

## GaN/사파이어 구조에서의 표면탄성과 전단특성

최국현 · 김진용\* · 김형준 · 정수진 · 이태근\*\* · 김영진\*\*\*†

서울대학교 공과대학 재료공학부

\*Film Characterization and Properties Group Ceramics Division, NIST, Gaithersburg, MD, USA

\*\*서울산업대학교 재료공학과

\*\*\*경기대학교 첨단산업공학부 신소재전공

### SAW Propagation Properties of GaN/Sapphire Structure

Kook Hyun Choi, Hyeong Joon Kim\*, Su Jin Chung, Jin Yong Kim\*, Tae Kun Lee\*\*, Young Jin Kim\*\*\*†

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742

\*Film Characterization and Properties Group Ceramics Division, NIST, Gaithersburg, USA

\*\*Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 131-743

\*\*\*Department of Materials Science and Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760

(2002년 5월 13일 받음, 2002년 7월 2일 최종수정본 받음)

**Abstract** To investigate the SAW properties of GaN films on c-plane sapphire substrates, we carried out both the experimental measuring and theoretical calculation. The experimental characterization of SAW propagation properties was performed with a linear array of interdigital transducer (IDT) structures, while SAW velocities were calculated by matrix methods. HVPSAW mode with the propagation velocity over 10,000m/s and PSAW mode as well as GSAW could be observed in experimental determination. These results were verified by matching with the theoretical calculation.

**Key words** : GaN, SAW, Piezoelectricity, HVPSAW, PSAW

### 1. 서 론

최근의 이동통신 시스템의 발전으로 인해 고주파 통신 소자에 대한 요구가 점점 커지고 있다. GHz 대역의 표면탄성과 소자를 제조하기 위해서는 전극의 파장을 줄이거나 또는 표면탄성과 진행속도가 높은 재료를 사용함으로써 구현할 수 있다. 마이크론 크기 이하의 전극 형성 기술을 개발하기 위해서는 고가의 사진공정 장비를 사용해야 하며 제품의 생산 수율 저하가 문제점으로 대두된다. 그래서 표면탄성과의 속도가 높은 물질을 압전 박막과 결합시켜 사용하려는 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 다이아몬드와 질화 규소(SiC)를 ZnO와 AlN 등의 압전박막과 결합시킨 구조의 연구가 주로 이루어져 왔다.<sup>1~3)</sup>

본 연구에서 구현한 표면 탄성과소자는 사파이어 기판 위에 에피성장된 압전물질인 GaN 박막이 형성된 구조이다. Fig. 1에 개략도가 나타나 있다. 표면탄성과 소자에서의 탄성과의 전달원리를 보면, 역압전 효과 때문에 전기신호는 IDT(Interdigital transducer)에 의하여 GaN 박막에서 IDT 밑에 기계적 응력을 만들어내고, 그 결과인 주기적인 기계적 전위는 표면을 따라 표면탄성과로서 이동한다. 이 파장 자극(excitation)은 파장이 IDT 격자구조에 의하여 생기는 전기장의 주기적인 공간과 같을 때 효과적인 역할을

하게 되며, 최대 중심주파수,  $f_{max} = v/\lambda$ 이고, SAW 속도  $v$ 는 재료의 특징적인 성질이다. 이 관계는  $f_{max}$ 의 측정을 통해 결정하도록 할 수 있다.<sup>4)</sup> 전달 SAW가 도착하는 곳을 수신 IDT라고 정의하고, 압전효과가 전기적 반응으로 발생되어 검출될 수 있다.

본 실험에서와 같이 사파이어기판 위에 증착된 GaN 박막 구조에서는 서로 다른 물질상수를 가지는 매질내에서 표면파가 형성되어 전달되기 때문에 박막이 전체 표면파의 생성과 전파에 차지하는 비율이 중요하게 되어 속도 dispersion이라는 개념을 도입해야 한다. 이는  $kH (=2\pi H/\lambda)$ 의 함수로 표현된다. 여기서  $k$ 는 파수,  $H$ 는 GaN 두께를 나타낸다. GaN의 전파속도가 느리기 때문에 GaN의 두께가 두꺼워 질수록 속도가 느려지고 충분히 두껍게 되면 GaN의 속도를 나타내게된다. 이 속도 dispersion 관계를 이용하여 박막의 물질상수를 유추해낼 수 있다.<sup>5)</sup>

