

GaN 웨이퍼의 다이싱을 위한 스크라이빙 머신의 개발

Development of Scribing Machine for Dicing of GaN Wafer

차 영 업, 고 경 용

(Young-Youp Cha and Gyoung-Yong Go)

Abstract : After the patterning and probe process of wafer have been achieved, the dicing processing is necessary to separate chips from a wafer. The dicing process cuts a semiconductor wafer to lengthwise and crosswise directions to make many chips. The existing general dicing method is the mechanical cutting using a narrow circular rotating blade impregnated diamond particles or laser cutting. Inferior goods can be made by the mechanical or laser cutting unless several parameters such as blade, wafer, cutting water and cutting conditions are properly set. Moreover, we can not apply these general dicing method to that of GaN wafer, because the GaN wafer is harder than general semiconductor wafers such as GaAs, GaAsP, AlGaAs and so forth. In order to overcome these problems, this paper describes a new wafer dicing method using fixed diamond scriber and precision servo mechanism.

Keywords : scribing machine, GaN wafer dicing, dicing machine, semiconductor wafer

I. 서론

오늘날 대부분의 전자제품에는 저항, 콘덴서 등과 함께, 여러 가지 IC(Integrated circuit)칩이 실장된 PCB(Printed Circuit Board)와 발광다이오드(LED ; Light Emitted Diode) 등이 사용되고 있다. 이와 같은 IC칩과 LED용 칩의 제조과정은 단결정의 잉곳(Ingot)을 제작하고, 이를 Slicing하여 얇게 자른 다음, Polishing하여 표면을 평탄하게 하고, 웨이퍼 Processing에 따라서 차이는 있지만, Oxidize, Diffuse, Implant, Evaporate, Deposit를 한 후에, 마스크를 사용하여 Patterning을 하고 Etching을 반복한다. 그리고 Probing을 한 후에 다이싱(Dicing), Die Attaching, Lead Bonding, Encapsulating과 최종 시험(Testing)을 한다[1]. 여기서 반도체 웨이퍼의 다이싱 공정은 Patterning된 한 웨이퍼에서 다수의 칩들을 절단해서 개개의 칩으로 분리해내는 것을 말한다. 이와 같은 웨이퍼의 다이싱 공정은 다이아몬드 입자가 박힌 얇은 회전 블레이드(Blade)를 웨이퍼에 이송하여 절단하는 방법 [2]-[6]과 레이저를 이용한 절단 방법[7]-[9]이 반도체 웨이퍼 다이싱 기술로 가장 일반화되어 있다. 그 외에도 거의 사용되지 않는 Photo-lithography[10]나 Plasma etching[11] 방법이 있다.

다이아몬드 입자가 박힌 얇은 회전 블레이드를 이용한 다이싱 방법은 블레이드를 고속으로 회전시켜서 웨이퍼를 절단하여 개개의 칩으로 만든다. 이때 고속으로 회전하는 다이싱 블레이드의 아래에는 웨이퍼를 장착한 정밀 XYθ-스테이지가 있어서 웨이퍼를 각 방향으로 정확히 움직이고, 회전하는 블레이드를 Z-방향으로 일정한 깊이만큼 웨이퍼에 닿게 하여 절단하게 된다. 이때 웨이퍼와 다이싱 블레이드 사이에 절삭

유체를 공급한다[2]. 다른 한편으로 레이저를 이용한 다이싱 방법은 출력이 높은 CO₂, Nd : YAG, 엑시머(Excimer) 레이저 등을 이용하여 비접촉으로 웨이퍼를 절단한다[7].

그러나 다이아몬드 입자가 박힌 얇은 원형 블레이드를 이용하여 웨이퍼를 절단하는 다이싱 방법은 테이블의 느린 이송속도와 블레이드의 빈번한 교체에 따른 생산성 저하, 블레이드에 붙어있는 다이아몬드 입자의 과다탈락에 의한 웨이퍼의 열 발생과 부하증가에 따른 칩 불량발생, 웨이퍼 절단 방향과 다이싱 방향의 불일치에 따른 칩 파괴와 크랙발생, 수평방향 다이싱이 끝나고 수직방향 다이싱에서의 칩핑발생[3][4], 다이싱에서 필연적으로 발생하는 블레이드와 웨이퍼 절삭분말의 처리와 환경오염 문제가 심각하다. 더욱이 회전 블레이드를 이용한 다이싱 방법은 실리콘을 소재로 한 일반 IC 칩용 웨이퍼, 그리고 갈륨비소(GaAs), 갈륨비소인(GaAsP), 알루미늄갈륨비소(AlGaAs)를 소재로 한 범용 LED와 적외선 LED용 화합물 반도체의 다이싱에서는 별 문제가 없으나, 상대적으로 경도가 높은, 인조 사파이어로 불리는, 질화갈륨(GaN)을 소재로 한 청색 LED용 웨이퍼는 피삭재의 경도문제 때문에 다이싱이 불가능하다.

