

# 마이크로웨이브 工學의 現況과 展望

廉 京 煥\*, 羅 正 雄\*\*

韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科 博士課程\*, 教授(工博)\*\*

## I. 序 論

1864년 James C. Maxwell의 전자파 예언과, Hertz의 전자파 실증 이후, microwave는 이것을 바탕으로 통신<sup>1)</sup>, 방위전자산업(defense electronics)<sup>2)</sup>, 의학<sup>3)</sup>, 천문학(radio astronomy)<sup>4)</sup>, 전자파 가열(microwave heating)<sup>5)</sup> 등 여러 분야에 응용되어 꾸준한 발전을 거듭하여 왔다.

특히 2 차대전후 초고주파 반도체소자의 개발과, 박판 전송선(planar transmission line)의 해석은, 이것을 이용함으로써 기존의 microwave 소자들을 값싸고, 가볍고, 작게 만드는 것을 가능하게 했으며, 이것은 전후 축적된 rocket 기술과 우주 과학 기술에 힘입어 개발되어온 위성통신 service 방식에 큰 전환점을 마련하고 있다. 즉 그 동안 위성(satellite)에 사용되었던 TWT(traveling wave tube)를 최근 GaAs FET power amplifier로 대체했고, 또한 초기 지구국(earth station)에 사용되었던 MASER<sup>6)</sup>는 이와 거의 비슷한 잡음지수를 갖는 parametric amplifier로 대체되었다.

이와 더불어 값싸고 잡음지수(noise figure)가 낮은 GaAs MESFET 증폭기의 제작은 통신위성 신호의 수신을 각 개인의 가정에서 할 수 있을 정도로 수신기의 값을 내려 주고 있다. 이에 따라 위성 출력이 통신위성에 비해 높은 직접 위성 방송을 계획하고 있으며 대중적인 service의 개선을 서두르고 있다.

표 1은 각국의 위성개발계획을 요약해서 나타내고 있다.<sup>17)</sup>

또한 성숙된 GaAs MESFET 제작기술은 이것을 기본 소자로하여, 주파수 1~10GHz의 clock에 동작하는 high speed digital microwave IC를 MSI 정도의 수준까지 집적화하는데 성공하여 giga bit signal processing의 가능성을 엿보이고 있다.<sup>18)</sup>

표 1. 각국의 위성개발 계획

Country	Organization in charge	Starting date	Project	Contents
U.S.A.	NASA	1966	ATS (Application Technology Satellite)	Basic technology and applications on satellite systems, navigation, meteorology and communication, and broadcasting satellite (ATS-6)
Canada	The Royal Society of Canada	1976-01	HERMES (Communications Technology Satellite CTS)	Communication experiment (14/12 GHz), TV diagnosis, TV education, regional communications service
Japan	Science and Technology Agency, National Space Development Agency, Ministry of Posts and Telecommunications	1977-12	CS (Communication Satellite)	Communication application experiment
		1978-02	BSE (Broadcasting Satellite)	Satellite broadcasting experiment
Europe	European Space Agency (ESA)	1978-05	OTS (Orbit Test Satellite) ECS (European Communication Satellite)	Telephone and TV transmission an experiments, MARECS maritime satellite communications

## II. 本 論

### 1. Analog Microwave IC 개발과 현황

기판(substrate) 위에 lithography, screening 등의 기술을 사용하여 얻어진 수동소자와, 반도체 wafer 위에 process를 거쳐 얻어진 능동소자(active element)를 wire bonding, die attach 등의 기술로 결합시

키는 hybrid IC 기술이 있으며, 최근 단위 생산량이 커짐에 대비해서 반도체 wafer 위에 필요한 저항, capacitor, inductor 등과 능동소자들을 ion implantation, epitaxy 등의 기술로 wire bonding이나 dieattach 과정없이 직접 결합시키는 monolithic IC의 기술이 실현되고 있다.

이러한 IC 제작에 있어서 다른 저주파 IC에 비해 특이한 점은, 고주파 대역에서 잡음지수(noise figure)의 개선을 위해 능동소자를 정합시키는데 inductor가 필요하며, 또한 GaAs process 기술이 Si에 비해 아직 잘 개발되어 있지 않아서, 저주파 IC에 비해 yield가 작고, 특정한 active element 여러개로 다른 active element를 대체해서 사용하는 것은 silicon에 비해 wafer size가 작은 GaAs에서는 문제를 야기시키며, 적절하지 않다. 그리고 가장 문제시 되었던 것은 저주파 IC와 같이 수요가 크지 않으므로 monolithic IC보다는 chip이나 package된 반도체 능동소자를 process된 기판위에 붙이는 hybrid 기술이 많이 이용되고 있다.

