

# Technologie alternatywne i technologie przyszłości, część 4

*Oszacowano, że zasoby wiedzy ludzkiej podwajają się co około 10 lat. Związana z tym ilość gromadzonej i użytkowanej nowej informacji narasta wykładniczo. Stwarza to potrzebę opracowania szybkich i tanich pamięci, zdolnych przechowywać gigabity lub nawet terabity danych.*

## Pamięci optyczne

Jedną z technologii, która potencjalnie może obsłużyć taką ilość danych, są pamięci optyczne. Wśród wielu różnych rozwiązań rozważa się także możliwość wykorzystania bardzo cienkich warstw materiałów opartych na szkłe, domieszkowanych barwnikami organicznymi lub metalami ziem rzadkich.

W technologii fotochemicznego wypalania otworów (PHB) na punkcik na powierzchni szkła skierowuje się wiązkę światła lasera pracującego w zakresie widzialnym. Jeśli moc lasera jest mała, światło przedostanie się na drugą stronę płytki nie wywierając na nią żadnego wpływu. Jeśli jednak moc lasera jest większa (nie powodująca jednak uszkodzeń płytki), nastąpi wzbudzenie elektronów znajdujących się w szkłe. W efekcie może nastąpić zmiana właściwości absorpcyjnych oświetlonego szkła i w widmie absorpcyjnym pojawi się pasmo lub przerwa. Mówiąc inaczej, jeśli teraz w to samo miejsce skierujemy wiązkę laserową o małej mocy, zostanie ona pochłonięta i nie pojawi się po drugiej stronie płytki.

Tak więc, opierając się na tym, czy wiązka niskiej mocy przedostaje się na drugą stronę płytki, czy nie, można stwierdzić, czy dany obszar szkła został przedtem poddany działaniu wiązki dużej

mały, proces taki można powtórzyć na powierzchni płytki szklanej miliony razy.

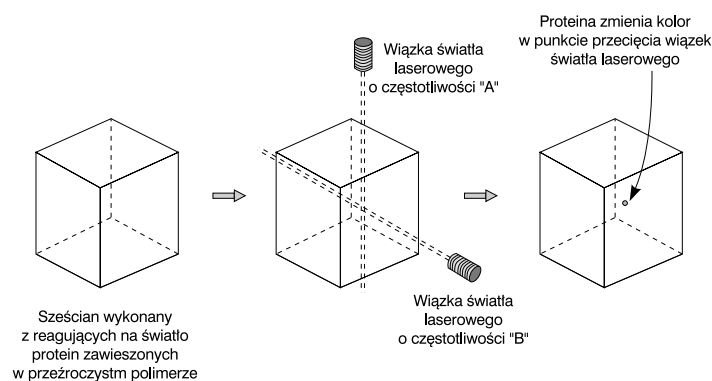
Jeśli naświetlane punkty znajdują się w odległości jednego mikrona od siebie, na powierzchni jednego centymetra kwadratowego można zapamiętać 100 megabitów. Jest to, oczywiście, niewiele w porównaniu z wymaganym np. terabitem. Jeśli jednak uświadomimy sobie, że każdy z punktów może być „multiplexowany“ poprzez zmianę długości fali lasera dużej mocy, zapewniającą powstanie następnego pasma absorpcyjnego, liczba przechowywanych bitów informacji może być zwiększona. Osiągnięto już stukrotne multipleksowanie, przy którym przy różnych długościach fali każdy punkt płytki umożliwia zapamiętanie stu bitów danych. Taki poziom multipleksowania zapewnia gęstość informacji 10 gigabitów na centymetr kwadratowy, a w przyszłości mogą być osiągnięte jeszcze wyższe krotności multipleksowania.

## Przełączniki i pamięci proteinowe

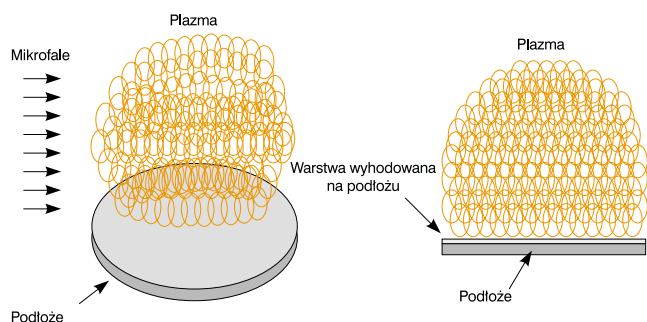
Inny obszar wiedzy, który cieszy się ogromnym zainteresowaniem, jest związany z przełącznikami i pamięciami proteinowymi. Cząsteczki organiczne posiadają wiele interesujących własności, np. to że odrzucają zanieczyszczenia i same się korygują.