현재 박막형 표면탄성과소자의 연구는 주로 ZnO와 AlN 박막에 치중되어 있는 실정이지만, GaN 박막은 압전계수가 충분히 크고 제조 공정이 많은 연구자들에 의해 광범위하게 연구되어 현재 상당한 수준에 와있으므로 고품질의 GaN 박막을 이용한다면 우수한 특성의 박막형 탄성과 소자를 제작할 수 있다. GaN은 압전특성을 가지고있는 반도체이므로 acousto-optic 소자를 압전특성과 결합시킨 형태

† E-mail : yjkim@kuic.kyonggi.ac.kr

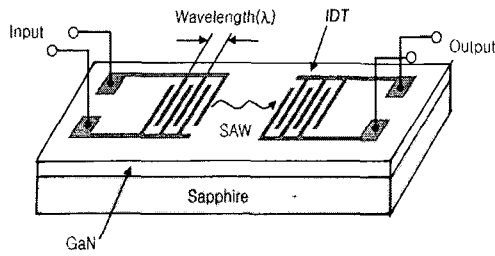


Fig. 1. Schematic diagram of GaN/sapphire SAW device.

의 하이브리드 소자들에 응용가능성을 가지고 있다. 또한 사파이어 기판위에 표면의 평탄도가 우수한 에피막이 형성되므로, 박막형 탄성과 소자에서 문제가 되는 표면에서의 탄성과 산란을 상당히 감소시킬 수 있다. 또한 표면탄성파 속도가 빠른 사파이어기판을 사용한 구조는 2GHz 이상의 고주파필터로 응용이 가능하다.

그러나 GaN의 SAW 소자로의 응용성은 매우 높지단 실제 이에 대한 연구는 그다지 활발하지가 못하다. 본 연구에서는 사파이어 기판 상에 증착된 GaN을 이용하여 고차모드 등의 다양한 SAW 모드의 관찰을 시도하고, 이를 이론적으로 계산된 값과 비교하여 검증을 시도함으로써, GaN의 기본적인 SAW 거동과 특성을 규명하고자 한다.

2. 다층박막의 표면 탄성과 분석을 위한 이론

제작된 표면탄성파의 특성을 계산을 통해 알아내기 위해서는 박막 구조에서 표면탄성파의 파동 방정식을 유도하고 계산에 이용할 수 있는 프로그램을 개발하는 과정이 필요하다. 고체에서 응력과 변형을 연관시키는 후크의 법칙과 뉴우톤의 힘방정식으로부터 균질한 박막에서의 탄성파에 대한 방정식을 유도할 수 있다. 압전체가 막을 구성하는 경우, 방정식에는 매질의 압전 텐서의 형태로 맥스웰식이 포함되어야 한다. 일반적으로, 자기장은 미치는 영향이 작으므로 무시하고, 전기장은 스칼라 포텐셜로 유도된 것으로만 한정해서 문제를 생각한다. 이러한 가정하에서  $x_3$ 축 방향의 입자 변위  $U_j$ 는 전기장  $\phi$ 에 대한 라플라스식과 압전 텐서  $e_{ijk}$ 를 통해 연관되고, 입자변위와 전기장은 아래와 같은 4개의 식을 각각의 매질에 대해 만족시켜야 한다. 다음은 이러한 표면탄성파의 전파를 기술하는 식이다.<sup>6~8)</sup>

$$c_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial x_l \partial x_i} + e_{kij} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_l \partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 U_j}{\partial t^2} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$e_{ikl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial x_l \partial x_i} - \epsilon_{ik} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_l \partial x_i} = 0 \quad (2)$$

여기서  $c_{ijkl}$ ,  $e_{ikl}$ ,  $\epsilon_{ik}$ ,  $\rho$ 는 각각 탄성텐서, 압전텐서, 유전텐서, 밀도이고,  $U_k$ 는 기계적 변위의 k번째 성분이며,  $\phi$ 는 전기장이다.

