ m resolution • automatic θ stage, $\pm 4^\circ$

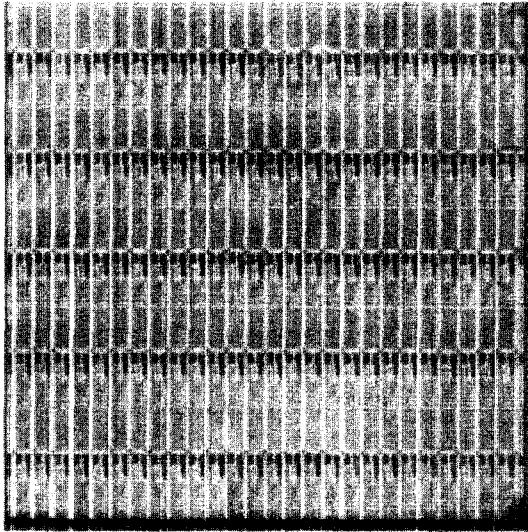


그림 1. 백금박막 저항체 사진.
Fig. 1. Photograph of Pt thin films resistor.

3. 결과 및 고찰

증착된 백금박막의 면저항 분포는 4-point probe를 이용하여 분석하였으며 그림2와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

증착에 이용된 스퍼터 시스템이 기판을 24장 동시에 장착하여 회전하면서 증착하는 방식으로 되어있어 증착시 회전축을 중심으로 원주 방향

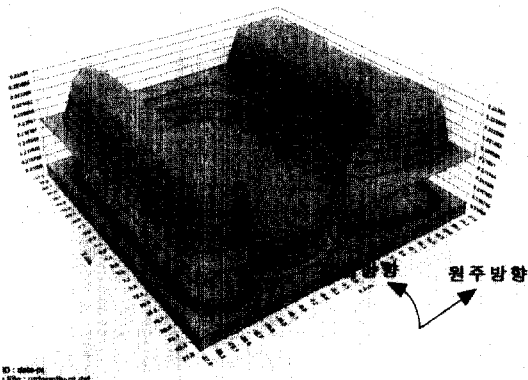


그림 2. 백금박막의 면저항 분포.
Fig. 2. Sheet resistance distribution of Pt thin films.

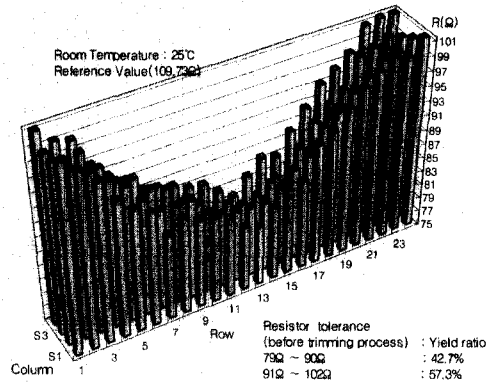


그림 3. 백금박막 저항체의 저항 분포.
Fig. 3. Resistance distribution of Pt thin films resistor.

으로는 $0.2179 \sim 0.2214 \Omega/\square$ 값으로 비교적 균일한 면저항 분포가 나타났으나 지름 방향으로는 $0.2079 \sim 0.2310 \Omega/\square$ 값으로 기판의 중앙에서 멀어질수록 면저항값이 상승하고 있음을 알 수 있다. 이는 24장의 기판이 공전성 회전(revolution) 하면서 증착되므로 원주방향으로는 증착 두께가 균일하게 분포하고 있으나 기판 자체에 자전성 회전(rotation) 기능이 없어 지름방향으로 증착박막의 두께 편차가 비교적 심한 것으로 나타났다. 면저항을 통한 두께편차 환산결과, 회전축을 중심으로 원주방향으로는 $\pm 0.7\%$ 이하로 나타났으나 지름방향으로는 $\pm 5\%$ 정도의 두께편차 특성을 보였다.

