

Ireneusz SZCZEŚNIAK

Politechnika Częstochowska, Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej

POSTĘPY OPTYCZNEJ KOMUTACJI PAKIETÓW

Streszczenie. Optyczna komutacja pakietów, która miała wykorzystać dużą przepustowość światłowodów, do dzisiaj nie została wdrożona, a przecież szybko znalazłaby zastosowanie, gdyby była atrakcyjniejsza od elektronicznej komutacji pakietów. W artykule omówiono najnowsze osiągnięcia optycznej komutacji pakietów z naciskiem na praktyczne zastosowanie. Wspomniano także, dlaczego optyczna komutacja pakietów nie została wdrożona i jakie są jej szanse na wdrożenie.

Słowa kluczowe: optyczna komutacja pakietów, optyczne buforowanie, integracja monolityczna, konwersja długości fali

PROGRESS IN OPTICAL PACKET SWITCHING

Summary. Optical packet switching, which was supposed to take advantage of the large optical fiber bandwidth, has not been deployed yet, while it would promptly be applied had it offered advantages over electronic packet switching. In the article we discuss the recent progress in optical packet switching with emphasis on practical application. We also mention why optical packet switching has failed, and discuss its prospects.

Keywords: optical packet switching, optical buffering, monolithic integration, wavelength conversion

1. Wprowadzenie

W przeciągu kilkudziesięciu lat istnienia sieci światłowodowych można wyróżnić kilka kluczowych dokonań. Przełomowe było zastosowanie technologii zwielokrotnienia falowego WDM (ang. *wavelength division multiplexing*), która pozwoliła na przesyłanie w światłowodzie wielu długości fal. Mimo zwielokrotnienia przepustowości, ciągle potrzebne były wzmacniacze z konwersją optyczno-elektroniczno-optyczną (OEO), celem wzmocnienia każ-

dej długości fali. Zastosowanie wzmacniaczy optycznych było następnym przełomowym dokonaniem, co umożliwiło optyczne wzmocnienie jednocześnie wielu długości fal.

Niegdyś w każdym węźle sieci sygnał optyczny musiał być zamieniany na postać elektryczną celem jego komutacji, jednak obecnie może on być komutowany optycznie na poziomie długości fali przez przełącznice optyczne. Dodatkowo, dostępne optyczne krotnice transferowe potrafią dodawać i usuwać pojedyncze długości fal. Urządzenia te wraz ze wzmacniaczami optycznymi, regeneratorami i konwerterami długości fali pozwalają budować sieci WDM, które ustanawiają ścieżki optyczne między parami węzłów, udostępniane następnie klientom sieci. Obecnie klientami sieci WDM są sieci elektroniczne, takie jak PDH, SONET/SDH czy IP.

Na przykładzie wzmacniaczy i przełącznic optycznych można stwierdzić, że zamiana urządzeń elektronicznych na urządzenia optyczne jest korzystna, między innymi z powodu mniejszego kosztu zakupu i utrzymania, mniejszej awaryjności i mniejszego zużycia energii urządzeń optycznych w porównaniu z urządzeniami elektronicznymi. Ciągłe jednak komutacja pakietów przenoszonych przez długość fali odbywa się elektronicznie z wykorzystaniem konwersji OEO i tradycyjnego sprzętu elektronicznego. Optyczna komutacja pakietów (OKP) daje szansę na wyeliminowanie konwersji OEO z komutacji pakietów w sieci transportowej.

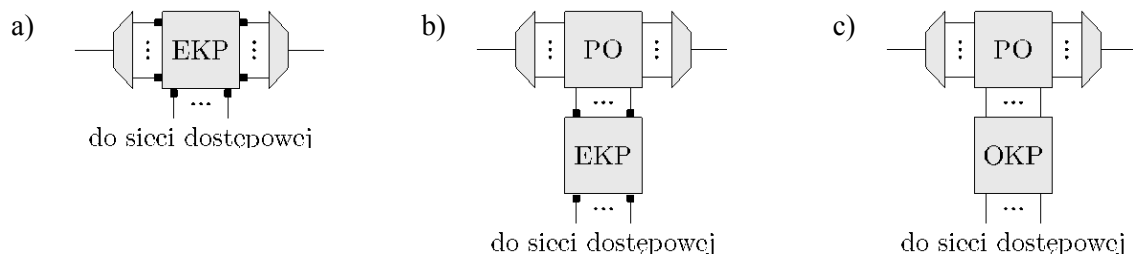
Struktura artykułu jest następująca. Poniżej omówione są krótko podstawy OKP. Następnie przedstawiono wybrane postępy OKP ostatnich kilku lat, które autor artykułu uważa za najważniejsze i najciekawsze. Artykuł kończy się omówieniem przyszłości OKP i podsumowaniem.

2. Optyczna komutacja pakietów

Prace badawcze nad OKP mają na celu zastąpienie elektronicznych komutatorów pakietów przez ich optyczne odpowiedniki. W sieci z OKP dane użytkownika są zamieniane z postaci elektronicznej na postać optyczną tylko w węźle brzegowym, gdzie pakiet jest dopuszczany do sieci transportowej. W sieci transportowej pakiety są przesyłane w postaci optycznej (czyli bez zamiany sygnału optycznego na elektryczny w każdym węźle, jak to dzieje się w tradycyjnych sieciach) do momentu, kiedy pakiety osiągają swoje docelowe węzły brzegowe. W docelowych węzłach brzegowych zawartość pakietów jest zamieniana na sygnał elektryczny i przesyłana do elektronicznej sieci dostępowej.

