

# 光ニューロコンピュータ用デバイスと材料

三菱電機(株)中央研究所 太田 淳  
新田 嘉一  
久間 和生

## Devices and materials for optical neuro-computers

Jun Ohta, Yoshikazu Nitta and Kazuo Kyuma  
Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation

### 1. はじめに

現行のコンピュータにない柔軟な情報処理の実現への期待から、生物の脳における情報処理のメカニズムを模倣したニューラルネットワークモデルの研究が、ここ数年非常に高まりをみせている<sup>(1),(2),(3)</sup>。現在その研究は、既存のコンピュータ上でのソフトウェアシミュレーションが主流であるが、ニューラルネットワークモデル自体が分散・並列処理を基本としているため、逐次直列処理を基本とする現在のコンピュータ(フォン・ノイマン型)を適用したのでは処理速度などの点で本質的に無理を生ずる。そのためには、分散・並列処理に適した専用ハードウェア、即ちニューロコンピュータを実現する必要がある。

現在、ハードウェア化の研究は大きく以下の3つに分けられる。①マイクロプロセッサなどの並列接続によるニューロコンピュータ、②専用LSIによるハードウェア化(Siニューロチップ)、③光技術によるハードウェア化(光ニューロコンピュータ)。このうち光技術には、上述の①、②の場合に比較して以下の潜在的利点が考えられる<sup>(3)</sup>。①光のもつ空間並列性。このため、本質的に並列モ

デルであるニューラルネットワークとの整合性が良い、②光波は互いにクロストークをうけることなく伝搬し、またその伝送容量も大きい、③超高速光デバイスの利用が可能。

本論文では、光ニューロコンピュータ実現に必要なアレイ化光デバイスおよびそれらを実現するために必要とされる材料に関して最近の研究動向のレビューを行う。なお、光ニューラルネットワーク自体の解説は文献<sup>(3)</sup>を参照して頂きたい。

### 2. ニューロンのモデルとその光による実現

Fig. 1は形式ニューロンモデルを光電子ハイブリッド方式により実現した例である<sup>(3)</sup>。ニューロンは、Fig. 1に示されているように、フォトダイオード(PD)と比較器およびLEDで構成されている。ニューロンの興奮状態は、LEDの点滅状態に対応している。各発光素子からの入力 $v_j$ ( $j=1, 2, \dots, N$ )は、シナプス強度 $T_{ij}$ に対応してその透過率を与えた光学マスクを照射すると、その出力光強度は $v_j$ が強度変調された $T_{ij}v_j$ に比例する。次に、この光学マスクからの出力光はすべてレンズ系によってPDアレイの一つに集光される。従っ

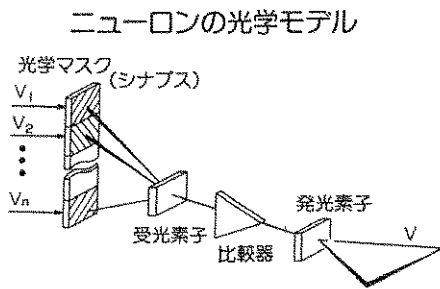
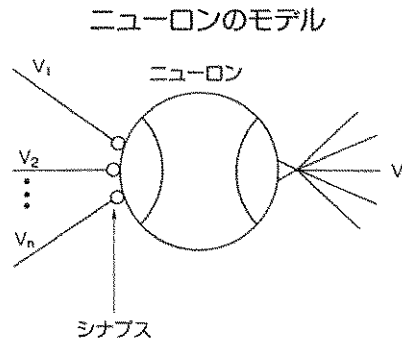


Fig. 1 ニューロンのモデルとその光学的実現

て、その受光素子出力  $u_i$  は、 $u_i = \sum T_{ij}v_j$  となる。この信号は、比較器でしきい値処理されニューロンの興奮状態、即ち発光素子の on/off 状態が決まり、他のニューロンへ信号を送る。

Fig. 1 の基本単位である光ニューロンを多数組み合わせることによって光ニューラルネットワークを構成することができる<sup>(4),(5)</sup>。Fig. 2 はニューラルネットワークモデルの一つであるフィードバックモデルをこの光ニューロンを組み合わせて実現した筆者らのグループによる例である<sup>(6)</sup>。この構成はまた光学的ベクトル・マトリクス乗算にしきい値処理をしフィードバックをした系と見なすこともできる。ここで重要なことは、光学的手法を用いると、上述の演算が極めて高速に並列に実行されることである。この系でニューロン数  $N=32$ 、メモリ数  $M=3$  の連想メモリを構成した、疑似最適解にトラップされることなく完全情報に収束するように、互いに相関のない雑音源を比較器の参照端子に与えて認識率の向上をはかっている。更に、フィードフォワード型の系も試作されており、アルファベット 26 文字の認識に成功している<sup>(6)</sup>。

