

특집 : 층간절연막의 라만분광학분석

Silicon 기반 IC 디바이스에서의 층간 절연막 특성 분석 연구

권순형 · 표성규[†]

중앙대학교 융합공학과 나노공학

Raman Spectroscopy Analysis of Inter Metallic Dielectric Characteristics in IC Device

Soon Hyeong Kwon and Sung Gyu Pyo[†]

Department of Nano materials Science & Engineering, School of Integrative Engineering, Chung-Ang University, Heuk-seok-ro 84, Dong-jak-gu, Seoul 06911, Korea

(Received December 12, 2016: Corrected December 13, 2016: Accepted December 16, 2016)

Abstract: Along the few nano sizing dimensions of integrated circuit (IC) devices, acceptable interlayer material for design is inevitable. The interlayer which include dielectric, interconnect, barrier etc. needs to achieve not only electrical properties, but also mechanical properties for endure post manufacture process and prolonging life time. For developing intermetallic dielectric (IMD) the mechanical issues with post manufacturing processes were need to be solved. For analyzing specific structural problem and material properties Raman spectroscopy was performed for various researches in Si semiconductor based materials. As improve of the laser and charge-coupled device (CCD) technology the total effectiveness and reliability was enhanced. For thin film as IMD developed material could be analyzed by Raman spectroscopy, and diverse researches of developing method to analyze thin layer were comprehended. Also In-situ analysis of Raman spectroscopy is introduced for material forming research.

Keywords: IC device, intermetallic material, intermetallic dielectric, Raman spectroscopy, IMD, thin film, in-situ

1. 서 론

Integrated circuit(IC) 디바이스의 나노-사이즈화는 제기된 많은 기술적 장벽들을 허물고 계속해서 진행되고 있다. 특히 resistance-capacitance(RC) delay를 비롯하여 low-k 물질 개발, 공정 연계, electron migration(EM)과 같은 기술적 장벽들은 반도체 연구 단체인 international technology roadmap for semiconductors(ITRS)를 비롯하여 다양한 기관에서 보고 하였고, 핵심적인 발전을 통해 현재 10 nm 대의 Si 기반 IC 칩 생산을 가능하게 하였다.^{1,2)} Back end of line(BEOL) RC 개선 기술개발과 더불어 진행되고 있는 소형화 추세에 맞추어 SiCOH($k \leq 2.55$)로 대표되는 low-k 층간 절연막(intermetallic dielectric)을 구성하는 물질은 추가적으로 개선되어야 할 핵심 목표이다.³⁾ 2020년 이후에는 air gap($k=1.0$)이나 k value 2.0 이하의 metal organic framework(MOF), covalent organic framework(COF)과 같은 신물질을 기반으로 하여 형성되어, k value가 2.0

이하로 구성되는 목표가 제시되어 있다. 현재 사용되는 물질들은 다공성(porous)이나 공동(empty) 구조로 되어 있어, 후속 공정과 기계적 특성에 있어 고성능 반도체를 구성 하는 것에 voids나 crack을 유발하는 stress의 주요 유발 원인이 될 수 있다.^{4,6)}

층간 절연막을 형성하는 과정은 핵심적으로 chemical vapor deposition(CVD) 공정이 사용된다. 최근의 연구에서는 low-k 유기물 막을 증착 하기 위하여 spin coating 방식의 증착을 하기도 한다.⁷⁾ 이를 분석하기 위하여 사용되는 장비로는 transmission electron microscopy(TEM), auger electron spectroscopy(AES), focused ion beam(FIB), X-ray photoelectron spectroscopy, Nuclear magnetic resonance를 포함한 다양한 장비가 있다.⁸⁾ 원하는 박막의 성막과 관련하여 정밀한 분석을 위해 현재도 활발히 사용되고 있다.^{2,9,10)} 박막 형성 후 분석을 위해 사용되는 장비들과 대비하여 라만 분광 분석기의 장점은 막의 성분과 도핑 상태와 같은 정밀한 정보를 포함하며 이와 더불어 열적, 물

[†]Corresponding author
E-mail: sgpyo@cau.ac.kr

© 2016, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

리적으로 발생한 스트레스와 같은 정보들을 분석 가능한 장점이 있다.¹¹⁾ 이와 더불어 광 전달 원리를 이용한 *in-situ* 분석을 통하여 기존의 장비들과 대비하여 단시간 내에 형성하고자 하는 층간 절연막에 대한 특성과 상태에 대한 분석이 가능하다. 패턴 후 Cu 증착 된 IC 디바이스에서 라만 분광분석기를 통하여 층간 절연막을 분석하여, 증착을 통하여 분자구조의 변화가 발생함을 확인하였다.^{12,13)} 이러한 과정을 통해 형성된 low-k 물질이 후속 공정인 *dicing*, *assembling*, *packaging*의 과정에서 특성을 유지하는 것이 필요하다.^{1,3)}

