

게이트 절연막에 의한 다이아몬드 MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) 계면의 전기적 특성 개선과 전계효과 트랜지스터에의 응용

Improvement of Electrical Properties of Diamond MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) Interface by Gate Insulator and Application to Metal-Insulator-Semiconductor Field Effect Transistors

윤 영

Young Yun

요 약

본 논문에서는 비 산화물인 불소화합물 게이트절연막을 이용하여 박막반도체 다이아몬드 MIS계면(Metal-Insulator-Semiconductor Interface)의 전기적 안정화를 실현하였다. 특히 산소 게터링 효과(Oxygen-Gettering Effect)에 의한 표면준위 억제를 통해, 박막반도체 다이아몬드 MIS계면에 있어서 최적의 전기적 특성을 부여하는 BaF₂ 게이트절연막을 개발하였다. 본 논문의 결과에 의하면, BaF₂ 게이트 절연막을 이용하여 제작한 Al/BaF₂/diamond MIS 다이오드와 MISFET(Metal-Insulator-Semiconductor Field Effect Transistor)로부터 저농도의 ~10¹⁰/cm² eV의 표면준위밀도가 관측되었고, 그리고 이제까지 발표된 다이아몬드 박막반도체 FET중 최고치인 400 cm²/Vs의 유효이동도가 관찰되었다.

Abstract

Diamond MIS(Metal-Insulator-Semiconductor) diodes and MISFETs(Metal-Insulator-Semiconductor Field Effect Transistors) were fabricated by employing various fluorides as gate insulator, and their electrical properties were closely investigated by means of C-V measurements. The Al/BaF₂/diamond MIS structure exhibited outstanding electrical properties. The MIS diode showed a very low surface state density of ~10¹⁰/cm² eV near the valence band edge, and the observed effective mobility(μ_{eff}) of the MISFET was 400 cm²/Vs, which is the highest value obtained until now in the diamond FET. From the chemophysical point of view, the above result might be explained by the reduction of adsorbed-oxygen on the diamond surface via strong chemical reaction by the constituent Ba atom in the insulator during the film deposition(Oxygen-Gettering Effect).

Key Words : Diamond, MISFET, Surface State Density, Oxygen-Gettering Effect, BaF₂

I. 서 론

박막반도체 다이아몬드는 5.5 eV의 높은 밴드 에너지 갭, 4×10⁶(V/cm) 높은 항복전계, 물질중 최고의 열전도율, 5.9의 낮은 비유전율, 내방사특성 등

으로 하드 일렉트로닉스 반도체소자(고온, 고출력, 고주파동작용, 그리고 방사선환경에서의 동작용 반도체소자)로서 기대되어지고 있다. 최근 들어 박막 반도체 다이아몬드 MISFET(Metal-Insulator-Semiconductor Field Effect Transistor)로부터 양호한 고주파특성^[1]

마쯔시바전기 반도체 디바이스연구센터(Semiconductor Device Research Center, Matsushita Electric Industrial)

· 논문 번호 : 20030226-035

· 수정완료일자 : 2003년 4월 2일

과, 그리고 다이아몬드 MISFET를 이용한 인버터회로 (inverter circuit)로부터 양호한 고온고주파특성^[2]이 발표되면서 박막반도체 다이아몬드는 고온고주파 반도체소자로서 특히 주목을 끌고 있다. 이러한 박막반도체 다이아몬드로서는 수소 플라즈마 처리에 의해 형성된 표면 전도층을 이용하는 수소화 다이아몬드 (hydrogenating diamond)^{[3]-[5]}와 고온에서의 다이아몬드 표면에의 불소종단 (fluorine termination)에 의해 형성된 표면 전도층을 이용하는 불소화 다이아몬드 (fluorinated diamond)^[6]가 있다.

