論文96-33A-2-14

실리콘 기판에 증착된 코발트 박막의 잡음특성 연구

(A Study on Noise Properties of Co Films Deposited on Si)

趙 南 仁 *, 兪 淳 載 *

(Nam-Ihn Cho and Soon Jae Yu)

요 약

실리콘 기판 위에 전자빔 방법과 스퍼터링 방법에 의하여 코발트 박막을 진공 증착하였으며, 코발트/실리콘의 경계면에서 결정성을 가진 복합물질이 핵형성되어 가는 과정을 투과형 전자현미경으로 관찰함과 동시에 전기적인 잡음을 측정하였다. 증착된 코발트의 두께는 10㎚이내로써, 전자회절 패턴으로 조사한 결과에 의하면 최초에 계면에서 형성되는 복합물질은 비정질의 구조를 가지다가 두께의 증가에 따라 다결정 구조로의 변환이 이루어졌다. 같은 시편을 이용하여 계면에 일정한 전류를 흘려주면서 1/f 잡음 전력스펙트럼을 측정하였고, 측정된 잡음을 규격화한 뒤 잡음의 크기와 주파수 지수항의 변화를 알아보았다. 1/f 잡음 스펙트럼은 10-13/Hz의 아주 작은 전력밀도를 갖다가 두께의 증가에 따라 잡음진폭도 커지나, 다결정 복합물질 핵형성이 일어나는 두께에서는 잡음의 크기가 급격히 감소하는 양상을 보여주었다. 이러한 전기적 잡음변수의 변화는 비정질 구조의 상변화를 나타낸다고 보여지며, 잡음의 진폭은 복합물질의 구조적인 불안정성에 기인하는 현상으로 해석하였다.

Abstract

In an effort to learn more about the reaction mechanisms which lead to the compound nucleation at the interface of cobalt and silicon, electrical noise properties has been investigated for cobalt thin films deposited on silicon substrates by the electron beam evaporation and rf sputtering techniques. Microstructural variations at the Co/Si interfaces have been observed by transmission electron microscopy. Amorphous structures are observed at the Co/Si interfaces for samples whose cobalt thicknesses are less than 4㎚, and a polycrystalline compound nucleation has been occurred for thicker films. 1/f noise power spectral density has been measured during the application of the constant current for the same samples, and the spetral density has been normalized. The amplitude of 1/f noise power spectral density shows a gradual increase as the cobalt thickness is increased, and the amplitude has dropped abruptly after the compound nucleation. The variations of the noise parameters are assumed to be an indication of the phase transformation along the nucleation reaction path, and amplitude has been interpreted as instabilities of the Co/Si interfacial structures.

*正會員, 鮮文大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Center for Science and Advanced Technology, Sun Moon Univ.)

接受日字:1995年4月13日, 수정완료일:1996年1月18日

I. 서 론

본 연구에서 실리콘기판과 코발트 박막의 계면구조에 대하여 잡음 특성을 측정함으로써, 계면에서 복합물질이 핵형성(compound nucleation) 되는 과정을 전기적 측면에서 관찰하였다. 이러한 전기적 관찰은 종래의 구조적 관찰[1~7]과는 전혀 다른 새로운 시도이며, 아직까지 반 경험적인 방법으로만 발전되고 있는 반도체 집적회로 공정의 고체상태 반응 메커니즘에 대한 보다 근본적인 지식을 얻는 것을 목적으로 하고 있다. 사실상 두 물질이 고체상태로 반응하여 새로운 복합물질의 핵형성이 되는 반응과정은 반도체소자 제조에서 널리 쓰이고 있지만, 핵형성의 반응메커니즘은 거의 알려져 있지 않다. 이는 두 물질 반응의 최초 단계에는 비정질 구조(amorphous structure)가 형성되고, 그 비정질이 여러 반응조건에 따라 에너지 상태가 월등히 낮은 다결정의 복합물질 구조로 변화되어 가기 때문으로, 많이 알려진 물질분석 기술은 결정성이 있는 구조에 대해서만 뚜렷한 정보를 제공하고 있는 실정이다. 즉 투과형 전자현미경(TEM, transmission electron microscopy), 주사형 전자현미경(SEM, scanning electron microscopy), Auger, 이차이온 질량분석기(SIMS, secondary ion mass spectroscopy), XRD(X-ray diffraction) 기술 등은 모두 비정질 구조분석에는 많은 제한이 있으며, 유력한 분석방법은 EXAFS(extended X-ray adsorption fine structure) 혹은 SEXAFS(surface extended X-ray adsorption fine structure) 이나 국내에서는 이 장치가 없기 때문에 금번 실험에서는 사용하지 않았다. 반면에 전기적 잡음특성이 물질의 미세구조에 의해 다르게 나타난다고 볼때, 비정질 또는 짧은 거리의 규칙성(SRO, short-range-order)만을 갖는구조에 대하여 전기적 잡음 변수의 변화를 측정함으로써 종래의 물질분석 방법으로는 얻을 수 없는 새로운 정보를 얻을 수 있을 것이다. 더욱이 본 연구의 관심 영역은 비금속성이며[2] 비결정성 구조이기[5] 때문에 잡음특성에는 많은 변화가 관찰될 것이고, 잡음특성의 변화가 순탄히 진행되는 경우는 구조적 변화도 서서히 진행된다고 여겨지고, 잡음특성의 급격한 변화는 구조자체가 어떤 비정질 구조에서 다른 비정질 구조로 전환된다고 해석할 수 있을 것이다.

