

非線形アナログ集積回路と反応拡散チップ ～ 反応拡散系をシリコンチップ上に実現する～

浅井 哲也 砂山 辰彦 西宮 優作 雨宮 好仁

北海道大学 工学部 電子工学科

〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
Phone : 011-706-6080, Fax : 011-707-6585

E-mail: asai@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

反応拡散系を模擬する「シリコン反応拡散チップ」の概念を提唱する。また、反応拡散チップ開発の一環として「Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応を模擬するチップ」の一構成法(セルオートマトンの原理に基づく反応拡散チップ)を提案し、SPICEシミュレーションによりその基本動作特性を示す。

反応拡散系, シリコン反応拡散チップ, Belousov-Zhabotinsky 反応, セルオートマトン

Nonlinear Analog Integrated Circuits and Reaction-Diffusion Chips

Tetsuya Asai, Tatsuhiko Sunayama, Yuusaku Nishimiya, and Yoshihito Amemiya

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628, Japan

Phone : 011-706-6080, Fax : 011-707-6585

E-mail: asai@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

We propose silicon reaction-diffusion chips that implement dissipative and autocatalytic reaction systems. In this paper, we construct such a chip on the basis of cellular-automata that imitate the Belousov-Zhabotinsky reaction. Essential properties of the chip are evaluated by SPICE simulations.

reaction-diffusion systems, reaction-diffusion chip, Belousov-Zhabotinsky reaction,
cellular automata

1 はじめに

Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応で観測される円形波形やらせん波は、散逸構造の代名詞となっており、反応拡散モデルにより記述できる代表的な現象である [1, 2]。反応拡散系が示すダイナミクスは多種多様であり、線形システムでは決して起こりえないような「生き生きとした」現象を観測することができる。これらの現象の本質を見い出せれば、新しい情報処理形態の発見と応用につながる可能性がある。そこで我々は、散逸構造を人工的に生み出すシリコン反応拡散系（反応拡散チップ）の開発を通して、反応拡散系の新しい機能・情報処理形態を探ることとした。本稿ではその一環として「BZ 反応を模擬するセルオートマトン反応拡散チップ」の設計を行い、その基本動作の確認を目的とする。

2 セルオートマトンによる BZ 反応のモデル化

BZ 反応系は、化学反応と分子拡散をメカニズムとする「反応拡散モデル」で記述できる。BZ 反応の代表的なモデルとしては、ブリュセレータやオレゴネータなどが挙げられる [3, 4]。これらのモデルは、以下のような反応拡散方程式

$$\frac{\partial u_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D_i \nabla^2 u_i(\mathbf{r}, t) + f_i(u_i(\mathbf{r}, t)) \quad (1)$$

$(i = 1, 2, \dots, N)$

で記述できる (u_i は反応種の濃度, \mathbf{r} は空間, t は時間, D_i は拡散定数)。ここで f_i は反応種により異なる反応項であり、その非線形性が系の時空間構造の特徴を決定する。また、反応拡散系の基本モデルとして (1) を簡略化した以下の二変数反応拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= D_u \nabla^2 u + f(u, v) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= D_v \nabla^2 v + g(u, v) \end{aligned}$$

がよく用いられる。ブリュセレータやオレゴネータもこの簡略式で表すことができる。

反応拡散基本モデルの動的挙動は、 $f(u, v) = 0$ と $g(u, v) = 0$ で表される曲線（ヌルクライン）

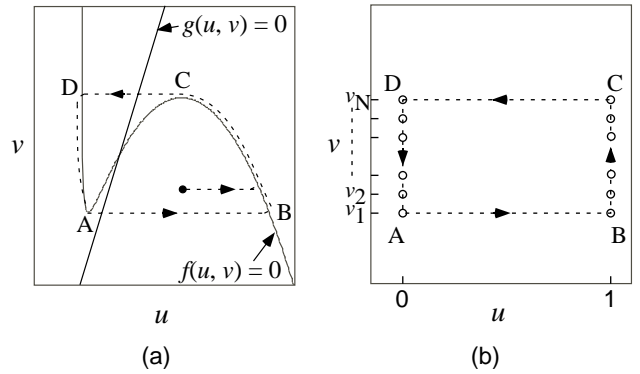
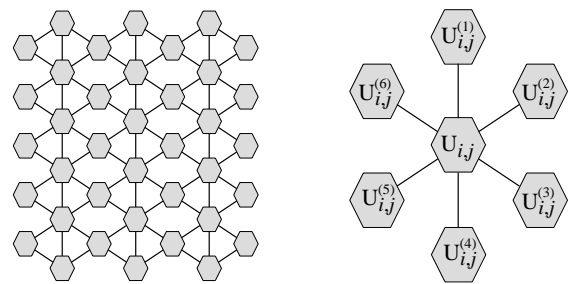


