

CMP 가공 메카니즘의 기계적 요인의 규명

신영재*, 이응숙*, 강재훈*

Indentification of the Mechanical Aspects of Material Removal Mechanims in CMP

Shin Young Jae*, Lee Eung Sug*, Kang Jae Hoon*



1. 서론

CMP(Chemical Mechanical Polishing)가 반도체의 공정에 사용된 것은 1950년대 초반이며 웨이퍼 소재의 가공을 위해서였다.^(1,2)

고밀도/성능의 칩이 요구됨에 따라 새로운 기술이 요구되고, 그 중 평탄화의 한 방법으로 기존에 사용되던 반응성 이온에칭법 대신 CMP기술이 IC 제조에 사용되기 시작한 것은 1980년대 중반 IBM에 의해서이며, 1980년대 후반에 새로운 반도체 공정으로서 소개되기 시작하였다.⁽³⁾

처음 발표된 논문은 CMP를 16Mb DRAM에 적용한 Davari의 논문이다.⁽⁴⁾ 초기의 CMP는 실리콘 산화막 등의 층간절연막의 평탄화에 사용되었지만, 이제는 IC 공정의 여러 곳에서 사용되고 있다. 그 예로, Shallow Trench Isolation, Damascene 공정, low-k 절연막과 구리 박막을 비롯하여 MEMS 부품의 마이크로 머시닝에까지 적용영역이

늘어나고 있다.^(5,6)

CMP 공정은 현재 반도체 제조공정의 평탄화 제조공정으로 자리를 잡고 있으며 고성능 고집적 소자의 생산을 위해 필요한 design rule이 엄격해질수록 CMP 공정의 응용 사례는 증가할 것으로 보인다.

CMP는 기존의 폴리싱 공정보다 더 화학적인 요소가 많으며 IC 칩 제조를 위해 평탄화기술로서 상용화된 기술이다. CMP Machine의 구성요소는 웨이퍼를 지지하는 Carrier, 폴리싱 플레이트 위의 폴리싱 패드, 가공 중 슬러리를 공급하는 슬러리 공급장치 등이다. 캐리어는 일반적으로 자전을 하면서 폴리싱 플레이트 위를 공전한다. 슬러리 공급장치는 패드의 표면에 연마제 슬러리를 공급한다. 캐리어의 안쪽에는 표면장력과 모세관현상을 이용하여 웨이퍼를 흡착하는 캐리어 필름이 있으며, 폴리싱 패드와 캐리어 필름은 폴리우레탄과 폴리에스터 같은 폴리머로 특별히 만들어져 있다.

* 한국기계연구원 자동화연구부

CMP 공정의 응용이 증가함에도 불구하고, 광역평탄화의 달성, 재료가공을 제어, 새로운 CMP 공정개발(슬러리, 패드의 대체 등)등은 IC 칩의 선폭이 적어지므로 매우 어려운 실정이다. 왜냐하면 공정을 적절히 나타낼 수 있는 모델이 없고, 가공프로세스를 모니터링할 수 있는 유력한 방법이 없고 기본적인 가공 매카니즘(화학 및 기계요소)에 대한 지식이 부족함과 동시에 패드와 슬러리 등의 소모품의 영향을 정확히 판단하기 힘들다.

CMP는 화학적인 요소와 기계적인 요소가 복합된 공정으로서, 기계적인 요소는 연마입자에 의한 제거가공이며, 화학적인 요소는 전기 화학적인 현상이다. 기계적인 요소는 폴리싱패드, 연마입자, 웨이퍼 표면과의 상호 물리적인 작용과 관계가 있다. 물리적인 관계는 주로 슬러리의 점성과 웨이퍼의 상대속도, 수직압력, 연마입자의 크기와 경도, 패드 성질(표면거칠기, 밀도, 압축성), IC 패턴 밀도, 웨이퍼 곡률 등에 의하여 좌우되는 윤활 특성에 의해 결정된다.

통상적인 연마가공의 경우 화학적 작용과 기계적 작용은 잘 알려져 있지 않다. 래핑의 경우 재료의 제거는 주로 연마 입자에 의한 긁힘, 압입, 스크래칭 등의 기계적인 현상에 좌우되고, 슬러리의 화학적 효과는 표면을 연화시킨다든지 재료 제거율을 높여준다든지 하는 것이다.