본 논문에서는 라만 분광 분석기를 사용하여, 반도체에 사용되는 층간 절연막(IMD)을 중점적으로 분석하고자 라만 분광 분석기를 이용한 층간 절연막과 관련한 박막들의 분석기술들을 제시하였다. 특정한 구조와 관련된 국소부위의 기계적 스트레스의 라만 분광 분석 방법은 1996년 Ingrid De wolf의 원리와 방법적 리뷰 연구와 관련하여 파생된 연구들과 최신 연구 결과들을 소개하고자 하였다.^{13,14)} 또한 박막의 상태 분석 및 high-k 물질로 사용되는 박막에 대한 분석 결과의 *in-situ* 분석 방법의 개발 결과를 중점적으로 다루어 보고자 하였다.

2. Si 기판 내 국소 부위 라만 분석 방법

라만 분광 분석기를 이용한 층간 절연물질 분석을 위한 기본적인 라만 분광 분석방법과 이론을 소개하고자 한다. 이와 더불어 최근에 소개된 실리콘 IC 디바이스 기판 내의 미세 구조들과 그 구성 물질에 대한 라만 분석기로 분석 가능한 물질의 특성과 상태에 대한 분석 방법들과 결과들을 분류하였다.^{3,11,12)}

이번 연구에서 주요 분석 대상으로 다루고 있는 라만 분광 분석기는 개발 후 지속적으로 광원 발생 장비와 분광 분석기의 불안정함으로 인해 분석의 정확성이 문제가 되었던 과거와 달리, 광원 및 *charge-coupled device*(CCD)의 비약적 발전으로 인해 분석에 대한 신뢰도가 향상되고 있다. 하지만 IMD나 high-k와 같은 반도체 구조에서 사용되는 박막의 두께는 현재 얇게는 수~수 십 Å으로 분석하고자 하는 대상에 대한 특성을 분석하는 것에 여전히 완전한 성능을 나타내고 있지 못하였다.⁶⁾ 특히 광원 초점과 초점 주변의 수 μm 크기의 *depth of focus*(DOF)의 존재에 따라 정확한 획득에 어려움이 있다. 이러한 광학적 문제들을 해결을 위해 조건의 설정과 설계가 필요하다. 라만 분광 분석기의 분석 원리와 관한 연구로서 *strain*이나 *stress*에 따른 *phonon*의 *frequency* 변화에 대한 기초연구들이 다수 진행되어 왔다.^{15,16)} 이를 응용한 구조 내 분석 결과의 해석과 박막 간 현상에 대한 연구들이 수행되어야 한다.

2.1. Practical: 라만 분광 분석 조건

라만 분광분석기를 사용하기 위해서는 기본적인 몇 가

지 분석 기능이 필요하다. 대표적인 분석 조작 변수 바로 광원의 파장, *confocal* 시스템에서의 대물렌즈, 에너지 조사량이 있다. 이들은 분석 대상이 되는 물질의 광학적 특성을 반영하여 결정하여야 한다. 뿐만 아니라 분석대상의 광학적 특성 또한 면밀하게 검토되어 분석에 적용되어야 한다.^{13,17)}

먼저 국소부위를 정밀하게 분석하기 위한 *confocal system*의 사용을 위한 라만 분광 분석기에서의 광학적 특성 설계가 있다. 대물렌즈의 경우 렌즈 배율, *numerical aperture*(NA), *focal length*, *immersion*, 파장별 *transparency* 등과 같은 다양한 조건들이 라만 시스템과 관계가 있다. 관계가 되는 다양한 조건들은 아래와 같이 라만 분석 성능과 특징들을 나타낸다.¹⁷⁾ 수식 1의 D는 레이저가 대물렌즈에서 입사되는 사이즈이다. f는 초점거리이다. λ는 사용한 레이저 광원의 파장이다.¹⁸⁾ 수식 (2)의 λ는 사용한 레이저 광원의 파장이다. N.A.은 *numerical aperture*이며 각 매질에 따라 구경과 초점거리를 통해 결정된다.¹⁹⁾

