STREDNÁ PRIEMYSELNÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ

**OptickÉ poČítače**

**Matej Sloboda, II. D**

2024

Obsah

Obsah 2

Anotácia 3

1 Čo je optický počítač 4

1.1 História optických počítačov 4

1.2 Ako pracuje optický počítač 4

1.3 Technológia – optické komponenty 5

1.3.1 VCSEL 5

1.3.2 Fotonické kryštály 6

1.3.3 Nelineárna optika 6

1.3.4 Celooptická regenerácia 6

1.3.5 Fotonické neurónové siete 6

1.4 AIM – Microsoft Analog Iterative Machine 7

2 Výhody a limitácie optických počítačov 9

2.1 Výhody fotónovej technológie 9

2.2 Limitácie fotónovej technológie 10

3 Súčasný stav a budúcnosť optických počítačov 11

3.1 Rôzne názory 11

3.2 Možnosti 11

3.3 Optické počítače versus kvantové počítače 12

3.4 Firmy zaoberajúce sa optickými počítačmi 13

Záver 14

Zoznam použitej literatúry 15

Anotácia

Táto práca sa zaoberá optickými počítačmi. Na úvod si povieme pár slov z histórie a na akom princípe optické počítače pracujú, aké technológie využívajú. Pozrieme sa bližšie, aké majú výhody ale aj limitácie. Potom sa budeme zaoberať tým, ako vidia budúcnosť optických počítačov odborníci a s ktorými oblasťami sa musia ešte vývojári popasovať. Ku koncu práce uvedieme niekoľko príkladov firiem, ktoré sú aktívne vo vývoji optických počítačov. Súčasťou práce je učebná pomôcka, kde nazhromaždené poznatky prezentujeme sumárnou formou s viacerými názornými obrázkami.

**Annotation**

This work is focused on optical computers. At the beginning we will say a few words about the history of optical computers and the principle they work on, as well as what technologies they use. We will take a closer look at their advantages, but also their limitations. Then we will discuss how experts see the future of optical computers and which areas still need to be addressed by the developers. Near the end we will list some examples of companies that are active in the development of optical computers. This work includes a teaching aid where the gathered knowledge is presented in summarized form with several illustrative pictures.

1. Čo je optický počítač

Optický počítač sa nazýva aj fotónový počítač (ang. Optical Computing). Ide o technológiu, ktorá pre digitálne výpočty používa fotóny generované laserom alebo laserovou diódou.

1.1 História optických počítačov

História optických počítačov je spojená s vývojom radarových systémov. S vynálezom laseru v 60. rokoch 20. storočia prišli aj prvé návrhy na plne optický počítač. Von Neumann publikoval svoj patent v r. 1957 a Bell Labs vytvorili prvé optické digitálne výpočtové obvody. [1] Odvtedy prešla oblasť optických počítačov viacerými aktívnymi cyklami a útlmami. Koncom 70. rokov bol predstavený koncept paralelných logických brán v počítači na vysokorýchlostné spracovanie obrazov. [2] Od 90. rokov sa pozornosť vývojárov presunula na optické prepojenie polí polovodičových smart pixelov. [3,4]

Na prelome milénia nastal obrovský pokrok v rýchlosti prenosu dát na optických vláknach, ako aj vývoj nových typov nelineárnych optických zariadení a prepínačov. Takéto tempo pokroku naznačovalo, že do roku 2020 budeme mať plne optické počítače a signálové procesory bez zbytočného a pomalého prevodu na elektroniku a späť na fotóny. Rýchlosť vo vývoji šírky prenosového pásma a nelineárnej optiky sa však následne spomalila a dnes ešte stále nie sú plne optické technológie rozšírené na bežné používanie. [5] Možno povedať, že v určitých obdobiach mali vplyv na odsunutie pozornosti od optických počítačov aj úspechy v napredovaní elektroniky. V poslednej dobe sa optika opäť dostáva do popredia v súvislosti s AI. [2]

