

**■14 群 (歴史・年表・資料) - 1 編 (電子情報通信技術史)****5 章 エレクトロニクス**

(執筆者：今井 元) [2010年6月 受領]

**■概要■**

エレクトロニクスは近年大いに発展した分野の一つであり、我々の日常生活に欠かせない数々の商品を支える部品・デバイスの発明・改良を進展させてきている。本章では、こうした発展の歴史を数多くある分野から五つ、すなわち通信用デバイス、放送用デバイス、コンピュータ用デバイス、情報家電用デバイス、小型化技術に絞って詳述するものである。

**【本章の構成】**

まず「5-1 通信用デバイス技術」では、近年インターネットの発展を支える電子および光デバイス技術の歴史を紹介する。続いて、高精細テレビや今後の3次元テレビなど放送の高度化を支える放送用デバイスを「5-2 放送用デバイス技術」で、コンピュータの目覚ましい発展、特に高集積化・省電力化などを実現してきたコンピュータ用デバイスを「5-3 コンピュータ用デバイス技術」で、家庭電気製品のインテリジェント化を支えてきたセンサなどの情報家電用デバイスを「5-4 情報家電用デバイス技術」でそれぞれ技術史として説明した。そして、最も急速に普及した携帯電話を支えてきたデバイス・モジュールの小型化の技術史を「5-5 小型化技術」として紹介する。

## ■14 群 - 1 編 - 5 章

### 5-1 通信用デバイス技術

(執筆著: 板屋義夫) [2009年3月 受領]

#### 5-1-1 通信用 Si 電子デバイス

1940年代から1960年代頃までの電子デバイスの主力は真空管である。日本において1956年に実用化された同軸ケーブルを用いる960通話のアナログ伝送方式(C-4M)、1960年に実用化された2700通話路のC-12M方式では、ともに、真空管を使った広帯域アンプが採用されている<sup>1)</sup>。しかし、真空管はフィラメントをヒータで加熱して使うために消費電力が大きく発熱すること、寿命が短いこと、小型化や耐震性などの点に問題があった。

1947年末にベル研究所のウォルター・ブラッテン、ジョン・バーディーン、ウィリアム・ショックレーらのグループによりトランジスタが発明される。トランジスタの初期はチップの両面からエミッタとコレクタ領域を形成する方法であったが、その後、チップの一方の表面からエミッタ及びコレクタ接合を形成するメサトランジスタが開発される。

トランジスタのIC化の歴史は、1959年のTI社のキルビーによる特許出願と、フェアチャイルド社のノイスらによるプレーナ技術の特許出願により始まる<sup>2)</sup>。Siプレーナ型トランジスタの技術はpn接合の表面全体をSi酸化膜で覆うことにより、汚染によるpn接合の劣化がほとんどないという特徴をもつ。また、フォトエッチング技術を用いて、エミッタ及びベースを選択拡散で自由な形に形成でき、平坦な絶縁膜上に電極及び配線を自由に形成できるという特長をもつことから、集積化と量産性に適し、IC化の進展に大きく寄与するとともに、それまで主流であったGeを用いたメサ型トランジスタを置き換えていく。日本における最初のICは1961年に発表されている<sup>2)</sup>。

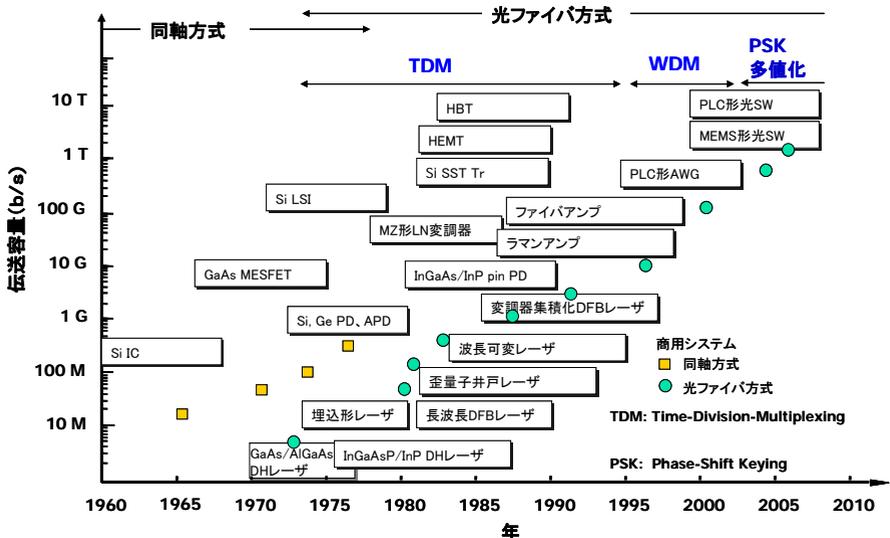


図 5・1 通信用デバイスの進展

1960年代以降トランジスタの生産歩留まりが高まってコストが下がると、通信や放送分野の機器においては、次第に真空管からトランジスタに取って代わられることになる。そして、個別デバイスは集積化技術の進歩によって IC に置き換えられ、更に LSI によって置き換えられていく。

日本では 1966 年に実用化された同軸のアナログ中継伝送方式 CP-12M-Tr 方式からトランジスタ素子が採用される。その後、世界初のデジタル同軸方式 DC-100M 方式の実用化(1974 年)、更に 4 倍の容量をもつ DC-400M (PCM-400M) 方式により通信網のデジタル化は大きく進展するが、PCM-400M 方式では遮断周波数  $f_c = 8 \text{ GHz}$  の Si プレーナ型トランジスタが中継機用トランジスタとして採用されている。

1981 年に光ファイバケーブルによる伝送方式 (F-32M) が商用スタートし、それ以来、この分野で日本は世界をリードしてきた。日本では 1983 年に通信速度 400 Mbps の光伝送方式 (F-400M) が、1987 年には 1.6 Gbps の光伝送方式 (F-1.6G) が実用化されている。F-400M 光通信システムの中継器用 IC では Si プレーナ型トランジスタが使われたが、F-1.6G システムでは、Si プレーナ型の倍の高周波特性をもつ超高周波トランジスタが必要となり、SST (Super Self-aligned Technology) Si パイポラトランジスタが考案された<sup>3)</sup>。SST 技術は従来のプレーナ型トランジスタのエミッタとベースの距離をセルフアラインプロセスによって極限まで近づけることにより、高速動作を妨げる寄生抵抗や寄生容量を徹底的に減らし、プレーナ型では不可能な超高速動作に成功した。

1983 年に導入された D70 型デジタル交換機では通話路も電子化され、時分割の半導体通話路スイッチが開発された。また、通話路系装置の接続動作や信号処理、保守運用機能を制御する中央処理装置や加入者回路にも LSI が導入される。加入者回路は B (Battery feed), O (Over voltage protection), R (Ringing), S (Supervision), C (Codec), H (Hybrid), T (Test) の機能をもつので BORSCHT と呼ばれる。BORSCHT の機能はリレーやトランスなどの電磁部品を前提としているので、要求される耐圧は 320 V と高く LSI には不向きな回路であったが、320 V 耐圧の RT は誘電体分離技術、60 V 耐圧の BSH は pn 接合分離によるパイポラ技術を使い、RT, BSH, CODEC, CONT (制御機能) の 4 LSI 構成による加入者回路が導入された<sup>4)</sup>。

## 5-1-2 高速 GaAs IC デバイス

1996 年に日本で実用化された超大容量光伝送方式 (FA-10G) からは、電子デバイスも更なる高速動作が要求されることとなり、GaAs-IC 技術が導入される。最初の GaAs MESFET (MEtal Schottky Field-Effect Transistor) は 1966 年にカリフォルニア工科大学のミードにより報告された<sup>5)</sup>。化合物半導体中の電子は Si に比べて高移動度であり、n 型の不純物添加した GaAs における電子の移動度は Si の約 6 倍である。また、半絶縁性基板を得ることができるために、素子間分離容量、配線容量などの寄生容量を減らすことが可能となり、Si に比べて高速な動作が可能であるという特長をもつ。

1980 年前後にゲートパターンを用いてソース、ドレイン電極を形成するなどの各種セルフアラインプロセスが考案され、素子の微細化が可能となり高性能 IC が製造される。セルフアライン構造 FET の代表には高融点金属ゲートをマスクとして n<sup>+</sup> 層のイオン注入を行うセルフアライン GaAs FET<sup>6)</sup>、多層レジストによるダミーゲートをマスクに n<sup>+</sup> 層のイオン注入を

行った後に金属ゲートを形成する SAINT MESFET<sup>7)</sup>がある。

新たな化合物半導体デバイスとしては、1980年に HEMT (High Electron Mobility Transistor)<sup>8)</sup>が、1982年に HBT (Heterojunction Bipolar Transistor)<sup>9)</sup>が開発された。HEMTは電子が走行する結晶領域と電子を供給する結晶領域とをヘテロ接合によって空間的に分離し、電子がドナー不純物によって散乱されるのを防ぐことで電子移動度を増大させ高速動作を可能とするトランジスタである。HBTは、エミッタにワイドバンドギャップの半導体を用いたバイポーラトランジスタで、高電流利得で駆動力の高い高速動作が可能なトランジスタである。

MMIC (Microwave Monolithic IC)は GaAs や Si などの半導体基板上に、能動素子(トランジスタ)と受動素子(抵抗, キャパシタ, インダクタなど)を一体的に形成した高周波帯集積回路である。MMICに対して個別のトランジスタやキャパシタ, 抵抗などをプリント基板上に実装したものをハイブリッド IC という。MMICはハイブリッド IC に比べて装置の大幅な小型化, 軽量化ができ, 量産性や信頼性に優れるという特長をもつ。1990年代に入り携帯電話端末の小型化が進むとともに MMIC に対する要求も高まり, フロントエンドモジュールや送受信モジュールなどが 1 チップの MMIC で形成される。更に高集積化を図った MMIC として, ポリイミド膜を用いて受動素子を積み重ねることが可能な多層化 MMIC が開発された<sup>10)</sup>。

### 5-1-3 半導体レーザー

光通信に用いられるデバイスは、半導体レーザー, 光変調器, 光合波器, 光アンプ, 受光器である。レーザー光を使った光通信の概念は 1960 年のルビーレーザーの発振のときに既に出されていたが, よい光の伝送媒体がないために, 長い間実用化されなかった。しかし, 1970 年の伝送損失 20 dB/km の石英系光ファイバと GaAs/AlGaAs 二重ヘテロ接合構造レーザーの室温連続発振の成功<sup>11), 12)</sup>が, 光通信の実用化の可能性を一気に高めた。半導体レーザーの高信頼性, 高速化, 高出力化のためには, 横モード制御が重要なテーマであった。レーザーの活性層幅を 1  $\mu\text{m}$  程度にし, 活性層の周りを AlGaAs 層で埋め込む埋込構造レーザー<sup>13)</sup>により, 低閾値動作, 高出力, 横モードの安定化, 高信頼性が達成された。その後, 光ファイバの低損失波長領域が 1  $\mu\text{m}$  帯にあることが示され, 1  $\mu\text{m}$  帯で発振する InGaAsP/InP を用いたレーザー<sup>14)</sup>に研究がシフトした。