Na rys. 1 ogólnie przedstawiono ewolucję architektury węzła w pakietowych sieciach transportowych, gdzie z lewej i prawej strony węzły są połączone przez multipleksery WDM do sąsiednich węzłów sieci transportowej, dolne połączenia węzła służą do komunikacji z siecią dostępową, a czarne, małe kwadraty symbolizują konwersję optoelektroniczną. Na

rys. 1a jest zobrazowana elektroniczna komutacja pakietów z użyciem konwersji optoelektronicznej, która była pierwotną i także jest obecną metodą, stosowaną w pakietowych sieciach transportowych. W sieciach optycznych następnej generacji, obecnie już wdrażanych, jest stosowana optyczna komutacja kanałów, w których komutacja pakietów ciągle odbywa się elektronicznie, jak pokazano na rys. 1b. Jedną z obiecujących technologii transportu pakietów jest optyczna komutacja pakietów, gdzie już nie dochodzi do konwersji optoelektronicznej celem komutacji pakietów, jak pokazano na rys. 1c.



Rys. 1. Architektury węzłów: (a) z elektronicznym komutatorem pakietów (EKP), (b) z przełącznicą optyczną (PO) i elektronicznym komutatorem pakietów, (c) z przełącznicą optyczną i optycznym komutatorem pakietów (OKP)

Fig. 1. Node architectures: (a) with electronic packet switch, (b) with optical switch and electronic packet switch, (c) with optical switch and optical packet switch

Jednym z argumentów za OKP przytaczanych w wielu artykułach faworyzujących tę technologię jest ogromna przepustowość światłowodów, której wolna konwersja optoelektroniczna nie jest w stanie wykorzystać. Istotnie, przepływność sygnału jest ograniczona przez użycie pojedynczego fotodetektora (obecnie 10 Gb/s), ale użycie wielu fotodetektorów wraz ze zwielokrotnieniem czasowym usuwa to ograniczenie. Co warto podkreślić, w artykułach tych zwykle nie były wspomniane poważne wady komponentów OKP takie jak, na przykład, przesłuchy w sprzęgaczu kierunkowym czy szумы wprowadzane przez wzmacniacze półprzewodnikowe, które nie tylko ograniczają przepływność sygnału, ale także ograniczają skalowalność sieci z OKP. Dodatkowym argumentem za OKP miała być przezroczystość względem przesyłanego sygnału, co nie do końca się sprawdziło, bo w pracach eksperymentalnych z zakresu OKP autorzy eksponują największe osiągnięte przepływności sygnału przy danym kodowaniu sygnału.

Z początkiem nowego wieku zaczęto poddawać w wątpliwość założenia OKP, ponieważ urządzenia elektroniczne stawały się coraz doskonalsze i tańsze [1, 2]. Profesor Tucker, jeden z pionierów OKP, krytykuje OKP za niesatysfakcjonujące osiągnięcia w porównaniu z elektroniczną komutacją pakietów i zauważa, że obecnie prace nad elektroniczną komutacją pakietów postępują szybciej niż prace nad OKP [3, 4].

3. Postępy optycznej komutacji pakietów

Poniżej skoncentrowano się na postępach w pracach nad OKP w przeciągu ostatnich około dziesięciu lat, które dotyczyły głównie wytworzenia nowych komponentów, optycznego buforowania, integracji monolitycznej i konwersji długości fali. Nie sposób przytoczyć tutaj wszystkich osiągnięć, więc poniżej przedstawiono wybrane, najważniejsze i najciekawsze zagadnienia.

Optyczne komutatory pakietów początkowo były budowane z użyciem sprzęgaczy kierunkowych, potem z użyciem bramek optycznych, a następnie z użyciem falowodowych układów fazowanych (ang. *arrayed waveguide grating*). Poniżej zostaną omówione dwa nowe elementy komutujące z czasami sterowania rzędu nanosekund, z których można budować optyczne komutatory pakietów: rezonator mikropierścieniowy i elektrooptyczny szyk fazowany.

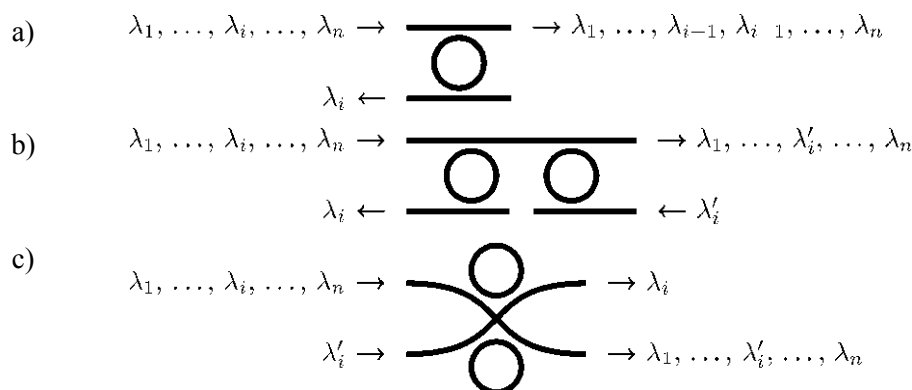
Buforowanie, integracja komponentów i konwersja długości fal są niezbędne dla OKP. Optyczne buforowanie było problemem od początku OKP i do tej pory problem nie został rozwiązany. Kolejno omawiane będą, między innymi, bufory z wolnym światłem i optyczne przerzutniki. Przez około ostatnich dziesięć lat prace koncentrują się na opracowaniu atrakcyjnych rozwiązań OKP, alternatywnych dla elektroniki, a kluczowa w tych pracach jest integracja komponentów optycznych, która także zostanie tu przytoczona. Ostatnim omawianym zagadnieniem jest optyczna konwersja długości fal, która podobnie jak optyczne buforowanie, boryka się z technicznymi problemami.