1.2 Ako pracuje optický počítač

Ako každý počítač, optický počítač potrebuje na dobré fungovanie tri veci [4]:

* Optický procesor
* Optický prenos dát, napr. optický kábel
* Optické úložisko

V klasických počítačoch sa na výpočty používajú elektróny a pri procesoch je prúd usmerňovaný pomocou tranzistorov, kondenzátorov, odporov a iných komponentov. V optických počítačoch sa používajú fotóny, ktoré sa generujú pomocou diód alebo laseru a sú veľmi ľahké a rýchle. Namiesto tranzistorov používa optický počítač transfázory, svetlo sa manipuluje pomocou fotodetektorov, fázových modulátorov, vlnovodov atď. [6,7] Svetelné vlny generované laserom alebo nekoherentnými zdrojmi sa používajú na procesovanie dát, umelú inteligenciu, numerické výpočty, uloženie dát, prenos dát. [4]

Optický počítač má za cieľ zvládať riešenie zložitých optimalizačných problémov, ktoré sú bežné v odvetviach ako sú financie, logistika, doprava, energetika, zdravotníctvo alebo výroba. Zložitosť spočíva v tom, že počet možných kombinácií na riešenie problému rastie exponenciálne, čo je pre tradičné digitálne počítače problém vyriešiť včas a energeticky a nákladovo efektívne. Na vysvetlenie tejto zložitosti sa klasicky uvádza ako príklad problém cestujúceho obchodníka. „Predstavte si, že sa pokúšate nájsť najefektívnejšiu trasu na návštevu skupiny miest a každé môžete navštíviť len ​​raz pred návratom do východiskového bodu. Len s piatimi mestami existuje 12 možných trás – ale pri probléme so 61 mestami počet potenciálnych trás prevyšuje počet atómov vo vesmíre.“ [8]

1.3 Technológia – optické komponenty

V optickej výpočtovej technike existujú tri samostatné trendy: analógové optické systémy na špeciálne účely, digitálne optické systémy na všeobecné použitie a hybridné opticko-elektronické systémy. Stavebným základom pre analógové a digitálne optické počítače sú inovácie, ktoré prinášajú stále nové optické komponenty a technológie ako napríklad elektrooptický priestorový filter, 2D modulátor priestorového svetla a variabilné elektrooptické zrkadlo.[3] Tu sú niektoré z optických inovácií.

1.3.1 VCSEL

VCSEL (vertical cavity surface emitting micro laser) vysiela svetlo v cylindrickom lúči a premieňa elektrický signál na optický pomocou šošoviek a mikrozrkadiel. Jeho výhodou je vysoký výkon a nízke náklady. [7]

A diagram of a light source

Description automatically generated

Obrázok 1 VCSEL [7, str.8]

1.3.2 Fotonické kryštály

Úlohou fotonických kryštálov v optických počítačoch je nahradiť elektróny.[7] V štruktúrach fotonických kryštálov sú vzduchové otvory usporiadané periodicky tak, že vzdialenosť medzi nimi je menšia ako vlnová dĺžka svetla, ktoré sa nimi šíri. To spôsobí, že sa prichádzajúce svetlo odrazí od konštrukcie vzduchových otvorov. Avšak svetlo sa tu môže šíriť aj cez kanál, ktorý má väčšiu šírku ako je vlnová dĺžka svetla. Oproti elektrónom a integrovaným obvodom tu dochádza k veľmi nízkym stratám pri prechode svetla. [9]

1.3.3 Nelineárna optika

Fotóny vo voľnom priestore prechádzajú cez seba bez ovplyvnenia, preto vedci hľadajú spôsob, ako vyvolať interakcie, a to je možné vo vnútri nelineárnych kryštálov. Nelineárna optika spočíva v tom, že jeden svetelný lúč mení elektronickú štruktúru materiálu, čo ovplyvňuje ďalšie šírenie lúčov. Kľúčovým parametrom je nelineárny koeficient, ktorý určuje, ako intenzívny musí byť riadiaci lúč, aby sa vytvorila významná modulácia druhého lúča. Väčšina materiálov má veľmi malé nelineárne koeficienty, čo znamená, že intenzita riadiaceho lúča musí byť veľmi vysoká. [5]

