

MATHESZ ANNA

A logika új kapui

Egy városi legenda szerint az 1940-es évek elején *Thomas J. Watson*, az IBM akkori elnöke a következő kijelentést tette: „Véleményem szerint körülbelül öt számítógép számára van hely a világpiacon.” Jóslata valószínűleg beigazolódik, amennyiben a személyi számítógépek megmaradnak olyanok, amilyen az első Harvard-IBM számítógép, a *Mark I* volt. A gépnek ugyanis rendkívül „impozáns” paraméterei voltak, úgymint 2,5 méteres magasság, 15,5 méteres szélesség, emellett megközelítőleg 5 tonnát nyomott és több száz kilométer kábelt foglalt magába. A mikroelektronika rohamos fejlődésének köszönhetően azonban Mr. Watson előrejelzése végül nem teljesült, hiszen napjainkra a számítógép meglehetősen elterjedté vált, például 2010-ben mintegy 340 millió személyi számítógépet adtak el a világon [1].

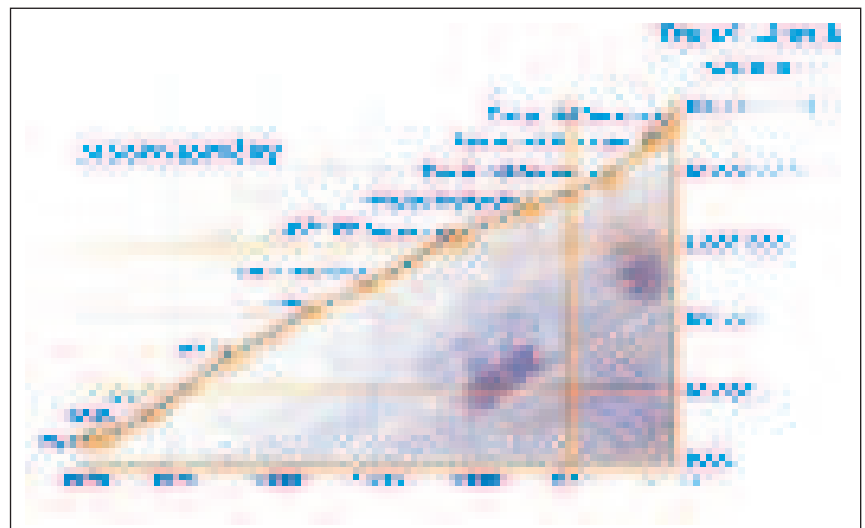
A XX. századot gyakran hívják az elektronika aranykorának, ugyanis az ágazat a 60-as évektől rohamos növekedésnek indult. Az integrált áramkörökben a logikai elemek (tranzisztorok) száma, feltalálásuktól számítva, 18 havonta megduplázódott, a számítási teljesítmény/sebesség a duplájára nőtt (1. ábra). Ezt a jelenséget írja le a Moore-törvény, melyet az Intel egyik alapítója, *Gordon E. Moore* fogalmazott meg 1965-ben megjelent cikkében [2].

A folyamatos fejlődés fenntartásának kulcsa az alkatrészek miniaturizálásában rejlik, ugyanis az elemek méretének csökkenésével nő az adott felületre integrálható alkatrészek száma. Ez pedig az integrált áramkörök sebességének növekedését, továbbá az egyre komplexebb funkciók megvalósítását teszi lehetővé. Napjainkra az integrált áramköröket alkotó elemek mérete 30 nanométer (0,00003 milliméter) alá csökkent, és ahhoz, hogy a fejlődés a Moore-törvénynek megfelelő ütemben folytatódhasson, az alkotóelemeket az elkövetkező 10 évben molekulaméretűre kellene zsugorítani. Amennyiben a gyártási méret nem csökken, az integrált áramkörökben az egy-egy felületre eső tranzisztorok száma sem duplázódhat meg 18 hónap alatt. A szakértők, köztük a szabály megalkotója, *Gordon Moore* is, egyetértenek abban, hogy a következő évtizedben a tör-

vény érvényét vesztheti, mivel a félvezető technológia eléri a miniaturizálhatóság határait.