각 매질 내에서의 입자변위와 전기장은 다음과 같은 부분파의 선형조합으로 가정할 수 있다.

$$U_j = A_j \exp[ik(b x_3 + x_1 - vt)] \quad (3)$$

$$\phi = A_4 \exp[ik(b x_3 + x_1 - vt)] \quad (4)$$

이것은  $x_1$ 방향으로 위상속도  $v$ 로 전파해 가는 파형벡터  $k$ 를 가지는 평면파를 기술하는 식이다.  $b$ 는 복소수이며, 깊이에 따른 크기의 변화를 나타낸다.  $A_j$ 는 각 부분파들의 상대적인 크기를 나타낸다.

식 (3), (4)를 (1), (2)에 대입해서 풀게 되면, 4개의 미지수  $A_1, A_2, A_3, A_4$ 를 가지는 4원 일차연립방정식이 나오고, nontrivial해를 가지기 위해서는 계수들의 행렬식이 0이 되어야 한다. 이 행렬식은  $b$ 에 대한 8차방정식의 형태를 가지게 된다. 8개 각각의 근에 대해서 4개 원소로 된 아이젠벡터 ( $A_1, A_2, A_3, A_4$ )가 존재하고, 8개 각각의 근  $b$ 와 아이젠벡터의 조합은 모두 식 (1), (2)를 만족하게 된다. 기판에서는 깊이가 깊어질수록 해가 0으로 감쇠되어야 하기 때문에, 8개의  $b$ 중에서 허수부가 음수인 4개만이 유효하다. 그러므로 기판에서는 4개의 부분파가, 그 위의 층들에서는 8개의 부분파가 존재하게 된다. 이들 부분파들은 경계조건을 만족하도록 선택된 계수들을 가진 선형조합으로 표현될 수 있다. 식 (1), (2)의 일반해는 다음과 같이 주어진다.

$$U_j = \sum_{m=1}^4 C_m U_j^{(m)} \exp[ik(b^{(m)} x_3 + x_1 - vt)] \quad (j=1,2,3) \quad (5)$$

$$\phi = \sum_{m=1}^4 C_m \phi^{(m)} \exp[ik(b^{(m)} x_3 + x_1 - vt)] \quad (6)$$

여기서  $ib^{(m)}$ 은  $x_3$ 방향으로의 감쇠 상수이다. 계수  $C_m$ 은 경계조건에 의해 결정되고, 기판에서  $m$ 값은 4개, 그 위의 층에서는 8개가 된다.

본 연구에서는 사파이어 기판위에 GaN층이 있는 구조의 표면탄성파의 위상속도를 수치적으로 계산하였다. 표면탄성파는 Fig. 2에서와 같은 다층구조 박막에서  $x_1$ 방향으로  $x_2$ 에 수직한 평면으로 전파해 가며,  $x_3$ 방향으로 지수함수적으로 감쇠한다. 응력  $T_{ij}$ 와 전기적전위  $D_k$ 는 사용한 구조의 경계조건을 적용한다.

계산 프로그램으로 구현하기 위해서 첫 번째 계면에서의 경계조건과 마지막 계면에서의 경계조건 사이의 관계를 몇 개의 식으로 압축하면서 그 사이의 계면에 대한 식들은 모두 소거시켜 모든 변수들이 외부경계조건에 의해서만 표현

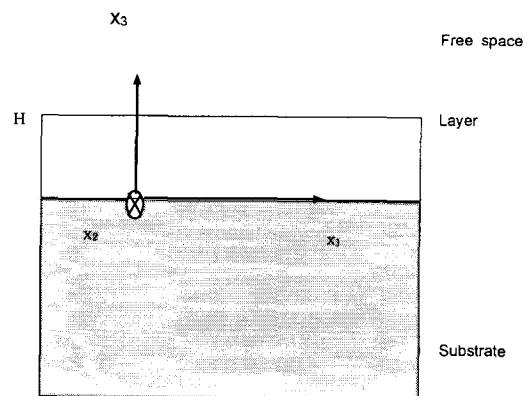


Fig. 2. A layer structure of GaN/sapphire.