실리콘 MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) 전계효과 디바이스의 발전역사에서 널리 알려진 바와같이 실리콘 표면준위(surface state) 감소에 의한 MOS계면의 양호한 전기적 특성은 실리콘 MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) 개발에 있어서 핵심요건이었다. 따라서, 박막반도체 다이아몬드에 있어서도 MISFET의 응용을 위해서 MIS 계면의 표면준위에 관한 연구가 이미 행하여졌으며^[7], 그 연구결과로부터, 박막반도체 다이아몬드 표면에 있어서 산소흡착은 표면준위밀도를 증가시켜 MIS 계면의 전기적 특성을 저하시킨다는 사실을 알 수 있었고, 그 결과 MISFET의 양호한 전기적특성을 위해서는 박막반도체 다이아몬드 표면에 있어서 가능한 산소흡착을 방지하는 것이 key-point임을 알았다^[7]. 표면준위 감소에 의한 다이아몬드 MIS계면의 전기적 안정화에 관해서는, 현재까지 저산소환경 프로세스에 의한 박막반도체 수소화 다이아몬드 MIS 계면의 전기적 안정화^[7], 산소저감 프로세스에 의한 박막반도체 불소화 다이아몬드 MIS 계면의 전기적 안정화^[8], 초고진공 프로세스에 의한 박막반도체 불소화 다이아몬드 MIS 계면의 전기적 안정화^[2] 등의 연구결과가 보고되어 있고 또는 보고중에 있다. 그러나, 현재까지는 게이트 절연막에 의한 다이아몬드 MIS계면의 전기적안정화에 관한 연구보고는 아직까지 발표되어 있지 않다.

본 논문에서는 비 산화물인 불소화합물 게이트 절연막을 이용하여 박막반도체 수소화 다이아몬드 MIS계면의 전기적 안정화를 실현하였다. 특히 표면 준위억제를 통한 MIS계면의 양호한 전기적 특성을 위해서는 박막반도체 다이아몬드 표면에 있어서 가능한 산소흡착을 방지하는 것이 key-point^[7]라는

점에 주목하여, 박막반도체 다이아몬드 MIS계면에 있어서 최적의 게이트 절연막을 연구, 개발하는데 초점을 두었다. MIS 다이오드와 MISFET의 제작은 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr의 진공상태에서 행하였다. 본 논문의 결과에 의하면, BaF₂ 게이트 절연막을 이용하여 제작한 MIS 다이오드와 MISFET로부터 저농도의 $\sim 10^{10}$ cm² eV의 표면준위밀도가 관측되었고, 그리고 이제까지 발표된 다이아몬드 박막반도체 FET중 최고치인 400 cm²/Vs의 유효이동도가 관찰되었다. 그리고, 본 논문에서는 비 산화물인 불소화합물 게이트 절연막을 통한 MIS계면의 안정화 메카니즘에 대해서도 자세히 기술한다.

II. 본 론

2-1 MIS다이오드와 MISFET의 제작절차

본 논문의 MISFET 단면 구조와 사진은 그림 1(a)와 (b)에 나타나 있다. MIS다이오드와 MISFET의 제작을 위해서 호모에피택셜(homoepitaxial) 100 다이아몬드 기판 위에 박막반도체 다이아몬드층을 CVD (Chemical Vapor Deposition)법에 의해 제작하였으며, 상기 박막반도체 다이아몬드층을 형성하기 위해 고온환경에서 H₂와 CO 가스가 이용되었다. 박막반도체 다이아몬드층의 두께는 대략 1 μ m이며, 표면전도층으로는 수소 플라즈마 처리에 의해 형성된 표면 전도층^{[3]-[5]}을 이용하였다. 소스 드레인 전극으로서 는 합금/티탄(Pt/Ti)이 이용되었으며, 다이아몬드 표면과 금속의 오믹접합을 위해 고온 아닝(annealing)을 수행하였다. 그리고 MIS다이오드와 MISFET의 게이트 절연막으로서 는 비 산화물인 불소화합물 (BaF₂, CaF₂, MgF₂)이 이용되었는데, 전자빔증착법 (electron beam deposition method)에 의해서 성막되었다. 게이트 메탈로서는 Al이 이용되었는데, 이는 열 필라멘트법(hot filament method)에 의해 증착되었다.

