

## TiSi<sub>2</sub> 박막의 열안정성에 미치는 막 스트레스의 영향

김영욱 · 고종우 · 이내인 · 김일권 · 박순오 · 안성태 · 이문용 · 이종길

삼성전자(주) 반도체부문 기반기술센터

### The Effect of Stress on the Thermal Stability of the TiSi<sub>2</sub> Film

Y.W. Kim, J.W. Ko, N.I. Lee, I.K. Kim, S.O. Park, S.T. Ahn, M.Y. Lee and J.G. Lee

Research and Development Center, Semiconductor Business, Samsung Electronics

**초 록** 단결정 실리콘위에 스퍼터법으로 증착된 티타늄막을 급속가열로에서 고상반응에 의해 형성시킨 면저항 1.2 ohm/sq. 내외의 TiSi<sub>2</sub> 박막에 있어서 열안정성을 상부절연막의 유무 및 종류에 따라 조사하였다. 상부절연막은 상압 CVD로 증착한 USG(Undoped Silicate Glass, SiO<sub>2</sub>) 막과 플라즈마 CVD법으로 증착한 PE-SiN(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)막을 사용했다. 열안정성 평가는 900°C에서 시간을 달리하여 TiSi<sub>2</sub>막을 열처리한후 응집현상을 SEM 관찰, 면저항 측정 및 각 박막의 스트레스의 측정으로 조사했다. 그 결과, TiSi<sub>2</sub>막의 응집현상은 면저항의 증가 뿐만 아니라 스트레스의 회복도 수반하는 것이 확인되었다. 900°C에서 TiSi<sub>2</sub> 막, PE-SiN막, USG막의 스트레스는 각각  $1.3 \times 10^9$ ,  $1.25 \times 10^{10}$ ,  $2.26 \times 10^{10}$  dyne/cm<sup>2</sup>의 인장응력을 나타내었다. 응집현상은 TiSi<sub>2</sub>위에 절연막을 형성시키므로써 억제시킬 수 있었는데, USG막 보다 스트레스가 작은 PE-SiN 막의 경우가 응집을 억제하는데 더욱 효과적 이었다. 상부 절연막에 의한 스트레스가 존재할 경우 고온에서 TiSi<sub>2</sub>의 응집현상은 Nabarro-Herring 마이크로 크리프에 의한 원자의 확산관점에서 검토되었다.

**Abstract** The effect of the film stress on the thermal stability of TiSi<sub>2</sub> films under the dielectric overcoat was investigated. TiSi<sub>2</sub> films with the sheet resistance of 1.2 ohm/sq. were produced by a solid-state reaction between sputtered Ti film and single-crystalline Si in an RTA (rapid thermal anneal) machine. Dielectric overcoats such as the USG (Undoped Silicate Glass, SiO<sub>2</sub>) film and the PE-SiN(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) film were deposited by AP-CVD and PE-CVD, respectively, on the TiSi<sub>2</sub> film. The thermal stability of the TiSi<sub>2</sub> film was evaluated by changes in the sheet resistance, film stress and microstructure after furnace anneals at 900°C. Agglomeration of the TiSi<sub>2</sub> film high temperatures results in the increase of sheet resistance and the decrease of tensile stress of TiSi<sub>2</sub> film. The stress level of the TiSi<sub>2</sub>, PE-SiN and USG films at 900°C was  $1.3 \times 10^9$ ,  $1.25 \times 10^{10}$ ,  $2.26 \times 10^{10}$  dyne/cm<sup>2</sup> in tensile, respectively. Dielectric films deposited by CVD on TiSi<sub>2</sub> was effective on preventing agglomeration of TiSi<sub>2</sub>. The PE-SiN film improved the thermal stability of TiSi<sub>2</sub> more effectively than the AP-CVD USG film. It is considered that agglomeration of the TiSi<sub>2</sub> film under the stress of dielectric overcoat at high temperature can be caused by a diffusional flow of atom called Nabarro-Herring microcreep.

## I. 서 론

반도체 소자의 고집적화에 따라 0.25 $\mu$ m CMOS 기술에 있어서는 RC 지연시간의 감소를 극복하기 위해 트랜지스터의 게이트(gate) 저항과 소오스(source) 및 드레인(drain)의 확산영역의 series저항을 감소시켜야 한다. 그 방법중의 하나로 단결정 또는 다결정의 실리콘

위에 티타늄(titanium)을 증착하여 고상반응에 의해 티타늄 실리사이드(TiSi<sub>2</sub>)를 형성시키는 SALICIDE(Self-Align Silicide) 또는 폴리사이드(polycide)공정이 보고되고 있다<sup>1, 2)</sup>. 이 TiSi<sub>2</sub>는 CoSi<sub>2</sub>와 함께 실리사이드재료중에서 가장 낮은 저항을 나타내고, 특히 self-align공정이 가능하다는 장점이 있어 0.25 $\mu$ m수준의 반도체소자 요소기술로서 기대

되는 재료이다.