Az integrált áramkörök gyártói jelenleg hatalmas erőfeszítéseket tesznek annak érdekében, hogy a legújabb nanotechnológiai eljárások segítségével további méretcsökkenést érjenek el. Hosszú távon azonban a számítási sebesség további növekedéséhez új megoldások szükségesek. Lehetséges alternatívát kínál többek között a nanoelektronika, a molekuláris elektronika, illetve az integrált optika. Az

A számítógépekben a logikai műveleteket végző áramkörök építőkövei a tranzisztorokkal működő logikai kapuk. Az optikai adatfeldolgozó rendszerek kutatásának egyik célja az integrált elektronikában használt logikai kapukhoz hasonló, optikai elven működő logikai kapuk létrehozása. Az elmúlt években az ultragyors (nanoszekundumos) optikai kapcsolás megvalósítása óriási áttörést jelentett. Erre alapozva számos kutatócsoport fejleszt különböző logikai műveletek elvégzésére képes optikai áramköröket [3–5].

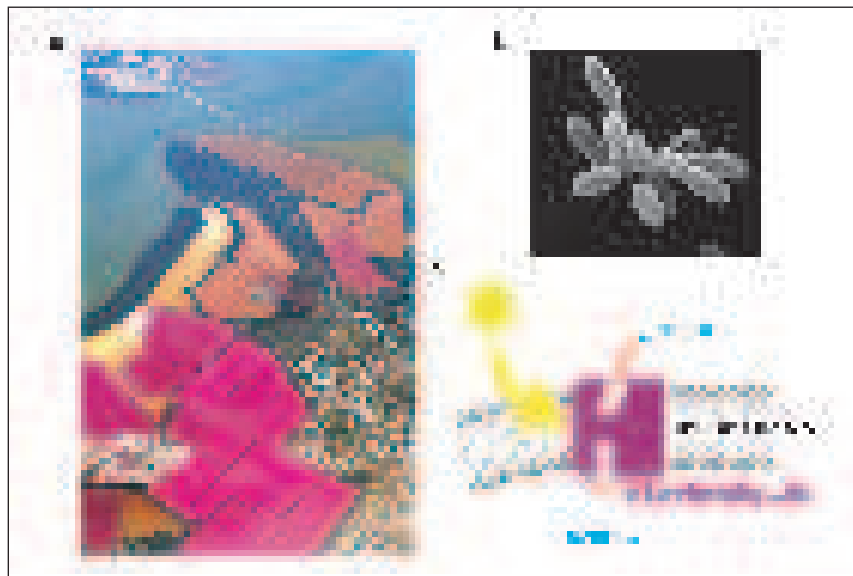


1. ábra. Moore-törvény. Az elmúlt évtizedben az integrált áramköröket alkotó aktív és passzív elemek mérete 100 nanométer (0,0001 milliméter) alá csökkent, jelenleg a legfejlettebb processzorok több milliárd tranzisztorot tartalmaznak. A *Gordon E. Moore* által megalkotott törvény szerint az integrált áramkörökben a tranzisztorok száma 18 havonta megduplázódik (Forrás: Intel)

írásban egy kutatócsoportunk által kifejlesztett integrált optikai alkalmazást mutatok be.

Az integrált optika napjaink rendkívül gyorsan fejlődő tudományága, amelynek célja olyan – az integrált elektronikai áramkörökhöz hasonló – miniaturizált „optikai áramkörök” létrehozása, amelyekben az információt elektronok helyett fény továbbítja. Ezekben az optikai áramkörökben a vezetékeknek a hullámvezetők, a feszültségnek a fényintenzitás, az áramforrásnak pedig a fényforrás (általában lézer) feleltethető meg.

Az integrált áramkörökhöz hasonlóan, az integrált optikai áramkörök is tartalmaznak aktív, illetve passzív elemeket. Az elektronikában passzív elemeket például az ellenállás vagy a kondenzátor, aktív elem (képes változtatni a rajta eső feszültséget) pedig a tranzisztor. A passzív integrált optikai elemek (hullámvezető struktúrák, tükrök, rácsok stb.) gyártási technológiája már rendelkezésünkre áll, az aktuális kutatások célja ezért olyan anyagok fejlesztése, amelyek ezekben az áramkörökben aktív, vezérlő szerepet tölthetnek be.