Hybrid microwave integrated circuit(MIC) 기술의 시작은 1964년 미국에서 radar에 응용하기 위해, Air Force Avionics의 지원으로 Texas Instruments에서 수행한 MERA(Mocular Electronics for Radar Applications) project에서 시작되었고, 이때 만들어진 MERA module은 그림 1과 같으며<sup>11)</sup> 이것은 S-band amplifier, 2개의 phase shifter, 2개의 4채배 multiplier, pulsed amplifier, T/R switch, mixer, 500MHz pre-amplifier로 구성되어 있다. 당시 이것의 제작은 혁신적이었고, 그뒤 기업체들은 일상적으로 microwave IC 제작에 이 hybrid 기술을 사용해와서 현재에는

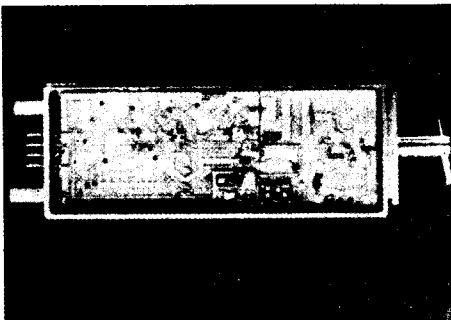


그림 1. MERA module의 사진

거의 성숙한 기술이 되어 있다.

1970년대 후반부터 직접 방출형(DBS)의 사용 가

능성과 phased array antenna의 개발로, 동일한 microwave circuit의 대량생산이 필요하여졌으며, performance와 또 생산line에서의 노약적인 wire bonding, dieattaching, tuning process가 줄고 간단하게 될 필요성을 느끼게 되었다. 이와 때를 맞추어 CAD/CAM 기술 개발과 전송선의 불연속(discontinuity)<sup>12)</sup> 특성이 대부분 설명됨에 따라 제작후 미세조정의 필요성을 제거할 수 있어 현재에는 monolithic IC 또한 점차 사용이 증가되는 추세에 있다.

Monolithic IC의 제작에는 substrate로 SOS(silicon on sapphire), semi-insulating GaAs substrate 등이 사용되고 있다. SOS의 경우 sapphire는 alumina와 비슷한 절연도를 가지며, semi-insulating silicon substrate보다 손실이 적고, 현재까지 잘 개발된 silicon IC 제작 기술이 직접 응용 될 수 있으므로, 주파수 2GHz 이하의 monolithic microwave IC 제작에 사용된다. GaAs의 경우 표 2에 나타난 것과 같이 손실이 alumina substrate와 대등하며, GaAs electron mobility는 silicon에 비해 6배 정도로 커서, 동일한 silicon과 lithography 기술을 응용할 경우, 보다 높은 주파수에서 동작하게 된다. 따라서 2GHz 이상의 주파수에서의 monolithic microwave IC 제작에는 semi-insulating GaAs substrate를 사용하고 있다.<sup>13)</sup>

표 2. Monolithic technology가 가능한 substrate의 물성 비교

Property	GaAs	Silicon	Semi-insulating GaAs	Semi-insulating Silicon	Sapphire	Alumina
Dielectric Constant	12.9	11.7	12.9	11.7	11.6 (C-axis)	9.7
Density (gm/cc)	5.32	2.33	5.32	2.33	3.98	3.89
Thermal Cond. (watts/cm <sup>2</sup> -K)	0.46	1.45	0.46	1.45	0.46	0.37
Resistivity (ohm-cm)	---	---	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>8</sup>	> 10 <sup>14</sup>	10 <sup>11</sup> - 10 <sup>14</sup>
Elec. Mobility (cm <sup>2</sup> /v-sec.)	4300*	700*	---	---	---	---
Sat. Elec. Vel. (cm/sec.)	1.3 × 10 <sup>7</sup>	9 × 10 <sup>6</sup>	---	---	---	---

