

유리-유리 기판의 진공-정전 열 접합 특성

주병권 · 이덕중 · 이윤희

한국과학기술연구원 정보재료 · 소자연구센터

Vacuum-Electrostatic Bonding Properties of Glass-to-Glass Substrates

Byeong-Kwon Ju, Duck-Jung Lee and Yun-Hi Lee

KIST Electronic Materials and Devices Research Center
(2000년 1월 12일 접수, 2000년 1월 26일 게재승인)

요 약: 유리 프리트와 유리 튜브를 사용하지 않고 FED, VFD와 PDP를 봉입할 수 있는 기반 기술로서, 진공 내에서 두 장의 sodalime 유리 기판들을 정전 열 접합하는 공정을 연구하였으며, 대기 중에서 정전 열 접합한 기판 쌍들과 비교하여 접합 특성을 비교·분석하였다. 진공 분위기 내에서 비정질 실리콘 interlayer를 이용하여 접합된 유리 기판 쌍의 경우, 대기압의 경우와 비교할 때 동일한 접합 온도와 전압에서 접합 강도가 상대적으로 낮은 것으로 측정되었으며, 산소 분위기의 경우 접합 강도가 증가하였음을 확인하였다. XPS와 SIMS를 통한 비정질 실리콘 표면 및 유리기판 표면의 조성 변화 분석으로부터, 진공 내에서 산소가 부족함으로써 정전 열 접합 과정에서 부가적으로 수반되는 실리콘 산화막이 불완전하게 형성된 것으로 해석할 수 있다.

Abstract: As an essential technology for the FED, VFD and PDP packaging having merits of no glass frit and no glass tube usage, two sodalime glass substrates were electrostatically-bonded in a vacuum environment, and the bond properties were compared with the case of bonding in atmosphere. The glass wafer pairs bonded in vacuum using a-Si interlayer had a relatively lower bond strength than the ones bonded in atmosphere under same bonding conditions (temperature and voltage). And the bond strength was increased in the case of oxygen ambient. Through the XPS and SIMS analyses for the surface region of a-silicon and bulk glass, it might be concluded that the lower bonding strength was originated from the inactive silicon oxide growth occurred during the electrostatic bonding process due to oxygen deficiency in vacuum.

1. 서 론

평판 표시기에 있어서 전계 방출 디스플레이(Field Emission Display : FED)는 마이크로 구조물 또는 박막에 강한 전계를 인가하여 방출되는 전자를 형광물질에 충돌하도록 하여 구동하는 디스플레이로서, 빠른 응답 속도, 저 전압 구동, 높은 contrast, 넓은 시야각, 온도의 비 의존성등의 장점을 가지고 있다. 하지만, FED의 안정적인 동작을 위해서는 전계 방출 소자의 개발과 함께 진공 패키징 기술의 중요성이 대두되고 있다. 형광 표시관 (Vacuum Fluorescent Display : VFD)은 설계의 자유도가 크고, 동작 전압이 낮으며, 신뢰성이 우수하여

자동차용, 가전용, 사무기기등에 응용되어지고 있다.

VFD는 심선의 필라멘트가 600~650°C의 고온으로 발열하면서 방출하는 열전자를 형광체에 충돌시킴으로서 구현되어지는 형광관이다. FED와 VFD는 방출된 전자의 이동에 의한 것으로 이를 위하여 10^{-5} Torr 이상의 고진공 실장을 요구하며, 어떠한 방법으로 고진공을 얻을 수 있도록 실장할 것인가와 대기압과의 압력 차이에 의한 스트레스를 어떻게 최소화 할 것인가에 대한 문제점을 가지고 있다.

플라즈마 디스플레이(Plasma Display Panel : PDP)는 다른 디스플레이에 비해 초대형화에 적합하다는 것과 매우 강한 비선형성, 넓은시야각 형광막을 이용한