2. ábra. A *Halobacterium salinarum* és a bakteriorodopszin. (a) Sóléparlói tó a San Francisco-öbölben, amely jellegzetes bíbor színét a bakteriorodopszinnak köszönheti (Forrás: <http://www.flickr.com/photos/23688516@N00/364573572>). (b) A *Halobacterium salinarum* mikroszkópos képe (Forrás: Wikipédia). (c) Fény hatására a bakteriorodopszin protonokat juttat a membrán belső oldaláról a külsőre

Az optikai elven működő eszközökben alkalmazható aktív anyagokkal szemben támasztott legfontosabb követelmény az, hogy fényel történő megvilágítás (gerjesztés) hatására észlelhető mértékben megváltozzon az anyagnak valamilyen optikai tulajdonsága (pl. a törésmutató). Emellett a gyakorlati felhasználás szempontjából elengedhetetlen a környezeti hatásokkal szembeni stabilitás, valamint, hogy az anyag többször gerjeszthető legyen.

Aktív anyagként jelenleg leggyakrabban különböző kristályokat és folyadékkristályokat használnak, amelyeknek általában elektrooptikai tulajdonságait használják ki. Ebben az esetben az anyagban az optikai változás elektromos tér hatására következik be, a fényvezérlés fotoelektromos átalakítókon (pl. fotodiódákon) keresztül, áttételesen történik. Közvetlen fényvezérlésre igazán alkalmas szervesetlen anyagot korábban nem sikerült találni, ezért ilyen szempontból is igen érdekesnek mutatkozik a biológiai anyagok optikai tulajdonságainak feltérképezése.

Jelenleg a legesélyesebb jelölt a feladatra egy – fény hatására protonokat szállító – membránfehérje, a bakteriorodopszin (bR). De mi is a bakteriorodopszin, és melyek azok a tulajdonságok, amelyek alkalmasak teszik az integrált optikai alkalmazásra?

A bakteriorodopszin a *Halobacterium salinarum* nevű sókedvelő baktérium membránjában található fehérje, amely kulcsfontosságú szerepet tölt be a baktérium energiaátalakításában. A *Halobacterium salinarum* körülbelül 0,5

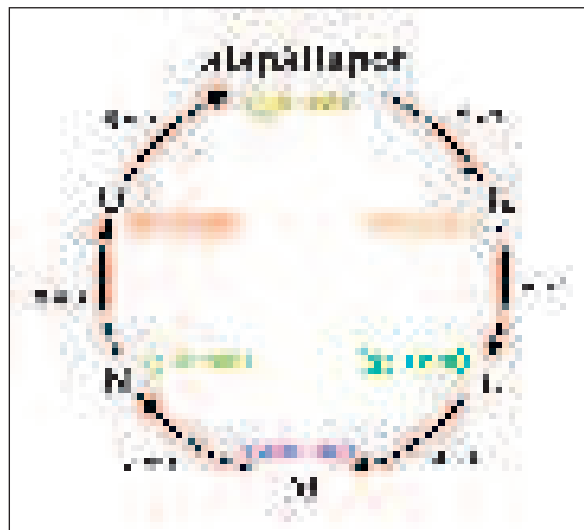
mikrométer átmérőjű, és 4–10 mikrométer hosszúságú, pálcika alakú baktérium, mely rendkívül magas sókoncentrációjú tavakban, illetve sóléparlókban található meg (2. ábra). Feltételezések szerint ezen szélsőséges életkörülménynek köszönhetően – a klorofill alapú fotoszintetikus rendszerekkel szemben – a halobaktériumnak mindössze egyetlen fehérjére, a bR-re van szüksége a fény kémiai energiává történő átalakításához. A bR feladata, hogy fény hatására protonokat pumpáljon a sejt belső részébe. Eközben a fehérje jól megkülönböztethető térszerkezetű állapotok sorozatán megy keresztül (fotociklus). Ezen úgynevezett köztes állapotok jelölése rendre: BR (alapállapot), K, L, M, N, O (3. ábra).