Oprócz bardzo niewielkich rozmiarów niektóre z nich posiadają doskonałe parametry elektryczne. Inaczej niż przewodniki metalowe, zamiast przemieszczania elektronów, przekazują energię przesuwając obszar wzbudzenia elektronów. Może to zaowocować szybkościami przełączania o wiele rzędów wielkości większymi niż w przypadku materiałów półprzewodnikowych.

Niektóre proteiny reagują na pole elektryczne, inne zaś na światło. Np. dużym zainteresowaniem cieszy się ostatnio rodopsyna, proteina wykorzystywana przez



Rys. 15. Pamięci proteinowe - sześciennie struktury światłoczułych protein.



Rys. 16. Tranzystory heterozłączowe - naparowywanie próżniowe.

niektóre bakterie wyko-rzystujące fotosyntezę do zamiany światła na energię. To właśnie obecność bakterii zawierających rodopsynę sprawia, że woda w sadzawkach staje się czerwona, a ich słonowodni kuzyni podobnie zabarwiają wodę w Zatoce San Francisco.

W niektórych przypadkach wiązka laserowa może być wykorzystana do zmiany stanu takich światłoczułych protein. Istnieją ponadto proteiny reagujące wyłącznie na dwie długości fali światła. Jest to wyjątkowo interesująca cecha, ponieważ umożliwia uzyskanie trójwymiarowych optycznych pamięci proteinowych.

Przeprowadzono eksperymenty, w których utworzono sześciany z matryc protein reagujących na dwie długości światła, zawieszonych w przezroczystych polimerach. Gdyby były to proteiny reagujące na pojedynczą wiązkę laserową, cała linia protein zmieniałaby stan. Ponieważ jednak były to proteiny reagujące na dwie długości światła, wykorzystanie dwóch laserów o wiązkach przecinających się pod kątem prostym umożliwia zmianę stanu pojedynczych protein sześciannu (rys. 15).

Nawet przy współcześnie dostępnej technologii możliwe jest zapamiętanie 20 gigabitów w jednym centymetrze sześciennym takiego materiału, a przecież jeden gigabit odpowiada 1250 współczesnym 16-megabitowym pamięciom RAM!

### Tranzystory elektromagnetyczne

Od pewnego czasu wiadomo, że przyłożenie silnego pola elektromagnetycznego do specjalnych mieszanin półprzewodnikowych powoduje powstanie struktur zachowujących się podobnie jak tran-

zystory. Pierwotnie stosowano technologię polegającą na pokryciu półprzewodnikowego podłoża warstwą domieszki, a następnie przyłożeniu z niewielkiej odległości bardzo silnego, skoncentrowanego pola elektromagnetycznego.

Obowiązująca wówczas teoria głosiła, że silne pole elektromagnetyczne powodowało wnikanie atomów domieszki w podłoże. Ku ogromnemu zaskoczeniu wszystkich okazało się później, że struktury tranzystorowe powstają także wtedy, gdy nie stosuje się domieszki!

Co zaskakujące, dotąd nikt nie potrafił wyjaśnić mechanizmu powodującego to zjawisko. Fizycy utrzymują, że silne pola elektromagnetyczne powodują powstanie w kryształach mikrodefektów, ich migrację oraz łączenie się.