다른 한편으로 레이저를 사용한 다이싱 방법은 회전 다이아몬드 블레이드를 사용하는 다이싱 방법에 비해서 진동 문제가 없고, 재료 손실이 적으며, 더 높은 수율을 얻을 수 있다. 또한 다이싱 날과 절삭유체가 필요 없으며, 절단속도가 빠르고, 가공 유연성이 크다. 그러나 원하는 깊이로 절삭하기 위해 레이저의 파워를 정확하게 제어해야 하며, 부가의 레이저 광학계가 필요하다. 또한 열에 의한 잔류 응력과 변형이 생길 수 있고, 레이저 헤드에 부가의 냉각 시스템이 있어야 하며, 가공 정밀도가 레이저의 초점의 크기와 레이저 품질에 좌우되어 장비의 가격이 고가로 되고 제어가 복잡한 단점이 있다.

본 연구는 경도가 높아서 인조 사파이어로 불리는 질화갈륨계(GaN)의 화합물 반도체를 소재로 한 웨이퍼의 다이싱을 위하여 고정된 다이아몬드 스크라이버에 웨이퍼를 가

접수일자 : 2001. 5. 11., 수정완료 : 2002. 1. 31.

차영업 : 원광대학교 기계공학부(ggyocha@wonkwang.ac.kr)

고경용 : 원광대학교 대학원 기계공학과(kky@gaebiyok.wonkwang.ac.kr)

* 이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음.(KRF-99-041-E00063)

로와 세로 방향으로 이송시켜 스크라이빙하는 새로운 개념의 웨이퍼 다이싱을 위한 스크라이빙 머신의 개발에 대한 것이다. 이 방식은 회전하는 블레이드 대신 고정된 절삭 날로 다이아몬드 팁이 있는 스크라이버를 사용한다. XY-테이블에 수직으로 설치된 Z-테이블에 장착되어 있는 다이아몬드 스크라이버가 원하는 절삭 깊이만큼 위치하게 되면, 웨이퍼를 고정시키는 척 테이블을 장착한 XY-테이블의 움직임에 따라 원하는 깊이로 스크라이빙된다. 여기서 스크라이버는 경도가 높고 취성에 약한 재료인 웨이퍼에 알맞도록 선택되어야 하며, 스크라이버의 각도, 웨이퍼의 이송속도, 스크라이버에 가해지는 하중, 그리고 절삭깊이가 스크라이빙에 중요한 변수가 된다. 또한 스크라이빙하는 동안 Z-방향의 운동이 안정되어 스크라이버가 웨이퍼를 누르는 힘이 일정하지 않으면 LED 칩에 손상을 줄 수 있다. 개발된 시스템에서는 이와 같은 여러 가지 스크라이빙 조건들을 고려하였고, 다이아몬드 스크라이버와 함께 검사 카메라를 두어 온 라인 검사가 가능하도록 하였다. 본 연구에서는 이와 같은 스크라이빙 머신을 설계, 제작하고, 이를 이용하여 절화갈륨 소재의 인조 사파이어 웨이퍼를 직접 스크라이빙하고, 그 결과를 현미경 사진을 통하여 보여줌으로써, 개발된 스크라이빙 머신의 성능을 확인할 것이다.

