

논문 19-1-4

6H-SiC 위에 형성한 에피택시 AlN 박막 구조에 대한 전기적 특성의 평가온도 의존성

Temperature Dependence on Electrical Characterization of Epitaxially Grown AlN Film on 6H-SiC Structures

김용성¹, 김광호^{1,a}

(Yong-Seong Kim¹ and Kwang-Ho Kim^{1,a})

Abstract

Epitaxial aluminum nitride films on 6H-SiC (0001) were fabricated using reactive RF magnetron sputtering and post-deposition rapid thermal annealing. The electrical properties of AlN films depending on film thickness and measurement temperature have been observed. Full width at half maximum of AlN (0002) was 0.1204° (about 430 arcsec) X-ray rocking curve results. The equivalent oxide thickness (EOT) of AlN film was estimated as about 10 nm and the leakage current density was within the order of 10⁻⁸ A/cm². The dielectric constant of AlN film estimated from the accumulation region of C-V curve measured at 300 °C was 8.3. The dynamic dielectric constant was obtained as 5.1 from J vs. 1/T plots at the temperature ranging from R.T. to 300 °C. From above, estimation temperature dependance of the electrical properties of Al/AlN/SiC MIS devices was affirmed and useful data compilation for the reliabilities of SiC MIS is expected.

Key Words : Reactive RF magnetron sputtering, MIS (Metal-insulator-semiconductor), EOT (Equivalent oxide thickness), Rocking curve, RTA (Rapid thermal annealing)

1. 서론

탄화규소 (Silicon Carbide; SiC)는 300 K, 3 eV의 에너지갭, 4 MV/cm 이상의 절연파괴장도, 3.7 W/cmK의 열전도율, 2.0×10⁷ cm/s의 전하이동속도 등의 전기적, 물리적으로 뛰어나, 고온, 고전력, 고주파용 소자의 응용분야에 큰 가능성을 지니고 있는 재료로써 주목받고 있다[1,2]. 특히, 큰 에너지갭을 갖는 반도체 재료들 가운데 유일하게 자연산화막의 형성이 가능하다는 점은 다른 화합물 반도체 재료들을 능가하는 장점이라 할 수 있다. 그

러나 이런 장점만큼이나 SiC MIS 소자의 동작 특성에 대한 정확한 평가 또한 매우 중요하다. 특히 SiC MIS 소자의 경우, 실리콘 소자들과는 달리 실온에서는 큰 에너지갭과 높은 계면준위 밀도 때문에 다수 캐리어의 응답속도가 매우 느려서 수년이 걸리기도 한다[3]. n-type 반도체의 경우 다수캐리어인 전자가 계면준위로부터 전도대역으로 방출될 수 있는 시정수를 다음의 관계식[4]과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_n = \frac{\{\exp(E_c - E)/kT\}}{T^2 \gamma_n \sigma_n} \quad (1)$$

여기서, $\gamma_n = (v_{Tn} / T^{1/2})(N_c / T^{1/2})$, T: 절대온도 (K), σ_n : 포획단면적, v_{Tn} : 열전자속도, N_c : 전도대역의 유효상태밀도이다.

1. 청주대학교 정보통신공학부
(충북 청주시 상당구 내덕동 36)
a. Corresponding Author : khkim@cju.ac.kr
접수일자 : 2005. 10. 18
1차 심사 : 2005. 10. 26
2차 심사 : 2005. 11. 18
심사완료 : 2005. 11. 23

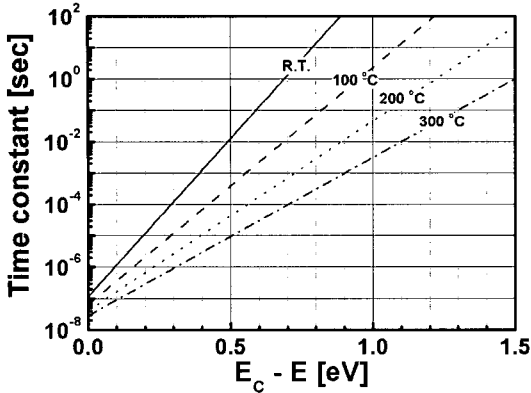


그림 1. 계면준위로부터 다수캐리어 밴드로의 전자방출에 관한 n-type 6H-SiC에서의 시정수 (τ_n).