그림 3은 증착된 박막을 이용하여 사진식각공정 및 열처리공정을 거친 96개(4×24)의 저항체로 레이저 가공전 저항 분포를 보여주고 있다. 기판내 저항분포를 보면 그림 2에서 나타나는 면저항 및 두께편차 특성과 일치함을 알 수 있다.

전체 저항 편차에 따른 분포를 보면 71~90Ω과 91~102Ω이 각각 42.7%, 57.3%로 나타났다. 저항체로 제작된 후, 저항편차가 면저항 및 두께편차에 비해 커지게 되는 것은 사진식각공정시 백금박막의 난이한 패턴형성 특성과 열처리시 발생하는 오차에 인한 것으로 사료된다.

일반적으로 막의 레이저 가공에 이용되는 trimming의 종류에는 그림 4와 같이 Plunge cut, Double cut, L-cut, Serpentine cut, Scan

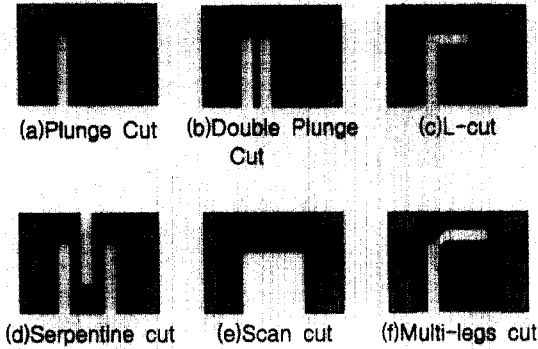


그림 4. 다양한 종류의 cut.
Fig. 4. Various types of cut.

cut 그리고 Multi-legs cut 등을 들 수 있다. 저항체의 정확한 가공을 위해서는 레이저 가공 변수 즉, 레이저 종류 및 power, bite size 그리고 가공 주파수 등이 매우 중요한 역할을 하게 된다[4].

본 연구에서 주로 plunge cut, double plunge cut 그리고 serpentine cut을 각각 link-cut 부분과 final-cut 부분에 이용하게 된다. 특히, final-cut 부분에 이용되는 serpentine cut은 0.01%이하의 정밀 저항 가공기술로 정밀계측기와 레이저 가공 시스템 사이에 5msec 이하의 실시간 통신을 이용되게 된다.

그림 5는 (a), (b) 1064nm 적외선 레이저와 (c), (d) 355nm 자외선 레이저를 이용하여 제작된 백금 저항체를 가공한 사진을 보여주고 있다. 그림 5(a), (b)에서 알 수 있듯이 적외선 레이저는 레이저의 kerf가 상당히 거칠어 가공선의 윤곽이 분명하지 않으며 가공시 HAZ가 상당히 심하게 발생했음을 알 수 있다. 이에 비해 그림 5(c), (d)에 나타나듯이 355nm 파장을 갖는 자외선 레이저의 가공 kerf는 선폭이 10um 정도로 상당히 예리하고 날카롭게 가공되었으며 적외선 레이저에서 볼 수 있는 HAZ 흔적이 거의 없음을 알 수 있다. 자외선 레이저는 적외선 레이저와 달리 물질을 순수한 열로 용융시켜 제거하지 않고 분자들의 화학적 결합을 파괴하여 제거함으로써 HAZ가 거의 없는 깨끗한 kerf를 얻을 수 있는 것이다.

백금박막을 이용한 PRT는 온도에 상당히 민감하며 선형적인 저항온도계수(TCR)를 갖는다. 현재, 국제적으로 통용되는 DIN EN 60751 규격에

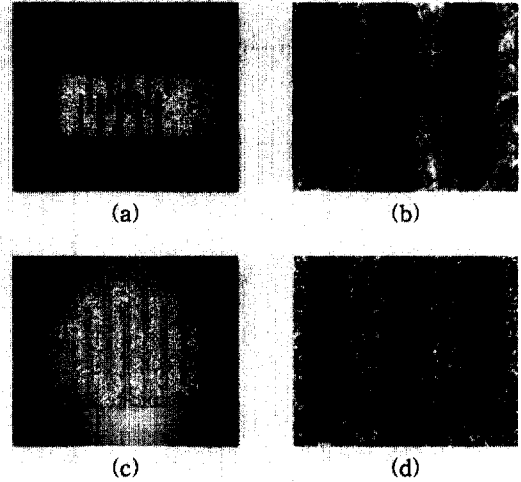


그림 5. (a), (b) 1064nm & (c), (d) 355nm 레이저를 이용한 저항체 가공 사진.
Fig. 5. Photographs of resistor trimmed by (a), (b) 1064nm & (c), (d)355nm laser.