以上の例より、光ニューロコンピュータの基本

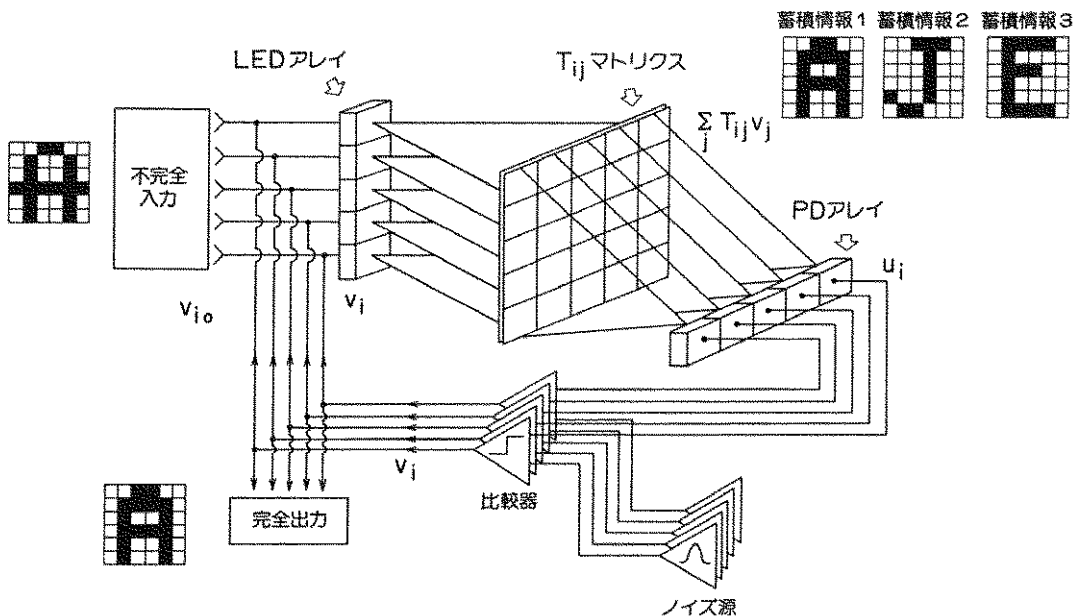


Fig. 2 連想光ニューロコンピュータの基本構成

素子としては、アレイ化発光素子/受光素子、空間光変調素子(インターコネクション素子)、しきい値素子アレイなどが必要であることがわかる。また、これらを集積化した光ニューロチップの検討も将来の光ニューロコンピュータ実現のために重要な課題である。

### 3. 2次元アレイ化光源

2次元アレイ化光源には、面発光半導体レーザ(LD)やLEDなどの能動素子を集積化したものと、回折格子などで一本のビームを多数本に分岐させるようなアレイイルミネータがある。

面発光LDには、回折格子結合型、45°ミラー型、垂直キャビティ型などがあるが<sup>(7)</sup>、ここでは、我々のグループで研究を進めている回折格子結合型面発光LDについて述べる。Fig. 3は、2次回折格子結合型面発光LDの構成図である<sup>(8)</sup>。光は回折格子から扇状ビームとして放射される。現在3×4アレイが試作されており、またほぼ同一構造で回折格子領域に外部光を入射させることによ

