

## Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy 를 이용한 저항 탐침 형성 고정 최적화를 위한 단면 채널 구조 관찰

김찬형<sup>1</sup> · 유경희<sup>1</sup> · 신현정<sup>1,\*</sup> · 이봉기<sup>2</sup> · 박홍식<sup>3</sup> · 민동기<sup>3</sup> · 정주환<sup>3</sup> · 홍승범<sup>3</sup> · 김성동<sup>4</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 공과대학 신소재공학부

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, The University of Texas at Dallas, P.O.#Box 830688, Richardson, TX 75083, USA

<sup>3</sup>삼성종합기술원 Storage Laboratory, <sup>4</sup>서울산업대학교 공과대학 기계설계자동화공학부

## Characterization of Channel Structure for Formation and Process Optimization of Resistive Probe Using Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy

Chanhyung Kim<sup>1</sup>, Kyunghee Ryu<sup>1</sup>, Hyunjung Shin<sup>1,\*</sup>, Bongki Lee<sup>2</sup>, Hongsik Park<sup>3</sup>,  
Dong-Ki Min<sup>3</sup>, Juwhan Jung<sup>3</sup>, Seungbum Hong<sup>3</sup>, and Sungdong Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, The University of Texas at Dallas,  
P.O.#Box 830688, Richardson, TX 75083, USA

<sup>3</sup>Nano Devices Laboratory, Samsung Advanced Institute of Technology, P.O. Box 111, Suwon 440-600, Korea

<sup>4</sup>Seoul National University of Technology, School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul 139-743, Korea

This paper describes process optimization for fabricating resistive probe used scanning resistive probe microscopy (SRPM) using scanning nonlinear dielectric microscopy (SNDM). The SRPM proposed recently that has a semiconducting resistor at the apex of the tip and can directly observe charge distribution on surfaces, has potential for a variety of applications such as next-generation storage media and local electrical characterization. Since the spatial resolution of the SRPM is depending on a small resistive region at the apex of the tip, analyzing dimension of the resistive region is important. For the observation of the exact dimension of the region SNDM results were obtained from the cross-sectional samples of the probes. Because SNDM requires high quality oxide for measurement of sample's capacitance, various oxide layers were grown by different methods on p-type silicon substrates and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-treatment was selected. To avoid the error of doping profile by variation of flat band voltage owing to the interface states in the oxide layer, the resulting diffusion length of As ions was estimated by comparing the SNDM results with the SUPREM calculation.

**Keywords:** scanning nonlinear dielectric microscopy, scanning resistive probe microscopy, doping profiles

### 1. 서 론

차세대 정보 저장 기술 중 하나인 탐침형 정보 저장 장치는 개서 방식이 캔틸레버의 기계적 deflection이나 진동의 변화를 통하여 미세한 힘을 감지하는 원리를 사용하여 상기한 기계적 응답속도가 전기적 그것에 비하여 크게 떨어질 수밖에 없는 단점을 가졌다. 이러한 단점을 극복하고자

제안된 것이 바로 scanning resistive probe microscopy<sup>[1]</sup> (SRPM)이다. 이런 저항 탐침의 원리는 탐침 첨단에 국부적인 저항을 만들어 측정하고자 하는 표면전하에 의한 전기장이 존재하면 탐침 첨단에 존재하는 carrier의 공핍 또는 축적에 대한 저항의 변화를 감지하는 원리이다. 기존의 3-terminal 소자와는 달리 나노미터 크기의 전기적 도메인을 감지하기 위해서는 형성되는 채널의 길이 또한 나노미터 크기로 제작되어야 하기 때문에 이러한 저항영역의 확인을 위해서는 Si 내에서의 dopant 이온의 profile 형상화에