의하면 온도센서의 저항 오차 규격이 아래 수식과 같이 정의되어 있다.

$$\text{Classification A : } \Delta t = \pm(0.15+0.002t)$$

$$\text{Classification B : } \Delta t = \pm(0.3+0.005t)$$

위의 수식에서 알 수 있듯이, 0°C A-class에 해당하는 0.15°C는 0°C에 100Ω인 PRT를 기준으로 0.06Ω이하에 해당하는 값이 된다. 실제적으로 이 정도의 고정밀 저항을 세팅하기 위해서는 고정밀 레이저, 정밀한 저항체 패턴의 설계 및 제작, 저항 세팅 환경의 균일성 그리고 그 외 여러 가지 핵심적인 제반기술이 동반수행 되어야 된다.

그림 6은 레이저를 이용한 미세저항 세팅시 가공횟수에 따른 저항체의 가공편차를 보여 주고 있다. 1064nm 파장의 적외선 레이저를 이용할 경우, 가공횟수가 증가함에 따라 세라믹기판이 받는 열에너지가 증가하여 세팅된 저항체의 오차가 증가함을 알 수 있다. 이는 적외선 레이저의 가공은 순수한 열에너지에 의해 이루어지기 때문에 나타나는 현상으로 가공시 발생하는 열에너지만큼 실제

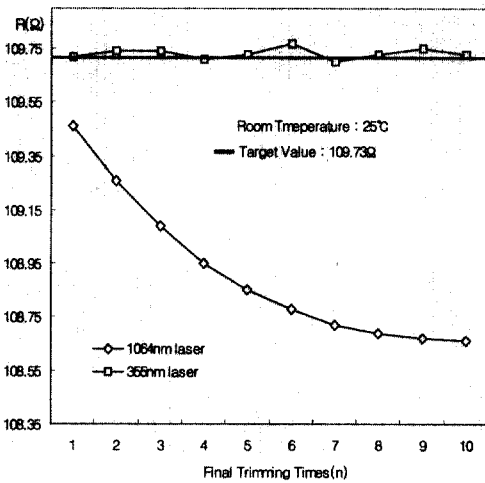


그림 6. 미세저항 세팅시 레이저 가공횟수에 따른 목표저항과의 오차 비교.

Fig. 6. Comparison of resistance tolerance with target resistance depending upon laser trimming frequency during final resistance setting.

로 가공되는 저항체는 목표저항치보다 작은 값으로 가공되는 것이다. 본 연구에서 이러한 가공오차 증가현상은 가공시 기판이 받아들이는 열에너지가 열전도 및 확산을 통해 외부와 열평형상태에 도달할 때까지 계속됨을 확인 할 수 있었다. 그러나 355nm 파장의 자외선 레이저를 이용할 경우, 가공 횟수에 상관없이 전체적으로 0.05% 정도의 저항편차가 생김을 알 수 있는데 이는 가공시 발생하는 열에너지와는 상관없는 오차로 레이저 가공시 기판주위의 온도 편차 및 제작된 저항체의 부분적인 patterning 에러에 의한 것으로 사료된다. 본 실험에서 0.06%이하의 고정밀 세팅을 요하는 PRT 제작시 적외선 레이저는 비효율적이며 자동화에 따른 고수율 생산이 불가능함을 확인할 수 있었다.