II. 기존 다이싱 공정

그림 1은 다이아몬드 입자가 부착된 회전 블레이드를 사용하는 기존의 다이싱 머신을 보여주고 있다. 그리고 그림 2는 이러한 다이싱 머신에서 각 운동부의 축을 나타낸다. 웨이퍼 다이싱 과정은 XY-테이블 위에 장착된 척 테이블(chuck table)에 다이싱 할 웨이퍼를 올려놓고, Z축 방향으로 상하 이동하고 Y축 방향의 고속 스피들 축에 다이아몬드 입자가 날 끝에 박힌 얇은 블레이드를 회전시키고, XY-테이블을 X축 방향으로 이송시키면서 다이싱이 이루어진다. 한 Line의 절단이 끝나면 다음 Line의 절단을 위해 회전 블레이드는 Z축 방향으로 상하 이동하고, 웨이퍼는 칩의 간격만큼

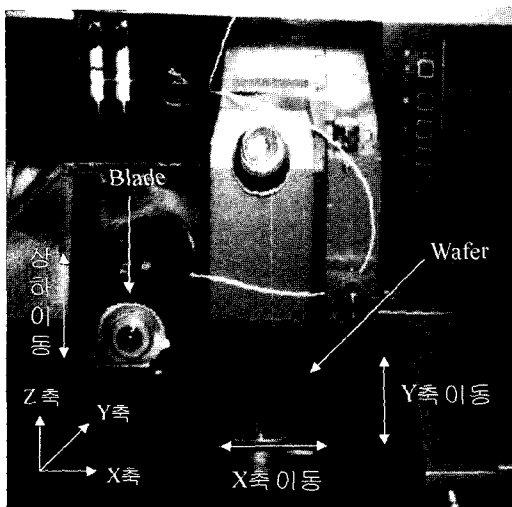


그림 1. 회전 블레이드를 이용한 기존의 다이싱 머신 사진.
Fig. 1. Photograph of a existing dicing machine using rotating blade.

Y축 방향으로 이동한다. 그리고 X축이 리턴(return)한 후, 회전 블레이드의 Z축이 하향 이동하고, 테이블이 X축 방향으로 이동하면서 다음 Line이 다이싱 된다. 이러한 과정을 반복하면서 웨이퍼를 절단한다.

그림 3은 범용 LED용 갈륨비소(GaAs)를 소재로 한 웨이퍼의 다이싱 경우에 웨이퍼와 블레이드의 관계를 도식적으로 보여준다. 이러한 웨이퍼 다이싱에서는 일반적으로 블레이드 표면에 다이아몬드 입자가 박힌 것을 사용하고, 블레이드 두께는 15~20 μm, 외경은 50mm, 회전속도는 30,000rpm이다. 그리고 웨이퍼 두께는 약 260 μm이고, 다이싱 된 웨이퍼의 폭은 블레이드의 두께보다 약간 커지는데, 이 폭을 Kerf라 하고 20~25 μm 정도가 된다. 웨이퍼를 고정시키는 테이프(PVC)의 두께는 40~50 μm이다. 테이프와 웨이퍼 사이에는 접착부가 있고, 이 두께는 20~30 μm이다. 다이싱 과정에서 블레이드는 웨이퍼를 통과해서 접착부를 약 10 μm만큼 더 들어간다. 일반적으로 다이싱 작업 후 생성되는 칩은 여러 가지가 있지만, 보통 가로 0.25mm, 세로 0.25mm, 높이 0.26mm의 크기를 갖는다. 그리고 회전하는 블레이드는 블레이드 헤드의 스피들에 장착되어 Z축 방향으로 상하 이동한다. 웨이퍼를 진공적으로 고정하는 척 테이블이 장착된 XY-테이블의 X방향은 블레이드 면과 평행하고, 이송속도는 15~17 mm/sec이다.

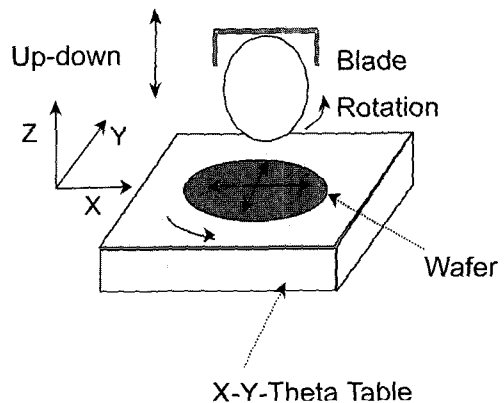


그림 2. 그림1의 다이싱 머신의 운동 축.
Fig. 2. Moving axes of dicing machine of Fig. 1.