2-2 게이트 절연막에 의한 MIS계면의 전기적 특성 안정화

Al/CaF₂/diamond, Al/MgF₂/diamond, 그리고 Al/BaF₂/diamond MIS 다이오드에 대한 C-V특성측정 결과가 그림 2 (a), (b), (c)에 나타나 있다. C-V특성을 조사하기 위해서 그림 1(a)의 MIS 다이오드 용량의

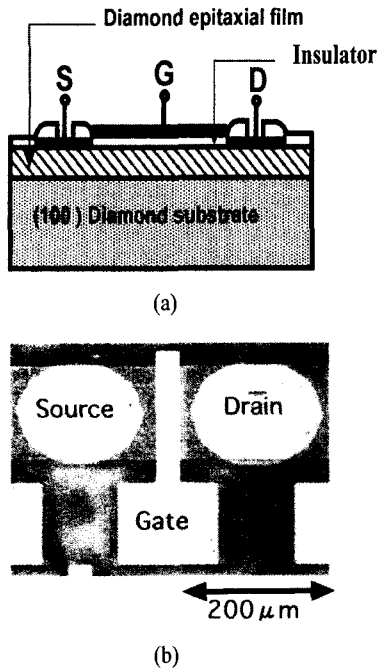


그림 1. (a) 박막반도체 다이아몬드 MISFET의 구조
 (b) 박막반도체 다이아몬드 MISFET의 사진
 Fig. 1. (a) A schematic cross section of the completed diamond MISFET.
 (b) An optical micrograph of the completed diamond MISFET.

게이트-소스간 전압(V_{GS}) 의존성을 고찰하였다.
 그림 1(a)는 실제 MISFET의 단면구조이나, 드레인 전극이 존재하는 것만 빼고는 MIS 다이오드와 동일한 단면구조를 가진다. 우선 Al/CaF₂/diamond와 Al/MgF₂/diamond MIS 다이오드의 C-V특성을 고찰하였다. 그림 2 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 양자는 축적(accumulation) 상태에서부터 결핍(depletion) 상태에 이르기까지 박막반도체 표면의 에너지밴드의 양호한 밴드밴딩특성을 보여주고 있다. 그러나, Al/CaF₂/diamond MIS 다이오드와 비교해, Al/MgF₂/diamond MIS 다이오드는 히스테리시스(hysteresis)와 완만한 C-V커브특성을 보여주는데, 이는 Al/MgF₂/diamond MIS 다이오드의 박막반도체 다이아몬드 표면에 비교적 다량의 표면준위가 존재함을 의미한다. MIS 다이오드의 다이아몬드 표면에 생성된 표면준위를 정량적으로 고찰하기 위해서 널리 알려진 Terman method^[9]를 이용하여 측정된 C-V특성으로부터 표면준위를 계산하였다. Terman method에 의해

표 1. 실온에서의 각 원소의 산소와의 반응에 대한 Gibbs 함수와 평형상수

Table 1. The Gibbs function(ΔG) and the equilibrium constant(K_a) at 298(K).

	$-\Delta G$ (kJmol ⁻¹)	K_a^*
Mg(g) + O(g) → MgO(g)	~310	~10 ²⁴
Ca(g) + O(g) → CaO(g)	~350	~10 ⁶²
Ba(g) + O(g) → BaO(g)	~520	~10 ⁹¹

*평형상수 K_a 는 식 $\ln(K_a) = -\Delta G/RT$ 로부터 계산되었다 (RT=2.48 kJmol⁻¹)

계산된 결과에 의하면, Al/MgF₂/diamond MIS 다이오드의 경우, ~10¹²~10¹⁴/cm² eV 정도의 표면준위가 존재하며, Al/CaF₂/diamond MIS 다이오드의 경우, ~10¹¹~10¹³/cm² eV 정도의 표면준위가 존재하였다.

그런데 Al/CaF₂/diamond 와 Al/MgF₂/diamond MIS 다이오드에 대한 MIS 계면의 전기적 특성차를 야기한 원인에 대해서는 다음과 같이 설명할 수 있다. 본 논문에서는 박막반도체 다이아몬드 표면에 있어서 산소흡착은 표면준위밀도를 증가시켜 MIS계면의 전기적 특성을 저하시킨다는 사실^[7]에 근거하여 칼슘(Ca)과 마그네슘(Mg)의 산소 게터링 효과(Oxygen-Gettering Effect)^[10]에 주목하였다. 즉, 상기 MIS 계면의 전기적 특성차는 게이트 절연막 증착시에 있어서 Ca 또는 Mg과 다이아몬드 표면에 존재하는 산소와의 반응성차에 기인한다고 생각되어진다.