A megvilágítás hatására elinduló fotociklus során a bakteriorodopszin törésmutatója is megváltozik. Ez a változás a mérések szerint eléri, egyes esetekben meg is haladhatja az integrált optikai eszközökben jelenleg használt szervesetlen anyagokét. Ezt a fényindukált törésmutató-változást felhasználva

optikai kapcsolás hozható létre [6], ami optikai elven működő logikai kapuk létrehozását teszi lehetővé. A bakteriorodopszin a többi biológiai eredetű molekulához képest kivételes stabilitást mutat, ami szintén fontos követelmény a lehetséges alkalmazások szempontjából [7].

A 70-es években történt felfedezése óta világszerte számos kutatóintézetben vizsgálják a bakteriorodopszin felhasználási lehetőségeit (például holografikus memória, tisztán optikai elven működő kapcsoló). A Magyar Tudományos Akadémia Szegedi Biológiai Kutatóközpontjának Biofizikai Intézetében 1974 óta folyó bakteriorodopszinnal kapcsolatos kutatások. Kutatócsoportunk – *Dér András* vezetésével – a bakteriorodopszin integrált optikai felhasználásával, többek között optikai kapcsolással [6], és erre épülő, teljesen optikai elven működő logikai kapuk fejlesztésével foglalkozik [8].

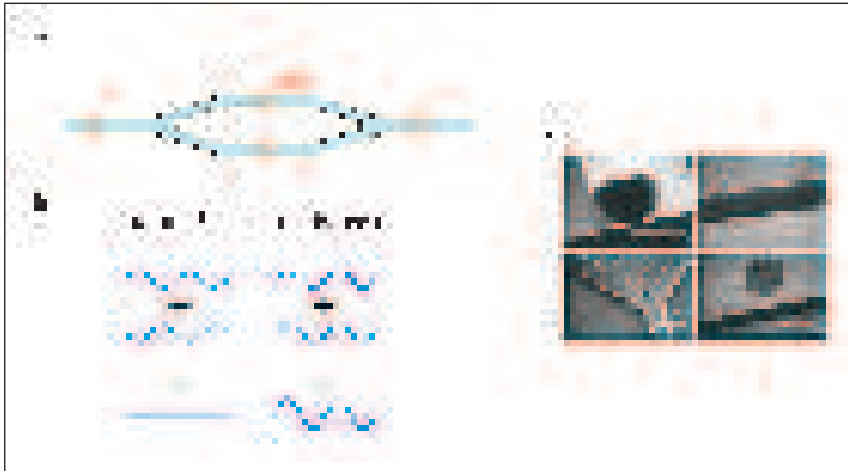
Az általunk fejlesztett eszköz alapja egy integrált optikai Mach-Zehnder interferométer (4a. ábra), amelyet úgynevezett fotolitográfias módszerrel készítettünk. Az eljárás során üveg tárgylemezre felvitt fényérzékeny rétegbe ultrabolya lézerrel rajzoljuk a kívánt struktúrát. A réteg csak a megvilágítás helyén köt meg, ennek köszönhetően, a felesleg leoldása után,



3. ábra. A bakteriorodopszin fotociklusa. Az egyes állapotokban a bR más-más hullámhosszú (színű) fényt nyel el legnagyobb mértékben (ezek a hullámhosszértékek láthatók zárójelben). Szemléletesen ez azt is jelenti, hogy a fehérje fotociklus közben változtatja a színét

az üvegfelülethez kötötten megkapjuk az interferométert (4c. ábra).

A lézert fényt ($\lambda = 633 \text{ nm}$) az interferométer bemenetéhez illesztett optikai szálon juttatjuk be az eszközbe, majd a kilépő fényt szintén optikai szál segítségével vezetjük el a jelerősítő



4. ábra. A Mach-Zehnder interferométer. (a) Az integrált optikai Mach-Zehnder interferométer sematikus rajza. (b) A hullámok egyesítéskor létrejöhét erősítés vagy gyengítés, attól függően, hogy a két hullám egymáshoz képest milyen állapotban találkozik. (c) Az interferométer elektronmikroszkópos képe

