

# 반도체 재료와 장치에서의 잡음

閔 弘 植\*

서울대학교 工科大学 電子工學科 (工博)

## 1. 잡음의 정의와 잡음 연구의 목적

넓은 의미에서 잡음이란 원하는 신호를 방해하는 원하지 않는 신호를 말한다. 주어진 시스템을 생각할 때 이 시스템에서 발생하는 잡음은 크게 두가지로 나누어 진다. 하나는 이 시스템의 밖으로 부터 들어 오는 잡음 (예를 들면 시스템 내의 회로망과 60Hz 전력선, 라디오 송신기, 형광등등과의 전기자기적인 상호 작용에 의한 잡음, 번개나 은하계로 부터 오는 방사선에 의해 생기는 잡음) 이고, 다른 하나는 시스템 내부에서 발생하는 잡음이다.

시스템 내부에서 발생하는 잡음도 기계적인 진동등에서 오는 사람이 만드는 잡음과 시스템 내부의 장치 (devices) 나 재료에서 자발적으로 발생하는 잡음 (Spontaneous fluctuations) 으로 구분될 수 있다. 시스템 외부에서 들어 오는 잡음은 Shielding, filtering, 혹은 회로소자의 layout을 바꾸어 주므로써 줄여지거나 제거될 수 있으나, 전자 장치나 재료에서 자발적으로 생기는 맥동현상 (fluctuations) 은 완전히 제거되지 않는다. 반도체 재료와 장치에서의 잡음은 외부의 원인에 의해서 생기는 잡음이나 내부에서 사람에게 의해서 만들어 지는 잡음이 아닌 자체에서 자발적으로 생기는 맥동현상을 의미한다. 이와 같이 자체에서 자발적으로 발생하는 잡음을 특히 기본 (fundamental) 잡음, 혹은 진성 (true 혹은 intrinsic) 잡음이라 하고, 외부에서 들어오는 잡음이나 내부에서 사람에게 의해서 만들어 지는 잡음을 disturbance 혹은 외부 (extrinsic) 잡음이라 한다.

잡음이란 이름의 유래는 회로소자나 전자장치 등에서 발생하는 맥동하는 전류나 전압을 저주파 증폭기를 거쳐서 스피커를 통하면 시끄러운 소리 (hissing sound) 를 내기 때문에 이 맥동하는 양을 잡음이라고 불러 왔지만, 실제에는 맥동하는 신호가 귀에 들리든 안 들리든 자발적인 맥동현상을 모두 잡음이라고 부른다.

반도체 재료와 장치에서 발생하는 자발적인 맥동현상인 잡음을 연구하는 목적을 알아 보자.

첫째, 반도체 재료와 장치는 작은 물리적인 양을 측정하거나 작은 신호를 증폭시키는 시스템들에 주로 사용되어 왔다. 측정할 수 있는 물리적인 양의 최소치 (혹은 한계치) 와 증폭할 수 있는 신호의 최소치 (혹은 한계치) 는 측정시스템이나 증폭기 자체에서 발생하는 잡음에 의해 결정되는 것이 보통이다. 즉 측정시스템이나 증폭기 자체에서 발생하는 잡음보다 크기가 작은 물리적인 양이나 신호를 측정하거나 증폭하기가 어려울 것이다. 그러므로 재료와 장치에서 잡음이 발생하는 원인을 알아내어 측정 혹은 증폭할 수 있는 한계치가 잡음 발생 요인들에 의해서 어떻게 영향을 받는지를 규명하여, 재료나 장치의 최적 동작 상태를 찾아 내는 것은 중요한 일이다. 또한 이와 같은 지식을 이용하여 측정이나 증폭할 수 있는 한계치를 낮추기 위한 재료나 장치를 개선할 수 있는 방법을 연구하여 알아 낼 수 있을 것이다.