図 1 反応拡散基本モデルの動的挙動とセルオートマトンによるモデリング



(a) cells on hexagonal lattice (b) cell $U_{i,j}$ and its neighbors

図 2 セルオートマトン（六角格子配置）

から推測できる。図 1(a) に、典型的な基本モデルのヌルクラインの例を示す。この例では、 g ヌルクラインは摂動に対して安定であるが、 f ヌルクラインは負性抵抗に相当する領域があり、わずかな揺らぎに対して不安定である。したがって、両ヌルクラインの交点 (A) も不安定であり、刺激が加わると以下のプロセスをとる: i) f ヌルクライン上の点 (B) に移る (興奮期), ii) f ヌルクライン上を点 (C) まで移動する, iii) 点 (C) に達すると、 f ヌルクライン上の点 (B) に移る, iv) f ヌルクライン上を定常解である交点 (A) に向かって移動する (不応期), v) 交点 (A) に達した時点で定常状態となる (休止状態)

BZ 反応系においても、自己触媒作用による化学振動が発生して上記の休止・興奮・不応の三つの状態が循環する。このプロセスを、セルオートマトンの手法により次のようにモデル化する [5]: i) 興奮の有無を表す活性変数を二値 ($u = 0$ または 1) 表し、不応の度合いを表す抑制変数を多値 (v_1, v_2, \dots, v_N) で表す [図 1(b)], ii) 一つの活性因子と抑制因子からなる「セル」を定義