$$DOF = 2.5 \times \lambda \times \left(\frac{f}{D}\right)^2$$

수식 1 Depth of focus 관계식

$$\text{Laser spot diameter} = \frac{1.22\lambda}{NA}$$

수식 2 미세 부위 분석을 위한 2D 레이저 지름 관계식

층간 절연막과 같은 수 nm 이하의 박막을 정밀하게 분석하기 위하여, 고배율의 대물렌즈를 이용하여 분석을 진행한다. 이는 라만 분광 분석의 *depth of focus*와 높은 NA 수치와 연관이 있다. 높은 배율은 특히 DOF 관계식인 초점과 NA와 연관이 되어 있다. 또한 높은 NA는 *laser spot*의 지름을 줄이며, 이를 더욱 줄이기 위하여 기름이나 물 등의 액체를 사용해 *immersion*을 하기도 한다. 더욱 높아진 NA를 통해 많은 양의 광을 라만 분광 분석기로 전달하고, 다양한 분석적인 이점을 가진다. 이처럼 소개한 수식 (1)과 (2)를 포함한 광학적 특성을 설계하여 분석에 반영하여야 한다.^{12,20,21)}

앞서 소개한 모든 광학적 조건들을 분석 대상이 되는 물질을 분석하기 위하여 최적화 설계하는 것이 필요하며, 이를 통해 보다 정밀하고 의미 있는 정보를 라만 분광분석기를 통해 분석해 낼 수 있을 것이다.^{13,17,19,20)}

2.2. Si 기판 패턴 IC 디바이스 내에서의 분석

기존의 전기적 특성 분석을 위한 모니터링은 *in-line*에서 공정을 분석하기 위하여 *scribe line*이라는 테스트 분석 라인을 이용한다. 라만 분광 분석기를 이용하여 NAND flash device의 poly Si의 그레인 사이즈를 분석하기도 하였다.²²⁾ 이처럼 라만 분광분석기를 이용한 대면적 분석이 가능하면, 테스트 및 성능 분석을 위한 과정에 신뢰도를 더 할 수 있을 것이다. Si 패턴 디바이스 내에서의 층간

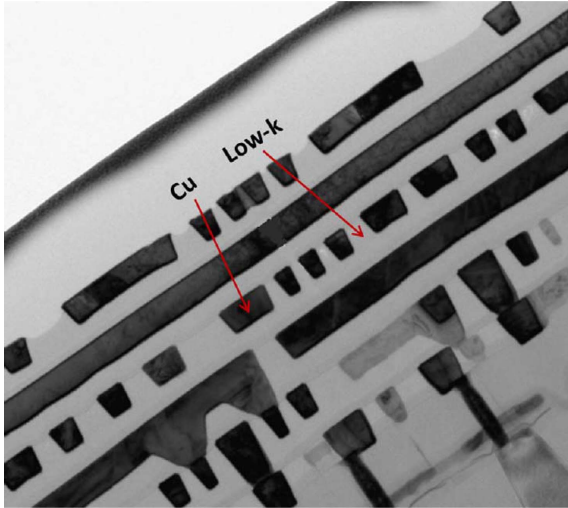


Fig. 1. IC 디바이스의 TEM Cross-section view by CMOS process¹¹⁾

절연막을 포함한 미세 구조와 물질의 상태를 분석하기 위하여 라만 분광분석기를 이용하여 분석한 실험이 진행되었다. 특히 패턴된 IC 디바이스 구조 내에서 라만 스펙트럼의 결과 분석을 통한 층간 절연막 구성물질의 변화 영향(스트레스, TDDB)을 평가한 연구들이 진행되었다. 이러한 연구들은 Si 패턴 디바이스 내에서의 라만 분광 분석기를 이용한 특성 분석 방법이 개발될 시 이를 사용함에 따른 분석 결과를 개발에 이용할 수 있는 과정으로 진보할 수 있는 가능성이 크다.

또한 분석 대상이 되는 물질과 더불어 다양한 물질들이 IC 디바이스를 구성하는데 사용되고, 얇은 박막 상태와 미세 구조를 이루며 Fig. 1¹¹⁾과 같은 상태로 존재한다. 이러한 구조와 복잡한 물질 속에 증착된 박막의 신호를 적절히 분리하여, 분광 분석기를 통해 분석하고자 하는 물질의 특성을 파악하는 것이 개발의 주요 목표이다. 기존의 방법을 이용한 연구로는 He et al. 연구팀에서 새로운 층간 절연막을 이용하여 IC 디바이스를 구성하고 infant mortality(IM) 테스트를 약 168시간 동안 진행하며, SIMS를 이용하여 Cu가 Low-k 층간 절연막에 침투한 것을 분석해내었다.^{6,23)} TDDB 결과에 영향을 미칠 수 있는 현상으로 이러한 분석 결과를 라만 분광 분석기를 통하여 in-situ로 분석해 낸다면, 어떤 결합으로 인해 Cu가 층간 절연막 내로 확산 됐는지를 분석할 수 있을 것이다. 이를 이용하여 공정 개선을 할 수 있는 개발이 이어질 수 있다.