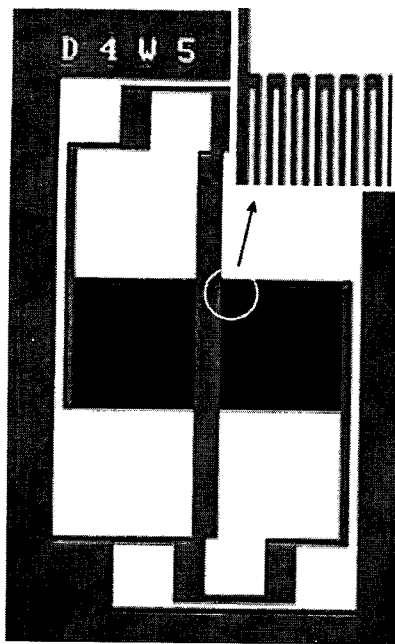


Fig. 3. IDT pattern fabricated by wet etching.

될 수 있게끔 하였다.<sup>3)</sup>

탄성과 속도 계산은 박막의 두께와 전파 방향을 변화시켜서 행하였다. 기판위에 박막이 형성되어 있는 구조인 경우, 박막의 두께와 파장의 비에 의해 탄성과 특성이 변하므로 박막의 두께는  $\mu\text{m}$ 로 표시하였다. 선택된 전파 방향은 사파이어의  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 와  $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ 방향이다.

### 3. 실험 방법

GaN 박막은 c-면 사파이어 기판위에 MOCVD 장치를 이용하여 성장시켰다. 성장온도는  $1,050\text{ }^\circ\text{C}$ 이고 반응기 압력은 100 torr로 유지시켰다. Ga의 원료물질로는 trimethylgallium (TMGa), 질소의 원료물질은 암모니아 ( $\text{NH}_3$ ), Mg의 원료물질은 biscyclopentadienyl ( $\text{Cp}_2\text{Mg}$ )을 사용하였다. p-type 인 경우 Mg의 농도는  $8 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 이다. 이 농도는 전하 농도가 아닌 총 도핑량이며 증착 후 SIMS (Secondary ion mass spectroscopy)로 분석한 결과이다. 암모니아와 TMGa은 수소를 수송가스로 이용하여 각각 6 slm and 60 sccm 로 공급하였다. c-면 사파이어 위에 금속유기화학증착법으로 성장시킨 GaN 박막이 에피 성장했는가를 확인하기 위해 고분해능 x-선회절기를 이용해 분석하였다. Unapodized IDT (Inter-Digital Transducer) 전극을 사진 식각공정을 사용하여 GaN/사파이어의 표면에 형성 시켰다. 사용한 전극재료는 Al-0.5%Cu이며 두께는 150 nm 로 하였다. 전극 finger는 50쌍이며 파장 ( $\lambda$ )은  $4 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$  범위이다. Fig. 3는 습식식각에 의하여 제작된 IDT 패턴의 광학사진이다. 각 소자의 SAW 특성은 HP8753D 네트워크분석장치를 사용하여 측정하였다. 측정주파수 범위는 200 MHz에서 4 GHz이고 wafer probe (Cascade Microtech)를 방법을 이용하였다.

### 4. 결과 및 고찰

SAW 측정을 하기 전에 GaN 박막의 결정품질을 분석하여 실험에 적합한 지를 확인하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이,  $\theta/2\theta$  주사를 통해 GaN (002) 면이 기판에 수직한 방향으로 잘 성장한 박막임을 확인하였다. 하지만 피크의 모양으로 보아 GaN과 사파이어의 격자부정합으로 인한 변형이 GaN 박막내에 존재하고 있음을 확인하였다. 또한, Fig. 4의 삽입 그림에서 나와 있듯이, GaN (002) 측 rocking curve는 좌우 대칭의 모양을 지니며, FWHM 값은 340 arcsec 정도로 다른 선진 연구자들에 의해 발표된 값과 유사한 값을 얻을 수 있었다. 이로부터 성장시킨 GaN 박막은 p-도핑을 위해 Mg를 첨가하였음에도 불구하고 c-plane 사파이어 기판에 에피택셜 관계를 가지고 성장한 비교적 우수한 결정질의 단결정 박막임을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 사용한 GaN 박막의 파단면의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 순수한 GaN의 두께는  $1.2\mu\text{m}$ 이고, Mg 도핑된 박막의 두께는  $1\mu\text{m}$ 이다. Mg이 도핑된 층과 안 된 층의 파단면 형상의 차이를 뚜렷이 보여주고 있으며, 이는 박막내의 응력 차이에서 온 것으로 추측된다. 하지만 이후 실험을 통해 도핑의 효과가 표면탄성과 특성에는 영향을 주지 못함을 확인하였다.

