

Schottky Barrier Height의 온도의존성에 관한 연구

심성엽 · 이동진 · 김동렬 · 김인수 · 김말문 · 배인호 · 한병국* · 이상윤**

영남대학교 물리학과
*경산대학교 물리학과
**경북대학교 물리학과

Study on the Temperature Dependence of Schottky Barrier Height

S.Y.Shim, D.K.Kim, D.R.Kim, I.S.Kim, Y.H.Moon, M.M.Kim, I.H.Bae, B.K.Han* and S.Y.Lee**

Dept. of Physics, Yeungnam University

**Dept. of Physics, Kyungsan University*

***Dept. of Physics, Kyunpook University*

초 록 Au/Si(100) Schottky diode를 100K~300K 온도범위에서 current-voltage(I-V), capacitance-voltage(C-V)측정을 하였다. 얻어진 Schottky barrier height(SBH)값은 실온에서 두측정값 모두 $(0.79 \pm 0.02)eV$ 이다. 그러나 온도가 감소할수록 I-V측정에서 SBH는 선형적으로 감소하고 C-V측정에서 SBH는 온도에 따른 변화가 관찰되지 않았다. 이것은 낮은 온도에서 열이온 방출 이론을 따르지 않는다는 것을 나타낸다. 이것으로 재결합 전류를 고려하여 계산해 본 결과 I-V에서도 SBH의 변화가 관찰되지 않으므로 C-V측정과 일치됨을 보았다. 이런 상반된 결과를 가져오는 이유는 전류수송 현상이 온도에 따라 변화하므로 생긴 것임을 알 수 있었다.

Abstract The Schottky barrier height(SBH) of Au/n-Si(100) were investigated by current-voltage(I-V) and capacitance voltage(C-V) measurement within a temperature range of 100K~300K. The values of SBH at room temperature obtained from these two measurements were $(0.79 \pm 0.02)eV$. The SBH obtained from the C-V measurement was temperature independent, while that obtained from the I-V measurement decreased linearly with decreasing temperature. This indicates that the Schottky diode has deviated from the thermionic emission theory at low-temperature, Thus, other current transport processes were considered and the contribution of recombination current was dominant at low temperature. We found that it leads to a lower SBH value. Thus, the conflicting results between C-V and I-V measurement were explained, C-V measurement is believed to yield more reliable SBH values in present study since it is not affected by the current transport uncertainties.

1. 서 론

반도체 소자 공정기술중 반도체-반도체, 금속-반도체, 산화층-반도체의 계면특성이 아주 중요한 부분을 차지한다. 이중 특히 금속-반도체 diode는 정류특성과 함께 반도체 기본소자로써 응용성이 높다. 그러나 이러한 단순한 구조와는 달리 Schottky diode를 만드는 과정에서 생기는 계면결합과 반도체의 표면상태 등의 영향으로 아직 계면상태에 대한 정확한 이해가 부족한 상황이며 전류 수송현상에 걸

대적 영향을 끼치는 SBH가 계면상태에 많은 영향을 받으며 또한 측정 방법에 따른 SBH의 변화도 보고되고 있다. 이중 특히 C-V, I-V측정이 가장 일반적이나 온도의 변화에 따른 상반된 결과들이 보고되고 있으므로 본 연구에서는 Au/Si(100) Schottky barrier diode(SBD)를 제작하여 온도변화에 따른 SBH를 측정하고 그 상반된 결과의 원인과 특성을 조사하였다.

BSRI-95-2404, 이 연구는 1995년도 교육부 기초과학육성연구비 지원에 의한 것임.

2. 이 론

Schottky 장벽을 지나 흐르는 전하들에 대한 이론들은 Fig. 1과 같이 장벽을 넘어 지나가는 열이온 방출과 장벽을 투과하는 양자역학적 터널링, 공간 전하영역에서의 재결합, 그리고 반도체 중성영역에서의 재결합 전류등으로 분류된다.

