

最近の技術から

感度可変受光素子アレイを用いた光ニューロデバイス

原 邦彦・新田 嘉一・追田 真也・久間 和生

三菱電機(株)中央研究所 〒661 尼崎市塚口本町 8-1-1

1. はじめに

光ニューロコンピュータの実現には、光技術とエレクトロニクスの融合が重要である。そして受光素子はこの両者のインタフェースの一つとして不可欠である。ここでこの受光素子の感度を可変にすれば、単なる光信号の検出以上の役割を持たせられる。例えば光配線のダイナミック制御や感度を介した演算等が考えられる。そこで我々は MSM (metal-semiconductor-metal) 構造を用いた感度可変受光素子 (VSPD) を提案し、そのアナログ可変感度機能や感度の値を素子内に保持するアナログメモリ機能を実証してきた。本稿では、この VSPD の高い機能性を活かした光ニューロデバイスについてまとめる。

2. アナログ記憶機能付き光ニューロチップ

図1に光ニューロチップの構造を示す¹⁾。光ニューロチップは、メモリ機能を有する感度可変型受光素子 (VSPD) アレイと発光素子 (LED) アレイから構成されている。これらのアレイデバイスが、GaAs 基板上に3次元的に集積化されている。チップ全体の大きさは7 mm 角、1チップでニューロン数 32、シナプス結合 1024 個を実現している。

光ニューロチップの基本機能は、学習により外界から新たな知識を獲得し、その結果をチップ内部に VSPD の光検出感度としてニューロン間のシナプス結合荷重を蓄積できることにある。さらに記憶されたシナプス結合行列とニューロンの状態ベクトルとの積和演算を、光の持つ空間並列性を利用することにより並列に行うことが

できる。これらすべての演算処理は、アナログ信号で行うことができるため、光ニューロチップは、本質的にアナログ情報処理であるニューラルネットワークに適している。

次にアナログメモリの動作原理を示す。書き込みモードでは、光ニューロチップの LED から一定の発光強度の光を VSPD に入射しながら、シナプス結合強度に相当する電圧を VSPD に印加する。その際に VSPD の吸収層内部にフォトキャリアが蓄積され、VSPD の電極近傍に内部電界が発生する。この内部電界は、半導体内部の不純物準位または界面準位でのキャリアのトラップが関与しているため、電圧をオフにした後も数十分間にわたって保持される。読み出しモードでは印加電圧をオフにした後、LED から読み出し光を VSPD に入射する。このとき発生する光電流がメモリ出力に相当する。以上の方法により光ニューロチップは光-電気書き込み、光読み出しのメモリとして動作させることができる。

メモリ機能を利用することにより、光ニューロチップは、外部メモリを用いることなしに学習を行うことができる。これまでに光ニューロチップを用いて、誤差逆伝搬学習則に基づく学習システムを実現し、パターン分類問題に適用した。さらにニューロン数を増加させることにより大規模なニューラルネットを構成することができ、より複雑な情報処理を実現することができる。

3. 人工網膜チップ

図2に VSPD 2次元アレイを用いた人工網膜チップの構成を示す²⁾。Ti/Au ショットキー電極を用いた MSM-VSPD 4,096 個が Si-GaAs 基板上に集積されている (画素数 64×64 に対応)。画像を効率的に受光するために各 VSPD は近接して配置され、またすべての電極間が受光部として機能するように設計されている。パッドを含めたチップ全体の大きさは 14.3 mm 角である。

次に動作原理を示す。各 VSPD の光感度は行ごとに印加される制御電圧によりアナログ的に変えられる。一方、出力電流は各列ごとに加えられて出力される。この制御ベクトルと画像の積和演算によりさまざまな画像処

