



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0138642
(43) 공개일자 2023년10월05일

- | | |
|---|--|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 <i>G02F 1/135</i> (2006.01) <i>G02F 1/1335</i> (2019.01)
 <i>G02F 1/1337</i> (2006.01) <i>G02F 1/1343</i> (2006.01)
 <i>G06N 3/063</i> (2023.01)</p> <p>(52) CPC특허분류
 <i>G02F 1/135</i> (2013.01)
 <i>G02F 1/133528</i> (2021.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2022-0036464
 (22) 출원일자 2022년03월24일
 심사청구일자 2022년03월24일</p> | <p>(71) 출원인
 충남대학교산학협력단
 대전광역시 유성구 대학로 99 (궁동, 충남대학교)</p> <p>(72) 발명자
 유정선
 대전광역시 유성구 봉명서로20번길 62(봉명동)
 김중현
 대전광역시 유성구 봉명서로20번길 62(봉명동)</p> <p>(74) 대리인
 김원준</p> |
|---|--|

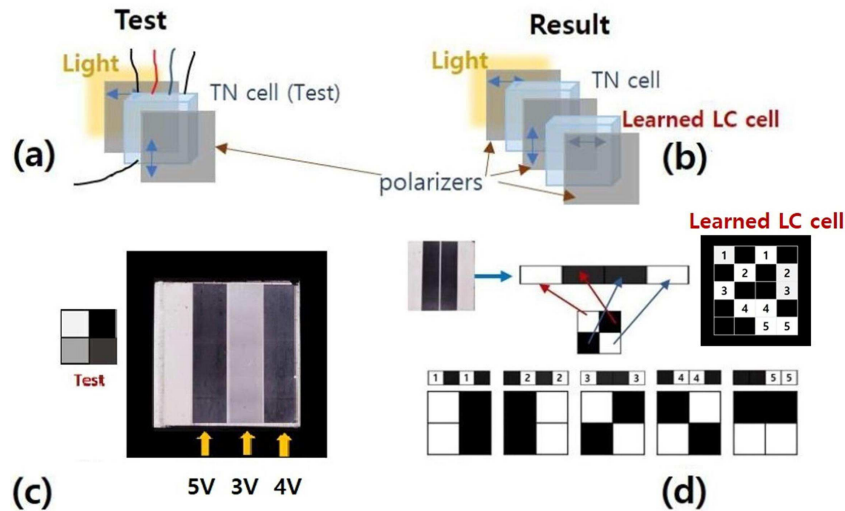
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 액정을 이용한 시냅스 소자 및 이를 이용한 뉴로모픽 소자

(57) 요약

본 발명은 멀티레벨 특성과 단기 기억 및 장기 기억 특성에 의한 시냅스 가소성을 나타내며, 소모 전력이 낮고 크기가 작아 뉴로모픽 소자에 유용하게 사용할 수 있는 시냅스 소자에 관한 것으로, 보다 상세하게는 한 쌍의 교차 편광판; 및 상기 한 쌍의 교차 편광판 사이에 위치하며 각각 전극이 형성된 대향한 기관 사이에 강유전성 액정물질이 봉입된 액정셀을 포함하며, 상기 기관에 가해지는, 상기 강유전성 액정물질의 반응시간보다 짧은 주기를 갖는 펄스신호에 의해 시냅스 가중치가 변화되는 것을 특징으로 하는 시냅스 소자에 관한 것이다.

대표도 - 도6



(52) CPC특허분류

G02F 1/133553 (2013.01)

G02F 1/1337 (2013.01)

G02F 1/1343 (2013.01)

G06N 3/063 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345344865
과제번호	2018R1D1A1B07047808
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(교육부)(R&D)
연구과제명	시냅스 특성의 액정 모드를 이용한 심층신경망의 광 연산처리 장치
기 여 율	40/100
과제수행기관명	충남대학교
연구기간	2018.06.01 ~ 2022.05.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345334035
과제번호	2021R1I1A3052203
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공학학술연구기반구축(R&D)
연구과제명	유체 벡터장에서 마이크로 입자의 자체추진 구현과 제어
기 여 율	30/100
과제수행기관명	충남대학교
연구기간	2021.06.01 ~ 2025.05.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345343004
과제번호	2020R1A6A1A03047771
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공학학술연구기반구축(R&D)
연구과제명	양자제어물성연구소
기 여 율	30/100
과제수행기관명	충남대학교
연구기간	2020.06.01 ~ 2029.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

한 쌍의 교차 편광판; 및

상기 한 쌍의 교차 편광판 사이에 위치하며 각각 전극이 형성된 대향한 기관 사이에 강유전성 액정물질이 봉입된 액정셀을 포함하며,

상기 기관에 가해지는, 상기 강유전성 액정물질의 반응시간보다 짧은 주기를 갖는 펄스신호에 의해 시냅스 가중치가 변화되는 것을 특징으로 하는 시냅스 소자.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 교차 편광판은 편광 방향이 상호 수직인 수직 교차 편광판인 것을 특징으로 하는 시냅스 소자.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 시냅스 가중치는 펄스신호의 세기, 펄스신호의 수, 펄스신호의 폭, 펄스신호의 주기 또는 이들의 조합에 의해 결정되는 것을 특징으로 하는 시냅스 소자.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 펄스신호는 전기적 신호인 것을 특징으로 하는 시냅스 소자.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 펄스신호는 광신호인 것을 특징으로 하는 시냅스 소자.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 액정셀의 한쪽 기관에 광기전력 물질 층이 코팅되어 있으며,

상기 펄스 신호는 광기전력 물질에 가해지는 광신호에 의해 형성되는 전기적 신호인 것을 특징으로 하는 시냅스 소자.

청구항 7

청구항 5에 있어서,

광신호가 입력되는 상기 액정셀의 반대쪽 방향에는,
교차 편광판의 후단에 거울이 배치되는 것을 특징으로 하는 시냅스 소자.

청구항 8

청구항 1에 있어서,
상기 액정셀은 표면강화 강유전성 액정셀인 것을 특징으로 하는 시냅스 소자.