Fig. 1. Time constants (τ_n) for electron emission from an interface state to the majority carrier band in an n-type 6H-SiC.

그림 1에는 본 실험에 사용된 n-type 6H-SiC에서의 측정 온도에 따른 다수캐리어의 응답속도 (τ_n)를 위의 식을 통해 계산한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 1은 전도대로부터의 상대적인 계면준위 에너지에서의 다수캐리어 응답속도로써, 온도가 높을수록 그 범위가 넓어짐을 알 수 있다. 따라서 보다 넓은 영역의 에너지 대역에 대해 다수캐리어의 응답을 얻어내기 위해서는 가능하다면 측정하고자 하는 시편의 온도가 높을수록 효과적임을 알 수 있다.

본 논문에서는 n-type, 6H-SiC 기판에 형성한 에피택시 AlN 박막의 두께에 따른 누설전류 의존성을 알아보고, Al/AlN/SiC MIS 구조에 대한 보다 자세한 전기적 특성의 평가를 위하여 시료를 가열한 경우와 그렇지 않은 경우의 계면특성 및 누설전류 특성을 평가한 바, 이에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

AlN 박막의 형성은 일반적인 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 이루어졌다. 고순도 Al (6N grade) 타겟과 질소 (6N grade) 가스가 원료 물질로 사용되었다. 성막이 이루어지는 챔버는 가스가 공급되기 전까지 터보 분자펌프를 이용하여 mid 10^{-7} Torr 정도까지 진공을 유지하게 하였다.

스퍼터링이 이루어지는 동안의 전체 압력은 10 mTorr로 고정하였으며, 전체 가스 유량은 MFC (mass flow controller)를 이용하여 제어하였다. 플라즈마 유도를 위한 전력원은 13.56 MHz RF generator가 사용되었으며, RF 파워는 25 W로 유지하였다.

기판으로 사용된 wafer는 n-type, Si 면을 가지며 3.5° off-axis 된 최종 Si 표면을 가진 SiC 에피택시 성장된 6H-SiC (0001)으로 $1\sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 로 질소 도핑된 것을 이용하였다.

준비된 기판은 챔버에 로딩하기에 앞서 RCA 세정을 거친 후 10 % HF 용액에 10분간 담근 직후 스퍼터링 챔버에 로딩하였다. 챔버의 진공도가 mid 10^{-7} Torr 정도가 되었을 때 질소 가스를 흘리고 플라즈마를 여기 시켰다. 셔터를 열어 성막이 시작되기 전에 타겟의 표면을 깨끗한 상태로 만들어주기 위해 10~20 분간 pre-sputtering을 진행하였다. 성막이 진행되는 동안의 챔버내 압력은 10 mTorr가 유지되도록 하였다. AlN 박막의 두께를 5~60 nm가 되도록 하였으며, 성막 중 기판의 온도는 실온을 유지하였다. 스퍼터링이 끝난 후 900 $^\circ\text{C}$, 질소 분위기에서 1분간 급속열처리 (RTA)를 수행하여 그 결정성을 X선 (θ - 2θ scan, 록킹곡선, 극점도)을 이용하여 관찰하였다. 성막과 열처리를 끝낸 시편들은 모두 직경 200 μm 의 원형 급속 마스크를 이용하여 열 증착기를 이용하여 Al을 상/하부 전극으로 형성하고 질소 분위기에서 10 분간 급속화 후 열처리를 수행한 후, HP 4284A (Precise LCR meter)와 HP 4140B (pA meter)를 이용하여 전기적 특성 평가를 각각 수행하였다. MIS capacitor 전극의 면적은 $3.27 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 이다.

3. 결 과

아래 그림 2에서는 본 실험을 통해 제작된 AlN/6H-SiC(0001) 구조의 결정성에 대한 X선 회절 분석 결과로 록킹곡선과 AlN ($10\bar{1}1$)에 대한 극점도를 나타내고 있다.