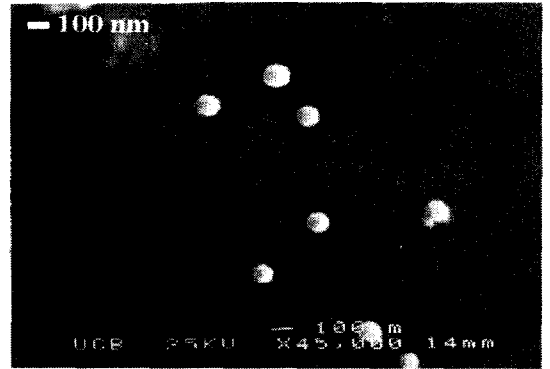
CMP에서 기계적인 요소로부터 화학적인 요소를 분리해내는 것은 상당히 어렵다. 화학적인 요소라는 것은 웨이퍼 표면의 기계적인 성질을 변화시키는 것이다. 기계적인 효과는 응력과 질량과 모멘텀의 보존, 파괴 등의 연속적인 개념으로 볼 수 있다. CMP에서의 화학적인 현상에 대한 연구는 다수 있지만, 화학적인 것과 기계적인 것을 아직까지 확실하게 구별하기가 어려운 상태이다.

Rajan⁽⁹⁹⁾는 재료의 성질이 취성에서 연성으로 변환됨으로서 CMP 후 표면이 평활화되는데 도움이 된다고 하였고, 또한 슬러리의 화학적인 효과에 의해 표면이 약화되고 연마입자에 의한 물리적인 제거과정이 복합됨으로서 가공능률이 향상될 것이라고 제안하였다.

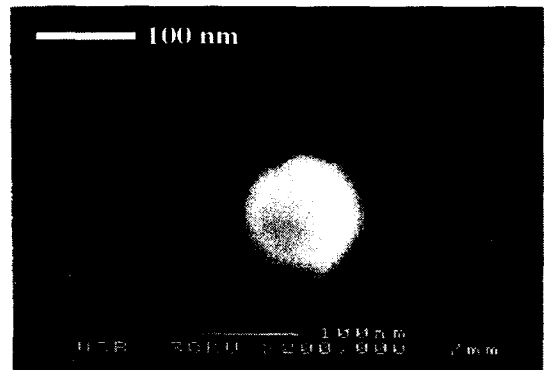
본 연구에서는 이러한 연마 입자와 화학적 효과와 기계적 효과를 조사하기 위해 상용의 슬러리를 chemical 과 abrasive로 분리하여 CMP 가공실험을 하였다. 즉, original 슬러리, chemical-less 슬러리, abrasive-less 슬러리 등의 세 가지를 사용하여 폴리싱 실험을 하였다.

2. 실험

2.1 슬러리의 준비



(a)



(b)

Fig. 1 Silica abrasives in Nalco2352 silicon polishing slurry, x45,000 (a) and x200,000 (b) magnification respectively

Abrasive-less 슬러리와 Chemical-less 슬러리는 Nalco2352 colloidal silica 폴리싱 슬러리(평균 입자 직경 70-90 nm, Fig. 1)로부터 분리하였다.

슬러리는 원심분리기로 분리한 후, 원심 분리 튜브의 위쪽의 화학용액은 피펫으로 조심스레 뽑아내고 밑에 가라앉은 나머지는 따로 완전히 말린다. Abrasive-less 용액 슬러리는 추출한 화학용액과 DI water를 1대 15로 섞어 만들고, chemical-less 슬러리는 말린 입자와 DI water를 1대 15.3(무계비)으로 섞어 만든다. 이 비율은 입자의 분산비율, 화학조성의 부피비율 등이 표준의 슬러리와 같은 조건으로 만들기 위한 비율이다. 확산을 돕기 위해 특별한 혼합물을 첨가하고 화학적 버퍼를 첨가하여 pH를 original 슬러리(10-11)과 같이 맞추었다. 이과정의 설명은 Fig. 2에 나타내었다.

