Journal of the Korean Vacuum Society
Vol. 3, No. 1, March 1994, pp. 59-64

〈연구논문〉

초고집적 Submicron 박막금속화를 위한 Dielectric Overlayer의 Passivation 효과

김대일 · 김진영

광운대학교 전자재료공학과

(1994년 1월 31일 접수)

The Effects of Dielectric Passivation Overlayers for Submicron Thin Film Metallizations of ULSI Semiconductor Devices

D. I. Kim and J. Y. Kim

Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

(Received January 31, 1994)

요 약 – 극소전자 디바이스의 고집적화와 더불어 박막배선의 선폭은 0.5 μm 이하까지 축소되며 초고집적 submicron 박막금속화가 진행되고 있다. 미세회로에 적용되어지는 배선재료는 인가되는 고전류밀도로 인하여 electromigration에 의한 결함이 쉽게 발생한다는 단점이 있다. 금속박막 전도체 위의 dielectric overlayer는 electromigration에 대한 passivation 효과를 보여 극소전자 디바이스의 평균수명을 향상시킨다. 본 연구에서는 박막금속화에서 dielectric overlayer의 passivation 효과를 알아보기 위하여 약 3000 Å의 SiO_2 절연 보호막을 1000 Å 두께의 Al, Al-1%Si, Ag, 그리고 Cu 박막배선 위에 증착하여 SiO_2 절연 보호막의 유무에 따른 박막배선의 수명변화 및 신뢰도(σ)를 측정하였다. 박막배선에 인가된 전류밀도는 1×10^6 A/cm^{2}와 1×10^7 A/cm^{2}이었다. SiO_2 dielectric overlayer는 Al, Al-1%Si, Ag, Cu 박막배선에서 electromigration에 대한 보호막 효과를 보이며 평균수명을 모두 향상시킨다. SiO_2 passivation 효과는 Al, Ag, Cu 박막 중 Cu 박막배선에서 가장 크게 나타났다. SiO_2 dielectric overlayer가 형성되지 않은 경우 Al 박막배선의 수명이 가장 긴 것으로 나타났으나 SiO_2가 형성된 경우는 Cu 박막배선의 수명이 가장 길게 나타났다.

Abstract – ULSI submicron thin film metallizations of microelectronic devices have continuously reduced the line width up to less than 0.5 μm. Thin film metallizations in a microelectronic circuit undergo a high current density, which results in a electromigration induced failures seriously. Dielectric overlayers on a thin film conductor increase the lifetime of a microelectronic device showing passivation effects on the electromigration. In this study, 3000 Å SiO_2 dielectric overlayers were deposited onto 1000 Å Al, Al-1%Si, Ag, and Cu thin film metallizations of investigate the dielectric passivation overlayer effects. Changes of a lifetime and a reliability (σ) were measured and compared with non-passivation metal films. The current densities were 1×10^6 and 1×10^7 A/cm^2. SiO_2 dielectric overlayers showed the passivation effects on the electromigration resulting in the increased lifetime in all the Al, Ag, and Cu thin film metallizations. While a Al thin film showed the longest lifetime in the non-passivated Al, Ag, Cu thin films, a Cu thin film showed the longest lifetime in the SiO_2 passivated Al, Ag, Cu thin films.

1. 서 론

ULSI 디바이스에 있어 선폭의 계속적인 감소는 박막배선에 상대적으로 높은 전류밀도를 초래하여, electromigration과 같은 결함을 발생시키는 새로운 문제점을 대두시키고 있다[1, 2].

극소전자 소자의 배선재료에 일반적으로 널리 적용되어지는 Al-alloy는 높은 전기전도도 및 기판과의 뛰어난 접착력 등 배선재료로서의 필요조건을 대부분 만족하고 있어 많이 사용되어지고 있으나, Al-alloy 박막배선에 고전류밀도가 인가될 경우에 발생되는 electromigration에 대한 저항이 약하다는 단점이 있다[3-5].

Ag, Cu, Au 등의 배선재료는 기존의 Al-alloy보다 일반적으로 높은 전기전도도와 열적 안정도를 갖는 장점이 있으나 기판에 대한 접착력(adhesion force)이 약하고, 표면산화(surface oxidation)에 대한 저항력이 약한 단점이 있다[6-9].