full color 구현이 용이하다는 장점을 가지고 있다. PDP의 동작원리는 캐소드와 애노드 사이에 있는 양 전극 사이에 있는 네온(Ne), 아르곤(Ar), 제논(Xe) 또는 이들의 혼합물에 높은 전압을 인가하여 발생하여 플라즈마의 전리 현상에서 나오는 VUV(Vacuum Ultra Violet)가 red, green, blue로 이루어진 형광막을 자극하여 컬러를 구현하게 된다. 이들은 초기 고진공의 분위기에서 가스를 주입하는 공정을 거쳐야 한다. 일반적으로, 국내외의 관련 회사들이나 연구소에서는 CRT (cathode ray tube)의 패키징 방법을 응용하여 배기용 세관을 패널에 유리프릿으로 연결하고 절단 밀봉 공정(tip-off process)으로 패키징하고 있으며, 패널(유리기판)이 받는 스트레스를 최소화 하기 위하여 3 mm 이상의 두꺼운 유리기판을 사용한다. 이상과 같은 공정은 유리프릿의 소결시 발생하는 가스와 400°C 이상의 고온 공정으로 패널 내부의 금속 전극이 손상을 받을 수 있다. 또한 기존의 상용화된 제품(CRT-TV)과는 달리 내부 체적이 상당히 작기 때문에 배기용 세관의 진공 효율 한계성과 미소 체적의 스페이서로서 수십 MPa의 스트레스를 견뎌야 하는 등 진공 실장의 개선 방법이 요구된다. 이상의 문제점들을 해결하기 위하여, 레이저를 이용하여 유리프릿을 국부적으로 녹여 실장하는 방법이나 진공 분위기에서 고온으로 가열하여 진공 실장(In-line packaging)하는 방법등이 모색되어 지고 있다. 하지만, 이들은 고온 공정으로 인한 out-gases의 문제, 전기적 절연, 물리적 강도등의 한계성을 가지고 있다. 이를 통하여 알 수 있는 바와 같이 음극 기판에 형성된 배기구를 유리관이 아닌 유리-유리 간 정전 열 접합으로 밀봉할 경우에는 접합이 진공 내에서 이루어져야 하며, 따라서 진공 내에서의 유리 간 접합 특성을 분석할 필요가 있다. 이때 적용되는 유리 관이 없는 밀봉 공정은 FED를 일례로 하여 전술한 바 있다.^{1,2)} 본 연구에서는 유리 기판 간의 정전 열 접합을 대기압 및 진공 내에서 수행하였고, 이에 따른 접합 특성을 접합 전류, 접합 강도, 및 계면 조성의 향으로 분석, 비교하여 보았다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 두께 1.1 mm의 sodalime 유리기판을 사용하였다. Sodalime 유리기판은 낮은 permeation rate를 가지고 있어 고진공을 장시간 유지 할 수 있는 것으로 보고되었다.

유리기판 간 진공-정전 열 접합을 위해서는 전압을 인가할 수 있는 전극과 유리 기판 내에 형성되는 음전하와 대응할 수 있는 양전하 공급층이 필요하며, 본 실

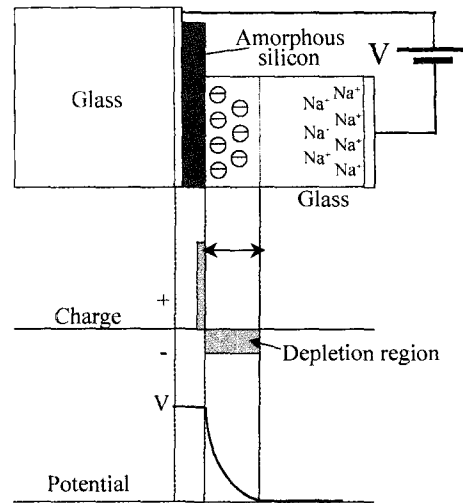


Fig. 1. Theoretical view on the glass-to-glass electrostatic bonding using ITO-amorphous Si thin film structures.

Table 1. Deposition condition by sputtering

Process Parameter	Deposited layers		
	ITO	SiO _x	a-Si
Source	ITO target	Si target	Si target
Initial pressure	3×10 ⁻⁵ Torr		
Work pressure	4×10 ⁻³ Torr		
Temperature	150°C	120°C	120°C
Reaction gas	Ar	Ar : O ₂ (9 : 1)	Ar
Power	3.3 W/cm ²	1.8 W/cm ²	2.2 W/cm ²
Deposited rate	200 Å/min	40 Å/min	100 Å/min
Thickness	1,500 Å	200~1000 Å	2,000 Å