Si 기판 내에서의 층간 절연막 분석을 위해 앞서 소개한 종합적인 광학적 특성을 반영한 설계가 필요하다. 이를 통해 다음과 같은 분석 대상의 설정과 분석 범위의 소형화를 통해 공간 좌표 상에서의 분석 범위를 최소화하는 과정으로 정밀한 분석이 가능하다. 아래 그림과 같이 confocal 시스템을 설계하고, 국소 부위를 분석할 수 있다.

Huang et al.은 가시광선과 UV를 이용한 time dependent

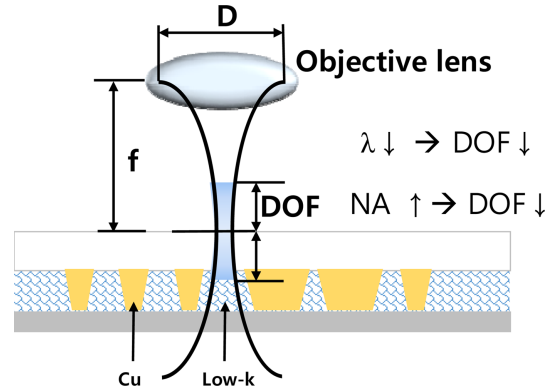


Fig. 2. Low-k 라만 분석과 대물 렌즈 광학 성능 설정

dielectric breakdown(TDDB)를 테스트 하였다. 기존의 전류 인계 방법을 이용하며, low-k 층간 절연막의 변화에 관점에서 분석을 통해 분자적 변화를 관찰하였다.^{11,12)} 특징적으로 dual damascene 방법으로 형성한 IC device 내에서의 Fig. 2와 같이 confocal system으로 100배의 대물 렌즈를 이용하여 1 μm 이하의 광원 입사를 통해 분석을 진행한 것이다. 이 연구에서는 두 가지 다른 파장의 광원을 사용하였고, 중점적으로 가시광선과 UV를 이용하여 SiCOH의 유기 층간 절연막을 분석하여 패턴된 IC 디바이스 상에서 특징적인 분석 대상을 분리 하는 방법까지 제안하였다.¹²⁾ 이 방법은 추후 TDDB와 같은 테스트에 연계하여 응용되었다. 이외에도 기술을 발전시켜 in-line에서 불량과 같은 특이 소재 분석에 이용될 수 있을 것이다.¹¹⁾

이와 더불어 Myers et al.과 Zhang et al.은 플라즈마 공정이 low-k 층간 절연막에 미치는 영향을 라만 분광분석기를 이용하여 분석하였다.^{24,25)} 이 과정에서 분석 대상이 되는 공정 전후 변화에 대해 기존에 픽과 분리하여 변화를 해석하는 과정을 진행하였다. 이런 과정을 통해 플라즈마 공정이 SiCOH의 벌크 물질과 다공성 물질에서 변화하는 물질의 결과를 나타내었다. 다른 연구에서는 조사하는 빛의 입사 각도와 빛의 resonance 효과를 유발한 연구도 진행이 되었다. 이는 Si 기판에 패턴된 Cu의 각도를 주어 입사광의 조사 범위에 모서리 부분을 위치시켜, scattering 신호를 증폭시키고자 한 연구이다. 특히 이 연구에서는 기판 전체를 $\theta=45^\circ$ 로 기울이는 것을 통해 라만 분석 대상이 되는 산란광의 신호량을 상대적으로 증가시키는 결과를 얻을 수 있었다.²⁶⁾ 이러한 분석과 과정을 통해 IC 디바이스 내의 층간 절연막을 분석할 수 있을 것이다.