Bethe에 의한 열이온 방출전류 밀도는 다음과 같으며

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$= J_{ST} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

드리프트와 확산으로 표시되는 전류밀도는

$$J = \frac{q^2 D_n N_c}{kT} \left[\frac{2q(V_{bi} - V) N_D}{\epsilon_s} \right]^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \cdot$$

$$\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

로 나타난다.

확산이론에서 포화전류밀도 J_{SD} 는 열이온방출 이론에서 포화전류밀도 J_{ST} 보다는 바이어스에 대해 빨리 변화하지만 온도에서는 민감하지 않다는 것을 알 수 있다. 이 두 이론의 중요한 차이점은 Quasi-Fermi level(imref)이 공핍층에서 위치가 다르다는 것이며 이것이 Fig. 2에 나타나 있다.

Padovani와 Stratton¹⁾에 의해 터널링 전류는 다음과 같이 구해졌다.

$$J = J_0 \exp\left[\frac{V}{E_0}\right]$$

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{qE_{00}}{kT}\right)$$

$$E_{00} = \frac{h}{4\pi} \left(\frac{N_D}{m^* \epsilon_s} \right)$$

여기서 J_0 는 Crowell과 Rideout²⁾에 의해

$$J_0 = \frac{J_m q (\pi E_{00} (\phi_b - V - \xi))^{1/2}}{kT \cosh(qE_{00}/kT)} \exp\left[-\frac{q\xi}{kT} - \frac{q}{E_0} (\phi_b - \xi)\right]$$

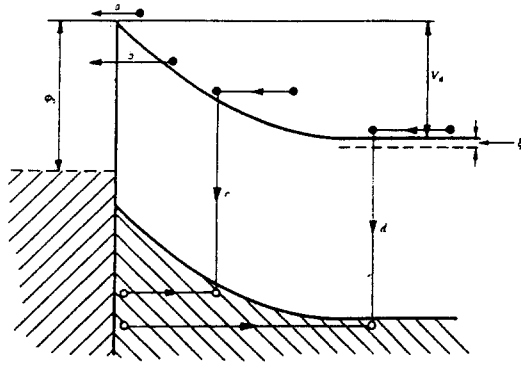


Fig. 1. Four basic transport processes under forward bias.

- a) thermionic emission current.
- b) tunneling current.
- c) recombination in the space-charge region.
- d) hole injection from the metal to the semiconductor.

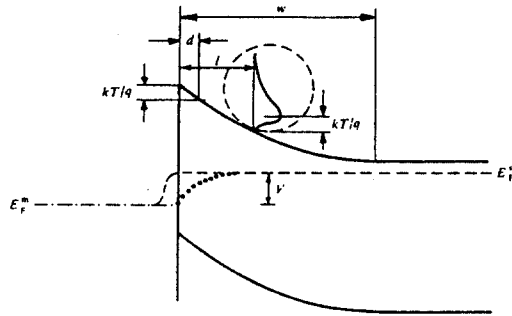


Fig. 2. Electron Quasi-Fermi level(imref) in a forward-biased Schottky barrier:.....according to diffusion theory, —according to thermionic emission theory.

$$J_m = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\xi}{kT}\right)$$

로 계산되어지고 재결합 전류밀도는 다음과 같이 나타난다.

$$J_{re} = J_{ro} \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_{ro} = \frac{qn_i w}{2\tau_o}$$

3. 실 험

본 실험에서 사용한 실리콘은 실온에서 약 1×10^{15} 의 농도로 Phosphorus가 주입되고 결

정면이 (100)인 n형 단결정 웨이퍼(wafer)를 사용하였다.

표준세척공정으로 오염물질들을 제거하고 Au를 진공 증착하였으며 제작된 diode의 전극 지름이 1mm이다. 웨이퍼 뒷면에 ohmic접합은 Al을 사용하였다. 이렇게 제작된 소자를 200°C에서 10분간 N₂분위기에서 열처리를 하였다.

Fig. 3은 I-V와 C-V측정을 위해 구성한 실험을 나타내고 있다. I-V측정은 semiconductor parameter analyzer HP4145B를 사용하여 전압이 0~0.4(V)의 전압으로 측정하였다. 소자는 probe-station에 잘 고정시켜 액체 질소로 100K~300K로 온도를 변화시켜가며 다시 I-V를 측정하였다.