그러나, DRAM(dynamic random access memory)과 같이 고온 열처리 공정이 많은 소자의 제조공정에 TiSi<sub>2</sub>를 적용할 경우 TiSi<sub>2</sub>막의 열적 불안정이 문제가 된다. 즉 800°C~1000°C의 고온에서 발생하는 TiSi<sub>2</sub>막의 응집(agglomeration)현상에 의한 실리콘과 TiSi<sub>2</sub>계면의 모양변화로 급격한 저항증가를 일으킨다<sup>2, 3)</sup>. 이러한 응집현상에 관해서는 상부 절연막의 영향<sup>4)</sup>, N<sub>2</sub>와 같은 불순물 영향<sup>5, 6)</sup>, 산화막층을 통해서 실리콘사이드를 형성시키는 SITOX법<sup>7)</sup>등 실험적인 연구와 이론적인 모델<sup>8)</sup>등 다수 보고되고 있다. 응집현상은 표면 또는 계면에너지를 최소화 하기위한 원자의 확산현상의 하나이므로 실리콘사이드 박막에 작용하는 스트레스에 의해 응집거동은 달라질수 있다. 그러나 응집현상을 막 스트레스관점에서 조사한 예는 전무한 상태이다.

본 연구에서는 스퍼터법에 의해 증착된 티타늄막을 하지 실리콘기판과 고상반응시켜 형성된 TiSi<sub>2</sub>박막의 상부 절연막의 종류 및 유무에 따른 응집현상을 비교하고, 상부절연막과 TiSi<sub>2</sub>박막의 스트레스와 TiSi<sub>2</sub>막의 열안정성의 상관관계를 조사하였다.

## II. 실험 방법

TiSi<sub>2</sub> 박막의 고온 응집 거동과 관련된 열안정성 평가는 주사전자현미경에 의한 TiSi<sub>2</sub>막의 현상 관찰, 막 스트레스 및 면 저항의 변화로부터 평가 하였다.

티타늄을 증착을 위한 기판으로는 150mm 직경의 P-형 (100) 실리콘웨이퍼를 사용했다. 실리콘사이드형성후 막의 스트레스를 구하기 위해 실리콘웨이퍼의 초기 곡률반경을 측정후, Ti을 증착하기 전에, 자연산화막 제거를 위한 100 : 1HF 용액에서 120초간 습식세정과 RF 에칭을 실시했다. RF 에칭은 실리콘 산화막 50 Å을 제거하는 조건으로 실시했다. RF에칭과 Ti막의 스퍼터는 Varian사의 M-2000설비에서 실시했다. RF에칭후 in-situ로 Ti을 500 Å 두께로 스퍼터하여, 850°C Ar 분위기에서 20초간 RTA(rapid thermal anneal)를 실시하여 약 1000 Å 두께의 TiSi<sub>2</sub>를 형성시켰다. 그후 SiH<sub>4</sub> 가스 분위기하에서 상압CVD법 또는 플라즈마CVD법에 의해 TiSi<sub>2</sub>

위에 USG(Undoped Silicate Glass, SiO<sub>2</sub>)막 또는 PE-SiN(Plasma Silicon Nitride, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)막을 각각 1500 Å 두께로 증착했다. TiSi<sub>2</sub>막의 초기 면저항(이하 R<sub>s</sub>로 표기) 및 스트레스를 측정후 900°C, N<sub>2</sub> 분위기하에 시간을 변화시켜 열처리 한후, 또다시 R<sub>s</sub> 및 스트레스를 측정했다. 이때 R<sub>s</sub>의 측정은 무접촉 방식의 Tencor사의 모델명 M-guage를 사용했으며, 스트레스값은 곡률 반경의 변화로부터 계산되는 모델명 FLEXUS 설비를 사용하여 측정했다. 상부절연막이 있는 경우의 스트레스는 절연막과 TiSi<sub>2</sub> 박막의 복합막 스트레스를 측정했다.

## III. 결 과

실리콘과 고상확산에 의해 형성된 TiSi<sub>2</sub> 막위에 절연막을 증착하지 않은 자유표면이 노출된 TiSi<sub>2</sub>를 고온에서 열처리를 실시할 경우 열처리 시간에 따른 R<sub>s</sub> 값과 스트레스의 변화를 그림 1에 나타내었다.

