

가공 및 측정이 가능한 복합나노가공시스템의 개발

장동영*, 박만진+, 김진현**, 한동철***

Development of a multi-functional nano-fabrication system for fabrication and measurement

Jang, Dong-Young*, Park, Man-Jin+, Kim, Jin-Hyun**, Han, Dong-Chul***

Abstract

In focused-ion-beam (FIB) application of micromachining and device transplantation, four kinds of FIB processes, namely FIB sputtering, FIB-induced etching, redeposition, and FIB-induced deposition, are well utilized. As with FIB systems, scanning electron microscopes(SEMs) were extensively used in the semiconductor industry. They are the tools of choice for defect review and providing the image resolution needed for process monitoring. The enhanced capabilities of a dual-column on one chamber system are quickly becoming realized by the nano industry for performing a wide range of application.

Key Words : FIB, FE-SEM, nano-fabrication, two-chamber, two-column

1. 서론

나노기술은 21세기에 들어오면서 세계주요국들이 정보 기술(IT), 바이오기술(BT)와 함께 21세기를 주도할 핵심 기술로 선정, 범국가적 지원을 하고 있다.

나노기술은 그 특성상 IT, BT 등과 Hybrid적인 성격이 강하며, 기술개발에 따라 나머지 기술의 한계를 극복하거나 패러다임 전체가 바뀌는 현상까지 가져오는 중요한 기술이다. 따라서 나노기술은 화학, 소재, 기계, 전자, 환경, 에너지, 국방 우주 등 모든 기술과 결합되어 그 분야의 한계를 극복해 내는 중요한 기술이 될 것으로 예측되고 있다.

나노기술이 소개된지 20년도 채 안되었지만, 그 발전 가능성은 상상하기 힘들다. 20세기 말 등장한 반도체 산업이 새로운 문명을 창출했듯이 21세기는 나노 기술이 이 자리를 대신할 것이라고 많은 미래학자들은 예측하고 있다⁽³⁾.

지금까지 나노 기술은 주로 물리학, 화학, 소재공학 등 대부분 순수과학 분야에서 진행되어 왔다. 그러나 실험실 수준에서 산업화까지 나노기술이 확대되기 위해서는 다양한 공학기술이 접목되어야 할 것이다. 이를 위해서 나노가공장비, 나노 측정장비, 나노 액투에이터 및 나노 가공공정기술 개발은 반드시 연구·개발되어야 하는 분야이다.

* 서울산업대학교 산업정보시스템공학과 (dyjang@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

+ 서울대학교 기계항공공학부

80년대에 세계 제조업을 리드해왔던 일본이 90년대 들어서면서 자국 내 제조업체들이 중국 등 생산여건이 유리한 지역으로 속속 빠져나가면서 불거진 소위 제조업 공동화 문제에 크게 연연하지 않고 오래전부터 극미세 나노기술의 개발을 통해 재기의 꿈을 다지고 있다⁽⁴⁾.

우리나라는 현재 DRAM분야에서 세계1위를 차지하고 있으며 기술을 선도하는 입장이다. 이러한 소자분야의 장점 및 Know-how는 해당분야의 나노기술에 많은 도움이 될 것이다. 이 나노 소자기술에 직접적으로 적용 가능한 것이 바로 이온빔을 이용한 나노 가공기 즉 Focused Ion Beam(FIB)이다. FIB는 단순히 반도체 소자부분에서만 사용되는 것이 아니라, 기술개발 및 연구를 위한 기초적인 장비이며, 직접적으로 나노스케일 수준의 가공이 가능하므로 나노머신 등의 개발에 매우 중요한 장비가 될 것으로 예측된다. 나노기술 중 또 하나의 중요한 기술이 나노단위를 측정할 수 있는 측정 장비를 개발하는 것이며, Field Emission-Scanning Electron Microscope(FE-SEM)이 10 nm 이내의 크기까지 측정할 수 있을 정도로 고정밀한 나노급 측정 장비로 현재 나노 관련 기술 개발에 많이 쓰이고 있다. 본 연구에서는 FIB장비와 FE-SEM을 복합화한 나노가공시스템에 관한 것으로서, 진공 수용 공간을 형성하는 시스템챔버와 시스템챔버 내에 독립된 진공공간으로 마련되는 이온빔가공부인 가공챔버, 가공챔버와 독립된 진공공간으로 마련되는 전자주사현미경을 이용한 전자주사측정챔버, 미세요동이 가능하게 설치되어 시료를 적재하는 측정스테이지와, 가공챔버와 측정챔버를 진공상태로 연결하며 하나의 영역에 개폐 가능한 시료출입구가 형성된 진공이송챔버와, 진공이송챔버 내부에서 가공챔버와 측정챔버를 향해 왕복 이동하는 시료이송테이블을 갖는 진공이송부와 시스템챔버와 가공챔버 및 측정챔버와 진공이송챔버의 내부를 소정의 진공도로 유지시키는 진공유지수단과 미리 설정된 가공 및 측정프로그램과 각 챔버의 적정 진공도에 따라 이온빔가공부와 전자주사측정부 및 진공이송부와 진공유지수단의 동작을 제어하는 제어컴퓨터를 포함하는 시스템을 개발한다. 이에 의하여, 진공의 파기없이 방출