전기적 잡음현상은 어떠한 전자소자(박막포함)에서도 그 소자에 전류를 흘려줄 경우 발생하게 되며, 잡음현상은 그 물리적 원인에 따라 Johnson 잡음, shot 잡음, 1/f 잡음의 세 가지로 구분된다. 그중 Johnson 잡음, shot 잡음은 주파수에 무관한 백색잡음에 해당되며 물리적 원인이 일찌기 규명되었다. 그러나 1/f 잡음은 주파수의 감소에 따라 그 크기가 무한정 증가하는 성질을 나타내며, 꾸준한 노력에도 불구하고 일반적으로 인정되는 이론이 아직껏 정립되어 있지 않다. 예를 들어, MOSFET에나 박막구조에 현재 적용되고 있는 McWhorter의 1/f 잡음이론은[8], 반도체 표면에 있는 trap에 전기반송자들이 trapping 또는 detrapping 되는 현상을 잡음의 원인으로 간주하고 있으나 반도체 덩어리(bulk)에서 생기는 잡음현상은 설명해 주지 못하고 있다. 제안된 1/f 잡음이론 중에서 다체간 상호작용이론(many-body interaction theory)은 물질의 미세구조에서 출발하여 양자역학적인 분석을 통하여 잡음현상을 설명하였다. 다체간 상호작용이론을 처음 전개한 사람은 Handel 이었으며[9] 그는 1/f 잡음이 전하를 띤 입자가 고체 내부에서 이동할 때 받는 간섭효과로써 나타난다고 보고 1/f 잡음의 양자이론을 주장하였다. 즉, 전기반송자가 고체 내에서 전류를 형성하게 되면 양자화된 전자장과 상호작용이 일어나고, 따라서 반송자들은 아주 낮은 에너지를 가진 광자(soft photon)를 방출하게 되는데 이를 적외선 발산(infrared divergence)이라고 한다. Handel은 이 간섭과정에서 전기 반송자의 파동함수를 도입하고, 반도체 물질의 단면에서 전류의 잡음을 계산하여 그것이 아주 낮은 주파수에 이르기까지 1/f에 비례함을 밝혀 내었다. Handel의 이론은 수학적으로 우수하나, 잡음의 주파수 지수항이 정확하게 -1인 경우만을 설명할 뿐으로, 실제 전자소자에서는 지수항이 -0.5에서 크게는 -3.0 정도까지도 나타나고 있다.

Ngai에 따르면[10] 1/f 잡음의 물리적 원인으로는 유전체 손실응답(dielectric response) 현상을 설명하기 위해 가정된 일종의 전자 또는 이온의 에너지 상태(correlated state)라고 한다. 즉 그는 주파수에 역비례하는 잡음과 유전체 응답 현상은 같은 원인에 의해 생긴다고 주장한다. 사실상 유전체 응답 중 허수부분(손실부분)을 주파수축으로 그리면 기울기가 물질에 따라 0과 1사이에서 변하는 것으로 관찰되었고, 물질의 결합력이 강하면 기울기는 작아진 것으로 나타났다. 고체 내의 이온이나 원자간의 상호작용 계수

(correlation factor, n)를 도입하면, 1/f 잡음의 주파수 지수항은 1-n으로 표현가능한 것으로 유도되었다. 그러나 Ngai의 이론을 한 단계 발전시킨 1/f 잡음 이론은 Hill[11]에 의해 제안되었다. 그는 Ngai가 도입한 에너지 상태의 낮은 에너지 방출은 그것에만 그치지 않고, 역작용으로 방출에 대한 에너지 흡수를 동반한다고 가정하였다. 그는 유전체 쌍극자(dielectric dipole)에서 세 종류의 에너지 변환에 대해서 검토하고 수학적인 과정을 거쳐 고체 내부에 전기 전도에서의 잡음을 해석하였다. Hill의 이론에 의하면 잡음의 주파수 지수항은 2(1-n)로 표현된다. 이처럼 물질내부의 미세구조변화는 1/f 잡음 특성의 변화를 가져옴을 알 수 있다.

고체 상태 반응 메커니즘을 조사하기 위하여 본 실험에서는 단결정 실리콘 웨이퍼 상에 초박막의 코발트를 진공증착하고, 박막의 두께에 따른 계면에서의 미세구조를 투과형 전자현미경으로 관찰함과 동시에 같은 시편에 대해 잡음특성을 측정하여 두 결과를 비교하였다. 실리콘-코발트 박막시스템에 국한하여 실험을 한 것은 코발트가 near-noble 금속으로 산화속도가 느리기 때문에 연구단계에서 적합한 물질이고, 코발트-실리콘 복합물질(Co-silicide)은 여러 silicide 중 비저항이 가장 낮아 집적회로의 이용에 유리하게 적용할 수 있기 때문이다. 알려진 바와 같이 코발트-실리콘 시스템에서 존재하는 안정된 복합물질은 Co_2Si, CoSi, $CoSi_2$의 세가지 실리사이드이며 그중에서 가장 먼저 생기는 물질상은 Co_2Si이다. 복합물질의 핵형성은 주로 반응온도와 코발트 박막두께의 함수이므로, 시편의 변수는 코발트 박막 두께로 하였으며, 그 두께는 핵형성이 일어나기 시작하는 범위로써 약 10㎚ 이하로 하였다. 준비된 시편은 먼저 전자현미경으로 미세구조와 전자회절에 의하여 반응과정(reaction path)상에서 대략적인 위치를 파악한 뒤 잡음을 측정하였다. 측정된 잡음은 규격화하여 잡음변수를 추출하였으며, 제안된 잡음이론에 의해 해석을 시도하였다.