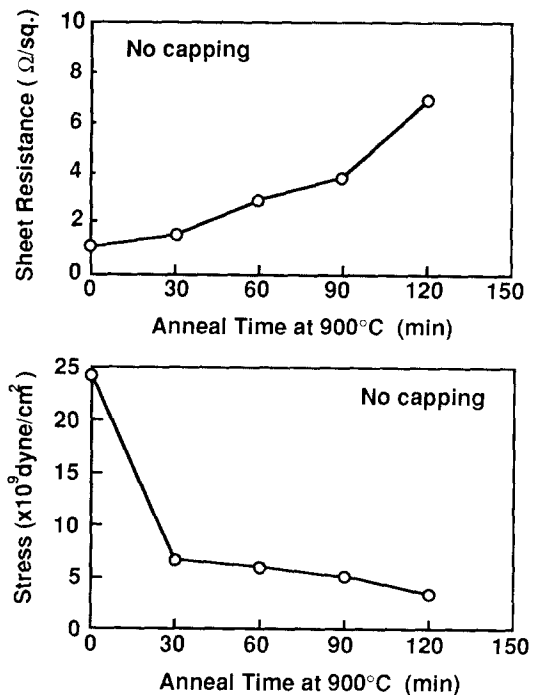
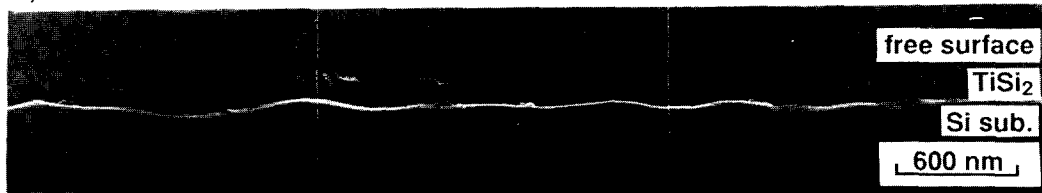


Fig. 1. Change of the sheet resistance and the stress of TiSi<sub>2</sub> film on single-crystalline silicon with the anneal time at 900°C.

## a) as-silicidation



## b) after annealing at 900°C for 60 min.

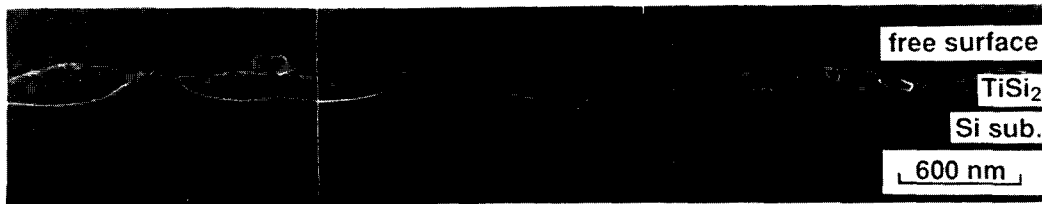


Fig. 2. Scanning electron microscope photographs showing the agglomeration behavior for the  $\text{TiSi}_2$  film without a dielectric overcoat.

$\text{TiSi}_2$ 막의 형성직후 초기  $R_s$  값은  $1.2 \Omega/\text{sq}$ .이며 잔류 스트레스값은  $2.5 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$ 의 인장응력을 나타내었다.  $900^\circ\text{C}$ 에서 열처리 시간이 길어질수록  $R_s$ 값은 급격히 증가하고 동시에  $\text{TiSi}_2$ 막의 스트레스는 감소함을 알 수 있다. 그림 2는 실리사이드 형성직후와  $900^\circ\text{C}$ , 60분 열처리후의 단면 SEM사진이다.  $\text{TiSi}_2$ 형성시의 평탄하고 연속적이던 막이 열처리후 응집하여 실리콘에 의해 분리되는 영역이 생기는 심한 모양변화를 가져온 것을 알 수 있다.