3.1. Rezonator mikropierścieniowy

Rezonator mikropierścieniowy, w najprostszej postaci, jest urządzeniem pasywnym, które służy do usunięcia z falowodu lub dodania do falowodu zakresu długości fal, które są rezonansowe dla mikropierścienia. Możemy mówić o jednej długości fali, jeżeli zakres jest mały. Długość fali rezonansowej zależy głównie od długości falowodu mikropierścienia i współczynników załamania światła falowodów. Promień pierścienia może wynosić od kilku do kilkuset μm . Falowód mikropierścienia jest oddzielony od falowodów szczeliną o grubości około 200 nm, która jest wypełniona ośrodkiem o współczynniku załamania mniejszym niż współczynniki falowodów.

Na rys. 2 przedstawiono schematycznie przykładowe konfiguracje rezonatorów mikropierścieniowych. Na rys. 2a pokazano podstawową konfigurację z użyciem jednego mikropierścienia, która służy do usunięcia długości fali λ_i ze światłowodu wejściowego z n długościami fal. Jeżeli jednocześnie należy usunąć długość fali λ_i , a następnie dodać długość fali λ'_i , konieczne jest zastosowanie dwóch mikropierścieni, jak pokazano na rys. 2b. W tej konfiguracji falowód z usuwaną długością fali znajduje się po stronie falowodu wejściowego, zaś falowód

z dodawaną długością fali po stronie falowodu wyjściowego. Jeżeli wymagane jest odwrotne wyprowadzenie światłowodów z usuwaną i dodawaną długością fali, można zastosować konfigurację pokazaną na rys. 2c, co może okazać się przydatne w projektowaniu optycznych układów scalonych.



Rys. 2. Konfiguracje rezonatorów mikropierścieniowych: (a) funkcja albo usunięcia, albo dodania długości fali, (b) funkcja jednoczesnego usunięcia i dodania długości fali w odwrotnym kierunku, (c) funkcja jednoczesnego usunięcia i dodania długości fali w tym samym kierunku

Fig. 2. Configurations of microring resonators: (a) for removing or adding one wavelength, (b) for removing and adding one wavelength in the opposite direction, (c) for removing and adding one wavelength in the same direction

Zaletą rezonatorów mikropierścieniowych i urządzeń z nich zbudowanych jest ich mały rozmiar, rzędu μm , co jest korzystne przy budowie optycznych układów scalonych. Z rezonatorów mikropierścieniowych można zbudować optyczny komutator falowy (ang. *wavelength-routed switch*), który jest mniejszych rozmiarów niż komutator zbudowany z falowodowego układu fazowanego, zazwyczaj wykorzystywanego do tego celu. Na przykład, w projekcie MOTOR [5] jako komutator 8x8 zastosowano falowodowy układ fazowany o powierzchni $7 \text{ mm} \times 4,25 \text{ mm} = 29,75 \text{ mm}^2$, a w projekcie BOOM [6] jako komutator 4x4 zastosowano układ rezonatorów mikropierścieniowych o powierzchni $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$, czyli o powierzchni około tysiąc razy mniejszej.

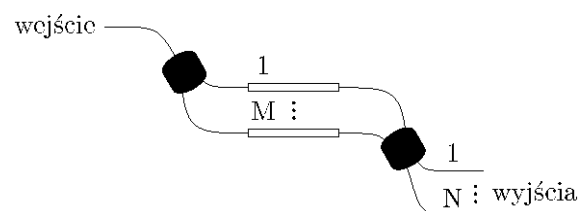
Przy stałej długości mikropierścienia, zakres długości fal rezonansowych można zmieniać przez modulację efektywnego współczynnika załamania falowodu mikropierścienia. Używając modulacji współczynnika załamania, poprzez wymuszoną dwójłomność przeprowadzaną optycznie lub elektronicznie, można komutować jednocześnie wiele długości fal światła do falowodu wyjściowego lub falowodu usuwającego długości fal.

3.2. Elektrooptyczny szyk fazowany

Elektrooptyczny szyk fazowany (ang. *electrooptic phased array*) jest elementem komutacyjnym z jednym wejściem, N wyjściami i M elektrodami sterującymi. Układ nie jest wrażli-

wy na długość fali, czyli sygnał na dowolnej długości fali może być przesyłany z wejścia na dowolne wyjście.