GaN의 SAW 속도를 계산하기 위하여 탄성계수를 결정해야한다. 그러나 GaN은 단결정 형태로 제조하기 힘들기

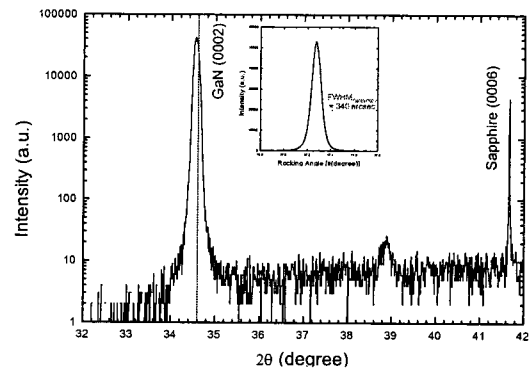


Fig. 4. HRXRD pattern of Mg-doped GaN/sapphire.

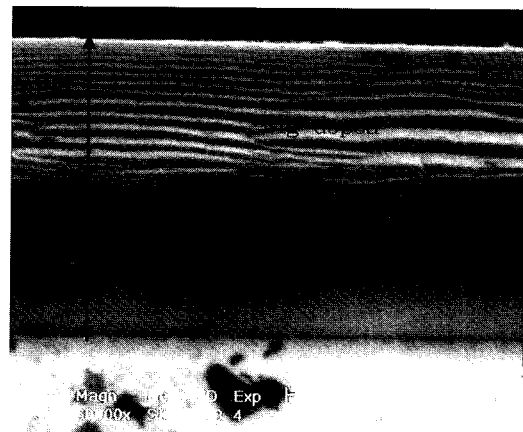


Fig. 5. SEM micrographs of GaN/sapphire.

Table 1. Elastic Modulus of GaN

$C_{ij}$ (GPa)	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{66}$
a. Needle like bulk GaN <sup>9)</sup>	390	145	106	398	105	122.5
b. GaN plate <sup>9)</sup>	377	160	114	209	81.4	109
c. GaN on sapphire <sup>10)</sup>	370	145	110	397	90	112.5
d. GaN on sapphire <sup>11)</sup>	365	135	114	381	109	115
e. GaN on sapphire <sup>12)</sup>	373	141	80.4	387	93.6	118
f. GaN single crystal <sup>13)</sup>	396	144	100	392	91	126
g. GaN single crystal <sup>14)</sup>	367	135	103	405	95	116
h. GaN single crystal <sup>15)</sup>	350	140	104	376	101	115

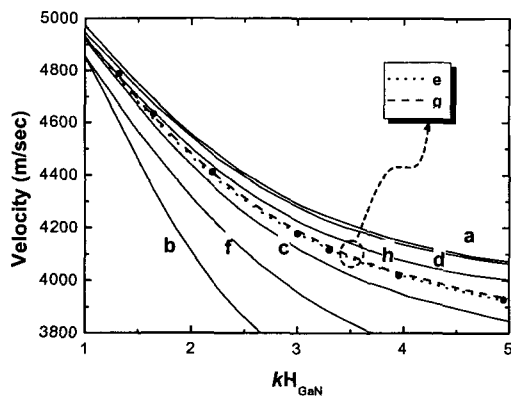


Fig. 6. The calculated velocity dispersion of the 0th mode SAW (line) with reported elastic moduli and the measured one plotted in circle.

때문에 탄성계수의 직접적인 측정이 어려운 물질이다. 보고된 바에 의하면 Pseudopotential method, full potential linear muffin-tin-orbital method, Brillouin spectroscopy, resonance ultrasonic method 등의 여러 방법들이 사용되었으며<sup>8~15)</sup>, Table 1과 같이 문헌에 발표된 탄성계수들은 수치에서 상당한 차이를 보이고 있다. 그래서 본 연구에서는 발표된 탄성계수 값을 이용하여 기본 모드의 탄성과 속도 dispersion를 계산하였고 이를 본 실험에서 측정된 데이터와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6를 보면 Deguchi<sup>12)</sup>, Wright<sup>14)</sup>에 의해 발표된 탄성계수 값이 본 연구 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 본 실험의 탄성과 속도 계산에서는 Wright에 의해 발표된 계수 값을 사용하였다.