이온으로부터 기기를 보호할 수 있고, 시료의 초미세 가공 정밀도를 보장하면서 효율성과 생산성을 확보하여 대량생산이 가능한 나노가공시스템을 개발한다.

2. FIB에 의한 가공장치의 구성

집속이온빔 장치의 요소기술은 이온빔 발생장치, 이온빔의 집속을 위한 Lens System, 2차 전자 또는 2차 이온의 Detect와 Image Processing, 고압 고안정도 Power supply 등으로 분류할 수 있으며, 그 밖에 진공 System, 고정밀 제어장치, 정밀 스테이지 등의 기술이 필요하다.

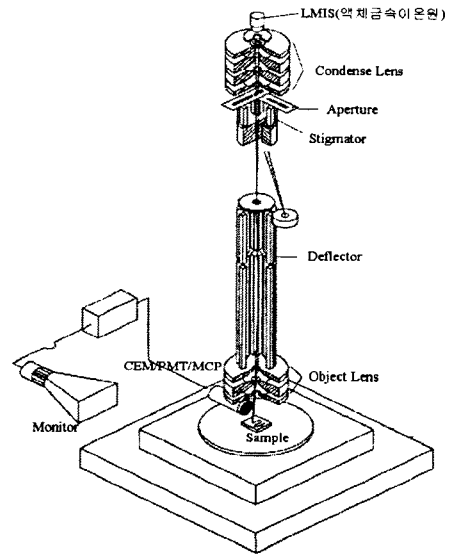


Fig. 1 집속이온빔(FIB) 장치의 구조

2.1 이온빔 발생장치

이온빔은 전자빔 또는 Laser, X-ray, 적외선 등의 광자빔과 다르게 매우 높은 질량을 가지고 있어 물리와 전자기적인 상호작용보다는 운동에너지를 직접 전달하는 고전적인 방법으로 상호작용을 하므로 광자나 전자와는 매우 다른 특성을 갖는다. 여기에서 사용되는 이온빔의 발생장치는 액체금속 이온원(Liquid Metal Ion Source:LMIS)으로 이온빔의 발생영역이 매우 작으며, 장시간의 동작에서 안정

적인 성능을 유지하며, 높은 에너지로 가속시킬 때 에너지 퍼짐특성이 매우 작으며, 이온빔의 세기가 높은 특징이 있다.

2.2 이온빔 집속을 위한 Lens System

집속이온빔 장치의 Lens system은 정전렌즈 형태를 사용한다. 주사전자현미경에는 전자를 집속시키기 위한 렌즈는 자기렌즈(Magnetic Lens)를 사용한다. 전자의 경우 매우 빠른 속도로 이동하기 때문에 자기장에 의한 집속효과가 큰 반면, 이온의 경우 전자보다 매우 큰 질량 때문에 같은 이온에너지를 갖더라도 약 100~200배 이상의 속도차이가 생긴다. 따라서 자기장에 의한 집속효과는 전기장보다 상대적으로 매우 작게 된다. 따라서 집속이온빔 장치에 사용되는 렌즈는 정전렌즈(Electro-static Lens)로 3극의 평판에 전기장을 가하고, 그 중앙으로 이온빔이 이동하면서 평판전극사이에서 이동방향(z)과 수직방향(r)으로 전기장을 받게 된다.