Jak przedstawiono na rys. 3, układ jest złożony z rozgałęziacza, szyku falowodów z przesuwnikami fazy i sprzęgacza. Rozgałęziacz przesyła do każdego falowodu w szyku światło o tej samej mocy i tej samej fazie. Aby układ nie był wrażliwy na długość fali wejściowej, zastosowano w szyku falowody o równej długości: przed albo po przesuwniku krótszy, a po drugiej stronie przesuwника dłuższy. Warto podkreślić, że w falowodowym układzie fazowanym, który jest podobnej budowy, stosuje się różne długości falowodów w szyku, aby układ był wrażliwy na długość fali wejściowej.



Rys. 3. Schemat elektrooptycznego szyku fazowanego
Fig. 3. Schema of electrooptic phased array

Sterując przesuwnikami fazy w każdym z falowodów w szyku możemy przesuwać fazę o dowolny kąt i w efekcie skupiać światło ze wszystkich falowodów na wybranym wyjściu sprzęgacza. Przesuwnik fazy może wykorzystywać efekt elektrooptyczny do modulacji współczynnika załamania przez zmianę dwójłomności wymuszanej elektrycznie. Zmiana współczynnika powoduje zmianę długości drogi optycznej i w efekcie zmianę fazy światła opuszczającego przesuwnik.

Liczba M wymaganych falowodów w szyku jest uzależniona od liczby wyjść N . Im większa liczba M , tym układ ma lepsze parametry, ale pobiera więcej mocy sterowania i jest droższy. Aby tłumienie układu było mniejsze niż 5 dB, a współczynnik ekstynkcji, wyrażony jako stosunek mocy sygnału użytkowego do mocy przesłuchów w skali logarytmicznej, wynosił co najmniej 30 dB, powinna być spełniona zależność $M=1,6 N$ [7].

3.3. Pamięć optyczna

Jednym z największych problemów technicznych OKP jest brak pamięci optycznych typu RAM, co uniemożliwia zastosowanie tradycyjnego przekazywania pakietów, polegającego na buforowaniu i przesyłaniu ich wtedy, kiedy to możliwe. Obecnie buforowanie sygnału optycznego jest możliwe tylko przez opóźnianie go przy użyciu światłowodów lub falowodów z wolnym światłem, podobnie jak w połowie ubiegłego wieku buforowano sygnał elektroniczny przez opóźnianie drgań mechanicznych wysyłanych i odbieranych piezoelektrycznie. Pojemność pamięci optycznych jest bardzo ograniczona z powodu konieczności ciągłego

przesyłania światła, ponieważ foton, w odróżnieniu od elektronu, bezustannie się porusza. Pojemność pamięci optycznych wyrażona jest iloczynem ich opóźnienia i przepływności buforowanego sygnału.

Najbardziej stabilne i powszechne w badaniach laboratoryjnych jest buforowanie przy użyciu światłowodów. Niestety, objętość światłowodu wymagana do buforowania jest bardzo duża. Na przykład, przyjmując kodowanie sygnału optycznego 40 Gb/s, optyczne przechowanie 40 Gb (5 GB) wymaga 200 tys. km światłowodu, zajmujących objętość około kilku m^3 , a elektroniczne przechowanie danych tej samej wielkości zaledwie kilka cm^3 .

Falowód z wolnym światłem (ang. *slow-light waveguide*) potrafi opóźnić sygnał optyczny kilkadziesiąt razy więcej niż światłowód o tej samej długości. Przykładem takiego falowodu jest falowód fotoniczny (ang. *photonic crystal waveguide*), w którym światło wielokrotnie odbija się, co prowadzi do wydłużenia drogi przebywanej przez światło i w efekcie zwiększenia opóźnienia sygnału. Jeden bit danych może w falowodzie mieć długość λ , a odległość między falowodami może wynosić 5λ [3]. Przy takich założeniach i dla $\lambda=1550$ nm, bit danych może być przechowany w około 10^{-16} m^3 , a 10 GB w około 1 cm^3 , czyli w objętościach porównywalnych z objętościami pamięci elektronicznych. Jednak wadą tego typu falowodów jest ich bardzo duża tłumienność, która jest kilka tysięcy razy większa od tłumienności światłowodu, co w efekcie wymusza wzmocnienie sygnału po zaledwie kilku metrach takiego falowodu. Poważną wadą falowodów z wolnym światłem, podobnie jak światłowodów wielomodowych, jest ograniczenie na przepływność sygnału, która wynika z rozmycia impulsu światła spowodowanego różnymi ścieżkami optycznymi przebywanymi przez sygnał w wyniku wielokrotnych odbić.

Implementacja bufora opóźniającego światło wymaga licznych i złożonych urządzeń, które będą odpowiednio wzmacniać, wprowadzać i wyprowadzać sygnał optyczny, co przekłada się przede wszystkim na ograniczenie pojemności pamięci, ale także na zwiększenie złożoności, poboru mocy, objętości i awaryjności. Co więcej, sygnał optyczny nie może być dowolnie długo przesyłany w światłowodzie, ponieważ po pewnej przebytej odległości musi zostać wzmocniony. Wzmocnienie sygnału optycznego ograniczone jest mocą nasycenia wzmacniacza optycznego, co przekłada się na ograniczenie długości światłowodu, po którym sygnał należy ponownie wzmocnić.