GaN의 결정계는 6mm 점군이다. 따라서 c-면에서 등방성탄성(isotropic elastic)과 압전성을 갖게 된다. 반면에 사파이어는 3m으로서 c-면에서 압전성은 없지만, 탄성특성은 6회 대칭의 탄성 특성을 나타내고 있다. c-면 사파이어의 방향에 따른 표면탄성과 계산속도는 5548-5687m/s 사이의 값을 갖는다. 사파이어의 <1120>와 <1100> 방향으로 전파특성 측정을 시행하였는데, 각각의 방향이 가장 작고 큰 표면탄성과 속도를 가진다. 여러 가지 테스트패턴의 IDT에 따른 표면탄성과 특성을 분석하였으며, 그 중에서  $\lambda=6\mu\text{m}$ 의 주파수 응답 특성을 Fig. 7에 나타내었고

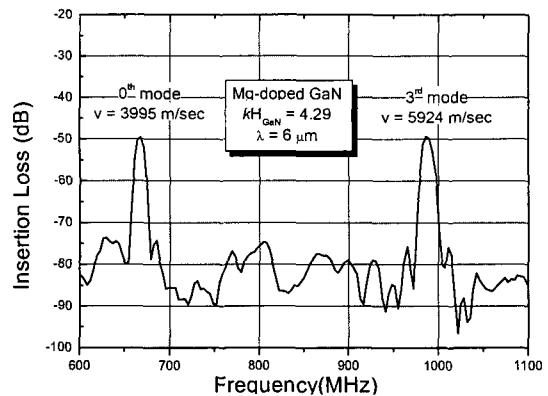


Fig. 7. Measured frequency response of GaN/sapphire SAW Filter with  $6\mu\text{m}$  wavelength and  $kH_{\text{GaN}}=4.29$ .

이때의  $kH$ 는 4.29이다. 중심주파수는 666 MHz와 987 MHz로, 666 MHz 피크에서는 기본 Rayleigh 모드가 나타난 것이고 987 MHz에서는 3번째 고차 모드이다. 기관 위에 다수의 박막층이 형성되어 있는 구조인 경우 Rayleigh 파의 고차 모드가 존재하며 첫 번째 고차모드를 Sezawa파라고 부르기도 한다. 이러한 고차모드는 Rayleigh파와 거의 유사한 특성을 보여주므로 Generalized-Rayleigh SAW (GSAW)라고 불린다. 삽입손실은 비교적 큰 값들을 보이고 있다. 그러나 이 경우 임피던스 매칭을 과정을 거치지 않았기 때문이다. 더욱 높은 주파수 영역에서 GSAW가 아닌 탄성과 모드가 측정되었다.  $\lambda=6\mu\text{m}$ 이고  $kH$ 가 2.2일 때의 주파수 응답 특성을 Fig. 8에 나타내었다. 중심주파수는 1125 MHz와 1775 MHz로써 각각의 속도를 계산해 보면 각각 6750과 10650 m/sec가 된다. 같은 전파방향으로 기관인 사파이어의 수직 전단속도가 (shear vertical) 5719 m/sec이므로 측정된 탄성파는 GSAW보다 속도가 빠른 의사표면탄성과 (PSAW, Pseudo SAW))임을 예상할 수 있다. 6750 m/sec 속도는 계산 결과 의사표면파의 속도와 일치하였으며, 10650 m/sec의 속도를 나타내는 모드는, 사파이어의 수평 전단속도 (shear horizontal)가 6750 m/sec이므로 고속의 의사표면탄성과 (HVPSAW, High velocity PSAW)로 분류할 수 있으며 계산결과와도 일치하였다. 측정된 결과들을 검증하기 위해