험에서는 앞선 연구 결과를 토대로 하여 각각 ITO와 비정질 실리콘 박막을 선택하였다.²⁾ 한 쪽의 유리 기판에 ITO와 비정질 실리콘 박막을 성장시킨 뒤 다른 유리 기판과 정전 열 접합을 이루는 메커니즘은 Fig. 1에 보인 바와 같이 접합 계면 부근에서의 공간 전하 분포와 이에 따른 전위 분포를 통하여 실리콘-유리 접합과 동일하게 설명될 수 있다.³⁾ 유리 기판 위에 증착되는 박막들의 증착 조건을 Table 1에 요약하였다. 여기에서 완충층으로 이용되는 실리콘 산화막은 ITO와 실리콘 막 간의 접착력을 향상시키는 역할을 하며, 실리콘의 스퍼터링 동안에 산소를 아르곤 대비 10%의 분압으로 흘려 주어 증착하였다. AFM으로 측정된 표면의 평균 거칠기를 살펴보면, 박막이 증착되기 이전의 유리 기판이 8 Å이고, 실리콘 막의 두께가 1000 Å, 2000 Å, 3000 Å

으로 증가함에 따라 각각 21 Å, 23 Å, 그리고 24 Å으로 거의 유사한 것으로 나타났다.

ITO와 비정질 실리콘 박막이 연속적으로 증착된 sodalime 유리 기판과 박막이 증착되지 않은 sodalime 유리 기판들을 정전 열 접합하였으며, 사용된 유리 기판은 두께가 1 mm, 크기가 각각 2~3 cm²과 1.5~1.5 cm²가 되도록 하였다. 접합 조건은 온도를 70~230°C로, 전압을 50~250 V_{dc}의 범위에서 변화시켰으며, 접합 분위기로는 대기압과 진공 (4~10⁻⁶ Torr), 그리고 기체 분위기(산소, 아르곤, 질소)를 사용하였다. 접합된 시편들에 대하여, KEITHLEY 237을 이용하여 접합 시간과 전류와의 관계를 측정하였고, 접합 후 광원하에서 접합 계면의 모양을 관찰하였으며, Tensile test를 이용한 접합 강도와 SEM, SIMS, XPS등의 계면 조성 분석 등으로 접합 분위기 의존성을 중심으로 분석하였다.

3. 결과 및 분석

3-1. 접합 전류 측정

대기 및 진공 내에서 유리-유리 간 정전 열 접합을 할 경우에 나타나는 전류의 파형들을 Fig. 2에 비교하였다. 두 경우 모두 초기 전류치가 시간에 따라 감소하며

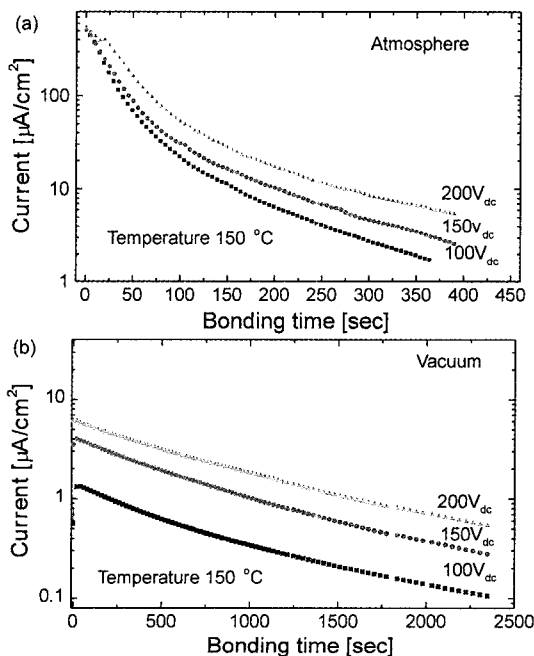


Fig. 2. Bonding current curves measured during the electrostatic bonding in (a) atmosphere and (b) vacuum environments.

