

고집적용 구리배선의 electromigration 및 thermal fatigue 연구

김영후¹ · 박영배^{2,3} · Reiner Mönig³ · Cynthia A. Volkert^{3,4} · 주영창¹

¹서울 국립 대학교 재료공학부, ²안동 국립 대학교 재료공학부,
³독일 Stuttgart 막스 플랑크 연구소, ⁴독일 Forschungszentrum Karlsruhe

Electromigration and thermal fatigue in Cu metallization for ULSI

Y.H. Kim¹, Y.B Park^{2,3}, R. Mönig³, C.A. Volkert^{3,4}, and Y.C Joo^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

²School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong, Korea

³Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart, Germany

⁴Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Germany

초 록: 구리 배선에서의 신뢰성 평가를 위해 직류 전류와 교류 전류를 각각 인가하였을 때의 파손 발생을 분석해 보았다. 직류 전류에서는 electromigration 현상이 발생하는데, 높은 전류 밀도와 온도에서 더욱 빠르게 파손이 진행되었으며, 실험을 통해 구한 활성화 에너지와 전류밀도 의존지수는 각각 0.96eV와 4의 값을 갖는 것으로 나타났다. 교류 전류에서는 열 피로 현상이 발생하였는데, 높은 주파수와 ΔT 가 클수록 파손이 심하게 진행되었다. 집합 조직에 따른 failure morphology 분석 결과, (100)grains에서는 결합이 넓게 성장하여 faceted grains가 되지만 (111)에서는 배선의 두께 방향으로 성장하여 빠르게 단선을 유발하는 것으로 나타났다.

Abstract: We researched damage formation and failure mechanism under DC(direct current) and AC(alternative current) in order to estimate reliability of Cu interconnects in ULSI. Higher current density and temperature induces more short TTF(time to failure) during interconnects carry DC. Measurement reveals that Cu electromigration has activation energy of 0.96eV and current density exponent value of 4. Thermal fatigue is occurred under DC, and higher frequency and ΔT value gives more severe damage during interconnects carry AC. Through failure morphology analysis with respect to texture, we observed that damages had grown widely and faceted grains had appeared in (100)grains but damages in (111) had grown thickness direction of line and had induced a failure rapidly.

Keywords: electromigration, thermal fatigue, Cu interconnect

1. 서 론

반도체 소자가 점점 더 집적화됨에 따라 금속 배선에는 매우 높은 전류밀도가 인가되게 되는데 이는 electromigration 현상을 유발하게 된다. Electromigration 현상은 일반적으로, 도선 등에 전류가

흐를 때 이동하는 전자들에 의해 생긴 운동량이 원자에 전이 되면서 원자가 움직이게 되는 것을 말한다. 이러한 electromigration 현상은 전자 소자의 도선에서 void나 hillock을 통해 failure를 유발할 수 있으므로 중대한 신뢰성 문제를 야기할 수 있다.

*Corresponding author
E-mail: ycjoo@plaza.snu.ac.kr

낮은 비저항 및 우수한 electromigration 신뢰성 등의 장점을 가지는 구리는 알루미늄을 대체할 차세대 배선 물질로 부각되고 있다. 구리는 매우 작은 비저항 값($1.69 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$)을 갖는 것으로 알려져 있으며, 녹는점이 $1,100^\circ\text{C}$ 로 기존의 배선 재료로 사용되던 알루미늄의 660°C 에 비해 높기 때문에 상대적으로 원자의 확산도가 떨어져 electromigration 저항성 또한 낮을 것으로 기대되기 때문이다.^{2,11,12,13} 그러나 알루미늄이 이미 안정적인 공정과 물성이 확보되어 있는 것에 반해, 구리 배선의 경우 이론적인 예측과는 달리 실제 배선 재료로써 사용할 경우 신뢰성의 향상이 항상 보장되지 않는다는 것이 실험적으로 관찰되었다.^{1,4}

그 이유로는 damascene Cu 배선의 trench 옆면에서 발생하는 결정립 성장에 의한 side wall texture 효과를 들 수 있다.^{8,10} Damascene 구조에서는 미리 형성된 trench 모양의 패턴에 막을 증착하게 되므로 핵생성이 패턴의 바닥과 옆면에서 동시에 발생하기 때문에 집합 조직과 입계가 복잡하게 성장한다. 이러한 측면 집합조직의 효과는 배선의 폭이 작아지고 깊이가 깊어질수록 옆면에서 핵생성한 입자의 분율이 커져서 강하게 되는데 복잡한 집합 조직의 형성이 구리 배선의 신뢰성에 나쁜 영향을 줄 것이라고 생각된다. 또한 기존의 알루미늄과는 달리 구리 배선에서는 표면 확산을 효과적으로 차단해줄 만한 우수한 자연 산화막이 존재하지 않기 때문에 표면에서의 electromigration이 중요한 신뢰성 문제를 일으키는 것으로 보인다.

