

SBGFET를 이용한

마이크로波的 能動裝置 (1)

朴 漢 奎

延世大學校 電子工學科教授, 工博

1. 序 論

1970年代의 마이크로파 能動裝置에 크게 각광을 받고 있는 MESFET (Metal-Semiconductor Field Effect Transistor 또는 Schottky Barrier Gate Field Effect Transistor)는 衛星通信의 핵심적인 역할을 하고 있고 근래에는 半導體素子の 응용에서 論理回路等 매우 빠른 動作速度를 요구하고 있을 때 가장 적합한 素子로 등장하였다. 이러한 MESFET의 歷史的 高찰을 보면 다음과 같다.

1948年 雙極形트랜지스터가 紹介된 이래 實用的인 利得과 雜音指數를 갖는 마이크로波 트랜지스터가 出現하기까지는 20年이라는 時間이 경과되어야만 했다. 1952年 美國 Bell 研究所에서 Shockley¹⁾에 의한 JFET에 基礎를 두며 1955年 Dacey, Ross에 의하여 FET와 雙極形트랜지스터의 物理的 差異의 具現에 따라 3年後인 1958年 Sah와 Moll이 理論을 展開하여 1960년에 MOSFET의 發明에 이르렀으며 1965년에 6dB 以下の 雜音指數를 갖는 Ge 트랜지스터가 L-band (1~2.6GHz)에 使用되었고 1968년에는 Engelbrecht와 Kurokawa²⁾에 의해서 開發된 balanced 트랜지스터 增幅器가 S-band 및

C-band 마이크로波 通信 link에 使用되었다. 계속적인 發展으로 雙極形트랜지스터에서 低雜音性能和 大電力을 얻을 수 있었으며 周波數도 X-band에 이르게 되었다. Archer³⁾에 의하면 Si 半도체 物質을 使用한 雙極形 npn 트랜지스터가 8GHz에 利用됨을 알 수 있다. 이러한 雙極形트랜지스터의 發展추세에 比하여 MESFET에 對해서는 1967年 Hopper⁴⁾와 Cohrer에 의하여 게이트에 金屬을 形成시킨 MESFET (또는 SBGFET)의 製造를 시사하였고, 1年後인 1968년에 Mead⁵⁾에 의하여 半導體物質 Si와 GaAs를 比較하여 GaAs가 Si보다 3倍以上으로 電子移動도가 높다는 點을 착안하여 처음으로 모형을 提案하였으며, 스위스 IBM 研究所에서 MESFET의 製造 成功에 이르렀다. 1971년에 이르러 매우 급성장하였으며 現在의 MESFET는 4GHz 以上の 周波數帶에서 雙極形트랜지스터에 比하여 높은 利得, 높은 電力增幅效率 그리고 낮은 雜音指數를 나타낸다. 特히 FET는 構造上으로도 micron ($\mu:10^{-6}m$) 以下の 規模까지 縮소가 可能하며 半絶緣基板上의 回路들은 monolithic 集積으로 낮은 寄生容量과 적은 相互連結損失을 나타내며 높은 packing 密度的 素子 絶緣을 할 수 있다.

MESFET는 構造的으로 電子의 周行時間이

SBGFET를 이용한 마이크로波的 能動裝置(1)

매우 빠르므로 매우 높은 動作 速度를 요구하는 論理回路素子로 使用될 수 있으며, digital 通信에 適用하여 每秒當 giga bit의 比率로 처리할 수 있는 能力이 있다. 게이트형태를 바꾸어 二重 게이트 MESFET로 할 경우, 多重 PSK 通信의 變調, 複調의 素子 등으로써 使用할 수 있으며, 특히 MESFET의 動作速度가 매우 빠름을 利用한 Switch time multiplexing, 계수기 설계 등에 使用되고 있어 MESFET를 要求하는 分野가 더욱 增大됨을 豫見할 수 있고, 이러한 MESFET를 사용한 裝置 등은 무게, 크기 效率 등의 利點으로 電波天文學, 長距離通信, 衛星通信 및 自動電話交換裝置 등에 能率의으로 使用되고 있다. 工業的으로는 마이크로波裝置를 利用하는 熱接着機 熔鑄爐의 溶解施設 등 많은 使用도를 알 수 있고 家庭的으로는 마이크로波 oven 등에 이미 製造되어 널리 使用되고 있어 應用分野가 無窮하다. 이와 같이 使用도가 많은 마이크로波 裝置에서 核心이 되는 MESFET에 對하여 本 論考에서는 MESFET의 半導體物質의 比較 特性和 動作原理를 記述하고 最近 MESFET의 製造機術上的 어려운 점을 피하고

效率를 높이기 위하여 MESFET의 게이트形態를 變形시킨 素子들의 特徵과 利用도를 論述하고 小信號 等價回路 해석, 雜音, 周波數 制限을 제시한 後 끝으로 增幅器의 設計에 對하여 考察 하기로 하겠다.