그림 3은 USG 막과 PE-SiN 막을 각각  $\text{TiSi}_2$ 막위에 증착한 경우의  $R_s$  및 스트레스의 변화를 나타낸것이다.  $\text{TiSi}_2$ 박막의 초기  $R_s$ 는  $1.18 \Omega/\text{sq}$ . 이고 절연막과  $\text{TiSi}_2$ 의 복합막 스트레스의 초기치는  $9 \times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$ 의 인장응력을 나타내었다. 그림 1과 그림 3을 비교하면 절연막을 형성시켜 열처리를 실시했을 경우  $R_s$  값의 증가 및 스트레스값의 감소가 상당히 억제되고 있는 것을 알 수 있다. PE-SiN 막과  $\text{TiSi}_2$ 의 복합막 스트레스값은 초기  $9.0 \times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$ 에서  $900^\circ\text{C}$  30분 열처리후  $1.7 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$ 로 급격히 증가하나 그 후 30분 간격으로 120분까지 더 이상의 변화 없이 일정한 값을 유지하고 있다. 이러한 열처리 초기의 급격한 스트레스 변화거동은  $\text{NH}_3$

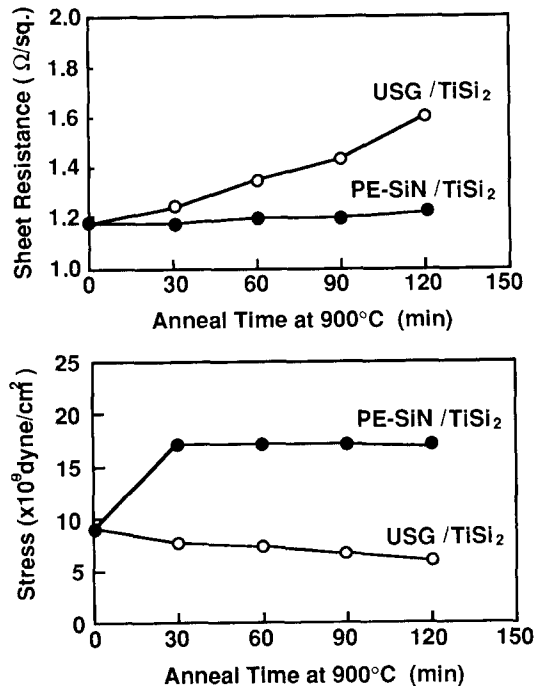


Fig. 3. Change of the sheet resistance and the stress with the anneal time at  $900^\circ\text{C}$  for the stacks of USG/ $\text{TiSi}_2$  and PE-SiN/ $\text{TiSi}_2$ .

및  $\text{SiH}_4$  가스를 이용한 플라즈마 CVD 방식으로 증착된 PE-SiN 막에 잔류하던 수소의

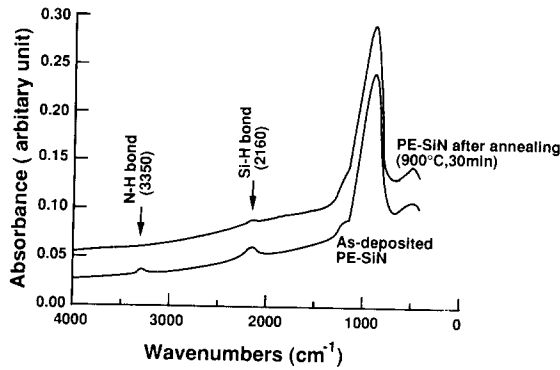


Fig. 4. FTIR spectra of as-deposited and annealed PE-SiN films. The anneal condition was at 900°C for 30 minutes.

방출에 의한 스트레스변화 때문으로 사료된다. 그림 4에 적외선분광분석(FTIR) 결과를 나타내었다. 증착상태의 PE-SiN막에서 수소 결합인 Si-H, N-H bond가 900°C 열처리후 완전히 소멸한 것을 알 수 있다. 즉, PE-SiN막은 고온에서 수소의 방출로 치밀화 되면서 스트레스가 증가하게 되어 TiSi<sub>2</sub>와의 복합막 스트레스가 초기 열처리단계에서 변화된 것으로 사료된다. 그림 5에 열처리 시간에 따른 PE-SiN 막의 실온에서 스트레스변화를 나타내었

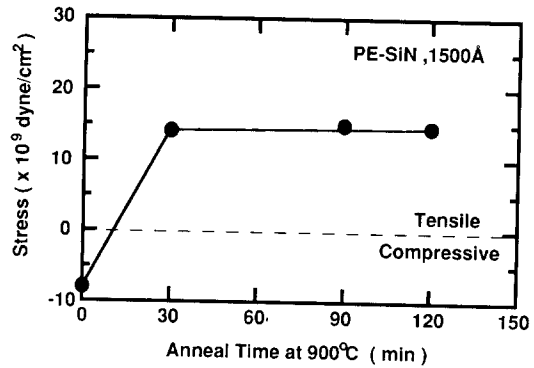


Fig. 5. Change of the stress of the PE-SiN film at room temperature with the post-anneal time at 900°C.