2.3. Ultra violet(UV) 광원을 이용한 분석 방법

라만 분광 분석기를 이용하여 IC 디바이스 내 층간 절연막을 분석하기 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 분광 분석기에 사용하고자 하는 광학적 특성이 미세 구조와 물질을 분석 하는 것에 적합하여야 한다. 이 과정에서 광원은 매우 중요한 특성이며 대표적으로 파장에 따른 광학

Table 1. 파장과 에너지 따른 Si 표면의 광학 특성²⁵⁾

Wave length	λ (ev)	Silicon penetration depth	Refractive index
325 nm	3.82	10 nm	Low-k 1.49 Silicon 4.6
532 nm	2.33	700 nm	Low-k 1.46 Silicon 3.9

적 특성은 Table 1과 같다.²⁷⁾

단파장 광원의 라만 분광분석기 사용은 앞서 언급한 광학적 성능이 개선되고 특히 라만 분광 분석기의 성능인 라만 산란 변수가 nm 감소에 따라 급격히 상승되는 특징이 있다. 특히 예로써 630 nm의 라만 광원과 대비하여 325 nm 파장의 광원을 사용하면 약 14배 정도의 신호 증가 효과가 나타난다.^{12,21,28,29)} 하지만 고에너지의 빛으로 인하여 분석 물질의 열 변형 현상이나, 고 에너지로 인한 파괴 현상이 예상되는 샘플에 사용 시 열분해 혹은 피크 변화 등이 발생하여 분석 내용이 변화할 수 있다.

$$P_{\text{scattered}} \propto \frac{I_0}{\lambda^4}$$

수식 3 라만 산란 변수와 파장과의 관계

UV 광원의 라만 분광 분석기를 이용한 특징적인 연구에는 Huang et al.의 연구가 있다. 가시광선에 이어 UV 광원을 이용하여 특히 spatial resolution을 1 μm 이하로 줄여 패턴 된 IC 디바이스 상의 ultra low-k 층간 절연막을 분석하였다. 이 연구에서는 사용된 ultra low-k 층간 절연막의 분해 과정을 라만을 통해 규명하는 연구를 진행하였다.¹²⁾

이와 더불어 동일하게 디바이스 상에서 low-k 물질의 TDDB 테스트와 스트레스가 작용할 때 라만 스펙트럼의 변화와 관련한 메커니즘 연구가 진행되었다.^{15,30)} 구동 시 발생하는 피크 시프트와 스트레스 작용 시 레드 시프트하는 현상을 발견했고, 라만과 더불어 EDX, FT-IR을 복합적으로 이용하여 분석을 진행하였다. 이 과정을 통해 Ta 이온의 migration 현상을 규명한 결과를 발표하였다.^{31,32)}

2.4. 박막 증착 및 층간 절연막 In-situ 라만 분광 분석

IC 디바이스의 구동에 사용되는 새로운 박막을 분석하기 위함이다. IC 디바이스에 사용 되는 박막은 특히 초기 물질의 증착과정과 증착 중간의 물질 특성 그리고 증착 종료 시 성막된 막의 표면의 상태가 중요하다. 이와 더불어 증착한 박막과 연계한 주위 구조의 계면현상은 현재 Cu dual damascene 방법의 IC 디바이스의 핵심 분석대상이다.^{33,34)}

라만 분광 분석기를 이용한 in-situ 분석을 통해 개발한 신규 물질에 대한 분석에 대해 초기현상, 중간증착현상

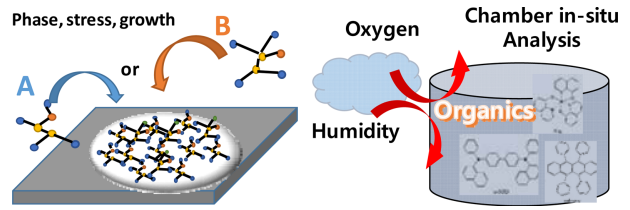


Fig. 3. 라만 분광분석기를 이용한 박막 In-situ 분석의 장점

과 박막 증착 완료 시 표면 현상에 대해 분석이 가능하다. 이와 더불어 계면 현상의 발생 시 이에 대한 스펙트럼 분석이 가능하다는 점에서 응용 가능성이 높다. 특히 in-situ 분석에서 라만 분광분석기를 사용할 때 Fig. 3와 같이 외부의 분위기와 격리된 공정 중의 표면 상태와 현상들을 분석할 수 있는 점이 특징적이다. 이를 통해 기존에 분석 공정에서 사용하지 못하였던 물질들에 대한 연구 개발 가능성을 가지고 있다.³⁵⁾