이들 배선재료는 특히 electromigration에 대한 저항성이 특히 강한 것으로 알려지고 있으며, 따라서 초고집적 submicron 박막금속화를 위해 연구가 진행되고 있다.

Ag, Cu, Au 등 배선재료에서는 barrier metal에 대한 연구와 표면의 산화방지 및 절연 보호막에 관한 연구가 이루어지고 있다[10-12].

본 연구에서는 차세대 초고집적 submicron 박막금속화를 위해 응용 가능한 기존의 Al, Al-1%Si과 Ag, Cu 등의 박막배선 재료에 대해 SiO_2 절연 보호막을 형성하여 electromigration에 대한 보호막 효과에 대하여 연구하고자 한다.

2. 실 험

Al, Ag, Cu 박막배선에서의 electromigration에 대한 SiO_2 절연 보호막의 passivation 효과를 관찰하기 위한 박막배선은 Si(100) 기판 위에 열산화 공정을 통하여 약 5000 Å의 Si 산화막을 성장시킨 후, 에칭공정이 어려운 Ag, Cu 박막배선 그리고 순수 Al은 선폭이 100 μm인 Cr metal mask와 E-beam evaporator를 이용하여 제작하였다. Al-1%Si 박막배선의 선폭은 1 μm로서 MRC 920M sputter를 이용하여 두께가 1000 Å이 되도록 증착한 이후에 RIE(Reactive Ion Etching) 방법에 의한 E-beam lithography 공정을 진행하여 제작하였다. Al, Al-1%Si, Ag, Cu 박막의 두께는 1000 Å이었다.

Al, Ag, Cu 박막배선의 선폭은 100 μm, 길이는 5000 μm이며, Al-1%Si 박막배선의 선폭은 1 μm, 길이는 800 μm이었다. 또한 박막배선과 probe와의 접촉저항, 그리고 current concentration을 줄이기 위하여 접촉 pad 부분을 크게 제작하였다. 증착된 시편은 광학현미경을 통하여 결함상태를 관찰하였으며 이상이 있는 박막은 실험에서 제외시켰다. Electromigration test 후에 failure uniformity는 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 통하여 확인하였다.

Al-alloy로 제작된 박막배선은 표면에서의 보호 산화막 형성으로 인하여 외부 부식이 잘 일어나지 않는다는 장점이 있으나 Ag, Cu는 표면산화에 따른 corrosion에 약한 단점을 갖고 있으므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 절연 보호막 재료에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[10, 12, 14].

Tomomitsu Satake는 Al의 비저항(2.8 μΩcm)보다 상당히 큰 비저항을 갖는 NiCr(108 μΩcm) 배선에 SiO_2 절연 보호막이 형성될 경우에는 NiCr의 활성화 에너지(Q)값이 Al 배선의 활성화에너지보다 2.78배 크게 되므로 Al 배선의 평균수명보다 긴 평균수명을 가짐을 보고하였으며, Kazuo Yokoyama는 Al 박막배선에 두께 약 3000 Å의 산화막을 encapsulation시킴으로써 절연 보호막이 형성되지 않은 Al 박막배선의 평균수명보다 약 38배의 평균수명 증가가 나타남을 보고하였다[12, 15].

또한, E. Hall은 Ta-Au-Ta 배선에 sputter를 이용한 SiO_2 절연 보호막을 증착함으로써 배선의 평균수명이 약 38배 증가함을 발표하였다[16].

따라서, 본 연구에서는 magnetron sputter와 E-beam evaporator를 이용하여 기존의 반도체 배선재료인 Al, Al-1%Si 뿐만 아니라, Ag, Cu 등의 박막배선을 제작한 후, 각 박막배선에 RF sputter를 이용하여 약 3000 Å의 SiO_2 절연 보호막을 형성하였으며, Al, Al-1%Si, Ag, Cu 박막배선의 기판온도가 높은 상태에서, 10^4 A/cm^{2}까지의 낮은 전류밀도가 인가될 경우에 발생하는 lattice diffusion을 억제하며, grain boundary diffusion에 의하여 발생하는 electromigration 현상을 측정하기 위하여 각 박막배선에 1×10^6 A/cm^2, 1×10^7 A/cm^{2}의 고전류밀도를 일정하게 인가하였다.