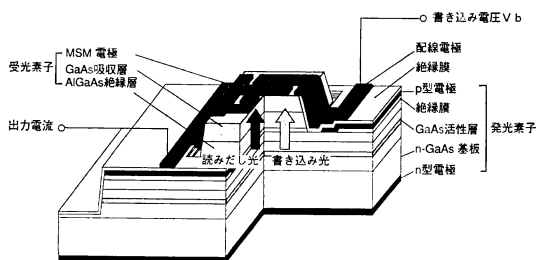


図1 光ニューロチップの構造

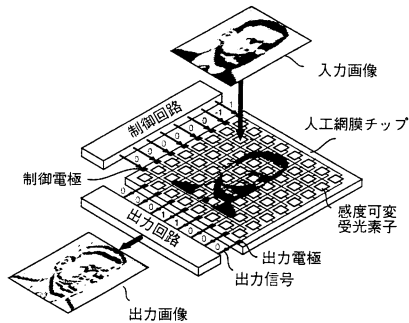


図2 人工網膜チップの構成

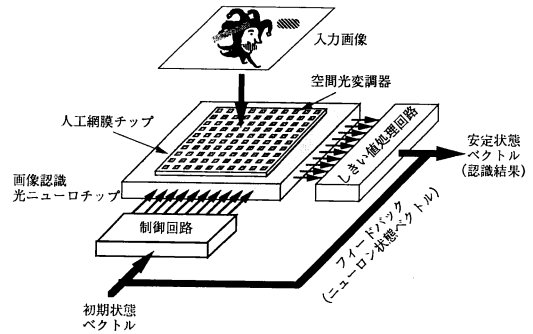


図3 画像認識光ニューロチップの構成

理が実現される。例えば、1行目に $+1V$ 、2行目に、 $-1V$ を印加すると2行の明るさの差が出力される。この制御電圧を行方向にシフトしていけば、輪郭が検出された画像が行ごとに出力される。このように入力画像が照射されればその検出と処理が同時に実行され、結果が電気信号として出力される。そして制御電圧を変えるだけで、画像の検出、指定パターンの検出、フーリエ変換、画像の記憶、1次元信号への圧縮等が実行できる。また1回の積和に要する時間は $3\mu s$ なので、画像全体は約 $200\mu s$ で処理することが可能である。現在応答は各VSPDのキャパシタンスで制限されているため、素子の小型化によりいっそうの高速化が期待できる。

また、1次元に圧縮された信号をニューラルネットワークに入力すればパターン分類に応用できる。例えばすべての制御電圧を $+1V$ にしたときは、列方向への射影が出力される。このような単純な圧縮を用いるだけでも、ひらかな46文字、アルファベット26文字の分類が可能であることを確認している。ニューラルネットワークとして光ニューロチップ等の専用ハードウェアを用いれば数 μs での分類が可能である。

4. 画像認識光ニューロチップ

2章で述べた光ニューロチップは、シナプス結合行列を電気信号で、ニューロンの状態ベクトルを光信号で入力した。しかしまた、光ニューロチップは、シナプス結合行列を光信号で、状態ベクトルを電気信号で入力することもできる。したがって、チップに画像を2次元情報そのまま直接光で入力でき、実時間で画像認識できるシステムが構築できる。

図3に、画像を直接入力できる画像認識光ニューロチップの構成を示す³⁾。人工網膜チップ上に空間光変調器(SLM)を積層した構造で、入力画像はSLMにより強度変調された後、人工網膜チップにシナプス結合行列と

して入力される。ニューロンの状態ベクトルは、人工網膜チップの制御電極に印加される制御電圧のパターンとして入力される。状態ベクトルとシナプス結合行列との積和が光電流として得られ、これをしきい値処理してニューロン状態を更新する。更新されたニューロン状態を制御電極にフィードバックして、相互結合型ニューラルネットワークを構成している。

次に、画像認識の原理について述べる。ホップフィールドモデルのような相互結合型ニューラルネットワークでは、ニューロン状態は更新を繰り返して安定状態に収束する。そこで、同じニューロン初期状態から始めて、収束する安定状態が記憶画像によって異なるようにSLMの光透過率パターンを設計して、画像を記憶する。即ち、記憶画像に関する知識はSLMに蓄積される。

SLMの光透過率パターンはシミュレーテッドアニーリングなどの学習により設計される。ニューロンの初期状態は、例えばランダムパターンを用いる。現在、SLMの代りに光学マスクを用いて、画素数 8×8 、記憶画像数3のチップが試作され、曖昧な入力画像でも正しく認識する機能が実証されている⁴⁾。

5. おわりに

光技術の高密度配線能力、画像直接処理能力とVSPDの高い機能性を活用した光ニューロデバイスについて報告した。今後は各デバイスの高性能化、大規模化だけでなく、これらのデバイスを多数組み合わせさせたネットワークシステムの構築も課題の一つである。

文 献

- 1) Y. Nitta, *et al.*: IEEE Photon. Technol. Lett., 5 (1993) 67.
- 2) E. Lange, *et al.*: 1992年電子情報信学会春季大会, d-83 (1992).
- 3) W. Zhang, *et al.*: Opt. Lett., 17 (1992) 673.
- 4) 追田真也, ほか: 1992年信学会秋季大会, SD-2-3(1992).

(1993年3月27日受理)