半導体レーザーはへき開によってミラーを形成するため, ファブリーペロー共振器構造になる。そのため, 多くの縦モードで発振が起こる。ファイバには波長分散があり, 光信号を長距離伝送すると, 波形の劣化が発生する。大容量で長距離, 光信号を伝送するために単一の縦モードで発振するレーザーの必要性がいわれた<sup>15)</sup>。半導体レーザーに回折格子を内蔵した DFB (Distributed FeedBack) レーザ<sup>16), 17)</sup>, DBR (Distributed Bragg Reflector) レーザ<sup>18)</sup>が開発された。

半導体レーザーの結晶成長法にも進展があり, 液相成長法から層厚を nm オーダで制御できる有機金属気相成長法が使われるようになった。レーザーの活性層に量子井戸構造<sup>19)</sup>を使うことにより, レーザの発振閾値は更に低くなった。

半導体レーザーは注入する電流を ON/OFF することで光を直接変調できる特徴があるが, 注入電流の変化により発振波長が揺らぐチャーピング特性が 10 Gbit/s 以上の高速通信では伝送特性の劣化の原因になった。電界吸収型の光変調器を DFB レーザに集積したもの<sup>20)</sup>が開発

された。最近では波長多重通信に任意の波長にチューニングできる波長可変レーザ<sup>21)</sup>が開発されている。

#### 5-1-4 外部光変調器

LN (LiNbO<sub>3</sub>) 変調器は LN 結晶表面に Ti を拡散して作成される。低損失、大きな電気光学効果、高速応答性を有している。導波路上の電極に変調信号を電界で印加することで導波路の屈折率を変化させ光信号に変調をかける。最初は光位相変調器が実現された。その後、LN 結晶上に MZ (Mach-Zehnder) 型干渉構造の光導波路を形成した光変調器<sup>22)</sup>が開発された。

MZ 型 LN 変調器は光の強度変調が可能で、原理的に波長チャーピングをゼロにできるため、5~10 Gbit/s を超える大容量・長距離光伝送システム用に使われている。LN は誘電体であるため、DC ドリフト現象が実用上の大きな障害となっていたが、バッファ層上への Si のコーティング、リッジ型光導波路などの採用により、十分抑制されるようになった。また、変調信号と導波路中の光の伝搬速度との速度整合を取るために、進行波型電極の採用により、低電圧駆動、広帯域化<sup>23)</sup>が達成された。

#### 5-1-5 光ファイバアンプ

光ファイバアンプは光を光のまま増幅できるために、光の伝送距離と容量を拡大した。Er をドープしたファイバを 0.98  $\mu\text{m}$ 、または 1.48  $\mu\text{m}$  の光で励起することで 1.5  $\mu\text{m}$  帯の光を増幅することが可能であることが示された<sup>24)</sup>。光ファイバアンプは最大 50 dB を超える増幅性能が示されているが、ファイバの非線形光学効果が生じない 10 dB 程度で使うのが一般的である。

ファイバに添加する希土類元素を変えることで増幅する波長を変えることができる。1.3  $\mu\text{m}$  帯には Nd または Pr、1.48  $\mu\text{m}$  帯及び 1.65  $\mu\text{m}$  帯には Tm を添加することで各々の信号波長域の光増幅ができる。

また、光ファイバの非線形性を利用したラマン増幅<sup>25)</sup>も使われている。増幅させたい光信号の波長の 100 nm 短波長側の光をファイバに入射することで光信号を増幅できる。

#### 5-1-6 受光器

光を電気に変換する受光器 (PD : Photo Diode) は Si、または Ge に不純物を拡散し pn 接合を形成するものが最初開発された。Si は波長 0.8  $\mu\text{m}$  から短波、Ge は 1  $\mu\text{m}$  帯に使われた。現在では、波長 1.6  $\mu\text{m}$  帯まで受信感度が低下しない InGaAs 結晶が使われている。素子の容量を低減するために、光吸収層の undoped-InGaAs を p 型 InP、n 型 InP 層でサンドイッチにした pin 構造<sup>26)</sup>が用いられている。

受信感度を上げるために受光器の後に低雑音の TIA (Trans-Impedance-Amplifier) と LIM (LIMiting-Amplifier) が使われる。受光素子自体の感度を上げる方法として、pn 接合に逆バイアスを印加し空乏層でなだれ電流増倍を起こさせる APD (Avalanche PD)<sup>27)</sup>も使われている。

#### 5-1-7 プレーナ光波回路デバイス

Si や石英基板上に光導波路を形成し、回路パターンにより光信号の合波や分波などの機能を実現するプレーナ光波回路 (PLC : Planar Lightwaveguide Circuit) が開発された<sup>28)</sup>。光ファ

イバ製造に用いるガラスと同じ原料ガスを用いてシリコン基板上に極めて透明度の高いガラス膜を形成し、このガラス膜を LSI 加工技術で高精度に加工し光導波路を形成する。高い信頼性、量産性、低コスト、小型化に適している。

PLC 型スプリッタは FTTH (Fiber to the Home) の PON (Passive Optical Network) システムにおいて使用されている。また、複数の異なる波長の光信号を合波したり、その逆に波長多重化された光信号を波長ごとに信号を分波するアレー導波路格子 (AWG : Arrayed Waveguide Grating)<sup>29)</sup> は波長多重通信 (WDM : Wavelength Division Multiplex) のキー部品となっている。

### 5-1-8 光スイッチ

光ネットワークのノード (交差点) での光パスの切り替えに光スイッチ (SW) が重要な役割を果たしている。ガラスの熱光学効果を使った PLC 型光スイッチ<sup>30)</sup> はメトロ系光ネットワークの ROADM (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer), Si の小さなミラーを使う MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 型光スイッチ<sup>31)</sup> は波長選択スイッチ (WSS : Wavelength Selective Switch) に使われている。

#### ■参考文献

- 1) “NTT R&D の系譜 実用化研究への情熱の 50 年,” NTT-AT, 1999.
- 2) 電子情報通信学会編, “LSI ハンドブック,” オーム社, 1984.
- 3) T. Sakai, Y. Kobayashi, H. Yamauchi, M. Sato, and T. Makino, “High speed bipolar ICs using super self-aligned process technology,” Proc. The 12th Conf. on Solid State Devices, Tokyo, 1980.
- 4) 木村, 井鍋, 林, 田辺, “D70 デジタル交換機の加入者回路 LSI,” 通研実報, vol.33, no.7, pp.1777-1786, 1984.
- 5) C. A. Mead, “Schottky barrier gate field effect transistor,” Proc. IEEE, vol.54, no.2, pp.307-308, 1966.
- 6) N. Yokoyama, T. Mimura, M. Fukuta, and H. Ishikawa, “A self-aligned source/drain planar device for ultra-high-speed GaAs MESFET VLSI’s,” ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.218-219, 1981.
- 7) K. Yamasaki, K. Asai, and K. Kurumada, “GaAs LSI-Directed MESFET’s with self-aligned implantation for n<sup>+</sup>-layer technology (SAINT),” IEEE Trans., vol.ED-29, no.11, pp.1772-1777, 1982.
- 8) T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, and K. Nanbu, “A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterojunctions,” Japan. J. Appl. Phys., vol.19, no.5, pp.L225-227, 1980.
- 9) H. T. Yuan, “GaAs bipolar gate array technology,” GaAs IC Symp. Tech. Dig., pp.100-103, 1982.
- 10) T. Hirano, T. Tokumitsu, and M. Aikawa, “Very small wide-band MMIC magic-T’s using microstrip lines on a thin dielectric film,” IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.37, no.10, pp.1569-1575, Oct. 1989.
- 11) Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, E. L. Portnoi, and M. K. Trukan, “AlAs-GaAs heterojunction lasers with a low room-temperature threshold,” Fiz. Tekh. Poluprov., vol.3, p.1328, Sep. 1969. (Sov. Phys. Semicond.), vol.3, p.1107, Mar. 1970.
- 12) I. Hayashi, P. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, “Junction lasers which operate continuously at room temperature,” Appl. Phys. Lett., vol.17, no.3, p.109, Aug. 1970.
- 13) T. Tsukada, “GaAs-Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As buried heterostructure injection lasers,” J. Appl. Phys., vol.45, no.11, pp.4899-4906, Nov. 1974.
- 14) J. J. Hsieh, “Room-temperature operation of GaInAsP/InP double-heterostructure diode lasers emitting at 1.1 μm,” Appl. Phys. Lett., vol.28, no.5, pp.283-285, Mar. 1976.
- 15) Y. Suematsu and M. Yamada, “Transverse mode control in semiconductor laser,” Proc. IEEE semiconductor laser conference, Boston, MA, pp.305-310, May 1972.
- 16) H. Kogelnik and C. V. Shank, “Coupled wave theory of distributed feedback lasers,” J. Appl. Phys., vol.43, no.5, pp.2327-2335, May 1972.
- 17) T. Ikegami, K. Kuroiwa, Y. Itaya, S. Shinohara, K. Hagimoto, and N. Inagaki, “1.5 μm transmission

- experiment with DFB laser,” Proc. 8th Euro. Conf. Opt. Commun., Tech. Dig., AVIII-6, 1982.
- 18) H. Kawanishi, Y. Suematsu, Y. Itaya, and S. Arai, “GaIn<sub>1-x</sub>AsP<sub>1-y</sub>/InP injection laser partially loaded with distributed Bragg reflector,” Japan. J. Appl. Phys., vol.17, pp.1439-1440, Aug. 1978.
  - 19) Y. Arakawa and H. Sakaki, “Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current,” Appl. Phys. Lett., vol.40, no.11, pp.77-78, Jan. 1982.
  - 20) Y. Kawamura, K. Wakita, Y. Itaya, Y. Yoshikuni, and H. Asahi, “Monolithic integration of InGaAsP/InP DFB lasers and InGaAs/InAlAs MQW optical modulators,” Electron. Lett., vol.22, pp.242-243, 1986.
  - 21) Y. Tohmori, Y. Suematsu, Y. Tsuchida, and S. Arai, “Wavelength tuning of GaInAsP/InP integrated laser with butt-jointed built in distributed Bragg reflector,” Electron. Lett., vol.19, no.17, pp.656-657, Aug. 1983.
  - 22) T. R. Ranganath, S. Wang, “Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> branched-waveguide modulators: Performance and design,” IEEE J. Quantum. Electron., vol.QE-13, no.4, pp.290-295, 1977.
  - 23) K. Noguchi, O. Mitomi, and H. Miyazawa, “Low-voltage and broadband Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulators operating in the millimeter wavelength region,” OFC’96 Technical digest, ThG2, pp.205-206, 1996.
  - 24) R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, “High gain rare-earth doped fibre amplifier operation at 1.55  $\mu$ m,” Proc. OFC, Reno, NV, 1987.
  - 25) K. C. Byron, “Simultaneous amplification and pulse compression in a single-mode optical fibre,” Electron. Lett., vol.22, pp.1275-1277, 1986.
  - 26) F. Capasso, R. A. Logan, A. Hutchinson, and D. D. Manchon, “InGaAsP/InGaAs heterojunction p-i-n detectors with low dark current and small capacitance for 1.3-1.6  $\mu$ m fiber optical systems,” Electron. Lett., vol.16, no.23, pp.893-895, Nov. 1980.
  - 27) K. M. Johnson, “High-speed photodiode signal enhancement at avalanche breakdown voltage,” IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.ED-12, pp.55-63, Feb. 1965.
  - 28) M. Kawachi, M. Yasu, and M. Kobayashi, “Flame hydrolysis deposition of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> glass planar optical waveguides on silicon,” Japan. J. Appl. Phys., vol.22, p.1932, 1983.
  - 29) H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi, “Wavelength multiplexer based on SiO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> arrayed-waveguide grating,” IEEE J. Lightwave Technol., vol.12, no.6, pp.989-995, 1994.
  - 30) T. Goh, M. Yasu, K. Hattori, A. Himeno, M. Okuno, and Y. Ohmori, “Low-loss and high extinction-ratio silica-based strictly nonblocking 16 $\times$ 16 thermo-optic matrix switch,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol.10, no.6, pp.810-812, Jun. 1998.
  - 31) J. E. Ford, V. A. Aksyuk, D. J. Bishop, and J. A. Walker, “Wavelength add-drop switching using tilting micromirrors,” Journal of Lightwave Technology, vol.17, pp.904-911, 1999.