다. 열처리 시간이 길어져도 일단 수소가 방출된 PE-SiN 막이므로 막 스트레스는 약  $1.45 \times 10^{10}$  dyne/cm<sup>2</sup>로 일정한 값을 나타낼 수 있다.

그림 6은 USG, PE-SiN 막을 TiSi<sub>2</sub>막위에 증착시킨 경우의 900°C, 60분간의 열처리후의 SEM 사진이다. 절연막을 형성시키지 않은 경우에 비하여 실리콘과 TiSi<sub>2</sub>의 계면상태가 양호하며 PE-SiN로 증착한 경우의 TiSi<sub>2</sub> 막은 초기의 평탄한 상태를 거의 유지하고 있다.

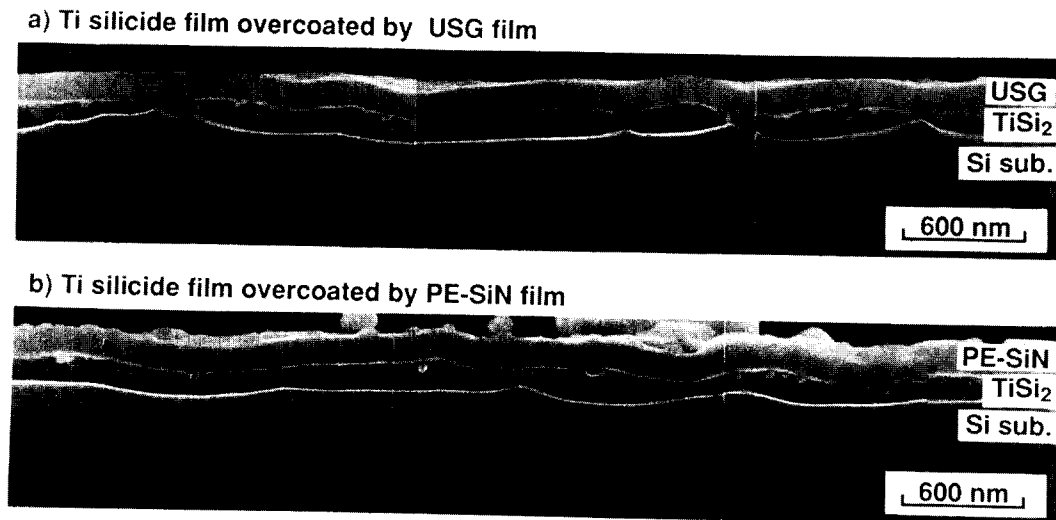


Fig. 6. Scanning electron microscope photographs showing agglomeration of the TiSi<sub>2</sub> film after annealing at 900°C for 60 minutes, when the TiSi<sub>2</sub> film is covered by the USG or PE-SiN film.

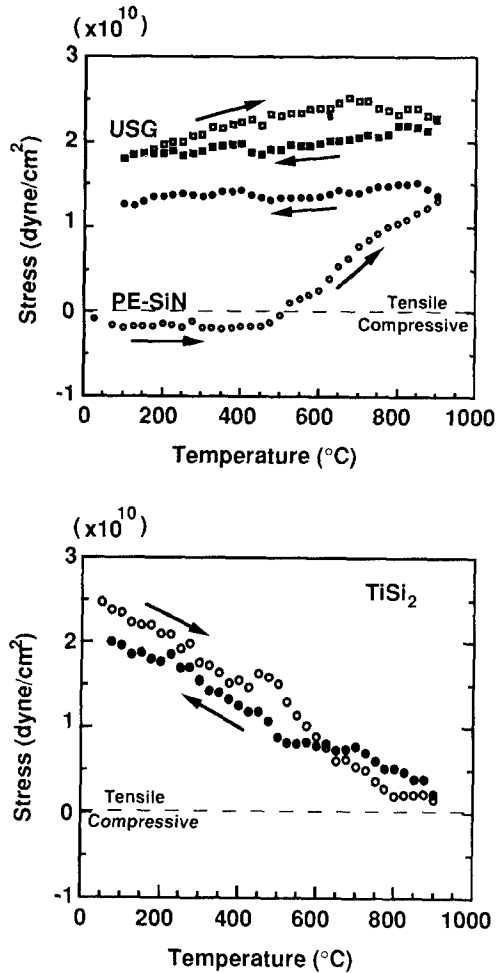


Fig. 7. Temperature dependence(RT-900°C) of the film stress in USG, PE-SiN and TiSi<sub>2</sub>. Arrows near the curve signify heating and cooling.