특징적인 연구로는 2014년에 발표된 CeO₂ 박막의 분석 연구이다. Guel et al. 연구팀에서 발표한 이 연구는 CeO₂ 박막의 post growth annealing 공정을 최적화 하기 위한 연구로 CeO₂ 박막의 증착 이후 annealing 공정에서 표면을 분석하며 in-situ로 분석한 결과이다. 이 공정 중 표면의 상변화와 피크의 상태를 분석하여 개선된 특성을 FWHM과 peak wave number로 규정하고 이를 가정한 상태로 제작하기 위한 조건인 900°C에서 3시간을 공정하는 것으로 최적화 하는 실험을 진행하였다.³³⁾ PE-CVD를 이용한 증착과정에서 증착막의 분석을 진행하는 연구가 Nishida et al.로 부터 발표되었다. 특히 2.7 nm 정도의 두께에서 증착 수준을 평가할 수 있는 모델을 제작하였다. 하지만 이 연구는 표면의 일반적인 상태에서 분석 대상이 되는 박막의 신호가 약한 편이어서 추가적인 연구가 필요하였다.^{34,36)} 특히 이는 관련 박막에 대한 신호 정밀화 및 증폭하는 설계가 부족한 것으로 예상된다.

이와 관련된 연구로는 TiO₂를 증착하며 최소 수준의 두께에서 라만 분광분석기로 24 Å 수준의 박막을 분석한 결과와 물질의 상분석을 위하여 ZrO₂, HfO₂ 절연막을 112에서 660 nm 두께로 증착한 후 이를 기존의 방법인 XRD와 라만 분광 분석기를 이용하여 분석하였다. 이 과정을 통해 분석 증착 시 두께에 따른 표면에서의 상변화를 % 단위의 농도로 환산하여 피크를 해석한 결과가 있다. 이를 통해 라만 분석을 통한 상 분석의 가능성을 제시하였다.¹⁶⁾

3. 요약 및 결론

지금까지 라만 분광 분석기를 이용한 Si 기반의 반도체 국소부위 분석 방법이 연구된 방법과 결과의 일부를 소개하였다. 라만 분광 분석기는 분석 대상에 따른 광학적 설계를 통한 분석 대상물질에 대한 심층적인 분석이 가능하다. 관련하여 소개한 연구들은 IC 디바이스를 구성

하는 것에 있어 물질의 특성과 상태를 정확히 파악하고, 이윽를 라만 스펙트럼을 통해 규명하며 개선하고자 하는 목적을 가진다. 또한 증착 공정에 있어 신규 물질을 이용한 막 형성 과정을 분석하기 위한 *in-situ* 분석이 필요하다. 특히 층간 물질의 분석에서 라만 분광 분석기의 도입과 국소 부위의 스트레스 분석은 비파괴 분석임에도 불구하고, 기존의 방법과 비교하여 단시간에 직접적인 정보를 확인할 수 있었다. 이러한 분석을 통해 구조와 물질의 특성 개선을 이룰 수 있는 수단으로서 라만 분광 분석기를 사용할 수 있으며, 다양한 방법들을 확인할 수 있었다. 또한 *in-situ* 라만 분광 분석방법을 이용할 때 특징적인 장점들과 박막들의 특성 분석이 가능하다는 점을 강조하고자 한다. 이를 통해 IC 디바이스 내 박막의 초기 성장 과정에서 표면변화와 성장 특성을 파악 가능하고 이에 대한 보다 정밀한 분석을 통한 개선된 정보의 생산이 예상된다. 이와 더불어 지속적으로 문제가 발생하는 부분에 집중적인 분석을 진행하여 해당 국소부위에서의 분자적 결함과 대체방안에 대해 평가할 수 있는 분석 방법이 개발 되고 있다.

위 과정에서 개발한 분석 기술들과 핵심 기반 기술들의 고도화를 통해 라만 분광 분석기를 이용하여 박막의 개발과 관련한 특성 및 상태를 분석 가능할 수 있을 것이다. 또한 분석된 스펙트럼을 이용하여 발생한 현상에 대한 심층적 분석과 층간 절연막을 개선하기 위한 공정과 물질의 개발이 이어질 것으로 기대한다.