앞서 말한 electromigration이 직류 전류에 의한 현상이었다면, 교류 전류가 인가될 경우, 이와는 다른 거동을 할 것으로 예상할 수 있다. 즉, 한 방향으로 지속적인 운동량의 전이가 일어날 수 없는 교류 전류에서는 앞서 말한 electromigration과는 다른 현상이 일어날 것이며 이는 소자에서 또 다른 신뢰성 문제를 유발할 수 있다.⁶ 도선에 전류가 흐르면 joule heating에 의해서 열이 발생하게 된다. 교류 전원은 전류의 방향이 주기적으로 변하게 되는데 이 때, 전류가 0이 되는 시점에서는 joule heating이 제로가 되어 상대적으로 낮은 온도가 되고, +, -의 최대 전류가 되는 시점에서는 반대로 가장 높은 온도를 갖게 된다. 이처럼 교류 전류에서는 필연적으로 주기적인 heating이 발생하게 되어 thermal fatigue와 유사한 현상이 일어날 것

으로 생각할 수 있다. 최근 배선의 크기가 작아지고 소자에 요구되는 주파수가 더욱 높아지게 되면서 이로 인한 열적 기계적 피로(thermo-mechanical fatigue)현상은 새로운 신뢰성 문제로 주목 받고 있다.^{7,8} 구리와 같은 f.c.c 금속의 경우 60Hz와 20kHz 사이의 주파수를 갖는 교류 전원의 경우 피로 수명에 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있으나 박막에서와 고주파수에서의 효과에 대한 연구는 그리 많지 않았다.

본 연구에서는 구리 배선에서의 electromigration 현상을 분석하기 위하여 온도와 배선 폭 등의 조건을 다르게 하여 직류 전류가 인가되었을 때의 배선의 수명을 통계적으로 분석하고, 교류 전류에서의 열 피로에 의한 신뢰성 평가를 in-situ SEM(Scanning Electron Microscope)사진을 이용하여 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 직류 전류에 의한 파손 실험

시편은 $\text{SiO}_2(1000\text{\AA})/\text{n-type Si}$ wafer 위에 순수 구리 박막을 UHV sputter를 이용하여 5000\AA 증착 후 electromigration용으로 패턴화된 마스크를 이용하여 사진 식각 공정과 현상 및 wet-etching을 하여 다음의 Fig. 1과 같은 시편을 제작하였다. 시편은 선폭이 $8\mu\text{m}$, 길이는 $2000\mu\text{m}$ 로 제작하였다. 그림에서처럼 시편은 4-point 측정용 구조와 같아져서 시편에서의 라인부분 이외의 모든 요인에 의한 전압강하 요인을 배제할 수 있으므로 효과적이다. 또한 통계처리가 가능한 데이터를 확보하기 위해 4-라인구조에서 실험을 진행하였다.

Electromigration 실험은 고온에서 진행되는데, 실험 도중에 열처리 효과에 의한 입계 성장이 일어나면 정확한 측정을 할 수가 없다. 따라서 실험을 하기 전에 제작된 시편을 400°C 에서 30분간 진공

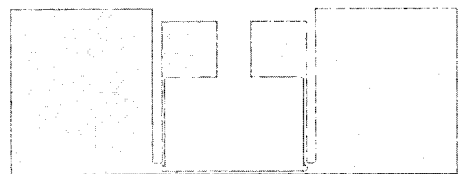


Fig. 1. Electromigration 테스트용 시편의 개략적 모습.