그림 7은 각 USG막, PE-SiN막 및 TiSi<sub>2</sub> 단일막의 온도에 따른 스트레스 변화를 나타낸 것이다. PE-SiN막의 초기 잔류스트레스가 압축응력이었으나, 그림 4에서 나타낸 것과 같이 수소방출로 약 500°C 이상에서 인장응력으로 변화되고 있다. 고온에서 스트레스값은 USG막이 PE-SiN 막보다 약 2배 큰 것을 알 수 있다. 이에 비해 TiSi<sub>2</sub>는 가열시와 냉각시에 열팽창에 기인한 스트레스의 히스테리시스 거동을 보이면서 900°C 근방에서의 스트레스값은 USG나 PE-SiN 막에 비해 매우 작은 값을 나타내었다. TiSi<sub>2</sub>막, PE-SiN막, USG막의 900°C에서의 스트레스값은 각각  $1.3 \times 10^9$ ,  $1.$

$25 \times 10^{10}$ ,  $2.26 \times 10^{10}$  dyne/cm<sup>2</sup>이다.

#### IV. 고 찰

##### 4.1 상부 절연막 유무에 따른 TiSi<sub>2</sub> 응집 거동

앞에서 TiSi<sub>2</sub>막막의 응집에 의해 저항값이 급격히 증가함을 확인하였고, 절연막증착으로 그 응집현상이 억제되는 결과를 얻었다. 이는 자유표면을 갖는 TiSi<sub>2</sub>막에서 응집이 용이한 것을 의미한다. TiSi<sub>2</sub> 막의 응집현상은 TiSi<sub>2</sub> 자체의 표면에너지의 감소를 위해 일어나는 원자의 확산이라고 보고되고 있다. 원자 확산 시간( $t$ )에 따른 평면 자유표면의 진폭변화  $y(t)$ 는 Mullins의 이론에 의하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>9)</sup>.

$$y(t) = y(o) \exp[-(F\omega + A\omega^2 + D\omega^3 + B\omega^4)t] \quad (1)$$

여기서 F, A, D, B는 각각 자유표면 에너지, 증기압, 체적확산, 표면확산에 관련된 함수로써 증기압이 낮은 고체인 경우 F, A 값을 무시할 수 있다. 따라서 식(1)은

$$y(t) = y(o) \exp[-(D\omega^3 + B\omega^4)t] \quad (2)$$

$$\text{단, } D = P_0 D_g \gamma / kT + D_v \gamma / kT$$

$$B = D_s \rho^{4/3} / kT$$

여기서  $\gamma, \rho, P_0$ 는 각각 표면에너지, 원자체적, 기체의 밀도를 나타내는 상수이며,  $D_v, D_s, D_g$ 는 각각 체적확산계수, 기상확산계수, 표면자기확산계수이다. 식 (2)로 부터 자유표면의 변화  $y(t)$ 는 표면 에너지와 원자 확산이 균형을 이루면서 일어남을 알 수 있다. TiSi<sub>2</sub>와 같이 증기압이 매우 낮은 고체에서  $D_g$ 를 무시하면 자유표면에서의 모양 변화는  $D_v, D_s$ 에 따라 결정되며 이들 확산계수는 온도에 지수적으로 변하므로 고온으로 갈수록  $D_v, D_s$ 에 크게 의존하게 된다. Si의 경우 1000°C에서  $D_v$ 와  $D_s$ 의 상대적인 값을 예로들면  $D_v/D_s = 9.1 \times 10^8$ 으로  $D_s$ 가 매우 크다<sup>(10)</sup>. TiSi<sub>2</sub>막 위에 절연막이 없는 경우가 응집현상이 심한 것은 TiSi<sub>2</sub>막에서 Ti와 Si원자의 표면확산에 기인한 것으로 사료된다.

TiSi<sub>2</sub>막위에 절연막을 증착 하면 TiSi<sub>2</sub>의 자

유표면은 절연막/TiSi<sub>2</sub> 간의 계면을 형성한다. 900°C에서 이 계면에서의 확산, 입계에서의 확산, 체적확산, 또는 하부 실리콘내의 자기확산중 어느것이 지배적인 확산기구일지는 이론적으로 검토하지는 어려우나 이들 모든 확산방법을 통하더라도 원자의 이동속도는 표면확산에 비해 매우 느릴 것으로 판단된다. 따라서 TiSi<sub>2</sub>막의 열안정성은 자유표면이 없는 경우가 우수할것으로 사료된다.