1.3.4 Celooptická regenerácia

Regenerácia signálu sa v súčasnosti vykonáva prostredníctvom OEO konverzie: Optical-to-Electronic-to-Optical. Hoci sa tento nápad objavil pred vyše dvoma desaťročiami, problém uvedenia do praxe spočíva predovšetkým v tom, že ide o veľmi komplexnú technológiu, ktorá si vyžaduje mimoriadnu presnosť, čo sa zatiaľ nedá dosiahnuť tak, aby sa to mohlo zoširoka používať v bežnej praxi. [10] Pri plne optickej regenerácii je potrebné optické impulzy znovu zosilniť, pretvarovať a prečasovať – to je tzv. 3R regenerácia (reamplify, reshape and retime). Dá sa to dosiahnuť odosielaním impulzov cez nelineárne zosilňovače a mixéry zložené z úsekov vysoko nelineárnych vlákien (highly non linear fiber HNLF) alebo polovodičových optických zosilňovačov (semiconductor optical amplifiers SOA). Zatiaľ boli dosiahnuté úspechy vo vývoji 2R plne optickej regenerácie (znovuzosilnenie a pretvarovanie, ale nie prečasovanie), aj to iba pri nižších dátových rýchlostiach. Cieľom je dosiahnuť 3R pri vysokých dátových rýchlostiach (40 Gb/s). [5]

1.3.5 Fotonické neurónové siete

Fotonické neurónové siete využívajú technológie založené na svetle a majú obrovský potenciál v oblasti umelej inteligencie (AI) a výpočtovej techniky. V porovnaní s tradičnými elektronickými neurónovými sieťami ponúkajú vyššiu rýchlosť spracovania, nižšiu spotrebu energie a lepšiu paralelnosť. Tieto siete by mohli vyriešiť problémy so škálovateľnosťou a efektívnosťou vo veľkých systémoch AI, v telekomunikáciách a celkovo v spracovaní dát. [11] „Neurónová sieť je vysoko prepojená sieť uzlov a prepojení, v ktorej sú informácie distribuované v sieti takmer rovnakým spôsobom, akým sú informácie distribuované a spracovávané v mozgu“ [5]. Neurónové siete môžu byť digitálne aj analógové. Digitálne neurónové siete sa dajú implementovať cez softvér na bežných digitálnych počítačoch, kým analógové siete sú implementované v špecializovanom hardvéri, niekedy nazývanom aj neuromorfné počítačové systémy. Práve na analógových neurónových sieťach sa dá využiť optika, pretože svetlo má vynikajúcu schopnosť vytvárať prepojenia vo voľnom priestore medzi veľkým počtom optických uzlov. [5]

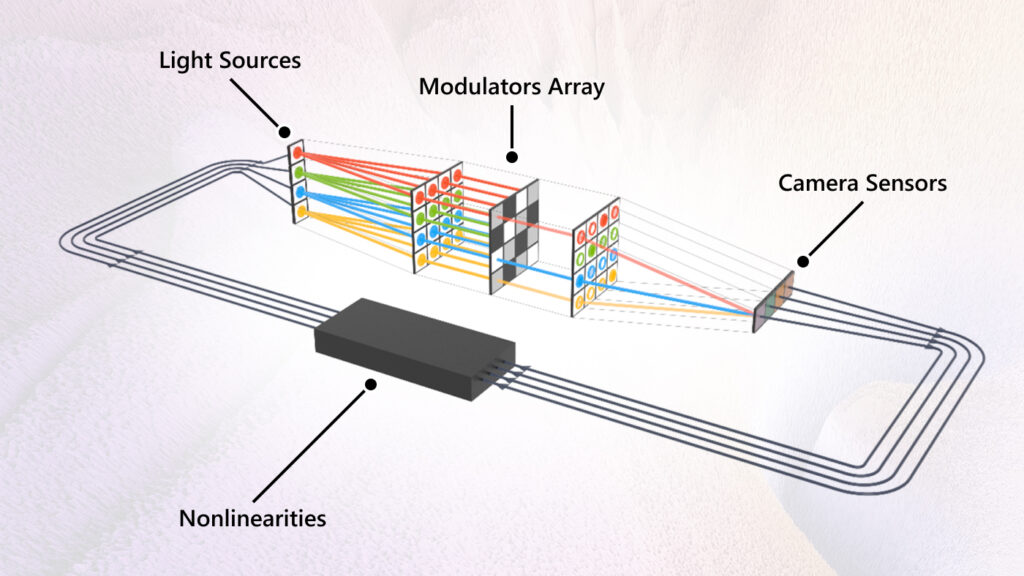
A diagram of a multi-matrix multiplication