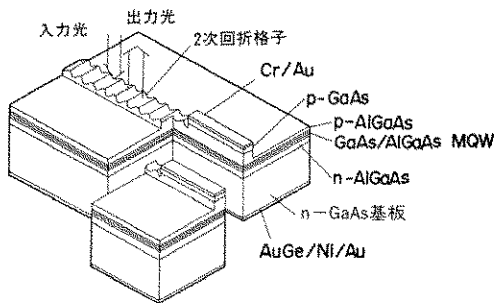


Fig. 3 回折格子結合型面発光半導体レーザ構造図

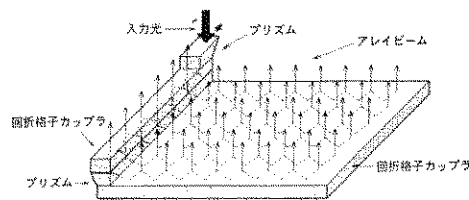


Fig. 4 回折格子カップラーを用いたアレイイルミネータ構造図

り数十psでスイッチングできる光双安定素子も試作されている<sup>(9)</sup>、これらのLDは最近研究の進展が著しく今後の発展が期待される。

アレイイルミネータは、能動素子アレイと異なり、素子自体の発熱が無く、比較的容易にファンアウト数を100×100以上程度にできるなどの利点がある。Fig. 4は、導波路内に外部光を入射させ多数の回折格子カップラーにより光を垂直に取り出す素子の構造図である<sup>(10)</sup>。ガラス基板上に形成したフォトリソト回折格子カップラーにより15×15アレイ素子が試作されている。また、Damman回折格子と呼ばれる位相型計算機ホログラムによりファンアウト数201×201までの素子が設計されている。実際に、窒化シリコン膜を用いてFig. 5に示す回折格子パターンを作製し、ファンアウト数15×15の素子が試作されており、回折効率65%、強度均一度6%以内の特性が得られている<sup>(10)</sup>。

### 4. 集積化光ニューロコンピュータ

現在迄発表されている光ニューロコンピュータは、個別光部品で構成されたものが殆どである。実用的な光ニューロコンピュータの実現には、システムの集積化・チップ化が必要である。集積化・チップ化の利点として、①大規模化(高密度化)が

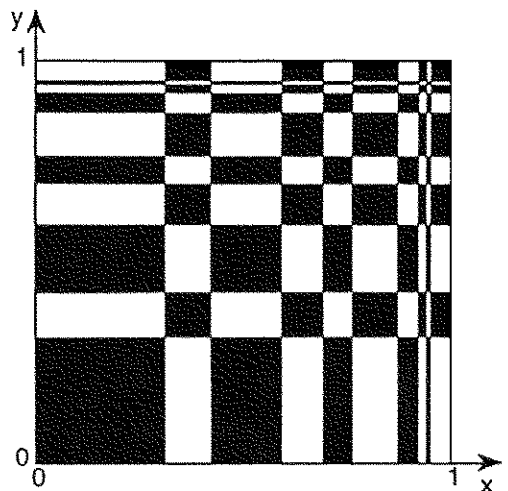


Fig. 5 Damman型回折格子パターン(一周期分)

可能、②超小型化が可能で、かつ機械的安定性に優れる、③電子回路、周辺 LSI との整合性が良い、などが挙げられる。

Fig. 6 は筆者らによる光ニューロコンピュータの核心部であるニューロン間配線部分(ベクトル・マトリクス乗算)を集積化した光ニューロチップ構造模式図である<sup>(12)</sup>。GaAs 基板上に形成した 32 本の線状 LED の上に、32×32 要素の結合行列を集積化した。結合行列パターンは金属固定マスクである。また、同じく GaAs 基板上に 32 本の PD を形成し、LED/結合行列と、クロスバー配置でハイブリッド集積した。前述の個別部品構成の光学的ベクトル・マトリクス乗算器との比較を Fig. 7 に示す。この様に、線状のアレイ素子を密着させることで集積化が可能となる。アレイ素子は比較的大きなチップサイズ内に多数の素子が集積化されるため、面内での素子特性の均一度が要求される。そのために大面積に良質の結晶成長が行える分子線エピタキシー(MBE)法を用いた。チップサイズは、約 8mm 角で、128 ピンフラットパッケージにマウントされている。発光強度分布はチップ内で約 5% 以内と良好である。

この光ニューロチップとしきい値処理等の外部

回路とを組み合わせ、ニューロン数  $N=32$ 、蓄積情報数  $M=3$  の連想メモリを構成し、連想特性として個別部品構成の場合とほぼ同程度が得られている。今後、素子構造の最適化設計により一層の高集積化、高速化が達成されるであろう。