### Tranzystory heterozłączowe

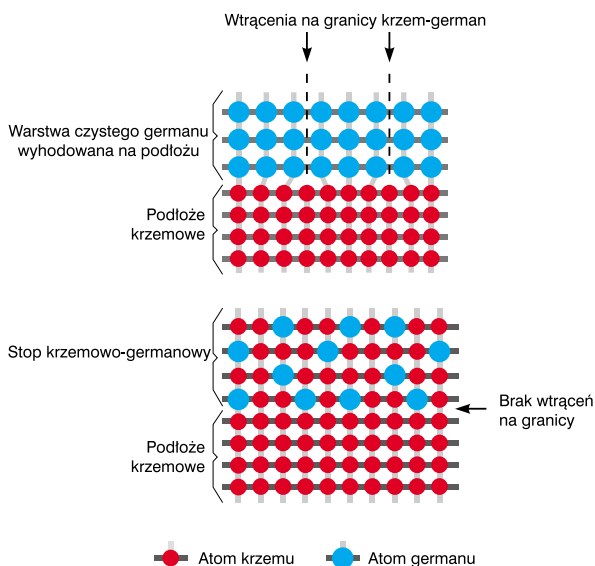
Jeśli można znaleźć jedno powiedzenie dotyczące elektroniki zasługujące na miano truizmu, to jest nim stwierdzenie „im szybciej, tym lepiej“.

Tak naprawdę, to istnieją tylko dwa sposoby podnoszenia szybkości elementów półprzewodnikowych. Jeden z nich polega na wykonywaniu mniejszych struktur i mniejszych, położonych bliżej siebie tranzystorów. Drugi - na stosowaniu nowych, zapewniających wyższą szybkość przełączania materiałów. Choć istnieją materiały o lepszych właściwościach niż krzem, np. arsenek galu, to jednak tylko krzem jest tani, łatwo dostępny i stosunkowo łatwo się go przetwarza.

Istotne jest również to, że w technologii związanej z krzemem przemysł zainwestował miliony dolarów. Z tych właśnie powodów zwiększanie szybkości odbywało się dotąd drogą miniaturyza-

cji tranzystorów. Niestety, coraz wyraźniej zauważalny jest fakt zbliżania się do granicy możliwości konwencjonalnych technologii w tym zakresie. Wynikają one po prostu z możliwości procesu związanych z nakładaniem warstw, wytwarzaniem masek i stosowanych długości fali (ultrafiolet). Około roku 1990 wraz z pojawieniem się struktur jednomikronowych uważano, że struktury półmikronowe stanowią będą granicę możliwości, osiągalną przez proces fotolitograficzny, a następnym etapem będzie litografia rentgenowska. Jednak ciągłe usprawnienia w zakresie wykonywania masek, systemów optycznych, soczewek, serwomechanizmów, systemów pozycjonowania oraz w technologii chemicznej sprawiły, że możliwe wydaje się osiągnięcie struktur 0,1-mikronowych tylko drogą udoskonalania obecnie stosowanych procesów.

Istnieją także i inne uwarunkowania. Szybkość działania tranzystora jest bardzo silnie związana z jego rozmiarami, które mają wpływ na długość drogi przebywanej przez elektrony. Aby więc tranzystory mogły przełączać szybciej, technolodzy dążyli do zmniejszenia ich rozmiarów. Jednakże zmniejszając rozmiary tranzystora, należy zachować odpowiednie ilości domieszki, by zapewnić jego działanie. Koncentracje domieszki wzrastają wraz z miniaturyzacją samego tranzystora. Gdy poziom domieszki staje



Rys. 17. Tranzystory heterozłączowe - stop krzem-german.

się zbyt wysoki, zaczynają występować takie niekorzystne zjawiska jak upływ, w efekcie czego tranzystor pozostaje przez cały czas włączony. Technolodzy pracują więc intensywnie nad nowymi materiałami.

Obszar leżący między dwoma obszarami półprzewodnika o takim samym podstawowym składzie ale przeciwnych rodzajach domieszek nosi nazwę złącza jednorodnego. Analogicznie, obszar znajdujący się między dwoma obszarami półprzewodnika o różnym podstawowym składzie nosi nazwę heterozłącza. We współczesnej produkcji elektronicznej dominują łatwiejsze do wytworzenia złącza jednorodne. Jednak w heterozłączu w naturalny sposób występuje pole elektryczne, które można wykorzystać do przyspieszania elektronów, a tranzystory heterozłączone posiadają znacznie wyższe szybkości przełączania niż ich odpowiedniki o jednorodnym złączu i identycznych rozmiarach.