청구항 9

복수개의 입력수단과 복수개의 출력수단의 교차점에 존재하는 복수개의 청구항 1 내지 청구항 8 중 어느 한 항의 시냅스 소자들을 포함하는 시냅스 어레이.

청구항 10

청구항 9의 시냅스 어레이를 포함하는 뉴로모픽 소자.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 멀티레벨 특성과 단기 기억 및 장기 기억 특성에 의한 시냅스 가소성을 나타내며, 소모 전력이 낮고 크기가 작아 뉴로모픽 소자에 유용하게 사용할 수 있는 시냅스 소자에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 인공지능(A.I. Artificial Intelligence)은 인간이 지닌 지적 능력의 일부 또는 전체를 인공적으로 구현한 것으로, 입력받은 다양한 정보를 학습하고, 해석하여 결과를 출력하는 정보의 처리에 관한 것이다. 인간의 뇌가 학습하고 연산하는 과정을 모방한 인공지능 알고리즘은 기계학습을 시작으로 딥러닝과 같은 소프트웨어 기반으로 비약적으로 발전하고 있으며, 2016년 이세돌 구단과의 대국으로 유명한 알파고에서 확인되듯이 인간과 유사하거나 심지어 인간을 뛰어넘는 성능을 입증하였다. 알파고는 이세돌과의 대국을 수행하기 위해 1202개의 CPU와 176개의 GPU를 사용하였으며, 그에 따라 크기가 크고 방대한 전력을 소모할 수밖에 없었다. 이러한 비효율성은 딥러닝 알고리즘이 인간의 뇌구조에서 영감과정을 얻어 연산을 수행하는 것일 뿐, 모든 단계의 연산들이 기존 폰 노이만 구조의 컴퓨터 상에서 이루어지기 때문이다. 폰 노이만 구조에서는 연산유닛(CPU, GPU)이 메모리가 서로 분리된 상태에서 데이터의 메모리에서 가져온 데이터와 명령에 의해 순차적으로 한번에 하나의 데이터만 처리한다. 폰 노이만 구조에 의해 딥러닝과 같은 복잡하고 많은 양의 데이터를 처리할 때에는 이러한 직렬적 특성과, 연산유닛의 빠른 처리속도와 메모리의 느린 응답속도의 불일치로 인한 병목 현상이 불가피하기 때문에 인공지능의 구현에 한계가 있다.

[0003] 뇌는 20 W 미만의 소비전력을 소모하면서 뉴런과 뉴런 사이의 연결고리인 시냅스를 통해 신호를 주고받으며 다양한 연산, 논리, 학습, 기억 작업을 수행한다. 이러한 점에 착안하여 상기 소프트웨어적 접근의 한계를 극복하고자 인간의 뇌신경망을 하드웨어적으로 구현하려고 하는 것이 뉴로모픽 소자이다. 인간의 뇌에는 약 10^{11} 개의 뉴런이 존재하고, 인간의 신피질에는 뉴런당 약 5,000~10,000개의 시냅스가 존재한다. 뉴런은 다른 뉴런에서 오는 신호를 모아 특정 임계값을 넘으면 스파이크를 생성하고, 시냅스를 통해 다른 뉴런으로 스파이크를 전달한다. 각각의 뉴런에서 생성된 신호가 시냅스를 통하여 처리되는 과정에서 시냅스는 스파이크의 타이밍에 따라 가중치를 저장하는데, 이는 정보처리 과정에서 학습 및 기억 과정이 시냅스를 통하여 동시에 일어남을 의미한다. 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템을 구현하는 뉴로모픽 소자 역시 뇌의 뉴런 역할을 담당하는 뉴런 소자와 시냅스 역할을 담당하는 시냅스 소자로 구성된다.

[0004] 프리-시냅틱 뉴런에 의해 자극을 받은 포스트-시냅틱 뉴런의 반응은 뉴런들 사이의 연결(즉, 시냅스 가중치)을 강화 또는 약화함으로써 학습 및 기억의 기초가 된다. 따라서 뉴런 시스템에서의 학습 및 기억의 기초는 "시냅

스 가소성"(즉, 시냅스 가중치의 변화)에 기초한다. 가중치를 높이는 장기 강화(long-term potentiation)에 의해 신호는 증폭되며, 가중치를 낮추는 장기 약화(long-term depression)에 의해서는 신호가 억제된다. 즉, 시냅스 소자는 가중치로 정보를 저장하는 동시에 신호를 처리하는 역할을 수행한다. 이상적인 시냅스 소자는 가중치의 최소값과 최대값의 차이가 크고 아날로그 방식의 가중치 변화를 보이며 가중치의 변화가 선형적으로 이루어져야 한다. 이런 이상적인 시냅스 소자를 구현하기 위해서는 많은 레벨을 저장할 수 있는 높은 멀티레벨 특성을 가져야 한다. 또한 짧은 시간 이후 기억된 정보가 소멸되는 단기기억 특성과 함께 장기기억 특성을 구현해야만 인간의 뇌 신경망을 정확하게 모사할 수 있다.

[0005] 현재 뉴로모픽 시냅스 소자로는 SRAM에 기반한 시냅스 소자와 비휘발성 메모리에 기초한 시냅스 소자가 있으며, 이들은 주로 외부 전기신호에 의해 작동되어 시냅스 가소성과 관련된 특성을 모방하여 시냅스 가중치의 조정을 구현한다. 그러나 복잡한 외부환경에서는 대부분의 경우 전기입력신호를 직접 얻기 어렵고, 정보를 추가로 처리하여 전기입력신호로 변환하여야 하므로 불필요한 전력 소비를 증가시킨다. 자연환경에서 광신호를 입력신호로 사용하는 것은 통상적이다. 따라서 외부신호를 전기신호로 변환하지 않고 광신호를 직접적으로 사용하여 시냅스 가중치로 전환하면 기존 전력 소비를 더욱 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 아직 광학적 뉴로모픽 시냅스 소자에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있지 않다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 등록특허 제10-2342308호

비특허문헌

[0007] (비특허문헌 0001) Nature 521, 61 (2015), IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62, 2410 (2015)

(비특허문헌 0002) Nature Commun., 8, 14736 (2017)

(비특허문헌 0003) Nat. Mater. 16, 414 (2017)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 종래 기술의 문제를 해결하기 위하여 전기-광학적, 시간 의존적 투과도 변화 특성을 가지면서 제어 가능한 뉴로모픽 소자를 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0009] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명은, 한 쌍의 교차 편광판; 및 상기 한 쌍의 교차 편광판 사이에 위치하며 각각 전극이 형성된 대향한 기관 사이에 강유전성 액정물질이 봉입된 액정셀을 포함하며, 상기 기관에 가해지는, 상기 강유전성 액정물질의 반응시간보다 짧은 주기를 갖는 펄스신호에 의해 시냅스 가중치가 변화되는 것을 특징으로 하는 시냅스 소자에 관한 것이다.