표 1은 실온에서의 각 원소의 산소와의 반응성을 보여주며^[10], 평형상수값이 클수록 산소와의 반응성이 큼을 의미한다. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 Ca이 Mg보다 산소와의 높은 반응성을 보여준다.

위 사실로부터, CaF₂에 포함된 Ca은 산소와의 높은 반응성에 의해 게이트 절연막 증착시에 있어서 다이아몬드 표면에 흡착되어 있던 산소와 결합하여 다이아몬드 표면으로부터 산소를 제거하는 역할을 수행한다고 추측할 수 있다(이후부터 산소 게터링효과^[10]라고 명명하겠다). 위의 사실을 고려하면, 다이아몬드 MIS계면의 전기적특성 안정화를 위해서는 산소와의 반응성이 좋은 원소를 포함하는 게이트 절연막을 사용하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 표면준위 감소를 통해 양호한 절연막/다이아몬드 MIS계면을 얻기 위하여, 그리고, 다이아몬드 표면에의 산소 게터링 효과를 다시 한

게이트 절연막에 의한 다이아몬드 MIS 계면의 전기적 특성 개선과 전계효과 트랜지스터에의 응용

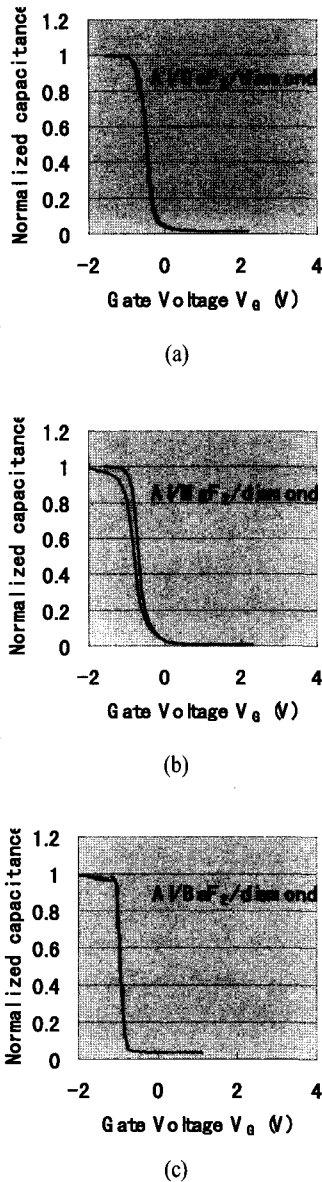


그림 2. (a) Al/CaF₂/diamond MIS 다이오드에 대한 C-V특성 측정결과
 (b) Al/MgF₂/diamond MIS 다이오드에 대한 C-V특성 측정결과
 (c) Al/BaF₂/diamond MIS 다이오드에 대한 C-V특성 측정결과

Fig. 2. (a) Measured C-V characteristics of Al/CaF₂/diamond MIS diode.
 (b) Measured C-V characteristics of Al/MgF₂/diamond MIS diode.
 (c) Measured C-V characteristics of Al/BaF₂/diamond MIS diode.

번 확인하기 위해서, 산소와의 반응성이 아주 높은 바륨(Ba)을 포함하는 BaF₂ 게이트 절연막을 이용하였다. Al/BaF₂/diamond MIS 다이오드에 대한 C-V특성 측정결과가 그림 2 (c)에 나타나 있다. C-V특성에서 알 수 있는 바와 같이 축적상태에서 결핍상태에 이르기까지 박막반도체 다이아몬드 표면의 에너지 밴드의 양호한 밴드밴딩을 관찰할 수 있으며, 히스테리시스특성도 보여지지 않는다.

그리고 에너지밴드의 flat-band 영역인 -1 V의 게이트전압 근방에서 C-V커브의 급격한 경사를 관찰할 수 있다. 이러한 특성들은 Al/BaF₂/diamond MIS 다이오드의 MIS 계면이 저농도의 표면준위에 의해 전기적으로 매우 안정되어 있음을 의미한다. 실지 MIS 다이오드의 다이아몬드 표면에 생성된 표면준위를 정량적으로 고찰하기 위해서 Terman method를 이용하여 측정된 C-V특성으로부터 표면준위를 계산하였다. 그림 3은 여러 가지 MIS 다이오드의 다이아몬드 표면에 존재하는 표면준위 밀도를 보여준다.