## ■14 群 - 1 編 - 5 章

### 5-2 放送用デバイス技術

(執筆: 栗田泰市郎) [2009年7月 受領]

放送用デバイスとしては、各種半導体など汎用のデバイスを除けば、撮像デバイス、記録デバイス、表示デバイスが代表的なものである。以下では、これら各々の概要や変遷について述べる。

#### 5-2-1 撮像デバイス

放送用カメラに適用される撮像デバイスには、テレビジョンの黎明期から長い間、真空デバイスである撮像管 (Image Pickup Tube) が用いられてきた。しかし、1980年代になると、固体デバイスである CCD (Charge Coupled Device) が台頭し、現在に至るまで放送用撮像デバイスの主流となっている (図 5・2)。

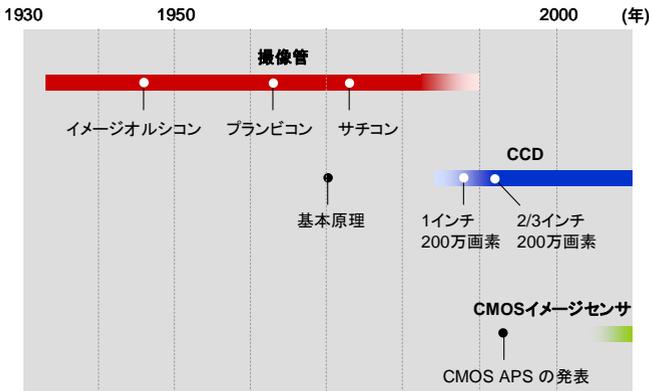


図 5・2 放送カメラ用主要撮像デバイス

放送用撮像デバイスの歴史は、光が入射すると物質表面から電子が放出される外部光電効果を利用した撮像管から始まる。なかでも、1946年に Rose らによって発表されたイメージオルシコン<sup>1)</sup>は、放送に使用可能な感度と画質とを有していたことから、1953年の我が国でのテレビジョン放送の開始時から長年にわたって使用された。しかし、外部光電効果を利用した撮像管は構造が複雑で小型軽量化が難しいことから、1960年代の中頃に境に、放送用カメラには光が入射すると物質内部の伝導電子数が増加する内部光電効果を利用した小型の撮像管が用いられるようになった。

その契機となったのが、1963年に Hann らによって発表されたブランビコン<sup>2)</sup>である。ブランビコンは、従来のイメージオルシコンなどに比べて格段に小型軽量で、高感度、低暗電流、低残像などの特徴を有していたことから、1960年代後半から1970年代にかけて放送用主力撮像管として活躍した。また、ブランビコンの登場を受けて、1970年代には、カルニコンやサチコンなど、内部光電効果を利用した、様々な光導電型撮像管が開発された。なかでもサチコン (Saticon) は、小型化しても高い解像度が得られたことから、ENG 対応のハンディ

カメラなどに用いられ、機動的かつ効率的な番組制作に貢献した。

このように撮像管は、世界的にテレビジョン放送の立ち上げとその発展に貢献するとともに、我が国においてはハイビジョンの開発でも重要な役割を果たした。しかし 1980 年代の後半になると、放送用カメラへの CCD の適用が本格化し、超高感度カメラ用途などの一部の例外を除いて、撮像管はその役割を終えた。

CCD の基本原理は 1970 年に Boyle と Smith によって発表されたが<sup>3)</sup>、放送用カメラに本格的に用いられるまでには約 20 年の歳月を必要とした。その間に、CCD の電荷転送方式である、FT (Frame Transfer) 方式 (1971 年)、IT (Interline Transfer) 方式 (1972 年)、FIT (Frame Interline Transfer) 方式 (1979 年) が提案され、後に、IT-CCD はデファクトスタンダードに、スマリアなどの抑制が可能な FIT-CCD は主に放送用などの業務用カメラに採用された。

また、CCD の高感度・高 S/N 化を可能とする Floating Diffusion アンプ (1972 年)、相関二重サンプリング回路 (1974 年)、埋込みフォトダイオード (1981 年)、オンチップマイクロレンズ (1983 年) などの革新的な技術や、インターレース走査に対応し、動解像度などの向上を可能とするフィールド読み出し (1976 年)、ブルーミングの除去や画素サイズの縮小を可能とする垂直オーバーフロードレイン構造フォトダイオード (1982 年) などが提案され、CCD の小型高性能化と、その実用化に貢献した。CCD の放送用カメラへの適用は 1980 年代の中頃から模索され、1980 年代の後半から標準テレビ用 CCD カメラの本格的な導入が始まった。

ハイビジョン用としては、1980 年代の後半に 1 インチ (光学サイズの対角長 16 mm) 200 万画素 CCD<sup>4)</sup> が、1990 年代の前半には 2/3 インチ (光学サイズの対角長 11 mm) 200 万画素 CCD<sup>5)</sup> などが開発された。これらはハイビジョン放送の立ち上げに貢献するとともに、オンチップマイクロレンズの集光率改善による感度向上などを経て、2000 年から始まった BS ハイビジョン放送での番組制作などに使用された。現在、放送用カメラはハイビジョン化が急速に進みつつあるが、ほとんどのカメラに CCD が適用されている。

一方、現在、携帯電話や高解像度なデジタルスチルカメラなどに適用されている CMOS イメージセンサは、当初、固定パターンノイズが多く、CCD に比べて画質の面で劣っていたため、放送用カメラに用いられることはなかった。しかし、近年、回路技術などの進展により、固定パターンノイズの抑制が可能となったことから、高速で駆動できる、消費電力が少ないなどの特徴を生かして、特殊撮影用の高速度カメラや、ハイビジョンの画素数を遥かに超える次世代放送用超高精細映像システムの研究開発などに用いられている。また、CMOS イメージセンサを適用した放送用ハイビジョンカメラも登場しつつある。

## 5-2-2 記録デバイス

放送局では膨大な量の映像・音声コンテンツを扱うことから記録装置の役割が極めて大きい。1956 年に米国の Ampex 社により初めて実用化された VTR (video tape recorder) は、それまでのフィルム録画に代わり書き換えが可能な画期的な映像記録装置であった<sup>6)</sup>。当初、アメリカにおける東部と西部間のテレビジョン放送の時差解消の手段として使われたが、その後、番組編集や特殊再生などにも使われ、番組制作の多様化に貢献した。VTR は、数十年にわたって多量なコンテンツを記録できる唯一の記録装置として放送局の中で使われてきた。

最初の VTR で、Ampex 社は信号を周波数変調して記録するアナログ記録方式を採用する

ことで高画質の映像記録に成功した。この変調方式は、磁気記録系がもつ非線形入出力特性や時間的な出力変動による再生映像信号劣化を視覚上問題にならないレベルまで低減できる変調方式であった。VTR はその後、家庭用も開発され普及したが、放送用記録装置としては高画質・高音質・高信頼性・長期保存性など多岐にわたる高性能化が要求される。また、海外も含めた放送局間で番組交換を問題なく行うための標準化も不可欠である。これらを満たす次世代 VTR として 1970 年代後半にデジタル VTR の研究が始まった。研究開発が活発化するなかで、規格の乱立を避けるため SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineering) が標準化に乗り出し、D-1 以下、D-x (x は数字) という名称の多くのフォーマットが規格化された<sup>7)</sup>。

一方、1957 年、コンピュータの外部記憶装置として世界初の HDD (Hard Disk Drive) RAMAC (Random Access Method of Accounting Control) が米国の IBM 社から発表された。それ以来、コンピュータの高性能化とともに小型化・大容量化が進められてきた。放送局においては、番組の生産性を向上させるために、1990 年頃、HDD をベースとするノンリニア編集機を導入した。その後、HDD の大容量化・高速化によって、ハイビジョンコンテンツも扱えるようになり、VTR に代わって放送局内の中核を担うストレージになりつつある。

図 5・3 に VTR, HDD, コンピュータデータ用ストリーマなど磁気記録装置の面記録密度の年次推移を示す。放送局用の新規 VTR の開発は 2003 年の D-16 (HDCAM-SR) を最後に終了しており、磁気テープの高密度化は LTO (Linear Tape-Open) や SAIT (Super Advanced Intelligent Tape) などストリーマにおいて進められている。放送局では、従来、映像記録用としてはストリーマを使っていなかったが、大容量化・高速化によって、映像サーバのバックアップやデータ保存用に導入されつつある。

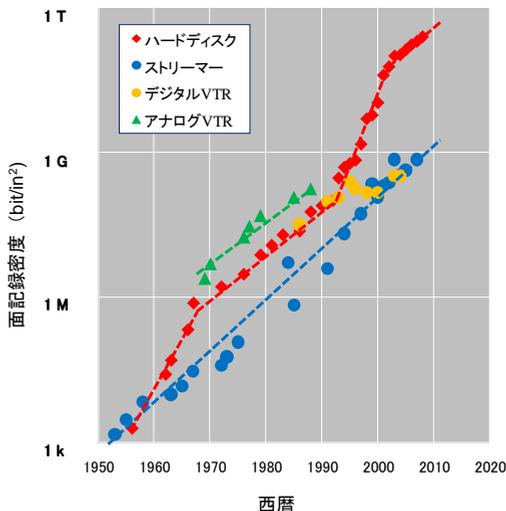


図 5・3 磁気記録装置の面記録密度の年次推移

図 5・3 に示すように、HDD の面記録密度は 50 年間で 1 億倍に向上した。現在、HDD の面記録密度は磁気テープと比較して 300 倍程度高い。この大容量化を支えている主要な技術は垂直磁気記録<sup>8)</sup>である。2005 年以降、垂直磁気記録へ移行することにより、HDD の高密度化は年率 30 % 程度を維持している。また、1 Tbit/in<sup>2</sup> 以上の超高密度記録技術の研究開発も着実に進められている。