Ograniczenia na buforowanie sygnału, takie jako długość ścieżki optycznej czy liczba przebytych wzmacniaczy optycznych, dotyczą nie tylko pojedynczego bufora, ale całej ścieżki przebywanej przez pakiet w sieci z OKP. Jeżeli sygnał optyczny pakietu ulegnie zbyt dużej degradacji, to będzie wymagana regeneracja OEO pakietu w sieci transportowej, co zmniejsza atrakcyjność OKP.

Interesującym i obiecującym w długoterminowej perspektywie sposobem buforowania sygnału optycznego jest zastosowanie przerzutników optycznych. Przerzutnik przechowuje jeden bit, więc można zbudować pamięć dowolnej wielkości, wykorzystując wiele przerzutników. W pracy [8] zaprezentowano przerzutnik optyczny z czasem zmiany stanu wynoszącym 60 ps. Małe rozmiary przerzutnika $3 \mu\text{m} \times 7,5 \mu\text{m} \times 7,5 \mu\text{m}$ pozwoliłyby budować pamięci optyczne o rozmiarze 10 GB w zaledwie 1 cm^3 . Jednak tematem prac badawczych pozostaje to, jak zbudować optyczną pamięć RAM używając optycznych przerzutników i czy czas dostępu optycznych pamięci będzie mniejszy od czasu dostępu elektronicznych pamięci. Co więcej, moc pobierana przez jeden przerzutnik optyczny wynosi kilka mW, co przekłada się na setki MW mocy pobieranej przez pamięć o pojemności 10 GB. Należy zwrócić uwagę, że wytworzenie i eksperymentalne potwierdzenie działania jednego przerzutnika optycznego nie gwarantuje stabilnego działania całej pamięci.

3.4. Optyczne układy scalone

Podobnie jak w połowie ubiegłego wieku zaczęto miniaturyzować i integrować komponenty elektroniczne w układy scalone, tak obecnie komponenty optyczne są integrowane i miniaturyzowane w optyczne układy scalone. Integrowanymi są zarówno komponenty aktywne, takie jak źródła i odbiorniki światła, konwertery długości fal czy bramki optyczne, jak i komponenty pasywne, takie jak sprzęgacze, tłumiki, multiplexery, falowodowe układy fazowane czy pętle opóźniające, które niegdyś były produkowane jako odrębne komponenty łączone światłowodami.

Oczywistymi zaletami zintegrowanych układów optycznych są mniejsze koszty produkcji, mniejsza tłumienność, mniejsze opóźnienia sygnału, mniejszy pobór mocy, mniejsze rozmiary i większa niezawodność. Integrowane komponenty, z racji małych rozmiarów, można, poprzez chłodzenie lub podgrzewanie, łatwo stabilizować termicznie i dostrajać, niwelując niedokładności wykonania. Dodatkowo, w układ optyczny mogą być integrowane elektroniczne układy sterujące o małych rozmiarach i małej pojemności elektrycznej, co pozwala zwiększyć prędkość sterowania i zmniejszyć pobór mocy.

Układy optyczne są znacznie mniejszej skali integracji niż układy elektroniczne. Falowód dla długości fal około 1550 nm musi mieć grubość co najmniej 200 nm [9], a ścieżka elektroniczna może mieć grubości kilku nanometrów, złożoną z zaledwie kilkunastu atomów. Zintegrowane komponenty optyczne, takie jak bramki optyczne, mierzą mikrometry czy nawet milimetry, a zintegrowane komponenty elektroniczne, takie jak tranzystory, mogą mierzyć zaledwie kilka nanometrów. Oczywiście jest, że skala integracji układów optycznych jest kilka rzędów mniejsza niż układów elektronicznych.

Integrację można podzielić na hybrydową i monolityczną. Integracja hybrydowa polega na opakowaniu w jeden układ wielu komponentów wykonanych na podłożach z różnych materiałów, takich jak fosforek indu (InP), krzem (Si), niobian litu (LiNbO_3) czy arsenek galu (GaAs). Integracja hybrydowa jest trudna, ponieważ wymaga ręcznego łączenia światłowodami integrowanych komponentów z mikroskopijną dokładnością i zastosowania odrębnych procesów technologicznych dla każdego z użytych materiałów podłoża. Z powodu trudności technologicznych, układy hybrydowe mają małą liczbę zintegrowanych komponentów [10].

Integracja monolityczna wykorzystuje jeden proces technologiczny z użyciem podłoża jednego materiału, co pozwala na budowę układów z dużą liczbą komponentów. Łączenie komponentów nie jest już problemem, jak w przypadku integracji hybrydowej, ponieważ falowody są wytwarzane na podłożu układu. Obecnie fosforek indu jest powszechnie stosowany jako podłoże w integracji monolitycznej, ponieważ pozwala na integrację komponentów aktywnych i pasywnych, wymaganych przy transmisji w oknach 1310 nm i 1550 nm. Technologia jego obróbki była stosowana i udoskonalana od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku przy produkcji na dużą skalę różnych komponentów optycznych, głównie źródeł światła [11].