2.3 2차 전자 또는 2차 이온 검출장치

집속이온빔 장치에서 중요한 기능 중에 이온빔 주사에 의하여 발생된 2차 전자 또는 2차 이온의 검출이 있다. 고에너지 이온빔이 시료에 주입될 때 시료에서는 여러종류의 에너지를 갖는 2차전자와 2차이온, 중성원자, 광자, X-ray 등의 반응이 나타나며 선택적 검출을 통하여 여러종류의 기능을 수행할 수 있다. 2차전자의 경우 일반적인 방법으로 2차전자의 양을 이용 Image Processing에 사용한다. 일반적으로 2차 전자와 2차 이온을 검출하여 Image Processing에 사용한다. 검출기는 전자증배관(Channel Electron Multiplier : CEM), 광증배관(Photo Multiplier Tube : PMT), Multi Channel Plate(MCP) 등이 각각의 특성에 맞게 사용된다.

2.4 고압 Power Supply

이온빔을 가속시키고, 집속시키기 위하여 필수적인 장치가 고압, 고안정도 Power Supply이다. 최대 출력전압이 50 kV, Ripple Factor 0.01%, load regulation이

0.01% 이하 이어야 하며, 특히 Load regulation의 경우 8시간이상의 Operating에도 안정도를 유지하여야 한다. 고배율의 이미지와 나노가공을 위하여 필수적인 될 장비이다.

2.5 시료대용 스테이지

고정밀 위치결정 X, Y, Z축 제어 스테이지, 그리고 Tilting 및 Rotating 스테이지가 구비되어야 하며, 이들 스테이지가 고정밀로 제어되어야 한다. 또한 시료대는 진공도의 효율적인 운용을 위하여 Main Chamber와 시료고정을 위한 시료준비 Chamber, 그리고 이들의 분리 운용을 위한 밸브 개폐제어가 필요하다.

3. FE-SEM에 의한 측정장치의 구성

주사전자현미경은 크게 전자선을 발생시키는 전자원과 전자선을 제어하는 렌즈시스템, 그리고 시편위에 조사되는 영역을 결정하여 배율을 결정하는 scan coil, 비점수차를 제거하는 stigmator, 시편으로부터 얻어지는 signal을 수집하는 detector, 그리고 detector로 얻은 정보를 보여주는 camera, 또는 CRT로 이루어져 있다.

3.1 전자총

전계 방사형 전자총은 열전자 방사형의 낮은 휘도 및 큰 빔의 직경을 개선하고자 개발된 재료이다. 전자총은 끝이 매우 날카로운 tip의 형태를 가지는데, 다음 식에서 보는 바와 같이 tip에 걸리는 전계는 곡률반경, r에 반비례하여 증가하기 때문이다.

$$F \propto V/r$$

Tip과 제1 양극 사이에 가한 인출전압으로 tip의 선단에 강한 전계(약 1V/Å)를 발생시켜 전자를 방출시킨다. FE 전자총은 열전자 방사형에 비해 휘도가 100~1000배 높으며 전자빔의 직경도 10 nm 이하로 할 수 있어 SEM의 분해능을 향상시키며 수명이 길다. 그러나 안정하게 동작시키기 위해서는 10^{-7} Pa 이상의 초고진공도(ultra-high vacuum: UHV)를 필요로 한다.