열처리하고 안정화하였다. 구리 배선의 경우 100°C이상의 온도에서도 쉽게 산화되어 비저항이 급속히 증가하므로 정확한 electromigration 거동을 평가하는데 문제를 야기할 수 있다. 일반적으로 10⁻⁴ torr 수준의 진공도는 300°C 정도의 온도에서 구리가 산화되는 것을 막지 못한다고 알려져 있다. 따라서 본 실험에서 electromigration 실험은 반드시 10⁻⁷ torr 수준의 고진공 chamber 내에서 행하였다. 실험은 electromigration의 전류 밀도와 온도 의존성을 구하기 위하여 온도는 267°C와 297°C에서, 전류 밀도는 2.5MA/cm²와 5MA/cm²의 두 가지 조건에서 진행하였다.

2.2 교류 전류에 의한 파손 실험

교류 전원에서 열 피로 실험 패턴은 배선 폭과 길이는 각각 8 μm와 800 μm로 하였으며, grain 크기와와의 관계를 보기 위해 두께가 100nm, 300nm 인 두 개의 종류를 준비하였다. 준비된 시편은 실험하기에 앞서 안정화를 시키기 위하여 400°C에서 15시간 동안 열처리를 해주었는데 두께에 따른 평균 grain 크기 차이를 충분히 하기 위하여 열처리 시간을 길게 하였다. 이때의 진공은 10⁻⁷ torr 이하였다. 또한 교류 전류에서의 파손 거동을 이해하기 위하여 교류 전류의 최대 전류의 값을 변인으로 선정하였다. 최대 전류의 값은 결국 교류 전류에서 0 전류가 걸렸을 때와의 상대적인 온도 차이를 유발하게 되므로 이 조건은 결국 ΔT 값을 제어할 수 있게 된다. 또한 집합조직에 따른 파괴 morphology 관찰을 위하여 in-situ SEM을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 구리 배선의 electromigration 거동 평가

3.1.1. 4-line 구리 시편에서의 MTTF(Median Time To Failure) 측정

다음의 Fig. 2는 앞의 조건에 따라 4-line 시편에서 테스트를 진행하여 나온 파괴 시간 결과를 log-

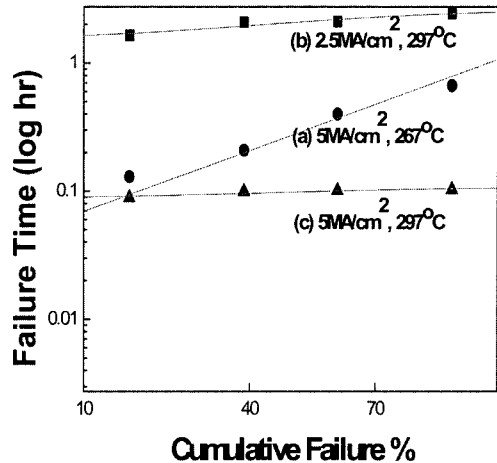


Fig. 2. 파괴 시간의 log-normal plot (a) 2.5MA/cm², 267°C (b) 5MA/cm², 297°C (c) 5MA/cm², 297°C

normal plot한 것이다. 이를 선형 회귀하여 통계처리하면 MTTF값인 t₅₀를 구할 수 있다.

실험 조건에 따른 파괴 시간과 이를 통해 구한 MTTF값은 다음의 Table 1과 같다.

3.1.2. 구리 배선에서의 electromigration과 current density exponent, 활성화 에너지 분석

널리 알려진 Black의 관계식은 다음의 식 (1)과 같이 나타내며, 앞서 실험을 통해 측정된 t₅₀ 값을 이용하면 구리 배선의 electromigration과 관계된 중요한 parameter들을 구해낼 수 있다.¹⁴⁾

$$t_{50} = A J^{-n} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right) \tag{1}$$

여기서, A는 상수, n은 t₅₀의 전류밀도 의존성, Q는 t₅₀의 온도에 대한 의존성을 나타낸다. n과 Q는 클수록 가속조건보다는 사용조건에 긴 수명을 가지게 된다. Q는 일반적으로 electromigration이 발생하는 지배적인 확산기구의 활성화 에너지 값을 의미한다.