1995 年以降、VTR に代わり、ディスクや半導体メモリなどいわゆる“テープレス化”を担う記録メディアを使用するカメラ一体型映像記録装置が開発された。2003 年に発表された XD-CAM では光ディスクを、2004 年に発表された P2 cam では半導体メモリを記録メディアに使用する。P2 cam では、ヘッド・媒体機構系が不要なため、衝撃や振動に強く静粛性に優れる。今後、放送と通信の連携、制作・送出機器のネットワーク化の進展に伴い、放送用記録デバイスは、それらと親和性の高いテープレス化が進んでいくものと考えられる。

### 5-2-3 表示デバイス

放送用表示デバイスといえばほぼテレビディスプレイデバイスのことをさすが、これについては、テレビ黎明期から 21 世紀初頭までの約 80 年間に渡り、CRT (Cathode-Ray Tube, ブラウン管, 受像管) が独占的な位置を占めていた。しかし 2005 年前後より、FPD (Flat Panel Display, 平面型もしくは薄型ディスプレイ) である LCD (Liquid Crystal Display, 液晶ディスプレイ) や PDP (Plasma Display Panel, プラズマディスプレイ) が主流になっている (図 5・4)。

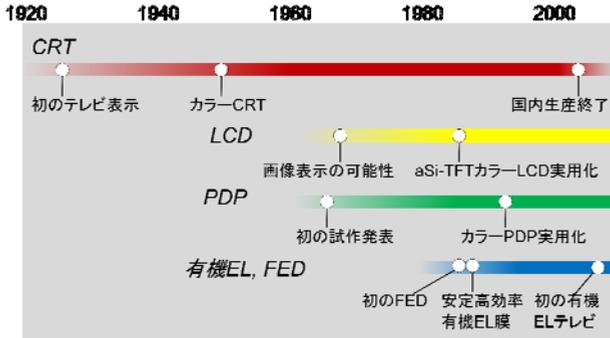


図 5・4 テレビディスプレイ用デバイス

CRT はドイツの Braun により 1897 年に波形観測用として発明されたが、1926 年、高柳健次郎により初めてテレビディスプレイとして利用された<sup>9)</sup>。このとき高柳らは「イ」の字を撮像・表示することに成功している。一方、世界初のテレビ実験は 1925 年イギリスの Baird により行われ、このときはニブコー円板という機械的走査手段による撮像・表示デバイスが用いられた。つまり、テレビ発祥の翌年には、早くも CRT がテレビディスプレイの先頭に立ったのである。その後、1950 年の RCA 社によるカラー CRT の開発、1960 年代の高性能蛍光体の開発、1969 年ゼニス社によるブラックマトリクス蛍光面の開発などを経て CRT は性能が飛躍的に改善され、その後も絶え間ない改善が続けられて進歩し続けた<sup>10)</sup>。これらにより、

20 世紀中は CRT が質・量とも他の表示デバイスを寄せ付けず、市場をほぼ独占していた。

しかし、CRT には外形の大きさ（特に奥行き）、重量の重さという克服しがたい課題がある。一方で、ハイビジョンの開発により放送メディアは大画面・高精細表示を指向するようになり、1980 年代以降、大画面でも場所をとらない FPD の開発・実用化が望まれるようになった。その結果、1990 年代後半から LCD, PDP の実用化が徐々に進み、CRT の市場占有率は 2002 年ころから明らかに減少し始めた。2004 年には CRT の国内生産が終了し、2005 年にはテレビの国内年間出荷台数において FPD が CRT を上回った<sup>11)</sup>。その後も CRT から FPD への代替が急速に進んでいる。

一方、液晶の発見は古く 1988 年にさかのぼるが、画像表示デバイスとしての液晶の可能性は 1968 年に RCA 社により初めて示された。これを契機に LCD の開発が世界的に進められたが、テレビとして実用化されるまでには時間を要した。1971 年、TN モードの発表、同年のアクティブマトリクス (TFT) 駆動の提案、シャープによる交流駆動の開発と世界初の液晶製品となる液晶電卓の実用化 (1973 年)、今日の LCD の主流である aSi-TFT カラー LCD の最初の実用化 (1986 年) などを経て、1990 年代中ごろより TFT LCD の本格的な量産が開始された<sup>10), 12)</sup>。その後、大幅な性能改善と大型化が進められ、今日ではテレビディスプレイとして最大の市場占有率をもつに至っている。

PDP は 1966 年にイリノイ大学から初めての試作発表がなされた。これを契機に開発が世界的に進められたが、これも実用化までには時間を要した。1984 年に今日の PDP の基礎構造となっている 3 電極面放電型 PDP が富士通により開発され、更に 1990 年のアドレス・表示期間分離駆動法の開発などを経て、初のフルカラー PDP の実用化が 1993 年に富士通によりなされた。その後も性能改善が継続的に進められ、今日ではテレビディスプレイの主流の一翼を担っている。PDP が LCD と大きく異なる点の一つは、LCD が多用途かつ小型ディスプレイから徐々に大型化してきたのに対し、PDP は構造的に大型化に有利とされ、当初から 40~50 型以上の大画面テレビディスプレイを目指して開発が進められてきたことである。

その他の表示デバイスとして、1986 年フランスの Meyer らの開発に始まる FED (Field Emission Display, 電界放出型ディスプレイ, 冷陰極ディスプレイ) や、1987 年、コダック社の開発を端緒とする有機 EL (Organic Electro-Luminescence) ディスプレイが今後有望な FPD とされ、開発が進められている。有機 EL については、有機 EL テレビとして世界初となる 11 型の製品が 2007 年にソニーから市販された。今後、課題である大型化が実現されれば有力なテレビディスプレイとなる可能性がある。FED については、CRT に匹敵する高画質が期待できる FPD として、特に業務用モニタとしての期待が高いが、まだ本格的な実用化はなされておらず、今後が期待される。

#### ■参考文献

- 1) A. Rose, P. K. Weimer and H. B. Law, "The Image-Orthicon," Proc. IRE, vol.34, pp.424-432, 1946.
- 2) F. F. De Hann, A. Van der Drift, and P. P. M. Schampers, "The "PRUMBICON," A New Television Camera Tube," Philips Tech. Rev., vol.25, no.6/7, pp.133-151, 1963/1964.
- 3) W. S. Boyle and G. E. Smith, "Charge Coupled Semiconductor Devices," Bell Syst. Tech. J., vol.49, pp.587-593, 1970.
- 4) 秋山郁男, 永野賢治, 中島広志, 長井清武, 織田英嗣, "ハイビジョン CCD カラーカメラ," テレビ技報, vol.12, no.43, pp.37-42, 1988.

- 5) K. Harada, M. Negishi, T. Ohgishi, S. Kubota, T. Oda, and M. Yamagishi, "A 2/3-inch 2M Pixel FIT-CCD HDTV Image Sensor," Proc. ISSCC92, TP 11.3, pp.170-171, 1992.
- 6) E. D. Daniel, C. D. Mee, and H. Clark, "Magnetic Recording the First 100 Years," IEEE Press, 1999.
- 7) 沼澤潤二, 梅本益雄, 奥田治雄, 喜連川優, "情報ストレージ技術," pp.138-145, コロナ社, 2007.
- 8) S. Iwasaki and Y. Nakamura, "An Analysis for the Magnetization Mode for High Density Magnetic Recording," IEEE Tran. Magn., MAG-13, 5, pp.1272-1277, 1977.
- 9) 高柳健次郎, "学会創立 40 周年の回顧," 映情学誌, vol.44, no.4, pp.363-366, Apr. 1990.
- 10) 大石 巖, 畑田豊彦, 田村 徹, "ディスプレイの基礎," pp.1-15, 共立出版, Dec. 2001.
- 11) 栗田泰市郎, 宮下哲哉, 廣田昇一, 染谷 潤, 石井啓二, 小牧俊裕, 平和 樹, 和田恭典, 根尾陽一郎, 時任静士, 藤掛英夫, 陶山史朗, "情報ディスプレイ," 映情学誌, vol.60, no.8, pp.1169-1177, Aug. 2006.
- 12) 電子情報通信学会「技術と歴史」研究会, "電子情報通信技術史," pp.146-156, コロナ社, 2002.

## ■14 群 - 1 編 - 5 章

### 5-3 コンピュータ用デバイス技術

(執筆著：安藤壽茂) [2009年3月 受領]

計算を容易に行いたいというニーズは古くから存在し、そのためのデバイスとして、各種の算盤が使われた。しかし、算盤は計算の中間結果を記憶するもので、現代風にいうとレジスタであって、計算の主体は人間であった。計算の過程そのものを自動化したいという要求を実現した初期の計算機械としては、パスカル (Blaise Pascal) の開発した Pascaline (1642年) やバベッジ (Charles Babbage) の Difference Engine (1853年に規模を縮小して完成) などがあり、これらのマシンは機械的な歯車やカムにより加算や桁上げの伝達を行っていた。このようなメカニカルな計算機構は、米国のモンロー (Monroe) 社や我が国のタイガー計算機の手廻し計算機に使用され、1970年代の電卓の普及まで使用された。

しかし、歯車による計算は速度が遅く、より高速に処理を行いたいという要求に応じて、米国の国勢調査用に開発されたホレリス (Herman Hollerith) のパンチカードシステム (1889年) などでは、電気的なリレー (継電器) や電気機械式のカウンタが用いられた。

これらのマシンは、エレクトロニクスに基づくデバイスは利用しておらず、いわば先史時代のコンピュータ用デバイスである。

コンピュータの歴史を論じるとき、使用デバイスの観点から、次のように分類されることがある。

第一世代：真空管、パラメトロンなど

第二世代：トランジスタ

第三世代：集積回路 (Integrated Circuit)

第四世代：大規模集積回路 (Very Large Scale Integrated circuit)

#### 5-3-1 第一世代のコンピュータ用デバイス

エレクトロニクス化されたコンピュータ用デバイスとして最初に用いられたのは真空管である。ヒータにより加熱されたカソードから出る電子の流れをその周囲に配置したグリッドに与える電位で制御し、高電圧を掛けたアノードに到達する電子量、すなわち電流を制御するデバイスであり、電磁石で接点を開閉するリレーに比べて3桁程度、高速のスイッチングを行うことができた。1946年に完成し、実用に供された最初のコンピュータである ENIAC は約 18000本の真空管を用い、10進10桁の加算を毎秒5000回実行することができた。

真空管は高速であったが、高温となるヒータの断線など故障が多く、ENIACのような大規模なコンピュータでは常時、故障した真空管の取替えが必要であった。これに対して我が国では、東大の後藤英一が磁心のパラメータ励振を利用するパラメトロンと呼ぶ素子を開発した。磁心にコイルを巻くだけの簡単な構造であり、真空管に比べて安価で信頼度が高く、1950年代後半から国産各社がパラメトロンを使用するコンピュータを開発・発売したが、次世代のトランジスタに比べると速度が遅く、消費電力も大きいという問題があり、1960年代の初頭にはトランジスタ計算機に切り替わっていった。