Ⅱ. 실험 및 측정방법

본 실험에서는 p형(100)의 단결정 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하였으며, 전자빔 증착방식에 의하여 아주 얇은 코발트 박막을 진공 증착하였다. 증착이 이루어지기 전에 실리콘 기판은 RCA 방법에 의해 표면에 있을 수 있는 각종 불순물을 화학적으로 제거하고, 증착 챔버에 넣은 다음 고 진공을 유지한 채 실리콘 기판에 대한 이온 밀링 방식으로 다시 cleaning하였다. 화학적인 세척방법은 끓는 TCE(Trichloroecthyene) 용액에 3분간 담근 뒤 아세톤과 메탄올에서 각각 3분간 초음파 세척함으로써 유기물을 제거하였다. 이 기판은 이어 10%의 불산액(HF)에 1분간 담가 실리콘 산화층을 벗겨내고 고순도 메타놀 용액 속에 보관한 뒤 진공챔버에 넣기 전에 DI water로 세척하였다. 세척이 완료된 실리콘 기판은 이온펌프로써 챔버내의 진공을 10^{-8}Torr 영역에 유지시킨 뒤 4N 코발트 target을 전자빔으로 증발시켜 샘플을 만들었으며 증착속도는 0.1~0.2nm/sec의 낮은 비율로써 진행하였다. 한편 잡음 측정용 샘플의 전극을 형성시키기 위하여 박막부근을 깨끗한 실리콘 조각으로 가린뒤에 박막의 두께보다 훨씬 두껍게 약 100㎚의 코발트를 증착하였다. 이때 두 전극사이의 초박막 구조는 가급적 정사각형의 모양을 유지하도록 하였다.

이상의 방법으로 준비된 샘플의 박막두께는 아주 얇아서 상당한 오차를 나타낼 수 있기 때문에 샘플의 직류 면저항(surface resistance)을 측정함으로써 반응과정 상에 그 위치를 가늠할 수 있는 척도로써 사용하였다. 저항 측정은 박막 양단에 증착된 코발트 전극(약 100㎚ 두께)을 통하여 직류 전류를 흘려주며 electrometer로써 측정한 저항값을 샘플의 평면구조를 고려하여 고유 면저항 값을 계산하였다. 즉 고유 면저항 값 (이하 "R"로써 표시함) 은 양단 전극간의 길이에 반비례하고 샘플의 폭에 비례하는 값으로, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R = (\text{측정된 저항값}) \times \frac{(\text{폭})}{(\text{전극간 거리})}$$

또한 준비된 샘플에 대하여 투과형 전자현미경으로 Co/Si 계면에서 형성되는 구조를 관찰하였다. 투과형 전자현미경은 비정질 구조에 대한 정밀한 정보를 줄 수는 없으나 비정질구조 인지 결정성구조인지를 판별할 수는 있을 것으로 판단하였다. 투과형 전자현미경으로 관찰하기 위하여 샘플을 얇게 하는 작업이 선행되었다. Co/Si의 계면은 단면과 평면에서 조사되었는데 단면 샘플은 ion milling 방법으로 얇은 계면을 얻었으며, 평면 샘플인 경우에는 화학적인 방법에 의하여 실리콘 뒷면에서부터 얇게 만드는 방식을 채택하였다.

화학물질로는 질산(HNO_3)과 불산(HF)을 2:1로 섞어서 실리콘을 식각하여 계면에 얇은 부분이 형성되도록 하였다. 단면 샘플에 대한 배율은 50만배, 평면 샘플에 대한 배율은 6만배로 구조를 관찰하였다. 코발트-실리콘 계면의 구조를 알기 위하여 전자회절방법을 이용하였으며, 이때 카메라 길이는 70㎝ 였다. 전자회절 패턴에서 관찰된 점(dot) 또는 둥근 링(ring) 모양은 k-공간에서의 d-spacing에 해당되므로 중앙의 (000) 빔으로 부터의 거리를 실측하여 해당되는 구조를 찾아내었다.