\*Corresponding author: hjshin@kookmin.ac.kr

관한 연구가 필수적이다. 따라서 기존의 doping profile (SIMS, SRA) 등의 기술은 나노 스케일의 공간 분해능을 가지지 못하여 저항 탐침에서 형성되는 나노미터 크기의 채널을 확인하는데 있어 어려움이 있었다. 그러나 SPM의 응용 기술들은 나노 스케일의 공간 분해능을 가지고 있어 저항 탐침의 저항영역뿐만 아니라 수십 나노미터 크기의 소자에서의 채널확인도 가능하다. 이러한 doping profile에 있어서 가장 널리 사용되고 있는 SPM 응용 기술이 바로 scanning capacitance microscopy (SCM)<sup>[2,3]</sup>과 Kelvin probe force microscopy (KPFM)<sup>[4,5]</sup> 그리고 scanning spreading resistance microscopy (SSRM)<sup>[6,7]</sup>이다. KPFM의 경우 사용하는 탐침과 시편의 일함수차를 이용하여 doping level 및 type 을 형상화 한다. 그러나 Si와 같은 반도체 재료의 표면 일함수는 표면에 존재하는 surface states<sup>[8]</sup> 및 water layer<sup>[9]</sup> 등과 같은 표면 상태에 따라 측정하는 재료의 일함수를 정량화하는데 무리가 있다. 그러나 SCM의 경우 재료의 커패시턴스의 변화량을 이용하여 doping profile을 측정하고 SiO<sub>2</sub>의 산화막으로 표면을 보호하여 표면 상태에 비교적 안정적인 장점을 가지고 있다. 특히 doping profile에 사용하는 커패시턴스는 doping 상태와 직접적인 관계를 가지고 있어 이를 doping profile에 사용하는 것은 매우 유용한 방법으로 알려져 있고 doping profile에 사용되는 SPM 응용 기술 중 가장 널리 쓰이는 방법이다.

본 연구에서는 SCM 응용 기술 중 하나인 scanning non-linear dielectric microscopy (SNDM)<sup>[10,11]</sup>을 이용하여 SRPM에서 나노 스케일의 공간 분해능을 얻기 위해 필수적인 저항 탐침의 저항영역 크기를 관찰하였다.

## 2. 실험방법

SCM의 측정 방법은 일반적인 metal oxide semiconductor (MOS) 구조를 기반으로 하여 반도체 특성을 분석하기 위한 고주파 커패시턴스-전압 (C-V) 측정을 SPM에 접목/확장한 것이다. SCM의 장점은 비파괴적인 방법으로써 반도체 소자의 표면이나 단면의 도핑 농도를 이차원적으로 형상화 할 수 있다는 것이다. 기존 C-V 측정 방법에 비해 공간 분해능이 높을 뿐만 아니라 p-n 접합과 같은 좁은 접합 계면의 전하 dynamics에 대한 연구까지 가능하다는 것이 그것이다.

그림 1은 SCM의 원리를 보여주는 개략도이다. 금속을 코팅한 탐침, 실리콘 위에 증착 시킨 SiO<sub>2</sub>, 그리고 실리콘 기판으로 구성된 경우를 기존의 MOS 구조로 볼 수 있다. 탐침과 실리콘기판 양단간의 전압을 인가하여 전압에 따른 커패시턴스 변화량에 기인한  $dC/dV$ 를 측정한다. 그림 1(b)는 n-type 반도체의 C-V 곡선을 보여주는데 도핑 농도에 따른  $dC/dV$ 의 양상이 다른 것을 보여준다. 예를 들어 도핑 농도가 높은 곳은 공핍지역이 매우 작게 발생하여  $dC/dV$ 가 작게 되고 도핑 농도가 낮은 지점은 그에 반해  $dC/dV$  신호가 크게 발생한다. 즉  $dC/dV$  신호는 도핑 농도에 반비례 하게 된다. 또한 n type과 p type의 부호의 구별은 그림 1(b)에서 나타내었듯이 n-type 경우 전압에 따른 커패시턴스 변화( $dC/dV$ )가 양의 기울기를 갖고, p-type 경우는 음의 기울기를 보이므로 n과 p 지역을 구별할 수 있다. 이러한 원리로 측정하는 SCM은 반도체의 doping profile을 관찰하는데 강력한 기술이지만 산화물의 질과 탐침 형상 등 다양한 변수로 인해 평탄도가 변화함에 따라 정량화에 어려

