

Amorficzny krzem w mikroelektronice

1. WSTĘP

Badania właściwości fizycznych amorficznego krzemu (a-Si) stanowią przedmiot intensywnych prac wielu laboratoriów uniwersyteckich i przemysłowych. Wynika to z możliwości wykorzystania zjawisk fizycznych zachodzących w tym materiale do realizacji wielu ważnych przyrządów półprzewodnikowych. W ciągu ostatnich dziesięciu lat zaproponowano wykorzystanie a-Si w ponad dwudziestu różnych zastosowaniach [1, 2], a w chwili obecnej pięć z tych propozycji doprowadziło do wyrobów dostępnych na rynkach światowych. Rozwój ten zapoczątkowały dwa fundamentalne odkrycia dokonane w połowie lat siedemdziesiątych. Pierwszym z nich było stwierdzenie [3], że a-Si otrzymany za pomocą chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą (PECVD- Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition), nazywanego również rozkładem gazu w wyładowaniu jarzeniowym (Glow Discharge Process) charakteryzuje się bardzo małą gęstością stanów zlokalizowanych w przerwie zabronionej. Było to punktem zwrotnym w rozwoju badań i zastosowań tego materiału, gdyż doprowadziło wprost do powstania polowego tranzystora cienkowarstwowego (a-Si TFT FET) i dało podstawę dla odkrycia w 1975 roku możliwości domieszkowania a-Si w szerokim zakresie [4]. Wkrótce potem pojawiło się doniesienie o wytworzeniu złącza p-n [5] i przetwornika fotowoltaicznego [6]. W następnych latach nastąpił szybki rozwój badań i zastosowań a-Si, w szczególności przetworników fotowoltaicznych produkowanych obecnie na szeroką skalę. Są one najbardziej obiecującymi spośród przetworników fotowoltaicznych wytwarzanych z różnych materiałów.

2. PÓLPRZEWODNIK AMORFICZNY

Półprzewodniki amorficzne są ciałami, w których atomy są przypadkowo usytuowane. Nie mają uporządkowania dalekiego zasięgu. Nie można jednak powiedzieć, że półprzewodniki amorficzne są całkowicie nieuporządkowane w skali atomowej. Prawa chemiczne zapewniają prawie rygorystycznie długość wiązania i w mniejszym stopniu kąt wiązania określony przez najbliższe sąsiedztwo. Amorficzne półprzewodniki składają się z kowalentnie związanych atomów ułożonych w otwartą sieć z uporządkowaniem do trzeciego lub czwartego najbliższego sąsiada. To uporządkowanie bliskiego zasięgu jest bezpośrednio odpowiedzialne za obserwowane właściwości fizyczne takie jak krawędź absorpcji optycznej i przewodnictwo elektryczne.

Materiały amorficzne różnią się tym od polikrystalicznych, te ostatnie bowiem złożone są z ziarn, z których każde zawiera periodyczną sieć atomów otoczonych warstwą graniczną.

Otrzymany materiał jest eksperymentalnie określony jako amorficzny jeżeli jego dyfraktogram składa się z rozmytych pierścieni, a nie z ostrych pierścieni Bragga lub plamek, charakterystycznych odpowiednio dla materiału polikrystalicznego lub monokrystalicznego.

Właściwości materiału mogą być tylko wtedy właściwie zinterpretowane, gdy znany jest model struktury elektronowej. Przy braku uporządkowania dalekiego zasięgu, stanów elektronowych nie można opisać za pomocą wektora falowego k , gdyż średnia droga swobodna elektronu jest bardzo mała, wskutek czego elektron ciągle zmienia kierunek pędu. Oznacza to, że teoria Blocha - potężne narzędzie w rękach fizyków ciała stałego - nie może być użyta do opisu stanu amorficznego. Wykazano jednak, że koncepcja funkcji gęstości stanów pozostaje ważna dla materiału niekryształicznego tak długo, jak długo istnieje uporządkowanie bliskiego zasięgu i może być używana do przedstawienia obrazu pasm. W amorficznym krzemie występują również dwa pasma: walencyjne i przewodnictwa, które są jednak bardziej rozmyte niż w półprzewodnikach krystalicznych. "Ogony" tych pasm mogą zachodzić na siebie. Nie oznacza to jednak, że amorficzny krzem ma cechy metaliczne, gdyż charakter stanów o energiach leżących w ogonach pasm jest zupełnie inny niż stanów o energiach ze środkowych części pasm. Wykazano, że istnieje granica w ogonach pasm oddzielająca stany swobodne od stanów zlokalizowanych, w których ruchliwość nośników jest bardzo mała i transport odbywa się za pomocą przeskoków (hopping). Istnienie ostrych krawędzi ruchliwości jest bardzo charakterystyczną cechą amorficznych półprzewodników.