1/f 잡음은 전류의 흐름이 있을 경우에만 존재하므로 샘플에 전류를 흘러 주기 위한 전원으로는 Ni-Cd 밧데리를 직렬저항을 통하여 샘플 양단의 전극과 전기적 연결함으로써 계면 구조에서 발생하는 전기적 잡음을 측정하였다. 이때 전원으로 교류 전원을 이용한 전원장치는 60Hz의 잡음을 유기할 수 있기 때문에 이를 배제하기 위하여 재충전이 가능한 밧데리를 사용하였다. 전원 전압은 12V로 고정하고 샘플과 전원간에 직렬저항을 연결하여 샘플에 흐르는 전류값은 수 10㎂ 정도가 유지되도록 하였다. 전류제한용 직렬 저항은 잡음특성이 우수한 wire wound 저항 또는 metal film 저항을 사용하였다. 직류 전류에 의해 샘플에서 발생되는 전압은 일정한 값을 유지하나 미소한 잡음 성분을 포함하고 있다. 시편 양단의 전극에서 교류잡음 성분을 차동증폭기에 연결함으로써 순수한 잡음만을 증폭하도록 하였다. 사용된 차동증폭기의 증폭도는 최고 80dB까지 가능하고, 동상성분 제거비(common mode rejection ratio : CMRR)은 100dB 이다. 이 증폭기는 대역통과 여파기를 포함하고 있으며 주파수 대역은 저주파에서 DC-1Hz, 고주파에서 3Hz~300kHz 사이에서 잡음전력스펙트럼밀도를 나타내도록 하였다. 한편 시편에 따라 60Hz와 120Hz에서 큰 피크값을 나타내기도 하였으나, 그 피크값은 주변 주파수에서의 값과 비교하여 평균치를 구하였다. 그러나 이때 구해진 샘플의 잡음 전력스펙트럼밀도는 박막에서 발생된 1/f 잡음 외에도 박막의 열잡음과 측정장비의 1/f 잡음도 포함될 수 있다. 이를 제거하기 위하여 같은 조건에서 전원의 값을 영(zero)으로 하고 (즉, 샘플에 전원을 가하지 않은 상태) 잡음전력스펙트럼밀도를 측정하여 그 차이를 계산하였다. 구해진 잡음 전력 스펙트럼 밀도 차이는 박막에서 발생하는 순수한 1/f 잡음전력밀도이나, 잡음의 크기는 샘플에 인가한 전류의 크기의 제곱에 비례한다. 따라서 샘플에 걸리는 전류를 기준으로 규격화하여 샘플 간 잡음 크기의 비교치로 사용한다. 규격화된 잡음전력밀도는 이하 S로 기호화 하였다. 각 샘플에 대한 잡음전력스펙트럼밀도를 주파수를 축으로 하여 대수 스케일로 그리게 되면 그 plot의 기울기를 취하여 잡음 주파수 지수항 값을 구하게 된다. 이상에서 구한 잡음 주파수 지수항은 β로 표시하기로 한다.

Ⅲ. 실 험 결 과

Co/Si의 경계면 구조를 알기 위하여 먼저 실리콘 단결정 위에 약 80㎚의 코발트 박막을 전자빔 방식으로 진공 증착시켜 단면을 관찰하였다. Co와 Si의 경계면에는 약 5㎚의 계면 구조가 존재하였는데, 단면 샘플에 의한 계면구조 상태를 명확히 규정하는데는 어려움이 있었다. 계면구조가 첫 번째 silicide 상인 Co_2Si로 변해 가는 과정을 알기 위하여 샘플을 평면구조로 관찰함이 용이하다고 판단되었다.

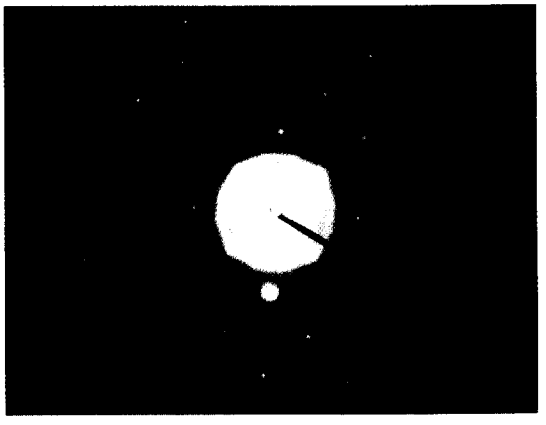

그림 1. 실리콘 기판위에 전자빔 증착방법에 의하여 상온에서 1nm의 코발트를 증착한 실리콘/코발트 계면의 전자회절패턴

Fig. 1. Electron diffraction pattern of Co/Si interface for 1nm cobalt films deposited on silicon substrate at room temperature.

따라서 코발트 박막의 두께와 박막제조시의 온도를 변화시켜 샘플을 준비하였다. 상온에서 코발트 박막을 증착할 경우, 코발트 박막의 두께가 3㎚ 이하로 증착된 계면구조에서는 silicide가 전혀 생성되지 않았다. 이들 샘플에서의 전자회절의 결과는 그림 1에서 보는 바와 같이 실리콘 단결정 spot와 두껍고 흐릿한 ring

패턴이 관찰됨으로써 silicide의 결정성 복합물질이라기 보다는 Co와 Si가 섞여서 비정질 구조를 이룬 것으로 판단되었다. 그러나 상온에서 만들어진 샘플 중에서 4㎚이상 증착된 코발트 박막에서는 Co_2Si상에 해당되는 다결정 ring 패턴을 관찰할 수 있었다. 그림 2는 이러한 핵형성을 보여주는 전자회절 패턴으로써 표 1에서는 이 ring 패턴을 index하여 Co_2Si 상과 비교하였다. 이처럼 상온에서 Co를 증착하여 silicide가 핵형성되는 현상은 near-noble 금속에서는 이미 보고된 바 있다[5, 12]

표 1. 4nm Co/Si 시편의 격자 d-spacing
Table 1. Lattice d-spacing of 4㎚ Co/Si sample.

측정된 d-spacing (Å)	Co2Si d-spacing (Å)	h k l
3.34	3.31	101
2.01	2.00	301
1.94	1.97	121
1.65	1.67	410
1.23	1.25	412
1.10	1.10	512

그림 2. 실리콘 기판위에 전자빔 증착방법에 의하여 상온에서 4nm의 코발트를 증착한 실리콘/코발트 계면의 전자회절패턴
Fig. 2. Electron diffraction pattern of Cp/Si interface for 4nm cobalt films deposited on silicon substrate at room temperature.