록킹곡선을 이용하여 AlN 박막에 대한 결정성을 평가한 결과 AlN (0002)의 FWHM (Full Width at Half Maximum) 값이 0.1204° (약 430 arcsec)를 가지며, 그림에 삽입된 것처럼 AlN ($10\bar{1}1$)에 대한 극점도 확인 결과 6H-SiC (0001) 기판 위에서 RTA를 통해 양호한 에피택시가 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 참고로 기판의 SiC (0006)에 대해 측정된 FWHM은 0.066° (약 240 arcsec)이었다[5].

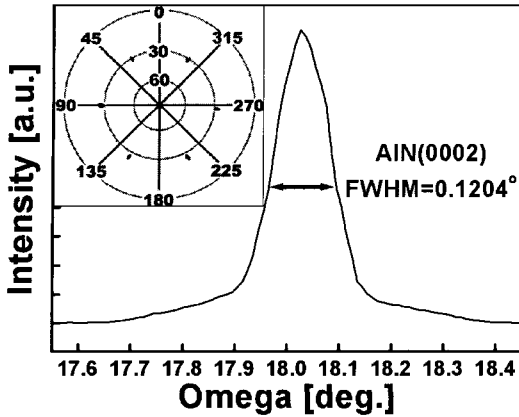


그림 2. RTA 처리한 AlN 박막의 AlN (0002) X-선 록킹곡선 및 AlN {10 $\bar{1}$ 1}에 대한 극점도.

Fig. 2. X-ray rocking curve for AlN (0002) and pole-figure for AlN {10 $\bar{1}$ 1} diffraction signal of the AlN film after RTA treatment.

위의 결과로부터 반응성 RF 마그네트론 스퍼터링을 통한 성장과 급속열처리만으로도 6H-SiC (0001) 기판 위에서 양호한 AlN 박막의 에피택시 결정이 얻어짐을 확인하였고, 이하에서는 평가 온도에 따른 Al/AlN/6H-SiC (0001) MIS 커패시터의 전기적 특성에 대해 논의한다.

먼저, AlN 박막에 대한 누설전류 특성의 막두께 의존성을 실온에서 평가하였으며, 그 결과를 그림 3에 보였다.

위 그림에 보인 것과 같이, AlN 박막의 두께가 5 nm, 9 nm, 22 nm, 35 nm, 53 nm인 각각의 시편에 대해 누설전류 특성을 평가해 본 결과, 22 nm ~ 53 nm 두께의 시편은 1 MV/cm의 전계에 있어서 소자로 응용하기에 손색이 없는 낮은 10^{-9} A/cm 2 ~ 낮은 10^{-8} A/cm 2 정도로 양호한 절연특성을 보였으나 막두께가 그보다 얇은 경우에는 누설전류가 크게 증가하기 시작함을 알 수 있었다. 약 20 nm의 AlN 박막에 대한 EOT (Equivalent oxide thickness)로 환산해 보면 약 10 nm가 된다. 이후 용량-전압 특성 및 누설전류의 온도에 따른 평가에는 보다 안정된 결과를 얻을 수 있도록 막두께가 53 nm인 시편이 사용되었다.

그림 4에 53 nm의 막두께를 갖는 Al/AlN/6H-SiC (0001) 커패시터의 1 MHz C-V 특성 그래프를 나타냈다. 시편의 온도는 실온에서부터 300 °C까지

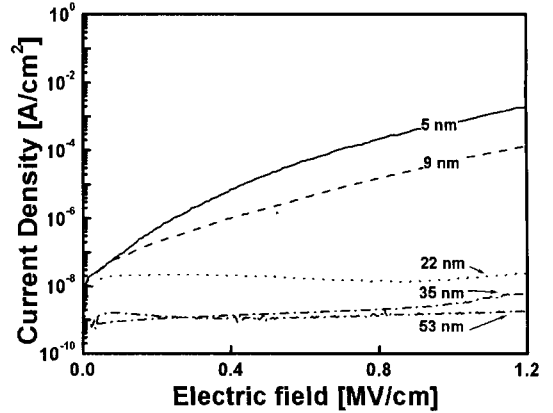


그림 3. 게이트 누설전류 특성의 막두께 의존성 ; AlN 박막의 등가 산화막두께 (EOT)는 약 10 nm이다.