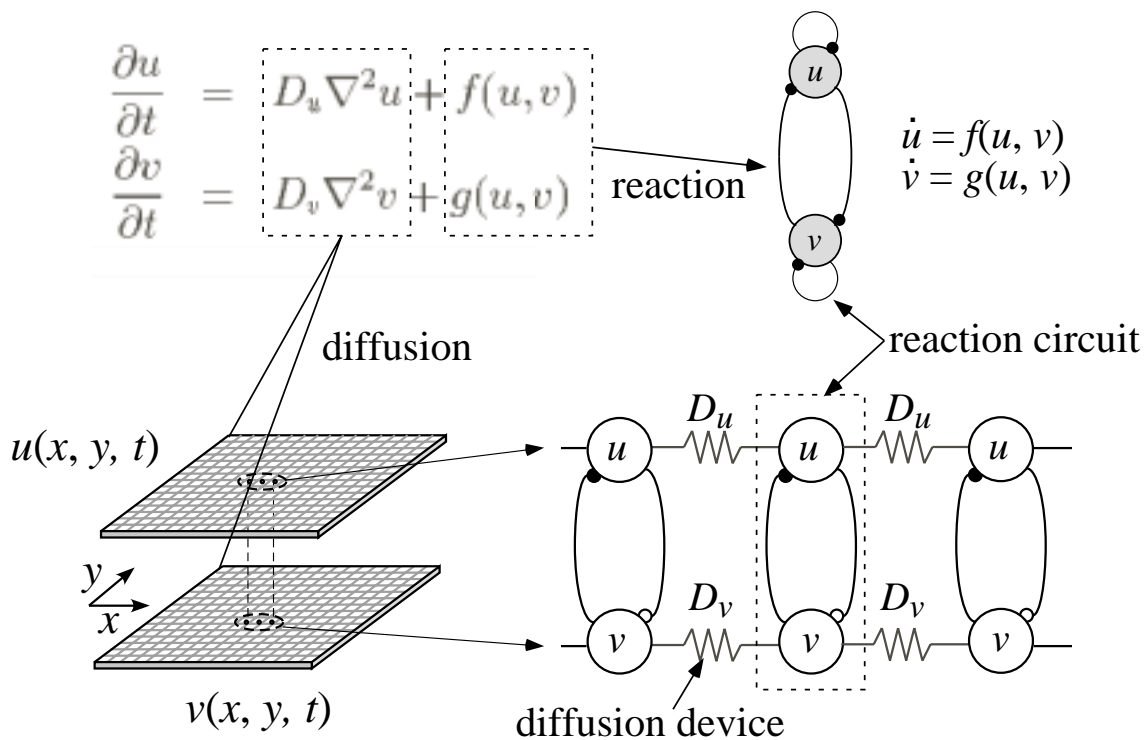


図 3 反応拡散基本モデルの構造と反応拡散チップの概要 (反応回路と拡散デバイス)

し、これを正方または六角格子状に敷き詰めて配置する [図 2(a)], iii) 各セルは隣接周囲セル [図 2(b)] の状態を見ながら遷移規則によって自分の興奮状態を決定する, vi) セルの状態遷移は時間ステップごとに一斉に生じるとする。図 1(b) に示したように、セルは休止状態 (A) から出発し、興奮 (B-C) と不応 (C-A) を経て休止状態 (A) に戻る。遷移規則に応じて振動モード (周囲に興奮セルがあれば遷移) と興奮モード (休止状態から興奮状態に自動遷移) のいずれか一方が生じる。

3 セルオートマトン反応拡散チップの構成

反応拡散チップは、反応拡散基本モデルをシリコンチップ上に実装・集積化した「シリコン反応拡散系」である。自然界の反応拡散現象と同様に、反応拡散チップの演算原理は本質的に並列アーキテクチャに基づくものである。そのために、図 3 に示す反応拡散基本モデルの空間構造 (拡散場と拡散場間の非線形相互作用) をチップ上に具

現化する。同図に示すように、反応拡散チップの基本デバイスは、i) 反応種のダイナミクスを生成するための「反応回路 (reaction circuit)」と、ii) 「拡散デバイス (diffusion device)」である。チップ上に反応回路を正方または六角格子状に敷き詰めて配置し、拡散デバイスを通してそれらを互いに局所結合させて反応拡散チップを構成する。

前節で示したセルオートマトンのアーキテクチャは、上記反応拡散チップのアーキテクチャに沿うものである。反応回路はセルに相当し、拡散デバイスはセルの周囲の状態に応じた遷移規則の中に取り込まれている。したがって、セルオートマトンの原理に基づいた「セルオートマトン反応拡散チップ」は、(遷移ルールを含む) セルを電子回路化しチップ上に敷き詰めて構成する。

セルオートマトンチップが模擬できる反応拡散系の空間規模は、1チップに搭載できるセル回路の数によって決まる。すなわち、大規模なセルオートマトン反応拡散系を模擬するためには、コンパクトな構成のセル回路を開発しなければならない。しかし、既存のデジタルアー

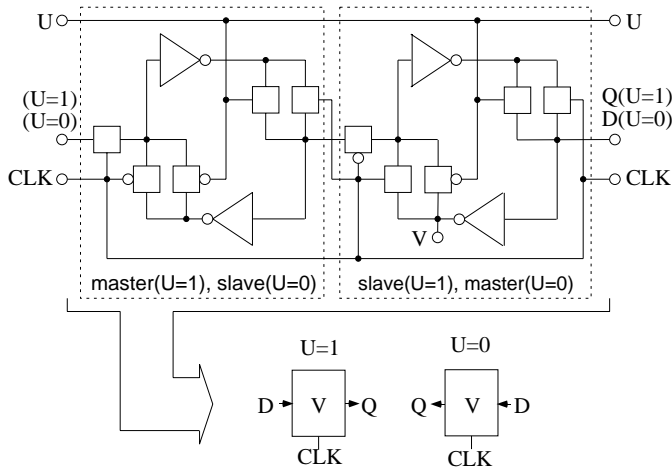


図 4 二相フリップフロップを用いた双方向データ転送レジスタ

キテクチャに基づいて回路設計を行うと、1チップに搭載できるセル回路の数は極めて少なくなる。そのため本稿では、セルの一部にアナログ回路を導入した「アナログ・デジタル混載型のセルオートマトン反応拡散チップ」の開発を目指すことにした。