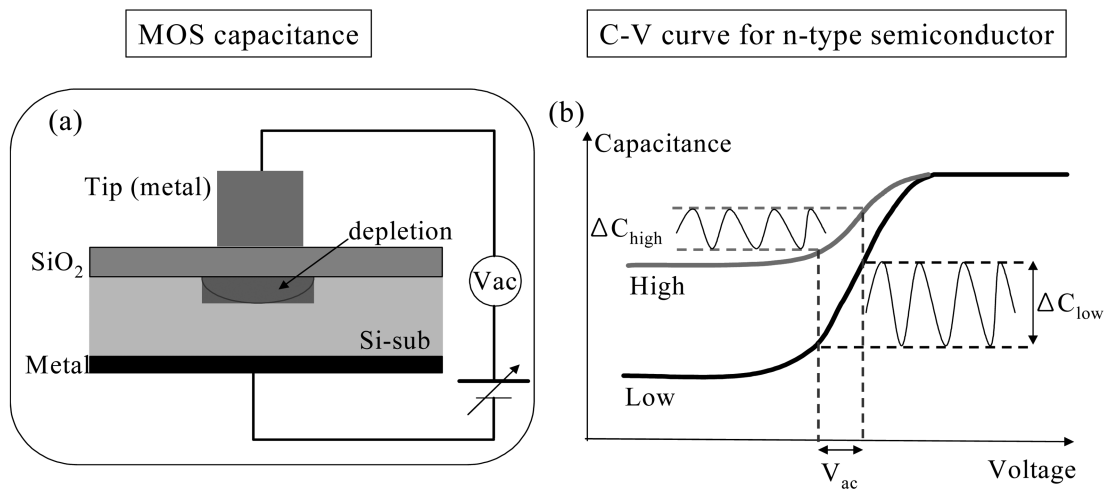


Fig. 1. (a) Schematic illustration of a conventional MOS structure and (b) C-V curves according to various doping concentrations.

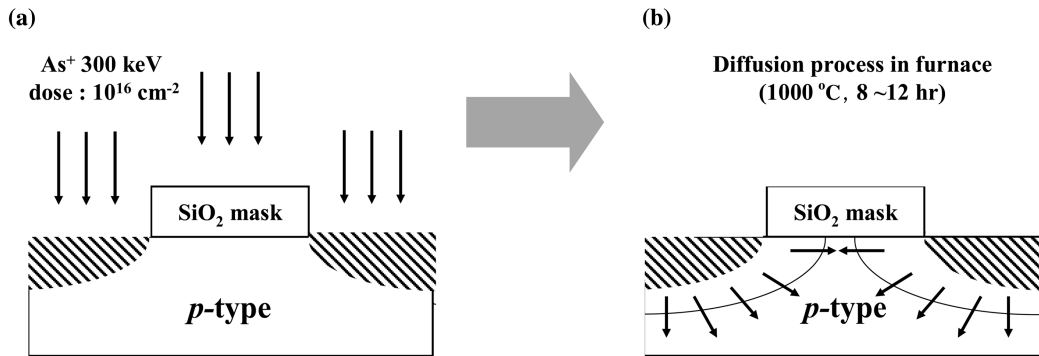


Fig. 2. Schematic diagram for procedure. (a) As implantation and (b) Diffusion process at 1000 °C for 8~12 hr.

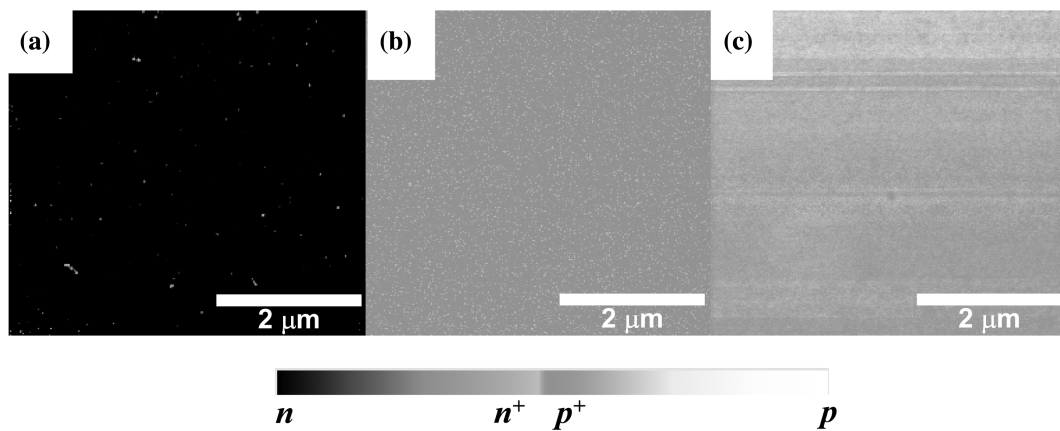


Fig. 3. SNDM capacitance contrast images obtained from oxide layers prepared different methods on p-type Si ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ). (a) native oxide layer (b) UV-ozone treated oxide, and (c)  $\text{H}_2\text{O}_2$ -treated surfaces.