References

1. L. Wilson, "International technology roadmap for semiconductors (ITRS)", Semiconductor Industry Association, (2013).
2. K. Maex, M. Baklanov, D. Shamiryan, S. Brongersma and Z. Yanovitskaya, "Low dielectric constant materials for microelectronics", *J. Appl. Phys.*, 93(11), 8793 (2003).
3. A. Grill, S. M. Gates, T. E. Ryan, S. V. Nguyen and D. Priyadarshini, "Progress in the development and understanding of advanced low k and ultralow k dielectrics for very large-scale integrated interconnects-State of the art", *Appl. Phys. Rev.*, 1(1), 011306 (2014).
4. E. Kim, M. Lee, S. Kim and S. E. Kim, "Ti/Cu CMP process for wafer level 3D integration", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(3), 37 (2012).
5. J. C. Lam, M. Y. Huang, T. H. Ng, M. K. B. Dawood, F. Zhang, A. Du, H. Sun, Z. Shen and Z. Mai, "Evidence of ultra-low-k dielectric material degradation and nanostructure alteration of the Cu/ultra-low-k interconnects in time-dependent dielectric breakdown failure", *Appl. Phys. Lett.*, 102(2), 022908 (2013).
6. W. Lin, J. Lin, T. Tsai, C. Hsu, C. Liu, J. Lin, C. Hwang and J. Wu, "Effects of Cu surface roughness on TDDDB for direct polishing ultra-low k dielectric Cu interconnects at 40nm technology node and beyond", *Microelectron. Eng.*, 92, 115 (2012).
7. M. G. Albrecht and C. Blanchette, "Materials issues with thin film hydrogen silsesquioxane low K dielectrics", *J. Electrochem. Soc.*, 145(11), 4019 (1998).
8. H.-C. Hsu, L.-M. Chu, B. Liu and C.-C. Fu, "An investigation on dicing 28-nm node Cu/low-k wafer with a Picosecond Pulse Laser", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(4), 63 (2014).
9. N. Fainer, Y. Romyantsev, M. Kosinova, E. Maximovski, V. Kesler, V. Kirienko and F. Kuznetsov, "Low-k dielectrics on base of silicon carbon nitride films", *Surf. Coat. Technol.*, 201(22), 9269 (2007).
10. Y.-L. Cheng, K.-C. Kao, G.-S. Chen, J.-S. Fang, C.-R. Sun and W.-H. Lee, "Effect of annealing temperature on electrical and reliability characteristics of HfO₂/porous low-k dielectric stacks", *Microelectron. Eng.*, 162, 34 (2016).
11. J. C. K. Lam, M. Y. M. Huang, H. Tan, Z. Mo, Z. Mai, C. Pei Wong, H. Sun and Z. Shen, "Vibrational spectroscopy of low-k/ultra-low-k dielectric materials on patterned wafers", *J. Vac. Sci. Technol., A*, 29(5), 051513 (2011).
12. M. Y. Huang, J. C. Lam, H. Tan, T. H. Ng, M. K. B. Dawood and Z. H. Mai "UV-Raman Microscopy on the Analysis of Ultra-Low-K Dielectric Materials on Patterned Wafers", *Adv. Mater. Res.*, 740, 680, (2013).
13. I. De Wolf, "Micro-Raman spectroscopy to study local mechanical stress in silicon integrated circuits", *Semicond. Sci. Technol.*, 11(2), 139 (1996).
14. I. De Wolf, J. Chen, M. Rasras, W. M. van Spengen and V. Simons "High-resolution stress and temperature measurements in semiconductor devices using micro-Raman spectroscopy", International Symposium on Photonics and Applications (ISPA), Singapore, 239, International Society for Optics and Photonics, (1999).
15. E. Anastassakis, "Strain and piezoelectric effects on the phonon frequencies in heterostructures", *Solid State Commun.*, 84(1-2), 47 (1992).
16. S. Tkachev, M. Manghnani, A. Niilisk, J. Aarik and H. Mändar, "Micro-Raman spectroscopy and X-ray diffraction studies of atomic-layer-deposited ZrO₂ and HfO₂ thin films", *J. Mater. Sci.*, 40(16), 4293 (2005).
17. N. Everall, "Depth profiling with confocal Raman microscopy, Part I", *Spectroscopy-springfield Then Eugene Then Duluth-*, 19, 22 (2004).
18. N. J. Everall, "Modeling and measuring the effect of refraction on the depth resolution of confocal Raman microscopy", *Appl. Spectrosc.*, 54(6), 773 (2000).
19. N. J. Everall, "Confocal Raman microscopy: why the depth resolution and spatial accuracy can be much worse than you think", *Appl. Spectrosc.*, 54(10), 1515 (2000).
20. N. Everall, "Depth profiling with confocal Raman microscopy, part II", *Spectroscopy-springfield Then Eugene Then Duluth-*, 19, 16 (2004).
21. F. Fan, Z. Feng, K. Sun, M. Guo, Q. Guo, Y. Song, W. Li and C. Li, "In situ UV Raman spectroscopic study on the synthesis mechanism of AlPO-5", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 48(46), 8743 (2009).
22. N. Y. Kwak, C. Y. Ham, M. S. Ko, S. C. Shin, S. J. Yeom, C. W. Park, C. H. Kang, B. S. Lee, S. G. Park and N. J. Kwak, "In-line Monitoring of Grain Size Distribution of Channel Poly Si used in 3D NAND Flash Memory Devices using Multiwavelength Raman Spectroscopy", *MRS Adv.*, 1(05), 339 (2016).
23. H. Ming, J. Plawsky, T.-M. Lu, S. Novak, L. Vanamurthy and