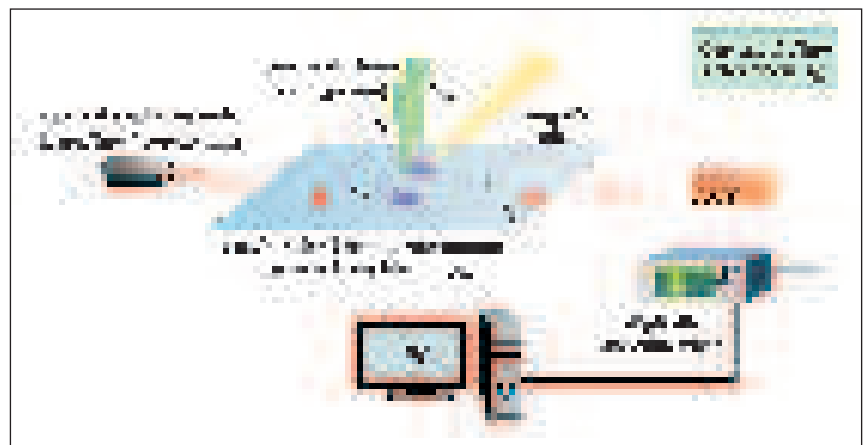
teszhez használt fotoelektron-sokszorozón keresztül a digitális oszcilloszkóphoz (5. ábra).

Az interferométerbe belépő fény két részre oszlik, amelyek egy adott úthossz megtétele után újra egyesülnek (4a. ábra). Alapesetben, a két egyforma karon a fény azonos idő alatt halad végig, és ekkor – az egyesítés után – a fénycsúcsok azonos állapotban találkoznak (hullámhegy hullámhegygel, hullámvölgy hullámvölgygel). Ebben az esetben a hullámok erősítik egymást (4b. ábra). Ha azonban a karok anyaga (törésmutatója) különböző, akkor a fény különböző sebességgel halad bennük, és ilyenkor az azonos úthosszakat a fény már nem azonos idő alatt teszi meg. Ekkor elérhetjük, hogy az egyesülő hullámok ne azonos állapotban találkozzanak: létrehozhatunk csillapítást vagy akár kioltást is; hullámhegy hullámvölgygel találkozik (4b. ábra).

Az általunk készített eszközben a karok törésmutatóját a következőképpen tudjuk változtatni. Az interferométer mindkét karjára vékony, egyenletes bakteriorodopszin réteget viszünk fel (5. ábra). Fénnyel történő megvilágítás hatására a bR réteg törésmutatója megváltozik, majd a gerjesztés kikapcsolásával visszatér a kezdeti értékhez. Ez teszi lehetővé, hogy a bR-t gerjesztve befolyásoljuk az egyes karokban a fény terjedési idejét, ezáltal változtatni tudjuk a kimeneten megjelenő fény intenzitását. A következőkben ismertetett méréseket a bR alapállapot – M állapot közötti átmenet gerjesztésével végeztük.

A logikai kapuk bemeneti és kimeneti értékei úgynevezett logikai értékek (0 vagy 1), melyeket az integrált elektronikában feszültségintékek képviselnek. Létrehozott eszközünkben a logikai be-

menetet (X_1, X_2) a bR-t gerjesztő fény, a kimenetet (Y) pedig az interferométerből kilépő lézercsík jelenti. Az integrált elektronikához hasonlóan a bemenet, il-



5. ábra. A mérési elrendezés sematikus rajza

letve a kimenet 0 vagy 1 értéket vehet fel a következőképpen: a bemeneten a bR réteg gerjesztése jelenti a logikai 1-et, a gerjesztés hiánya a logikai 0-t, a kimeneten pedig a maximális kilépő intenzitás (erősítés) felel meg 1-nek, a kilépő fény hiánya (kioltás) 0-nak.

Egy logikai kapu egy vagy több logikai értéket kap bemenetként, melyeken elvégezve az adott műveletet, egy kimeneti értéket ad vissza. A kapuk igaz-

ságtáblája (6. ábra) adja meg, hogy a különböző bemenetek kombinációjától függően, melyik logikai érték fog megjelenni a kimeneten.

A bR gerjesztésével vezérelt optikai logikai kapu működésének bemutatására végzett méréseink eredménye, valamint a megvalósított logikai műveletekhez tartozó igazságtáblák a 7. ábrán láthatók. A mérések során a kilépő fény intenzitása mellett a bakteriorodopszin gerjesztő lézercsík intenzitását is oszcilloszkóppal rögzítettük, ezáltal nyomon követhettük a bemeneti és kimeneti értékek változását. Az eredményeket ábrázoló grafikonon (7–8. ábra) piros szín jelöli az interferométer kimenetén mért fényintenzitást, a zöld és a kék pedig a bakteriorodopszin gerjesztő fény intenzitását az egyik, illetve másik karban.