Fig. 3. Thickness dependence of the gate leakage current properties; Equivalent oxide thickness (EOT) of AlN films were about 10 nm.

100 °C씩 증가시켜 특성을 평가하였다. 모든 C-V 특성의 평가는 암실상태를 유지하면서 20 mV/s의 속도로 반전-측정 영역을 왕복하도록 하였다. 그림에 나타난 것처럼 낮은 온도에서는 완전한 반전층이 형성·유지되지 못하나, 300 °C에서는 완전한 반전상태를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

시편의 온도가 높을수록 히스테리시스의 폭이 점진적인 증가를 보임과 동시에 V_{FB}의 위치가 음전압 쪽으로 이동하는 현상이 관측되었다. 이는 시편의 온도가 올라가면서 열에너지를 얻게 되어 진성 페르미 준위가 낮은 에너지 쪽으로 이동하면서 계면 근처의 트랩 및 박막 내부 트랩에 갇혀 있던 전하들이 트랩 밖으로 잘 빠져나오면서 나타난 결과로 판단한다.

실온에서의 경우는 계면근처 페르미 준위와 진성 페르미 준위 사이에서는 인가된 전압 하에서 계면 준위의 응답시간이 매우 길어서 갇힌 전하들이 쉽사리 빠져나오지 못하고 결국 트랩 내에 머물기 때문에 낮은 온도에서는 이와는 반대의 경향을 보인다.

위 그림의 300 °C에서 측정된 용량-전압 그래프의 측정영역의 용량 값으로부터 산출한 AlN 박막의 유전율은 8.3을 가지며, 벌크 AlN의 유전율은 8.5[6]와 비슷하게 얻어졌다.

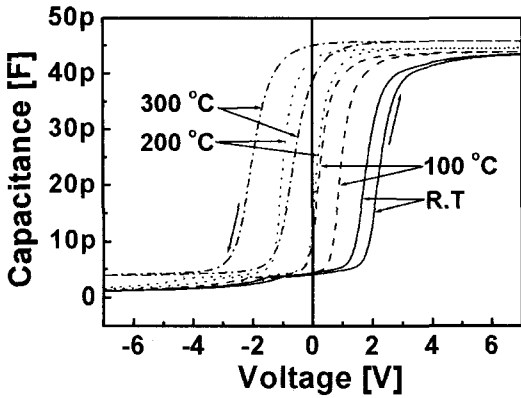


그림 4. Al/AlN/6H-SiC (0001) MIS 커패시터에 대해 실온~300 °C에서 20 mV/s의 속도로 측정된 1 MHz C-V 특성 곡선.

Fig. 4. 1 MHz C-V characteristics of the Al/AlN/6H-SiC (0001) MIS capacitors measured at different temperatures, ranging from R. T. to 300 °C with a voltage sweep rate of 20 mV/s.

또한, 그림으로 따로 나타내진 않았으나, 300 °C, 1 MHz C-V 및 컨택턴스법 (10 kHz~1 MHz)을 통해 평가한 계면준위 밀도는 중간값으로부터 약 0.5 eV의 위치에서 약 $5 \times 10^{10} / \text{cm}^2 \text{eV}$ 이었다. 이러한 결과 값들은 본 연구팀이 선행 발표한 논문[5]에서 photo C-V법을 이용하여 측정된 결과와 거의 일치하고 있다.

그림 5는 Al/AlN/6H-SiC (0001) 커패시터의 온도에 따른 누설전류 특성(J vs. \sqrt{E}) 변화를 관찰하기 위하여 실온 ~300 °C까지 시편에 온도를 가하여 각 온도에서의 누설전류 정도를 관측한 결과이다.

그림에 표시한 것처럼 실온일 경우보다 시편의 온도가 상승함에 따라 누설전류도 점차 커지고 있음을 확인할 수 있다. 2 MV/cm의 전계가 가해졌을 때 실온에서는 10^{-9} A/cm^2 order를 유지하고, 300 °C에서는 약 $2 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 를 나타냈다. AlN 박막의 절연 파괴강도를 확인하기 위해 실온에서 측정된 결과 6 MV/cm 이내에서는 절연파괴가 발생하지 않는 결과를 보였다.