第一世代のコンピュータのデータやプログラムを記憶する主記憶としては、ブラウン管のような構造で静電的に情報を記憶するウィリアムスチューブ (Williams Tube)、パルス音波を

循環させて記憶する水銀遅延線メモリ、磁気ドラムなどが用いられた。

### 5-3-2 第二世代 トランジスタとコアメモリ

トランジスタをスイッチング素子に採用した最初のコンピュータは、1958年に作られたフィルコ (Philco) 社の Transarc S-2000 である。このコンピュータは、毎秒 6 万回の加減算を実行することができ、消費電力は約 15 kW であった。

真空管が 100 V 以上のアノード電圧を必要とするのに対して、トランジスタの動作電圧は 10 V 以下であり、かつヒータも不要であるので低消費電力であり、Transarc S-2000 は、ENIAC と比較すると、メモリ量などが大幅に増加していることに加えて、10 倍以上の演算性能を 1/10 の消費電力で実現している。トランジスタの素材としては、当初はゲルマニウム (Ge) が用いられたが、温度特性が悪く、次第にシリコン (Si) を素材とするトランジスタに移行していった。

また、1953年には、Whirlwind コンピュータの主記憶装置として、小さな円環状の磁気コアの磁化の方向で状態を記憶するコアメモリが採用された。コアメモリは、第一世代の記憶装置に比べて高速のアクセスが可能であり、かつ動作安定度や信頼度が高く、1960年以降のほとんどのコンピュータで主記憶装置として使用されるに至った。

### 5-3-3 第三世代 集積回路

1959年にテキサスインスツルメンツ (Texas Instruments) 社のキルビー (Jack Kilby) がゲルマニウムの小片の上に複数のトランジスタや抵抗などを一体形成することに成功し、特許を出願した。また、これとは独立にフェアチャイルド (Fairchild) 社のノイス (Robert Noyce) がシリコン小片の上に、これらの素子とそれらの素子間を繋ぐ配線まで一体化する特許を出願した。このように複数の素子を含む回路を半導体小片に一体形成したものを集積回路 (Integrated Circuit) と呼ぶ。集積回路は複数の素子を同時に作ることで、素子のコストを低減することができ、また、個別のパッケージに封入されたトランジスタをプリント配線などで接続して回路を構成する場合に比べて、組立てコストも低減することを可能とした。

第二世代のトランジスタや初期の集積回路では、ベース領域にマイノリティキャリアを注入してエミッタ、コレクタ間に流れる電流量をコントロールするバイポーラ型のトランジスタ (Bipolar Transistor) が用いられたが、1960年代にはチャネル領域のマジョリティキャリアの量をゲートの電位でコントロールする MOS 電界効果トランジスタ (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) も使用されるようになってきた。

バイポーラ集積回路に比べて、MOS 集積回路の方が素子分離などの構造が簡単であり、ダイ (Die, 複数形は Dice)、またはチップと呼ばれるシリコン小片により多くのトランジスタを集積できるようになってきた。また、MOSFET はバイポーラトランジスタと比較してスイッチング速度は遅かったが、消費電力が少なかったことも多数のトランジスタの集積を可能とした一つの要因である。

インテル (Intel) 社のムーア (Gordon Moore) は、1965年に Electronics Magazine 誌に論文<sup>1)</sup>を発表し、一つのダイに集積されるトランジスタの数は年率 2 倍で増加しており、将来にわたってこの傾向を継続できない理由はないと述べた。経験則であるが、これをムーアの法則と呼ぶ。ムーアは 1975年には 2年で 2倍と増加率を修正したが、現在 (2009年) も、

これに近い増加率が継続している。

集積回路規模の増加による象徴的な展開として、インテルが 1971 年に発表した 4 ビットマイクロコンピュータシステム MCS-4 (CPU チップは 4004) があげられる。この 4004 チップは約 2300 トランジスタを集積し、データ処理単位は 4 ビットとコンピュータとしては小規模であるが、初めてワンチップのコンピュータを実現した。4004 は最小寸法 10  $\mu\text{m}$  の PMOS シリコンゲートプロセスを使用し、約 740 kHz のクロックで動作した。

また、インテルは 1970 年に 1103 という 1024 ビットの記憶容量をもつダイナミックメモリチップを発売した。この 1103 と後継となる 4 K, 16 K ビットのチップは高速の半導体メモリとして、それまでのコアメモリを置き換えていき、今日の DRAM の発展の基礎を築いた。

初期の MOS 集積回路は、製造の容易なマジョリティキャリアとして正孔を用いる p 型 MOSFET が用いられたが、半導体製造技術の向上に伴い、電子をキャリアとして用いる n 型 MOSFET に移行した。シリコン基板を使用する場合、電子の移動度は正孔の移動度の 2 倍程度と高く、NMOS 化によりスイッチ速度を向上することができた。

### 5-3-4 第四世代 CMOS 大規模集積回路

また、1980 年代に入ると、p 型 n 型の両方の MOSFET を一つのチップ上に形成し、それぞれの接続を相補的 (Complementary) とし、すべての入力状態に対してグランド側の NMOS 回路が On の場合は電源側の PMOS 回路は Off、あるいはその逆に NMOS 回路が Off の場合は PMOS 回路が On となるように構成する CMOS (Complementary MOS) LSI が作られるようになってきた。この CMOS 回路は、回路の状態の変化が起こる場合には寄生容量を充放電するエネルギーを消費するが、定常的な状態では電力を消費しないという優れた特性を持っており、CMOS 製造技術の一般化により、急速にコンピュータ用デバイスの主流となった。

#### (1) MOSFET の等電界スケーリング (Dennard Scaling<sup>2)</sup>)

MOSFET は、そのチャネル長、ゲート絶縁膜厚、ドレイン電圧を比例的に  $k$  倍に縮小する等電界スケーリングを行うと、スイッチ時間は  $k$  倍、消費電力は  $k^2$  倍となる。つまり、トランジスタの寸法を  $1/2$  にすると、2 倍のスイッチ速度が  $1/4$  の消費電力で実現できるようになる。また、一定面積のチップに集積できるトランジスタ数も 4 倍に増加する (結果として、一定面積のチップの消費電力は一定)。このため、微細化のメリットは非常に大きく、業界各社は微細化のために巨額の研究開発費をつぎ込み、また、莫大な費用を掛けてより微細な加工ができる工場を継続的に建設している。これがムーアの法則を継続させている原動力である。

#### (2) マイクロプロセッサの発展

次の図 5・5 と図 5・6 に、ISSCC (International Solid-State Circuit Conference) で発表されたマイクロプロセッサのトランジスタ数とクロック周波数の推移を示す。トランジスタ数は 20 年間に 1 万倍程度に増加しており、 $1/k^2$  が数百倍程度であるのに対して、大きな増加率を示している。これは、論理回路より素子密度が高いメモリのプロセッサチップへの搭載量が増えてきていることと、素子分離技術の改良による密度向上やコンピュータを用いて配置配線設計を行う CAD (Computer Aided Design) 技術による素子密度向上などの要素が貢献している。

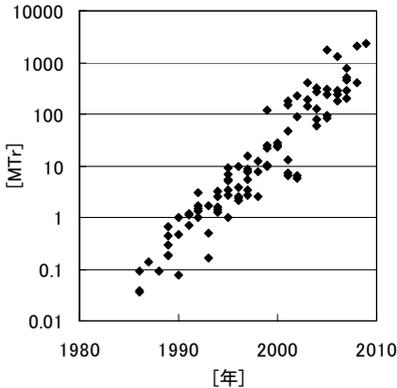


図 5-5 ISSCC で発表されたマイクロ  
プロセッサのトランジスタ数

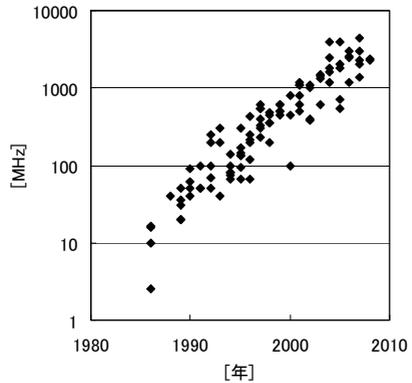


図 5-6 ISSCC で発表されたマイクロ  
プロセッサのクロック周波数

また、クロック周波数も 20 年で 300 倍程度に向上しており、 $1/k$  が 20~30 倍であるのに比べて高い伸びを示している。これはプロセッサのクロック周波数を決めるパイプライン 1 段に含まれる論理ゲート段数を減少させるアルゴリズムの採用や論理設計技術の改善による貢献が大きい。また、寄生容量の削減などの微細化以外のトランジスタの性能向上や、配線の寄生容量の低減などの半導体プロセスの改善による回路速度の向上も大きく貢献している。

しかし、等電界スケールリングよりも高い素子密度、高いクロック周波数を実現してきた結果、ダイ当たりの消費電力が増加し、2000 年頃には 100 W を超えるプロセッサチップが出現した。また、微細化に伴う電源電圧の低減に比例して、MOSFET のスレッシュホールド電圧を低下させてきたが、結果として Off の状態の MOSFET の漏れ電流が増加し、容量の充放電による消費電力と並ぶレベルになってきた。

このため、2005 年以降では電源電圧の低減は鈍化する傾向にある。そして、電源電圧が低下しない状況では、消費電力の制約からクロック周波数の向上も鈍化し、継続する集積度の向上を利用したマルチコア化などにより、総合性能を向上する方向に向かっている。

### 5-3-5 まとめ

このように集積回路技術の発展は、微細化によるクロック周波数の向上と飛躍的な集積度の増加を実現した。集積度の向上により、キャッシュやスーパスカラ実行、分岐予測などの高性能化を可能とするアーキテクチャ機構の実装が可能になっており、コンピュータの性能向上は集積回路技術によるコンピュータ用デバイスの発展が牽引してきたといっても過言ではない。

#### ■参考文献

- 1) Gordon Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," Electronics Magazine 19 April 1965
- 2) R.H. Dennard et. al., "Design of Ion-Implanted MOSFET's with Very Small Physical Dimensions," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Oct. 1974.