움이 뒤따르고 있다. 하지만 모델링과 다른 비파괴적인 정량화 측정 연구를 병행한 많은 관련 연구가 행해지고 있다.<sup>[12,13]</sup>

본 연구에서는 저항영역의 최적화를 위해 사용된 시편의 제작과정을 그림 2에 간단히 나타내었다. 그림 2(a)에서 도핑농도가  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 인 p-type 기판에 단면 시편 제작을 손쉽게 하기 위해 2 μm 크기를 가지는 라인패턴의 SiO<sub>2</sub> 마스크를 형성시킨 후 arsenic 이온들 ( $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , 300 KeV)을 주입시켰다. 그림 2(b)에서는 이온주입 후 저항 탐침의 저항영역을 형성하기 위해 1000 °C에서 8 - 12시간 동안 고온 공정을 수행하였다. 정확한 저항영역의 형성을 관찰하기 위해 단면시편을 제작하였다. 단면시편의 제작은 일반적으로 알려져 있는 TEM 샘플제작방식을 이용하였고 평평한 표면을 만들기 위해 diamond lapping film (9, 3, 1 μm)과 콜로이드 실리카 (1, 0.5, 0.3, 0.05 μm)를 사용하였다. SCM을 측정하기 위해서는 MOS 구조를 구성하여야 하고 양질의 SiO<sub>2</sub> 박막이 필수적이다<sup>[14-16]</sup>. 다양한 산화공정

(native oxide, air ultraviolet irradiation, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution)을 p-type wafer 적용하여 최적의 산화막을 형성시켰다. Resistance region의 측정은 다양한 SCM 기술 중 하나인 SNDM (Seiko Instruments Inc., SPA-400)을 사용하였다. SNDM 측정은 Au 코팅된 탐침 (Seiko Instruments., DF3-A)을 사용하였고 측정 시 인가한 AC bias와 DC bias는 각각 0.7 - 1.5 V<sub>p-p</sub> (8 khz)와 -0.5 - 0.5 V였다. 모든 측정은 대기상태에서 이루어졌다.

### 3. 결과 및 고찰

SCM을 이용한 dopant profile에 있어 가장 큰 문제는 세가지로 요약할 수 있다. 첫번째가 양질의 SiO<sub>2</sub>이다. SiO<sub>2</sub>막의 존재하는 고정 전하와 이동 전하들은 C-V 측정 시 flat band의 이동을 발생시킨다. Zavyalov *et al*<sup>[16]</sup> 및 Goghero *et al*<sup>[17]</sup>은 산화막질에 따른 flat band 이동에 대한 연구를 보고하였다. 질이 낮은 산화막의 경우 interface states의 존재

로 인해 flat band가 이동하여 분해능을 감소시키고 심지어 *n*-type의 C-V 거동이 *p*-type으로 혹은 *p*-type이 *n*-type으로 역전되는 현상이 관찰되었다. 이처럼 양질의 산화막은 SCM 분석에 있어 필수적인 요소이다. 두 번째 문제점은 나노 스케일의 공간 분해능을 얻기 위해 사용되는 tip의 영향이다. 일반적인 MOS 구조를 기반으로 하는 C-V 측정의 경우 비교적 큰 상부전극을 사용하여 doping profile 시 1 차원 모델을 적용할 수 있는 반면에 SCM에 사용되는 tip의 경우 반경이 약 10 - 30 nm로 작아 1 차원 모델의 적용이 어려운 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Schaadt et al.<sup>18)</sup>은 모델링을 통해 정량화하였다. 세 번째 문제점은 capacitance 변화량을 측정하기 위해 인가하는 probe의 voltage이다. tip에 걸여주는 AC 및 DC voltage에 의하여 표면에 field oxide가 생성되는 단점을 가지고 있다. field oxide의 생성은 SCM 측정에 있어 표면에 charge를 발생시킴으로써 sensitivity를 감소시킨다. Edwards et al.<sup>19)</sup>은 tip voltage 영향으로 표면 전하들이 이끌려 *pn* junction의 depletion region이 이동함을 관찰, 보고하였다.