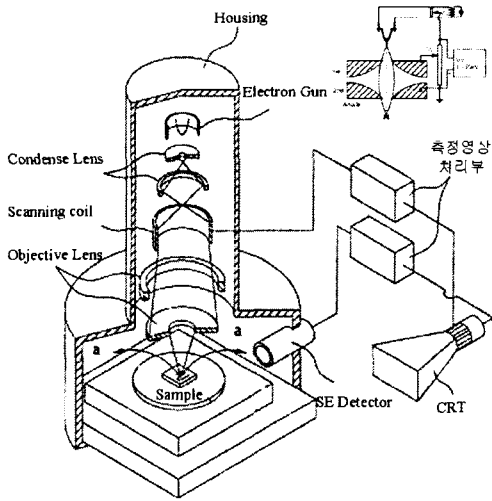


Fig. 2 주사전자현미경(FE-SEM) 장치의 구조

3.2 전자기 렌즈 및 조사시스템

주사전자현미경에서의 고분해능의 핵심은 시편에 입사하는 전자빔의 사이즈를 얼마나 작게 줄일 수 있느냐에 달려 있다. 즉 crossover를 줄이는 것으로 생각하면 된다. 시편에 의한 물리적인 제한을 무시하면 가작 작게 줄일 수 있는 전자빔의 사이즈가 바로 분해능으로 생각할 수 있다. Electron lens는 크게 condenser lens와 objective lens로 구성되어 있다. condenser lens는 electron gun에서 형성된 crossover를 줄이는 역할과 spot size의 조절을 담당하는 lens이며, 이에 반해 objective lens는 probe crossover의 위치를 광축을 따라 변화시키면서 image를 focusing을 하는 역할을 담당한다.

3.3 전자회로계

전자 회로계는 크게 진공콘트롤회로, 주사회로, 영상신호 처리회로 등으로 구분할 수 있다. 진공콘트롤 회로는 진공계 각단의 밸브를 여닫는 역할을 하고 냉각수 이상, 유화산 펌프 히터 단선, 전원이상, 이상 진공상태 등을 감지하여 시스템을 안전하게 동작시키는 일을 한다. 주사회로는 주사 신호 발생회로 (Scan Generator) 와 배율조정회로 렌즈전류조

정회로 등으로 구별되며 이는 상호 연관되어 있다. 주사신호 발생회로에서 만들어진 주사신호는 경통내의 주사코일과 관찰 CRT 및 촬영 CRT 등에 보내어져 동시 주사가 가능하게 한다.

4. 복합나노가공시스템의 구성

본 연구를 통해 개발하는 시스템은 Fig. 3에서와 같이 FIB와 FE-SEM을 통합한 복합시스템이다. 기존의 two column on two chamber 시스템은 가공과 측정이 다른 장비에서 이루어짐으로 인한 진공도의 유지를 보장할 수 없어 효율성과 생산성이 떨어지고, 이에 보완장비로 개발된 Y-type column on one chamber 시스템은 TEM 시편과 반도체 mask 수리용으로 적은 양의 가공에 이용되어 생산성면에서는 큰 단점을 가지고 있으며, 또한 하나의 chamber에 FIB와 SEM column을 가지고 있어 방출이온에 의한 chamber, 렌즈 및 전자방출부의 오염도가 높아 장시간 사용이 불가능하다는 단점을 가지고 있었다. 이에 본 과제는 Fig. 3와 4에서 보는 것과 같이 차세대 모델로서 하나의 chamber에 dual column을 설치하는 복합모듈로서 진공의 파기 없이 시편이동에 의한 가공 및 측정이 하나의 시스템에서 제작 상용화되는 나노급 복합가공장비의 개발로서, 정적·동적·열적 특성이 우수한 장비로서 바이오, 반도체, 기계류 부품의 3D 형상을 제조할 수 있는 장비 개발을 목표로 한다.