\* At 10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup> doping

앞서서 언급한 monolithic technology에 사용되는 substrate들의 물성을 표 2에 alumina와 비교하여 정리하였다. 그림 2, 3, 4는 현재 생산되고 있는 analog monolithic microwave IC의 사진들이며, 현재 각 회

사에서 생산되고 있는 receiver front end의 주파수에 따른 잡음지수(noise figure)를 그림 5에 나타내었다.<sup>(14)</sup>

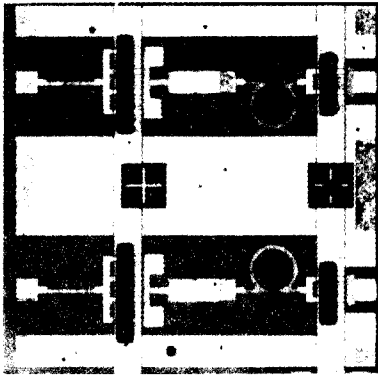


그림 2. Texas Instruments에서 제작된 two-stage GaAs monolithic X-band push-pull amplifier

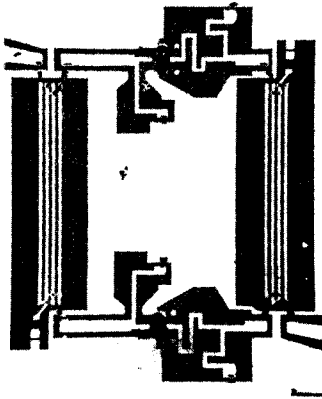


그림 3. Coplanar coupler를 이용한 X-band GaAs monolithic balanced amplifier (CISE사 제품)

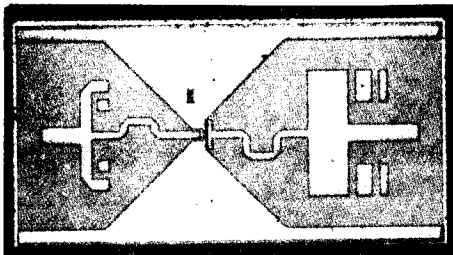


그림 4. 20GHz GaAs low noise amplifier chip (Nippon Electric company 제품)

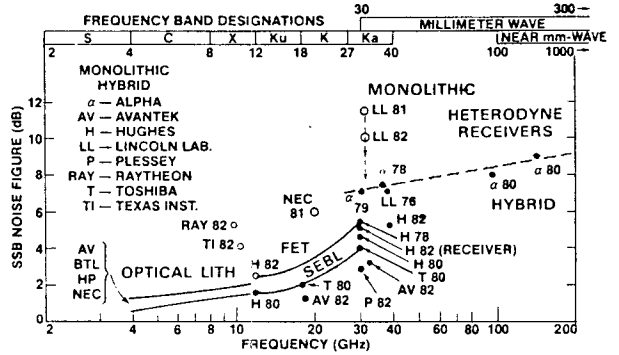


그림 5. 현재 생산되고 있는 수신기들의 잡음지수 SEBL(scanned electron beam lithography)

2. Digital Monolithic Microwave IC

고주파 저잡음 증폭(high frequency low noise amplification)에 사용되는 GaAs MESFET는 switching speed가 빠르고 trans-conductance가 커서 digital circuit으로서 응용가능성을 제시했다.<sup>(15)</sup> 1972년경 미국에서는 군사적 필요성으로 인해 Air Force의 지원으로 HP에서 처음으로 high data rate의 digital IC를 연구하기 시작했다.

이렇게 시작해서 현재 만들어지고 있는 digital IC들은 주파수 1~10GHz의 clock에 동작하므로 giga bit signal processing이 가능하고, 고주파에서 frequency counter, A/D converter, multiplier, FFT 등