4 ν MOSデバイスによるBZ反応回路

提案するセルオートマトン反応拡散チップの単位セル回路を図4から図7に示す。一つのセル回路は、i) アップ・ダウンシフトレジスタ(図4と5), ii) 遷移しきい回路(図6と7)から構成される。この単位セル回路を空間に敷き詰めて、セルオートマトン反応拡散チップを構成する。

アップ・ダウンシフトレジスタは、抑制変数の値(多値)を記憶するとともに、それをクロックにあわせて変化させる。図4に示した回路は、マスター・スレーブ型二相スタティック・フリップフロップの動作原理に基づいた「双方向にデータを転送可能なレジスタ」である。U="1"のときには、データは図の左から右へ向かって転送され、U="0"のときにはデータの流は逆になる。このレジスタをN段組み合わせたアップ・ダウンシフトレジスタを図5(a)に示す。4段のレジスタを組み合わせたアップ・ダウンシフトレジスタの動作例を図5(b)に示す。初期状態で

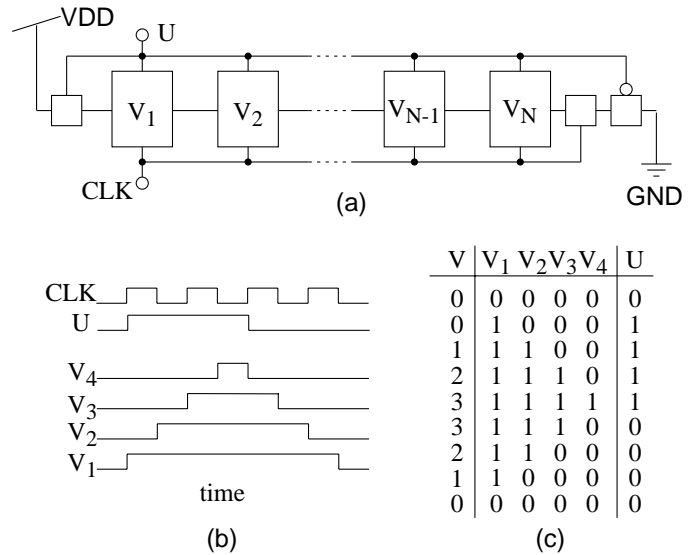


図 5 アップ・ダウンシフトレジスタ. (a) N 段の双方向データ転送レジスタからなるシフトレジスタ; (b) N=4における動作例; (c) レジスタの状態とV値(多値)の対応.

は、全てのレジスタは“0”を保持しているとする ($V_{1,2,3,4} = "0"$)。U="1"の場合、データはクロックに合わせて図の左から右へ転送される。シフトレジスタの左端は電源("1")に固定されているため、“1”が右方向へ転送される。U="0"の場合はデータフローは逆になり、シフトレジスタの右端("0")のデータが左方向に転送される。このシフトレジスタの状態を単位セルの抑制変数の値(V)とする[図5(c)]。

遷移しきい回路は、単位セルの活性変数を記憶すると同時に、周囲の状態を自分の状態とから次の自分の状態を決定する。図6に、周囲のセルのuの状態($u^1 \sim u^6$)と自分の状態を比較するしきい回路を示す。この回路は、 ν MOSトランジスタ[6](M1とM2)を対とするアナログ差動アンプである。 ν MOSトランジスタを用いることにより、同等の機能を持つデジタル回路よりも回路構成をコンパクトにすることができる。この回路構成では、回路の論理出力(0/1)は

$$V_{OUT} = H\left(\sum_{i=1}^6 u^i + V_{MODE} - V_1 - V_2 - 0.5\right),$$

で表される[Hはステップ関数, V_{MODE}は論理制御入力(0/1), V_{1,2}は自分のレジスタの論理出力(0/1)]. V_{MODE}は、興奮モードと振動モー