Description automatically generated

Obrázok 2 – Optické vektorovo-maticové násobenie [5]

1.4 AIM – Microsoft Analog Iterative Machine

Konkrétnym príkladom vývoja optického počítača je AIM (Analog Iterative Machine), ktorý vyvíja Microsoft. Ide o analógový optický počítač. Svetlo prechádza niekoľkými vrstvami a vytvára odtlačok na každej časti modulárneho poľa. Takto nahrádza funkciu štandardného tranzistora. [12] „Rôzna intenzita svetla sa dá využiť na sčítanie a násobenie, čo je základ pre optimalizačné problémy. Pokročilé verzie AIM, ktoré fungujú rýchlosťou svetla, by mali byť schopné prekonať rýchlosť binárnych počítačov asi stokrát“, hovorí Ballani z výskumného tímu. [13] Zatiaľ je AIM stále vývojárskym projektom a funguje v obmedzenom rozsahu, ale počiatočné výsledky sú sľubné. Multidisciplinárny tím začal spoluprácu s nadnárodnou bankou Barclays so sídlom v Spojenom kráľovstve s cieľom vyriešiť problém optimalizácie, typický pre finančné inštitúcie. V júni 2023 tím spustil online simulátor AIM, ktorý umožňuje partnerom preskúmať ponúkané možnosti. [8]



Obrázok 3: „Ilustrácia počítača AIM, ktorý implementuje masívne paralelné násobenie vektorovej matice pomocou komoditných optických technológií (back) a nelinearitu aplikovanú pomocou analógovej elektroniky (front). Vektor je reprezentovaný pomocou poľa svetelných zdrojov, matica je vložená do poľa modulátora (zobrazené v odtieňoch šedej) a výsledok je zhromažďovaný do snímača kamery“. [8]

1. Výhody a limitácie optických počítačov

2.1 Výhody fotónovej technológie

1. **Vyššia prenosová rýchlosť**

Táto technológia má zaručiť väčšiu rýchlosť prenosu, ako pri použití elektrónov (elektriny) v klasických počítačoch. Optické počítače majú potenciál byť 100-násobne rýchlejšie oproti najmodernejším digitálnym strojom pri rovnakom výkone. [14] Rýchlosť svetla v optických okruhoch by sa mohla približovať rýchlosti svetla vo vákuu. Na druhej strane, rýchlosť elektrického prúdu dosahuje aj za perfektných podmienok iba 50-95% rýchlosti svetla. [6]

1. **Menšia strata tepla pri prenose**

Optické počítače by mohli byť nielen rýchlejšie, ale aj s minimálnou stratou tepla pri prenose. Pohyby fotónov môžu byť vedené a kontrolované takým spôsobom, že môžu zatáčať a pokračovať bez výraznej straty výkonu. Svetlo sa dá ľahko zadržať a počas cestovania stráca menej informácií, čo je užitočné najmä v situáciách, keď sa prepojenia môžu zahriať, čo spomaľuje pohyb elektrónov. Fotonika má vysokú priepustnosť > 1 TB/s na kanál (ktorých môže byť veľa v tesnej blízkosti), v porovnaní so schopnosťou medeného drôtu 1 GB/s na kanál. [4]

1. **Menšie rozmery**

Viditeľné a infračervené lúče sa pretínajú bez toho, aby vzájomne na seba pôsobili (na rozdiel od elektrónov), čiže fungovanie je dvojrozmerné, kým v klasických počítačoch je potrebná trojrozmerná kabeláž, aby sa elektrický prúd mohol viesť okolo. Preto môžu byť optické počítače menšie.