위의 식 (1)에서 양변에 로그값을 취하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1. 각 조건에서의 실험 조건과 MTTF

	전류밀도	온도	배선 수	파괴수명 (hr)	MTTF, DTTF
a	5MA/cm ²	267°C	4	0.130, 0.208, 0.399, 0.666	0.291, 0.733
b	2.5MA/cm ²	297°C	4	1.641, 2.074, 2.106, 2.439	2.045, 0.162
c	5MA/cm ²	297°C	4	0.089, 0.099, 0.101, 0.103	0.098, 0.063

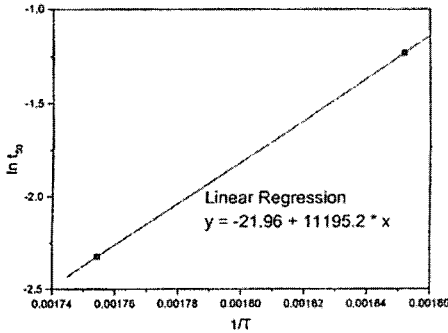


Fig. 3. Cu 라인에서의 활성화 에너지 E_a .

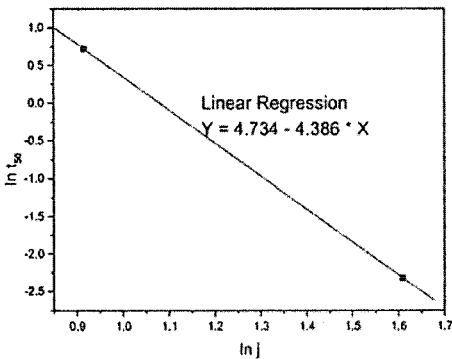


Fig. 4. Cu 라인에서의 current density exponent.

$$\ln t_{50} = \ln A - n \ln j + \frac{E_a}{k} \frac{1}{T} \quad (2)$$

이 식을 이용하여 $\ln t_{50}$ vs. $\frac{1}{T}$ 로 선형 회귀하여 기울기를 구하면 그 값은 $\frac{E_a}{k}$ 가 되고 이를 통해 다음의 Fig. 3에서와 같이 활성화 에너지를 구할 수 있다. 실험 결과 (a)와 (c)는 동일한 전류밀도 조건에서 온도가 다르므로 위와 같이 plot하는 것이 가능하다. 마찬가지로 (a)와 (b)의 결과를 $\ln t_{50}$ vs. $\ln j$ 선형 회귀 하면 Fig. 4에서와 같이 current density exponent를 구할 수 있다.

Fig. 3의 plot에서 얻은 함수의 기울기에 볼츠만 상수($k=8.616 \times 10^{-5}$)를 이용하여 계산하면 활성화 에너지는 0.96eV를 얻을 수 있다. 이 값을 동일한 선풍에서 알려져 있는 알루미늄의 0.834eV보다 근소하나마 큰 것을 알 수 있다.¹⁵⁾ 활성화 에너지가 더 큰 것은 구리의 원자 확산도가 상대적으로 낮기 때문이라고 생각되며 다른 조건이 거의 같다면 구리 배선의 사용이 신뢰성에서 긍정적인 평가

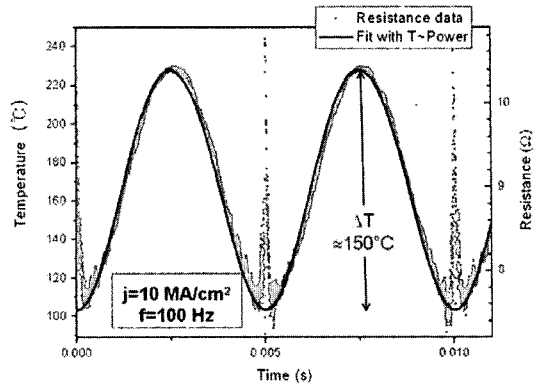


Fig. 5. 10MA/cm², 100Hz 조건에서의 10nm Ta/200 nm Cu 라인의 온도변화.

를 받을 수 있을 것이라 예상할 수 있는 근거가 된다. Fig. 4의 선형 회귀 결과에서 current density exponent n은 약 4정도가 나왔는데 전류밀도 의존 지수는 기존의 보고된 1과 2사이의 값이 아닌 상당히 큰 4정도의 값이 얻어졌는데 이것은 배선에서 joule heating이 발생하여 electromigration에 의한 파괴를 더욱 가속화하였기 때문이라 생각된다.