## 5. 空間光変調素子

実時間で、二次元並列光情報のパターン(光強度、位相、偏光分布などのパターン)を変調する機能を有する空間光変調素子(SLM)は、膨大な数のニューロン間をプログラマブル或は動的に配線する光インターコネクション素子(光シナプス結合素子)として用いられている<sup>(3)</sup>。現在までに、液晶材料、誘導体材料(LiNbO<sub>3</sub>、PLZT、BSO 単結晶など)、磁性材料(YIG 薄膜)、半導体材料(GaAs、InP など)を用いた種々の SLM が報告されているが、解像度、応答速度、コスト、使いやすさなどの面で十分な性能のものが得られているとは言え難い。ニューロコンピュータへの応用を前提とすると、解像度 1000×1000、フレームレート~10 kHz、コントラスト比 100:1 程度の性能を有する SLM の開発が必要であろう。Table 1 に種々の

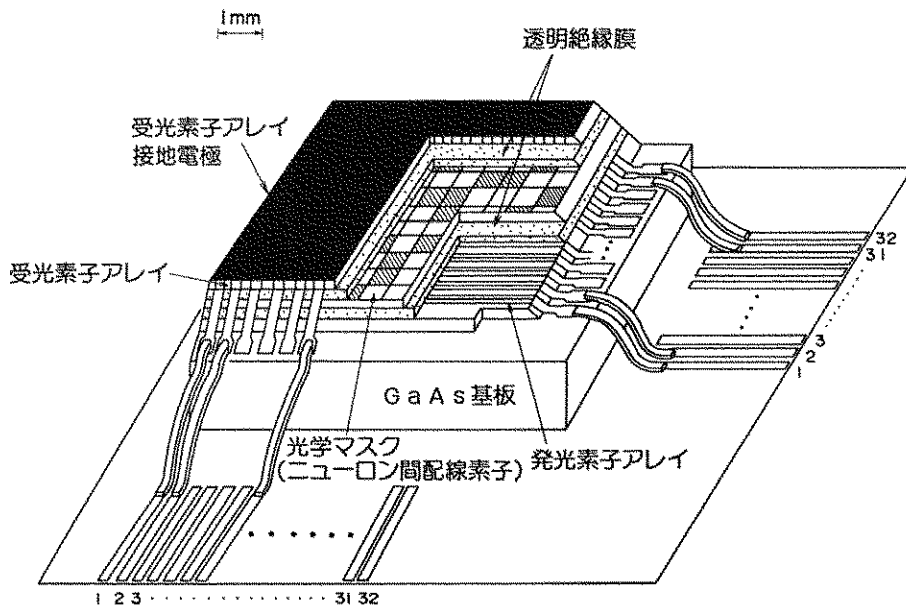


Fig. 6 光ニューロチップ構造模式図

SLM の特性を示す。

Fig. 8 は前節で述べた光ニューロチップ内の固定インターコネクションをSLMにしたダイナミック光ニューロチップの構成概念図である。Fig. 8(a)は発光素子アレイチップと受光素子アレイチップの間に液晶SLMをはさみこんだハイブリッド集積型、Fig. 8(b)は同じ半導体材料でSLMを構成したモノリシック集積型である。最

終形態は後者であろうが、材料・デバイス技術の成熟度から鑑て前者の研究が当面必要である。以下では、このような集積化に適したSLMについて述べる。

液晶SLMは、大規模アレイ化が比較的容易であるが応答速度がmsecオーダと遅いため、高速応答の材料の開発が進められている。近年研究が活発化している強誘電性液晶は、応答速度が数