Konkurencyjnym podłożem układów monolitycznych jest krzem, który jest atrakcyjny z kilku powodów. Przede wszystkim falowody mogą być wytworzone z krzemu lub z krzemionki łatwej do uzyskania na podłożu krzemowym. Kolejnym powodem są bardzo dobre właściwości mechaniczne i termiczne krzemu, lepsze od innych materiałów podłoża, przez co układ krzemowy jest łatwiejszy w produkcji i mniej wrażliwy na działania mechaniczne i termiczne. Dodatkowo, krzem daje możliwość wytworzenia komponentów optycznych i ich integracji z komponentami elektronicznymi przy użyciu standardowych technologii wytwarzania elektronicznych układów scalonych. Jednak podstawowymi problemami układów na krzemie są trudności z wytwarzaniem komponentów aktywnych i brak metody wytwarzania źródeł światła. Falowodowy układ fazowany jest przykładem pasywnego komponentu wytwarzanego na krzemie, z uwagi na wymaganą precyzję wykonania, którą łatwo zapewnić przez dopracowane technologie obróbki krzemu.

Niobian litu, który kiedyś był powszechnie stosowany w sprzęgaczach kierunkowych z uwagi na właściwość dwójłomności, obecnie nie jest preferowany jako podłoże układów monolitycznych z powodu trudnej obróbki technologicznej i trudności z wytworzeniem aktywnych komponentów, w szczególności źródeł światła. Także arsenek galu nie jest preferowany, ponieważ pozwala na działanie układu tylko dla długości fali 850 nm [10].

Firma Infinera jest producentem sprzętu telekomunikacyjnego, wykorzystującego optyczne układy scalone na fosforku indu z setkami komponentów, które sama opracowuje i produkuje. Już w 2004 roku jeden układ był w stanie generować 100 Gb/s: dziesięć sygnałów optycznych, każdy o przepływności 10 Gb/s. W 2009 roku było to 400 Gb/s: dziesięć sygna-

łów optycznych ze zwielokrotnieniem polaryzacji, każdy o przepływności 40 Gb/s. Do końca obecnej dekady firma Infinera planuje opracowanie układu o przepływności sygnałów optycznych 4 Tb/s.

3.5. Optyczne konwertery długości fali

Konwertery długości fali, zarówno przestrajalne, jak i nieprzestrajalne, są ważnymi komponentami w budowie sieci z komutacją kanałów i komutacją pakietów. Ich potrzeba pojawiła się wraz z opracowaniem sieci WDM, w których zastosowanie konwerterów zmniejsza prawdopodobieństwo blokady połączeń. Obecnie komercyjne konwertery są realizowane wyłącznie optoelektronicznie, a konwertery optyczne są w fazie badań laboratoryjnych. Konwertery optoelektroniczne są zbudowane z powszechnie stosowanych, optoelektronicznych odbiorników i źródeł światła, więc ich produkcja jest łatwa i tania, natomiast konwertery optyczne wykorzystują rzadziej stosowane komponenty optyczne, które są trudniejsze w produkcji i integracji. Kluczowymi parametrami konwertera są możliwe długości fal po konwersji, czas przestrajania, pobór mocy i fizyczne rozmiary. Podstawowe rodzaje konwerterów optycznych, wykorzystujących skrośną modulację wzmocnienia, skrośną modulację fazy czy mieszanie czterofalowe są omówione w [12].

Podobnie jak wzmacniacze optyczne okazały się lepsze od wzmacniaczy optoelektronicznych, tak konwertery optyczne mogą okazać się lepsze od konwerterów optoelektronicznych. Jednak ta analogia jest tylko powierzchowna, ponieważ elementy te spełniają inne funkcje: wzmacniacz optyczny jest dla wielu długości fal i nie wymaga przestrajania, a konwerter optyczny jest tylko dla jednej długości fali i musi być szybko przestrajalny. Co prawda konwertery optyczne potrafią konwertować jednocześnie wiele długości fal z jednego pasma w inne, ale ta funkcjonalność nie jest obecnie wymagana w sieciach z OKP.

Zaletą konwerterów optycznych jest możliwość konwertowania sygnału o przepływnościach powyżej 10 Gb/s, podczas gdy konwertery optoelektroniczne konwertują tylko sygnał o przepływnościach do 10 Gb/s. W odróżnieniu od podstawowych konwerterów optoelektronicznych, konwertery optyczne zachowują zmiany fazy i amplitudy sygnału, co jest niezbędne przy konwersji sygnału z kluczowaniem fazy czy kluczowaniem amplitudy. Jednak konwertery optyczne nie są w stanie konwertować sygnału o dowolnym kodowaniu, czyli nie spełniają kryterium przezroczystości względem kodowania sygnału, które jest jednym z założeń OKP. Dopuszczalne sposoby kodowania sygnału powinny być uwzględnione przy projektowaniu konwertera [13].

Niestety, obecne konwertery optyczne pobierają kilka razy więcej mocy niż konwertery optoelektroniczne, a przy tym generują gorszy sygnał optyczny [3], który prędzej musi być poddany regeneracji. Przestrajalne konwertery optyczne pobierają 60 mW, a nieprzestrajalne

50 mW, natomiast przestrajalne konwertery optoelektroniczne 24 mW, a nieprzestrajalne 16 mW. W perspektywie dziesięciu lat można spodziewać się redukcji poboru mocy o rząd wielkości zarówno dla konwerterów optycznych, jak i optoelektronicznych [4].