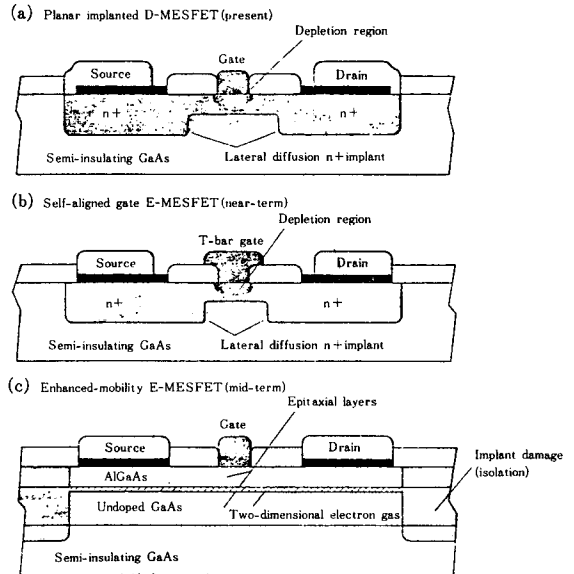


그림 6. Digital microwave IC의 기본소자 (a) D-MESFET (b) E-MESFET (c) HEMT

여러 곳에 사용될 수 있어, 응용 가치가 매우 높다고 할 수 있다.<sup>116)</sup>

이러한 digital microwave IC 구성에 기본소자로 사용되는 것들은 GaAs D-MESFET(depletion MESFET), E-MESFET(enhancement MESFET), MHET (high electron mobility transistor) 등을 들 수 있으며, 그 구조는 그림 6 에 나타내었다. 그중 과거 10년 동안 생산되었던 D-MESFET는 silicon JFET와 원리는 동일하고, 이것을 logic circuit의 기본소자로 사용할 경우 normally-ON 상태이므로, voltage level을 shifting 하는 circuit이 필요하며, 이것 때문에 항상 양, 음 두 개의 D. C. 전원이 필요하게 된다.<sup>117)</sup>

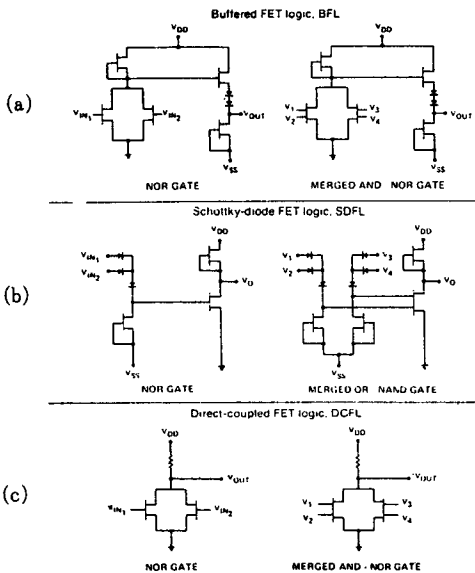


그림 7. DMESFET EMESFET로 이루어진 논리회로 (a) BFL (b) SDFL (c) DCFL

집적회로 구성은 buffered FET logic (BFL), schottky diode FET logic (SDFL)으로 실현되며 그 기본회로를 그림 7 (a), (b)에 보인다.<sup>118)</sup>

D-MESFET의 normally-ON 상태 때문에 생기는 logic circuit의 복잡성은 FET를 normally-OFF 상태로 만들면 해결된다. 따라서 E-MESFET의 경우는 channel의 electron doping을 조절하여 pinch-off voltage가 0volt 정도 되게 한다. 이렇게 제작된 E-MESFET는 gate-source 전압이 0~0.7volt 사이에서 동작하게 되며, direct coupled FET logic (DCFL)양상으로 논리회로를 구성하여 하나의 D. C. 전원으로 그림 7의 (c)와 같이 간단히 구성될 수 있다. 그러나 이

회로를 제작하는 경우 process된 각 gate이 uniform threshold voltage를 가지도록 해야 하고, channel에서의 electron doping을 매우 낮은 수준으로 해야 하므로 process가 매우 어렵게 된다.

최근 이러한 process의 어려움을 일본의 Fujitsu 회사는 tungsten silicide Schottky gate을 mask로 사용, silicon NMOS process 기술인 self-aligned gate (SAG)기술을 써서 1Kb RAM을 성공적으로 제작하였다. 또한 미국의 Hughes와 일본의 Nippon Telegraph 회사는 threshold voltage에 영향이 없도록 T-bar gate를 사용하여 이 문제점을 해결했다. 이 두 방법은 모두 SAG process를 사용하고 있는데, 이 process를 이용하지 않고 제작한 사례로는 McDonnell Douglas 회사와 일본 Sony 회사의 channel surface region에 p-type implantation을 거쳐 제작된 JFET와 일본 Toshiba 회사의 recessed gate 기술을 들 수 있다.