위와 같은 이유 중에 중요한 요소인 양질의 산화막을 얻기 위해 *p*-type wafer에서 다양한 산화공정을 수행하였고 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)-(c)는 각각 자연 산화막, 대기상태에서 자외선 조사방법을 이용한 산화막 그리고 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 용액을 이용하여 성장시킨 산화막의 SNDM 형상들이다. SNDM의 측정은 2V<sub>p-p</sub>의 AC bias를 인가하였고 DC bias는 인가하지 않았다. SNDM 결과를 살펴보면 그림 3(c)가 가장 높은 크기의 dC/dV 신호를 볼 수 있는데 가장 우수한 산화막의 형성으로 인해 flat band의 이동이 적다는 것을 보여주는 결과이다. 따라서 저항탐침의 최적화 공정을 위해 Diamond lapping 필름과 콜로이드 실리카를 이용하여 제작한 모든 단면시편은 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 용액을 이용하여 산화막을 형성하였다.

단면 시편제작 시 중요한 요소 중 하나는 표면 거칠기이다. 표면 거칠기가 큰 표면을 가진 시편은 표면에 dangling bond가 많이 존재하고 dangling bond는 표면에 surface

states로 작용하여 반도체 재료의 표면 밴드 휘어짐을 발생시킨다. 이러한 표면 밴드 휘어짐은 C-V 측정 시 flat band 이동을 크게 하여 SNDM 측정에 어려움을 가져다 준다. Yang et al.<sup>20)</sup>의 연구를 보면 다양한 크기의 콜로이드 실리카를 사용하여 표면 거칠기를 조절하여 그 영향에 대해 보고하였다. 본 실험에서 doping profile을 위해 제작한 단면 시편의 표면 형상과 표면 거칠기를 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a)와 (b)는 각각 12 시간 동안 고온 공정을 한 시편의 단면의 표면형상이고, 평균 표면 거칠기는 약 0.7 nm였다. 앞에서 언급한 것과 같이 SNDM을 이용한 doping profile 시 여러 문제점들로 인해 정량화에 어려움이 있어 계산을 통한 모델링 혹은 SIMS와 같은 분석 방법이 수반되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 SUPREM 모델링을 통해 이온주입 후 확산하는 As 이온 확산거리와 SNDM에서 얻어지는 dC/dV signal과 비교하고 저항 탐침의 저항영역의 공정 조건을 확보하기 위해 8 시간 확산시킨 단면 시편의 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)는 SNDM을 이

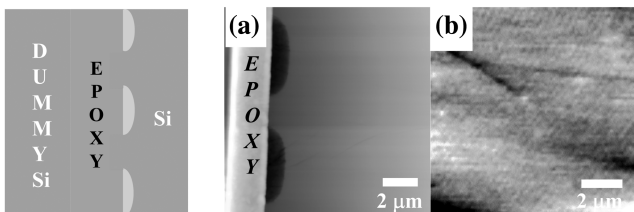


Fig. 4. Surface topology and roughness of cross sectional sample polished by using silica colloids.