#### 4.2. TiSi<sub>2</sub>막의 응집거동에 미치는 상부 절연막의 스트레스 영향

절연막을 TiSi<sub>2</sub>막위에 형성시키면 응집현상은 억제되고, USG막 보다 PE-SiN막의 경우가 그 효과가 현저했다. 응집이 원자의 확산에 의해 일어난다고 한다면 TiSi<sub>2</sub>막에 스트레스가 작용할 경우 화학적 포텐셜(chemical potential)의 변화에 의해 질량유속의 구배가 생긴다. 이와같은 현상은 Nabarro-Herring micro creep<sup>(11, 12)</sup>으로 알려져있으며 이 이론에 의하면, 인장응력이 작용하는 곳에는 밀도의 감소 즉 공공(vacancy) 농도 증가가 일어나며 스트레스  $\sigma$ , 에서 공공농도를 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$C_v = \exp[-(\Delta G_v^f + \Omega\sigma)/kT] \quad (3)$$

여기서  $\Delta G_v^f$ 는 공공형성에 필요한 자유에너지이며,  $\Omega$ 는 공공체적을 의미한다. 스트레스가 없을때 공공농도를  $C_v^0$ 라하고, 고온인 경우(즉,  $\Omega\sigma \ll kT$ 인 경우)의 공공의 농도변화는 (4)식과 같다.

$$\Delta C_v = C_v - C_v^0 = -C_v^0 \Omega \sigma / kT \quad (4)$$

즉, 인장응력( $\sigma < 0$ )에 의해 공공농도의 증가, 압축응력( $\sigma > 0$ )에 의해 공공농도의 감소를 가져온다. 인장응력과 압축응력이 동시에 작용하는 영역에서 공공농도 변화는

$$\Delta C_v = (C_v^0 \Omega / kT) [\sigma - (-\sigma)] = 2C_v^0 \Omega \sigma / kT \quad (5)$$

막 두께 L인 TiSi<sub>2</sub>의 경우 공공유속은 박막에서 인장응력만이 존재하므로 식(4)와 공공의 확산 계수  $D_v$ , 원자의 확산계수  $D = C_v^0 D_v$ 를 이용하면 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$J_v = -D_v dC_v/dX = -D\Omega\sigma/kTL \quad (6)$$

그림 8은 900°C 고온에서 각 박막의 상태, 스트레스의 분포 및 스트레스에 의한 TiSi<sub>2</sub>막의 응집거동을 모식적으로 나타낸 것이다. Si과 열팽창계수, 결정구조등이 다른 TiSi<sub>2</sub>와 상부 절연막이 Si 웨이퍼위에 형성된 상태에서는 박막에 스트레스를 잔류시키면서 그림 (a)의 형상으로 존재한다. 그림 7에서 나타낸 고온에서 스트레스 값으로부터, 각 박막에서 스트레스가 존재하지 않기위한 막의 이상적인 형상은 그림 (b)라고 할 수 있다. 이들 각 계면은 연속적인 구조를 갖기위해 그림 (c)와 같이 인장과 압축의 변형이 생긴다. TiSi<sub>2</sub>막에서의 응집은 Si과의 계면에서 원자의 이동에 주목해서 고찰해야한다. 그림 (d)와 같이 TiSi<sub>2</sub>막 위에 인장응력을 갖는 절연막이 존재하게 되면 TiSi<sub>2</sub>막은 인장응력하에 있게 되어 TiSi<sub>2</sub>/Si 계면에서는 인장응력을 받게된다. 따라서 그림 (e)에서처럼 TiSi<sub>2</sub>/Si 계면에서 공공의 생성이 용이해진다고 사료된다. 이러한 TiSi<sub>2</sub>