Jeden z rodzajów heterozłącza stał się ostatnio obiektem szczególnego zainteresowania, a mianowicie heterozłącze german-krzem. German i krzem są materiałami z tej samej rodziny, o zbliżonej strukturze krystalicznej, i wydawać by się mogło, że połączenie ich powinno być łatwe do wykonania. Praktyka jednak temu przeczy - jest to dość trudne. Obecnie trwają prace nad technologią polegającą na nanoszeniu w żądanych miejscach na standardowe płytki krzemu z obszarami domieszkowanymi bardzo cienkich warstw stopu krzemu i germanu.

Dwie najbardziej popularne metody nakładania tych warstw to naporowywanie próżniowe oraz epitaksja strumieniem cząstek. W przypadku naporowywania gaz zawierający odpowiednie cząsteczki jest wprowadzany w stan plazmy przez bardzo znaczne podniesienie jego temperatury metodą podgrzewania mikrofalowego. Atomy przynieszone są nad powierzchnię płytki przez plazmę, a następnie są przechwytywane przez strukturę krystaliczną podłoża. Struktura ta stanowi wzorec, który nowe atomy rozbudowują (rys. 16).

W przypadku epitaksji strumieniem cząstek płytka podłoża umieszczana jest w wysokiej próżni, gdzie uderza w nią sterowana

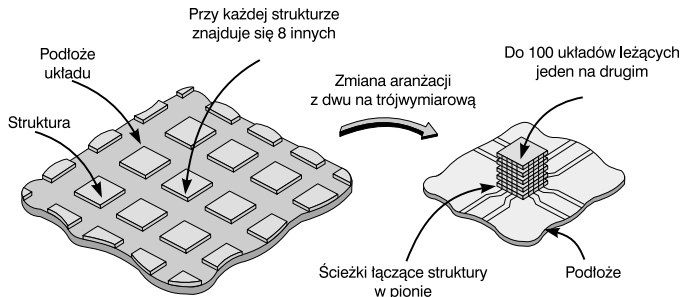
wiązka zjonizowanych cząstek, tworząc w odpowiednich miejscach warstwy o grubości pojedynczych cząstek.

Najkorzystniej byłoby uzyskać heterozłącze między czystym krzemem i czystym germanem. Niestety, atomy germanu są o około 4% większe niż atomy krzemu, w związku z czym w takiej strukturze krystalicznej powstają naprężenia, w efekcie czego pojawiają się defekty. Na każdym milimetrze kwadratowym pojawiają się miliony wtrąceń, które będą zakłócać pracę układu scalonego. Rozwiązaniem jest stworzenie warstwy stopu krzemu i germanu, eliminującej naprężenia i wynikające z nich defekty (rys. 17).

Heterozłącze stwarza możliwość uzyskania tranzystorów o szybkościach przełączania równie wysokich jak w przypadku elementów z arsenku galu lub wyższych, a przy tym przy znacznie niższym poborze mocy. Tranzystory takie mogą ponadto być produkowane na istniejących liniach, co jest niezwykle korzystne z punktu widzenia wykorzystania istniejącego potencjału produkcyjnego i intelektualnego oraz zainwestowanych środków.

### Podłoża diamentowe

Jak to już podkreślono w poprzednim rozdziale, wciąż podejmuje się wysiłki zmierzające ku uzyskaniu mniejszych, gęściej upakowanych tranzystorów, przełączanych z wyższymi prędkościami. Niestety, ciaśniejsze pakowanie tych stworzeń i wymachiwanie nad nimi batem, by zechciały pracować szybciej, powoduje wzrost ilości wydzielanego ciepła. Podobnie przedstawia się sytuacja w przypadku stosowania połączeń optycznych - wykorzystują one diody laserowe. Ich najbardziej sprawnie pracujące współczesne modele zamieniają na moc wiązki światła tylko od 30% do 40% doprowadzonej do nich mocy elektrycznej, reszta jest natomiast wydzielana w postaci ciepła. Mimo że diody laserowe są niewiel-



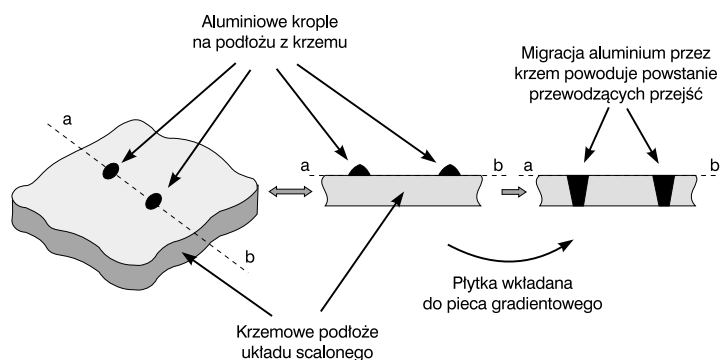
Rys. 18. Sześcienna struktura Chip-on-Chip.

kich rozmiarów (średnica liczy około 500 atomów), skumulowane ciepło pochodzące z kilku tysięcy diod stanowi poważny problem.