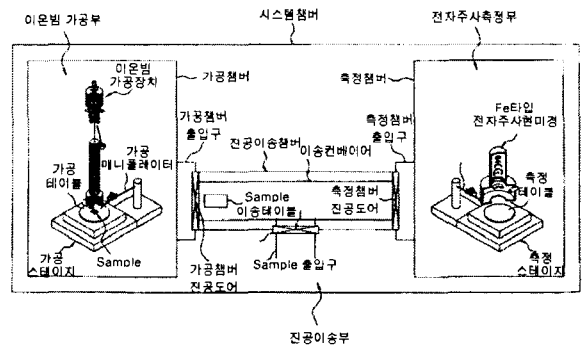


Fig. 3 복합나노가공시스템 장치의 구조

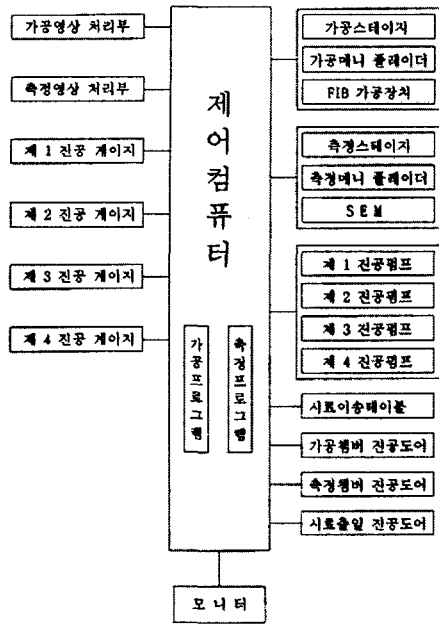


Fig. 4 복합나노가공시스템 장치의 제어부

복합나노가공시스템의 구성도를 살펴보면, 먼저 진공공간에서 sample을 가공하는 이온빔가공부, 이온빔가공부에서 가공된 sample을 진공공간에서 측정하는 전자주사측정부, sample을 이온빔가공부와 전자주사측정부로 진공상태로 이송시키는 진공이송부, 시스템을 각 진공영역에 맞게 소정의 진공도로 유지시키는 진공유지부, 그리고 시스템의 동작을 제어하는 제어부로 시스템을 구성한다. 여기서 sample의 가공 및 측정의 위치를 보다 정밀하게 하기 위해서 가공 및 측정스테이지는 약 200 nm의 이송변위와 약 1 μm 의 분해능 구동이 가능한 대변위이송부와 대변위이송부에 대해 약 100 μm 의 이송변위와 2 nm의 분해능으로 구동되는 미세이송부, 미세이송부상에 설치되어 sample을 적재하는 매니플레이터로 구성된다. 매니플레이터는 스테이지상에서 sample을 적재시키거나 적재된 sample을 진공이송부의 이송테이블로 이동시킨다.

진공이송부는 이온빔가공부와 전자주사측정부를 진공상태로 연결하는 진공이송챔버 내부에서 길이방향을 따라 가공챔버와 측정챔버 양쪽으로 왕복이송되는 sample이송테

이블을 갖는다. sample이송테이블은 sample출입구를 통해 진공이송챔버 내부로 출입하고 이송챔버 내부에서 가공챔버와 측정챔버 쪽으로 왕복이동한다.

진공유지부는 가공, 측정, 진공이송챔버의 내부진공도를 진공상태로 유지시키는 진공펌프와 각 챔버의 내부진공도를 측정하는 진공게이지들로 구성되며, 각각의 제어는 제어부에서 조정하게 된다.

제어부는 그 내부에 미리 저장되어 있는 가공프로그램 및 측정프로그램에 따라 sample을 진공이송부 및 가공 및 측정부를 제어하여 sample의 가공 및 측정을 실행한다. 그리고, 각 챔버의 진공도가 미리 설정되어 있는 진공도를 유지하여 sample이 최적의 진공공간에서 가공 및 측정되고 이송될 수 있도록 진공유지부의 구동을 제어한다. 또한 sample의 가공 및 측정 상태와 과정을 확인하기 위해 가공영상처리부와 측정영상처리부에서 전달되는 영상신호를 표시하는 한편, 진공유지부의 동작을 모니터링할 수 있는 시스템으로 구성될 것이다.

이러한 구성에 의해서, 복합나노가공시스템의 sample의 가공과정을 살펴보면, 가공대상인 sample의 진공이송챔버의 외부에서 sample이송테이블에 적재된 다음, 개방되어 있는 sample출입구를 통해 진공이송챔버 내부로 유입된다. 이때 sample출입진공도어는 제어부를 통해 폐쇄시키고 또한, 제어부에서는 진공이송챔버와 가공챔버, 측정챔버의 내부 진공도는 각 챔버의 적정진공도가 일치하도록 진공펌프를 동작시키며 sample이송테이블을 가공챔버 쪽으로 이송시킨다.

sample이 적재된 sample이송테이블이 가공챔버 쪽으로 이송되면, 제어부는 가공챔버진공도어를 개방하여 sample이송테이블을 가공챔버출입구에 위치시키고, 가공매니플레이터를 동작시켜 sample이송테이블에 적재된 sample을 가공챔버 내부에 설치된 가공스테이지의 가공테이블로 이동 적재시킨다.

sample이 가공테이블에 적재되면, 제어부는 가공챔버진공도어를 폐쇄한 다음, 미리 저장되어 있는 가공프로그램에 따라 집속이온빔 가공장치와 가공스테이지를 구동시켜

서 sample를 가공한다. 이때, 가공챔버진공도어는 폐쇄되며, 제어컴퓨터는 가공영상처리부로부터 전달되는 sample의 가공상태를 모니터에 표시하여 작업자가 가공과정을 모니터링할 수 있도록 한다.