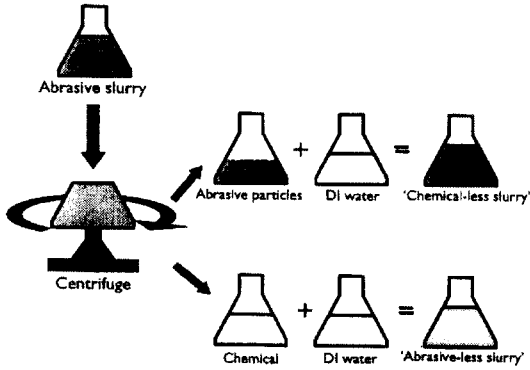


Fig. 2 Preparation of abrasive-less and chemical-less slurries

2.2 폴리싱

CMP는 Fig. 3과 같이 캐리어가 웨이퍼를 잡고 패드 위를 돌리는 방식이다.

본 실험에서는 Rodel IC60 패드를 사용하여 bare silicon wafer (p-type, <100> orientation)를 Fig. 4와 같은 실험실용의 CMP machine을 사용하였다. 슬러리는 마그네틱 교반기로 계속 저어가면서 30~120 ml/min씩 공급한다.

앞에서 말한 세 가지의 다른 슬러리를 사용하였다 1) 본래의 Nalco2352, 2) chemical-less, 3) abrasive-less 슬러리. 수직하중은 10kPa(1.46psi)이며, 가공량은 전자저울로 일정간격으로 무게를 측정하였다. 웨이퍼와 패드의 상대속도는 실험의 편차를 줄이기 위해 일정하게 유지하였으며, 가공량과 가공거리를 계산하였다.

SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 연마입자의 분리 및 DI Water희석에 따른 손상을 확인하였으

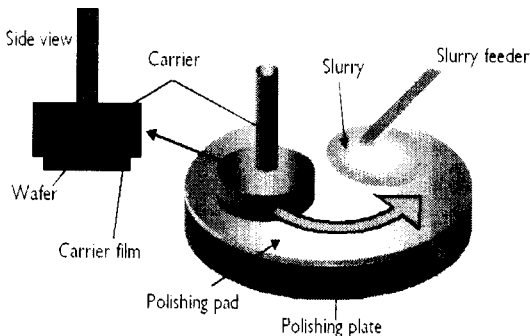


Fig. 3 Experimental setup

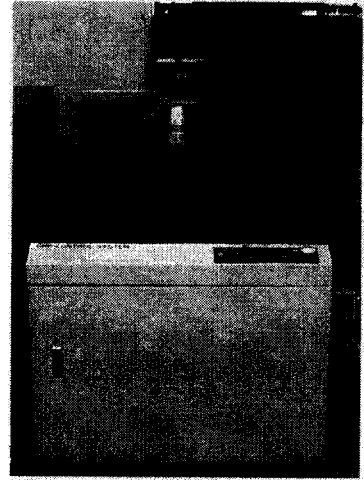


Fig. 4 CMP machine

며, 폴리싱 후 연마입자의 형상변화와 남아있는 슬러리의 조사도 병행하였다. 또한 웨이퍼의 표면도 가공전후에 각기 SEM으로 측정하였다.

마지막으로 CMP 전후의 웨이퍼 특성을 비교하기 위해 CVD로 산화막을 입힌 PSG(phosphorus silica glass)를 ILD1300 oxide로 폴리싱하였다.

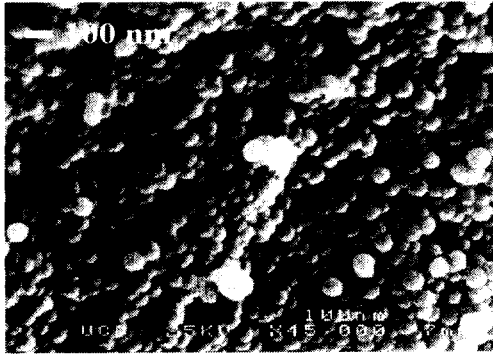
3. 실험결과

Chemical-less 슬러리를 준비하는데서 생겼는지 모르는 연마입자의 형상과 크기의 변화를 조사하기 위해 SEM으로 측정된 사진이다(Fig. 5).