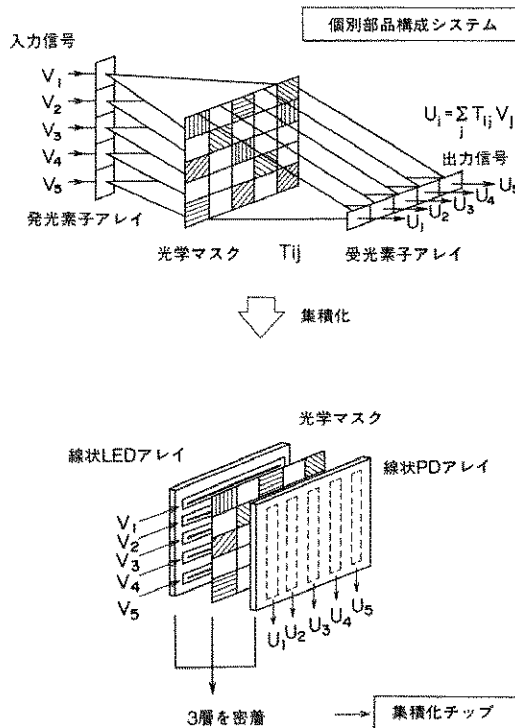


Fig. 7 光学的ベクトル・マトリクス乗算器の集積化の概念

Table 1 種々の空間光変調素子の諸特性

素子	光学効果	コントラスト比	スイッチング速度(sec)	アドレス方式	ピクセルサイズ	アレイサイズ
CCD-液晶	複屈折	$10^2$	$10^{-1}$	電気	$20\mu\text{m}$	$256 \times 256$
強誘電性液晶	複屈折	$10^2$	$10^{-4} \sim 10^{-6}$	電気	$17\mu\text{m}$	$64 \times 64$
CCD-QCSE	吸収	$10^1$	$10^{-10}$	電気/光	$70\mu\text{m}$	$16 \times 16$
磁性体薄膜(ファラデー効果)	複屈折	$10^3$	$10^{-7}$	電気	$76\mu\text{m}$	$128 \times 128$
PLZT/Si	複屈折	$10^2$	$10^{-6}$	電気	—	$12 \times 12$
マイクロチャンネルプレート	複屈折	$10^3$	$10^{-2}$	光	$10\text{ lp/mm}$	$16\text{mm } \phi$

10~100  $\mu$ s と高速で、しかもメモリ性を有している。現在 128×128 アレイ、フレームレート 30 msec の素子が発表されており<sup>(13)</sup>、今後の発展が期待される。液晶 SLM を光ニューロチップ内に集積化の際の問題点は、偏光板が必要なことである。この場合、光学的クロストークを抑えるために発光/受光アレイチップ間に狭む薄膜偏光子の厚さを  $\mu$ m オーダにする必要がある。これを回避する方法は、動的散乱モード (DSM)<sup>(14)</sup> を用いる事である。DSM 自体は、電流注入による乱流現象を利用しているため、コントラスト比が低く、動作速度も遅い等の欠点がある。これらの点を解

決するため、最近ネマチック液晶中にポリマーを分散させた光散乱性液晶複合体が開発された<sup>(15)</sup>。この場合、Fig. 9 に示すように液晶の常屈折率、異常屈折率が各々  $n_1, n_2$  の時ポリマーの屈折率  $n = n_1 > n_2$  とすることにより電流注入によらず電圧印加モードで散乱を有効に起すことができる。そのためスイッチング速度約 10 msec、コントラスト比 300:1 以上が得られており、上述の欠点が改善されている。半導体自体を液晶のセルとする技術等まだ解決すべき問題は多々あり今後の研究の発展が期待される。