C-V측정은 impedance analyzer HP4192로 온도를 100K~300K로 변화시키면서 -0.6~0.65(V)사이에서 측정하였다.

4. 결과 및 분석

①I-V 분석

온도변화에 따른 Au/Si SBD의 순방향 I-V 특성이 Fig. 4에 나타나 있다.

0.2~0.3V 사이에서 부터 전류가 준 포화상태로 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 반도체 기판과 외부의 전기접촉 그리고 계면에서 imref의 증가에 따라 공간전하영역과 계면에서 결합상태들의 점유도가 변화하므로서 전체 직렬저항성분의 변화로 여겨진다. 정확한 I-V 특성을 이해하기 위해 imref의 위치를 찾아보면

$$J = kT\mu N_c \exp\left(-\frac{E_c}{kT}\right) \frac{d}{dx} \left\{ \exp\left(\frac{\xi}{kT}\right) \right\}$$

에서 양변에 kTμN_c를 나누고 그것을 금속-반도체 계면에서부터 공핍층 경계까지 적분을 하면

$$\begin{aligned} & \frac{J}{kT\mu N_c} \int_0^l \exp(E_c/kT) dx \\ &= \exp(qV/kT) \{1 - \exp(\xi(0) - qV)/kT\} \\ &= \frac{J}{kT\mu N_c} \alpha^{-1} \exp(\phi_b/kT) F(\alpha l) \end{aligned}$$

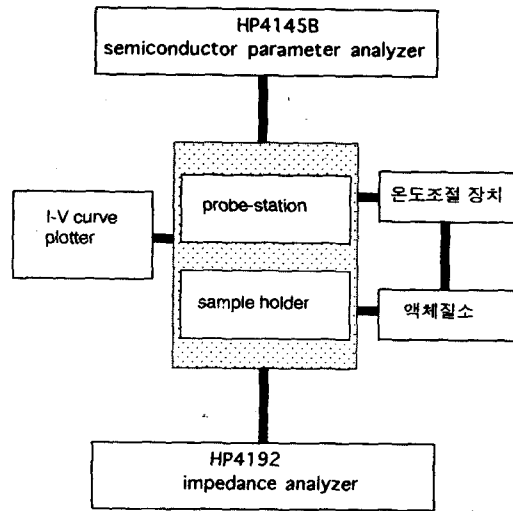


Fig. 3. Schematic diagram of measurement system.

이 식에서 ξ(0)-qV의 값으로 계면에서 imref의 값을 계산할 수 있다.

여기서

$$\alpha = \left(\frac{N_d q^2}{2\epsilon_s kT} \right)^{1/2}$$

l = depletion region length

$$y = \alpha^2 (x - l)$$

$$F(\alpha l) = \exp(-\alpha^2 l^2) \int_0^{\alpha l} \exp y^2 dy$$

: Dawson's integral

각 식들에 대응하는 수를 대입하고 계산하여 정리하면 qV-ξ(0)의 값은 0.014eV가 된다. 이것은 반도체 내부의 imref보다 금속-반도체 계면에서 imref가 0.014eV정도 낮다는 것을 의미하지만 아주 작은 값이므로 qV는 ξ(0)와 거의 차이가 없고 imref가 공간전하영역에서 거의 평탄하다. 이것은 열이온방출 이론에서의 가정과 일치하고 있다.