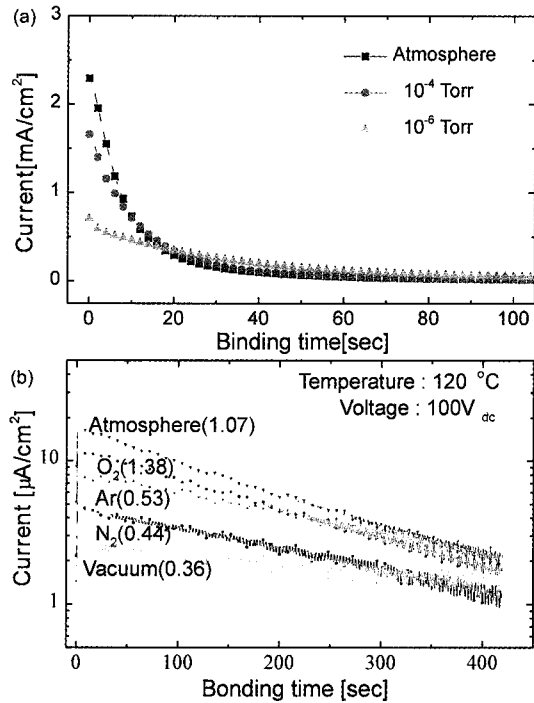


Fig. 3. Dependence of bonding current curves on (a) the vacuum levels and (b) ambient gases.

전류 크기가 전압에 비례하는 일반적인 성향을 보였는데, 진공 접합의 경우에는 상대적으로 초기 전류치가 작고 시간에 따라 전류치가 감소하는 정도도 느린 것으로 나타났다.

Fig. 3(a)는 접합 조건이 230°C-250 V_{dc}일 때 진공도를 변화 시키면서 전류 파형을 측정하였으므로 진공도가 증가할수록 초기 전류치가 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)는 10⁻⁴ Torr의 진공도 내에 산소, 아르곤, 질소를 주입하여 대기압을 만든 뒤 정전 열 접합을 행하고 분위기 기체에 따른 접합 전류의 의존도를 관찰한 것이다. 대기 중에 비해 진공 분위기에서 접합 전류의 피크치가 낮은 이유로서 접합을 돕는 산소 원자의 부족과 상대적으로 낮은 열 전도도를 추측한 일례가 있으며,⁴⁾ 접합 강도에 관한 데이터를 함께 고려할 경우 보다 구체적인 해석이 가능하다.

즉, 이들 기체 분위기 내에서 접합된 기판 쌍들의 접합 강도를 인장 응력으로 측정된 결과 산소(1.38 MPa)-대기압(1.07 MPa)-아르곤(0.53 MPa)-질소(0.44 MPa)-진공(0.36 MPa) 순으로 접합 강도가 나타났다. 일반적으로 접합 강도는 초기 전류치 피크의 크기, 즉 이동하는 양이온들의 양에 비례하는데, 산소 분위기의 경우에는 예외적으로 전류 피크치가 대기압보다 작음에도 불

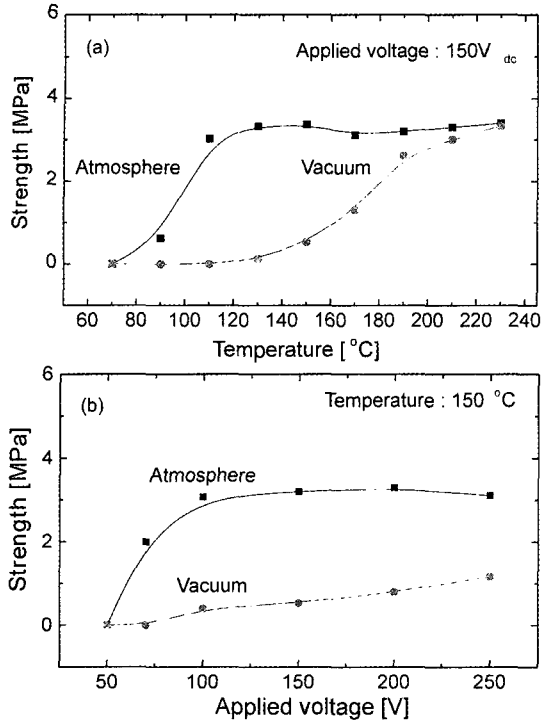


Fig. 4. Influence of bonding (a) temperature and (b) voltage on bond strength in the atmosphere and vacuum bonding process.

구하고 상대적으로 높은 접합 강도를 나타내었다. 이를 통하여 산소 분위기의 경우에는 이동되는 전하의 수와 더불어 접합에 영향을 미치는 별도의 요소가 존재하는 것으로 추측할 수 있다. 즉, 앞서 보고한 바와 같이,²⁾ 전계에 의한 접합 과정과 수반하여 접합 계면에서 Si-O-Si 형태의 화학적 결합이 진행되며, 따라서 산소 원자를 제공할 수 있는 분위기(산소 분위기, 대기압)에서 접합된 시편이 그렇지 않은 분위기(진공)의 경우에 비하여 상대적으로 큰 접합 강도를 갖는 것으로 판단된다. 아울러 진공의 경우 전류 피크가 상대적으로 더디게 감소하는 것은 접합된 기판으로부터의 열 손실이 낮아 느린 속도로 냉각되기 때문으로 풀이된다.