集積化に適した SLM として強誘電体セラミク

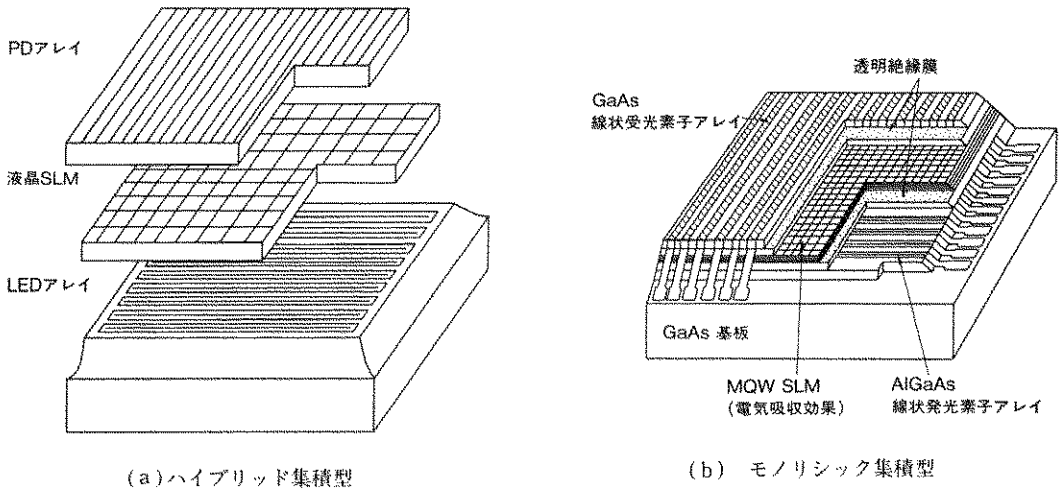


Fig. 8 ダイナミック光ニューロチップ概念図

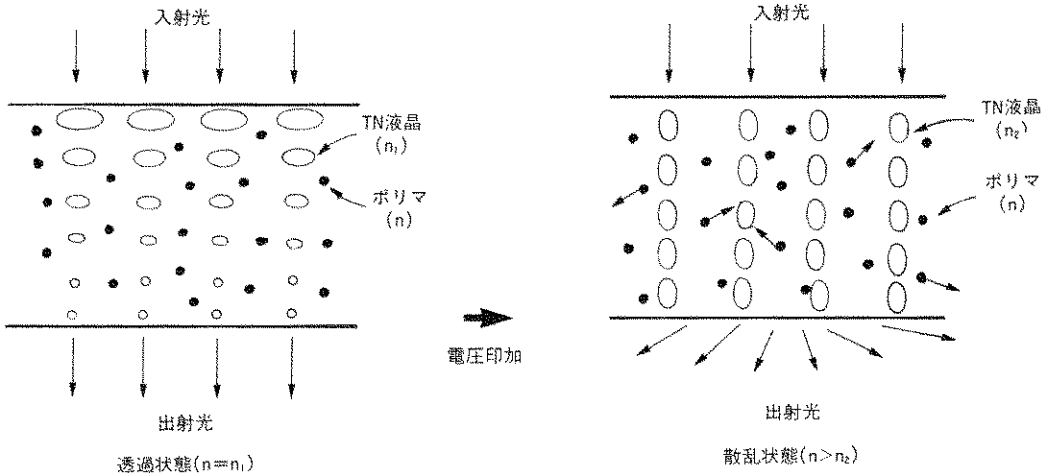


Fig. 9 光散乱性液晶複合体の動作原理

ス PLZT ( $\text{Pb}_{0.9}\text{La}_{0.1}(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})_{0.975}\text{O}_3$ ) がある。PLZT の電気光学効果を利用するわけであるが、特長としてこの PLZT 基板上に多結晶 Si を成膜し MOSFET などの電子回路を形成することができる点がある。現在、 $12 \times 12$  アレイでスイッチング時間  $10 \mu\text{s}$  のデバイスが得られている<sup>(16)</sup>。Fig. 10 は制御用フォトトランジスタを集積化した例である。受光素子アレイをさらに集積化することで光ニューロチップに適用可能であろう。

GaAs や InP などの III-V 化合物半導体における量子効果を用いれば  $100 \text{ psec}$  以下の超高速応答の SLM が可能である。また発光/受光素子と同じ材料系であるため集積化にも適している。Fig. 11 は、InP/InGaAs-MQW (多重量子井戸) における QCSE (量子閉じ込めシュタルク効果)<sup>(17)</sup>

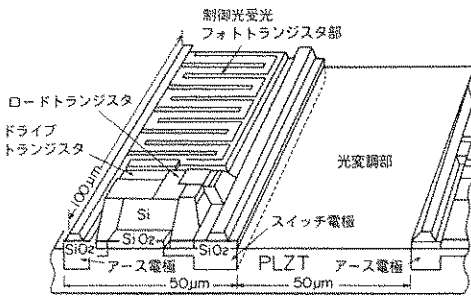


Fig. 10 PLZT/Si SLM 構成図

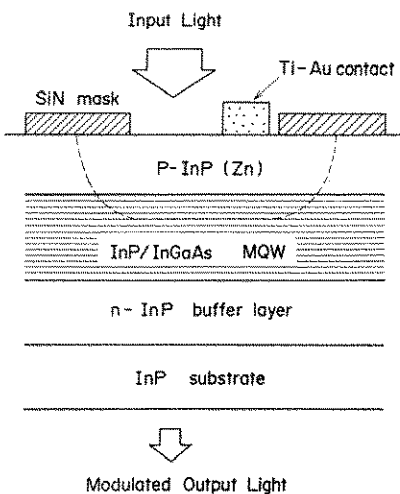


Fig. 11 QCSE を利用した MQW-SLM 構成断面図

を利用した SLM の構造断面図である<sup>(18)</sup>。MQW では電子/正孔が狭いポテンシャル中に閉じ込められているため強電界下でも励起子が解離しにくく、電界印加による励起子吸収ピークシフト (シュタルク効果) を観測することができる (QCSE)。励起子吸収スペクトルは非常に鋭いため電界印加による吸収変化はかなり顕著にあらわれ、MQW 層透過光の電圧による光強度変調が行える。Fig. 11 の素子では、集積化に適したプレーナ構造をとり  $3 \times 3$  アレイで変調度  $3 \text{ dB}$  を得ている。このような QCSE を利用した SLM の問題点は、コントラスト比が小さいこと、素子特性の温度変化依存性が大きいこと、などがあげられよう。