마지막으로 HEMT (high electron mobility transistor)는 최근 개발된 기술로서 그림 6의 (c)와 같은 구조로 되어 있다. 이 그림에서 보면 알 수 있듯이 D-MESFET와의 다른 점은 semi-insulating GaAs substrate 위에 약 70nm의 AlGaAs층이 있을 뿐이다. 이 70nm의 AlGaAs층은 MBE processing technology로 형성되며, AlGaAs channel과 gate이 약 1.2volt에서 conduction되며, AlGaAs층에서 electron mobility는 MESFET에 비해 크기 때문에 switching speed 또한 빠르게 된다. 이것의 단점은 process technology상의 문제로, 다음과 같은 것을 들 수 있다. 첫째로 active layer 즉 AlGaAs층이 매우 얇기 때문에, 열이나 plasma kinetics에 매우 약하게 되고, 둘째로 MBE 기술의 문제에 있다. 즉 MBE기술로 channel 저항의 조절과 gate와 gate사이의 threshold voltage uniformity 조절의 문제이다. 이러한 기술상의 문제로 HEMT나 E-MESFET는 아직 개발중에 있으며 생산 준비 단계에 있다.

현재 생산되고 있는 gate수의 집적도를 그림 8에 보였으며 약  $10^3$ 정도이다.<sup>119)</sup> 표 3과 표 4는 각 회사에서 생산되고 있는 ring oscillator와 frequency divider의 state of the art를 나타내었다.<sup>119)</sup> 또한 상용적으로 digital IC 성능의 비교 수단인 delay와 power dissipation의 관계로 각 digital IC 성능들을 그림 9에 나타내었다. 그림 10은 Fujitsu 회사에서 제작된  $16 \times 16$  multiplier chip의 사진이다.

표 3. 현재 생산되고 있는 digital ring oscillator의 speed power performance 비교

Source	Approach	Gate Length & Gate Width ( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	Propagation Delay $P^2$	Speed-power Product $P^2$	Fanin/Fanout
Hughes[28]	DMESFET/BFL Inverter	0.5×50	34	1.4	1/1
H. P. [20]	DMESFET/BFL NOR	1×20	86	3.9	2/2
Rockwell	DMESFET/SDFL NOR	1×10	120 52	0.040 0.053	2/1
Thomson CSF [30]	DMESFET/BFL	0.75×20	68	2	1/1
FUJITSU[31]	EMESFET/D-LOAD	1.2×20	170	0.12	1/1
FUJITSU[32]	SELF ALIGN E/DCFL	1.5×30	50	0.287	
N. T. T. [29]	EMESFET/DCFL	0.6×20	30 17.5*	0.057 0.616	2/1 1/1
MCD[12]	EJFET/Pseudo Complementary	1.0×10	150	0.06	1/1
Thomson CSF [13]	EMESFET/quasi-normally-off	1.0×35	105	0.23	1/1

\* Measured at 77°K

III. 結 論

Monolithic microwave IC (MMIC)의 출현 및 digital microwave IC의 등장은 과거 microwave 분야의 system에 (예를 들어 hybrid microwave IC와 waveguide로 이루어진 집적회로등) 상당한 변화를 줄 것으로 예측된다. 현재에서의 MMIC는 거의 시작 단계라고 볼 수 있으나, 이것은 solid state device가 microwave