그림 3에서 사각형은 Al/CaF₂/diamond MIS 다이오드의 표면준위 밀도에 해당하며, 삼각형은 Al/MgF₂/diamond의 표면준위 밀도에 해당한다. 그리고 검은 원은 Al/BaF₂/diamond의 표면준위 밀도에 해당한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 MIS계면의 게이트 절연막 구성원소가 산소와의 반응성이 좋을수록(표 1참조) MIS 다이오드의 표면준위밀도는 낮아짐을 알 수 있다. 실지 다이아몬드 전계효과 소자로서의 응용을 위해서는 FET의 I_D-V_D커브의 게이트전압 의존성을 관찰할 수 있어야 하는데, 이를 위해서는 대

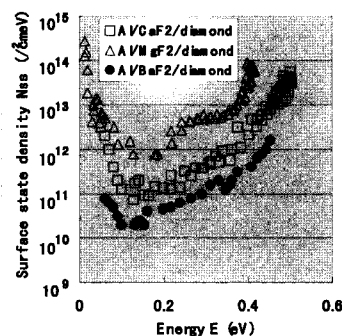


그림 3. 여러 가지 MIS 다이오드의 다이아몬드 표면에 존재하는 표면준위 밀도

Fig. 3. Surface state density distributions for various Al/insulator/diamond MIS diodes.

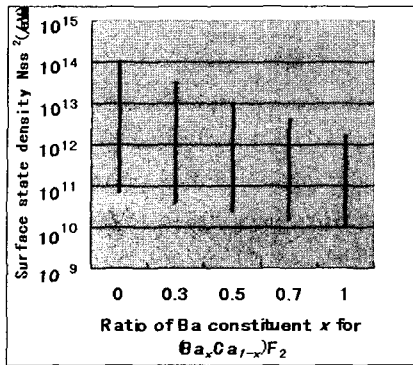


그림 4. Al/(Ba_xCa_{1-x})F₂/diamond MIS 다이오드의 계면에 존재하는 표면준위밀도의 Ba 조성비의 의존성

Fig. 4. Dependency of ratio of Ba constituent X for surface state density of Al/(Ba_xCa_{1-x}) F₂/diamond MIS diodes.

약 10¹⁴/cm² eV 이하의 표면준위밀도가 존재해야 한다^[7]. 이제까지 밝혀진 다이아몬드 표면의 표면준위 밀도는 대략 ~10¹² ~10¹⁴/cm² eV 정도이나^[7], Al/BaF₂/diamond MIS다이오드에 존재하는 표면준위 밀도는 대략 ~10¹⁰~10¹¹/cm² eV 정도이며, FET동작시의 Fermi level 위 치인 가전자대(valence band) 근방(그림 3의 0.1 eV이하의 에너지대역)에서는 대략 ~10¹⁰/cm² eV 정도이며, 이는 상용화된 실리콘 MOSFET (실지 상용화된 실리콘 MOSFET의 경우는 ~10¹⁰~10¹¹/cm² eV 정도이다)에 버금가는 결과이다.

다이아몬드 MIS계면의 전기적 특성 안정화에 있어서 Ba의 역할을 고찰함으로써 산소 게터링 효과를 좀더 명확하게 확인하기 위해서, (Ba_xCa_{1-x})F₂ 게이트 절연막을 이용하여 Al/(Ba_xCa_{1-x})F₂/diamond MIS 다이오드를 제작하였다. Ba의 조성비 X를 바꾸어 가며 수 종류의 Al/(Ba_xCa_{1-x})F₂/diamond MIS 다이오드를 제작하였으며, MIS계면의 전기적 특성을 평가하였다. 그림 4는 Terman method를 이용하여 구한 Al/(Ba_xCa_{1-x})F₂/diamond MIS 다이오드의 계면에 존재하는 표면준위밀도의 Ba 조성비 의존성을 보여 준다.