1. **Menej náchylné na poškodenie teplom alebo skratom**

Optické počítače používajú na vykonávanie výpočtov logické brány a binárne rutiny, ale spôsob, akým sa tieto výpočty vykonávajú, sa líši. Optické počítače totiž namiesto silikónových kanálov a medených drôtov používajú plazmonické nanočastice. Keďže neobsahujú fyzické káble, sú menej náchylné na poškodenie teplom alebo vibráciami. Sú prakticky imunitné voči pôsobeniu elektromagnetického poľa a elektrickým skratom.[4] Tým by sa mohla dosiahnuť aj dlhšia životnosť hardvéru.[6]

1. **Väčšia šírka pásma, paralelné spracovanie**

Vďaka vlnovým vlastnostiam svetla sú optické počítače schopné komunikovať súbežne v mnohých kanáloch bez vzájomného ovplyvňovania. [4] Vďaka paralelnému spracovaniu môžu skomprimovať viac informácií a obsiahnuť väčšiu šírku pásma a spracovávajú oveľa zložitejšie údaje. [6]

1. **Ďalšie výhody**

K ďalším výhodám optických počítačov patria napríklad priame spracovanie obrazu, vyššia hustota úložiska, dynamické škálovanie a rekonfigurovateľnosť na menšie/väčšie siete/topológie, spracovanie údajov na optických komponentov môže byť lacnejšie a jednoduchšie, niektoré optické materiály sú dostupnejšie a majú vyššiu akumulačnú hustotu ako magnetické materiály. [4]

* 1. Limitácie fotónovej technológie

1. **Drahé a objemné komponenty**

Znižovanie ceny komponentov pre klasické počítače možno dosahovať vďaka masovej výrobe, čo zatiaľ pre optické počítače nie je možné. Navyše, optické komponenty nie sú zatiaľ dostatočne zminiaturizované, preto sú súčasné prototypy optických počítačov objemné.

1. **Nároky na presnú výrobu, čistotu a ovládanie viacerých signálov**

Akákoľvek malá nepresnosť vyrobených komponentov alebo aj prach v zariadení môže mať za následok odklonenie laserových lúčov a tým pádom úplne iný výsledok. Okrem toho, v dôsledku interakcie viacerých signálov je výpočet zložitý proces a integrácia optických brán je komplikovaná. Takisto je veľkou výzvou výroba fotonických kryštálov. [4]

1. **Nekompatibilita**

Konvenčné počítače sú zostavené podľa Von Neumannovej architektúry. Aplikačný softvér a operačné systémy sú postavené na tejto architektúre. Na rozdiel od toho sú optické počítače zostavené podľa inej architektúry kvôli paralelizmu systému. V dôsledku toho operačné systémy, ako napríklad Microsoft Windows, nemusia byť schopné správne fungovať alebo dokonca nemusia fungovať vôbec.

1. Súčasný stav a budúcnosť optických počítačov

Fotónová technológia je vnímaná kontroverzne, čo sa týka jej reálnych možností využitia.