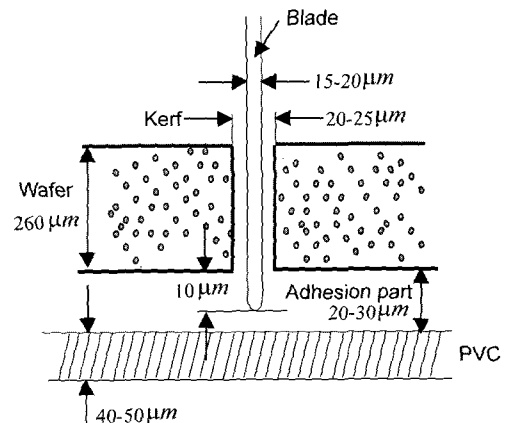


그림 3. 다이싱 상태에서 웨이퍼와 블레이드.
Fig. 3. Wafer and blade at dicing state.

III. 스크라이빙 머신 설계

1. 시스템 사양과 구조 결정

II장에서 설명한 회전 다이아몬드 블레이드를 이용한 기존의 다이싱 방법은 실리콘을 소재로 한 일반 IC 칩용 웨이퍼, 그리고 갈륨비소(GaAs), 갈륨비소인(GaAsP), 알루미늄 갈륨비소(AlGaAs)를 소재로 한 범용 LED와 적외선 LED용 화합물 반도체의 다이싱에서는 별 문제가 없으나, 상대적으로 경도가 높은, 인조 사파이어로 불리는, 질화갈륨(GaN)을 소재로 한 청색 LED용 웨이퍼는 피삭재의 경도문제 때문에 다이싱이 불가능하다. 뿐만 아니라, 절단 시 열 발생과 진동의 영향으로 크랙과 칩핑 등의 다이싱 불량이 나타난다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 새로운 개념의 GaN 웨이퍼 다이싱을 위한 스크라이빙 머신을 개발하였다. 스크라이빙 머신에서 요구되는 최소한의 기능을 포함하고 요구되는 축수를 최적화하기 위해서, 웨이퍼를 장착한 척 테이블의 XY-방향 이동과 θ -방향 회전이 필요하고, 스크라이버의 Z-방향 이동이 필요하다. 각각의 이동 기구의 중복과 간섭 그리고 행정을 고려하여 배치하면 축의 수를 늘이지 않고 최적의 스크라이빙 장비 구성이 가능하다. 본 연구에서는 스크라이빙 머신의 최적 구성을 위하여 그림 4에서 보는 것처럼 3축으로 구성된 XY θ -테이블에 척(Chuck) 테이블을 장착하고, 그 위에 웨이퍼를 진공으로 고정하도록 하였다. 그리고 웨이퍼의 스크라이빙 위치를 카메라로 인식한 후 Z축 방향으로 이동하는 다이아몬드 스크라이버를 이용하여 XY θ -테이블과 함께 가로·세로방향으로 스크라이빙하도록 4축으로 구성하였다.

본 연구에서 개발된 스크라이빙 머신의 사양은 다음과 같다. 먼저 웨이퍼의 스크라이빙을 위한 수평이송과 칩 간격만큼의 이동을 위한 X와 Y-테이블의 이동범위는 각각 150mm 이고, 각 축의 분해능은 1 μ m이다. 그리고 스크라이빙을 위한 Y축 이송속도는 1~400mm/sec 까지 조절이 가능하다. 또한 웨이퍼와 스크라이버의 정렬을 위한 θ -테이블의 회전각도는 $\pm 360^\circ$ 이고, 분해능은 0.001 $^\circ$ 이다. 스크라이버의 상하이송을 위한 Z-테이블의 이동범위는 100mm이고, 분해능은 1 μ m이다. 웨이퍼의 정렬과 외곽인식을 위한 CCD 카메라의 FOV(Field of View)는 1mm \times 1mm가 되도록 광학계를 제작 사용하였다. 그리고 스크라이버가 웨이퍼에 가하는 하중을 20g~500g까지, 스크라이버가 지면과 이루는 각도를 0~90 $^\circ$ 까지 가변할 수 있도록 하였다. 또한 스크라이버 자중에

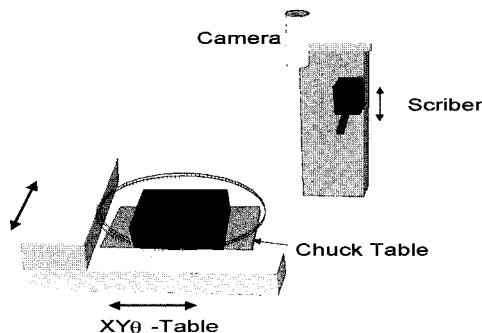


그림 4. 스크라이빙 머신의 개념설계.
Fig. 4. Layout of scribing machine.