Mimo postępów w dziedzinie konwerterów optycznych, konwertery optoelektroniczne są obecnie bardziej atrakcyjne i prawdopodobnie pozostaną bardziej atrakcyjne przez kolejną dekadę [4].

3.6. Przyszłość OKP

Obecnie OKP nie jest atrakcyjną technologią dla operatorów sieci telekomunikacyjnych, nie tylko dlatego, że sprzęt elektroniczny jest lepszy, ale także dlatego, że wprowadzenie OKP byłoby zbyt ryzykowną i kosztowną decyzją, ze względu na wymaganą dużą skalę zmian. Ponieważ zapotrzebowania na OKP na rynku nie ma, producenci urządzeń nie są zainteresowani tą technologią. Dla porównania, z inicjatywy producentów sprzętu powstało setki standardów implementowanych w komutatorach elektronicznych, a do dzisiaj nie powstał ani jeden standard dotyczący OKP. Można przewidywać, że w ciągu najbliższych dziesięciu lat sytuacja ta się nie zmieni.

Mimo braku bezpośredniego zainteresowania przemysłu, OKP może korzystać z najnowszych osiągnięć sieci optycznych, ponieważ niektóre urządzenia stosowane przy budowie sieci optycznych, takie jak optyczne układy scalone, mogą być stosowane także w sieciach z OKP. Inne urządzenia sieci optycznych, takie jak komutatory kanałów czy filtry przestrajalne, spełniają funkcje wymagane w OKP, jednak czasy sterowania tych urządzeń są zbyt duże, aby znalazły zastosowanie w OKP. Niestety, pewne urządzenia, takie jak bufora optyczne, nie mają zastosowania w tradycyjnych sieciach optycznych i dlatego rozwojem tych urządzeń jest zainteresowane tylko środowisko akademickie, pracujące nad OKP.

Podobnie jak zapotrzebowanie na elektronikę konsumencką, taką jak telefony komórkowe czy komputery dla graczy, napędzało rozwój układów elektronicznych, tak obecnie stale rosnąca penetracja konsumenckiego rynku sieci dostępowych technologią optyczną, taką jak pasywne sieci optyczne, przyczyni się do udoskonalenia, integracji i zmniejszenia kosztów komponentów optycznych. OKP powinna na tym skorzystać.

OKP ma szansę na wdrożenie w centrach danych lub centrach superkomputerowych, z racji możliwej małej skali wdrożenia. Co więcej, potrzeba komunikacji i związane z nią problemy są szczególnie zauważalne w takich centrach, gdzie moc elektryczna wymagana do komunikacji jest porównywalna z mocą wymaganą do samych obliczeń [11]. Ponieważ zwiększenie mocy obliczeniowej pojedynczego rdzenia jest obecnie trudne, to moc zwiększa się głównie przez zwiększenie liczby rdzeni, procesorów i węzłów połączonych komutatorami pakietów. Być może przyszłe generacje optycznych komutatorów pakietów będą pobierać

mniej energii, wydzielać mniej ciepła i zajmować mniej miejsca niż komutatory elektroniczne, co jest pożądane w przypadku takich centrów. Pierwsze udane wdrożenia, jeżeli takie będą, powinny zwiększyć popyt na OKP i w konsekwencji uczynić ją atrakcyjną, nawet dla operatorów telekomunikacyjnych. Przykładem świadczącym o zainteresowaniu przemysłu tego rodzaju zastosowaniem jest prototypowy system optoelektronicznej komunikacji międzyprocesorowej, opracowany przez firmę Intel, który pozwala na komunikację optyczną z przepływnością 50 Gb/s [11].

Argumentem przytaczanym za OKP jest szacowana mniejsza energia komutacji bitu dla optycznych komutatorów w porównaniu z elektronicznymi komutatorami, przy założeniu przyszłych przepływności sygnału rzędu Tb/s [14]. Dla przepływności 10 Gb/s energia komutacji bitu dla optycznych komutatorów wynosi około 1 nJ/b i jest około dziesięć razy większa w porównaniu z elektronicznymi komutatorami, ponieważ optyczne komutatory wymagają dużej mocy sterowania i stabilizacji termicznej. Jednak dla przepływności większych od 100 Gb/s energia komutacji bitu jest mniejsza dla optycznych komutatorów w porównaniu z elektronicznymi komutatorami: energia komutacji bitu dla optycznych komutatorów maleje wraz ze wzrostem przepływności sygnału, ponieważ optyczne komutatory pobierają nieznacznie więcej mocy wraz ze wzrostem przepływności sygnału, a w przypadku komutatorów elektronicznych energia komutacji bitu pozostaje stała lub rośnie wraz ze wzrostem przepływności sygnału [3]. Można więc przewidywać, że w przyszłości OKP spotka się z większym zainteresowaniem z powodu potencjalnych oszczędności energii oraz rosnącego znaczenia oszczędności energii w telekomunikacji.