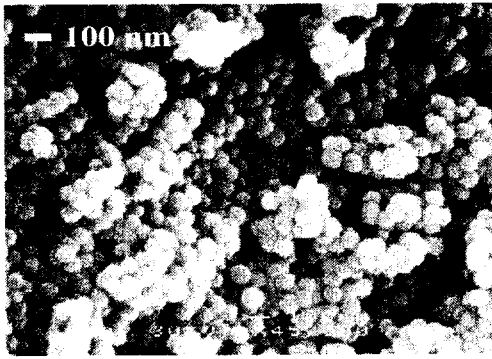
그림에서 보는바와 같이 입자의 크기 분포는 정량화하지 못했지만 원심분리와 DI water에 섞어 휘젓는 과정에서 눈에 떨 만큼의 형상변화가 없다. 따라서, 이 과정에서의 형상변화 등은 무시해도 큰 영향이 없을 것으로 생각된다.

Fig. 6은 웨이퍼와 패드의 상대속도의 차이에 따른 가공량(material removal per sliding distance Å/m)의 변화를 나타낸 것이다.

일반적인 CMP의 경우 낮은 상대속도의 영역에서 단위거리당 가공량은 패드와 웨이퍼의 마찰이 많은 관계로 상당히 크게 나타난다. 속도가 증가하면 웨이퍼와 패드의 접촉은 유동압 현상에 의해 감소하게 된다. 즉 가공량이 줄어들게 된다. 연마제가 없는 abrasive-less의 화학 폴리



(a)



(b)

Fig. 5 Silica abrasives sampled from the normal (a) and the chemical-less (b) slurries

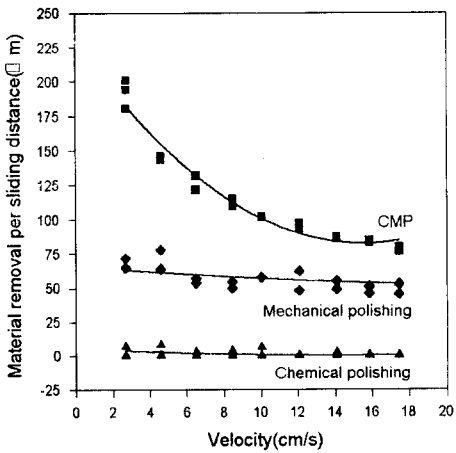
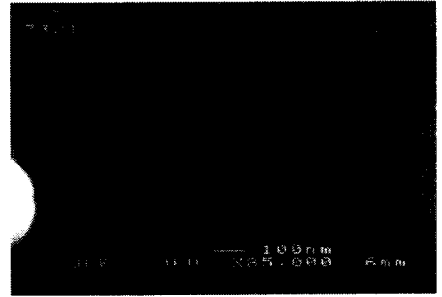
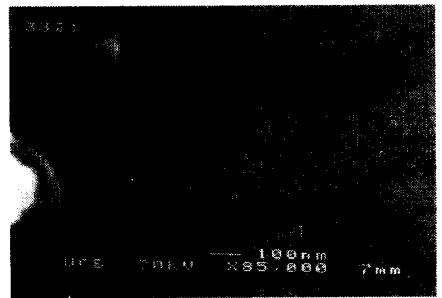


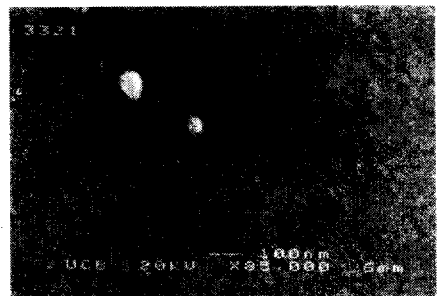
Fig. 6 Material removal per sliding distance of chemical, mechanical, and normal polishing



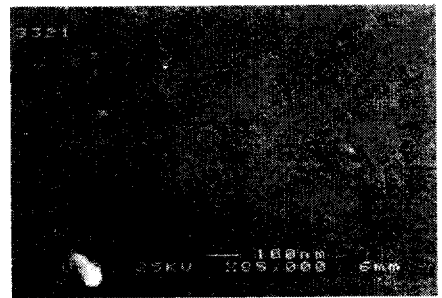
(a)



(b)

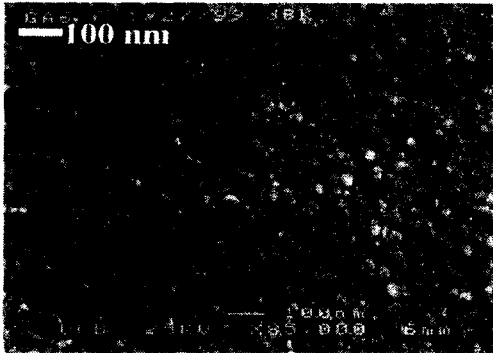


(c)