3-2. 접합 강도

대기압과 진공 내에서 접합된 시편들에 대하여 접합 온도와 전압을 변화 시키면서 접합 강도를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 측정된 접합 강도의 포화치는 3MPa 범위에서 포화되는 것으로 나타났는데, 이 이상에서는 접합의 파괴가 유리 기판과 실리콘 박막간의 접합 계면에서 일어나지 않고, ITO와 실리콘 박막 간의

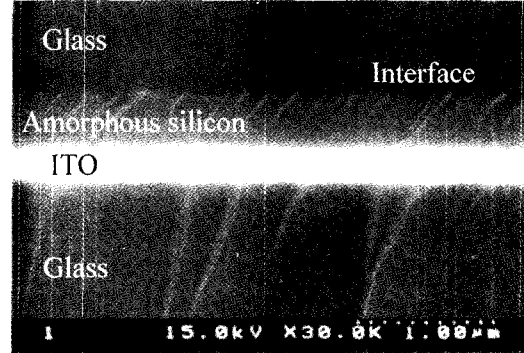


Fig. 5. SEM cross-sectional view of the bonded glass wafer pair.

박막 계면에서 일어났다. 즉, 접합 강도는 3 MPa 이상으로 측정 불가능한 영역에 해당한다. 진공 내의 경우라도 접합용 온도가 약 240°C 이상이 되면 포화치에 접근함을 알 수 있으며, 150°C의 온도에서는 접합용 전압을 250 V_{dc}에 이르기까지 증가 시키더라도 접합 강도의 증가는 매우 완만하며, 1 MPa 정도에 불과함을 알 수 있다. 접합이 일어나기 시작하는 접합 조건은 대기압 접합의 경우에는 150°C-70 V_{dc}나 90°C-150 V_{dc} 정도인 반면, 진공 접합의 경우에는 150°C-100 V_{dc}나 130°C-150 V_{dc} 정도로 진공 접합이 약간 높은 온도와 전압을 필요로 하고 있다.

3-3. 접합 계면 분석

진공 내에서 접합된 유리 기판 쌍들에 대해 단면을 절단한 뒤 전자 현미경으로 관찰한 모양은 Fig. 5와 같다. 대기압 및 진공 접합에 관계없이 최적 접합 조건을 만족시키는 기판 쌍들은 대부분 결함이나 손상, 비접합 영역이 없는 비교적 완전한 접합 계면을 형성하고 있는 것으로 나타났다.

아울러, 대기 및 진공 분위기 내에서 접합된 후, 실리콘 interlayer와 ITO 막의 박막 계면에서 분리가 일어난 시편들을 대상으로 하여 실리콘 막-접합 계면-유리 기판 방향으로 깊이에 따른 SIMS 분석을 하였다. 진공 내에서 접합한 경우, 산소 원자의 부족으로 인하여 접합 계면에서 실리콘 산화물의 형성 정도가 대기압 접합인 경우에 비해 상대적으로 낮을 것으로 예측하였으나, 두 경우에 있어서 큰 차이를 발견하기는 어려웠다. Fig. 6은 대기 중에서 접합된 시편에 대한 SIMS 결과이며, 진공 접합의 경우에도 이와 유사한 현상을 나타내었다. SIMS profile을 살펴 보면, sputtering rate를 약 100 Å/분으로 가정할 때, 약 1000 Å까지는 실리콘 산