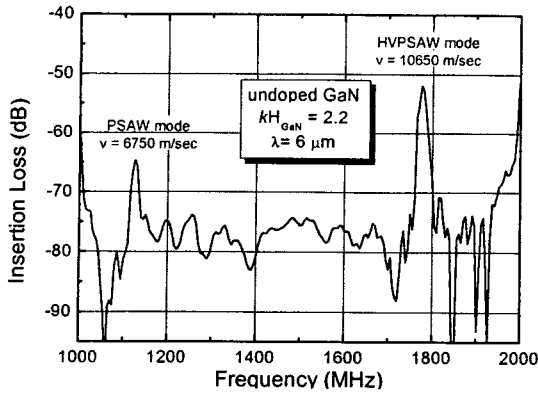


Fig. 8. Measured frequency response of GaN/sapphire SAW Filter with  $6\mu\text{m}$  wavelength and  $kH_{\text{GaN}}=2.2$

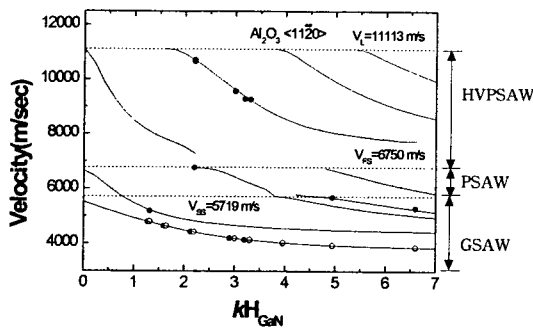


Fig. 9. The calculated (line) and experimental (circle) SAW velocity of undoped (open) and Mg-doped (closed) GaN/sapphire as a function of  $kH$ . The propagation direction is  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ .

$kH$ 에 따른 탄성파 속도를 계산해 보았다. 선택된 전파 방향은 사파이어를 기준으로  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 와  $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ 이다. Fig. 9와 10에 각각의 방향에 따른 탄성파 계산결과와 측정값을 나타내었다. 기관인 사파이어의 벌크 횡파 속도를  $V_L$ 로 나타내었고, 두 종류의 벌크 종파 속도를 각각  $V_{FS}$ 와  $V_{SS}$ 로 나타내었다. 도핑을 시키지 않은 GaN과 Mg 도핑된 박막 둘 사이에 탄성파 속도의 관점에서는 거의 차이점을 구별할 수 없었다. 이는  $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  도핑된 양이 탄성계수를 변화시킬 정도로 충분하지 못할 뿐 아니라 고온 활성화 과정을 거치지 않았으므로 도핑이 전기적인 특성에도 영향을 주지 못했기 때문이라 판단되나, 어느 것이 더 지배적인지는 현재로는 결론질 수 없다.

기관인 사파이어의 벌크파의 속도가 GaN보다 빠르므로 사파이어의 벌크파 속도가 한계속도를 결정하게 된다. 기본 모드의 표면탄성파는 느린 벌크 종파 (slow shear velocity) 보다 느린 속도를 나타낸다. 의사표면파의 경우 빠른 벌크 종파 (fast shear velocity)와 느린 벌크 종파 속도사이의 값을 가지고, 그보다 빠른 모드는 고속의사표면파에 속하며 벌크 횡파속도보다는 느린 속도 값을 가진다. 측정된 모드가 어느 영역에 속하는지 확인하기 위해 점선으로 구분하였다.  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 와  $\langle 1\bar{1}00 \rangle$  각각의 방향 모두에서 고속 의사표면파 영역에 탄성파가 존재하지 못하는 영역이 존재하였다. 이 영역의 속도를 가지는 partial wave들의 조합 들로는 경계조건을 만족시키지 못하기 때문이다. 계산결과

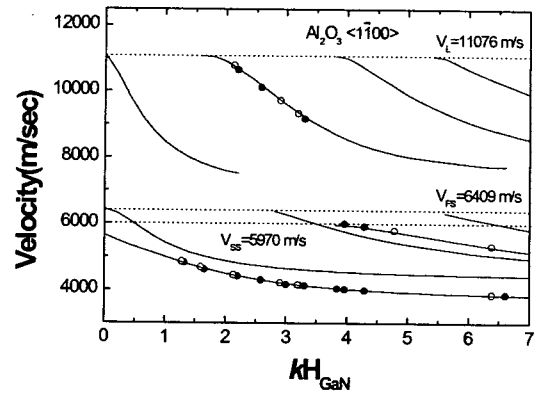


Fig. 10. The calculated (line) and experimental (circle) SAW velocity of undoped (open) and Mg-doped (closed) GaN/sapphire as a function of  $kH$ . The propagation direction is  $\langle 1100 \rangle$ . Horizontal dashed lines represent longitudinal velocity ( $V_L$ ), fast shear velocity ( $V_{FS}$ ), and slow shear velocity ( $V_{SS}$ ).