- H. Bakhru, "Cu penetration into low-k dielectric during deposition and bias-temperature stress", *Appl. Phys. Lett.*, 97(25), (2010).
24. J. N. Myers, X. Zhang, J. D. Bielefeld and Z. Chen, "Plasma Treatment Effects on Molecular Structures at Dense and Porous Low-k SiCOH Film Surfaces and Buried Interfaces", *J. Phys. Chem. C*, 119(39), 22514 (2015).
25. X. Zhang, J. N. Myers, Q. Lin, J. D. Bielefeld and Z. Chen, "Probing the molecular structures of plasma-damaged and surface-repaired low-k dielectrics", *PCCP*, 17(39), 26130 (2015).
26. M. Y. Huang, B. Liu, P. K. Tan, J. C. Lam and Z. Mai, "Enhancement of Raman signals from low-k dielectrics with angle-resolved light scattering on nanostructure patterned Cu/low-k interconnects of IC devices", *J. Vac. Sci. Technol., A*, 33(2), 020603 (2015).
27. D. Chandler-Horowitz and P. M. Amirtharaj, "High-accuracy, midinfrared ($450\text{ cm}^{-1} \leq \omega \leq 4000\text{ cm}^{-1}$) refractive index values of silicon", *J. Appl. Phys.*, 97(12), 3526 (2005).
28. F. D'Amico, F. Cammisuli, R. Addobati, C. Rizzard, A. Gesini, C. Masciovecchio, B. Rossi and L. Pascolo, "Oxidative damage in DNA bases revealed by UV resonant Raman spectroscopy", *Analyst*, 140(5), 1477 (2015).
29. F. Fan, Z. Feng and C. Li, "UV Raman spectroscopic studies on active sites and synthesis mechanisms of transition metal-containing microporous and mesoporous materials", *Acc. Chem. Res.*, 43(3), 378 (2009).
30. J. W. Ager and M. D. Drory, "Quantitative measurement of residual biaxial stress by Raman spectroscopy in diamond grown on a Ti alloy by chemical vapor deposition", *Phys. Rev. B*, 48(4), 2601 (1993).
31. H. Yamin, H. Tan, D. Wang, J. Lam and Z. Mai, "Experiments and results of Raman and FTIR complementary vibrational spectroscopy for IC reliability failure analysis", *Proceedings of the 21th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits(IPFA)*, Singapore, 291, IEEE, (2014).
32. D. D. Wang, W. L. Wang, M. Y. Huang, A. Lek, J. Lam and Z. H. Mai, "Failure mechanism analysis and process improvement on time-dependent dielectric breakdown of Cu/ultra-low-k dielectric based on complementary Raman and FTIR spectroscopy study", *AIP Adv.*, 4(7), 077124 (2014).
33. Y. Guhel, J. Bernard and B. Boudart, "In situ Raman characterization of CeO₂ thin films sputtered on (111) Si in order to optimize the post growth annealing parameters", *Microelectron. Eng.*, 118, 29 (2014).
34. K. Nishida, K. Morisawa, A. Hiraki, S. Muraishi and T. Katoda, "In-situ monitoring of PE-CVD growth of TiO₂ films with laser Raman spectroscopy", *Appl. Surf. Sci.*, 159, 143 (2000).
35. H. Y. H. Chan, C. G. Takoudis and M. J. Weaver, "In-situ monitoring of chemical vapor deposition at ambient pressure by surface-enhanced Raman spectroscopy: Initial growth of tantalum (V) oxide on platinum", *J. Am. Chem. Soc.*, 121(39), 9219 (1999).
36. I. Burlacov, J. Jirkovský, M. Müller and R. Heimann, "Induction plasma-sprayed photocatalytically active titania coatings and their characterisation by micro-Raman spectroscopy", *Surf. Coat. Technol.*, 201(1), 255 (2006).



- 권순형(權純亨)
- 중앙대학교 융합공학과
- 라만 분광 분석, 소재 합성
- e-mail: gala1993@naver.comcom



- 표성규(表成奎)
- 중앙대학교 융합공학부
- 3D integration, AFM/TEM, 반도체공정, Sensor, EP/ELP도금공정
- e-mail: sgpyo@cau.ac.kr