Eddigi kísérleteink során kétféle logikai kaput hoztunk létre, ezek a NEM (NOT, inverter) és az XOR (kizáró VAGY) kapu. A NEM kapu a legegyszerűbb logikai műveletet, a tagadást végzi (0-ból 1, 1-ből pedig 0 lesz). Az XOR kapu, magyar nevén KIZÁRÓ VAGY a

kimeneten kizárólag akkor ad 1-et, ha a bemeneti értékek különbözőek. Gyakran használják kettes számrendszerbeli számok egyezésének vizsgálatára.

6. ábra. Néhány logikai kapu igazságtáblája

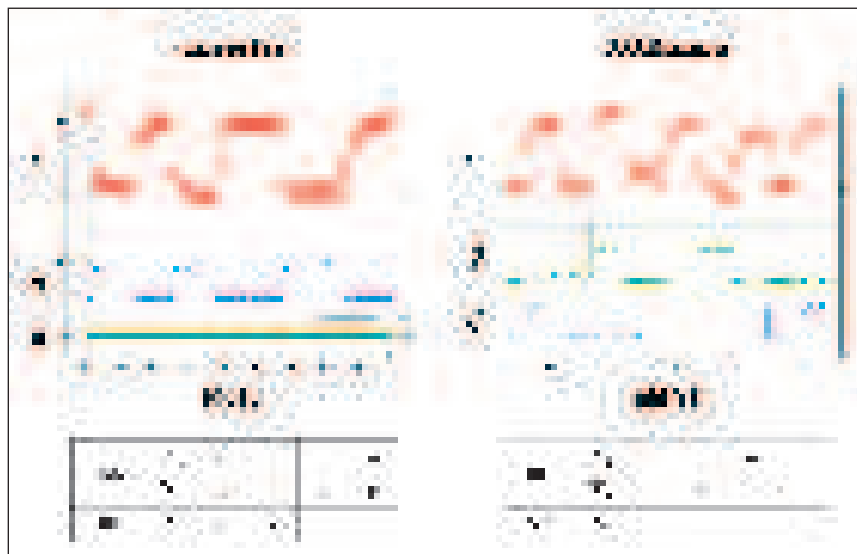
Logic Gate	X_1	X_2	Y
NOT (NEM)	0	0	1
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	0
XOR (KIZÁRÓ VAGY)	0	0	0
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	0
AND (ÉS)	0	0	0
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	1
OR (VAGY)	0	0	0
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	1

A megalkotott logikai kapuk egyetlen Mach-Zehnder-interferométerből állnak. További kapuk megvalósításához több interferométer összekapcsolására van szükség [9]. A jövőben ilyen, több interferométerből

végzett kísérleteinket is. Ez az átmenet nagyságrendekkel gyorsabban lezajlik, mint a BR–M átmenet. Ezt a nagyon gyors átmenetet felhasználva sikerült megvalósítanunk az eddig demonstrált

leggyorsabb fehérje alapú integrált optikai logikai kaput.

Kutatásaink alátámasztják, hogy megvalósíthatóak olyan optikai logikai kapuk, amelyek az integrált elektronikák kiegészítve, bizonyos esetekben helyettesítve, nagy szerepet kaphatnak a jövő nagysebességű, optikai elven működő telekommunikációs és adatfeldolgozó egységeiben.