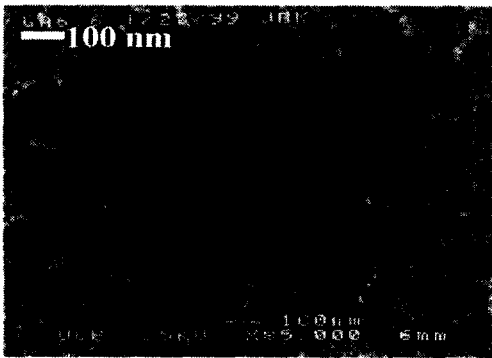


(d)

Fig. 7 SEM pictures of silicon wafer surface (a) before CMP, (b) after normal CMP, (c) after chemical polishing, and (d) after mechanical polishing.



(a)



(b)

Fig. 8 PSG oxide wafer surface before (a) and after (b) CMP

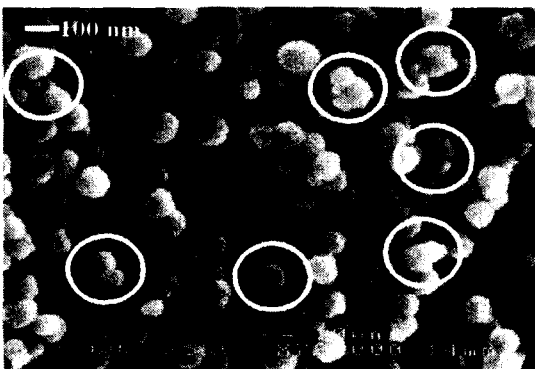


Fig. 9 Irregular silica abrasives (circled) sampled in the used silicon CMP slurry

싱의 경우 속도의 영향을 전혀 받지 않으며 가공량이 거의 영에 가깝다. chemical-less의 기계적인 폴리싱의 경우 가공량이 거의 표준 CMP에 비해 40-60% 수준이며 가공 속도가 증가하면 다소 줄어든다.

Fig. 6은 가공전후의 웨이퍼 표면의 SEM 사진이다.

Fig. 7에서 보듯이 각기 웨이퍼의 표면의 차이가 없다. 여기서 기계적인 폴리싱의 메카니즘은 CMP와 유사하며, 연마입자에 의한 마이크로 혹은 마이크로 이하의 스크래치가 전혀 나타나지 않았다. Fig. 8은 CVD로 입힌 산화막 웨이퍼의 표면의 사진으로 자세히 살펴보면 CMP 전후 표면의 상태가 현저히 바뀌었음을 알 수 있다. 스크래치 등은 보이지 않으나 CMP 후 표면이 평탄화 되었다.

Fig. 9는 CMP 후의 입자들의 사진으로 사용전의 연마 입자들은 크기와 모양이 일정하였으며 균일하게 분포되었으나, 사용후의 연마입자는 크기와 모양이 불균일하고 불규칙함을 알 수 있다. 이는 가공중 입자의 파쇄 혹은 웨이퍼 표면으로부터의 탈락물질의 부착 등에 의한 것으로 생각된다.

4. 고찰

산화막 CMP에서의 화학적인 작용의 설명으로 표면을 연하게 하여 연마입자로 하여금 쉽게 가공되게끔 한다는 보고가 있다. 여기서 화학적인 요소와 기계적인 요소의 영향을 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

실험에서 알 수 있듯이 전체 가공량은 단순히 화학적인 폴리싱과 기계적인 폴리싱의 합으로 주어지지 않는다는 사실이다. 웨이퍼 표면은 화학적인 작용에 의해 연성으로 변한 다음, 연마입자는 패드가 상대적으로 웨이퍼보다 부드러우므로 순간적으로 폴리싱패드에 박히게 된 상태에서 웨이퍼 표면을 원자/분자 단위로 표면을 긁고 지나가게 된다(Fig. 10). 즉, 두 가지의 요소가 복합되어 시너지 효과가 생기는 것으로 예측할 수 있다. 화학적인 폴리싱에는 공구인 연마재가 없으므로 거의 가공이 되지 않게 되고, 기계적인 폴리싱에는 표면을 연질화 시켜주지 못하므로 가공능률이 떨어진다.