비정질 구조와 다결정 silicide 구조의 전자회절 패턴 상의 차이는 잡음전력스펙트럼밀도 측정에서도 명확한 차이를 나타내었다. 잡음전력 특성상 가장 뚜렷한 차이는 그림 3에서 보는 바와 같이 다결정 구조를 가진 샘플은 주파수 지수항의 값이 일정한 값(약 "-1"의 값을 가짐)을 갖는 반면 비정질 구조를 가진 샘플은 주파수 지수항이 복잡한 양상을 보인다는 것이다. 1㎚의 코발트 박막을 증착한 샘플에 대한 주파수-잡음전력밀도 관계를 보여주는 그림 4에서 약 110Hz의 주파수를 기준으로 하여 그 이하의 주파수 영역에서는 주파수 지수항 값이 -0.9 정도이지만, 그 이상의 주파수 영역에서는 -2.5 정도의 큰 값으로 변함을 알 수 있다.

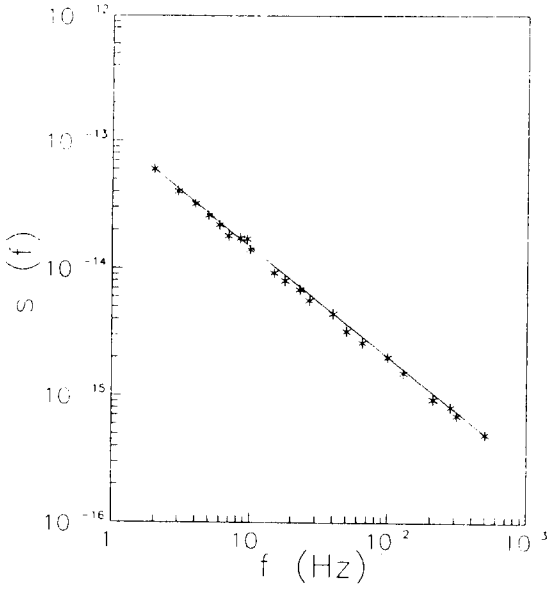

그림 3. 실리콘 기판위에 전자빔 증착방법에 의하여 상온에서 4nm의 코발트를 증착한 실리콘/코발트 계면의 잡음전력 밀도 측정치
Fig. 3. Measured noise power spectral density of Co/Si interface for 4nm cobalt films deposited on silicon substrate at room temperature.

또 하나의 잡음전력밀도 특성상의 차이는 그 크기에 있다. 다결정 구조를 보여주고 있는 샘플에서는(그림 2) 아주 낮은 잡음전력밀도를 나타내고 있으며 그 크기는 10^{-14}/Hz 정도에 불과하였다. 그러나 그림 4에서 보는 바와 같이 비정질 계면 구조 샘플은 10^{-11}/Hz로써 훨씬 큰 잡음전력밀도를 보여 주고 있다. 이상의 차이

는 이 실험에서 사용된 Co/Si 계면에서 구조적인 반응과 전자적인 시스템 사이에는 깊은 연관성이 있다고 판단되었고 각 샘플에 대하여 전기적 비저항을 측정하였다. 예측한 바와 같이, R값은 증착된 코발트 박막두께에 따라 감소하는 추세를 보여 주었는데, silicide가 핵형성된 것으로 전자회절패턴에서 관찰된 샘플에서는 약 10 kΩ/sq.의 작은 면저항값을 나타내었고, 비정질 샘플에서는 20 kΩ/sq.에서 1 MΩ/sq. 까지의 큰 면저항 값을 나타내었다. 이러한 샘플의 면저항 값은 증착되는 코발트의 두께를 정밀하게 알 수 없다는 점을 감안할 때, 오히려 샘플의 반응과정을 더욱 정확하게 지시해 주는 척도가 될 수 있다고 여겨진다. 따라서 측정된 잡음의 특성을 면저항값의 변화에 따라 알아보았다.

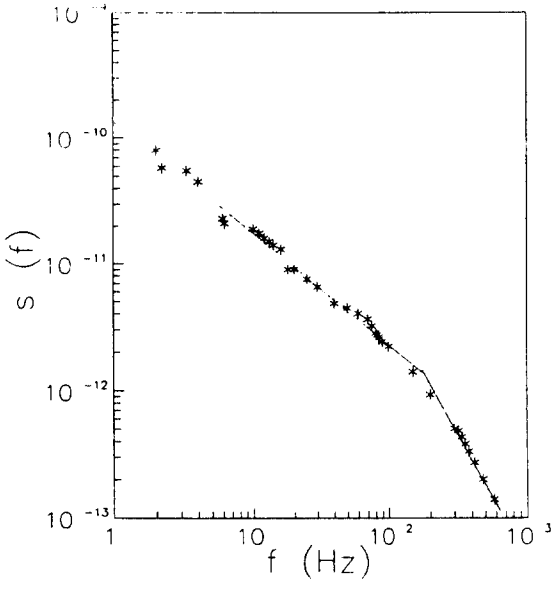

그림 4. 실리콘 기판위에 전자빔 증착방법에 의하여 상온에서 1nm의 코발트를 증착한 실리콘/코발트 계면의 잡음전력 밀도 측정치

Fig. 4. Measured noise power spectral density of Co/Si interface for 1nm cobalt films deposited on silicon substrate at room temperature.