그림 7은 그림 3에서와 같이 백금박막 증착후 제작된 저항체를 355nm 파장의 자외선 레이저를 이용하여 주파수 : 200Hz 그리고 bite size : 7.5 μ m에서 power 37mW로 가공한 결과이다. 가공 목표 저항값은 맞추기 위해 실제 환경을 0 $^{\circ}$ C에 안정화시키는 것이 불가능하여 주위온도를 25 $^{\circ}$ C로 세팅시킨 후 가공하였다. 가공중에도 미세한 온도 변화에 따른 가공오차를 최소화하기 위해 100 Ω 값을 갖는 초정밀 백금박막 센서를 가공될 기판과

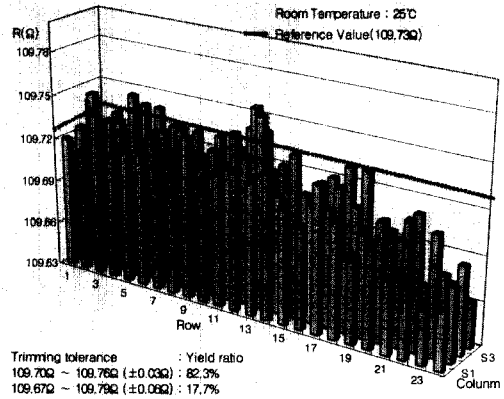


그림 7. 목표 저항치로 세팅된 저항체의 저항분포.

Fig. 7. Resistance distribution of resistors set to target value.

가능한 동일 위치에 장착하였다. 초정밀 백금박막 센서의 저항값을 목표값으로하여 2" x 2" 기판내의 96개(4x24) 저항체를 가공한 결과를 그림7에 도식화하였다.

25 $^{\circ}$ C에서 기준센서의 저항값은 109.73 Ω 을 나타내었다. 초정밀 백금박막 센서를 기준센서로 하여 제작된 백금박막 저항체의 저항분포는 전체적으로 균일하게 나타남을 알 수 있다. 세팅된 백금박막 저항체는 0 $^{\circ}$ C기준 $\pm 0.7^{\circ}$ C($\pm 0.03\Omega$)이내의 측정오차를 갖는 것이 82.3% 이상이었으며 나머지 17.7%도 모두 국제 DIN EN 60751 규격의 A-class 오차범위를 충분히 만족시킬 수 있었다. 그림 7을 보면 19~24행에 위치한 저항체들이 다른 부분에 위치한 저항체들에 비해 상대적으로 저항치가 작게 세팅되는 특성을 볼 수 있다. 이는 본 연구에 이용된 레이저 장비의 기판 장착부분의 온도가 균일하지 못한 현상으로 인해 비롯된 것으로 구조를 일부 변경함으로 쉽게 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

표 2는 355nm 파장의 자외선 레이저로 제작된 100 Ω PRT의 온도에 따른 저항변화를 나타내는 결과는 정확한 데이터를 얻기 위해 한국표준연구원에서 의뢰·분석하였다. 표 2에서 알 수 있듯이 TCR값이 3849.8ppm으로 DIN EN 60751 규격을 충분히 만족시키며 각 온도에 해당하는 저항오차역시 A-class를 충분히 만족시킴을 알 수 있다.

그림 8은 제작된 PRT의 장시간 신뢰성 실험 결

표 2. 온도에 따른 저항 변화.

Table 2. Variations of resistance according to temperature.