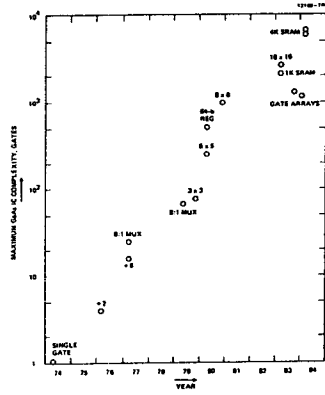


그림 8. 집적도의 발달과정

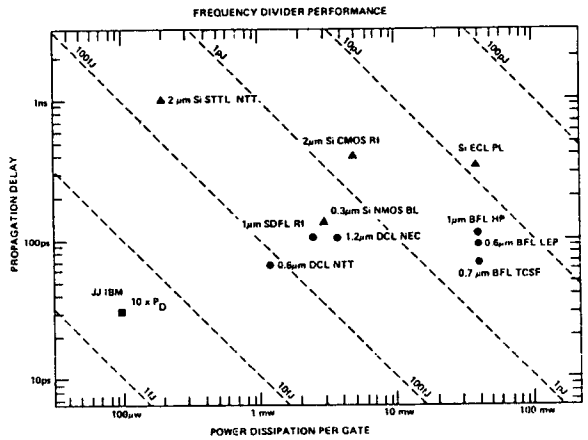


그림 9. 표 4의 frequency divider의 speed power performance

표 4. GaAs digital frequency divider의 performance 비교

GaAs IC Technology	Circuit Approach	Theoretical Max. Toggle F	Measured Max. Toggle F.	Equivalent $\tau_D$	Power Dissipation	$P_D \tau_d$
1 $\mu\text{m}$ D/SDFL Rockwell [23]	D. F. F. ÷ 2 (NOR CATE)	1/5 $\tau_D$	1.9GHz	105ps	2.5mW/gate	0.26pJ
0.7 $\mu\text{m}$ D/BFL TCSF [30]	D. F. F. ÷ 2	1/5 $\tau_D$	3.0	67	40	2.68
1 $\mu\text{m}$ D/BFL Hughes [33]	D. F. F. ÷ 2	1/5 $\tau_D$	2.2	91	78	7.1
1 $\mu\text{m}$ D/BFL H. P. [20]	NAND/NOR ÷ 2 COM. CLOCK	1/2 $\tau_D$	4.5	111	40	4.4
0.6 $\mu\text{m}$ D/BFL LEP [2]	NAND/NOR ÷ 2 COM. CLOCK	1/2 $\tau_D$	5.5	91	40	3.6
0.6 $\mu\text{m}$ E/DCFL N. T. T. [29]	D. F. F. ÷ 8 (NOR)	1/4 $\tau_D$	3.8	66	1.2	0.079
1.2 $\mu\text{m}$ E/DCFL NEC [34]	COMP. CLOCK ÷ 2 NOR	1/4 $\tau_D$	2.4	100	3.9	0.39

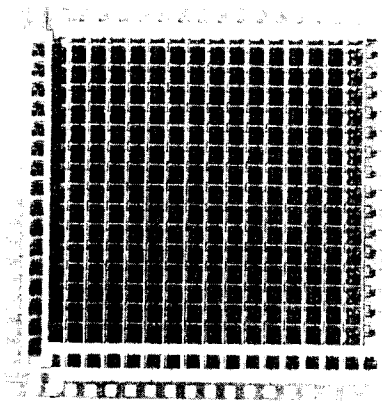


그림10. Fujitsu에서 제작한 16×16 multiplier

tube를 완전하게 대체할 수 없었던 것처럼, 이의 performance, cost, size 등의 문제가 우선되는, 특히 cost에 있어서 대량 생산과 같은 특성을 보장하는 MMIC의 장점이 필요한 분야에서부터 제작되리라 생각된다. 또한 semi-insulating GaAs substrate을 기본으로 하여 구성되는 GaAs MMIC는 silicon에 비해 장비나 process기술이 뒤떨어져 있기 때문에 주로 주파수 2~4GHz analog MMIC나 high data rate logic circuit 제작에 제한될 것으로 보이고, 2GHz 이하의 주파수에서는 현재와 같은 silicon process 기술의 응용으로 silicon MMIC로 제작될 것 같다.

현재 monolithic IC의 응용으로 전망되는 곳은 대량 생산과, 특성 개선이 요구되는 DBS 수신기의 전단부(front end), 또는 가벼운 잇점이 최대로 반영되고, 동일성이 필요한 space-borne phased array radar, air borne radar 등을 들 수 있으며 이들은 장차 늘어나는 통화량 해결 및 communication service 개선에 큰 기여를 할 것으로 전망된다.

#### 參 考 文 獻

[1] H. Sobol, "Microwave communications-an historical perspective," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 1170-1181, Sept., 1984.  
 [2] D.K. Barton, "A half century of radar," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 1161-1170, Sept., 1984.  
 [3] A.W. Guy, "History of biological effects and medical applications of microwave energy," *IEEE Trans. on Microwave*

*Theory Tech*, vol. MTT-32, pp. 1182-1200, Sept., 1984.