박막배선의 시간에 따른 저항 변화를 관찰하며, 회로의 전기적 개방(open)으로 인하여 저항의 급격한 증가를 보이는 시간, t_f(time-to-failure)으로부터 평균수명, $t_{50}=\exp(\ln t_f)$을 구하였다.

또한, SiO_2 절연 보호막의 유무에 따른 배선의 수명변화 및 Al-1%Si 박막배선에서 기판 온도조건(90~

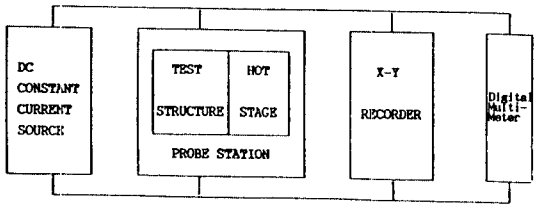

그림 1. Electromigration test를 위한 측정기기 구조도.

150℃)의 변화에 따른 평균수명의 변화를 측정하였다.

그림 1은 박막배선에서의 electromigration test를 위한 측정기기 구조도이다. 정전류원으로는 Keithley 228A를 이용하였으며, 기판의 온도는 hot stage와 K-type의 thermocouple을 이용하였다.

Electromigration test 후에 박막배선에서 발생한 hillock과 void는 SEM과 투과광학현미경을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

E-beam evaporator를 이용하여 제작한 각 Al, Ag, Cu 박막배선에 1×10^6 A/cm^{2}의 전류밀도를 인가한 경우와, 박막배선의 top layer에 SiO_2 절연 보호막을 형성한 이후, 동일한 1×10^6 A/cm^{2}의 전류밀도를 인가한 경우에 얻어낸 배선수명에 대한 결함발생 누적확률의 변화를 그림 2 (a), (b), (c)에 나타내었다. 표 1은 SiO_2층 형성에 따른 평균수명의 변화를 나타낸 것이다. 이때 사용된 시편의 수는 각각 6개이었다.

SiO_2 dielectric overlayer는 Al, Ag, Cu 박막배선에서 electromigration에 대한 보호막 효과를 보이며 평균수명을 모두 향상시킨다.

SiO_2층이 형성되어 있지 않은 경우에는 Al 박막배선의 평균수명이 약 139시간으로 가장 길게 나타났으나, 각 박막배선에 SiO_2 절연 보호막이 형성될 경우에는 Cu 박막배선의 평균수명이 546시간으로 가장 길었으며, Cu 배선에 SiO_2 절연 보호막을 형성함으로서 배선의 수명이 증가함은 J. M. Poate, I. Asano 등에 의하여 보고된 바 있다[17, 18].

사진 1은 전류밀도 $J=1\times10^6$ A/cm^{2}의 전류밀도를 약 100시간 인가한 이후의 결함이 발생한 Cu 박막 표면을 투과 광학현미경을 이용하여 관찰한 것이다.