의한 Suspension system으로 LM Guide를 부착하여 스크라이빙 시 충격을 흡수할 수 있도록 설계하였다. 그림 5는 이러한 스크라이버의 취부부를 보여주고 있다.

이와 같이 개발된 장비로 스크라이빙 할 수 있는 웨이퍼는 회전 블레이드를 사용하는 기존의 다이싱 머신에서 절단할 수 없는 질화갈륨 소재의 웨이퍼뿐만 아니라, 갈륨비소, 질화갈륨비소 등의 웨이퍼도 스크라이빙이 가능하다. 그리고 본 장비로 스크라이빙이 가능한 웨이퍼의 최대직경은 127mm(5in) 이고, 스크라이빙할 수 있는 칩은 최소 0.10mm \times 0.10mm이다. 이러한 사양들은 현재 사용되는 IC 칩과 LED에서 가장 작은 크기의 칩을 기준으로 결정하였기 때문에 범용 웨이퍼 절삭 시스템의 사양으로도 충분하다.

2. 스크라이빙 머신의 구성

그림 6은 전체 시스템의 신호 흐름도를 보여주고 있다. Host PC에서는 각 축에 장착된 4개의 모터를 구동하고, 카메라로부터 입력된 영상 데이터를 처리하여 스크라이빙 작업

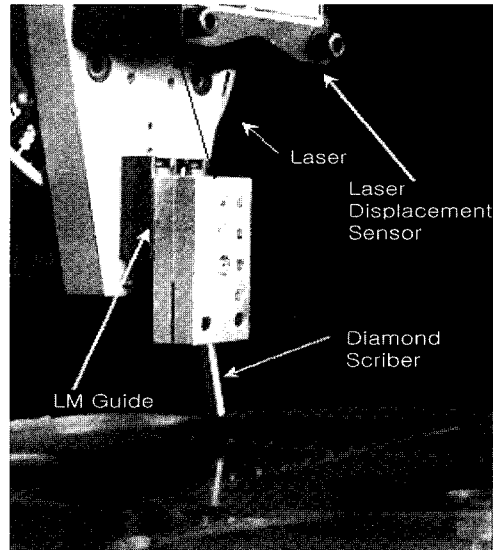


그림 5. 스크라이버 취부부.
Fig. 5. Scriber part.

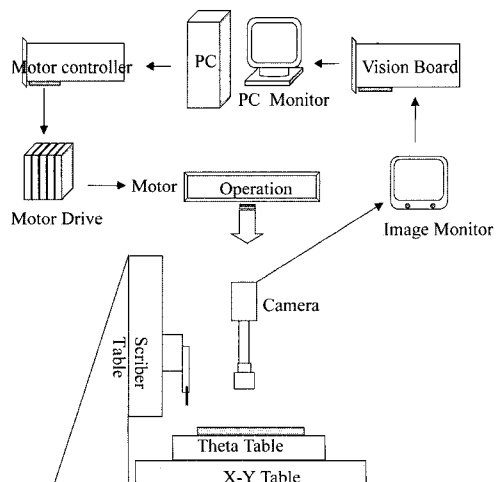


그림 6. 스크라이빙 머신의 신호 흐름도.
Fig. 6. Signal flow diagram of scribing machine.

을 자동으로 수행하도록 한다. 여기서 각 축에 장착된 모터는 모터 드라이버와 컨트롤러에 의해서 제어되고, 그 결과로 변화된 웨이퍼의 위치 등은 카메라에 의해서 영상 모니터에 나타나며, 이를 영상처리 한 후, 그 데이터를 활용하여 Host PC에서 작업명령을 모터 컨트롤러에 지시하여 모터를 구동 시킴으로써 연속된 스크라이빙 작업을 자동으로 수행하게 한다.

이와 같은 스크라이빙 머신은 Host PC부, 위치 결정부, 영상 처리부, 그리고 스크라이버 취부부로 크게 4부분으로 나눌 수 있다.

1) Host PC

스크라이빙 시스템의 S/W가 실행되는 부분으로 IBM 호환 586-PC를 사용하였다. 이는 위치결정부와 영상처리부를 포함한 주변장치를 통제하며, 스크라이빙 알고리즘을 구현하는 부분이다.