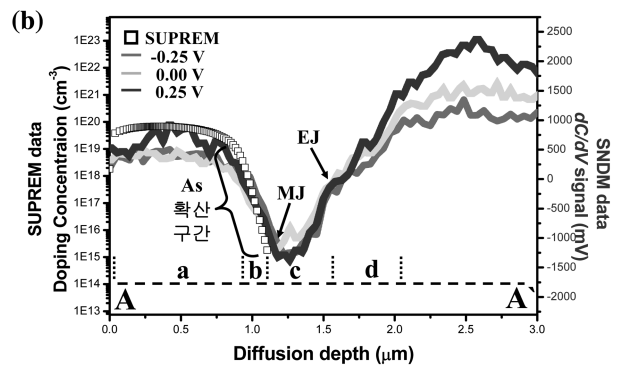
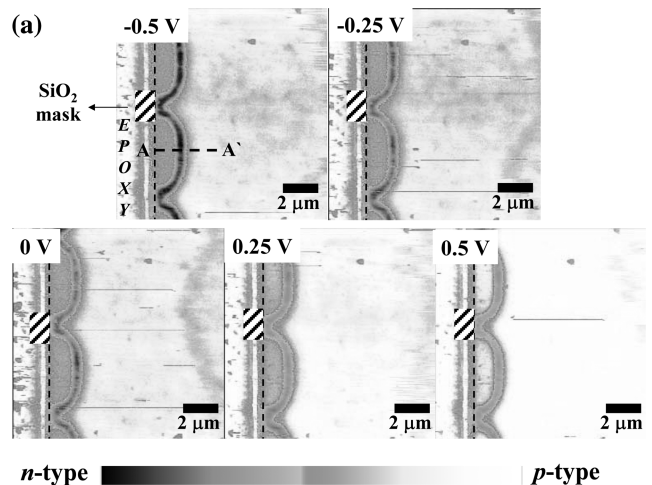


Fig. 5. SNDM analysis results obtained from a cross sectional sample with 8 hr diffusion. (a) SNDM capacitance images obtained under various applying DC bias (-0.5 V ~ 0.5 V) and (b) SNDM line profiling between A through A', compared with SUPREM results.

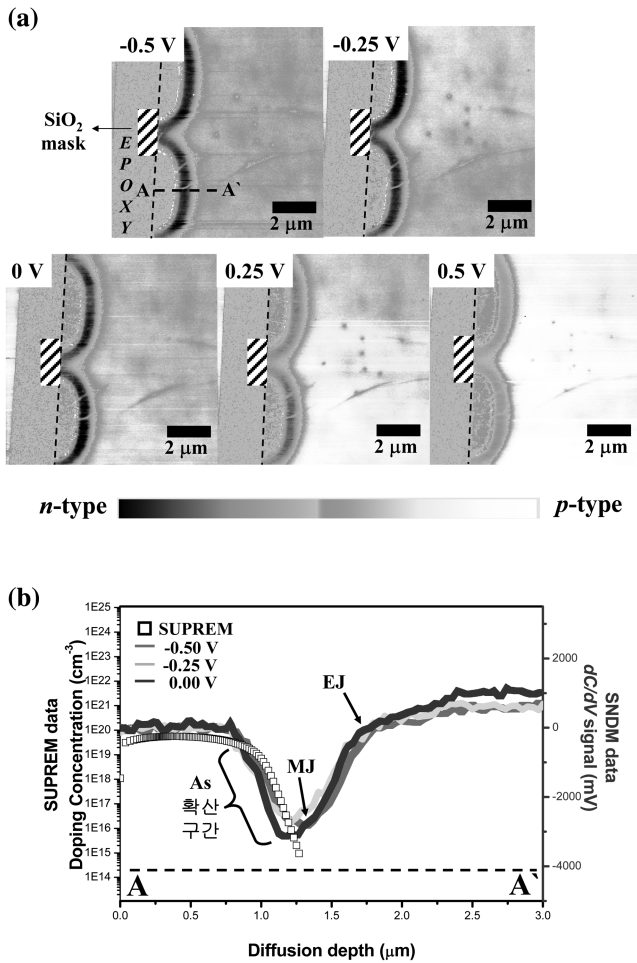


Fig. 6. SNDM analysis results obtained from a cross sectional sample with 12 hr diffusion. (a) SNDM capacitance images obtained under various applying DC bias (-0.5V ~ 0.5 V) and (b) SNDM line profiling between A through A', compared with SUPREM results.