W ten sposób dochodzimy do diamentu, wyrazu pochodzącego od greckiego „adamas“, co znaczy „niezwyciężony“. Diament jest znany przede wszystkim jako najtwardsza ze znanych substancji, ma jednak także wiele innych interesujących właściwości: w temperaturze pokojowej jest najlepszym ze znanych przewodników ciepła, w czystej postaci jest doskonałym izolatorem, jest jednym z najbardziej przezroczystych materiałów, jest bardzo wytrzymały mechanicznie i nie poddaje się korozji. Wszystkie te cechy sprawiają, że diament doskonale nadaje się na podłoża modułów wieloukładowych.

Oprócz tego zastosowania istnieje jeszcze wiele innych możliwości wykorzystania diamentu w elektronice. Ponieważ diament należy do tej samej rodziny pierwiastków co krzem i german, może funkcjonować jak półprzewodnik i być wykorzystany jako materiał na podłoża układów scalonych. W rzeczywistości diament pod wieloma względami byłby lepszy niż krzem: jest bardziej wytrzymały mechanicznie, lepiej znosi wysokie temperatury, jest stosunkowo mało wrażliwy na działanie promieniowania (problem w przypadku podzespołów wykorzystywanych w urządzeniach jądrowych i satelitarnych). Ponadto dzięki wysokiej przewodności cieplnej diamentu każdy układ scalony bardzo szybko odprowadzałby ciepło. Uważa się, że układy zbudowane z użyciem diamentu będą w stanie przełączać z szybkościami 50-krotnie wyższymi niż układy krzemowe, pracując w temperaturach przekraczających 500°C.

Niestety, naturalny diament jest niezwykle drogim materiałem. Jeś-



Rys. 19. Technologia Chip-on-Chip - wykonywanie połączeń przez płytkę.

li komuś uda się znaleźć jeden z tych rzadko spotykanych pięknych kamieni, na pewno ostatnim pomysłem, który mu wpadnie do głowy, będzie pocięcie go na cienkie płytki przeznaczone do zastosowań w elektronice! Istnieje kilka metod hodowania kryształów diamentu, wśród których najbardziej obiecująca jest metoda naparowywania próżniowego, ciesząca się największym zainteresowaniem. W procesie tym pary wodoru i węglowodorów podgrzewane są mikrofalowo, powstaje plazma, z której na powierzchni podłoża powstają warstwy diamentowe. Choć zachodzące w plazmie zjawiska chemiczne nie zostały jeszcze w pełni poznane, warstwy diamentowe mogą być w ten sposób tworzone na podłożach takich jak tytan, molibden, wolfram, ceramika i innych twardych materiałach, jak kwarc, krzem i szafir.

W procesie naparowywania próżniowego warstwa diamentu powstaje bezpośrednio na podłożu. Podobna, nowsza technologia, nosząca nazwę infiltrowania próżniowego, rozpoczyna się od utworzenia warstwy diamentowej w formie. Forma można zawierać pręty, wokół których ułożony zostanie diamentowy proszek. Proszek ten, poddany działaniu plazmy podobnie jak w przypadku naparowywania próżniowego, tworzy polikrystaliczną masę. Kolumny formy można następnie wytopić i zostaną po nich otwory umożliwiające poprowadzenie połączeń elektrycznych. Proces CVD umożliwia uzyskanie warstw diamentowych o grubościach dwukrotnie większych niż otrzymywane w procesie naparowywania próżniowego, a jest przy tym znacznie tańszy.

wiązka laserowa powoduje lokalnie bardzo wysoki wzrost temperatury, w wyniku czego z węgla uwalniane są atomy, częściowo pozabawione elektronów. Jony te osadzają się następnie na znajdującym się w niewielkiej odległości podłożu. Ponieważ wiązki laserowe są silnie ogniskowane, wysokie temperatury powstają wyłącznie w węglu, natomiast podłoże pozostaje w temperaturze zbliżonej do pokojowej. Proces taki można wykorzystać do tworzenia warstw diamentowych na dowolnym podłożu, włączając w to półprzewodniki, metale i tworzywa sztuczne.