단위: 저항비	발광다이오드의 저항값 = 99.976Ω										
온도/°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1.00000	1.00391	1.00782	1.01173	1.01564	1.01954	1.02345	1.02735	1.03125	1.03515	1.03905
10	1.03905	1.04295	1.04685	1.05074	1.05464	1.05853	1.06242	1.06631	1.07020	1.07409	1.07797
20	1.07797	1.08186	1.08574	1.08963	1.09351	0.9739	1.09739	1.10127	1.10514	1.10902	1.11289
30	1.11289	1.11677	1.12064	1.12451	1.12838	1.13225	1.13611	1.13998	1.14384	1.14771	1.15157
40	1.15157	1.15543	1.15929	1.16314	1.16700	1.17086	1.17471	1.17856	1.18241	1.18626	1.19011
50	1.19011	1.19396	1.19780	1.20165	1.20549	1.20933	1.21317	1.21701	1.22085	1.22469	1.22852
60	1.22852	1.23236	1.23619	1.24002	1.24385	1.24768	1.25151	1.25534	1.25916	1.26298	1.26681
70	1.26681	1.27063	1.27445	1.27827	1.28208	1.28589	1.28971	1.29352	1.29734	1.30115	1.30496
80	1.30496	1.30877	1.31257	1.31638	1.32018	1.32399	1.32779	1.33159	1.33539	1.33918	1.34297
90	1.34297	1.34678	1.35057	1.35436	1.35815	1.36194	1.36573	1.36952	1.37330	1.37709	1.38087
100	1.38087	1.38465	1.38843	1.39221	1.39599	1.39977	1.40354	1.40732	1.41109	1.41486	1.41863
110	1.41863	1.42240	1.42617	1.42994	1.43370	1.43746	1.44123	1.44499	1.44875	1.45251	1.45626
120	1.45626	1.46002	1.46377	1.46753	1.47128	1.47503	1.47878	1.48253	1.48627	1.49002	1.49376
130	1.49376	1.49750	1.50125	1.50499	1.50873	1.51246	1.51620	1.51993	1.52367	1.52740	1.53113
140	1.53113	1.53486	1.53859	1.54232	1.54604	1.54977	1.55349	1.55721	1.56093	1.56465	1.56837
150	1.56837	1.57209	1.57580	1.57952	1.58323	1.58694	1.59065	1.59436	1.59807	1.60177	1.60548
160	1.60548	1.60918	1.61288	1.61658	1.62028	1.62398	1.62768	1.63138	1.63507	1.63876	1.64246
170	1.64246	1.64615	1.64983	1.65352	1.65721	1.66090	1.66458	1.66826	1.67194	1.67562	1.67930
180	1.67930	1.68298	1.68666	1.69033	1.69400	1.69767	1.70134	1.70501	1.70868	1.71235	1.71602
190	1.71602	1.71968	1.72333	1.72701	1.73067	1.73433	1.73799	1.74164	1.74530	1.74895	1.75260
200	1.75260	1.75626	1.75991	1.76355	1.76720	1.77085	1.77449	1.77814	1.78178	1.78542	1.78906
210	1.78906	1.79270	1.79634	1.79997	1.80361	1.80724	1.81087	1.81450	1.81813	1.82176	1.82538
220	1.82538	1.82901	1.83263	1.83626	1.83988	1.84350	1.84712	1.85074	1.85435	1.85797	1.86158
230	1.86158	1.86519	1.86880	1.87241	1.87602	1.87963	1.88324	1.88684	1.89044	1.89404	1.89764
240	1.89764	1.90124	1.90484	1.90844	1.91203	1.91563	1.91922	1.92281	1.92640	1.92999	1.93358

4. 결론

1064nm 파장을 갖는 적외선 레이저와 355nm 파장을 갖는 자외선 레이저를 이용하여 백금박막 저항체를 가공하여 0°C에 100Ω을 갖도록 세팅하였다. 355nm 파장의 자외선 레이저를 이용하여 저항체의 저항 세팅을 효과적으로 할 수 있었으나 1064nm 파장을 갖는 적외선 레이저는 가공시 발생하는 온도문제 때문에 효율 있는 고정밀 저항세팅이 불가능함을 확인할 수 있었다. 355nm 자외선 레이저는 power : 37mW, 주파수 : 200Hz 그리고 bite size : 7.5μm에서 1~1.5μm 두께의 백금박막을 가장 안전하게 가공할 수 있었다.