용하여 관찰한  $dC/dV$  형상이고 (b)는 그림 5에 나타난 A 부터 A'까지 측정된  $dC/dV$  signal과 SUPREM을 이용한 doping concentration의 계산값과의 비교 그래프이다. 측정 한 결과에서 보면  $dC/dV$  를 측정하기 위한 AC bias 뿐만 아니라 DC bias도 함께 인가하였는데 이것은 interface states 들의 존재로 flat band의 이동으로 인한 signal 감소 및 금속 학적 접합 (MJ)과 전기적 접합 (EJ)의 이동을 막기 위함이다. 따라서 본 실험에서는 다양한 DC bias (-0.5V - +0.5V) 에 따른 측정을 수행하였다. 그림 5(a)에서 이온 주입한 부분은  $n^+$  지역과 epoxy 지역은 free carrier 들이 많거나 존재 하지 않아 작은 크기의  $dC/dV \sim 0$  (짙은 주황색 혹은 짙은 녹색) 값을 갖는다. 확산 공정 및 pn 접합으로 인하여 발생 된 n 지역은 carrier 수가 많아 비교적 큰 크기의 음의 기울 기의  $dC/dV$  값을 얻을 수 있었고 이미지에서 밝은 주황색

에서부터 검은색으로 나타난다. 기관으로 사용한 p-type ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) 기관의 경우 doping level이 낮아 비교적 큰 크기의 양의 기울기를 갖는  $dC/dV$  (밝은 녹색) 값을 얻을 수 있었다. 다시 말해 SDNM을 이용한 분석은 capacitance 변화 값을 이용하여 doping type 및 doping level을 구별할 수 있었다. 그림 5(b)에서 실험을 통해 얻은  $dC/dV$  신호는 tip 모양 등의 이유로 doping concentration으로 전환은 모델링을 통한 계산으로 전환하여야 하는데 일반적인 MOS 구조처럼 평판의 전극을 사용하지 않아 적용키 어려워 실험을 통해 얻어지는  $dC/dV$  신호에 대한 고찰이 필요하다. 이러한 고찰은 Williams *et al* [21]에 의해 보고되었다. 우리의 경우와 같이  $n^+$ -p 접합의 경우 그 구조를 네 부분 (그림 5(b) a, b, c, d) 으로 구분할 수 있다. 먼저 a 지역은 표면에서부터 음의 기울기인  $dC/dV$  값이 일정한 부분까지가 이온주입시 형성된  $n^+$  region이다. b 지역은 확산공정에 의한 As 이온의 확산구간으로 균일하던 As 이온농도가 확산으로 인해 감소하여 음의  $dC/dV$  값이 증가하고 최대값을 가지는 지점까지로 정의한다. p-type 기관의 농도가  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  으로 균일하다고 가정할 때 확산한 As 이온과 만나는 지점으로 음의  $dC/dV$  값이 최대일 때 이 지점을 실제로 As 이온과 B 이온 만나는 금속학적 접합 (Metallurgical Junction)이다. c,d 구간은 공핍영역으로 각각 p-type 으로 역전되는 지역과 p-type의 공핍층으로 구분될 수 있다. 이 두 지역을 나누는 기준점은 전기적 접합 (Electrical Junction)으로 전자의 농도와 홀의 농도가 만나  $dC/dV \sim 0$ 이 되는 지점이다. 저항 탐침 제작에 있어서 관심이 되는 대상은 저항 영역으로 사용될 As 이온의 확산 정도이다. 따라서 8 시간 동안 확산시킨 시편을 SUPREM 모델링과 SNDM 결과를 비교하여 확산 정도를 확인할 수 있다. 그림 5(b)에서 SUPREM 결과는 MJ 지점이 표면으로부터 약 1.1 mm이고 측정 결과 중 가장 근사한 SNDM의 결과는 DC bias가 0.0 V일 때 1.17 mm로 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 6은 12시간 확산공정을 한 시편의 결과를 보여준다. 그림 6(a)는 SNDM을 이용한  $dC/dV$  이미지이고, (b)는 A 부터 A'까지의 line profile 그래프이다. 그림 6(b)의 결과에서 SUPREM을 이용한 MJ 지점 위치는 약 1.27 mm이고 SNDM 결과 중 가장 근사한 값을 얻는 결과는 DC bias가 -0.5 V일 때 1.30 mm로 근사한 값을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