둘째, 반도체 재료와 장치에서 자발적으로 발생하는 잡음은 이들 재료와 장치에서의 도전기구 (conduction mechanism) 의 특성을 나타

내고 있으므로, 재료와 장치의 동작을 완전히 이해하기 위해서는 이들의 잡음 특성을 알아야 한다. 재료와 장치의 특성을 잘 이해하고 있으면, 이들 재료와 장치의 동작원리를 연구하는데 잡음을 하나의 방편(tool)으로 이용할 수가 있다. 특히 반도체 재료와 장치의 동작특성을 나타내는 양들 중에는 잡음 특성을 이용하면 다른 방법보다 더 정확히 측정되는 양이 있다.

2. 잡음의 종류와 원인 (Sources)

반도체 재료와 장치에서 관찰되는 잡음의 종류는 여러가지가 있으나, 이들 잡음들은 현재까지 어떤 통일된 기준에 따라서 분류되어 있지 않고, 각 잡음의 특성에 관계상의 이름을 갖고 있다. 반도체 재료와 장치에서 발생하는 잡음은 다음 세가지로 나누어 지는 것이 보통이다.

- ① 열 잡음 (thermal noise)
- ② 산탄 잡음 (shot noise)
- ③  $\frac{1}{f}$  잡음 (혹은 flicker 잡음)

열 잡음은 재료와 장치의 물리적인 작용 (physical process) 인 전류 매개체 (carrier)의 random motion 에 의해 생기기 때문에 열 잡음이라고 불리는 반면, 산탄 잡음은 재료와 장치의 물리적인 작용과는 관계 없는 하나의 수학적인 모델의 이름이다. 즉  $t_n$  이 밀도가  $\lambda$  인 random point 이고,  $h_n(t - t_n)$  이 시간  $t$  의 함수일때, random variable  $Y(t)$  가 독립된 event 인  $h_n(t - t_n)$  의 합인

$$Y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_n(t - t_n) \dots\dots\dots (1)$$

으로 표시 될때 생기는 맥동현상을 산탄 잡음이라 한다. 예를 들면 2극진공관의 음극에서 전자가 방출되는 것을 독립된 random event의 연속(합)으로 볼 수 있으므로 포화상태에서 동작하는 2극진공관의 잡음은 산탄 잡음이다.  $\frac{1}{f}$

잡음이란 단순히 잡음의 Spectral intensity 의 주파수  $f$  에 따른 변화가  $1/f^\alpha$  ( $\alpha$ 는 주로  $1 \leq \alpha \leq 3$ 의 크기를 갖는다)의 모양을 가질 때 붙여 지는 잡음의 이름이다.

위에서 보았듯이 반도체 재료와 장치에서 발생하는 대표적인 세가지의 잡음이 어떤 주어진 기준에 의해서 분류된 것이 아님을 알 수 있다. 그러면 반도체에서의 좀더 근본적인 잡음 원인을 알아 보고 이 근본 원인으로 부터 위의 세가지 잡음 현상을 설명해 보자.

반도체 재료와 장치에서 잡음을 발생시키는 근본적인 원인은 다음 두 가지로 보면 될 것 같다. 하나는 diffusion noise source 이고 다른 하나는 generation-recombination (이하  $g-r$ )

noise source 이다. 이 두 가지 noise source 는 맥동현상을 일으키는 반도체내의 물리적인 작용 (physical process) 에 따라서 이름이 붙여진 것으로서, 맥동현상을 분석하는 방법의 하나인 "Langevin method" (참고문헌 3, 4 참조) 에서 사용되는 현재까지 알려져 있는 가장 기본적인 noise source 이다.