3.2 교류 전원에서의 구리배선의 electromigration 거동 평가

교류 전류는 joule heating이 주기적으로 반복됨으로써 배선에 열 피로 현상을 유발할 수 있다. 일단 이를 실험적으로 관찰하기 위해서는 온도 차이와 주파수를 제어할 수 있어야 한다. 다음의 Fig. 5은 10MA/cm²의 전류 밀도를 100Hz의 주파수로 인가하였을 때 주기적으로 온도가 변화하여 결과적으로 ΔT 가 150°C정도인 열 피로를 야기하게 된다는 것을 보여준다.

열 피로 현상은 라인에 파괴를 유발하게 되는데 이를 in-situ SEM을 통해 관찰하였다.(Fig. 6) 피로가 진행될수록 라인의 곳곳에서 void와 같은 결함들이 여러 곳에서 발견되고 라인이 단선되는 것을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 결함이 발생하는 morphology와 단선될 때까지의 cycle을 얻을 수 있다.

다음은 ΔT 의 크기와 배선 두께 차이에 의한 grain 크기에 의해서 교류 전원 electromigration수명이 어떻게 영향을 받는지 알아보았다. 결과는 Fig. 7과 같이 다른 열 피로 현상과 마찬가지로 ΔT

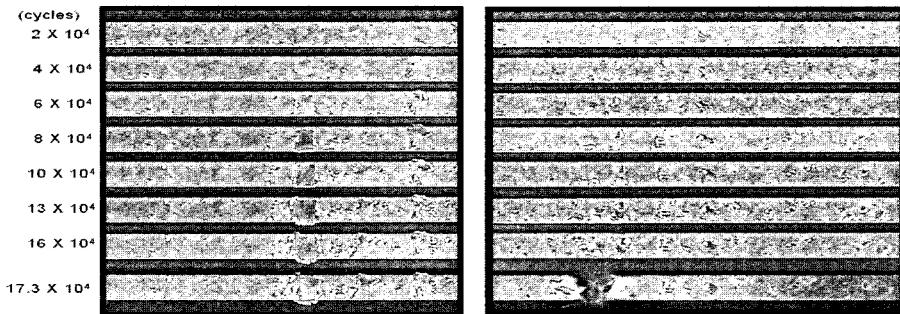


Fig. 6. 100Hz, $\Delta T=215^\circ\text{C}$, 두께 300nm 조건에서의 교류전원 electromigration 테스트. 구리 라인의 배선폭은 8 μm , 실시간 주사전자현미경 이미지.

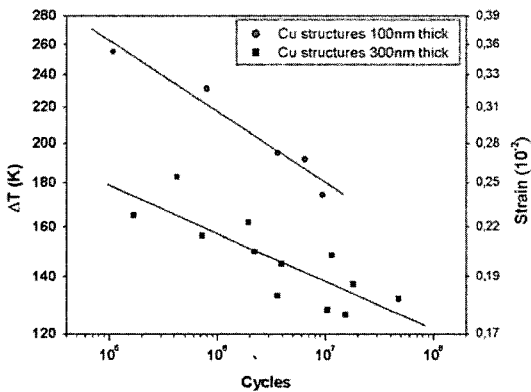


Fig. 7. 교류전원에 의한 열 피로현상에서 라인의 파괴 수명과 ΔT , grain 크기와의 관계.

가 클수록 파괴 주기도 짧아지는 것으로 나타났으며, grain 크기가 작은 두께 100nm 시편에서 파괴 수명이 좀 더 긴 것으로 나타났다.

Grain의 크기가 작은 시편에서 긴 파괴 수명을 갖는 것은, 결함이 성장하는 것과 관련된 dislocation 거동을 억제하는 grain boundary가 상대적으로 많기 때문으로 생각된다. 높은 grain boundary 밀도로 인하여 wrinkled grain의 성장이 억제되고, 단선을 늦추게 되는 것이다.

Fig. 8은 집합조직에 따른 damaged grain growth morphology를 in-situ SEM을 통해 나타낸 것이다. 그림을 보면 (111) grains에서 성장한 결함의 경우, 결함이 성장하면서 그 부분이 집중적으로 얇아지



(a) (111)에서의 결함 결정립 성장



(b) (100)에서의 결함 결정립 성장

Fig. 8. 집합조직에 따른 damaged grain growth morphology.