2. MESFET의 특성과 구조

2.1 MESFET의 物理的 特性

一般的인 MESFET의 構造와 性能은 그림 1과 表 1에 各各 나타나 있다.

마이크로波 半導體素子인 MESFET의 基板에 使用하는 物質(GaAs, InP 등)은 電子의 移動度가 正孔의 移動度보다 매우 높기 때문에 마이크로波 領域에서는 n形단이 使用되며, 그림 2은 GaAs MESFET의 斷面도를 보여준다.

基板은 GaAs에 Cr을 Doping하여 Cr이 GaAs에 억셉터로 作用하며, 抵抗率(resistivity)이 $10^8 \Omega\text{-cm}$ 인 半絶緣(semi-insulate)狀態로 소우스와 드레인接觸(contact) 사이에서 isolating 作用을 하며, 게이트 접합점의 큰 寄生容量은 접합점을 基板 위에 形成시킴으로써 除去할 수

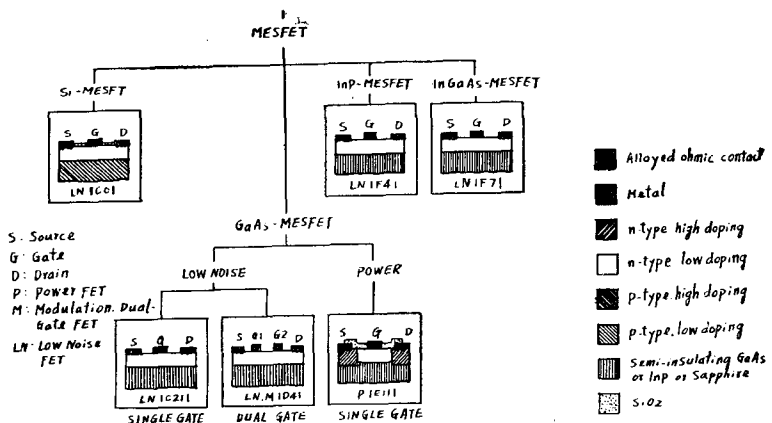


그림 1. MESFET의 種類

표 1. MESFET 종류에 대한 특성 비교

형 태	반도체	단일/이중게이트	통로(channel)			주파수영역 (GHz)	출력 (W)	전력득이 (dB)	소신호득이 (dB)	잡음수 (dB)	최대가용이득 (dB)
			형태	길이 (μm)	폭 (mm)						
MESFET											
Silicon	Si	SG	n	0.5		10				5.8	5.9
LN SG GaAs	GaAs	SG	n	0.5		10				2.7	13
LN SG GaAs	GaAs	SG	n	1		10				3.2	10
LN DG GaAs	GaAs	DG	n	1		10				4.0	18
P SG GaAs	GaAs	SG	n	1.5		8	2.2	3.2	4.2		
P SG GaAs	GaAs	SG	n	1.2	5.2	22	0.14	4.8	5.6		
LN SG InP	InP	SG	n	1	0.6	10				4.7	7.8
LN SG In GaAs	In GaAs	SG	n	1		7				5.7	18