3.1 Rôzne názory

V odborných kruhoch panujú rozdielne názory, či optické počítače môžu alebo nemôžu konkurovať elektronickým počítačom na báze polovodičov z hľadiska rýchlosti, spotreby energie, nákladov a veľkosti. Optický počítač sme ešte nevideli, ale sme na hranici vývoja. Fotonické počítače môžu byť bližšie, než si myslíme. [4]

Niektorí autori, ktorí sa zaoberajú myšlienkou optického počítača už dlhšie, majú názor, že v súčasnosti je realizácia optického počítača takisto vzdialená ako bola pred dvadsiatimi rokmi, resp. nejde to tak rýchlo ako to nádejne vyzeralo na prelome tisícročia, hoci nedávny pokrok v all-optical spracovaní je veľmi nádejný. [5] Konečný cieľ optického počítača: krištáľová doska bez obrazovky, ale holografická projekcia vo vzduchu pre vstup a výstup. Bude to však trvať ešte desaťročia. [6]

3.2 Možnosti

Najrýchlejšie krátkodobé úspechy sa dosahujú v pokusoch o integráciu optických a klasických počítačov. Kameňom úrazu pri tejto hybridnej technológii zostáva prevod optických signálov na elektrické a naopak, keďže tu dochádza k oneskoreniu a 30% energetickým stratám. [15] Preto dlhodobým snom zostáva vývoj plne optického počítača s optickými procesormi namiesto polovodičových procesorov, kde sa bude optická logika realizovať pomocou svetelných lúčov rovnako ako elektronické prúdy vykonávajú elektronickú logiku v tranzistoroch a integrovaných obvodoch, avšak bez potreby drahých medených drôtov. [5]

Pomôcť prekonať niektoré súčasné limitácie fotonických počítačov by mohli viaceré oblasti aktívneho výskumu:

Vysokorýchlostné integrované zariadenia: Výskumníci pracujú na vývoji vhodnej konfigurácie integrovaného optického hardvéru, vysokovýkonných fotodetektorov, modulátorov, prepínačov, zosilňovačov a iných komponentov. Dôležitá je aj integrácia veľkého množstva komponentov do jedného čipu bez kompromisov vo výkone. [4,16]

Nízkostratové materiály: Vývoj nízkostratových materiálov na vedenie svetla cez čipy by umožnil väčšie vzdialenosti medzi komponentmi a znížil by straty signálu, čím by sa zvýšila účinnosť optických obvodov. [4] Ako cenovo dostupné materiály na presnú tenkovrstvovú polarizáciu svetelných signálov vyzerajú sľubne grafén a uhlík [17]. Vývoj sa zameriava aj na kvalitné zálohovacie optické médiá. [16]

Nelineárne efekty: vývoj silnejších a praktickejších optických nelineárnych komponentov [16]. Je nevyhnutný veľký posun v nelineárnej optike - modulátorov priestorového svetla z tekutých kryštálov (spatial light modulators SLM) alebo nelineárnych interferenčných filtrov (nonlinear interference filters NLIF). [3] Napríklad jednofázová modulácia a štvorvlnové miešanie môžu obmedziť vzdialenosť, na ktorú možno prenášať signály a sťažiť ovládanie správania svetla v optickom obvode. [4]

Kompatibilita s existujúcimi technológiami: Vyvíja sa úsilie na vývoj hybridných optoelektronických systémov, ktoré integrujú optické prvky s konvenčnými elektronickými komponentmi, čo umožňuje využívať výhody oboch typov technológií.

Avšak už sú viditeľné realizovateľné aplikácie v špičkových výpočtových a dátových centrách. To znamená, že s takmer špičkovými výpočtovými schopnosťami môže IoT zariadenie s podporou 5G v maloobchodnej predajni vypočítať a uložiť časť svojich vygenerovaných údajov tam a tam namiesto prenosu všetkých nespracovaných údajov do vzdialeného dátového centra. Výsledok: nízka latencia, nízke prenosové straty. [6]

Musíme si zároveň uvedomiť, že oblasť vývoja klasických počítačov taktiež neustále napreduje. Takže porovnávanie optických a klasických technológií nie je statické a aj OEO konverzia sa zdokonaľuje. [5]