면서 결함의 범위 성장이 크게 일어나지 않고, 파괴가 일어나는 것을 볼 수 있다. 그렇지만 (100) 결정립에서 성장한 결함은 초기에 주변의 grain boundary와 twin boundary를 지속적으로 제거하면서 넓고 큰 하나의 faceted damaged grains로 성장하게 된다. 라인의 표면에 형성된 wrinkles는 다른 grain boundary를 밀어 내며 지속적으로 성장하여 라인 전체를 덮을 정도로 넓은 결함 입계를 형성한다.

4. 결 론

본 연구에서는 차세대 집적 회로 배선으로써 활용되는 구리에서 발생하는 신뢰성문제를 살펴보았다. Electromigration현상과 교류 전원이 인가될 때 발생하는 열 피로 현상은 최근의 보다 높은 성능을 요구하는 미세소자에서 중요한 신뢰성 문제로 부각되고 있는 것들이다. 따라서 이러한 거동들을 살펴보고, 다양한 변인에 의한 영향과 전자 현미경을 통한 미세구조 및 파괴 메커니즘을 관찰함으로써 구리 배선의 신뢰성문제를 개선하는 방향을 모색해 보았다.

구리에서의 실험 결과 높은 전류 밀도가 인가 될수록 라인의 수명이 짧아지며 전체 electromigration거동에 대한 구리 배선에서의 활성화 에너지는 약 0.9eV가 나왔으며 이 값은 알려진 알루미늄의 값보다 소폭 큰 값이었다.¹⁶⁾ 전류밀도지수는 4.4정도로 알려진 것보다 크게 나왔는데 이것은 joule heating에 의하여 파괴가 가속되었기 때문이라 생각되며, 시편 제작에 생기는 불순물 등에 의한 영향을 많이 받을 것으로 생각된다.

교류 전원에 의하여 발생하는 thermal fatigue 현상에서 ΔT 는 인가하는 전류밀도의 크기로 제어하는 것이 가능했으며 ΔT 가 증가할수록 라인의 파괴 수명은 짧아지는 것으로 나타났다. 평균 grain의 크기가 작을수록 결함의 성장이나 dislocation 거동을 억제하는 grain boundary의 밀도가 증가하여 결함에 의한 파괴 수명이 증가하였다. 집합조직에 의한 영향은 (111)grains에서 성장한 결함은

grain boundary를 밀어내지 못하고, 초기 결함이 넓게 성장하기 보다는 얇아지면서 파괴를 유발하였고, (100)grains의 경우에는 faceted grain의 형태로 결정립이 넓게 성장하면서 피로가 진행되는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 국제협력사업(과제번호 : 0417-20030110)에 의하여 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Pentium 4 by IBM (2000).
2. Thunderbird by AMD (2000).
3. M. A. Korhonen et al., J. Appl. Phys., 73, 3790 (1993).
4. C. S. Ryu et al., Symp. On VLSI Technology Digest of Tech. Papers, (1998).
5. Ki-Don, Lee, Ennis T. Ogawa, Hideki Matsuhashi, Patrick R. Justison, Kil-Soo Ko, and Poul S. Ho Appl. Phys. Lett., vol.79 . No.20, 12 Nov. (2001)
6. T. Berger et al., Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 612, D2.4.1 (2000).
7. L. Arnaud et al., 37th Annual International Reliability Physics Symposium, San Diego, (1999).
8. K. L. Lee, C. K. Hu, K. N. Tu, J. Appl. Phys., 78, 4428-4437, (1995).
9. C. Lingk et al., Appl. Phys. Lett., 74, 683 (1999).
10. M.T. Bohr, IEEE IEDM Technical Digest, 241, (1995).
11. E. Philofsky et al., 9th Annual Proceeding of Reliability Physics (1971).
12. Tarek Suwwan de Felipe, S. P Murarka, P. M. Ajayan and J. Bonevich, IITC., 293, (1999).
13. S. P. Hau-Riege et al., Appl. Phys. Lett., 76, 309 (2000).
14. J. R. Black, IEEE Trans. Electron Devices, ED-16, 338 (1969).
15. Y. -C. Joo and C. V. Thompson, J. Appl. Phys., 82, 6062 (1997).
16. J. R. Lloyd, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 R109-R118 (1999).