## ■14 群 - 1 編 - 5 章

### 5-4 情報家電用デバイス技術

(執筆者：佐藤真木) [2009年5月 受領]

ここでは「情報家電」を「情報を扱うことを主たる機能とする家電製品」と捉え、それらの製品に使われているデバイスを対象とする。具体的な製品カテゴリーとしては携帯電話、携帯情報端末、デジタルスチルカメラ、デジタルカムコーダ、デジタルビデオレコーダ、テレビなどであり、これらの製品に使われているデバイスのうち、「イメージャ (撮像デバイス)」、「ストレージ (記録デバイス)」、「ディスプレイ (表示デバイス)」、「バッテリー (蓄電デバイス)」の四つを取り上げる。また、そのうち「ストレージ (記録デバイス)」については、「磁気ストレージ」、「光ストレージ」、「半導体メモリ」の三つに分けて記述する。

#### 5-4-1 イメージャ

映像を離れた場所で映し出す「テレビジョン」の実現を目的に、入力映像の光-電気変換デバイスとして、最初の撮像デバイスである撮像管が開発された。世界初の実用的な撮像管は、1933年にウラジミール・ツヴォルキン (V. K. Zworykin, RCA 社) が発明したアイコノスコープ (Iconoscope) である。この撮像管は、光電効果を有する雲母板上にセシウム薄膜を形成し、撮影対象物が発した光をレンズなどの光学系によって雲母板上に結像させ、そこで発生した電荷を順次電子ビームで走査して読み出し、電気信号に変換するものであった。

撮像管は真空管の一種であり、動作電圧が高いことなどにより小型・低消費電力化が難しく、また特性の経年変化や信頼性の点でも課題が多く、その後品質が向上していく固体撮像素子に次第に置き換わっていくことになる。現在では、撮像管は高感度暗視カメラなどの特殊用途にのみ使われている。

CCD イメージセンサや CMOS イメージセンサに代表される固体撮像素子は、半導体製造技術を用いて集積化された光電変換素子である。この二つの代表的な固体撮像素子では、フォトダイオードで発生する電荷を出力するための転送機能として、それぞれ電荷結合素子 (CCD) や CMOS 素子が用いられる。

CCD は 1969 年、ベル研究所のウィラード・ボイル (W. S. Boyle) とジョージ・スミス (G. E. Smith) が、磁気バブルメモリの動作原理から着想し、半導体に応用することによって発明した。1971 年以降カラーアプリケーションとなる CCD イメージセンサとしての応用研究が進み、1970 年代後半には試作カメラが、1980 年代には実用的なカラーテレビカメラが製品化されている。民生用としては、1982 年に CCD イメージセンサが使われたビデオカメラが登場している。

1980 年代は家庭用ビデオカメラへの応用をめぐって、CMOS イメージセンサの前身である MOS 型イメージセンサと CCD イメージセンサの開発競争が繰り広げられた。MOS 型イメージセンサは、ダイナミックレンジが広いという特長を有していたが、感度が低くノイズが多いという欠点があった。その後、家庭用ビデオカメラの普及とともに感度が高く高画質の CCD イメージセンサが主流になっていく。

ところが 1990 年代後半になると、半導体製造技術、回路技術及びデジタル信号処理技術の発展により、増幅型の CMOS イメージセンサが市場で大きな伸びを見せるようになる。

CMOS イメージセンサは、CMOS 論理 LSI と製造技術や回路技術において互換性が高く、技術の発展により、急速に小型化・低コスト化が達成された。特にカメラ付き携帯電話の急激な市場拡大に応じて、2004 年後半には総出荷個数で CMOS センサが CCD イメージセンサを上回った。

CMOS イメージセンサの原理 (PN Photodiode + MOS Amp) が英国の Plessey Company Ltd. によって考案されたのは 1968 年と古いが、NASA ジェット推進研究所 (JPL) によって実用化されたのは、半導体微細加工技術が高度化した 1993 年のことである。

ますます微細化・高精度化する半導体製造技術の活用により、CCD イメージセンサと CMOS イメージセンサは、受光素子の微細化も急速なスピードで進められている。近年では、一辺のサイズが 1.4 ミクロンの画素や一眼レフ用に 2000 万画素を超える画素数のイメージセンサも実用化されている。

今後は、特に CMOS 論理回路との集積化特性に優れた CMOS イメージセンサにおいて、デジタル信号の高速処理技術と組み合わせ、より高度な撮像素子が開発されていくものと考えられる。

## 5-4-2 ストレージ

### (1) 磁気ストレージ

磁気を利用して情報を記録する方式は 1898 年にデンマークのポールセン (V. Poulsen) によって発明された。このときの記録媒体は現在の磁気テープではなく銅線に記録する方式であり、ヘッドとの接触が良好でない、走行の安定性が悪いなどの欠点があった。1928 年にドイツのフロイマー (A. F. Pflüemer) が紙テープに磁性粉を塗るというアイデアを考え、世界で初めて磁性粉を塗布した磁気テープが発明された。更に、1931 年にドイツの AEG 社より磁気テープ式記録機が発明されて、現在とほぼ同じ磁気テープによる記録方式が確立された。

初期の磁気記録機は音声のみの記録であったが、1957 年にアメリカの Ampex 社が世界で初めて映像が記録できる放送用 VTR を発表、また 1987 年にはソニーがデジタル映像を記録できる業務用デジタルビデオカメラを発表した。そして 1990 年代に入ると、デジタルビデオカメラは家庭用機種にまで普及し、誰でも映像をデジタルでテープに記録できる時代が到来した。これらの磁気記録の変遷は記録密度の向上によるものであるが、記録密度向上には磁気テープと磁気ヘッドの特性向上が大きく寄与している。

磁気テープの特性は磁性材料の性能が支配的である。初期の磁気テープに使用されていた磁性材料はマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) や  $\gamma$ -ヘマタイト ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) などの酸化鉄であったが、1960 年代になると Co を一部置換、または被覆したコバルト変成酸化鉄が開発された。また、酸化物を使用しないメタルテープも 1965 年頃よりアメリカの 3M 社などで開発が始まり、日本では 1978 年にオーディオテープとして発売された。金属磁性体を真空蒸着法で皮膜形成させる蒸着テープは 1979 年に初めて実用化され、現在のデジタル映像記録用磁気テープの主流となっている。

一方、磁気ヘッドは 1968 年に Ampex 社が磁気抵抗効果を利用した再生用の MR ヘッドを発明し、これにより記録密度が大幅に向上した。MR ヘッドは、当初はハードディスクドライブ (HDD) 用として開発されたが、現在では家庭用 VTR、カムコーダなどの磁気テープストレージにも搭載されている。

コンピュータのメインストレージである HDD が AV 製品に初めて搭載されたのは、米国ベンチャー企業の TiVo 社によるデジタルビデオレコーダで、1999 年のことであった。その後 Apple 社が 2001 年に 1 号機を発売したデジタルミュージックプレーヤの iPod にも小型の HDD が搭載され、現在ではフラッシュメモリに主役の座を明け渡してはいるものの、市場に広く受け入れられた。また、DVD を用いたデジタルビデオレコーダも、2003 年頃から HDD も搭載したハイブリッド型の製品が出始め、現在では DVD レコーダだけでなく、次世代の BD レコーダにおいても HDD とのハイブリッド機が主流になっている。

HDD の記録密度の向上はとどまるところを知らず、巨大磁気抵抗効果を利用した GMR ヘッドや、トンネル接合磁気抵抗効果を利用した TMR ヘッドといった再生ヘッド技術の進歩が大きく貢献してきたが、更に 2005 年には垂直磁化記録技術も東芝により実用化された。記録密度はこの 30 年間で約 10000 倍に向上し、これは磁気テープや光ディスクストレージの記録密度向上のペースを大きく上回っている。現在も更なる記録密度の向上に向けて、ディスクリットトラックレコーディング技術やパターンドメディアレコーディング技術などが開発されている。

## (2) 光ストレージ

光ディスクの研究は 1960 年代から進められていたが、最初の商品化は直径 30 cm のディスクに両面で最大 2 時間のビデオ信号をアナログ記録したビデオディスクであり、1981 年にパイオニアより「レーザーディスク」が、1983 年には日本ビクターより「VHD」が発売された。

デジタル信号を記録した初の光ディスクは、音楽用コンパクトディスク (CD) プレーヤとして、1982 年にソニーから 50 タイトルの音楽 CD と同時に日本で発売された (米国などでは 1983 年に発売)。波長 780 nm の半導体レーザを用い、12 cm のディスクに最大 74 分までの音声を収録できる音楽用 CD は急速な普及を示し、1988 年には 8 cm の CD シングルも発売された。CD はデータ用記録メディアとしても取り扱いが容易かつ安価であることから、音楽用のみならず、折しも爆発的な成長期にあった PC やゲーム用のリムーバブルメディアとしても、広く使われるようになった。

CD は当初再生専用のメディアであったが、記録可能な光ディスクがその後次々に登場した。まず、光磁気記録ディスクが業務用途向けに販売されたが、民生用としては、1992 年 11 月に日本国内でソニーより、録音・再生可能な直径 64 mm の磁界変調オーバーライト方式光磁気記録ディスク「MiniDisc システム」が発売された。続いて、有機色素を記録材料に用いた追記型 (ライトワンス) の CD-R が 1996 年に商品化された。また、書き換え可能な CD-RW は 1997 年に商品化された。

CD の成功により、音声のみならず動画をデジタル記録できる大容量の光ディスクを求める声が高まった。そしてついに、12 cm の CD サイズに 2 時間のデジタルビデオ信号を記録できる DVD が、1996 年に発売された。DVD は波長 650 nm の赤色半導体レーザを光源とし、片面一層で 4.7 GB のデータ記録ができ、二層構造も可能である。CD と同様に記録型の DVD も、有機色素を記録材料として用いる追記型の DVD-R や DVD + R、相変化材料を記録材料として用いる繰り返し記録型の DVD-RW、DVD-RAM、DVD + RW など各種の方式が商品化された。

その後、波長 405 nm の青色半導体レーザが実用化されたことにより、光ディスクの更な

る大容量化が可能になった。テレビ放送のデジタル化に対応して、Full HD の高精細表示が可能な液晶テレビの普及も始まった。こうした動きと歩調を合わせ、片面一層で 25 GB のハイビジョン映像を記録できる世界初の「Blu-ray」レコーダが 2003 年にソニーより発売された。これに対抗する「HD-DVD」方式も商品化されたが、2008 年には事業の終息が宣言され、規格争いにも終止符が打たれた。「Blu-ray」は、既に 2 層化も実現しており、ゲーム機にも搭載されている。

### (3) 半導体メモリ

フラッシュメモリ (Flash Memory) は、電気的にデータの消去及び書き込みが可能で、電源を切ってもデータが消えない揮発性の半導体メモリであり、正式名称はフラッシュ EEPROM (Electrically Erasable and Programmable Read Only Memory) という。

このフラッシュメモリは、記憶セルを接続する回路構成により、大きく NAND 型フラッシュメモリと NOR 型フラッシュメモリに分けられ、ともに舂岡富士雄が東芝在籍時 (NOR 型 1980 年、NAND 型 1986 年) に発明した。

その後、インテルの開発により、マイコン応用機器のプログラムコードの記憶に適した NOR 型が先行して市場に広がった。NOR 型は 1 バイト単位の読み出しが可能で、高速にアクセスできる利点があるが、書き込みは低速で、またメモリセルの構造上、NAND 型に比べて高集積化に不利となる。一方の NAND 型は高集積化に有利で、高速書き込みが可能である利点があるが、1 バイト単位の読み出しはできず、ランダムアクセスによる読み出しが低速である欠点を有する。このような欠点を有してはいたが、NAND 型は高いランダムアクセス性能が要求されない用途に適しており、携帯電話、デジタルカメラ、デジタルオーディオプレーヤなどの携帯機器の普及と共にその記憶媒体として近年急激に普及した。これに伴いフラッシュメモリの価格も低下し、民生品市場の一層の拡大に寄与した。