그림4에서 보는 바와 같이 비정질 구조의 샘플은 일정 주파수를 중심으로 하여 두개의 서로다른 주파수 지수항 값을 나타내고 있다. 주파수 지수항이 변화되는 주파수 값은 샘플에 따라 다르나 대략 100Hz 내외이다. 그림 5는 100Hz 이상의 높은 주파수 영역에서의 주파수 지수항을 각 샘플의 면저항에 따라 도식으로 표시한 것이다. 약 10 MΩ/sq.의 큰 면저항을 가지는 샘플은 약 -2.5 이상의 큰 주파수 지수항 값을 가지고 있으며 면저항 값이 작아질 수록 그 값은 점차적으로 감소하여 약 10 kΩ/sq.의 면저항 샘플에서는 -1.0 정도의 값을 나타내고 있다. 한편 낮은 주파수 영역에서의 주파수 지수항 값의 변화는 그림 6에서 보는 바와 같이 면저항 변화에 따른 뚜렷한 추세가 보이지 않고 단지 약 -1.0 값을 중심으로 하여 약간의 흔들림만을 나타내고 있다. 또다른 중요한 잡음 변수로써, 1/f 잡음전력밀도의 진폭을 선택하여 그 변화를 알아보았다.

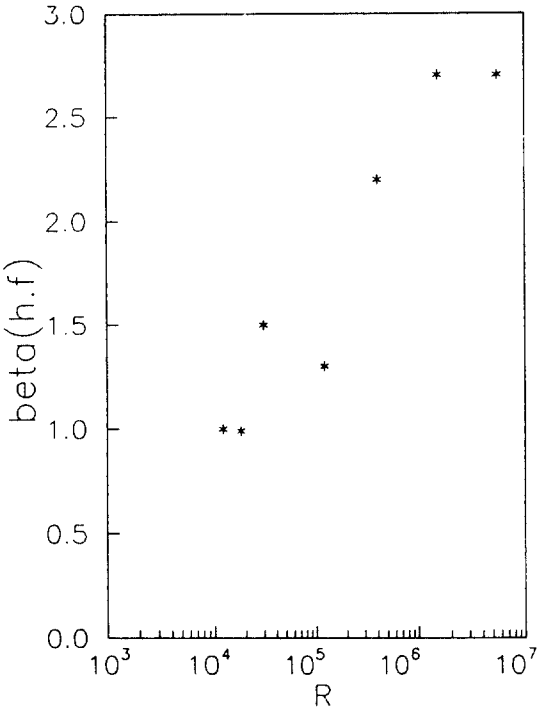

그림 5. 높은 주파수 영역에서 주파수 지수항의 변화

Fig. 5. Variation of noise frequency index at high frequencies.

그림 7에서는 각 샘플에 대하여 주파수 값이 10 Hz 일때 규격화된 잡음전력밀도(S값)를 면저항값의 변화에 따라 표시한 것이다. 큰 면저항 값을 가지는 샘플은 잡음전력밀도가 작은 편이지만 비저항 값의 감소에 따라 잡음의 크기는 크게 증가함을 볼 수 있다. 이러한 큰 잡음을 나타내는 샘플은 비정질 구조만을 가지는 계면 샘플에 해당된다. 그러나 전자회절에서 silicide 핵형성이 관측된 샘플은 잡음의 크기가 급격히 감소하

며 그 변화 폭은 10^4배이상이 되는 것을 알 수 있다.

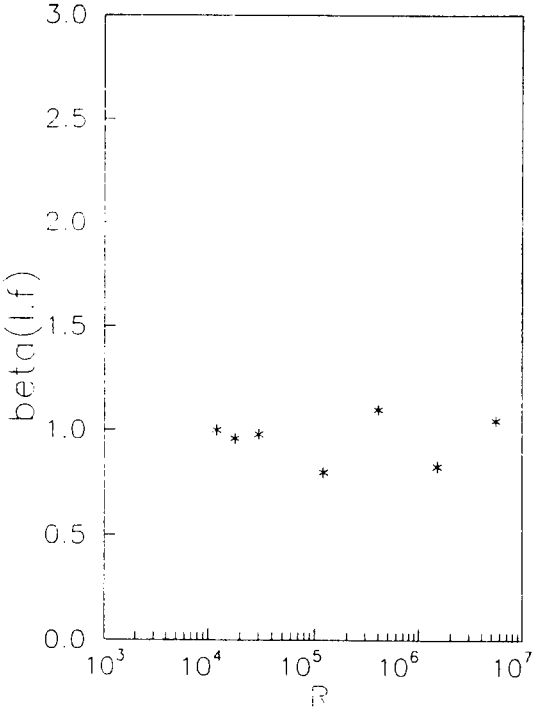

그림 6. 낮은 주파수 영역에서 주파수 지수항의 변화
Fig. 6. Variation of noise frequency index at low frequencies.

Ⅳ. 고찰 및 결론

실리콘과 코발트의 계면에서의 비정질 구조가 다결정 형태의 silicide 구조로 변화되어 가는 과정을 따라 1/f 잡음전력밀도 측정하여 잡음변수를 샘플 면저항값을 따라 추출한 결과 1/f 잡음전력 스펙트럼 밀도는 반응초기에서는 비교적 작은 값이지만, 반응이 진행됨에 따라 잡음의 진폭도 점차 커지고, silicide 핵형성이 일어나는 두께에서는 급격한 감소를 가져왔다. 이러한 잡음의 진폭변화 추세는 우선 전기적인 잡음이 계면구조의 불안정성을 암시하는 것으로 판단된다. 그 근거로는 증가형 MOSFET(Enhancement-type Metal-Oxide-Silicon Field Effect Transistor) 구조에 대하여 1/f 잡음을 측정한 실험결과[13]와의 비교를 들 수 있다. MOSFET 실험에서는 전도채널이 형성되는 과정을 따라서 1/f 잡음 진폭변화를 알아보았으나 금번 실험에서 측정된 바와 같은 급격한 진폭변화가 감지되지 않았다. MOSFET의 전도채널이 반전층으로(inversion layer) 변화하여 반도체 성질에서 금속성질로의 변화를 가짐은 본 실험의 Co/Si 계면시스템과 일치하나[2], MOSFET에서의 전도채널이 단결정 구조로써 변화가 없는 반면, Co/Si 계면구조는 짧은 거리의 규칙성(SRO, short range order)을 갖는 구조에서 먼 거리의 규칙성(LRO, long range order)을 갖는 구조로 변화가 있음을 감안할 때, 측정된 전기적인 잡음현상(electrical fluctuation)은 구조적인 변화에서 온 것으로 결론 내릴 수 있다. 그러나 전기적인 잡음현상이 구체적으로 어떠한 구조적인 fluctuation[14]을 나타내는 지는 알 수 없다.