그림은 가전자대로부터 0.5 eV 사이의 에너지대역에 존재하는 표면준위분포이다. 그림으로부터 Ba 조성비가 증가할수록 MIS 계면의 표면준위밀도가 감소함을 알 수 있다. 상기 결과들로부터, 다이아몬드 표면에서의 산소 게터링을 통해 절연막/다이아몬

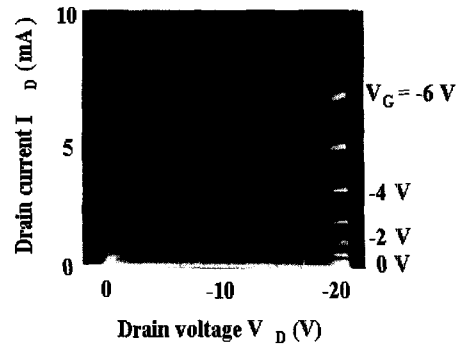


그림 5. Al/BaF₂/diamond MIS FET의 드레인 전류-전압(I_D~V_D) 특성 측정결과

Fig. 5. Drain current-voltage(I_D~V_D) characteristics measured from the Al/BaF₂/diamond MISFET.

드 MIS계면 안정화에 Ba이 결정적인 역할을 하였음을 알 수 있다.

2-3 Al/BaF₂/diamond MISFET의 전기적 특성

본 논문에서는 실지 Al/BaF₂/diamond MISFET를 제작하여, 그 전기적특성을 평가하였다. 그 외에도, 게이트 절연막에 의한 MISFET의 전기적 특성을 비교하기 위해서 다른 두 종류의 게이트절연막을 이용한 MISFET도 제작되었으며, 그 특성은 모두 표 2에 요약되어 있다.

표 2의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 게이트절연막에 의해 MIS계면이 안정될수록 더욱 양호한 MISFET의 전기적특성을 얻을 수 있다. Al/BaF₂/diamond MISFET의 실온에서의 드레인 전류-전압(I_D~V_D)특성 측정결과는 그림 5에 나타나 있다. 표 2에서 볼 수 있는 바와 같이 그림 5의 전류-전압특성

표 2. 다양한 박막반도체 다이아몬드 MISFET의 전기적 특성

Table 2. Electrical properties of various diamond MISFETs.

	유효이동도 μ_{eff} (cm ² /Vs)	표면준위밀도 (/cm ² eV)
Al/BaF ₂ /diamond MIS다이오드	400	~10 ¹⁰
Al/CaF ₂ /diamond MIS다이오드	10	~10 ¹⁰
Al/MgF ₂ /diamond MIS다이오드	2	~10 ¹⁰

으로부터 구한 Al/BaF₂/diamond MISFET의 유효이동도 μ_{eff} 는 400 cm²/Vs이며, 이는 이제까지 발표된 다이아몬드 박막반도체 FET^{[1]~[5],[7],[8]}중 최고치이다. 그리고, MISFET의 전류-전압 특성으로부터 MIS계면 표면준위밀도를 다시 한 번 계산하였는데 (FET의 전류-전압 특성으로부터 구한 드레인 컨덕턴스를 이용한표면준위밀도 계산식은 참고문헌 [11]에 자세히 기술되어 있다), 이 결과도 표 2에 요약되어 있다.

표 2의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이, Al/BaF₂/diamond MISFET의 경우는 MIS계면의 표면준위밀도가 $\sim 10^{10}$ /cm² eV이며, 이는 전 절에서 Terman method를 이용하여 구한 표면준위밀도와 잘 일치한다. 이 수치는 상용화된 실리콘 MOSFET에 버금가는 결과이다.

2.4 MISFET의 고온고주파 증폭기회로에의 응용

본 논문에서 제작된 MISFET를 이용하여 1단 증폭기를 제작하였으며, 고온고주파환경에서 양호한 전기적특성을 관측하였다. 증폭기의 기본적인 고온고주파특성을 조사하기 위해, 두 개의 MISFET를 연결한 능동 부하(active load)형식의 증폭기가 제작되었으며, 입출력 정합회로없이 50 Ω의 신호원단자와 출력신호검파단자가 입출력단에 직접 연결되었다. 그림 6은 200℃에서의 입출력 전압이득에 대한 주파수 특성을 보여준다. 그림 6에서 보는 바와 같이 전압이득에 대해 3 dB 감쇠주파수는 약 600 MHz 정도이다.