Przy zastosowaniu kodów korekcyjnych, operatorzy telekomunikacyjni mogą korzystać z optycznych torów transmisyjnych o niewygórowanych parametrach. Zastosowanie tych kodów przekłada się na oszczędności, ponieważ ich elektroniczna implementacja jest łatwiejsza i tańsza od zapewnienia wygórowanych parametrów toru. Na przykład, tor dla sygnału standardu Optical Transport Network (OTN) może mieć bardzo dużą elementową stopę błędów, wynoszącą nawet 10^{-4} , ponieważ zastosowanie kodu korekcyjnego zmniejsza efektywną stopę błędów do akceptowalnego poziomu 10^{-9} . Niestety, wygórowane wymagania OKP dotyczące parametrów torów, wynikające z braku możliwości optycznej implementacji kodowania korekcyjnego, mogą okazać się nie do przyjęcia przez operatorów. Sytuację dodatkowo pogarsza fakt, że optyczna regeneracja, tak niezbędna dla OKP, jest dużym problemem. Co prawda optyczna regeneracja 1R (wzmocnienie sygnału) jest powszechnie stosowana w postaci wzmacniaczy EDFA (ang. *erbium-doped fiber amplifier*), jednak optyczna regeneracja 2R (wzmocnienie sygnału i odtworzenie kształtu sygnału) sprawia duże trudności, a optyczna regeneracja 3R (wzmocnienie sygnału, odtworzenie kształtu sygnału i odtworzenie sygnału zegarowego) jest praktycznie nieosiągalna [13].

4. Podsumowanie

OKP jest interesującą i obiecującą tematyką badań naukowych, ale z perspektywy operatorów telekomunikacyjnych jest raczej laboratoryjnym kuriozum, a nie praktyczną technologią. Mimo wielu lat badań i imponujących postępów, OKP ciągle ma poważne problemy techniczne, z uwagi na które nie należy oczekiwać wdrożenia OKP w ciągu najbliższych dziesięciu lat.

Komercyjna przyszłość OKP nie jest obiecująca. Znaczne obniżenie kosztów konwersji optoelektronicznej i jej poboru mocy, postępy w integracji monolitycznej układów optycznych i elektronicznych sprawiają, że zachowanie sygnału w postaci optycznej celem jego komutacji nie jest już krytyczne, przez co potrzeba OKP jest mniejsza.

Badania naukowe ciągle są prowadzone w nadziei, że OKP w końcu przewyższy możliwości elektronicznych komutatorów pakietów. Aby ten cel osiągnąć, będą potrzebne przełomowe odkrycia raczej z dziedziny inżynierii materiałowej, optoelektroniki czy fizyki niż z telekomunikacji czy informatyki.

BIBLIOGRAFIA

1. El-Bawab T. and Shin J.: Optical packet switching in core networks: between vision and reality, *IEEE Communications Magazine*, 2000, vol. 40, no. 9, p. 60-65.
2. Marciniak M.: Droga do przyszłych całkowicie optycznych sieci pakietowych – którędy? *Przegląd Telekomunikacyjny*, 2003, vol. LXXVI, no. 4, s. 166-170.
3. Tucker R.: The role of optics and electronics in high-capacity routers, *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 12, p. 4655-4673.
4. Tucker R.: Scalability and energy consumption of optical and electronic packet switching, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, no. 16, p. 2410-2421.
5. Nicholes S., Masanovic M., Jevremovic B., Lively E., Coldren L., and Blumenthal D.: An 8x8 InP monolithic tunable optical router (MOTOR) packet forwarding chip, *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no. 4, p. 641-650.
6. Stamatiadis C. et al.: The BOOM project: Towards 160 Gb/s packet switching using SOI photonic integrated circuits and hybrid integrated optical flip-flops, *Journal of Lightwave Technology*, 2012, vol. 30, no. 1, p. 22-30.
7. Tanemura T. and Nakano Y.: Design and scalability analysis of optical phased-array 1xN switch on planar lightwave circuit, *IEICE Electronics Express*, 2008, vol. 5, no. 16, p. 603-609.

8. Liu L.: An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip, *Nature Photonics*, 2010, vol. 4, no. 3, p. 182-187.
9. Sumetsky M.: How thin can a microfiber be and still guide light? Errata, *Optical Letters*, 2006, vol. 31, no. 24, p. 3577-3578.
10. Infinera Corporation: Photonic integrated circuits <http://www.infinera.com> .
11. Leheny R.: Molecular engineering to computer science: the role of photonics in the convergence of communications and computing, *Proceedings of the IEEE*, 2012, vol. 100, p. 1475-1485.
12. Perlicki K.: *Systemy transmisji optycznej WDM*. WKŁ, Warszawa 2007.
13. Ciaramella E.: Wavelength conversion and all-optical regeneration: achievements and open issues, *Journal of Lightwave Technology*, 2012, vol. 30, no. 4, p. 572-582.
14. Blumenthal D. et al.: Integrated photonics for low-power packet networking, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, vol. 17, no. 2, p. 458-471.

Wpłynęło do Redakcji 1 marca 2013 r.

Abstract

In the article we discuss the recent progress in optical packet switching with emphasis on practical application. Specifically, we described the two new components which can be used in optical packet switching: the microring resonator and the electrooptic phased array.

Next we concentrated on optical buffering that is the long-standing problem of optical packet switching, and compared the existing solutions with the electronic memory. We also mentioned the optical flip-flop, which is a promising technology in the long term.

Finally, we also mention why optical packet switching has failed, and discuss its prospects, especially in the contexts of data centers and the power consumption.

Adres

Ireneusz SZCZEŚNIAK: Politechnika Częstochowska, Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej, ul. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, Polska, iszczeniak@icis.pcz.pl