[0010] 본 발명의 다른 양태는 복수개의 입력수단과 복수개의 출력수단의 교차점에 존재하는 복수개의 상기 시냅스 소자들로 구성되는 시냅스 어레이에 관한 것이다.

[0011] 본 발명의 또 다른 양태는 상기 시냅스 어레이를 포함하는 뉴로모픽 소자에 관한 것이다.

발명의 효과

[0012] 이상과 같은 본 발명의 시냅스 소자는 간헐적인 펄스신호에 의한 단기기억과 연속적인 펄스신호에 의한 장기기억 특성을 나타내며, 가해지는 신호의 세기와 시간 간격 등에 의해 멀티레벨 특성을 구현할 수 있어 생체 시냅스 특성을 모사할 수 있다. 특히 전기신호 뿐 아니라 광신호에 의해서도 구동이 가능하고, 하나의 액정 시냅스 소자의 크기가 작고 집적이 용이하며 소비전력이 낮아 뉴로모픽 컴퓨팅에 유용하게 사용할 수 있다.

[0013] 또한 본 발명의 시냅스 소자와 시냅스 어레이는 기존의 LCD(liquid crystal display) 제조방법에 의해 구현이 가능하므로 추가적으로 공정을 개발하지 않고도 간단하고 저렴하게 제작할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0014] 도 1은 일실시예에 의한 액정셀의 광-전기 히스테리시스 루프.
 도 2는 액정셀에서 펄스신호의 간격에 따라 쌍펄스 촉진이 유발됨을 보여주는 그래프.
 도 3은 액정셀이 장기기억과 단기기억, 시냅스 강화와 시냅스 약화 특성 갖는 것을 보여주는 그래프.
 도 4는 액정셀의 시냅스 가소성을 보여주는 그래프.
 도 5는 광신호에 의해 작동되는 본 발명의 일실시예의 시냅스 소자의 모식도.
 도 6은 일 실시예의 뉴로모픽 소자에 대한 광학적 테스트 구성을 보여주는 이미지.
 도 7은 도 6의 실시예에 대한 테스트의 패턴 입력 및 출력 결과를 보여주는 예시도.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0015] 이하 첨부된 도면과 실시예를 들어 본 발명을 상세히 설명한다. 그러나 이러한 도면과 실시예는 본 발명의 기술적 사상의 내용과 범위를 쉽게 설명하기 위한 예시일 뿐, 이에 의해 본 발명의 기술적 범위가 한정되거나 변경되는 것은 아니다. 이러한 예시에 기초하여 본 발명의 기술적 사상의 범위 안에서 다양한 변형과 변경이 가능함은 당업자에게는 당연할 것이다. 또한 발명을 설명함에 있어서 발명과 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에 그 상세한 설명을 생략하기로 한다.
- [0016] 본 발명은 한 쌍의 교차 편광판; 및 상기 한 쌍의 교차 편광판 사이에 위치하며 각각 전극이 형성된 대향한 기판 사이에 강유전성 액정물질이 봉입된 액정셀을 포함하며, 상기 기판에 가해지는, 상기 강유전성 액정물질의 반응시간보다 짧은 주기를 갖는 펄스신호에 의해 시냅스 가중치가 변화되는 것을 특징으로 하는 시냅스 소자에 관한 것이다.
- [0017] 인간의 뇌에서는 외부로부터의 자극 또는 다른 뉴런으로부터의 신호에 의해 활동전위가 발생하며, 활동전위가 문턱전압보다 높은 경우 시냅스 연결이 진행된다. 이러한 과정이 여러 신경망을 통해 이루어지면서 중첩되어 학습이 일어난다. 마찬가지로 액정은 조건에 따라 혹은 종류에 따라 전달되는 광신호 또는 전기신호가 문턱값 이상인 경우 스위칭이 일어나며 그 상태가 저장될 수 있다. 한 쌍의 교차 편광판은 액정의 스위칭 상태를 광학적으로 관측할 수 있도록 한다. 상기 교차 편광판은 편광 방향이 수직이면 대비(contrast)가 최대가 되므로 액정의 스위칭 상태를 가장 정밀하게 관측할 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 본 발명은 이러한 액정의 특징을 이용한 것으로, 액정물질의 반응시간보다 짧은 주기를 갖는 펄스신호에 의해 시냅스 가중치를 변화시키는 것을 특징으로 한다.
- [0018] 이하에서는 상기 액정셀로 표면안정화 강유전성 액정(SSFLC, surface stabilized ferroelectric liquid crystal) 셀을 예로 들어 설명한다. 표면안정화 강유전성 액정셀은 두 기판 사이의 간격(cell gap)을 작게 하고 강유전성 액정물질을 주입하여 구현할 수 있다. 표면안정화 강유전성 액정셀에서는 액정과 기판 사이의 계면에서 두 가지 배향 방향(bi-stable)만을 허용하여, 전기장에 대한 투과율 또는 자발분극은 메모리 특성을 나타낸다.
- [0019] 도 1은 한쪽 방향으로 러빙된 폴리이미드 배향막을 갖는 CS1026(Chisso Co.) SSFLC 셀(셀 간격 1.8 μm)의 광-전기 히스테리시스 루프를 나타내는 것이다. 도 1에서 전압이 작을 때에는 전압이 다시 0이 되면 스위칭 상태를 유지하지 못하지만, 인가전압이 2V 이상으로 충분히 크면 전압이 다시 0이 되어도 메모리 상태를 유지하는 전형적인 강유전성 광-전기 이력 특성을 보여준다.
- [0020] 상기 강유전성 액정은 보통 600 μs 정도의 응답시간을 갖는데, 상기 액정셀에 이보다 짧은 시간 간격의 펄스를 가하면 쌍펄스 촉진(PPF, paired pulse facilitation)을 일으킬 수 있다. 도 2의 (a)는 이를 보여주는 그래프로, 펄스 간격이 1 ms인 경우에는 응답반응이 중첩되지 않아 쌍펄스 촉진이 일어나지 않지만, 260 μs 인 경우에는 쌍펄스 촉진이 일어남을 보여준다. 도 2의 (b)는 40 μs 길이(t_1)의 펄스를 사용하였을 때, 펄스 간격(Δt)에 따른 투과도를 단일 펄스를 가했을 때의 투과도와 비교하여 나타낸 것이다. 도 2의 (b)에 따르면 펄스 간격이 약 700 μs 이상이 되면 두 피크의 투과도 비율은 100 %가 되어 쌍펄스 촉진이 일어나지 않음을 확인할 수