전류를 옮겨 주는 전자와 hole 은 항상 random motion (intra-band scattering 에 의해서 생김)을 하고 있음으로 (이 random motion 이 diffusion 의 원인이 된다) velocity fluctuation 을 갖고 있다. 이와 같이 전류 매개체 (carrier) 의 random motion 에 의해서 생기는 잡음을 diffusion noise 라 한다. 또 반도체 내에서 일어나는 전자나 hole 의 생성-재결합 ( $g-r$ ) 현상과 capture-emission 과정 (이를 interband scattering 이라 부른다)도 하나의 random process 로서 이에 의해서 carrier density 의 맥동이 생기게 된다. 이와 같이 random 하게 일어나는  $g-r$  과정이나 capture-emission 과정에 의해서 생기는 잡음을  $g-r$  noise 라 한다.

random motion 에 의해서 diffusion rate의 맥동이 생기면 부분적으로 carrier density 의

맥동이 생기게 되어 charge neutrality 가 깨어져서 기전력이 발생하므로 열적인 평형상태에서도 시료 양단에 잡음 전압이 생기게 된다. 재료와 장치가 열적평형 상태에 있을 때 발생하는 열 잡음은 바로 diffusion noise 가 원인이 되어 발생한다. 반면 random 하게 일어나는 g-r 과정에 의해서 생기는 carrier density 의 맥동은 charge neutrality 를 깨지 않고 단순히 시료의 저항 R 에  $\delta R(t)$  의 맥동을 생기게 하므로 이를 측정하려면 dc 전류 I 를 이 시료에 흘려서 맥동하는 전압  $\delta V(t) = I\delta R(t)$  를 만들어서 측정한다. 균질의 반도체에 dc 전류를 흘리면 diffusion noise source 에 의한 열 잡음과 g-r noise source 에 의한 g-r 잡음이 함께 나타나지만 이들 두 잡음의 주파수 특성이 다르기 때문에 측정 결과에서 이 두 잡음을 분리할 수 있다.

p-n junction diode에서는 이 두 가지 noise source 가 diode라는 특수 제약을 받으면서 diode 양단에 맥동하는 전류를 만들어 줄 때, 이 맥동 전류가 산탄 잡음의 형식을 갖기 때문에 (구체적인 증명은 참고 문헌 3, 4 참조) p-n diode 에서의 잡음도 2극 진공관에서와 마찬가지로 산탄 잡음이 주된 잡음이다.<sup>1)</sup> 잡음은 외부에서 dc 전압이 가해질 때 발생하는 g-r noise 가 반도체의 표면 근처에서 수 많은 surface states 에 의해 modulation 되어 나타나는 현상으로 설명되기도 하고 (McWhorter 의 모델), 표면이나 grain boundary에서와 같이 recombination center 가 많은 곳에서 interband scattering이 intraband scattering보다 우세하여 이로 인하여 생기는 전자나 hole의 mobility의 맥동에 의해서 발생하는 것으로 설명하는 등 여러가지 이론이 나와 있으나 아직 확립된 이론은 없다. 어쨌든  $1/f$ 잡음은 g-r noise source 가 근본 원인인 것임에는 틀림이 없

는 것 같다. 특히  $1/f$ 잡음은 잡음의 spectral intensity 의 주파수 특성에서 보듯이 저주파 영역에서 재료나 장치에 큰 영향을 미치며, transistor 등에서 저잡음 transistor 란  $1/f$  잡음을 최대한 줄인 transistor 를 의미한다.

### 3. 잡음 등가회로 및 잡음의 크기 표시 방법

반도체 재료나 장치에서 발생하는 자발적인 맥동현상 (spontaneous fluctuations) 은 회로적으로 독립된 전원으로 취급될 수 있다. 재료나 장치에서 발생하는 잡음의 크기는 소신호로 취급될 만큼 충분히 작기 때문에, 반도체 장치에서는 회로정리 (network theorem)을 이용하여 잡음이 없는 소신호 등가회로상에 잡음의 영향을 나타내는 독립전원을 따로 넣어서 소신호 잡음 등가회로를 그릴 수 있다. 구체적으로 단자가 둘인 반도체소자에서는 그림 1 (a)와 1 (b)에서와 같이 Thevenin 과 Norton 의 정리를 이용하여 잡음이 없는 소신호 등가회로에 잡음 전원으로 직렬 전압 전원과 병렬 전류 전원을 넣어서 잡음 등가회로를 그릴 수 있다.