QCSE は一種の電気光学効果とみなせるが、いわゆる 3 次非線形光学効果の顕著な化合物半導体の研究も近年盛んになってきており、SLM への応用が期待されている。この場合光による光の変調となり、例えば、双方向からの光書き込み/読み込みによる光ニューロチップが考えられよう。3 次非線形光学定数の内重要な定数の一つは、材料の屈折率  $n$  の入射光パワー  $I$  に対する依存性をあらわす  $n_2$  である ( $n = n_0 + n_2 I$ )。この  $n_2$  は 3 次非線形光学定数  $\chi_3$  と

$$n_2 = \chi_3(\text{MKS}) / n_0 \epsilon_0$$

Table 2 種々の材料の非線形光学定数 (室温)

材 料	波 長 ( $\mu\text{m}$ )	$-n_2$ ( $\text{cm}^2/\text{kW}$ )	文献
HgCdTe	10.6	$5 \times 10^{-4}$	(a)
InSb	10.6	$1.1 \times 10^{-4}$	(b)
Si	1.06	$1.2 \times 10^{-7}$	(c)
GaAs(MQW)	0.86	0.2	(d)
GaInAs(MQW)	1.68	0.35	(e)
ZnSe	0.46	0.017	(f)

- (a) D. Craig & A. Miller, Opt. Acta **33** (1986) 397  
 (b) J. G. H. Mathew et al., IEEE J. Quantum Electron. QE-21 (1985) 94.  
 (c) R. K. Jain & R. C. Lind, JOSA **72** (1983) 647.  
 (d) D. A. B. Miller et al, Appl. Phys. Lett., **42** (1983) 925.  
 (e) K. Tai et al., Appl. Phys. Lett., **51** (1987) 86.  
 (f) J. E. Pitts et al., SPIE vol. 881 Optical Computing. & Nonlinear Materials (1988) P. 107.

の関係にある<sup>(19)</sup>、Table 2 に種々の材料の  $n_2$  の値を掲げる。最近、 $n_2$  の実験結果を良く説明するブラズマ理論が開発され<sup>(20)</sup>、結晶成長技術の進展とあいまって材料設計に重要な指針を与えている。

さて、上述の材料を用いる場合発光/受光素子材料である GaAs 或は、Si 上にエピタキシャル成長する必要がある。従来このような異種材料のエピタキシャルは格子不整合が大きくて不可能であるとされていた。ところが、近年スーパーヘテロエピタキシャルと呼ばれる(あるいは HMM: Highly Lattice-mismatched Heteroepitaxy とも呼ばれる)技術が開発され格子不整合が大きくてしかも nonpolar 材料(Si 等)上の polar 材料(GaAs 等)上の成長が可能となってきた<sup>(21)</sup>。Si 上に GaAs/AlGaAs-MQW の SLM を形成した報告例<sup>(22)</sup>や、GaAs 上に InP 系の半導体レーザを形成した例<sup>(23)</sup>などが報告されており、Table 3 に幾つかの報告例を示す。この技術により、GaAs 発光素子の II-VI 化合物半導体 SLM の集積化のみならず、Si 電子素子との集積化も可能となろう。転位密度の低減や熱膨張係数の相違など克服しなければならぬ問題はあがるが、将来有望な技術である。

Table 3 種々のスーパーヘテロエピタキシャルの例

エピタキシャル層	基板	備 考	文献
GaAs	Si	MQW-SLMを形成	(a)
InP	Si	太陽電池形成	(b)
InSb	Si	CCD用	(c)
Si	GaAs	転位密度少ない。	(d)
InP	GaAs	半導体レーザ形成	(e)
GaAs	InP	ヘテロバイポーラトランジスタ形成	(f)

(a) 本文中 [22] 参照

(b) C. J. Keavney et al., Appl. Phys. Lett., 54 (1989) 1139.

(c) J. -I. Chyi et al., Appl. Phys. Lett. 54 (1989) 1016.

(d) K. Tamamura et al., Appl. Phys. Lett. 54 (1989) 347.

(e) 本文中 [23] 参照

(f) S. Agarwala et al., Appl. Phys. Lett. 54 (1989) 1151.