있었다.

- [0021] 이러한 쌍펄스 촉진 특성을 이용하여 뇌신경망의 시냅스를 모사할 수 있는 지 확인하였다. 도 3의 (a)는 SSFLC를 이용한 시냅스 소자가 단기 기억과 장기 기억 특성을 나타냄을 보여준다. 즉, 여러개의 펄스 간격이 응답시간보다 큰 1 ms인 경우에는 스위칭이 지속되지 않아 장기 기억으로 넘어가지 못하고 단기 기억만을 나타내지만, 펄스 간격이 응답시간보다 짧고 펄스 수가 많아지면 쌍펄스 촉진 현상이 누적되어 장기 기억으로 전환됨을 보여준다.
- [0022] 뇌신경망의 시냅스를 모사하기 위해서는 장기 기억을 위한 시냅스 강화와 함께, 새로운 학습을 위한 시냅스 약화가 필요하다. 도 3의 (b)는 펄스 신호에 의한 시냅스 강화와 반대의 펄스 신호에 의한 시냅스 약화가 가능함을 보여주어 본 발명에 의한 액정셀을 이용한 시냅스 소자가 생체의 시냅스를 모사할 수 있음을 확인시켜준다.
- [0023] 도 4에서 보여주듯이 본 발명에 의한 시냅스 소자에서는 펄스 신호의 특성에 의해 시냅스 가중치를 결정할 수 있다. 도 4의 (a)는 동일한 수(40회)의 펄스 신호를 가할 때 인가 전압이 제거된 후 장기 기억으로 전환될 때의 최종 투과도가 펄스 인가 전압에 따라 달라지는 것을 보여주며, (b)는 펄스 인가 전압을 고정시키는 경우(1V) 펄스 신호의 수를 다르게 하는 경우에도 인가 전압이 제거된 후 장기 기억에서의 투과도가 다른 것을 보여준다. 상기 장기 기억에서의 최종 투과도는 시냅스 가중치로 역할을 할 수 있다. 도 4의 (c)는 펄스 신호의 수에 따라 포화되는 인가 전압이 상이함을 보여주며, (d)는 펄스 인가 전압에 따라 포화되는 펄스 신호의 수가 상이함을 나타낸다. 또한, 도 3에서 확인할 수 있듯이 펄스 신호의 주기와 폭 역시 시냅스 가중치에 영향을 준다. 이는 본 발명에 의한 시냅스 소자에서 펄스 신호의 세기, 펄스 신호의 수, 펄스 신호의 폭, 펄스 신호의 주기 또는 이들의 조합에 의해 시냅스 가중치가 결정될 수 있음을 의미한다.
- [0024] 상기 설명에서는 액정셀에서 펄스 신호가 전기적 신호에 의해 주어지는 것을 예로 들어 설명하였다. 상기 펄스 신호는 대향한 기관에 각각 형성된 전극에 의해 가해질 수 있다.
- [0025] 뿐만 아니라 본 발명의 시냅스 소자는 액정셀을 구성하는 한쪽 기관에 빛에 의해 감광되어 전기를 발생하는 광기전력 효과(photovoltaic effect)를 갖는 물질을 코팅하면, 광 신호 자체를 입력 신호로 하여 발생하는 전기적 신호에 의해 구동될 수 있다. 도 5는 광 신호에 의해 구동되는 일 실시예의 시냅스 소자와 생체 시냅스 및 이들의 상응 관계를 보여주는 모식도로, 양쪽 기관 모두 액정이 수평 배향하도록 폴리이미드(PI)로 코팅 후 러빙하여 SSFLC 셀을 형성한 예시이다. 이해 편의를 위해서 도면의 상하 관계를 그대로 적용하여 설명한다. 액정셀의 상면 기관 위에는 배향 방향과 동일한 수평 방향의 상부 편광판이 배치되어 있으며, 광 신호가 광기전력 물질이 코팅된 액정셀에 도달하면 광기전력 물질이 감광되어 전기 신호를 발생시킨다. 광 신호가 액정 물질의 반응 시간보다 짧은 주기를 갖는 펄스 신호로 주어지면, 광기전력 물질에 의해 발생하는 전기 신호 역시 광 신호에 상응한다. 따라서 본 발명의 시냅스 소자에서 광 신호를 입력 신호로 하여 시냅스 가중치를 변화시킬 수 있다. 이 경우 광 신호에 의해 입력되는 신호는 단일한 극성으로 인가되어 한계가 있으나, 전극에 의해 반대 극성의 전기 신호를 인가하는 것에 의해 리셋(reset)을 해줄 수 있다.
- [0026] 시냅스 소자에 입력되는 신호가 광 신호인 경우, 상기 액정셀에 광 신호가 입력되는 반대쪽 방향에는, 액정셀 양쪽에 배치된 교차 편광판의 후단에 거울이 배치되는 것이 보다 바람직하다. 액정셀을 통과한 빛은 신호가 약하면 액정의 스위칭 방향이 바뀌지 않는다. 따라서 액정셀의 양쪽에 배치된 교차 편광판에 의해 빛은 통과하지 못하고 차단된다. 반면에 액정이 스위칭된 경우에는 빛이 편광판을 통과한다. 이때 편광판의 후단에 거울이 배치된다면 편광판을 통과한 빛은 거울에 반사된 후 다시 액정셀에 도달하여 한번 더 신호를 받아 스위칭 반응이 강화될 수 있다. 거울에 의해 스위칭 반응을 강화하기 위해서는 상기 교차 편광판의 각도는 70~110° 인 것이 바람직하며, 80~100° 인 것이 더욱 바람직하다. 거울에 의한 스위칭 반응의 강화를 생물학적인 시냅스에서 의 반응과 대응하면, 첫 번째 광 신호에 의한 스위칭은 시냅스 전 신호(pre-synapse)인 뉴런의 말단에서 나오는 신경 전달 물질에 대응되고, 거울에 반사된 두 번째 광 신호에 의한 동일 방향으로의 스위칭은 시냅스 후 신호(post-synapse)인 수용체에서 나와 신경 전달 물질과 결합하는 단백질에 대응된다. 양쪽 두 기관은 뉴런의 말단, 액정은 신경 전달 물질로 기능한다.
- [0027] 강유전성 액정은 양의 방향 및 음의 방향, 양 방향으로 스위칭이 가능하므로 동일한 방향의 신호가 반복되면 시냅스 강화가 일어나고, 반대 방향의 신호에 의해 시냅스 약화가 일어나므로 가중치를 가지고 저장될 수 있다.
- [0028] 본 발명의 다른 양태는 복수개의 입력 수단과 복수개의 출력 수단의 교차점에 존재하는 복수개의 상기 시냅스 소자를 포함하는 시냅스 어레이에 관한 것이다. 상기 입력 수단은 전술한 바와 같이 광 신호 또는 전기 신호를 입력하는 수단이며, 학습된 결과 역시 광 신호 또는 전기 신호의 형태로 출력될 수 있으므로 출력 수단 역시 광 신호 또