2) 위치 결정부

웨이퍼를 고정시키는 진공척을 장착한 척 테이블을 이송하고 회전시키는 XY θ -테이블과 스크라이버를 상하 이동시키는 Z-테이블 본체와 모터, 드라이버, 컨트롤러로 구성되어 있다. 각 축의 모터는 4000count/rev의 100W AC 서보 모터를 사용하였다.

3) 영상처리부

웨이퍼를 자동으로 스크라이빙하기 위해서는 작업영역 설정을 위한 웨이퍼의 형상 인식과 웨이퍼의 칩 패턴과 XY-테이블의 자동 정렬이 필요하다. 이를 위하여 Teli 8330 카메라와 광학장치, 그리고 삼성 MVB-03 비전 보드를 사용하였다.

4) 스크라이버 취부부

웨이퍼를 스크라이빙할 때는 웨이퍼의 재질과 두께에 따라서 스크라이버에 가해지는 하중, 그리고 웨이퍼와 스크라이버 사이의 각도를 조절해야 한다. 이를 위하여 다이아몬드 스크라이버를 취부하는 부분에 스크라이버 하중조절장치와 각도조절장치를 부착한다.

IV. 스크라이빙 알고리즘과 실험

그림 7은 III 장에서 언급한 사양과 구성으로 제작된 스크라이빙 머신을 보여주고 있다. 그리고 이 스크라이빙 머신의 구동 순서는 그림 8과 같다. 먼저 XY θ 그리고 Z-축 모터의 원점 센싱을 포함한 장비의 초기화가 이루어지고, Y-축을 움직여서 웨이퍼를 CCD 카메라의 시야에 들어오게 한 다음, CCD 카메라로부터 입력된 영상을 처리하고 θ -축 모터를 이용하여 웨이퍼를 정렬한다. 그리고 XY-축 모터와 CCD 카메라를 이용하여 웨이퍼의 윤곽을 생성한다. 최초 스크라이빙 할 위치로 XY-축 모터를 이동시키고, 스크라이버를 스크라이빙할 깊이만큼 Z축 모터를 이용하여 이동(하강)하고, Y축 모터를 이용하여 한 Line을 스크라이빙한다. 한 Line의 스크라이빙이 끝나면 대기 위치로 Z축 모터가 이동(상승)하고 다음 스크라이빙 할 Line으로 XY-축 모터를 이동시킨다. 웨이퍼 한쪽 방향이 모두 스크라이빙이 되도록 이 과정을 계속 반복한다. 웨이퍼의 한쪽 방향이 모두 스크라이빙 되면, θ 축 모터를 이용하여 웨이퍼를 90° 회전시키고, 다시 위의 스크라이빙 과정을 반복한다.

그림 9는 다이아몬드 스크라이버의 팁부분을 보여주고 있다. 이 그림에서 보면, 다이몬드 팁에는 120° 마다 인선이 있어서 이를 웨이퍼의 스크라이빙 위치에 정확히 일치하도록 해야 한다. 그림 10은 본 연구에서 제작한 스크라이빙 머신으로 GaN 웨이퍼의 스크라이빙 전(a), 스크라이빙 후(b), 그리고 브레이킹 후(c)의 확대사진을 보여주고 있다. 그림 10(a)에서 보는 것처럼 GaN 웨이퍼는 투명이고, 칩 1개의 크기는 가로 2.0mm, 세로 2.0mm 이다. 본 실험에서의 스크라

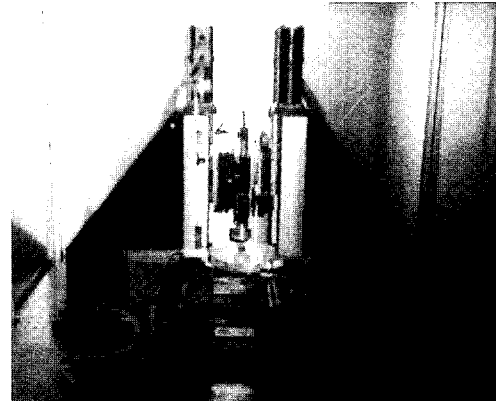


그림 7. 개발된 스크라이빙 머신의 사진.
Fig. 7. Photograph of scribing machine.