## 6. おわりに

以上概観してきた様に、光の並列性を完全に生かすことのできる光デバイスはまだ発展途上にあるといえる。今後は、単体素子の特性向上は勿論のこと、地道ではあるがアレイ化技術にも力を注ぐ必要があろう。また、材料技術自体も超格子やスーパーヘテロエピタキシャル等のように材料設計が自由に行える段階にきているが、まだデバイスレベルへの応用は、始まったばかりである。今後結晶成長技術、プロセス技術等の一層の発展が望まれる。

## 参考文献

- 1) 甘利, 「神経回路網モデルとコネクショニズム」, 東京大学出版, 1989.
- 2) D. E. Rumelhart, et al., *Parallel Distributed Processing* Vol I, II, MIT Press (1986).
- 3) 久間, bit, 20, No. 2, (1988), 155.
- 4) N. H. Farhat et al., Appl. Opt., 24(1985), 1469.
- 5) J. Ohta et al., Appl. Opt., 28(1989) 24 26.
- 6) 追田他, '89 秋応用物理学会予稿 p. 793.
- 7) 伊賀, 光学 18 (1989) 352.
- 8) K. Kojima et al., Appl. Phys. Lett., 50 (1987) 1705.
- 9) K. Kojima et al., Appl. Phys. Lett., 52 (1988) 942.
- 10) M. Takeda and T. Kubota, Optical Computing, 1989, p. 164.
- 11) M. R. Taghizadeh et al., Appl. Phys. Lett., 54 (1989) 1492.
- 12) J. Ohta et al., Int'l Joint Conf. Neural Networks, II-477, Washington D. C., 1989.

NEW GLASS Vol. 4 No. 3 1989

13) N. Collings et al., Spatial Light Modulators and Applications, 1988, p. 142.

14) 岡野, 小林共編, 「液晶=応用編」, 裳華房 1985.

15) 滝沢他, '88 秋応用物理学会予稿 p. 711.

16) J. H. Wang et al., Spatial Light Modulators and Applications, 1988, p. 124.



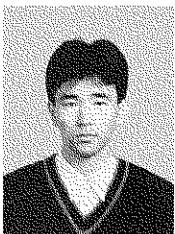
- 17) D. A. B. Miller et al., Phys. Rev., B32 (1985) 1043.
- 18) M. A. Z. Rejman-Greene et al., Photonic Switching., 1989, p. 72.
- 19) H. M. Gibbs, *Optical Bistability: Controlling Light with Light*, Academic Press, 1985.
- 20) L. Banyai & S. W. Koch, Z. Phys. B, 63 (1986) 283.
- 21) 西永, 電子情報通信学会誌, 72 (1989) 997.
- 22) K. W. Goossen et al., Quantum Wells for Optics & Optoelectronics, 1989, p. 112.
- 23) 上杉他, '89 秋応用物理学会予稿 p. 911.

〔筆者紹介〕



太田 淳 (おおた じゅん)  
 昭和 58 年, 東京大学工学部大学院  
 修士課程物理学専攻修了。  
 同年, 三菱電機(株)に入社。  
 現在, 同社中央研究所量子エレクトロニクス研究部第 1 グループに所属。GaAs 系化合物半導体結晶成長, 光電子集積回路および光コンピュータの研究に従事。

〔筆者紹介〕



新田 嘉一 (にいた よしかず)  
 昭和 63 年 東北大学工学部大学院  
 修士課程電子工学専攻修了。  
 同年, 三菱電機(株)に入社。  
 現在, 同社中央研究所量子エレクトロニクス研究部第 1 グループに所属。光コンピュータの研究に従事。

〔筆者紹介〕



久間 和生 (きゅうま かずお)  
 昭和 52 年, 東京工業大学大学院博士課程電子物理学専攻修了。  
 同年, 三菱電機(株)に入社。以来, 同社中央研究所勤務。  
 60 年~61 年, 米国カリフォルニア工科大学客員研究員。  
 現在, 同社中央研究所量子エレクトロニクス研究部第 1 グループマネージャ。光ファイバセンサ, 半導体レーザ, 光コンピュータの研究に従事。工学博士。

Abstract

This paper reviews recent development of devices and materials for optical neurocomputers. First, optical implementations of neural network models are shortly introduced. Second, array emitters are mentioned. Third, the integrated optical neurochips developed in our group are described. Finally, spatial light modulators (SLMs), which is key devices in optical neurocomputers, are described in the view points that they are applied to the optical neurochips.