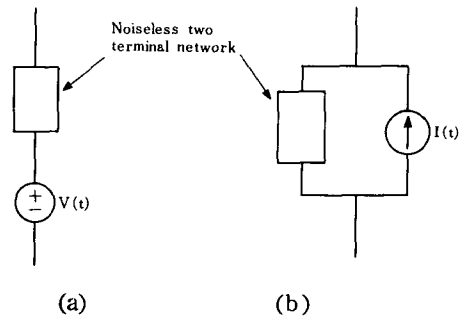


그림 1. Noise equivalent circuits for a two terminal network.

4 단자망에서는 잡음이 없는 소신호 등가회로의 input과 output 에 그림 2 (a) 에서와 같이 두개의 잡음 전류 전원  $I_1(t), I_2(t)$  를 넣어서 잡음의 영향을 나타낼 수도 있으며, 증폭등기에서는 많은 경우에 그림 2 (b)에서와 같이 잡음 전

원을 모두 input 쪽으로 옮겨서 잡음 등가회로를 그리기도 한다.

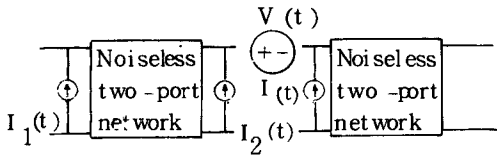


그림 2. Noise equivalent circuits for two-port networks.

맥동하는 전류와 전압을  $X(t)$ 라 할 때, random variable 인  $X(t)$ 는 통계적으로 취급될 수밖에 없다. 일반적으로  $X(t)$ 의 평균값  $\bar{X}$ 가 0이 되는 경우가 많으므로  $X(t)$ 를 대표하는 가장 중요한 양은  $X(t)$ 의 mean square value  $\overline{X^2}$  이거나 혹은 variance  $\overline{(X-\bar{X})^2}$ 이다. Mean square value 와 동등하게 중요한 양으로  $X(t)$ 의 spectral intensity  $S_X(f)$ 가 있다. 맥동하는 emf  $V(t)$ 의 spectral intensity를  $S_V(f)$ 라 할 때 작은 주파수 구간  $\Delta f$ 에서 이 맥동하는 emf  $V(t)$ 을 rms 값이  $\sqrt{S_V(f)\Delta f}$ 인 잡음전압 전원으로 표시해도  $\Delta f$  구간에서의 noise power 에는 변동이 없다. 마찬가지로 맥동하는 전류 전원  $I(t)$ 의 spectral intensity를  $S_I(f)$ 라 하면 작은 주파수 구간  $\Delta f$ 에서  $I(t)$ 를 rms 값이  $\sqrt{S_I(f)\Delta f}$ 인 잡음 전류 전원으로 바꾸어 놓을 수 있다.

예 1). 저항이  $R$ 인 회로 소자의 열적 평형에서의 잡음 등가 회로는 그림 3 (a)와 3 (b)로 나타낼 수 있다. 이때 맥동하는 전압  $V(t)$ 의 spectral intensity  $S_V(f)$ 와 맥동하는 전류  $I(t)$ 의 spectral intensity  $S_I(f)$ 는 Nyquist 정리 (참고문헌 3, 4 참조)에 의하면

$$S_V(f) = 4kTR \dots\dots\dots (2)$$

$$S_I(f) = 4kT \frac{1}{R} \dots\dots\dots (3)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서  $k$ 는 Boltzmann 상수이고  $T$ 는 절대 온도이다. 식 (2)와 (3)에서와 같이 주파수에 무관한 spectral intensity를 갖

는 잡음을 white noise 라 부른다. 그림 3 (a)와 3 (b)에서 잡음의 크기는 작은 주파수 구간  $\Delta f$ 에서 전압과 전류의 rms 값으로 표시되어 있다. 구체적으로  $R = 1K\Omega$ ,  $T = 300K$ ,  $\Delta f = 1Hz$  이면 맥동하는 전압 전원의 rms 값은  $4nV$ 가 됨을 알 수 있다.