가공챔버 내에서 sample의 가공이 완료되면, 제어부는 집속이온빔 가공장치와 가공스테이지의 동작을 정지시키고, 가공챔버진공도어를 개방시키고, 가공매니플레이터를 구동시켜서 가공테이블에 적재되어 있는 sample을 sample이송테이블로 이동, 적재시킨다. 그런 다음, sample이송테이블을 진공이송챔버를 통하여 측정챔버쪽으로 이동시키고 가공챔버진공도어를 폐쇄한다.

sample이 적재된 sample이송테이블이 측정챔버쪽으로 이동되면, 제어부는 측정챔버진공도어를 개방하여 sample이송테이블을 측정챔버출입구에 위치시키고, 측정매니플레이터를 동작시켜, 시료이송테이블에 적재된 sample을 측정챔버 내부에 설치된 측정스테이지의 측정테이블로 이동 적재시킨다.

sample이 측정테이블에 적재되면, 제어부는 측정챔버진공도어를 폐쇄한 다음, 미리 저장되어 있는 측정프로그램에 따라 전자주사현미경과 측정스테이지를 구동시켜서 sample을 정밀 측정한다. 이때, 측정챔버진공도어는 폐쇄되며, 측정챔버의 내부 진공도는 지속적으로 측정되어 제어부로 전달되고, 제어부는 적정 진공도와 일치하도록 진공펌프를 구동시킨다. 또한, 제어부는 측정영상처리부로부터 전달되는 sample의 측정상태를 표시하여 작업자가 sample의 가공상태 및 가공치수 등의 측정을 모니터링 할 수 있도록 한다.

한편, sample의 측정과정에서 가공오류가 발생되면, 제어부는 가공오류데이터를 저장한 후, 전자주사현미경과 측정스테이지의 동작을 정지시키고, 위에서 설명된 절차의 역순으로 다시 진행한다. 이때 가공오류데이터와 미리 설정되어 있는 가공프로그램을 비교하여 sample의 가공 오류부분을 재가공하게 되며, 재가공된 sample은 전술한 이송과정을 통해 측정챔버 쪽으로 진공이송되어 재측정된다.

4. 결론

진공공간인 시스템챔버 내부에 각각 독립된 진공공간의 가공챔버와 측정챔버를 진공이송챔버로 연결되게 마련하고, 이들 가공챔버와 측정챔버에 각각 이온빔가공부와 전자주사측정부를 설치한 본 시스템은 sample이 독립된 진공챔버 내부에서 가공 및 측정, 이송되도록 함으로써, sample의 변형에 중요한 영향을 미치는 진공도를 적절히 유지할 수 있어 초미세 가공에서도 가공정밀도를 보장할 수 있어, 효율성과 생산성이 향상될 수 있고, 집속이온빔 가공장치와 전자주사현미경이 독립된 진공챔버 내에 설치되기 때문에, 방출이온에 의한 챔버, 렌즈 및 기기의 오염을 방지하여 장시간 사용이 가능하다. 이에 따라, 초미세 정밀 가공품의 대량생산을 도모할 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 “이온빔 이용 나노가공용 장비 개발” 과제의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Ishitani, T., ohnishi, T., Madokoro, Y., and Kawanami, Y., 1991, "Focused-ion-beam "cutter" and "attacher" for micromachining and device transplantation", J.Vac.Sci. Technol. B, Vol.9, No.5, pp. 2633~2637
- (2) Tanaka. Y., Karashima, M., Takanashi, K., Sakamoto, T., Owari, M., Nihei, Y., 2003, "Development of a chemically assisted micro-beam etching system for three-dimensional microanalysis", Applied Surface Science, 203-204, pp. 205~208
- (3) 장동영, 김동환, 최현중, 홍원표, 이종황, 2003, 이온빔이용 나노가공용 장비개발에 관한 산업분석, 산업자원부 연구기획보고서
- (4) 김연건, 2004, NANO WEEKLY-일,극미세 나노기술에 제조업 재기승부수, KISTI, pp. 8