결론적으로 저항 탐침을 이용한 SRPM은 탐침형 개서방

식의 단점인 느린 응답속도를 보완한 새로운 차세대정보 저장 기술이다. SRPM에서 저항 탐침의 저항영역의 미세화는 높은 분해능을 얻기 위해 필수적인 요소이다. 저항 탐침을 제작하기 이전에 미세한 저항영역의 정의는 필수적이고 본 연구에서는 doping profile 방법으로 널리 사용되는 나노 스케일의 공간 분해능을 가지는 SCM 기술 중 하나인 SNDM을 이용하여 저항 영역을 관찰하였다. 결과에서 SNDM과 SUPREM의 비교를 통해 As 이온의 확산 정도를 확인하였고 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 앞으로 MJ 지점뿐만 아니라 EJ 지점까지의 모델링을 통해 보다 정확한 측정 비교가 필요하고 이러한 연구는 확산거동관찰뿐만 아니라 점차 미세화 되는 반도체 산업에 큰 영향을 줄 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 삼성전자, 한국과학재단 (R-01-2005-000-11172-0), the Asian Office of Aerospace Research and Development (AOARD; FA5209-05-P-0350), SRC/ERC 센터 (grant # R11-2005-048-00000-0)의 지원으로 수행되었고 이에 대해 감사드립니다.

### REFERENCES

1. H. Park, J. Jung, D.-K. Min, S. Kim, S. Hong, and H. Shin, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 1734 (2004).
2. T. Tran, J. N. Nxumalo, Y. Li, D. J. Thomson, G. E. Bridges, and D. R. Oliver, *J. Appl. Phys.* **88**, 6752 (2000).
3. N. Nakagiri, T. Yamamoto, H. Sugimura, Y. Suzuki, M. Miyashita, and S. Watanabe, *Nanotechnology* **8**, A32 (1999).
4. H. O. Jacobs, H. F. Knapp, S. Muller, and A. Stemmer, *Ultramicroscopy* **69**, 39 (1997).
5. M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle, and H. K. Wickramasighe, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2921 (1991).
6. P. De Wolf, T. Clarysse, W. Vandervorst, L. Hellemens, Ph. Niedermann, and W. Vandervorst, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16**, 401 (2000).
7. P. De Wolf, R. Stephenson, T. Trenkler, T. Clarysse, T. Hantschel, and W. Vandervorst, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**, 361 (2000).
8. A. Chavez-Pirson and O. Vatel, M. Tanimoto, H. Ando, H. Iwamura, and H. Kanbe, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 2358 (1995).
9. H. Sugimura, Y. Ishida, K. Hayashi, O. Takai, and N. Nakagiri, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 1495 (2002).
10. Y. Cho, S. Kazuta, and L. Matsuura, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 2833 (1999).
11. T. Matsukawa, C. Yasumuro, M. Masahara, H. Tanue, and S. Kanemaru, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 3169 (2004).
12. R. N. Kleiman, M. L. O'Malley, F. H. Baumann, J. P. Garno, and G. L. Timp, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18(4)**, 2034 (2000).
13. J. S. McMurray, J. Kim, and C. C. Williams, *J. Vac. Sci. Technol. B* **15(4)**, 1011 (1997).
14. C. C. Williams, Semiconductor Research Corporation, Contract Review, Austin, TX, 15-16 July (1997).
15. N. Duhayon, P. Eyben, M. Fouchier, T. Clarysse, W. Vandervorst, D. Alarez, S. Schoemann, M. Ciappa, M. Stangoni, W. Fichtner, P. Formanek, M. Kittler, V. Raineri, F. Giannazzo, D. Goghero, Y. Rosenswaks, R. Shikler, S. Saraf, S. Sade-wasser, N. Barreau, T. Glatzel, M. Verheijen, S. A. M. Mentink, M. von Sprekelsen, T. Maltezopoulos, R. Wiesendanger, and L. Hellemens, *J. Vac. Sci. Technol. B* **22**, 385 (2004).
16. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, and C. C. Williams, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 158 (1999).
17. Didier Goghero, Vito Raineri, and Filippo Giznazzo, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 1824 (2002).
18. D. M. Schaadt and E. T. Yu, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20(4)**, 1671 (2002).
19. H. Edwards, V. A. Ukraintesev, R. S. Martin, F. S. Johnson, P. Menz, S. Walsh, S. Ashburn, K. S. Wills, K. Harvey, and M.-C. Chang, *J. Appl. Phys.* **81**, 1485 (2000).
20. J. Yang, J. J. Kopanski, A. Postula, and M. Bialkowski, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 182101 (2005).
21. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, and C. C. Williams, *J. Appl. Phys.* **85**, 7774 (1999).