는 전기신호를 출력하는 수단일 수 있다. 복수개의 입력수단과 복수개의 출력수단의 교차점에 위치하여 시냅스 소자들이 입력수단과 출력수단을 공유하는 것에 의해 상기 시냅스 어레이는 수백억개의 뉴런과 뉴런 사이 수천 조개의 시냅스를 통해 신호를 주고 받는 뇌신경망을 모사할 수 있다.

[0029] 본 발명에서 하나의 시냅스 소자의 크기는 $1\ \mu\text{m}^2 \sim 1\ \text{cm}^2$ 정도이며 액정셀의 겹은 $1\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ 정도이다. 따라서 10,000개의 시냅스 소자(100×100)로 이루어진 시냅스 어레이를 구성하는 경우에도 크기가 $100\ \mu\text{m}^2 \sim 100\ \text{cm}^2$ 정도에 불과하여 집적도를 크게 향상시킬 수 있다.

[0030] 본 발명의 다른 일 양태는 상기 시냅스 어레이를 포함하는 뉴로모픽 소자에 관한 것이다.

[0031] 뉴로모픽 소자의 작동은 학습 과정과 학습 후 테스트 과정으로 구분된다. 뉴로모픽 소자의 테스트는 예를 들어 Nature Communication 8, 14736 (2017)에 기재된 교차점 어레이 방식을 사용하여 구성할 수 있다. 도 6은 테스트하는 패턴으로서 4 열의 입력수단과 학습된 5 행의 광학적 출력수단을 가지며, 그 교차영역이 각각의 시냅스 소자의 테스트 결과로 작용하는 뉴로모픽 소자의 광학적 테스트를 위한 예시적 구성도이다. 도 6에서는 임의의 변화된 패턴입력을 위해 전기구동이 가능한 트위스트 네마틱 액정셀을 테스트 셀로 사용하는 것을 예시하였다(도 6의 (a)). 그러나 학습 또는 테스트하기 위해 사용되는 임의의 광 패턴을 컴퓨터를 통해 나오는 광원으로 대체하면, 뉴로모픽 소자는 더욱 간단해 질 수 있다. 네마틱 액정물질의 배향에 따른 투과도의 변화로 광신호를 시냅스 소자 어레이(Learned LC cell)에 입력할 수 있도록 전단에 광원을 배치하고, 후단에는 편광판을 배치한다. 여기서 전단은 테스트 셀의 시냅스 소자와 반대되는 방향을 의미하며, 후단은 시냅스 소자 쪽 방향을 의미한다. 시냅스 소자의 후단에 편광판을 배치하면 출력된 신호를 시냅스 소자 어레이를 구성하는 액정셀의 밝기로 육안으로 직접적으로 관측할 수 있다(도 6의 (b)).

[0032] 입력수단으로 사용되는 테스트 셀의 4개의 열은 도 6의 (d)의 상단에 도시된 것처럼, 2×2 패턴의 각 셀의 이미지를 입력하며, 각 셀의 밝기는 예를 들어 도 6의 (c)에서와 같이 전압을 조절하는 것에 의해 제어할 수 있다. 2×2 개의 픽셀로 만들 수 있는 패턴의 경우의 수는 $2^4=16$ 개이다. 이 중 5 개의 패턴이 각각의 행에 학습되었다고 가정하고(도 6의 (d)의 Learned LC cell, 20개(4열 $\times$ 5행)의 픽셀에 저장됨) 테스트를 실시한다. 도 6의 (d)의 상단 오른쪽 이미지는 출력되는 셀의 번호를 보여주는 것이며, 하단 이미지는 각 패턴의 셀 배치 모형도로 각 행에 학습된 패턴의 이미지를 나타낸다. 각 셀에는 번호를 함께 저장하면, 결과를 바로 판단할 수 있다.