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{A^* T^2}{J_0}$$

열이온방출에 의한 이 식에서 SBH는 온도와 포화전류의 함수로 나타나며 이 식을 이용

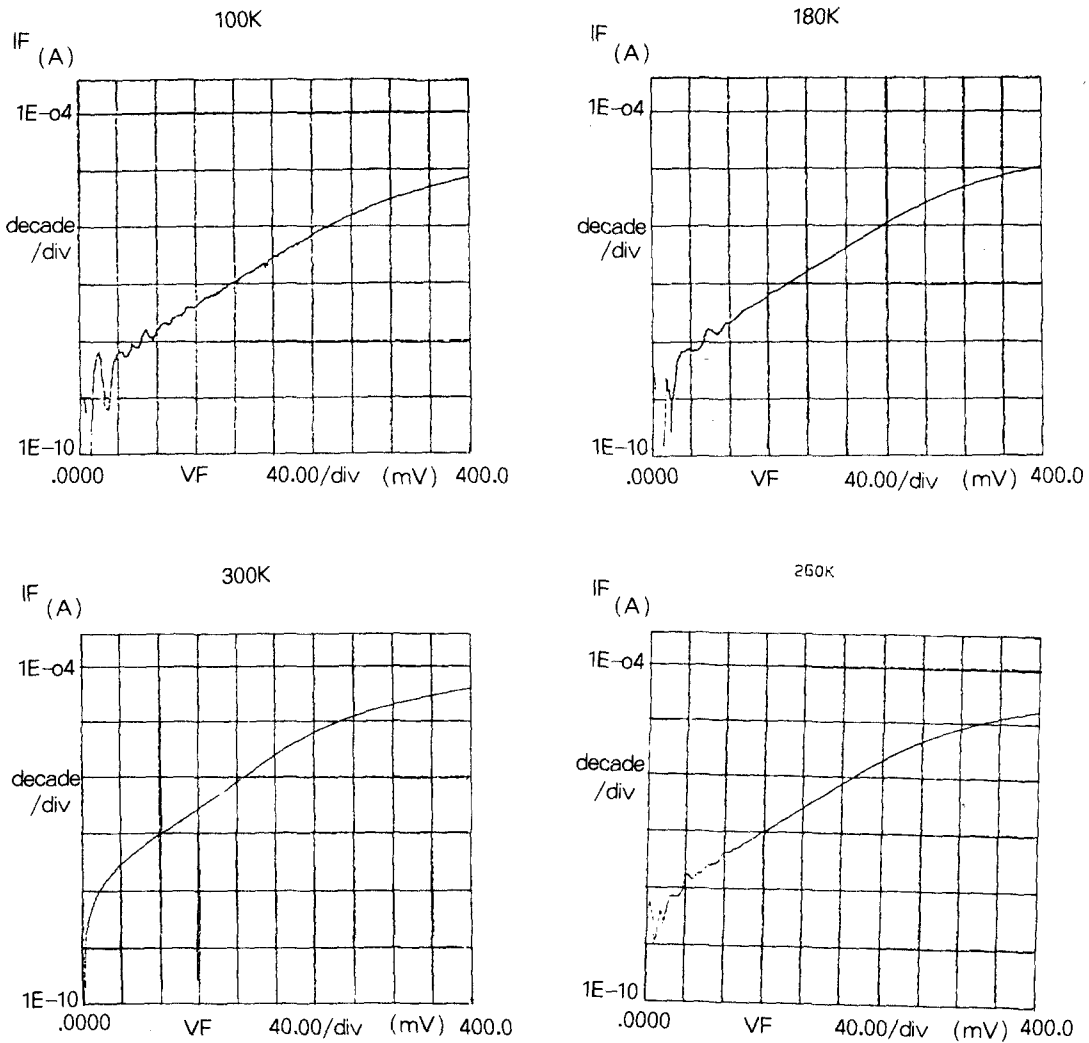


Fig. 4. Forward I-V characteristics with various temperatures.

Table 1. Temperature Dependence of SBH in I-V Measurement.

Temp.	300K	260K	180K	100K
SBH	0.79	0.7	0.48	0.26

하여 계산한 SBH의 값을 Fig. 5와 Table 1 나타내었다.

여기서 온도가 낮아짐에 따라 SBH의 값도 낮아짐을 볼 수 있다. 이것을 C-V 측정과 비교해 보기 위해 먼저 Fig. 6에 온도변화에 의한 $1/C^2-V$ 를 나타내었다.