LN-저잡음증폭 P-전력증폭 SG-단일게이트 DG-이중게이트

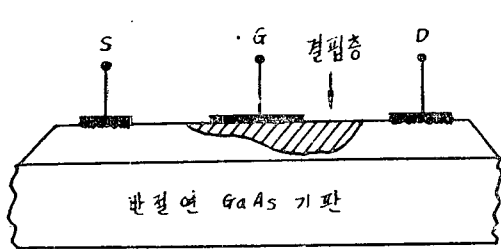


그림 2. MESFET의 斷面圖

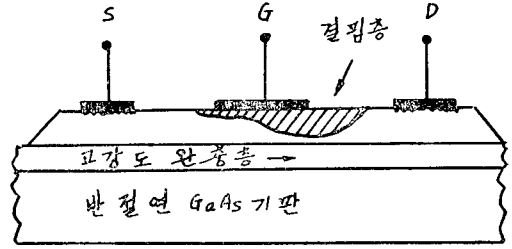


그림 3. Buffer 層을 形成시킨 MESFET의 斷面圖

있다.
 活性層(active layer)은 不純物濃도가 $10^{15} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 이며, 두께가 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ($2000\text{\AA} \sim 4000\text{\AA}$)로 매우 얇은 層으로 게이트길이의 $\frac{1}{3}$ 정도에 이르며 epitaxial 成長, 또는 ion implantation 製造技法으로 基板 위에 形成한다. 特別 最近에는 高周波動作에서 드레인과 基板 사이에 容量이 存在하여 基板의 抵抗性和 直列로 傳導信號行路 (conductive signal path)를 形成하며, 이에 依한 高周波에서 利得을 減少시키며, 雜音を 나타내는데, 이를 防止하기 위하여, 高感度완충층 (high sensitivity buffer layer)을 基板과 活性層(active layer, 또는 epitaxial 層이라함) 사이에 그림 3과 같이 成長시키고, 可能的 活性 n 層

內에 매우 높은 doping ($2.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)을 하며 소우스와 드레인의 電極은 接觸抵抗을 적게 하기 위하여 Au-Ge의 膜(film)을 350°C 에서 소우스와 드레인에 抵抗性接觸(ohmic contact)을 시킨다. 한편 게이트에서 發生하는 強한 容量性을 減少시키기 위하여 Al을 蒸發作用에 의하여 "MESA"形으로 接續하며, 接續面積이 작아 接續容量이 減少되어 마이크로波 能動素子로 容易하다.

이와 같이 形成된 GaAs MESFET의 動作은 電流가 드레인에서 소우스로 흐르며, 逆바이어스를 걸어줄 때 게이트아래에 形成하는 缺乏層의 깊이에 따라 電流가 制御된다. 한편 GaAs MESFET와 雙極形트랜스터를 比較할 때 雙極

形트랜지스터는 周波數 限界點이 GaAs, MESFET에 比하여 매우 낮음을 識見할 수 있다(그림 4 참조). GaAs MESFET는 게이트의 넓이에 따라 Si MESFET보다 또 雙極形트랜지스터보다 매우 높은 周波數領域(80GHz 以上)에 이르는 f_{max} 를 나타내며(그림 5), 이 f_{max} 는 物理的 特性에 의하여 게이트 길이에 反比例하고, 移動도에 比例한다. 즉,

$$f_{max} = \frac{qNd\mu a^2}{\pi L^2 \epsilon_s}$$

이 된다. 여기에서 L 은 게이트의 길이를 나타

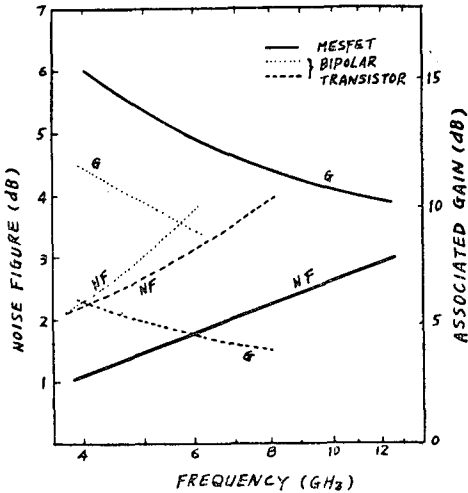


그림 4. 雙極形트랜지스터와 MESFET의 雜音指數와 利得의 比較

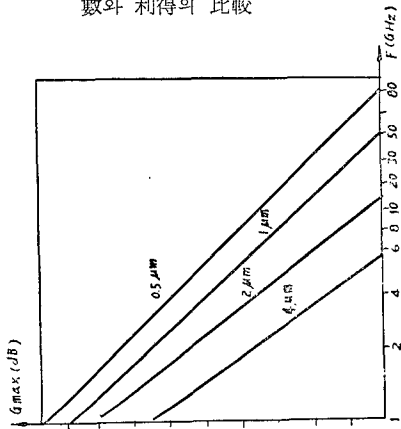


그림 5. 게이트길이에 대한 최대주파수와 이득

내며, a 는 活性層(active layer 또는 epitaxial layer)의 두께를 意味한다.