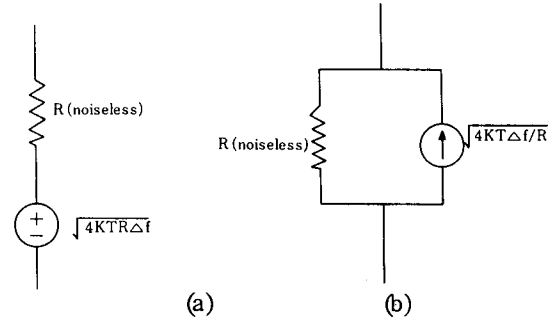


그림 3. Noise equivalent circuits for thermal noise.

예 2) 포화상태에서 동작하는 2극 진공관에 dc 전류  $I_d$ 가 흐르고 있을 때 발생하는 잡음은 앞에서 보았듯이 산탄 잡음으로 취급될 수 있으므로, Schottky 정리 (참고 문헌 3, 4 참조)에 의하면 Norton의 정리를 이용한 잡음 등가회로에서 잡음 전류 전원  $I(t)$ 의 spectral intensity  $S_I(f)$ 는

$$S_I(f) = 2qI_d \dots\dots\dots (4)$$

로 된다. 여기서  $q$ 는 전자가 갖는 전하의 크기이다. 이를 등가 회로로 그린 것이 그림 4이다.

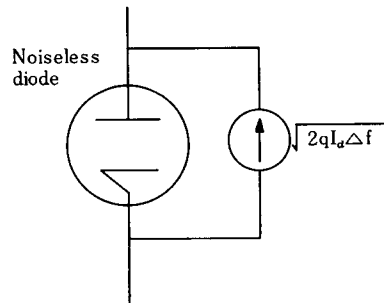


그림 4. Noise equivalent circuit for a vacuum diode.

예 1)과 예 2)의 결과를 일반 2 단자망에서의

잡음을 나타내는데 많이 사용한다. 즉 온도 T에서 동작하는 2 단자망에서 Thevenin의 정리를 이용하여 잡음 등가 회로인 그림 1a)를 그렸을 때, 잡음 전압 V(t)의 spectral intensity  $S_v(f)$ 를

$$S_v(f) = 4kTR_n \dots\dots\dots (5)$$

로 놓고, 이  $R_n$ 을 온도 T에서의 이 2 단자망의 등가 잡음 저항 (equivalent noise resistance)이라 부른다. 또 온도 T에서 동작하는 2 단자망에서 Norton의 정리를 이용하여 그런 잡음 등가 회로 (b)에서 잡음 전류  $i(t)$ 의 spectral intensity  $S_i(f)$ 를

$$S_i(f) = 2qI_{eg} \dots\dots\dots (6)$$

로 놓았을 때,  $I_{eg}$ 를 이 2 단자망의 등가 잡음 전류 (equivalent noise current)라 부른다.

끝으로 4 단자망 (two port network)에서 잡음의 영향을 나타내는 중요한 양인 noise figure에 대해서 이야기해 보자.