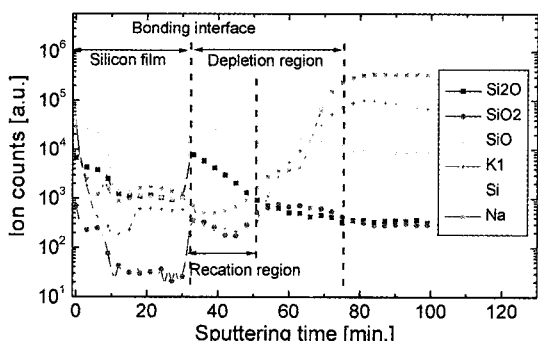
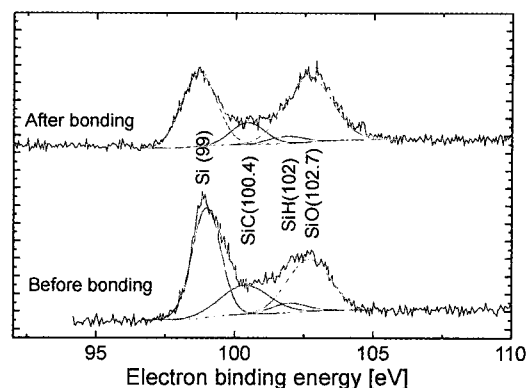


Fig. 6. SIMS depth profile from a-Si interlayer to bond interface for the de-bonded sample.

화막 완충층이고, 이로부터 접합 계면에 이르는 2200 Å의 깊이에 이르기까지 비정질 실리콘 interlayer가 존재한다. 접합 계면으로부터 유리 기판의 내부로 약 1900 Å 깊이에 해당하는 영역은 화학적 반응이 일어나는 영역으로 실리콘과 산소 원자들이 반응하여 Si-O 구조의 화학적 결합을 이루고 있음을 볼 수 있다. 또한 접합 계면으로부터 약 4200 Å의 깊이에 이르기까지 나트륨과 칼륨 양이온들의 공핍 현상을 볼 수 있다. Pyrex (#7740) 유리 기판의 경우 친수화 후 상온 예비 접합 과정을 통하여 양이온 공핍층을 가능한 깊게 형성하여도 그 두께가 1000 Å 이내인 반면에,⁵⁾ sodalime 기판의 경우에는 4200 Å에 이르는 점은 유리 벌크 내부에 불순물 함유량이 상대적으로 많아 보다 깊은 공핍 영역을 형성하기 때문인 것으로 판단된다.

SIMS 깊이 분석을 통하여 접합 계면으로부터 유리 기판 내부로의 조성 분석을 행한 결과 실리콘 산화막으로 이루어지는 과도 영역이 분명히 존재함을 확인할 수 있었다. 다음으로 접합 전과 후에 실리콘 interlayer의 표면 조성 변화를 조사하였다. 즉, 유리 기판 위에 실리콘 interlayer를 증착한 뒤, 230°C에서 열처리만 거친 시편(before bonding)과 230°C-100 V_{dc}에서 정전 열 접합을 거친 뒤 접합 계면에서 분리된 시편(after bonding)들에 대하여 접합 전과 후의 실리콘 interlayer의 표면 조성 변화를 XPS로 분석하였다. Si(Si_{2p}), SiC, SiH, 그리고 SiO에 대한 분석 결과를 Fig. 7에 나타내었는데, 조성 변화를 살펴 보면 접합 전에 비하여 접합 후에 실리콘 성분이 감소하고 실리콘 산화막 성분이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 실리콘 산화막은 유리 기판 뿐만 아니라 실리콘 interlayer에도 형성되는 것으로 볼 수 있다.

전술한 과정을 통하여 실리콘 interlayer 내에 존재하



	Si	SiC	SiH	SiO
접합 전(%)	43.78	19.82	4.71	31.69
접합 후(%)	39.20	11.05	3.66	46.08

Fig. 7. XPS spectrum of a-Si interlayer before and after bonding process.

는 산소가 정전 열 접합에 관계한다는 점은 분명히 할 수 있었으며, 이를 근거로 하여 실리콘 interlayer 내에 고의로 산소를 함유시켜 접합을 이룬 뒤 접합 강도를 평가하여 보았다. 즉, Table 2는 유리 기판 위에 형성되는 실리콘 interlayer 내에 산소가 일정 농도로 함유되도록 한 다음에 동일한 조건에서 정전 열 접합한 뒤, AES를 이용하여 O 농도에 따른 접합 강도의 변화를 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 세 종류의 시편들에 있어서 접합 과정에서 측정된 전류 파형의 모양은 큰 차이가 없었으며, 산소의 함유량이 증가함에 따라 접합 강도도 증가하는 것을 알 수 있었다. 산소의 농도가 20% 이상이 되면, 실리콘 interlayer-유리 기판간의 접합 강도치(3.0 MPa)를 넘어 유리 기판 벌크가 파괴되는 정도(4.7 MPa) 이상에 이르는 것으로 나타났다. 산소의 농도 변화가 접합 강도에 미치는 영향을 분석하여 보면, 접합 메커니즘보다는 실리콘 interlayer와 유리 기판 간의 접착력(adhesion)과 관계되는 것으로 추측된다.