일정한 압력에서 단위길이당 가공량이 줄어드는 것은 상대속도의 증가에 의해 웨이퍼와 패드의 접촉이 줄어들었기 때문이다. 낮은 상대 속도에서는 기계적인 역할이 주요한 제거작용으로 나타난다. 속도가 증가하면 기계적인 요소의 영향은 줄어들고 슬러리의 유량이 증가함에 따라 화학적인 영향이 증가한다. 따라서, 가공량의 변화는 Fig. 11

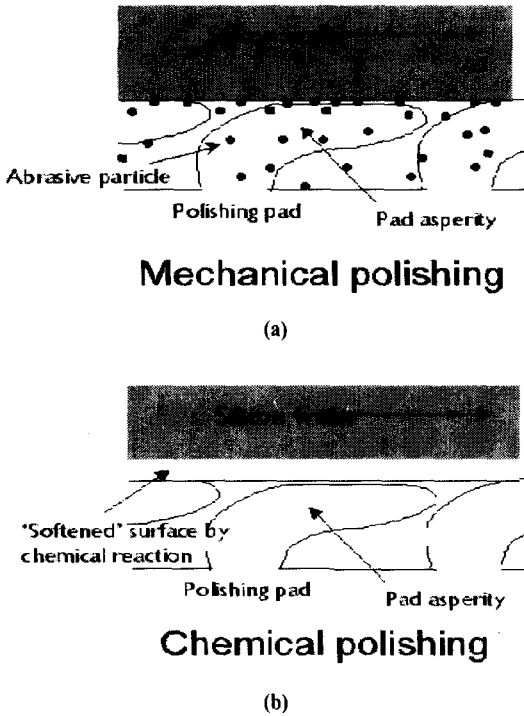


Fig. 10 Schematic of the mechanical (a) and the chemical(b) polishing action

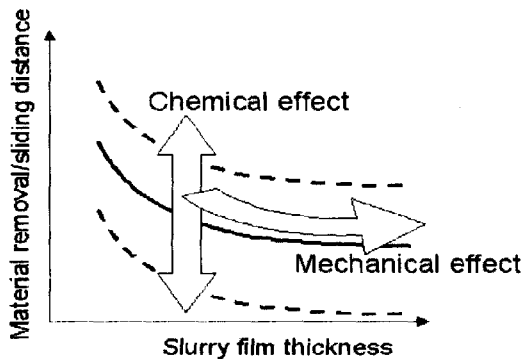


Fig. 11 Mechanical and chemical effect on the material removal per sliding distance in CMP

과 같이 접근선을 따라 변화하여 일정한 수치를 유지하게 된다. 이때의 일정한 값은 CMP에서의 기계적인 요소, 즉 속도, 압력, 입자의 형상, 슬러리 점성 등에 영향을 받는다.

참고 문헌

- (1) Bonora, A.C., "Flex-Mount Polishing of Silicon Wafers," *Solid State Technology*, October, pp. 55~62, 1977.
- (2) Wolf, S. and Tauber, R. N., "Silicon Processing for the VLSI Era-Volume 1: Process Technology," Lattice Press, 1986.
- (3) Burggraaf, P., "CMP: Suppliers Integrating, Applications Spreading," *Semiconductor International*, Nov., pp. 74~82, 1995.
- (4) Davari, B., "A new Planarization Technique, Using a Combination of RIE and Chemical Mechanical Polish(CMP)," *IEEE, IEDM Technical Digest 89*, pp. 341~344, 1989.
- (5) O'Mara, W.C., "Planarization by CMP : Forecasting the Future," *Semiconductor International*, July, pp. 140~146, 1994.
- (6) Sethuraman, A. R., Wang, J. F., Cook, L., "Review of Planarization and Reliability Aspects of Future Interconnect Materials," *Journal of Electronic Materials*, Vol.25, pp. 1617~1622, 1996.
- (7) K. Rajan, "Mechanical Processes in Chemical-Mechanical Planarization: Plasticity Effects in Oxide Thin Films," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 27, No. 10, pp. 1107~1111, 1998.