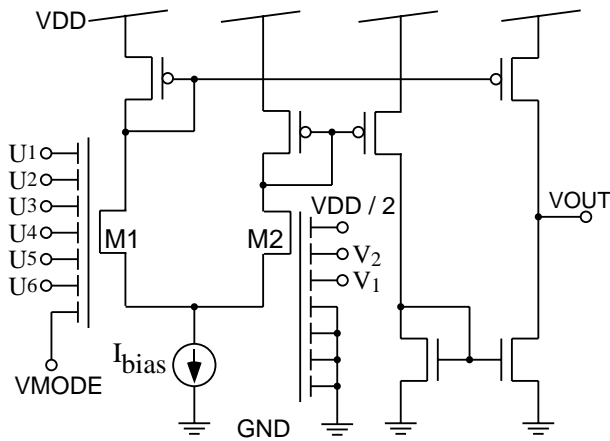


図 6 ν MOS トランジスタを用いたアナログコンバータ(しきい回路)

VMODE = 0			VMODE = 1		
V	THRESHOLD		V	THRESHOLD	
	V ₁	V ₂		V ₁	V ₂
3	x	x	3	x	x
2	x	x	2	x	x
1	x	2	1	x	1
0	1	1	0	0	0

(a) Excitation

(b) Oscillation

図 8 遷移しきい回路の遷移ルール ($U = 0 \rightarrow 1$ の遷移に必要な周囲の興奮状態のセル数)

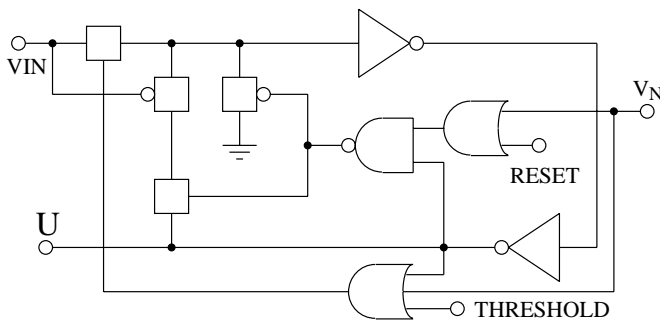


図 7 遷移判定・メモリ回路 (U の値を保持)

ドの切り替えを行う制御入力である。興奮状態“1”の周辺セルの数と VMODE の和がレジスタ (V_1 と V_2) が保持している“1”の数よりも多くなったときに、VOUT が“1”になる。この出力 (VOUT) は、図 7 に示す遷移判定回路に与えられる (VIN 端子と接続する)。遷移判定回路は、セルの活性変数 (U) を記憶するレジスタと遷移規則を決めるロジック回路で構成される。図 8 に、遷移しきい回路の遷移ルール (休止状態にある U が興奮状態に遷移する条件) を示す。しきい回路の制御入力 VMODE が“0”の場合、興奮モードとなり、VMODE が“1”の場合は振動モードとなる。また、各モードでの遷移規則 (休止状態から興奮状態に遷移するために必要な興奮状態“1”の周辺セルの数) は、遷移判定回路の THRESHOLD 端子をシフトレジスタの V_1 または V_2 端子のどちらかに接続することで切り替えられる。

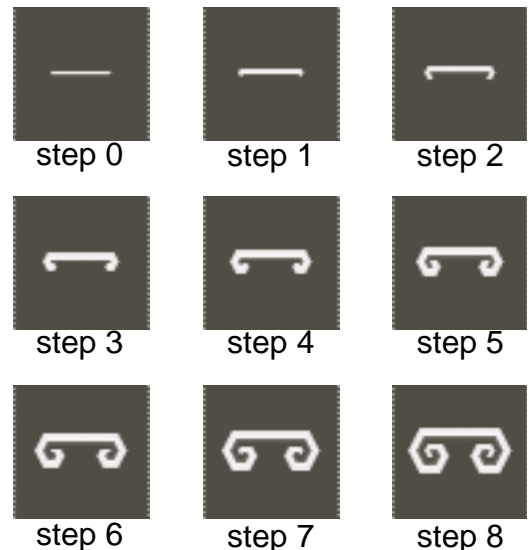


図 9 セルオートマトン反応拡散チップの動作シミュレーション例 1 (螺旋波)

5 動作シミュレーション結果

50×50 の単位セル回路を六角格子状に配置したセルオートマトン反応拡散チップを想定して HSPICE シミュレーションを行った。

図 9 に、 $N=3$, VMODE=“0” (興奮モード) として THRESHOLD 端子をシフトレジスタの V_1 と接続 (遷移なし) したセルオートマトン回路の動作例を示す。各セルの状態はグレースケールで表してある (白: 興奮, 黒: 休止)。初期状態として、休止期のセルが不応期のセルと興奮期のセルの二つに同時に接するような状態を与えた (図 9 の step 0)。不応期のセルに接したセ