フラッシュメモリは 2005 年頃までは、ハードディスクや光ディスクの容量単価とは比べ物にならないほど高額であった。しかし、ムーアの法則と呼ばれる半導体製造技術の指数関数的な進展により、2006 年頃よりフラッシュメモリの価格は大幅かつ急速に下落していき、価格的な欠点は徐々に和らいでいった。しかしながら 2009 年時点では、ハードディスクや光ディスクを抜き去るほどには至っていない。これは磁気記録においても技術革新により、記録密度が持続的に向上しているからである。

ところが近年では、NAND フラッシュメモリの低価格化により、小容量のものであればハードディスクと価格的にも十分競争可能になり、ハードディスクの置き換えも視野に入ってきた。そして、ついにコンピュータの補助記憶装置として長らく使用されてきたハードディスクを代替する SSD (Solid State Drive) と呼ばれるフラッシュメモリが登場するにいたる。この SSD を最初に採用したのは、従来のハードディスクを排除したノートパソコンであり、2007 年に発売された。

ノートパソコンには機器の小型化、軽量化、省電力化、衝撃に対する強さが要求されるが、SSD はハードディスクと比較してこれらの要素で優れており、更に物理的な動作がないので静音化ができ、また高速にアクセスできるという利点ももつ。

### 5-4-3 ディスプレイ

ドイツのフェルディナント・ブラウン (K. F. Brown) がブラウン管を発明したのは 1897 年のことだった。1929 年の実験放送開始 (英 BBC)、1935 年の定期放送開始 (独) に始まったテレビ放送は、1953 年には日本国内でも開始され、第二次大戦後、テレビジョンは世界中で爆発的に普及していった。そしてブラウン管はテレビジョンの表示装置として、近年まで不動の地位を占めてきた。

当初は白黒放送としてスタートしたテレビ放送であるが、カラー表示が可能なシャドーマスク方式やアパーチャグリル方式が開発され、1954 年にはアメリカ NBC が NTSC 方式によるカラー放送を開始し、日本でも 1960 年にカラー放送が開始された。テレビ放送の伝送媒体が衛星やケーブルなど多様化し、ビデオやゲーム機など様々な信号源が現れても、ブラウン管は半世紀に渡り表示デバイスとして活躍してきた。1990 年代には、横長ブラウン管やフラットブラウン管なども実用化された。また、ブラウン管は、オシロスコープや PC 用のモニターなどとしても広く用いられてきた。しかし、現在では新興国のテレビ向けに一部残るものの、市場のほとんどは FPD (Flat Panel Display) に移行している。

材料としての液晶は 1888 年にオーストリアの植物学者ライニツァー (F. Reinitzer) によって発見されたが、電氣的に光学特性を変化させることができるのを見出したのは、RCA 社のウィリアムズ (R. Williams) であった (1963 年)。同社は液晶を用いた表示装置を 1968 年に発表した。実際にシャープにより電卓の表示素子として商品化されたのは 1973 年のことだった。液晶はまず、こうした小型表示素子として普及が進んだ。

その後、1979 年に英国 Dundee 大学で開発されたアモルファスシリコン TFT (Thin Film Transistor) と、1981 年に東北大学から発表された並置加法混色法によるカラーフィルタが実用化されたことで、大型のカラー表示が可能になり、液晶の本格的な発展が始まる。大型の液晶が登場したことで、1980 年代後半にはノート PC が実現される。1990 年前後には、ノート PC 向けに各社が第一世代の本格量産ラインを立ち上げた。その後も液晶ディスプレイの進化が続き、大型化と高画質化が実現された結果、デスクトップ PC 用のモニターも 1990 年代末には液晶に移行した。折からの PC とインターネット普及の流れにも乗り、情報表示デバイスとしての液晶は巨大産業へと飛躍を遂げた。

2000 年代になると、テレビとして見るに足るサイズの大型液晶パネルが実現し、液晶テレビの本格的な普及期を迎えた。大型化・高画質化・低価格化を各社が競い合った結果、液晶テレビは爆発的に普及した。このように、液晶は今や携帯電話から大画面テレビまで、サイズを問わず広範な用途に用いられる主流のディスプレイになった。

プラズマディスプレイは、1964 年に米国イリノイ大学で発明され、当初は業務用途での情報表示に用いられていた。1980 年代には一部のラップトップ PC 用のモニターとしても使用されていたが、輝度も低くカラー表示ができなかったため、TFT 液晶が普及するとあまり使われなくなった。しかし、富士通ゼネラルが独自の AC 駆動方式の開発に成功したことで、テレビ用途の道が開けた。1996 年には富士通ゼネラルから世界初の民生用プラズマテレビが発売された (42 型)。その後も性能の改善や大型化への取り組みが続けられ、現在では 100 インチを超える大型のものも市販されている。

有機 EL ディスプレイは、携帯電話用などの小型のものから商品化されたが、家庭用テレビとしては 2007 年にソニーが 11 型を世界で初めて商品化した。自発光の固体表示素子であ

り、色再現性や動画性能など画質が良いことと、パネルが極めて薄いなどの利点があり、次世代の FPD として今後の発展が期待されている。

#### 5-4-4 バッテリー

ポータブル機器の駆動源として必要不可欠なバッテリーは、大きく一次電池と二次電池に分けられ、それぞれの用途に応じて様々な種類が商品化されているが、ここでは情報家電用のバッテリーとして、一次電池ではマンガン系などの乾電池について、二次電池ではニッケル水素二次電池とリチウムイオン二次電池について、その歴史を概観する。

現在のマンガン系乾電池の原型は 1868 年にフランス人のルクランシェ (G. Leclanché) が発明したルクランシェ電池といわれている。ルクランシェ電池にはゲル状の電解液が使用されていた。電解液を固体に染み込ませた、いわゆる乾電池を世界で初めて発明したのは日本人の屋井先蔵で、1885 年のことである。その後、ドイツとデンマークで相次いで乾電池の特許が取得され、乾電池は世界に普及することとなった。

1950 年代のトランジスタ時代の到来により、電子機器の低電圧化・ポータブル化が進展し、乾電池の高容量化に対する要求も高まった。1963 年には松下電器産業 (現パナソニック) から現在の乾電池とほぼ同じ形状のマンガン乾電池が発売され、1969 年にはそれまでのマンガン乾電池の放電時間を 1.5 倍に延ばした高性能マンガン電池が発売された。一方、電解液に水酸化カリウムなどのアルカリ溶液を用いるアルカリ乾電池は、1959 年、アメリカのエバレディ社によって開発され、国内では 1963 年に初めて日立マクセルから発売された。アルカリ乾電池は高性能のマンガン乾電池より更に放電時間が長く、また大電流が必要な機器に適している。

高性能マンガン乾電池の発売以降しばらくは、マンガン系、高性能マンガン系、アルカリの 3 種類の乾電池ラインナップであったが、2004 年にパナソニックが約 40 年ぶりの新ラインナップとなる、正極にオキシ水酸化ニッケルを使用した乾電池を発売した。この乾電池は従来のアルカリ乾電池の約 1.5 倍の放電時間を有する。更に同社は、2008 年にアルカリ乾電池の高容量タイプを発売した。

ポータブル機器の多様化に伴い、バッテリーに対しては高容量化とともに、繰り返し充電して使える二次電池に対する要求も高まった。1980 年代までは二次電池の主流はニッカド二次電池であったが、より高容量、小型軽量の二次電池が望まれていた。そのようななか、1990 年に負極に水素吸蔵合金を使用し、ニッカド二次電池よりもエネルギー密度を大幅に向上させたニッケル水素二次電池が、松下電池工業と三洋電機から発売された。ニッケル水素二次電池はニッカド二次電池と同じ放電電圧で 1.5~2 倍のエネルギー密度を有し、材料にカドミウムを含まないことなどから急速に置き換えが進んだ。

更にその 1 年後の 1991 年に、ソニーからニッケル水素二次電池の約 3 倍の体積エネルギー密度をもつリチウムイオン二次電池が発売された。リチウムイオン二次電池は放電電圧が 3.6V と高いこと、メモリ効果がないといった特徴も有している。この二種類の二次電池の登場により、ノートパソコン、携帯電話、カムコーダ、デジタルスチルカメラなどのポータブル情報通信機器が急速に普及することとなった。両電池とも、登場以来、新規材料の導入をはじめとする様々な改良により高容量化が図られ、体積エネルギー密度はともに発売当初の 2 倍程度にまで向上している。

## ■14 群 - 1 編 - 5 章

### 5-5 小型化技術

(執筆者：小野寺隆夫) [2010年11月受領]

近年、急速に普及し小型化が進んだ製品として、携帯電話があげられる。小型化技術は、ますます高性能化し、多機能化する携帯電話にとって、携帯性を高めるうえで重要なものとなっている。以下に、携帯電話の小型化推移についての概要と、大幅な小型化を実現した初期の小型化技術と、回路基板の小型化に常に寄与してきた表面実装用デバイス(SMD: Surface Mounted Device)について述べる。

#### 5-5-1 携帯電話の小型化

携帯電話サイズの小型化推移を見るうえで、仕様として掲載されている高さ、幅、奥行きを単純に掛け合わせたものを換算体積として図 5・7 にまとめた。

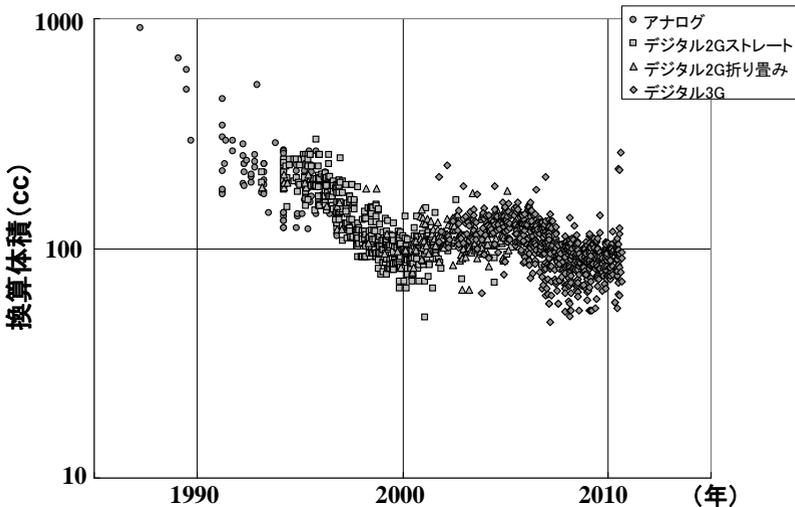


図 5・7 携帯電話サイズの推移

#### (1) 最初の携帯電話からハンディタイプへ

初めて「携帯電話」と呼ばれたのは、1987年に開始された携帯電話サービス用に、手に持つことを前提に開発された、高さ約 180 mm、幅約 42 mm、厚さ約 120 mm の電話機であった。当時は、可搬型の自動車電話などと比べて、衝撃的な小型・軽量さだったが、今の携帯電話からは程遠い大きさで、更に約 800 g 前後と重かった。そのため、手から簡単に滑り落ちないように、かなり頑丈なハンドストラップが付いていた。