Cu 박막배선에서 SiO_2 dielectric overlayer의 보호막 효과가 가장 큰 것은 electromigration에 대한 저

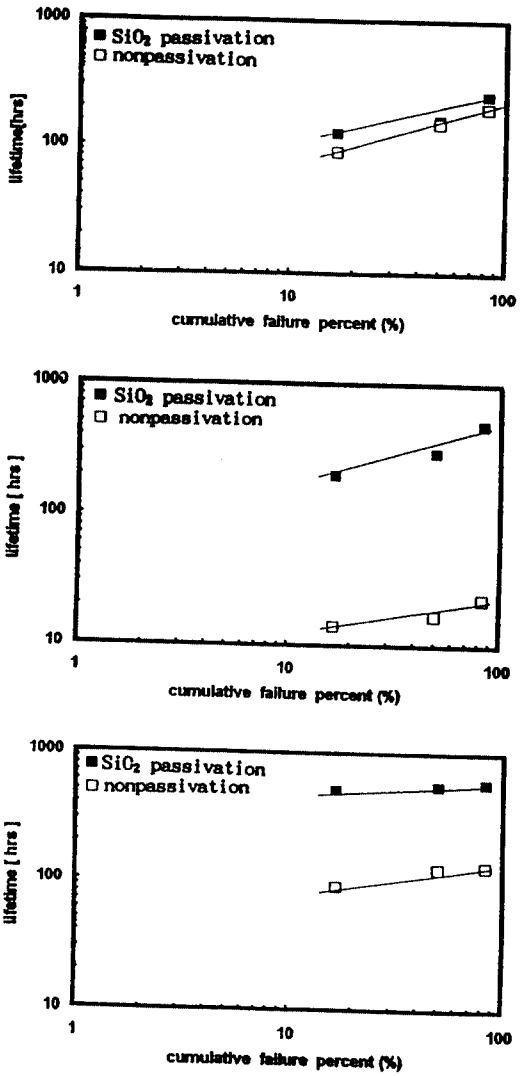

그림 2. SiO_2 절연 보호막 형성에 따른 Al, Ag, Cu 박막배선에서의 lifetime에 대한 결함발생의 누적확률 ($J=1\times10^7$ A/cm^2). (a) Al, (b) Ag, (c) Cu.

항성 향상과 Cu 박막의 대기노출이 방지되어 산화부식에 대한 저항성 향상 때문인 것으로 사료된다.

사진 2는 SiO_2 절연 보호막이 형성되지 않은 Ag, Cu 박막배선에 1×10^6 A/cm^{2}의 전류밀도를 인가한 경우에 발생한 hillock을 SEM으로 관찰한 것이다.

사진 3은 Ag, Cu 박막배선의 top layer에 RF sputter를 이용하여 약 3000 Å 두께의 SiO_2 layer를 형성한 이후에 1×10^6 A/cm^{2}의 전류밀도를 인가한 박막배선에서 발생한 hillock을 SEM으로 관찰한 것이다.

표 1. SiO_2 passivation 형성에 따른 평균수명의 변화 ($J=1\times10^6$ A/cm^2)

	Non-passivation		SiO_2 passivation	
	Lifetime (hrs)	Reliability (σ)	Lifetime (hrs)	Reliability (σ)
Al	139	0.46	170	0.40
Ag	18	0.28	309	0.50
Cu	114	0.23	546	0.08

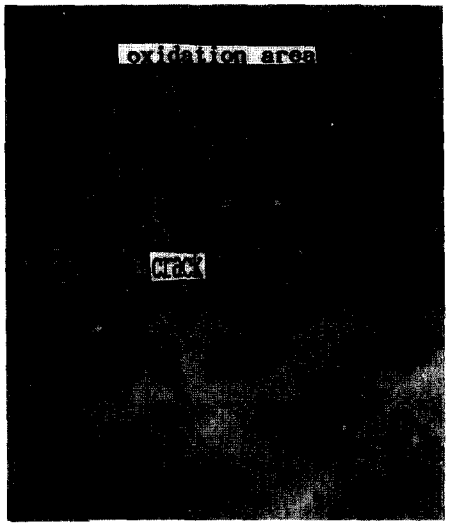

사진 1. Cu 배선의 표면산화에 따른 corrosion area ($J=1\times10^6$ A/cm^2) 투과광학현미경(×500).

(a)

(b)

사진 2. Ag, Cu 박막배선에서의 힐록(hillocks) ($J=1\times10^6$ A/cm^2). (a) Ag, (b) Cu.

사진 2와 3에서 SiO_2 절연 보호막을 Ag, Cu 박막배선 위에 형성할 경우, hillock의 발생수가 줄어듬을 알 수 있으며, 박막배선의 평균수명은 향상된다(표 1).

Cu 박막배선의 경우 SiO_2 절연 보호막에 의한 hillock density 감소가 가장 현저하게 나타났으며 평균수명 또한 가장 크게 향상되었다. Tomomitsu Satake는 Al 박막배선의 경우에 있어서도 SiO_2 절연 보호막 형성에 의하여 hillock과 whisker의 발생이 많이 완화됨으로서 소자의 수명이 향상됨을 보고하였다[12].

그림 3은 Al-1%Si alloy 배선에 일정한 1×10^7 A/cm^{2}의 전류밀도를 인가하여 Si 기판의 온도를 변화시킬 경우와 SiO_2 절연 보호막의 유무에 따른 수명에 대한 결함발생의 누적확률의 변화를 나타낸 것이다.