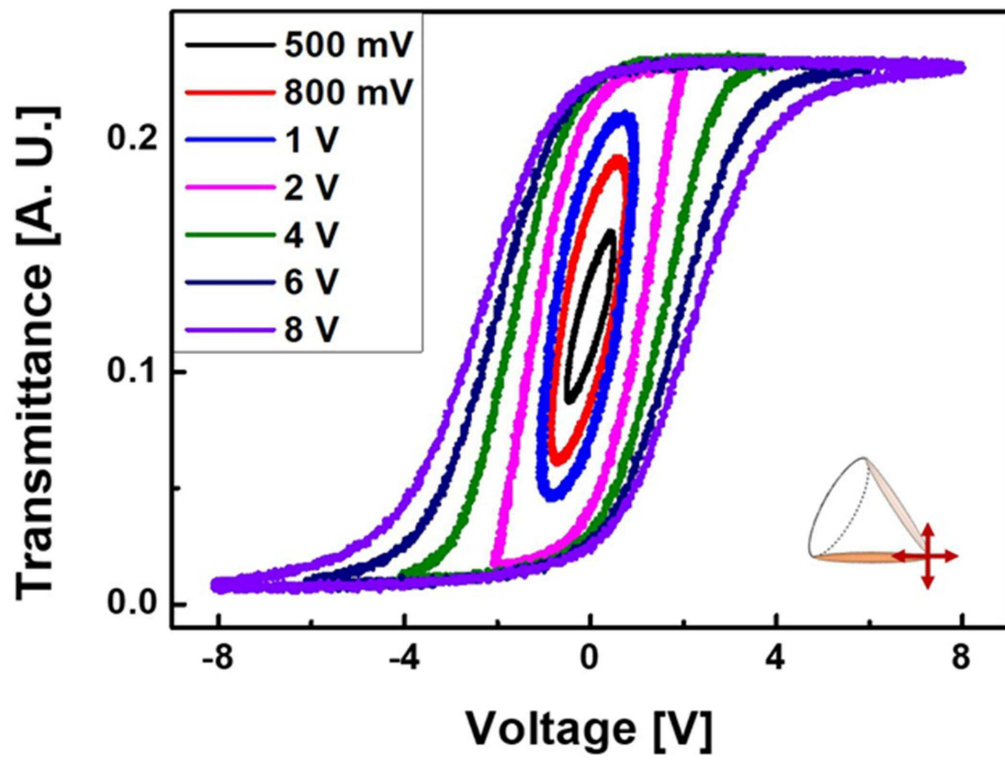
[0033] 도 7은 상기 뉴로모픽 소자를 통해 노이즈가 포함된 2×2 패턴의 이미지를 학습시킨 결과 출력될 수 있는 이미지의 예시들을 보여준다. 노이즈가 포함되지 않은 도 7의 (a)는 3의 밝기가 가장 높으며, 이는 도 6의 (d)에 도시된 "/" 패턴에 해당한다. 도 7의 (b)는 1의 밝기가 가장 밝으며, 이는 오른쪽 두 개의 셀이 어두운 패턴에 해당한다. 따라서 입력된 이미지로부터 노이즈가 제거된 패턴을 정확하게 출력할 수 있다. 도 7의 (c)~(f) 역시 노이즈가 포함된 이미지를 판단하여 출력되는 패턴의 예시이다.

[0034] 상기 예시에서는 20개의 픽셀을 사용하여 5개의 패턴을 나타내도록 하였으나, 16개의 패턴을 모두 학습하여 저장하려면, $4 \times 16 = 64$ 개의 픽셀이 필요하다. 또한, 3×3 어레이로 나타낼 수 있는 패턴은 $2^9=512$ 개이고, $9 \times 512 = 4,608$ 개의 저장할 픽셀이 필요하다. 저장할 픽셀은 늘어나지만, 입력부로서 9개의 열로 테스트를 한다면, 512개의 패턴을 광학적으로 한 번에 판단할 수 있으므로 판단이 매우 빠르다는 장점을 갖는다.

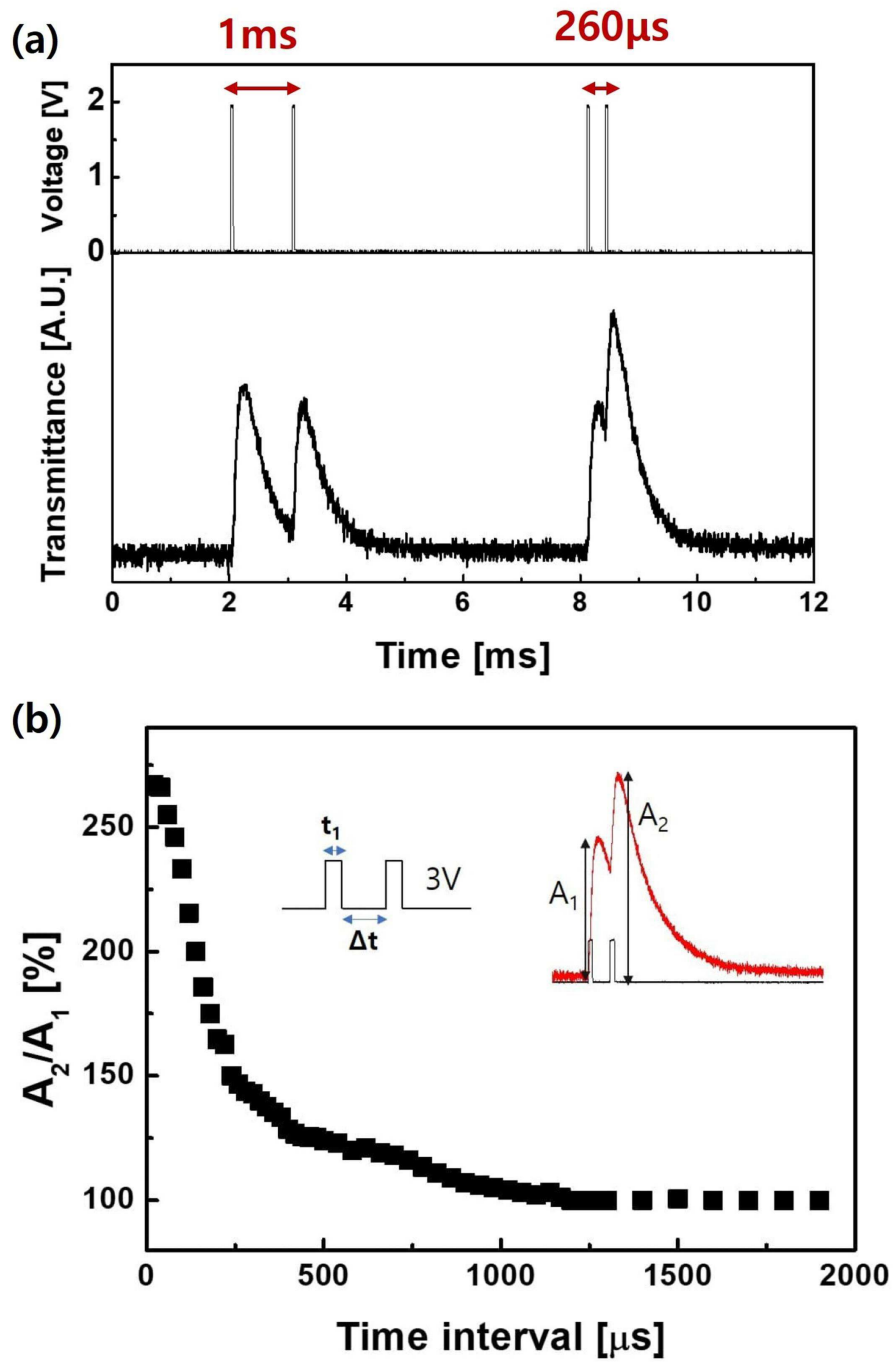
[0035] 또한, 상기 예시에서는 액정의 밝기로 결과를 출력하는 것을 도시하였으나, 각 액정에서의 밝기를 가중치로 하여 스파이크를 형성하도록 함으로써 전기신호로 출력할 수도 있다.