②C-V 분석

C-V 측정에서는 온도 변화에 따른 SBH의 변화가 관찰되지 않았다. 결국 I-V, C-V 측정에서 SBH는 차이를 보이고 있는데 이것은 열이온 방출 외에 다른 전류수송 과정, 즉 열이온 방출 이론 외에 재결합 전류, 터널링 전류 등을 고려할 수 있다. 터널링 전류는, 반도체 내부로부터 계면을 지나 금속으로 방출되는 확률 E_{∞} 가 다음과 같이 나타낸다.

$$E_{\infty} = \frac{h}{4\pi} \left(\frac{N_d}{m^* \epsilon_s} \right)^{1/2}$$

열이온 방출과 비교해 보면 터널링 전류가 $E_{\infty} > kT$ 일때 고려할 만큼의 양이다. 본 실험

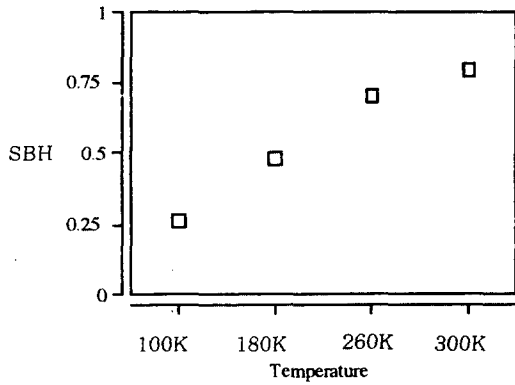


Fig. 5. Temperature dependence of SBH in I-V measurement.

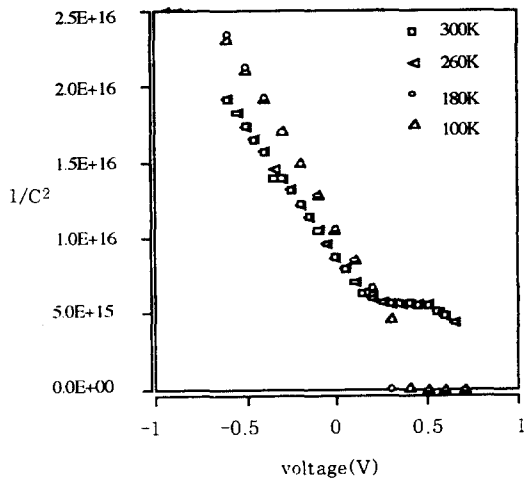


Fig. 6. C-V characteristics with various temperatures.

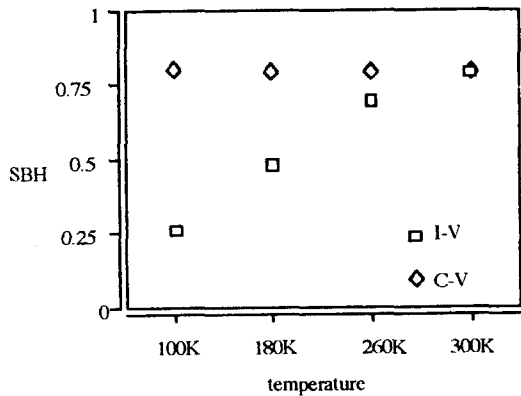


Fig. 7. Temperature dependence of SBH determined from I-V and C-V characteristics.

에서 사용한 n-Si에서 $N_D = 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 이므로

$E_{\text{sc}}/kT = 0.01$ 이고 100K에서는 0.03이다. 그러므로 I-V 측정에서 터널링 전류는 큰 중요성을 가지지 못한다. 전자들의 재결합 전류를 고려해 보면, 총전류를 ideality factor $n=1$ 인 순수한 열이온 방출 전류밀도 J_{th} 와 재결합 전류 밀도 J_{rec} 의 합으로 나타낼 수 있다.

열이온 방출 전류밀도

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

에 재결합 전류가 포함 되면

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b^-}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] + J_{\text{rec}}$$

가 된다. 그러므로 두 식의 barrier height 차이로 J_{rec} 와 J 의 비를 알아 낼 수 있다. 위의 두 식을 비교해서 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\phi_b^- - \phi_b = -\frac{kT}{q} \ln\left(1 - \frac{J_{\text{rec}}}{J}\right)$$

여기서 J_{rec} 의 변화가 없다면 SBH의 변화가 나타나지 않고 300K에서 J_{rec} 가 총전류에 대해 50%일 때 0.02V의 차이가 발생하고 90%일 때 0.06V의 차이가 난다. 그리고 100K에서 J_{rec} 가 99%일 때 0.04V의 SBH가 차이가 난다.