그림 3(a)에서 Al-1%Si 배선의 기판온도가 90℃에서 115℃, 130℃까지 증가할 경우, 평균수명은 4.71시간, 1.48시간, 0.11시간으로 감소함이 나타났다.

그림 3(b)는 기판온도가 150℃ 일 때 전류밀도 $J=1\times10^7$ A/cm^2 조건에서 약 3000 Å 두께의 SiO_2 절연 보호막을 형성한 Al-1%Si 박막배선에서의 평균수명 변화와 순수 Al-1%Si 박막배선의 평균수명 변화를 보이고 있다.

SiO_2 절연 보호막이 형성되지 않은 박막배선의 평균수명(MTF)은 약 0.11시간이었으나, SiO_2 절연 보호막이 형성된 박막배선은 6.86시간으로 평균수명(MTF)의 증가를 보였다.

SiO_2 절연 보호막이 형성된 경우에 평균수명의 향

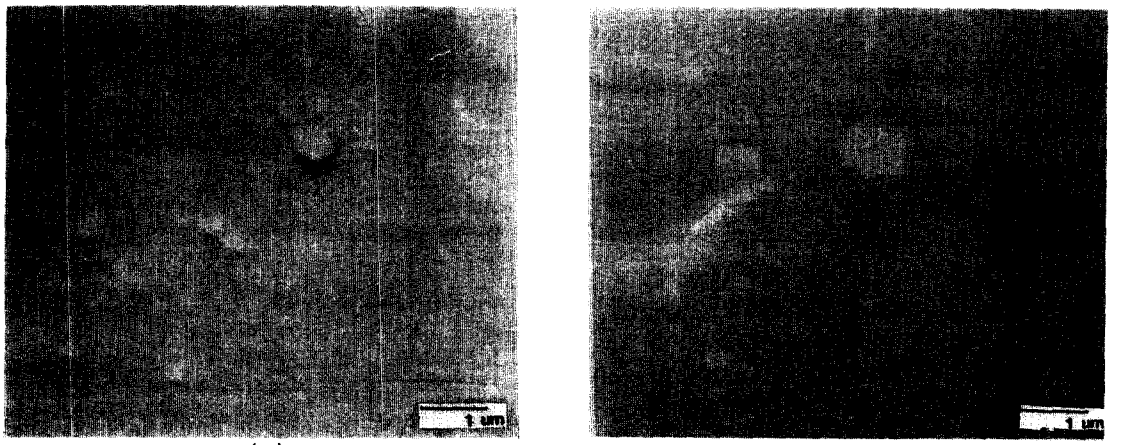

사진 3. SiO_2 절연 보호막 형성된 Ag, Cu 박막배선에서의 힐록(hillock) ($J=1\times10^6$ A/cm^2). (a) Ag, (b) Cu.

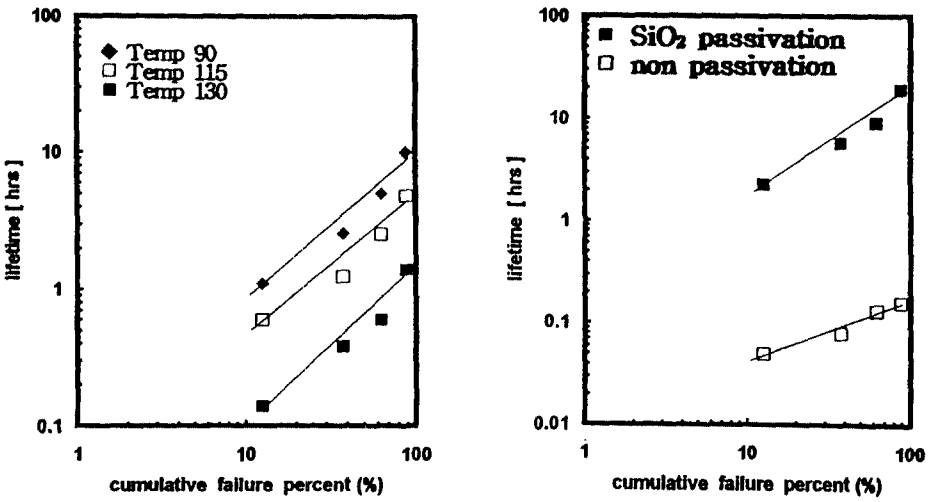

그림 3. Al-1%Si 박막배선의 수명에 대한 결함발생의 누적확률 ($J=1\times10^7$ A/cm^2). (a) 기판온도 조건의 변화(90, 115, 130℃), (b) SiO_2 절연막 형성에 따른 변화(기판온도 150℃).