도면

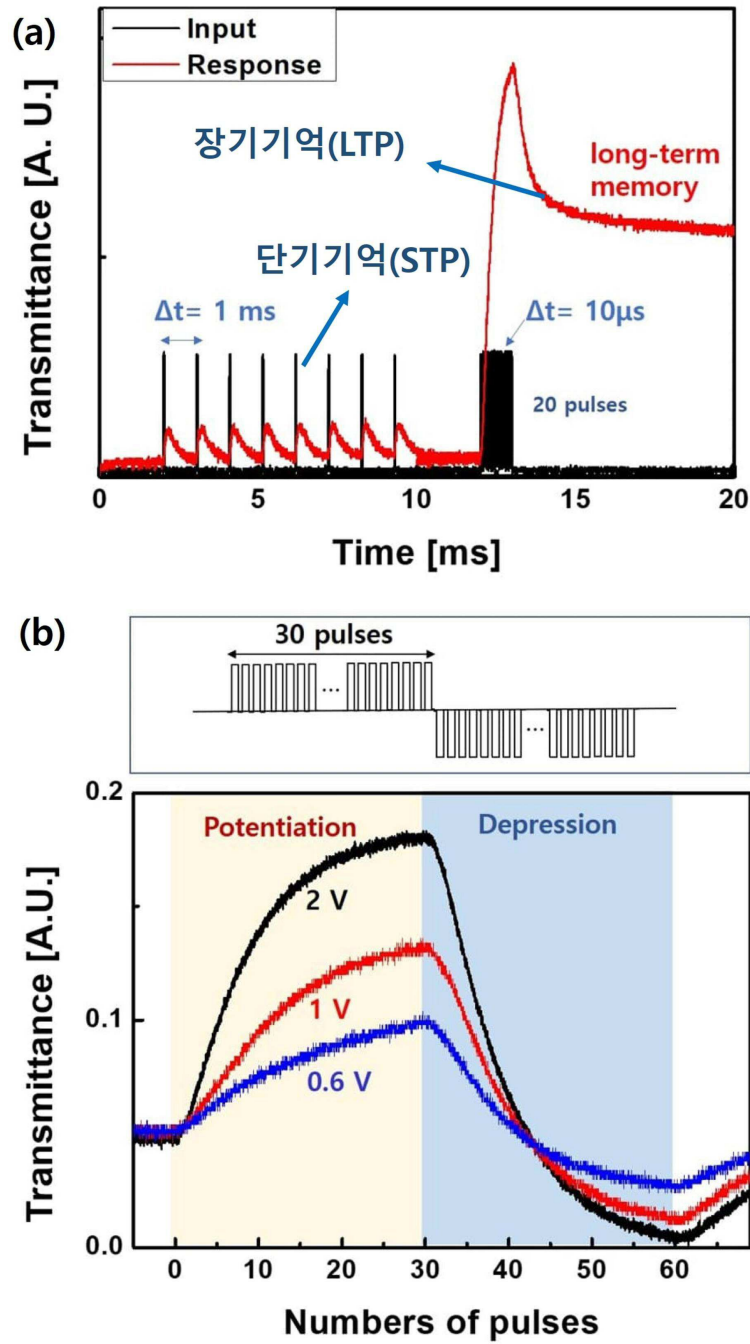
도면1



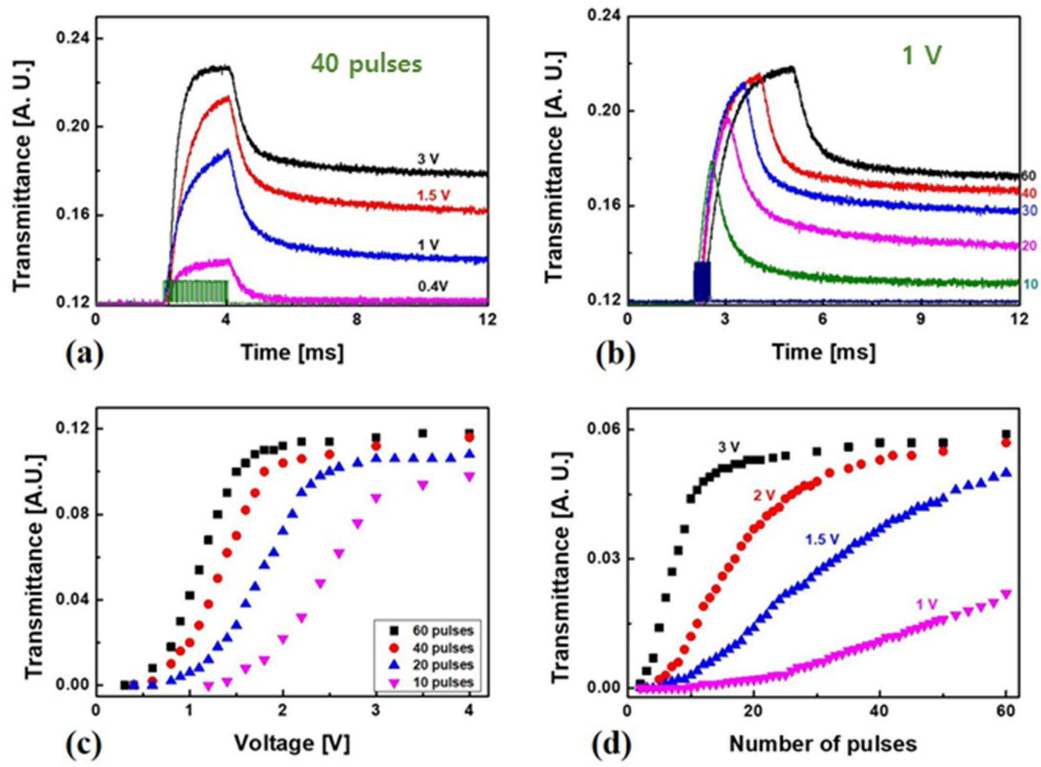
도면2