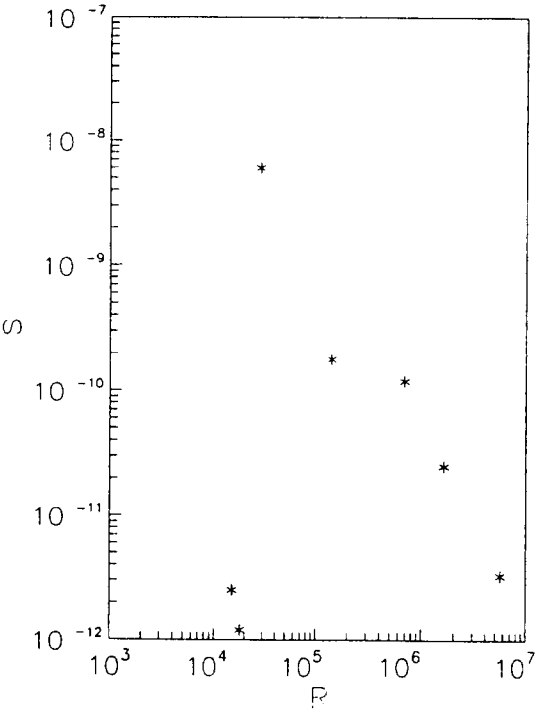

그림 7. 면저항 변화에 따른 잡음전력밀도의 변화
Fig. 7. Variation of noise power density along surface resistance of the silms.

1/f 잡음전력스펙트럼 밀도의 주파수 지수항은 핵형성 반응 경로를 통하여 복잡하게 변화됨이 관찰되었고 그 해석은 간단하지 않다고 생각된다. 1/f 잡음 주파수 지수항 값은 결정성이 있는 계면구조에 한하여 -1.0로

단일한 값을 가질 뿐 비정질의 구조에 대해서는 판이하게 다른 값을 가짐이 측정되었다. 낮은 주파수 영역에서는 계면에서의 반응과정이 진행되더라도 1.0 정도의 값을 유지하고 있으나, 높은 주파수 영역에서는 반응이 진행됨에 따라 초기에 -2.5 이상의 값을 갖다가 복합물질 핵형성이 시작되는 지점에서는 약 -1.0의 값으로 감소하는 경향이라고 요약할 수 있다. 중요한 것은 이 경우에 복합물질의 핵형성이 이루어지더라도 잡음 진폭에서와 같은 급격한 변화는 나타나지 않았다. 이 실험에서 측정된 1/f 잡음전력밀도의 주파수 지수항을 설명하는 물리적 현상으로는 두 가지를 들 수 있다. 첫째는 I장에서 기술한바 있는 다체간 상호작용이론(many-body interaction theory of 1/f nose)에서 고체 내에서의 이온이나 원자간의 상호작용 계수(correlation factor)와 잡음주파수 지수항과의 관계이다. Hill의 이론에 의하면[12] $\beta=2(1-n)$의 수학적 관계가 있으므로, 계면에서 반응이 진행됨에 따라 주파수 지수항이 감소하는 경향을 SRO의 구조간의 상호작용이 더욱 강해지는 것으로 해석가능 하다. 그렇지만, Hill의 이론에서도 주파수 지수항 값이 -2.0을 넘지 못하므로, 초기 반응에서의 주파수 지수항 데이터를 이해하는 데는 어려움이 따른다. 두 번째의 주파수 지수항값의 해석방법은 계면 구조의 비정수 차원(fractal dimension)[15-17]과의 관계를 이용하는 것이다. 그러나 계면의 비정수 차원에 대한 충분한 데이터를 가지고 있지 못하므로, 이에 대한 토의는 다음 단계의 연구로 미루기로 한다.

박막의 미세 구조의 변화가 1/f 잡음 변수에 영향을 줌을 가정한다면 본 실험 결과로써 대략적인 silicide 핵형성 과정을 아래와 같이 기술할 수 있을 것이다. 처음에 코발트 원자가 실리콘 기판에 증착되었을 때 두 개의 다른 원자(Co와 Si)가 분리되어 있음으로써 생기는 구조적 불안정성은 코발트와 실리콘을 혼합시키며 그것은 SRO 비정질 구조가 된다. 이때 형성된 비정질 구조는 주파수 지수항 값이 상대적으로 큰 것을 고려한다면 SRO cluster 간의 상호작용은 아주 약한 것으로 여겨진다. 여기에 코발트 원자들이 더욱 증착되면 cluster 간의 상호작용은 강해지나, 전기적인 잡음의 진폭이 커짐을 볼 때 구조적으로는 점차 불안정해 짐을 알 수 있다. 이러한 구조적인 불안정성이 어떤 한계적인 지점에 이르면 Gibbs의 자유에너지가 훨씬 낮은 다결정 복합 물질로 핵형성된다. 이러한 설명은 고체물질의 반응 진행이 단순히 Gibbs의 자유에너지가 최소가 되는 방향이 아니고, 자유에너지의 방출속도가 가장 큰 방향으로 진행된다는 Kinetic 모델[18]과 상충되지 않는다. 따라서 반응 메카니즘이 전 상태에 절대적인 영향을 받기 때문에 중간의 반응조건을 변경시키면, 반응결과 핵형성되는 silicide 물질 구조 및 전기적 성질도 변경 가능하다고 볼 수 있다. 그러므로 금속/반도체 계면에서의 공정조건을 변형하여 반도체 집적회로 응용에 보다 용이한 양질의 metalization 물질을 얻을 수 있을 것이며 이에 대한 실험은 다음 단계의 연구로써 매우 실용적인 내용이 될 것으로 사려된다.