상은 F. D'heurle, A. Ganglee 등에 의해서도 이미 보고된 바 있으며 그 이유는 Al-1%Si 박막배선의 electromigration 현상 및 stressmigration 현상이 완화되어지기 때문인 것으로 보고되고 있다[13, 19].

4. 결 론

Al, Al-1%Si, Ag, Cu 박막배선에서 SiO_2 dielectric overlayer는 electromigration에 대한 저항성을 높이며 평균수명을 향상시킨다.

SiO_2 passivation 효과는 Cu 박막배선에서 가장 크게 나타났다. SiO_2 dielectric overlayer가 형성되지 않은 경우 Al 박막배선의 수명이 가장 긴 것으로 나타났으나 SiO_2가 형성된 경우는 Cu 박막배선의 수명이 가장 길게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1993년도 교육부 학술연구 조성비(반도체 분야)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yoshinobu Arita, Tungsten and other refractory metals for VLSI/ULSI application V, edited by S. Simon Wong., Mat. Res. Soc., pp. 335-344 (1990).
2. A. Isobe, M. Sakamoto, Increase in EM resisrance by planarizing dielectric film over Al wiring, IEEE-VMIC, pp. 161-167 (1989).
3. Janet M. Towner, Electromigration induced short circuit failure, IEEE Reliability Physics Symposium, pp. 81-86 (1985).
4. Harry A. Schafft, Tammy C. Grant, Electromigration and the current density dependence, IEEE Reliability Physics Symposium, pp. 93-99 (1985).
5. I. Ames, Reduction of electromigration in Al film by Cu doping, *IBM J. Res. Dev.* **14**, 461 (1970).
6. Y. Ushiku, H. Ono, Planrized silver interconnect technology with a Ti self-passivation technique for deep sub-micron ULSIs, Symposium on VLSI technology, KYTO, pp. 121-122 (1993).
7. R. E. Hummel, Activation energy for EM in thin Ag, Au films, *Thin Solid Film*, **25**, 335 (1975).
8. R. E. Hummel, On the direction of EM in thin Ag, Au, Cu films, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 3733 (1971).
9. Birendra N. Agarwala, Electromigration failure in Au thin film conductors IEEE Reliability Physics Symposium, pp. 107-112 (1975).
10. Tetsuya Homma, Yukinobu Murao, A new interlayer dielectric film formation technology using room temperature flow CVD, IEEE-VMIC, pp. 71-77 (1993).
11. H. H. Hoang, R. A. Coy, Barrier metal effects on EM of layered Al metallization, IEEE-VMIC, pp. 133-141 (1990).
12. Tomomitsu satake, Kazuo Yokoyama, Electromigration failure in NiCr thin film stripes, *Appl. Phys. Lett.* **23**, 9 (1973).
13. M. Hassel Shearer, F. Quadri, Reliability analysis of several conductor at high current density for use in bubble memories, IEEE Reliability Physics Symposium, pp. 95-100 (1980).
14. 이종덕, 실리콘 직접회로 공정기술, 대영사, Chap. 4, p. 419 (1990).
15. Tomomitsu Satake, Kazuo Yokoyama, Electromigration in Al film stripes coated with Anodic Al oxide films, *Jap. J. Appl. Phys.* **12**, 518 (1973).
16. E. Hall, E. Philofsky, A. Gonzales, Electromigration of Al-2% Cu thin film, *J. Electron. Mater.* **2**, 333 (1972).
17. J. M. Poate, K. N. U, J. W. Mayer, Thin film-interdiffusion and reaction. A wiely-interscience publication, pp. 292-293 (1978).
18. H. K. Kang, I. Asano, Grain structure and electromigration properties of CVD Cu metallization, IEEE-VMIC, pp. 223-229 (1993).
19. F. D'Heurle, A. Ganglee, V. Ranieri, Thin film interdiffusion and reaction, Chap. 8, p. 292, edited by J. M. Poate, K. N. Tu, J. W. Mayer, A wiley-interscience publication (1978).