이와 같이 物理的 特性을 나타내는 MESFET에 대하여 1969年 Middelhek⁶⁾는 投射 masking에 의한 方法으로 $1\mu\text{m}$ 의 게이트 길이를 갖는 Si MESFET를 實現시켰으며, 이 새로운 MESFET는 從前의 FET 最大發振周波數 및 雙極形트랜지스터의 f_{max} 에 比하여 훨씬 높은 12GHz의 最大發振周波數를 보여 주었고 뒤이어 開發된 $1\mu\text{m}$ 의 게이트길이를 갖는 GaAs MESFET는 50GHz의 f_{max} 와 可用利得을 18GHz까지 可能하게 하였다.

1972年 Liechti⁷⁾는 10GHz에서 6.6dB의 綜合利得과 3.5dB의 雜音指數를 갖는 GaAs MESFET를 報告했고, Baechtold⁸⁾는 carrier의 飽和速度를 取한 測定과 잘 附合되며 inter vally 散亂을 說明할 수 있는 雜音 model을 提案했다. 지금까지 報告된 周波數에 對한 가장 낮은 雜音指數와 綜合利得이 그림 4에 나타나 있다.

2.2 MESFET의 半導體 物質

MESFET의 基板(substrate)으로 使用하는 物質 중 GaAs와 Ge, Si의 半導體 特性을 不純物 濃度 $N_A=10^{16}\sim 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 에서 比較하였을 때 (表 2) GaAs와 電子移動도가 $6,000\text{cm}^2/\text{sec}$ 로 Si의 電子移動도보다 5倍 정도의 큰 移動도와 2倍의 最大 drift 速度를 가짐으로써 寄生抵抗은 매우 작게 되며 傳達콘덕턴스는 커지게 됨을 알 수 있다. 따라서 강한 電界 領域에서 電子의 遷移時間은 1.5倍 정도가 된다.

한편 마이크로波 MESFET에서 가장 크게 利用되고 있는 化合物 半導體 중 GaAs, InP를 比較할 때 半導體 物質의 特性은 表 3과 같다. 특히 電子의 最大 drift 速度가 InP가 GaAs보다

표 2

Ge, Si, GaAs의 특성비교

Nd/cm ⁻³	Ge			Si			GaAs		
	이 동 도	포화전압	접촉전압	이 동 도	포화전압	접촉전압	이 동 도	포화전압	접촉전압
10 ¹⁶	3,200	0.65	25	1,200	0.9	55	6,000	1.2	70
10 ¹⁷	2,000	× 10 ⁷	5	700	× 10 ⁷	12	4,000	× 10 ⁷	16