- [4] P.G. Mezger, "50 years of radio astronomy," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech*, vol. MTT-32, Sept., 1984.  
 [5] J.M. Osepchuk, "A history of microwave heating applications," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech*, vol. MIT-32, Sept., 1984.  
 [6] W.L. Pritchard, "Satellite communication-an overview of the problems and programs," *Proc. IEEE*, vol. 65 pp. 294-307, March, 1977.  
 [7] K. Miya, *Satellite Communications Technology*. Tokyo, KDD engineering and consulting, Inc., 1981.  
 [8] P.T. Greiling and M. Waldner, "Future applications and limitations for digital GaAs IC technology," *Microwave J.*, vol. 26, pp. 74-87, Feb., 1983.  
 [9] H. Sobol, "Applications of integrated circuit technology to microwave frequencies," *Proc. IEEE*, vol. 59, no. 8, August, 1971.  
 [10] L. Young and H. Sobol, "Advances in microwaves," vol. 8, *New York, Academic Press*, 1974.  
 [11] D.N. McQuiday et al., "Monolithic microwave integrated circuits: an historical perspective," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. MTT-32 no. 9, Sept., 1984.  
 [12] K.C. Gupta et al., *Microstrip Lines and Slot Lines*. Washington, Artech house Inc., 1979.  
 [13] R.A. Pucel, "Design considerations for monolithic microwave circuits," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech*, vol. MTT-29, no. 6, pp. 513-534, June, 1981.  
 [14] A. Chu, "Monolithic circuits for millimeter-wave systems," *Microwave J.* vol. 26, pp. 28-48, Feb., 1983.  
 [15] P. Greiling, "the historical development of GaAs FET digital IC technology," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech*, vol. MTT-32 no. 9, Sept., 1984.  
 [16] D.H. Temme, "Further projections on the use of microwave monolithics," *Microwave J.*, vol. 26, pp. 22-24, Feb., 1983.

- [17] R.C. Eden et al., "Integrated circuits: the case for gallium arsenide," *IEEE Spectrum*, vol. 20, pp. 30-37, Dec., 1983.
- [18] R.S. Pengekly, *Microwave Field Effect Transistors-Theory and Design and Applications*. New York, Research Studies Press, 1982.
- [19] S.I. Long et al., "High speed GaAs integrated circuits," *Proc. IEEE*, vol. 70, pp. 35-45, Jan., 1982. \*

♣ 用 語 解 說 ♣

**그룹 클래시피케이션 코우드(Group Classification Code)**

데이터 코우드의 형태의 하나로, 코우드의 각 자리에 뜻을 갖게 하고 최상위의 자리부터 대분류, 중분류, 소분류, 세분류 등 분류의 계층을 자리에 의해서 나타내는 방법.

**그리드 시이트(Grid Sheet)**

事務處理의 흐름에 출현하는 전표와 그 전표에 담긴 데이터의 항목을 분석하기 위한 시이트, 이 시이트는 데이터의 각 항목을 위에 배열하고 좌측에 항목이 나오는 전표명을 표기하여 바둑눈에 해당난의 각 항목마다 캐릭터의 최대 자리수를 써 넣는다. 전표명은 플로우 차아트에 출현하는 순서로 위부터 기입하고 항목도 전표의 출현순서로 배열한다.

**더어멀方式(Thermal Type)**

感熱印刷方式에 있어서의 感熱紙에 더어멀 헤드로 스폿의 열을 가하여 인쇄하는 방식, 가격이 비교적 저렴하여 보급형의 기기에 채용되고 있다.

**데시멀 코우드(Decimal Code)**

데이터 코우드의 한 형태로, 類, 網, 目, 分目 또는 大分類, 小分類, 細分類와 같은 계층이 있는 항목을 각각 10분류하여 각각 0~9까지의 10개의 숫자로 코우드를 표현하는 방법.

**口述타이프**

문장을 입으로 말하는데 따라서 고속으로 타자하는 것, 音聲테이프의 이용으로 이 방식이 용이해져 보급되고 있다. 또 워드 프로세서의 활용으로 나중 교정편집(번역작업)이 용이해졌다.

**構造的 情報**

정보는 그 성질에 따라 다른 정보와 관련성을 가지고 있다. 이와 같은 관련성에 착안하여 정보의 상호관계를 명확하게 하고 순서를 구조적으로 한다. 이와 같은 체계화된 정보를 構造情報라고 한다. 예를 들면 平文은 構造情報라고는 하지 않지만 平文을 해석하여 그 구조를 시스템화하여 표현하면 構造情報가 된다. 이와 같은 일견 非構造的인 정보를 構造化하는 연구도 중요하다.