그림 6에서는 1 MV/cm 이하의 저전계 (low field)와 1 MV/cm 이상의 고전계 (high field)가 인가되었을 때의 누설전류와 온도의 관계를 나타내고 있다. 시편의 온도는 실온~300 °C의 상태를 만들어주었고, 각 온도에 대하여 측정된 결과로부터 전류 수송에 대한 메커니즘을 알아보았다.

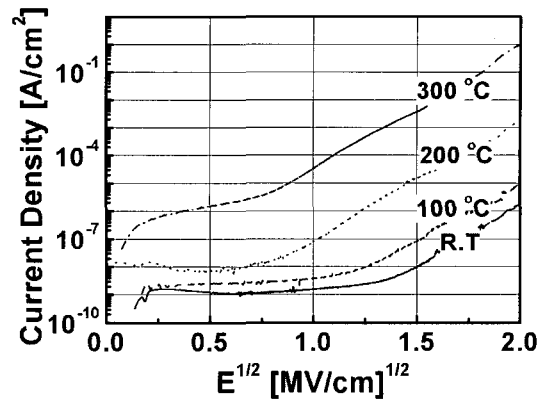


그림 5. 실온에서부터 300 °C까지 가열하여 측정된 Al/AlN/6H-SiC (0001) MIS 커패시터의 J vs. \sqrt{E} 특성.

Fig. 5. J vs. \sqrt{E} characteristics of an AlN/SiC MIS structure at a series of temperatures, ranging from R.T. to 300 °C.

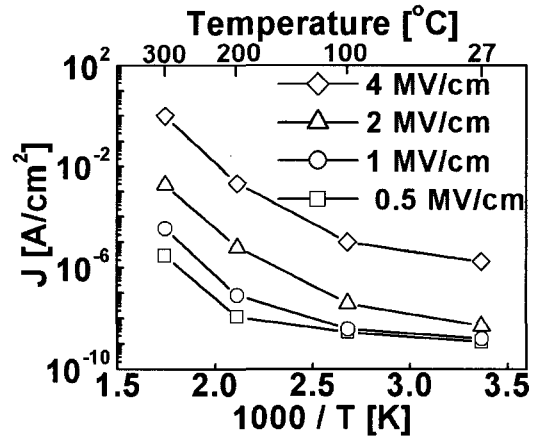


그림 6. 각기 다른 전계에 대한 전류밀도 대 1/T 특성.

Fig. 6. The plots of current density versus $1/T$ for different electric fields.

위의 결과로부터 본 연구팀이 제작한 Al/AlN/6H-SiC (0001) MIS 커패시터의 온도에 대한 누설전류의 변화는 저전계, 저온일 때(□와 ○로 표시된 그래프에서)는 그 변화가 매우 적으며, 고전계, 고온일수록(△와 ◇로 표시된 그래프에서) 누설전류가 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 전류수송 특성은 다음과 같이 두 개의 영역으로 명

확히 구분할 수 있다.

첫째, 저전계 (low field)에서는 열에너지를 흡수해 열적으로 여기된 전자들이 AlN 박막 내에 존재하는 어떤 에너지 준위에서 다른 에너지 준위로 건너뛰면서 발생하는 저항성 (Ohmic) 전류-전압 특성을 보이는 영역을 들 수 있다. 둘째는 고전계 (high field) 하에서 열적 여기가 더욱 촉진되어 트랩에 갇혀 있던 전자들이 전도대역으로 여기되는 Frenkel-Poole emission[7]에 의한 전류수송 특성으로 볼 수 있다.

또한, 그림 6과 같은 전계에 대한 전류밀도 대 $1/T$ 특성으로부터 Frenkel-Poole emission 특성을 나타내는 $100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 구간에서의 그래프 기울기로부터 dynamic dielectric constant인 ϵ_1 의 값을 구할 수 있다. AlN의 dynamic dielectric constant는 $\epsilon_{\infty}=4.68$ 과 $\epsilon_s=8.50$ 사이의 값을 가지며[8] 그림 6에 나타낸 그래프로부터 본 실험에서 제작한 AlN 박막의 dynamic dielectric constant, ϵ_1 의 값이 5.1임을 알 수 있었다.