1988年から1989年にかけて、数社が携帯電話市場に新規参入を果たし、日本での携帯電話事業は本格的な始まりを迎えた。そのなかで、体積が約 200 cc 程度にまで小型化された画期的な携帯電話が 1989年に登場した。高さ約 142 mm、幅約 64 mm、厚さ約 34 mm の大きさ

で、重さ約 305 g のこの携帯電話は、当時の最小・最軽量モデルとなり、ハンディタイプの幕開けとなった。更に 1991 年には、体積 150 cc、重量 230 g を目標に世界最小・最軽量を目指して開発され、ポケットに入るほど小さくなった携帯電話が続々と登場した。ちょうど、世界中で携帯電話の小型化競争に拍車がかかった時代であった。

## (2) デジタル化

1993 年には、第二世代と呼ばれるデジタル方式の携帯電話サービスが開始された。デジタル化によって、多くの構成部品を LSI (Large Scale Integrated Circuit) 化することができるようになり、特に回路基板関係の小型化が進んだ。また、年間に発売される機種数が急激に増加し、続々と小型の端末が開発された。1996 年頃には、大きさが 100 cc、重さが 100 g を下回るものが登場し、1999 年には重さが 60 g を切るものまで現れた。これらストレートタイプの携帯電話は、2000 年頃まで主流であった。

## (3) 大画面表示、カメラ搭載と折りたたみタイプ端末

1999 年から携帯電話版インターネット接続サービスが始まった。メールやインターネットへのアクセスが容易になることにより、携帯電話の使い方は、それまでの通話中心から大きく変化していくことになる。1999 年にはカラー液晶を搭載した携帯電話が登場し、翌 2000 年にカメラ付携帯電話が発売された。また、2000 年後半から折りたたみタイプが多数発売され、今までストレートタイプの小型・軽量化一辺倒だった流れは、メールやインターネット、更にはカメラで撮影した写真が見やすい大画面を特徴とする折りたたみタイプへと変わっていった。

## (4) 第三世代携帯電話

2001 年、第三世代の通信方式による携帯電話サービスが世界で初めてスタートした。最初に登場した端末は、高さ約 103 mm、幅約 52 mm、厚さ約 20 mm と少し大きめで、重さ約 105 g のタイプと、高さ約 104 mm、幅約 56 mm、厚さ約 35 mm とかなり大きく、重さも約 150 g のテレビ電話に対応したタイプがあった。新しい通信方式に対応するプラットフォームでは、基本となるチップセットの集積化が進んでいなかったことも要因のひとつであった。またこの時期は、大画面化の流れで折りたたみタイプが主流になったことと、電子決済機能やワンセグテレビ機能の搭載など、多機能化に対するニーズが強くなったことから、小型・軽量化があまり進まなかった。

2004 年頃から海外市場では、超薄型携帯電話が登場して人気となり、これまでの小型・軽量化の流れは、薄型化の方向へと変わっていった。2007 年には、高さ約 103 mm、幅約 49 mm、厚さ約 11.4 mm と 60 cc を切る大きさで、重さも 100 g 以下の当時として世界最薄の折りたたみタイプの携帯電話が登場した。更に翌 2008 年には、厚さ約 9.8 mm の極薄携帯電話が発売され、再び小型・薄型化が進んでいった。

### 5-5-2 アナログ世代の小型化技術

可搬型自動車電話から開発された初期の携帯電話に対して、より実用的になったハンディタイプの携帯電話は、大幅に小型化・軽量化された。それまで、トランジスタなどのディス

クリート部品、及び小型 IC (Integrated Circuit) や HIC (Hybrid IC) を多用して組んでいた回路基板に対して、ページャ(ポケベル)などで既に適用されていた表面実装技術 (SMT: Surface Mount Technology) を全面的に導入し、電気系の小型化を実現した。

小型化技術の一つは、新規に専用 LSI を開発し、基本回路を集積化したことである。例えば、「RF LSI (Radio Frequency LSI)」、及び「BB LSI (BaseBand LSI)」などと呼ばれた LSI で、その後、チップセットメーカーがプラットフォームとして製造するようになっていく。インタフェース関係の制御 IC などその他の周辺回路については、まだ十分な集積化が進んでいなかったため、基本回路よりも IC の個数が多く、実装面積も大きくなっていった。また無線系については、様々な表面実装用の特殊パッケージが開発され、部品のダウンサイズとモジュール化によって、ほぼすべての回路部品をプリント配線板 (PWB: Printed Wiring Board) 上に実装できるようになった。従来の貫通ビアによる多層配線板に対して、搭載部品の実装密度を高めるために、ブラインドビアを導入したのもこの頃である。

当時は、ニカド電池 (Ni-Cd 電池) またはニッケル水素電池 (Ni-MH 電池) を主に利用しており、セル数を減らすことによって電池の小型化を実現した。これは、無線出力の PA (Power Amplifier) デバイスが安定化するに従って、電力増幅回路への供給電圧を、6 セルの電池が必要な 7.2 V から、5 セルの 6 V へ、更に 4 セルで十分な 5 V へと低電圧化したためである。また、通話時以外の基地局との連絡を最小限に抑えるスリープモード制御を加えるなど、全体の消費電力を減らす様々な工夫が適用されていった。

その他、マイク、レシーバなどの音響系部品やキーボタンユニットなど、すべての部品を小型化してハンディサイズを実現した。

### 5-5-3 表面実装用デバイス

回路基板の小型化・薄型化については、表面実装技術の進歩によるところが大きい。ここでは、表面実装用デバイスについて、半導体パッケージを中心に述べる。図 5・8 に、携帯電話に用いられてきた主な表面実装用デバイスの変遷を示す。

1990 年代に主流だった半導体パッケージは、QFP (Quad Flat Package) 及び SOP (Small Outline Package) であった。SOP は、DIP (Dual Inline Package) のリードを外側に曲げて、表面実装に対応させた半導体パッケージである。TSOP (Thin SOP) と呼ばれる薄いパッケージ形状のものや、更に TSOP の横幅を狭めた TSSOP (Thin Shrink SOP) も後に登場した。また半導体の集積度が高くなると外部接続用端子数が増加し、4 辺すべてからリード端子を引き出したものが QFP である。QFP のサイズは、半導体チップの大きさよりも、外部接続端子数と端子ピッチで決まる。1990 年代前半には、端子ピッチが 0.8 mm から 0.4 mm へと急速に狭くなっていき、パッケージ本体部分に加え、外側に延びた外部接続端子部分の実装面積を低減した。また、受動部品であるチップ部品も、1.0 mm×0.5 mm の 1005 サイズの採用が増えていった。

QFP の実装面積を少しでも小さくするために、現在の QFN (Quad Flat Non-ledged Package) の原型とも見られる様々なリードレスパッケージの開発が進められ、特に無線系やアナログ系の回路をモジュール化したものに多く見られた。1990 年代前半は、高密度実装を実現するために、次々と新しい半導体パッケージが開発され、半導体メーカーごとに異なる呼び方、似たような呼び方のものが多数存在していた。1990 年代の終わりに規格化され、現在の QFN となっている。

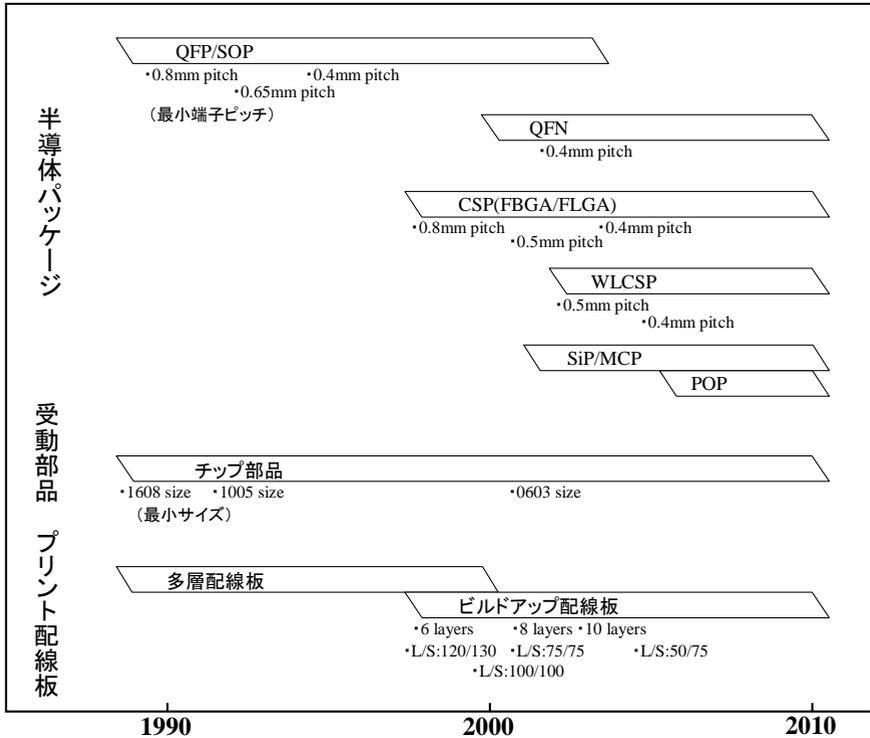


図 5・8 表面実装用デバイス

1990年代後半には、ビデオカムコーダに採用されていた BGA (Ball Grid Array Package) または CSP (Chip Size Package, Chip Scale Package) と呼ばれる半導体パッケージと、同時にビルドアップ配線板 (Buildup PWB) が導入された。BGA は、外部接続端子としてパッケージ底面に半田ボールを格子状に配置したものである。半田ボールを付けずに平面電極パッドのみを格子状に配置したものは、LGA (Land Grid Array Package) と呼ばれる。携帯電話で用いられている CSP は、FBGA (Fine-pitch BGA), FLGA (Fine-pitch LGA) と呼ばれる端子ピッチが 0.8 mm 以下、かつ外形サイズが 21 mm 角以下の半導体パッケージが主流である。ビルドアップ配線板は、コアとなるプリント配線板上の絶縁層に表面ビア (Surface Via Hole) を形成し、逐次積層により多層化したものである。従来の多層配線板では難しかった表層配線の微細化を可能とし、BGA/LGA の格子状端子からの引き出し配線を実現した。この FBGA/FLGA の採用によって、小型のパッケージでも多数の外部接続端子が配置可能となったため、LSI の高集積化とともに、更なる高密度実装が実現された。

2000年代に入ると、更に回路基板を小さくするために、半導体チップを段積みして 3 次元的に配置した MCP (Multi Chip Package) や SiP (System-in-a-Package) の採用が進んだ。異なるタイプのメモリを一つのパッケージ内に収めたり、ベースバンド LSI にメモリを載せるこ

などによって、実装面積を増やさずに多機能化を実現した。0.6 mm×0.3 mm の 0603 サイズのチップ部品が使われ始めたのもこの頃で、LSI 周辺の回路も高密度化していった。

2000 年代前半には、半導体チップ上の端子から外部接続端子への再配線を、ウェハ状態のまま形成する WL-CSP (Wafer Level-CSP) が登場し、小型パッケージの外形サイズを半導体チップの大きさにまで小型化した。更に 2000 年代後半には、POP (Package on Package) と呼ばれる、パッケージ上に別のパッケージを搭載するものも採用された。