3.3 Optické počítače verzus kvantové počítače

Ak hovoríme o vývoji počítačových systémov, nemožno nespomenúť kvantové počítače. Vďaka unikátnym vlastnostiam kvantovej mechaniky môžu kvantové počítače riešiť problémy na úrovni vyššej ako dovoľujú možnosti tých najpokrokovejších počítačov, a to aj optických. Optické počítače však predčia kvantové v rýchlosti, ktorou možno vykonávať jednoduchšie výpočty. Skúma sa aj, ako skĺbiť použitie optických a kvantových počítačov.[4] Jednou z hlavných výhod spojenia fotoniky a kvantových počítačov je kompatibilita s existujúcou infraštruktúrou a výrobnými procesmi pre veľkoobjemovú výrobu polovodičov. Na druhej strane práve vďaka optike by mohli kvantové počítače dosiahnuť svoj plný potenciál.[18]

3.4 Firmy zaoberajúce sa optickými počítačmi

Už sme spomínali Analog Iterative Machine (AIM) od **Microsoftu**. Tu sú príklady niekoľkých ďalších firiem, ktoré sú aktívne na poli optických počítačov alebo vývoja ich komponentov.

**Lightelligence**, ktorý vznikol oddelením od MIT, oznámila, že „transformovala najnovšiu optickú technológiu do prelomového počítačového riešenia, čo prináša nielen exponenciálne zlepšenia v sile počítača ale aj výrazne znižuje spotrebu energie.“[4]

**Nicslab** (Palo Alto, US, od 2020), spoločnosť vyrába čipy a vyvíja elektronické a fotonické integrované obvody pre optické riešenia v dátových centrách, AI a kvantových počítačoch. [[19](https://www.f6s.com/companies/photonics/mo)]

**Lightspeed Photonics**, deeptech startup v Singapure, buduje optické prepojenia novej generácie, ktoré posielajú dáta do čipov priamo cez lasery (bez káblov) a integrujú výpočtové čipy na spracovanie dát s veľkou šírkou pásma pri nízkej spotrebe energie. [6]

Záver

Optické počítače majú svojich prívržencov, hoci podľa niektorých odborníkov je tejto oblasti príliš veľa limitácií. Vývoj napreduje – objavujú sa nové laserové diódy, fotodetektory a  materiály pre výrobu rýchlejších switchov. Budúcnosť by mala priniesť výrazný upgrade v účinnosti a rýchlosti počítačov, ale aj zmenšenie objemu a zníženie ceny, ktorá bude práve závisieť aj od masovejšieho presadenia optiky a tým aj zodpovedajúcej masovej výroby. Predsa len však to bude stále ešte skôr v oblasti hybridných počítačov ako plne optických. A to aj z dôvodu, že klasické počítače tiež nezaspali vo vývoji ale prinášajú neustále rôzne vylepšenia. Zaujímavým sa javí napríklad aplikácia optickej technológie na kvantové počítače.