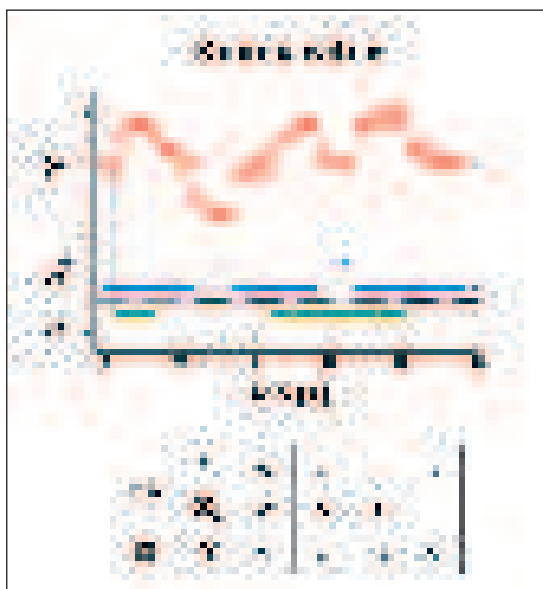
7. ábra. Az integrált optikai logikai kapukon végzett mérések eredménye, valamint a hozzájuk tartozó igazságtáblák. Pirossal az interferométer kimenetén mért fényintenzitást (logikai kimenet- Y), zölddel és késsel pedig a bakteriorodopszint gerjesztő fény intenzitása látható az egyik, illetve másik karban (logikai bemenetek- X_1, X_2)

álló logikai kapuk (elsősorban ÉS kapu, valamint VAGY kapu) létrehozását tervezzük.

A logikai kapuk mellett az interferométer komparátorként is működtethető (8. ábra). Az elektronikában is alkalmazott komparátor két bemeneti érték közötti mennyiségi kapcsolat (kisebb, nagyobb, egyenlő) előállítását végző eszköz. Ahogyan a 8. ábrán látható, a kimeneti intenzitás (Y) a kezdeti értékhez képest csökken vagy nő, attól függően, hogy melyik karon (X_1, X_2) gerjesztettük a bakteriorodopszint. Abban az esetben, ha egyik kart sem világítjuk meg ($X_1=0, X_2=0$), vagy mindkét kart egyszerre gerjesztjük ($X_1=1, X_2=1$), a kimeneti intenzitásérték változatlan marad. Ez azt jelenti, hogy az eszköz kimenetéből eldönthető, hogy melyik ágon történt gerjesztés, azaz melyik bemenethez tartozott a nagyobb logikai érték.

Eredményeinket 2013 augusztusában a *Biosensors and Bioelectronics* című tudományos folyóiratban foglaltuk össze [8]. Bemutattuk, hogy az általunk készített, a bakteriorodopszin fényindukált törésmutató-változását felhasználó, interferometrikus elven működő logikai eszköz – a fentiekben részletezett módon – invertként, XOR kapuként, továbbá komparátorként működtethető. Emellett ismertettük a BR–K átmenet gerjesztésé-

8. ábra. Az integrált optikai komparátorral végzett mérések eredménye. A komparátor két bemeneti érték közötti kapcsolat megállapítására alkalmas eszköz. Esetünkben a két bemenetet az egyes karokon található bR réteget gerjesztő fény jelenti (az ábrán zöld, illetve kék szín jelöli). A kimenet (az ábrán pirossal) mutatja meg, hogy melyik ágon történt gerjesztés, azaz melyik bemenethez tartozott a nagyobb logikai érték



Köszönetnyilvánítás

„A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

Irodalom

[1] <http://www.statisticbrain.com/computer-sales-statistics/>
 [2] „Cramming more components onto integrated circuits”. Gordon E. Moore, *Electronics Magazine* (1965)
 [3] „All-optical AND gate at 10 Gbit/s based on cascaded single-port-coupled SOAs”. Xinliang Zhang, Ying Wang, Junqiang Sun, Deming Liu, and Dexiu Huang, *Optics Express* (2004)
 [4] „All-optical digital 3-input AND gate using sum- and difference-frequency generation in PPLN waveguide”. J.E. Mcgeehan, M. Giltreli, A.E. Willner, *Electronics Letters* (2007)
 [5] „Optics inspired logic architecture”. James Hardy, Joseph Shamir, *Optics Express* (2007)
 [6] „Protein-based ultrafast photonic switching”. L. Fábíán, Zs. Heiner, M. Mero, M. Kiss, E. K. Wolff, P. Ormos, K. Osvay, A. Dér, *Opt. Express* (2011)
 [7] „Protein-Based Three-Dimensional Memory”. R. R. Birge, *American Scientist* (1994)
 [8] „High-speed integrated optical logic based on the protein bacteriorhodopsin”. A. Mathesz, L. Fábíán, S. Valkai, D. Alexandre, Paulo V. S. Marques, P. Ormos, E. K. Wolff, A. Dér, *Biosensors and Bioelectronics* (2013)