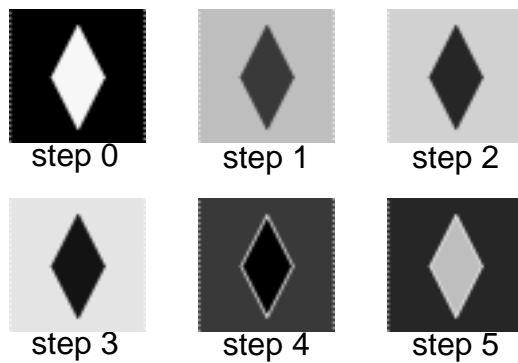


図 10 セルオートマトン反応拡散チップの動作シミュレーション例 2(ネガ・ポジ反転, 輪郭抽出)

ル(初期状態の白いバー直下のセル群)は興奮が抑制されており、抑制の強さに応じて興奮・不応・休止のいずれの状態もとれる。これらのセルが興奮または休止の状態をとった場合、端点が回転して BZ 反応に特徴的な螺旋波が発生することを確認できた。なお、螺旋の歪みはセル間の相互作用が辺で接するセルに制限されることから生じたものである。

図 10 に、振動モードの動作シミュレーション例を示す。 $N=4$, $V_{MODE}=“1”$ として THRESHOLD 端子をシフトレジスタの V_2 と接続した(遷移あり)。初期パターンを図 10 の step 0 に示す。この初期パターンが 2 ステップ後に反転(ネガ・ポジ反転)し、4 ステップ後に初期パターンの輪郭部分に位置するセルが興奮状態となることが確認できた(輪郭抽出)。このような輪郭抽出処理は BZ 反応でも観測されており [7]、コンピュータやビジョンチップなどが行う輪郭抽出とは全く異なった情報処理機構に基づくものである。

6 まとめ

セルオートマトンにもとづくアナログ-デジタル混載型反応拡散チップの設計を行い、SPICE シミュレーションによりその基本動作確認を行った。提案したセルオートマトン回路は、空間加算(しきい・遷移判定)をアナログ回路(ν MOS トランジスタを使用)で行い、加算値の保持をデジタル回路(アップ・ダウンシフトレジスタ)で行う形式である。

離散時間で動作するセルオートマトンモデル

の導入により、チップと既存の計算機との接続が容易になる(たとえば任意の時間に動作を停止させて系の状態を確認できる)。そのため、提案したチップは反応拡散系の理解を深める上で有用なツールとなりうる。それに加えて、反応拡散モデルに基づく機能センサや前処理演算システムにも応用できるものであって、脳型コンピュータへの情報入力デバイスとして新しい分野を拓く可能性を持っている。

参考文献

- [1] R. J. Field and M. Burger, *Oscillations and travelling waves in chemical systems*. John Wiley & Sons, Inc., 1985.
- [2] G. Nicolis and I. Prigogine, *Self-organization in nonequilibrium systems — from dissipative structures to order through fluctuations*. John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- [3] I. Prigogine and R. Lefever, "Symmetry breaking instabilities in dissipative systems. II," *J. Chem. Phys.*, Vol. 48, pp. 1695-1700, 1968.
- [4] R. J. Field and R. Noyes, "Oscillations in chemical systems. IV. limit cycle behavior in a model of a real chemical reaction," *J. Chem. Phys.*, Vol. 60, pp. 1877-1884, 1974.
- [5] M. Gerhardt, H. Schuster and J. J. Tyson, "A cellular automaton model of excitable media," *Physica D.*, Vol. 46, pp. 392-415, 1990.
- [6] T. Shibata and T. Ohmi, "A functional MOS transistor featuring gate-level weighted sum and threshold operations," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 39, pp. 1444-1455, 1992.
- [7] L. Kuhnert, K. I. Agladze, V. I. Krinsky, "Image processing using light-sensitive chemical waves," *Nature*, Vol. 337, pp. 244-245, 1989.