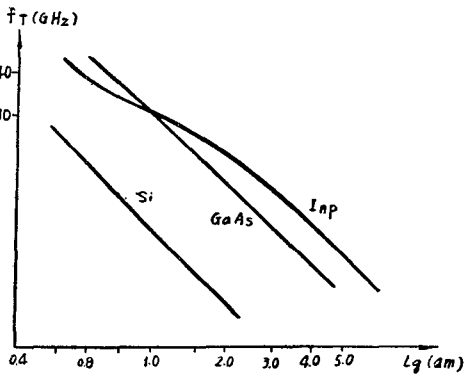


그림 6. GaAs, InP物質의 電界 drift 速度

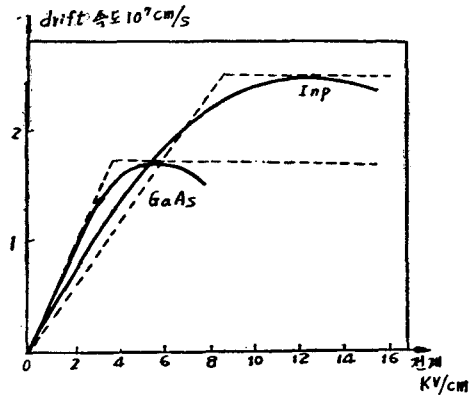


그림 7. 半導體物質 Si, GaAs, InP의 게이트 길이 대 f_T

표 3 Nd=1.0×10¹⁷cm⁻³, 게이트길이=1μm, 300°K에서 GaAs와 InP의 특성 비교

	GaAs	InP
쇼트기장벽높이	0.85eV	0.50eV
유전상수	13.13	12.35
접촉전압(V _B)	0.80V	0.45V
최대드리프트속도(V _H)	1.7×10 ⁷ cm/s	2.5×10 ⁷ cm/s
이동도	4.5×10 ³ cm ² /vs	2.88×10 ³ cm ² /vs
포화상태에서의드레인전압	0.36V	0.67V
포화상태에서의드레인전류	95.0mA	160mA
포화상태에서의전달콘덕턴스	76.0mmho	108.0mmho
포화상태에서의게이트-소우스간의용량	0.50PF	0.55PF
차단주파수(f _T)	25.0GHz	32GHz
f _T (InP)/f _T (GaAs)	1.3	

약 1.5배 정도 빠름을 알 수 있다(그림 6 참조).

한편 半導體 物質에서 電子는 時間에 對하여 從屬의으로 作用하여, 電界가 매우 높아 臨界 電界에 到達하면 수 μm의 走行距離를 몇 pico-second(10⁻¹²) 동안에 遲速하는 速度 overshoot 現象이 나타낸다.

특히 InP 또는 GaAs와 같은 化合物 半導體 에서는 이 速度 overshoot 現象이 Si 物質에 비하여 매우 重要的 役割을 하며, 이러한 關係는 Monte Carlo의 方法으로 計算된다(그림 7참조).

마이크로波 半導體 能動素子로 InP MESFET와 GaAs MESFET의 通路에서 速度 overshoot

에 의한 Si의 電界速度는 단조롭게 나타남을 알 수 있다. 특히 GaAs와 InP의 比較에서는 좁은 통로의 MESFET에 最初 pinch-off 電壓으로 높은 電壓이 存在하며 게이트 아래 存在하는 缺乏層은 電壓이 加해질 때 垂直, 水平으로 擴充되므로 통로의 두께가 커질 때에는 實効게이트의 길이가 커지는 영향을 考慮하여야 한다. 그러므로 InP와 GaAs MESFET에서는 적어도 $5\mu\text{m}$ 이하의 좁은 통로에서의 遷移効果는 이들 物質의 特性을 計算하는 데 매우 重要한 역할을 하고 있으며, 臨界電界에 對하여 走行時間의 關係를 基盤으로 하여 $1\mu\text{m}$ 이하의 實効 게이트길이에서는 GaAs MESFET의 f_T 가 InP MESFET의 f_T 보다 높고 $2\mu\text{m}$ 이상 $10\mu\text{m}$ 사이의 實効 게이트길이에 對한 f_T 는 InP MESFET가 GaAs MESFET보다 우수하다.

Reference

- 1) W. Schockley, "A Unipolar Field-Effect Transistors", Proc. IRE. pp 1365-1376 Nov. 1952.
- 2) R. Engelbrecht and K. Kurokawa, "A wide-

- band Low-noise L-band balanced transistor amplifier", Proc. IEEE. Vol. 53. pp 237-247. March. 1965
- 3) J. Archer, "Low-noise implanted-base microwave transistors", Solid-State Electron, Vol. 17, pp 387-393. April. 1974
- 4) W. Hopper, "Microwave Field-Effect transistors", Proc. IEEE. Vol. 55. July 1967
- 5) G.A. Mead, "Schottky-Barrier FET", Proc. IEEE. Vol 54. No2, pp.307. Feb. 1968
- 6) S. Middelhoek, "Metalization processes in fabrication of Schottky-Barrier FET'S", IBM. J. Res. Develop. Vol 14, pp 148-151, March. 1970
- 7) C. Liechti, E. Gowen and J. Cohen, "GaAs microwave Schottky-Gate FET", Int. Solid-State Circuits Conference, Dig. Tech, Paper, pp 158-159. 1972
- 8) W. Bachtold, "Noise behavior of Schottky Barrier Gate Field-Effect Transistors at microwave frequencies", IEEE Tran, Electron Devices, Vol ED-18 pp.97-104, Feb. 1971
- 9) B. Himsworth, "Atwo-dimensional analysis of InP junction Field Effect Transistors with long and short channels." Solid State Electron. Vol. 15. pp 1353-1361, Dec. 1972.