4. 결론

반응성 RF 마그네트론 스퍼터링 법과 성막 후 급속열처리를 이용하여 n-type 6H-SiC (0001) 기판 위에 에피택시 AlN 박막을 성공적으로 제작하였다.

절연특성을 유지하는 AlN 박막의 최소두께를 알아보기 위해 5 nm, 9 nm, 22 nm, 35 nm인 각각의 시편에 대해 실온에서의 누설전류 유지특성을 평가해 본 결과, 22 nm 및 35 nm 두께의 시편은 1 MV/cm의 전계에 있어서 소자로 응용하기에 손색이 없는 낮은 $10^{-9}\text{ A/cm}^2 \sim$ 낮은 10^{-8} A/cm^2 정도로 양호한 절연특성을 보였으나 막두께가 그보다 얇은 경우에는 누설전류가 크게 증가하기 시작함을 알 수 있었다. 양호한 절연성능을 유지하는 AlN 박막의 최소 두께는 약 20 nm로 EOT (Equivalent oxide thickness)는 약 10 nm 였다.

$300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 측정된 용량-전압 그래프의 축적영역의 용량 값으로부터 산출한 AlN 박막의 유전율은 벌크 AlN의 유전율인 8.5와 비슷한 8.3을 가지며, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 MHz C-V 및 컨덕턴스법 (10 kHz \sim 1 MHz)을 통해 평가한 계면준위 밀도는 중간 갭으로부터 약 0.5 eV의 위치에서 약 $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2\text{eV}$ 이었다.

누설전류의 평가 온도의존성을 관측한 결과, 인가전계 2 MV/cm를 기준으로 실온에서는 10^{-9}

A/cm^2 order를 유지하고, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서는 약 $2 \times 10^{-3}\text{ A/cm}^2$ 로 온도에 크게 의존하고 있음을 확인하였다. 또한, J vs. \sqrt{E} 및 J vs. $1/T$ 변화 관측을 통해 본 연구에서 제작한 AlN 박막의 전류수송 메커니즘이 Frenkel-Poole emission 모델을 따르고 있음을 확인하였으며, 이 그래프의 기울기로부터 얻은 AlN 박막의 dynamic dielectric constant, ϵ_1 의 값이 5.1임을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 에너지갭이 큰 SiC MIS 소자의 절연막으로 사용한 AlN 박막의 전기적 특성이 평가 온도에 따라서 어떠한 변화를 보이는지와 AlN 박막 내에서의 conduction 메커니즘을 알아보았다. 이처럼 광대역 반도체를 기판으로 이용한 MIS 소자들의 전기적 특성에 대한 평가에 있어 고온에서의 평가를 수행함으로써 보다 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] J. W. Palmour, J. A. Edmond, H. S. Kong, and C. H. Carter, Jr., "6H-silicon carbide devices and applications", Physica B, Vol. 185, No. 1-4, p. 461, 1993.
- [2] P. G. Neudeck, "Silicon carbide electronic devices", Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier Science Ltd., p. 8508, 2001.
- [3] J. A. Cooper, Jr., "Advances in SiC MOS Technology", Phys. Stat. Sol. (a), Vol. 162, No. 1, p. 305, 1997.
- [4] Dieter K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization", 2nd Ed. John Wiley & Sons, p. 279, 1998.
- [5] 김용성, 김광호, "반응성 RF 마그네트론 스퍼터링법을 이용한 AlN/SiC 구조의 제작 및 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 11호, p. 977, 2005.
- [6] S. Strite and H. Morkoc, "GaN, AlN, and InN: A review", J. Vac. Sci. Technol. (B), Vol. 10, No. 4, p. 1237, 1992.
- [7] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 402, 1981.
- [8] I. Akasaki and M. Hashimoto, "Infrared lattice vibration vapour-grown AlN", Solid State Commun., Vol. 5, No. 11, p. 851, 1967.