Liczba elektronów wrywanych z atomów węgla jest różna, co umożliwia powstawanie nieznanych dotąd tzw. nanofazowych struktur diamentowych. Jest to nowa postać materii, niedawno odkryta, w której małe bloki atomów tworzą większe struktury. Struktury te różnią się od spotykanych w naturalnych kryształach, w których atomy tworzą siatkę krystaliczną. Uważa się, że struktury te umożliwią uzyskanie ponad trzydziestu nieznanych dotąd postaci diamentu.

Na koniec - co jest kwestią wcale istotną, niezależny wynalazca Ernest Nagy opracował w późnych latach 80-tych prostą, tanią i elegancką metodę nakładania cienkich warstw diamentowych. Proces ten polega na pokryciu miękkiego elementu proszkiem diamentowym i obracaniu go z szybkością 30000obr./min. w niewielkiej odległości od płytki podłoża. Choć zjawiska fizyczne występujące w tym procesie nie zostały w pełni wyjaśnione, na płytce tworzy się gładka, regularna warstwa diamentowa. Kryszta-

Stosunkowo nowy sposób uzyskiwania warstw diamentowych polega na próżniowym nagrzewaniu węgla wiązką laserową. Zogniskowana na niewielkiej powierzchni

ły diamentu przechodzą transformację od struktury sześcienniej do heksagonalnej. Okazuje się, że metoda Nagy'ego jest skuteczna w przypadku niemal każdego materiału i niemal każdego podłoża!

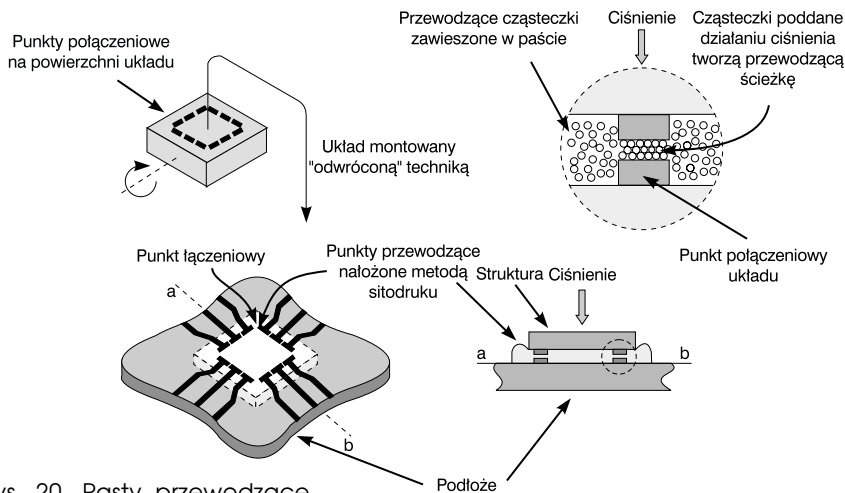
Wszystkie wspomniane technologie pozwalają uzyskać warstwy diamentowe o właściwościach zbliżonych do naturalnego diamentu, jeśli chodzi o przewodnictwo cieplne. Warstwy te są więc bardzo atrakcyjnym materiałem na podłoża modułów wielokładowych. Niestety, występują w nich wady struktury uniemożliwiające wykorzystanie w charakterze podłoża tranzystorów.

Podłoża układów scalonych wymagają dużej struktury krystalicznej, którą posiada wyłącznie naturalny diament. W chwili obecnej nie są znane materiały, na których mogłyby rosnąć pojedyncze kryształy diamentu. Nie można więc jeszcze hodować takich kryształów i jedynym rozwiązaniem wydaje się być modyfikowanie powierzchni podłoża, na którym utworzona została warstwa diamentowa. Uważa się powszechnie, że ta właśnie technologia rozwinię się w niedalekiej przyszłości. Jeśli tworzenie dużych, pojedynczych kryształów diamentu okaże się możliwe, to staną się one nie tylko ulubioną ozdobą kobiet, ale także najlepszym przyjaciele inżynierów.