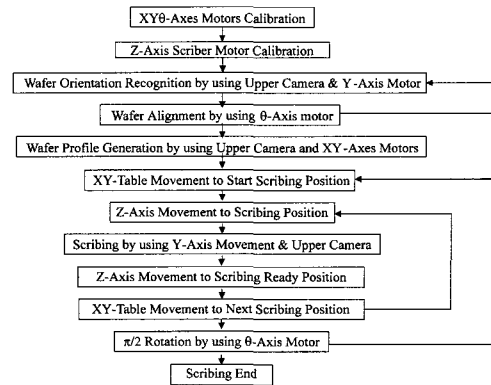


그림 8. 스크라이빙 순서.
Fig. 8. Sequence of scribing.



그림 9. 다이아몬드 스크라이버 팁.
Fig. 9. Diamond scribe tip.

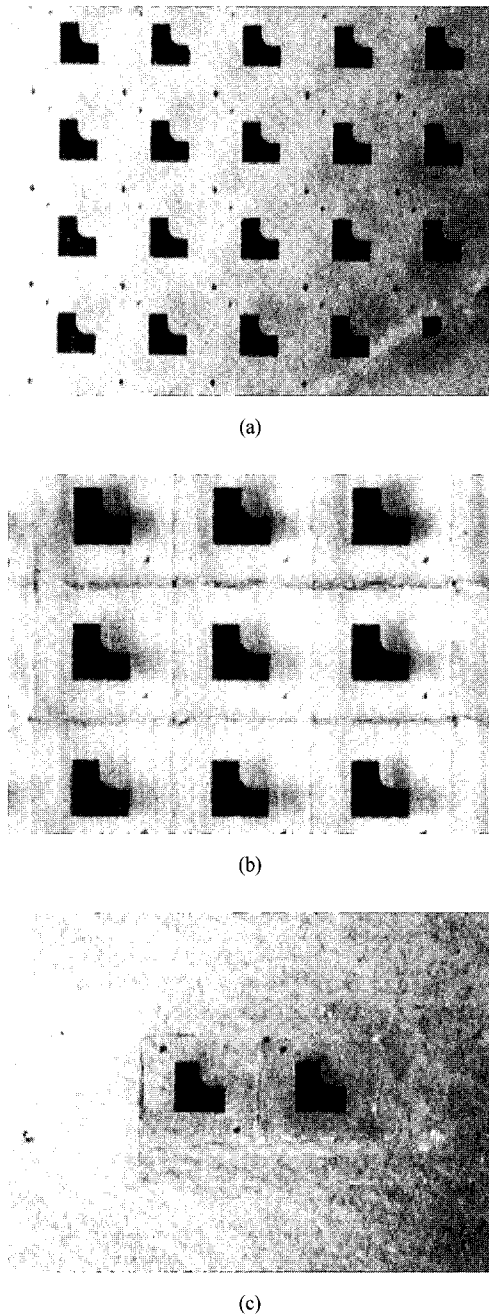


그림.10. GaN 웨이퍼의 스크라이빙 전(a), 스크라이빙 후 (b), 그리고 브레이킹 후(c)의 사진.
 Fig. 10. Photograph of GaN wafer before scribing(a), after scribing(b), after breaking(c).

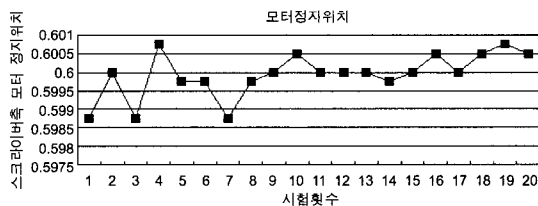


그림.11. 스크라이버와 레이저 변위센서를 이용한 웨이퍼 높이측정(mm) 실험결과.
 Fig. 11. Experimental result of height measurement of wafer by using scribe and laser displacement sensor.

이빙 속도는 200mm/sec, 스크라이버 각도는 70°, 그리고 스크라이버에 가해지는 하중은 40g으로 하였다. 그림 10(b)는 그림 10(a)의 GaN 웨이퍼를 가로와 세로방향으로 스크라이빙한 결과를 보여주고 있다. 여기서 스크라이빙 폭은 약 5 μm 로 일정하였고, 스크라이빙은 성공적으로 수행되었다. 그림 10(c)는 스크라이빙된 GaN 웨이퍼에서 각각의 LED 소자를 브레이킹 한 후의 사진을 보여주고 있다. 이렇게 스크라이빙과 브레이킹된 LED 소자를 이용하여 1cd급의 청색 LED제품을 제작할 수 있었다. 그림 11은 스크라이버와 레이저 변위센서를 이용한 웨이퍼 높이측정 실험결과를 보여주고 있다. 세로축의 단위는 mm이고, 20회 반복 실험에서 오차는 2μm 이하였다.