와 측정값들이 상당히 일치하는 모습을 보여주고 있으며, 고속 의사표면파인 경우 10000 m/sec 이상의 높은 속도 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 탄성파의 속도가 가장 빠른 물질로 알려진 다이아몬드와 탄화규소를 이용한 탄성파소자에서만 10000 m/sec 이상의 높은 속도를 얻을 수 있어, 이들은 2 GHz이상의 고주파 소자로 많은 각광을 받아왔다. 하지만 가공이 어렵고 제조에 많은 비용이 소모되는 단점을 가지고 있어 실용화의 걸림돌이 되어왔다. 하지만 GaN/sapphire 구조에서 고속 의사표면파 모드를 이용한다면 2GHz이상의 고주파 소자에 적용이 기대된다.

### 5. 결 론

사파이어의 c-면에 에피성장된 GaN의 표면탄성파 특성을 측정하고 이로부터 속도 dispersion 특성을 얻었다. 이것을 기존에 발표된 탄성계수를 사용한 속도 dispersion과 비교를 통하여 Deguchi, Wright에 의해 발표된 탄성계수 값이 본 연구 결과와 잘 일치함을 확인하였다. Rayleigh 모드 표면탄성파 뿐만 아니라 의사표면파와 고속의사표면파도 측정되었으며 이들 속도는  $kH$  전 범위에서 계산결과와 잘 일치하였다. GaN 박막 내의 활성화 되지않은 Mg 도핑은 표면탄성파 속도에 영향을 미치지 못함을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호: R01-1999-000-00190-0) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. H. Nakahata, K. Higaki, A. Hachico, S. Shikata, N. Fujimori, Y. Takahashi, T. Kajihara, and Y. Yamamoto, Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1, **33**(1A), 324 (1994).
2. G.D. O'Clock and M.T. Duffy, Appl. Phys. Lett., **23**, 55 (1973).

3. I.S. Didenko, F.S. Hickernell, and N.F. Naumenko, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., **47**, 179 (2000).
4. R.M. White, "Surface Elastic Wave", Proc IEEE, **58**(8), 1238 (1970).
5. S. Makarov, E. Chilla, and H. -J. Frohlich, J. Appl. Phys., **78**(8), 5028 (1995).
6. G.W. Farnell and E.L. Adler, "Elastic Wave Propagation in Thin Layers", edited by R.N. Thurston and W.P. Mason in physical Acoustics, Volume IX (Academic, New York, 1972), pp. 35-127.
7. E.L. Adler, et al. "PC Software for SAW Propagation in Anisotropic Multilayers", IEEE Ultrason, Ferr. and Freq. vol. 37, no. 2, pp.215-222.
8. A. Polian, M. Grimditch, and I. Grzegory, J. Appl. Phys. **79**, 3343 (1996).
9. R.B. Schwarz, K. Khachataryan, and R.E. Weber, Appl. Phys. Lett. **70**, 1122 (1997).
10. C. Deger, E. Born, H. Angerer, O. Ambacher, M. Stutzmann, J. Hormstein, E. Riha, and G. Fischeruer, Appl. Phys. Lett. **72**, 2400 (1998).
11. M. Yamaguchi, T. Yagi, T. Azuhata, T. Sato, K. Suzuki, S. Chichibu, and S. Nakamura, J. Appl. Phys. **86**, 1860 (1999).
12. T.Deduchi, D. Ichiryu, K. Toshikawa, K. Sekiguchi, T. Sato, R. Matsuo, T. Azuhata, M. Yamaguchi, T. Yagi, S. Chichibu and S. Nakamura, J. Appl. Phys. **86**, 1860 (1999).
13. K. Kim, W.R.L. Lambrecht, and B. Segall, Phys. Rev. B **53**, 16310 (1996); *ibid.* **53**, 7018 (1997)..
14. A.F. Wright, J. Appl. Phys. **82**, 2833 (1997).
15. K. Shimada, T. Sato, and K. Suzuki, J. Appl. Phys. **84**, 4951 (1998).