이것으로 미루어보면 재결합 전류가 증가하더라도 실제 SBH의 변화는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 5에서 SBH의 감소는 열이온 방출만을 고려한 계산으로 생긴 결과이며 온도의 감소로 재결합전류가 우세해지지만 SBH의 변화는 나타나지 않는다.

4. 결 론

$1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 의 phosphorus가 도핑된 n-Si에서 Au를 진공증착하여 Schottky diode를 제작하였다. 여기서 온도를 100K~300K로 변화시키며 I-V, C-V를 측정하여 SBH를 계산하였다. I-V에서는 포화전류가 300K일 때 $9 \times 10^{-7} \text{A}$ 이며 260K일 때 $5 \times 10^{-7} \text{A}$, 180K일 때

$2.8 \times 10^{-7} \text{A}$, 100K일 때 $1.8 \times 10^{-7} \text{A}$ 의 값으로 온도가 감소함에 따라 줄어들고 여기에 열이온 방출 이론을 적용하여 SBH를 계산해 보면 300K에서 0.79eV이고 100K에서 0.26eV으로 감소함을 볼 수 있었다. 계면에서 Quasi-Fermi level(imref)의 위치를 계산한 결과 실리콘 벌크 내부의 imref과 0.014eV정도의 차이가 나타남으로 imref가 공핍영역에서 거의 평탄하므로 본 실험에서 제작된 소자는 실온에서 열이온 방출이론을 따른다고 확인되었다. 그러나 온도가 감소함에 따라 ideality factor가 1.28에서부터 급격히 증가하므로 열이온 방출 이론은 많은 오차를 가져오고 또한 이것으로 다른 전류수송현상이 온도감소와 함께 나타난다는 것을 알 수 있다.

이와는 반대로 1MHz의 C-V측정에서는 온도에 따른 SBH의 변화가 관찰되지 않았으며 $(0.80 \pm 0.01) \text{eV}$ 의 값으로 일정하게 나타났다. 터널링 전류는 총전류에 대해 300K일때 1%, 100K일때 3%이므로 총전류에 큰 영향을 끼치지 못한다. 결국 열이온 방출 전류와 재결합 전류의 합으로 총전류가 결정되어진다.

재결합 전류의 증가에 따른 SBH의 변화는 100K에서 J_{rec} 가 99%까지의 증가에서도 SBH는 실온과 0.014eV의 차이 밖에 나지않으므로 재결합전류의 증가가 SBH에 변화를 주는 것은 아니다.

I-V 측정에서 전류수송현상이 온도에 따라 변화하므로 두 측정사이에서 상반된 결과가

나타나는 것이며 실제 SBH는 온도에 대한 의존성이 없음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. A.Padovahi, R.Strattor, Sol. State Electr, 9, 695 (1966).
2. C.R.Crowell, V.L.Rideout, Sol. State Electr, 12, 89 (1969).
3. Bardeen,J., Phys. Rev. 71, 717 (1947).
4. W.E.Spicer, P.W.Chye, P.R.Skeath, C.Y. Su, and I. Lindau, J. Vac. Sci, Tech, 16, 1422 (1979).
5. E.H.Phoderick, R.H.Williams, Metal-Semiconductor Contact, 2nd ed., (Larendor Press Oxford 1988).
6. Bethe, H.A., MIT Radiation Lad. Rep. 43-12. (1942).
7. S.M.Sze, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & sons (1981).
8. E.H.Rhoderick, J.Phys.D : Appl. Phys., 5, 1920 (1972).
9. Marc wittmer, Physical Review B, 42(8), 5249 (1990).
10. Marc wittmer, Physical Review B, 43(5), 4385(1991).
11. T.P.Chem, T.C.Lee, C.C.Ling, C.D.Beling, S.Fung, Solid-State electronics, 36(7), 949 (1993).