Table 2. Variation of bond strength as a function of O concentration in Si interlayer

Sample	Si concent. [%]	C concent. [%]	O concent. [%]	Bond strength [MPa]
# 1	93.7	0.4	5.9	2.1
# 2	88.2	0.3	11.5	2.8
# 3	77.1	0.9	22	> 3.0 (4.7)

4. 결 론

10^{-6} Torr 수준의 진공 분위기 내에서 두 장의 유리 기판들 간에 정전 열 접합을 이룬 뒤 접합 특성을 조사, 분석한 결과 다음과 같은 점을 확인할 수 있었다.

1) 진공-정전 열 접합의 경우 대기압에서의 접합에 비하여 접합 공정 초기에 나타나는 전류의 크기가 매우 작고 접합 시간의 경과에 따라 전류가 감소하는 정도도 느린 것으로 나타났다. 이는 진공 내에서의 낮은 열 전도 및 손실로 인하여 유리 기판 내에서 발생하는 이온의 수가 낮고 또한 유리 기판의 내부로 이동하여 고정되는 시간도 오래 걸리기 때문으로 해석된다.

2) 진공 및 각각 다른 기체 분위기의 대기압에서 정전 열 접합된 유리-유리 기판 쌍의 접합 강도를 측정할 결과, 산소 분위기 내에서 접합된 경우가 대기의 경우에 비해 높았으며, 진공의 경우에 가장 낮게 나타났다. 진공의 경우 낮은 열 전도 및 손실이 원인이 되며, 특히 산소 분위기에서는 두 기판 사이에 해당하는 실리콘 interlayer와 유리 기판의 계면에서 산소 원자를 통한 화학 반응이 일어나고 이로 인해 접합 강도가 증가하는 것으로 볼 수 있다.

3) 접합 계면에서의 화학적 조성을 분석한 결과, 대기 및 진공 내에서 접합된 시편 간에 크게 구별되는 점은 찾을 수 없었으나, 유리 기판 내부로 실리콘 산화물들이 형성되어 있는 것을 SIMS 분석을 통해 확인할 수 있었다. 또한 실리콘 interlayer 표면을 XPS로 조사한 결과 접합 전에 비해 접합 후에 표면에 실리콘 산화물이 증가한 것으로 나타났다. 실리콘 interlayer 내에 산소를 고의적으로 함유 시킨 다음에 접합 후 강도를 평가

한 결과 산소의 농도가 증가할수록 접합 강도도 증가하는 경향을 보였으며, 이상의 결과들을 종합하여 볼 때 산소 원자가 유리-유리, 혹은 유리-실리콘 간 접합력 향상에 기여하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부와 산업자원부가 주관하는 초소형 정밀기계 선도기술개발사업의 연구비 지원에 의한 것이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 주병권, 이덕중, 이윤희, 오명환, "Tubeless packaging 된 field emission display의 개발," 전기학회논문지, 48C권, 4호, pp. 275-280 (1999.4.)
2. 주병권, 이덕중, 최우범, 김영조, 이남양, 오명환, "비정질 실리콘 박막을 이용한 sodalime-sodalime 정전 열 접합 및 FEA packaging 응용," 전기학회논문지, 48C권, 9호 (1999.9.)
3. 주병권, 최우범, 이윤희, 정성재, 이남양, 성만영, 오명환, "전자선 증착된 Corning #7740 Interlayer를 이용한 실리콘-실리콘 정전 열 접합," 전기학회논문지, 46권, 10호, pp. 1562-1572 (1997.10.)
4. A.Cozma and B.Puers, "Characterization of the electrostatic bonding of silicon and Pyrex glass," J. Micromech. Microeng., vol. 5, pp. 98-102 (1995)
5. 주병권, 이덕중, 이윤희, 이남양, 한정인, 조경익, 오명환, "실리콘-유리 정전 열 접합에 있어서 상온 예비 접합에 의한 접합 특성의 개선," 전기학회논문지, 47권, 8호, pp. 1269-1276 (1998.8.)