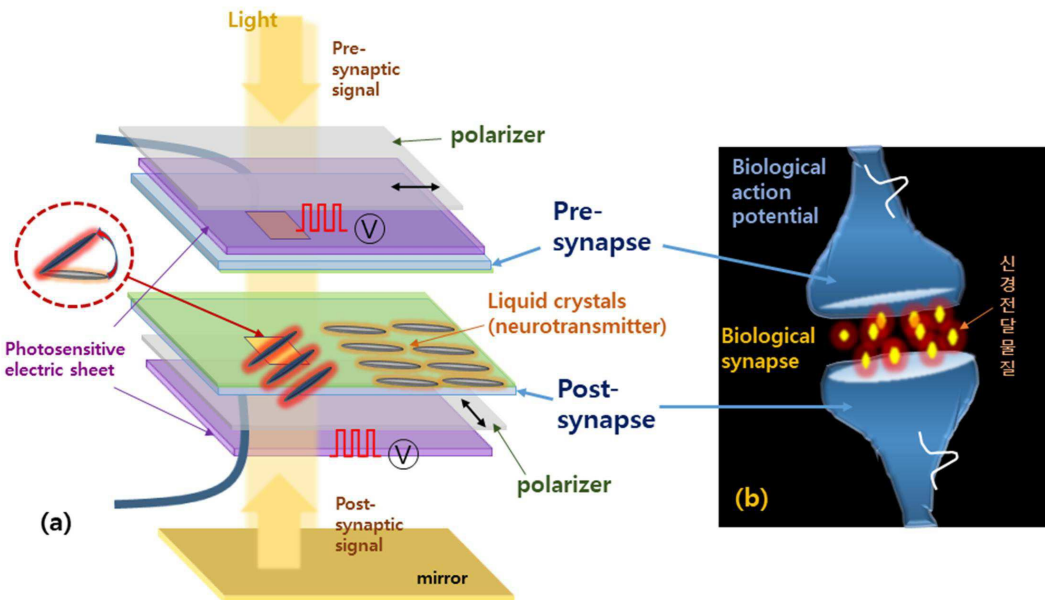
도면3



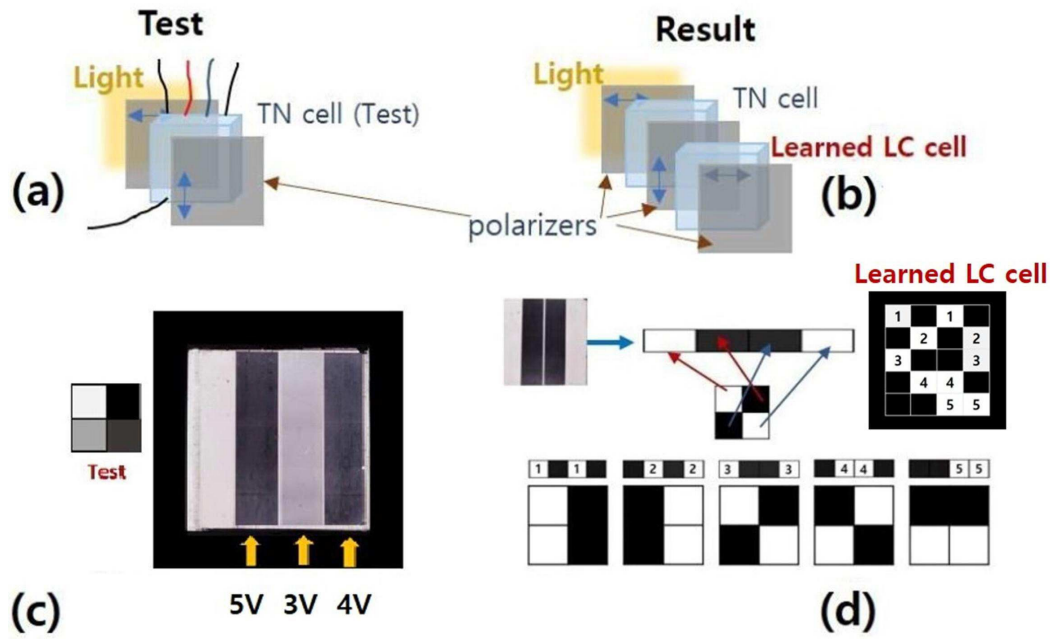
도면4



도면5



도면6



도면7