### Technologia Chip-On-Chip

Połączenia między pojedynczymi układami modułów wielokładowych są istotną przyczyną ograniczenia szybkości działania tych modułów. Jednym z narzucających się rozwiązań jest montaż układów w jak najmniejszej odległości od siebie i ograniczanie w ten sposób długości części połączeń. Niestety, na dwuwymiarowym podłożu w niewielkiej odległości od układu można umieścić tylko osiem następnich. Rozwiązaniem jest struktura trójwymiarowa. Każdy z układów jest bardzo cienki i gdyby ułożyć je jeden na drugim, można uzyskać strukturę trójwymiarową zawierającą ponad sto układów (rys. 18).

Jednym z problemów występujących w tej technologii jest odprowadzanie ciepła, dotyczące w szczególności wewnętrznych



Rys. 20. Pasty przewodzące.

układów struktury trójwymiarowej. Problem ten można byłoby rozwiązać wykorzystując podłoża diamentowe.

Inna trudność, występująca w przypadku tradycyjnych technologii, to konieczność prowadzenia połączeń z położonymi niżej układami po zewnętrznych powierzchniach sześcienu (rys. 18). W efekcie zastosowanie tej technologii ograniczone byłoby do struktur zbudowanych z identycznych układów, np. pamięci SRAM lub DRAM ułożone jedna na drugiej stanowią najbardziej powszechny tego przykład.

Nowa technika, przynosząca rozwiązanie problemu połączeń w strukturze Chip-on-Chip, polega na wykonywaniu otworów w podłożu krzemowym. Przeprowadzono eksperymenty, w których na podłożu umieszczono krople aluminium, a następnie w piecu gradientowym doprowadzono do migracji aluminium przez podłożo

krzemowe, uzyskując w ten sposób połączenie (rys. 19).

Kolejna, bardziej zgodna z duchem współczesności, technika uzyskiwania takich połączeń polega na wykorzystaniu lasera do przeprowadzania ścieżki aluminiowej przez podłożo. Eksperymenty te zapewne doprowadzą do uzyskania dwustronnych podłoży z układami i połączeniami po obu stronach. Mogą także mieć duże znaczenie dla technik wykonywania połączeń w strukturach Chip-on-Chip.

### Przewodzące pasty

Rozwój wielu procesów technologicznych, wykorzystywanych w produkcji podzespołów elektronicznych, zmierza w stronę upraszczania strony mechanicznej i podnoszenia złożoności technologii materiałów. Dobrym tego przykładem stanowią przewodzące pasty, zawierające małe cząsteczki materiałów przewodzących.

Pasty takie są wykorzystywane zwłaszcza w przypadku techniki "odwróconych" układów ("flipped chips"), stosowanej do montażu układów na podłożach układów hybrydowych, modułów wieloukładowych lub na płytkach drukowanych. Pasta nakładana jest metodą sitodruku na podłożo w miejscu, gdzie ma zostać ulokowany układ. Układ jest wciskany w pastę, która wiąże pod działaniem temperatury i ciśnienia (rys. 20).

Ogromną zaletą tej metody jest prostota masek wykorzystywanych do nakładania pasty oraz to, że jej nakładanie nie musi być bardzo precyzyjne, ponieważ pasta może zostać rozprowadzona po całej powierzchni układu. Przewodzące cząsteczki tworzą kontakt elektryczny tylko w miejscach, gdzie znajdują się kontakty układu i kontakty podłoża.

Początkowo w pastach przewodzących stosowano cząsteczki srebra. Niestety srebro - oprócz wysokiej ceny - posiada jeszcze inne wady, a mianowicie powoduje migracje elektronów w podłożu krzemowym. Współczesne pasty przewodzące tworzone są z użyciem związków organicznych metali, w których wspomniany problem występuje w mniejszym zakresie.

Oprócz prostoty i niższej liczby operacji w procesie technologicznym użycie past przewodzących pozwala uniknąć stosowania lutowni, które z racji zawartości ołowiu zaczyna być traktowane jako niebezpieczne dla środowiska.