결과적으로 이와 같은 스크라이빙 머신은 회전 다이아몬드 블레이드를 이용한 기존의 다이싱 방법으로는 불가능한 GaN 웨이퍼를 다이싱할 수 있을 뿐만 아니라, 내부 크랙과 진동의 영향이 거의 없었으며, 이송속도도 17mm/sec에서 200mm/sec로 최소 10배 이상 크게 할 수 있어 생산성을 향상시킬 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 일반 웨이퍼보다는 상대적으로 경도가 높아서, 회전 다이아몬드 블레이드를 사용하는 기존의 다이싱 머신에서는 절단이 불가능한, 질화갈륨(GaN)계의 화합물 반도체 웨이퍼를 다이싱하기 위하여, 고정된 다이아몬드 스크라이버에 웨이퍼를 가로와 세로 방향으로 이송시켜 스크라이빙하는 새로운 개념의 반도체 웨이퍼 다이싱을 위한 스크라이빙 머신을 개발하였다. 이를 이용하여 질화갈륨 소재의 인조 사파이어 웨이퍼를 직접 스크라이빙하고, 브레이킹하여 1cd급의 청색 LED를 제작할 수 있었다. 뿐만 아니라 이와 같은 스크라이빙 머신은 회전 다이아몬드 블레이드를 이용한 기존의 다이싱 방법에 비하여 내부 크랙과 진동의 영향이 거의 없으며, 이송속도도 10배까지 크게 할 수 있어 생산성을 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

- [1] V. G. Oklobdzija and E. R. Barnes, "On implementing addition in VLSI technology," *IBM T. J. Watson Research Center*, 1988.
- [2] Assembly Technology, "Dicing saw cuts wafers easily, accurately," *Machine Design*, vol. 66, no. 13, 1994.
- [3] 고경용, 차영엽, 최범식, "신호처리를 이용한 웨이퍼의 다이싱 상태 모니터링," 한국정밀공학회지, 제17권, 제5호, pp. 70-75, 2000. 5.
- [4] 고경용, 차영엽, 최범식, "역전과 알고리즘을 이용한 웨이퍼의 다이싱 상태 모니터링," 제어 자동화 시스템공학회지, 제6권, 제6호, pp. 486-491, 2000. 6.
- [5] A. Hassui, A.E.Diniz, et al., "Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission," *Wear*, vol. 217, pp. 7-14, 1998.
- [6] K.Subramanian, S.Ramanath, and M.Tricard, "Mechanism of material removal in the pression production grinding of ceramics," *Journal of Manufacturing Science and Engi-*

neering, vol. 119, pp. 509-519, 1997.

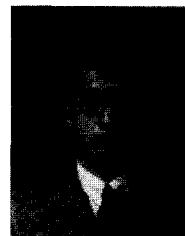
- [7] S. Avagliano, N. Bianco, O. Manca, and V. Naso, "Combined thermal and optical analysis of laser back-scribing for amorphous-silicon photovoltaic cells processing," *International Journal of Heat & Mass Transfer*, vol. 42, no. 4, pp. 645-56, 1999.
- [8] I. T. Collier, M. R. J. Gibbs, and N. Seddon, "Laser ablation and mechanical scribing in the amorphous alloys VAC 6030 and METGLAS 2605 SC," *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 111, no. 3, pp. 260-272, 1992.

- [9] S. R. Wenham, B. O. Chan, and C. B. Honsberg, "Green MA. Beneficial and constraining effects of laser scribing in buried-contact solar cells," *Journal of Progress in Photovoltaics : Research & Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 131-137, 1997.
- [10] A. Wang, J. Zhao, and M. A. Green, "24% efficient silicon solar cells," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 602, 1990.
- [11] C. Chong, K. Davies, et al., "Plasma grooved buried contact silicon solar cells," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 4135, 1991.



차 영 엽

1961년 11월 18일생. 1984년 부산대 기계공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 생산공학과(석사), 한국과학기술원 정밀공학과 박사(1995). 1995 - 현재 원광대학교 기계공학부 부교수. 관심분야는 이동로봇, 영상처리, 지능제어.



고 경 용

1972년 4월 28일생. 1997년 원광대 기계공학과 졸업. 1998년~동대학원 석사 과정. 관심분야는 신호처리, 영상 처리. 이동로봇.