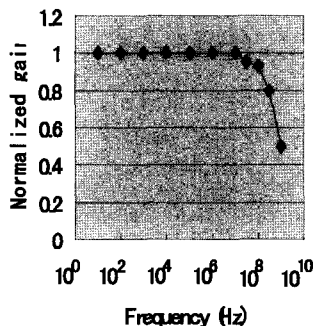


그림 6. 다이아몬드 MISFET를 이용하여 제작된 증폭기의 입출력 전압이득에 대한 주파수 특성
Fig. 6. Frequency dependency of voltage gain for amplifier employing diamond MISFET.

III. 결 론

본 논문에서는 비 산화물인 불소화합물 게이트절연막을 이용하여 박막반도체 다이아몬드 MIS 계면의 전기적 안정화를 실현하였다. 특히 표면준위억제를 위해 산소게터링 효과에 주목하여, 박막반도체 다이아몬드 MIS 계면에 있어서 최적의 게이트 절연막을 연구, 개발하는데 초점을 두었다. 게이트 절연막으로서의 산소와의 반응성이 좋은 Ba, Ca, Mg을 포함하는 BaF₂, CaF₂와 MgF₂ 절연막이 이용되었다. 산소와의 반응성이 클수록 더욱 양호한 MIS계면의 전기적특성이 관찰되었으며, 특히 BaF₂ 게이트 절연막을 이용하여 제작한 MIS 다이오드와 MISFET로부터 저농도의 $\sim 10^{10}$ /cm² eV의 표면준위밀도가 관측되었고, 그리고 이제까지 발표된 다이아몬드 박막반도체 FET중 최고치인 400 cm²/Vs의 유효이동도가 관찰되었다.

참 고 문 헌

- [1] L. H. Umezawa, H. Taniuchi, H. Ishizaka, T. Arima, N. Fujihara, M. Tachiki and H. Kawarada, "RF Performance of Diamond MISFETs", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 23, pp. 121-123, 2002.
- [2] 윤 영, "초고진공 프로세스에 의해 제작된 Al/CaF₂/diamond MISFET의 개선된 전기적 특성과 인버터회로에의 응용", 한국전파학회논문지, 14(5), pp. 536-541, 2003년.
- [3] H. Kawarada, M. Aoki and M. Itoh, "Enhancement Mode MESFETs Using Homoepitaxial Diamonds", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, pp. 1563-1565, 1994.
- [4] M. Itoh, H. Kawarada, "Fabrication and Characterization of MESFET Utilizing Diamond Surface - Conductive Layer", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1, vol. 34, no. 9A, pp. 4677-4681, 1995.
- [5] T. Maki, S. Shikama, M. Komori, Y. Sakaguchi, K. Sakuta and T. Kobayashi, "Hydrogenating Effect of Single-Crystal Diamond Surface", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part2, vol. 31, no. 10A, pp. L1446-L1449, 1992.
- [6] S. Suzuki, Y. Otsuka, T. Maki and T. Kobayashi, "Observation of Capacitance at the Flat-Band-

- Voltage in Boron-Doped Diamond MIS Structure", *Jpn. J. Appl. Phys., Part2*, vol. 35, no. 8B, pp. L1031-L1034, 1996.
- [7] Y. Yun, T. Maki and T. Kobayashi, "Surface state density distribution of semiconducting diamond films measured from the Al/CaF₂/i-diamond metal-insulator-semiconductor diodes and transistors", *J. Appl. Phys.*, vol. 82, pp. 3422-3429, 1997.
- [8] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 1st ed., Wiley, New York, Chap. 7, 1969.
- [9] M. W. Chase, Jr., C. A. Davies, J. R. Downey, Jr., D. J. Frurip, R. A. McDonald and A. N. Syvernd, *JANAF Thermochemical Tables*, 3rd ed., 1985.
- [10] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 1st ed., Wiley, New York, Chap. 11, 1969.

윤 영



1993년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1995년 2월: 포항공과대학 전자전기공학과 전파공학전공 (공학석사)

1999년 3월: 오사카대학 전기공학과 고주파 반도체 MMIC 전공 (공학박사)

1999년~현재: 마쓰시파전기 반도체 디바이스 연구센터
[주 관심분야] 무선통신용 MMIC