Zoznam použitej literatúry

1. KISSNER, M. a i., An All-Optical General-Purpose CPU and Optical Computer Architecture, Feb 2024, Dostupné z: <https://arxiv.org/html/2403.00045v1#bib.bib7>
2. TANIDA, J., Revival of Optical Computing. In: SUZUKI, H., TANIDA, J., HASHIMOTO, M., Photonic Neural Networks with Spatiotemporal Dynamics. Springer, Singapore, 2024, Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-981-99-5072-0_1>
3. ARBEL, D., KOPEIKA N.S., Optical Processing Systems, in [Encyclopedia of Modern Optics](https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123693952/encyclopedia-of-modern-optics), 2005, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/optical-computing>
4. LOE, Molly, Optical computers: everything you need to know – Optical computing – the light fantastic? In T-HQ, máj 2023, Dostupné z: <https://techhq.com/2023/05/what-is-optical-computing-explained/>
5. NOLTE, D. D., Twenty Years at Light Speed, Photonic COmputing, in Galileo Unbound by Oxford University Press, nov. 2021, Dostupné z: <https://galileo-unbound.blog/2021/11/28/twenty-years-at-light-speed-optical-computing/>
6. GUPTA, CH., The Rise of Photonics in Computing: Next Big Thing fore DeepTech VCs, marec 2023, dostupné z: <https://readwrite.com/the-rise-of-photonics-in-computing-next-big-thing-for-deeptech-vcs/>
7. ARSLAN, Ali, Photonic Computing - Opto-Electronics ES-425, dpt of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Islamia University of Bahawalput, Punjab. marec 2020, Dostupné z: <https://www.slideshare.net/slideshow/photonic-computing/230886801>
8. BALLANI, Hitesh, Unlocking the future of computing: The Analog Iterative Machine´s lightning-fast approach to optimization, jún 2023, Dostupné z: <https://www.microsoft.com/en-us/research/blog/unlocking-the-future-of-computing-the-analog-iterative-machines-lightning-fast-approach-to-optimization/>
9. RENJU, R. a i., The Dawn of Photonic Crystals: An Avenue for Optical Computing, apríl 2018, Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/57266>
10. Xinjie Han, Haocheng Ke, Huashun Wen, Wenchan Dong, Yunru Fan, Guangwei Deng, Qiang Zhou, Heng Zhou, Kun Qiu, Jing Xu, and Yong Geng, Towards a photonic integrated all-optical phase regenerator, Optics Letters, Vol. 48, issue 15, str. 3965-3968, 2023, online, dostupné z <https://doi.org/10.1364/OL.493475>
11. Khonina S.N. a i., Exploring Types of Photonic Neural Networks for Imaging and Computing, in *Nanomaterials* april 2024, volume *14*( issue8), s. 697; online, dostupné z: <https://doi.org/10.3390/nano14080697>
12. WICKENS, K., Microsoft´s light-based computer marks the unravelling of Moore´s Law, in PC Gamer, jún 2023, dostupné z: <https://www.pcgamer.com/microsofts-light-based-computer-marks-the-unravelling-of-moores-law/>
13. WELSCH, CH., Building a computer that solves practical problems at the speed of light, jún 2023, online, dostupné z: <https://news.microsoft.com/source/features/innovation/building-a-computer-that-solves-practical-problems-at-the-speed-of-light/>
14. KALININ, K. a i.: Analog Iterative Machine (AIM): using light to solve quadratic optimization problems with mixed variables, april 2023, dostupné z: <https://www.microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2023/05/Analog-Iterative-Machine-AIM-using-light-to-solve-quadratic-optimization-problems-with-mixed-variables.pdf>
15. RENJU, Rajan. a i.,["All-Optical Logic Gates Show Promise for Optical Computing"](https://www.photonics.com/a63226/All-Optical_Logic_Gates_Show_Promise_for_Optical). Photonics. Photonics Spectra. april 2018, dostupné z ["All-Optical Logic Gates Show Promise for Optical Computing"](https://www.photonics.com/a63226/All-Optical_Logic_Gates_Show_Promise_for_Optical)
16. Kun, Liao a i.. Integrated Photonic Neural Networks: Opportunities and challenges, in *ACS Photonics* 2023, vol. 10, issue 7, p. 2001–2010, online, dostupné z: [Integrated Photonic Neural Networks: Opportunities and Challenges | ACS Photonics](https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsphotonics.2c01516)
17. TEMPLETON, G., Here´s why we don´t have light-based computing just yet, feb. 2016, Dostupné z: <https://www.extremetech.com/extreme/223671-heres-why-we-dont-have-light-based-computing-just-yet>
18. JAGDALE, S., Photonics and Quantum Computing: A New Frontier in Information Processing, in. EE Times Europe, okt. 2023, online, dostupné z: <https://www.eetimes.eu/photonics-and-quantum-computing-a-new-frontier-in-information-processing/>
19. F6S community, 16 top Photonics companies and startups in 2024, máj 2024, online, dostupné z: [16 top Photonics companies and startups in 2024 | F6S companies | F6S](https://www.f6s.com/companies/photonics/mo)