2" × 2" 세라믹 기판상에 제작된 96개(4×24) 백금박막 저항체를 사진식각공정으로 제작하였다. 제작후 열처리를 거친 후 96개 저항체의 저항편차는 71~90Ω과 91~102Ω이 각각 42.7%, 57.3%로 나타났다

초정밀 백금박막 센서를 기준으로 하여 백금박막 저항체들을 가공한 결과, 저항 분포는 전체적으로 균일한 특성을 나타내었다. 0°C, 100Ω으로 세팅된 백금박막 저항체는 0°C기준 ±0.07°C (±0.03Ω)이내의 측정오차를 갖는 것이 82.3% 이상이었으며 나머지 17.7%도 모두 국제 DIN EN 60751 규격의 A-class 오차범위를 충분히 만족시킬 수 있었다. 또한, 장기간 신뢰성 실험 결과 150°C, 1300시간이상 환경에서도 0.02%미만의 저항변화가 나타남을 알 수 있었다.

본 연구결과 얻어진 레이저 정밀 가공기술, 정밀한 저항체 패턴의 설계 및 제작 기술, 저항 세팅 환경의 균일성 그리고 그 외 일부의 기술적 보완이 있다면 100%에 가까운 수율은 물론 모든 가공 저항오차를 0.03% 이내로 제작이 가능함을 확인하였고 세계적으로 경쟁력 있는 PRT를 제작할 수 있었다.

참고 문헌

[1] J. J. Dubowski, "Laser technologies for manufacturing of advanced materials and devices", Appl. Phys. Lett., Vol. 74, No. 14, p. 1948, 1999.
 [2] Edward J. Swenson, Yunlong Sun, and Corey Dunsky, "Laser micromachining in microelectronics industry", Laser Beam

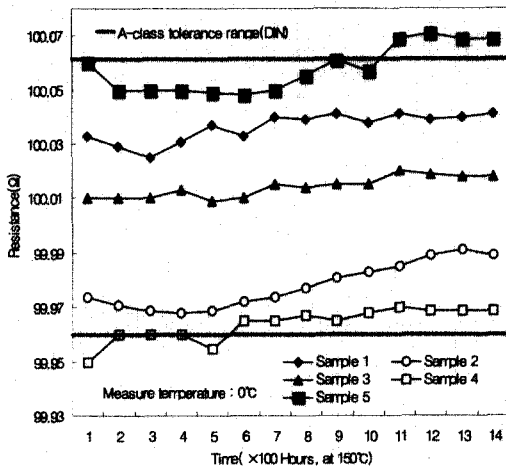


그림 8. 150°C에서 장기 신뢰성 실험.
 Fig. 8. Test of long terms stability at 150°C.

파이다. 150°C의 건조로에 100시간을 단위로 1300 시간동안 보관한 후, 얼음유조를 이용하여 0°C때의 저항을 측정한다 데이터이다. 150°C에서 1300시간 이상 지난 후에도 모든 PRT 센서들의 저항 변화가 0.02% 미만으로 나타났다. 일부 sample의 일부분에서 A-class의 저항오차범위를 벗어남을 볼 수 있는데 이는 초기 저항 세팅시 생긴 오차로 인한 것으로 충분히 해결할 수 있을 것으로 여겨진다.

Shaping, Proceedings of SPIE, Vol. 4095, p. 118, 2000.

- [3] Robert T. Smith and James D. Chlipala, "Laser programmable redundancy and yield improvement in 64K DRAM", IEEE J. of Solid-State Circuits, Vol. SC-16, No. 5, 1981.
- [4] M. Aslam and J. A. Mirza, "Thick film technology and its application in telecommunication system", COMSATS, Vol. 2, No. 4, 1997.
- [5] Jialiang Zhang and Yoshimichi Nagao, "Microstructure and temperature coefficient of resistance of platinum films", J. Appl. Phys. Vol. 36, p. 834, 1997.
- [6] Jan J. Dubowski, "Laser-induced microstructuring of photonic material semiconductors", First Int. Symp. on Laser PM, Proc. SPIE, Vol. 4088, p. 55, 2000.
- [7] L. F. Garfias and D. J. Siconolfi, "Reliability characterization of RuO₂ thin film resistors", Electrochemical Society Proceeding, Vol. 99-29, p. 217, 2000.
- [8] M. Meunier, "A novel laser trimming technique for microelectronics", Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing IV, Proc. of SPIE, Vol. 4274, p. 385, 2001.