그림 5는 그림 2b)와 같은 증폭기의 소신호 잡음 등가 회로에 signal source  $V_s$ , source 저항  $R_s$ 와 signal쪽에서 발생하는 잡음을 나타내는 잡음 전원  $E_t$ 가 연결되어 있다. IEEE standard에 따르면 그림 5에 있는 증폭기의 noise factor(혹은 noise figure) F는 bandwidth가 1 Hz인 주파수 구간에서 전체 available output noise power와 증폭기의 input에 연결된 signal source에서 발생하는 잡음인  $E_t$ 에 의

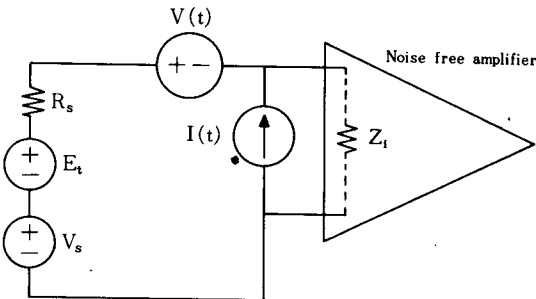


그림 5. Amplifier noise model and signal source.

한 output noise power와의 비(ratio)로서 정의되며, 식으로 쓰면

$$F = \frac{\text{total available output noise power}}{\text{source 저항의 잡음 전압 } E_t \text{에 의해 생기는 output noise power}} \dots\dots\dots (7)$$

로 표시된다. 식(7)을 변형하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \frac{\text{input signal - to -noise ratio}}{\text{output signal -to -noise ratio}} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \dots\dots\dots (8)$$

Noise factor F는 power의 비이므로 보통 dB로 표시한다. 즉 noise figure NF는

$$NF = 10 \log F \text{ [dB]} \dots\dots\dots (9)$$

가 된다. 식(7)과(9)에서 보듯이  $NF \text{ [dB]} \geq 0$ 이고, 증폭기에서 발생하는 잡음이 없으면  $NF \text{ [dB]} = 0$ 이 됨을 알 수 있다.

실제 문제에서는 시스템의 output에서의 signal-to-noise ratio를 크게 하는 것이 가장 중요하므로, 식(8)에 의하면 noise figure가 작은 시스템일수록 좋은 시스템이 됨을 알 수 있다. 즉 시스템을 설계할 때 F를 될 수 있는 대로 작게 하도록 노력해야 한다.

#### 4. 일반 참고 문헌

항목마다 구체적인 참고문헌을 나열하는 것 보다는 반도체 재료와 장치에서 발생하는 잡음에 관한 책이나, 주요 논문을 모은 논문집을 참고 서적으로 적는 것이 나을 것 같아서 아래의 일반적인 참고 문헌을 적어 본다. 특히 참고 문헌 [1]에는 잡음에 관한 2천편 이상의 참고 문헌의 목록이 수록되어 있다.

1. M.S. Gupta, "Electrical Noise : Fundamentals and Sources", (IEEE, New York, 1977).
2. A. Van der Ziel, "Fluctuation pheno -

- mena in semiconductors”, (Butterworths, London, 1959).
3. A. Van der Ziel, “Noise :Sources, Characterization, Measurement”, (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1970).
  4. A. Van der Ziel, “Noise in Measurements”, (John Wiley, New York, 1976).
  5. N. Wax, “Selected Papers in Noise and Stochastic Process”, (Dover, New York, 1954).
  6. C. Motchenbacher and F. C. Fitchen, “Low -Noise Electronic Design”, (John Wiley, New York, 1973).
  7. A. R. Bennett, “Electrical Noise”, (McGraw-Hill, New York, 1960).
  8. W. A. Riefelder, “Design of Low-noise Input Circuits”, (Hayden Book, New York, 1964).
  9. R. A. King, “Electrical Noise”, (Chapman and Hall, London, 1966).

• \* 著 者 紹 介 •

1943年 12月 9日生(本學會, 正會員)

1966年 서울大學校 電子工學科卒業

1969年 Minnesota 大學校 電子工學科

1971年 Minnesota 大學校 工學部卒業(工學博士)

大學院에서는 “P-n junction 을 갖고 있는 반도체 장치들에서의 잡음에 관한 이론 연구 및 실험연구” 를 하였음.

1976年 高麗大學校 電子科 助教授

1976年 ~ 1979年 現在 서울大學校 電子科 助教授