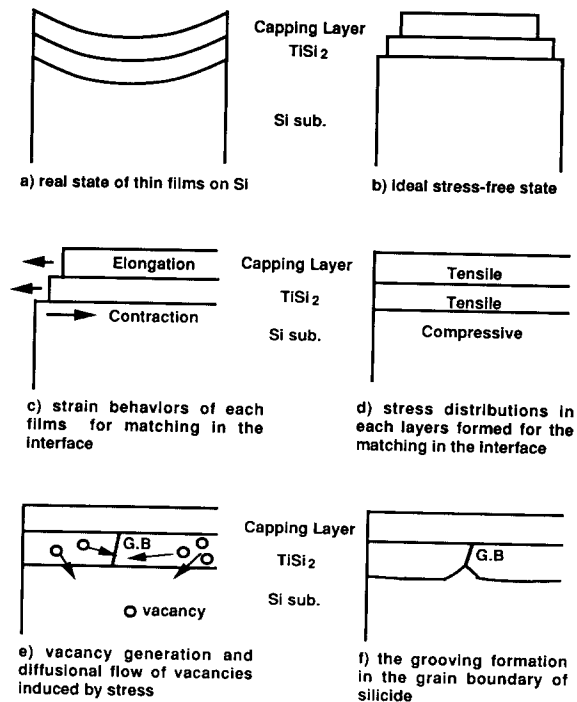


Fig. 8. Cross-sectional schematic of the thin film structure used in this study for illustration of the agglomeration behavior in TiSi<sub>2</sub>

막에서 생성된 Ti 또는 Si의 공공은  $TiSi_2$ 막의 입계와 같은 결합 또는 하부의 압축응력이 작용하는 Si으로 이동하여 소멸된다. 입계로의 확산에 의해 공공이 pile-up 되면 그림 (f)에서 처럼 groove를 형성시키고 Si으로 이동하면 국부적으로  $TiSi_2$ 막 두께의 증가를 가져와  $TiSi_2$ 의 응집이 진행될 것으로 사료된다.

이러한 스트레스에 의해 원자가 이동하게 되면 에너지가 소모되므로 스트레스가 완화되는 현상을 수반할 것도 예상할 수 있으며, 앞에서 그림 1과 3에서 얻어진 스트레스의 완화는 바로 응집 현상에 의한 것임을 알 수 있다. 식(6)에서 알 수 있듯이  $TiSi_2$ 의 원자확산은 절연막의 스트레스가 클수록, 온도가 높을수록 실리콘사이드막의 두께가 얇을수록 현저함을 알 수 있다. 즉 USG막의 경우가 PE-SiN막의 경우보다 더욱 응집을 촉진 시키는 것은 이러한  $900^\circ C$  내외의 고온 스트레스가 크기 때문인 것으로 사료된다.

## V. 결 론

면저항  $1.2 \text{ ohm/sq}$ . 내외의  $TiSi_2$  박막의  $900^\circ C$ 에서 열안정성을 CVD로 형성시킨 상부 절연막의 유무 및 종류에 따라 조사하여 막 스트레스 관점에서 검토한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1.  $TiSi_2$  박막은 고온 후속열처리에 의해 응집현상이 생기면  $TiSi_2$ 의 면저항 증가와 스트레스감소(회복)이 일어난다.
2.  $TiSi_2$ 막 위에 절연막을 형성시켜서 고온 후속열처리시 응집현상을 억제할 수 있었다.
3.  $900^\circ C$ 에서 두께  $1000 \text{ \AA}$  내외의  $TiSi_2$  막과 약  $1500 \text{ \AA}$  두께의 절연막인 PE-SiN막, USG막의 잔류응력은 각각  $1.3 \times 10^9$ ,  $1.25 \times 10$

$^{10}$ ,  $2.26 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$ 의 인장응력을 나타내었다.

4. 절연막의 경우 USG 막보다 고온에서 스트레스가 작은 PE-SiN 막이  $TiSi_2$ 의 응집을 현저하게 잘 억제시킴을 알 수 있었다.

5.  $TiSi_2$  박막의 응집현상은 확산 크리프 관점에서 설명될 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 1) V.Q. Ho and D. Poulin, J. Vac. Sci. Technol., A5(4), 1396 (1987)
- 2) H. Norstrom, K. Maex, J. Vac. Sci. Technol., B8(6), 1223 (1990)
- 3) K.Shenai, J. Mater. Res., 6(7), 1502 (1991).
- 4) R.K. Shulka and J.S. Multani, VMIC conference, 470 (1987).
- 5) S. Ogawa et al, Appl. Surf. Sci. 41/42, 290 (1989).
- 6) A.Ohsaki et al, Extended Abstracts of 21st Conf. on Solid State Devices and Mater., 13 (1989).
- 7) H. Sumi et al, IEDM, 249 (1990).
- 8) T.P.Nolan, R. Sinclair and R. Beyers, J. Appl. Phys., 71(2), 720 (1992).
- 9) W.W.Mullins, J. Appl. Phys, 30, 77 (1959)
- 10) D.M.Molkowiecki and J.B. Holt, Proc. 5th Inter. Conf. on sintering and related phenomena, Plenum Press, 279 (1980)
- 11) F.R.Nabarro, Rep. Conf. Strength Solids, 75 (1948)
- 12) C. Herring, J. Appl. Phys., 21, 437 (1950)