※ 이 연구는 '93년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임(과제번호: 931-900-002-1)

참 고 문 헌

[1] M.O.Aboelfotoh, H.M.Tawancy, and F. M.d'Heurle, "Transmission electron microscopic study of the formation of nickel silicide on amorphous silicon", *Appl.Phys.Lett.*, vol.50, no.20, pp.1453-1455 (1987).

[2] R.W.Bene, R.M.Walser, G.S.Lee, and K.C.Chen, "Is first compound nucleation at metal-semiconductor interfaces an electrionically induced instability?", *J.Vac.Sci.Technol.*, vol.17, no.5, pp.911-915 (1980).

[3] A.S.Bhansali, D.H.Ko, and Sinclair, "Phase reactions at semiconductor metallization interfaces", *J.Electro. Mater.*, vol.19, no.11, pp.1171-1175 (1990).

[4] C.C.Han, and R.W.Bene, "Variation in interface compund nucleation for Ti-Al ultrathin films on Si substrates", *Appl.Phys.Lett.*, vol.47, no.10, pp.1077-1079 (1985).

[5] A.Hiraki, "Initial formation process of metal-silicon interface", *Surface Science*, vol.168, pp.74-99 (1986).

[6] H.G.Nam, I.Chung, and R.W.Bene, "Effects of amorphous titanium silicide on subsequently formed crystalline

compound prepared by two step thermal process", *J.Appl.Phys.*, vol.71, no.1, pp.5460-5464 (1992).

[7] B.Y.Tsaur, S.S.Lau, J.W.Mayer, and M-A.Nicolet, "2nd nucleation phase in metal/silicon", *Appl.Phys.Lett.*, vol.38, no.11, pp.922-924 (1982).

[8] A.L.McWhorter, Semiconductor Surface Physics in 1957 ed. R.H. Kington pp.207.

[9] P.H.Handel, "Quantum theory of 1/f noise", *Phys.Rev.Lett.*, vol.34, no.24, pp.1492-1495 (1975).

[10] K.L.Ngai, "Unified theory of 1/f noise", Phys. Rev., vol.B22, pp.2066-2075 (1980).

[11] R.M.Hill, L.A.Dissado, and R.Jackson, "Correlation noise theory with dielectric materials", *J.Phys.*, vol. C14, pp. 3915-3921 (1981).

[12] M.O.Aboelfdtoh, H.M.Tawancy, and F.M.d'Heurle, "Transmission electron microscope study of the formation of Ni2Si and NiSi on amorphous silicon", Appl. Phys. Lett., Vol.50, pp.1453-1454 (1987).

[13] C.J.Adkins, and R.H.Koch, "Noise in inversion layers near the metal-insulator transistion", *J. Phys. C: Solid State Phys.*, vol.15, pp.1829-1839 (1982).

[14] R.C.O'Handley, and N.J.Grant, "Magnetoelastic evidence for a local structural transfortation in Co-rich glasses", *Physica*, vol.119B, pp.173, (1983).

[15] B.B.Mendalbrot, and R.F.Boss, "Noise in physical system and 1/f noise", *Elsevier, New York*, pp.31-39 (1985).

[16] R.Moller, C.Baur, and A.Esslinger, "Scanning noise potentionmetry", *J.Vac. Sci.Technol.*, vol.809, pp.609-611 (1991).

[17] G.W.Wornell "Wavelet representation for the 1/f family of fractal process", *Proceeding IEEE*, vol.81, no.10, pp.1428-1450 (1993).

[18] R.W.Bene, "Kinetic model for solid state silicide nucleation", J.*Appl.Phys.*, vol.61, no.5, pp.1826-1833 (1987).

저 자 소 개

趙 南 仁(正會員)

1950년 7월 14일 생. 1974년 2월 서강대학교 전자공학과(학사). 1984년 5월과 1988년 2월 The University of Texas to Austin 전기 및 컴퓨터 공학과(석사 및 박사). 1974년 ~ 1981년 국방과학 연구소 선임연구원. 1989년 ~ 1992년 한국 전자통신 연구소 근무. 1992년 3월 ~ 현재 선문대학교 전자공학과 부교수. 주 관심 분야는 반도체 소자 공정 관련 기술 임

兪 淳 載(正會員)

1959년 12월 14일 생. 1980년 2월 동국대학교 물리학과(학사). 1985년 동국대학교 대학원 반도체 물리(석사). 1991년 Osaka 대학원 전자에너지공학(박사). 1987년 ~1988년 산업과학연구소(일) 연구원. 1991년~1994년 현대전자산업(주) 선임연구원(실장). 1994년 3월~ 현재 선문대학교 전자공학과 전임강사. 주 관심분야는 Ⅲ-Ⅴ족 화합물 반도체 임.