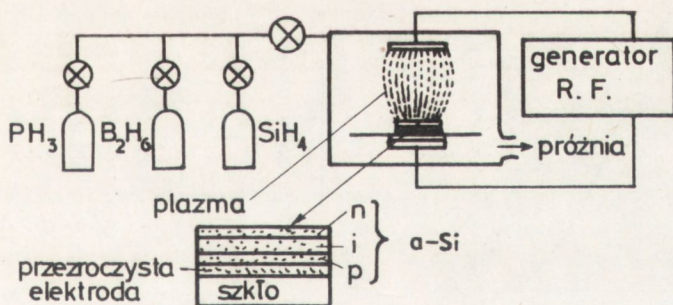
Amorficzny krzem, nawet gdy teoretycznie czysty, zawiera wiele niewysycionych wiązań (10^{19} - 10^{20} spinów/cm³). Energetyczne poziomy tych wiązań leżą w przerwie zabronionej wpływając na procesy transportu nośników, absorpcji, powodują, że fotoprzewodność i luminescencja jest bardzo mała, a poziom Fer-

miego jest "przygwożdżony" (brak wpływu wprowadzonych domieszek). Wygrzewanie wprawdzie zmniejsza ilość niewysyconych wiązań i ogon krawędzi absorpcji, jednakże tą drogą nie można wysycić wszystkich wiązań, gdyż krystalizacja materiału następuje wcześniej. Niewysycone wiązania nie mogą połączyć się między sobą przy wygrzewaniu, ale mogą połączyć się z innymi atomami, np. H, F, Cl. Zakłada się, że pierwiastki te, a przede wszystkim wodór, pasywuja niewysycone wiązania. W ten sposób wykorzystane mogą być interesujące właściwości amorficznego krzemu (aczkolwiek zmienione poprzez efekt stopu Si-H), a także umożliwiające domieszkowanie. Rola wodoru nie jest do końca wyjaśniona, gdyż poza pasywacją wiązań może on odgrywać aktywną rolę, np. powiększając optyczną przerwę zabronioną, uczulając fotopobudzone procesy, zmieniając oddziaływanie sieć - elektron, itd. Zagadnienie - jak duże uwodornienie jest potrzebne aby odkryć interesujące zjawiska - pozostaje ciągle otwarte.

3. METODY OTRZYMYWANIA

Z konwencjonalnymi metodami wytwarzania krzemu monokrystalicznego związanych jest wiele problemów, m.in. skomplikowane procesy technologiczne, duże zużycie materiału wyjściowego, duże zużycie energii (procesy w temperaturach powyżej 1000°C), ograniczona powierzchnia monokryształu.

Metody otrzymywania amorficznego krzemu są o wiele prostsze. Podstawową metodą, która odegrała decydującą rolę w rozwoju amorficznego krzemu, było osadzenie cienkich warstw z fazy gazowej poprzez rozkład silanu (SiH_4) w wyładowaniu jarzeniowym. Rys. 1 przedstawia typową metodę otrzymywania krzemu amorficznego.



Rys. 1. Schemat reaktora do otrzymywania warstw amorficznego krzemu w wyładowaniu jarzeniowym

Podłoża, np. szkło, blacha stalowa umieszczone są w komorze reakcyjnej na grzejniku o temperaturze 200–350°C. Do komory reakcyjnej doprowadzany jest gaz, SiH_4 przy obniżonym ciśnieniu 40–100 Pa. Grzejnik z podłożem stanowi jedną z elektrod, między którymi występuje wyładowanie jarzeniowe w.c.z.

(13,5 MHz). Wysoko energetyczne elektrony, pobudzone przez wyładowanie, zderzają się z atomami gazu, rozkładając go i dając w rezultacie osadzanie amorficznego krzemu na podłożu. Dodanie innych gazów (np. B_2H_6 lub PH_3) do SiH_4 umożliwia domieszkowanie materiału. Amorficzny krzem można również otrzymać za pomocą innych metod, np. rozpylania katodowego w obecności wodoru lub metod CVD (7). Materiał otrzymany w wysokich temperaturach wymaga dodatkowo wygrzewania w płazmie wodorowej.

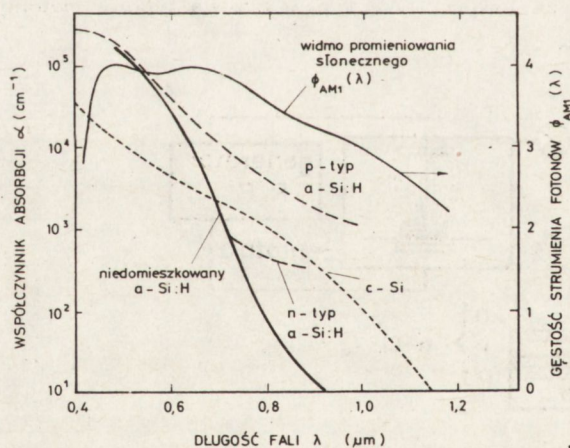
4. ZASTOSOWANIA

Przetworniki fotowoltaiczne

Amorficzny krzem ma wiele właściwości, które powodują, że materiał ten wydaje się być jednym z najbardziej obiecujących dla przetwarzania energii słonecznej. Należy tu wyróżnić:

1. Duży współczynnik absorpcji i dużą fotoprzewodność w widzialnym zakresie promieniowania.

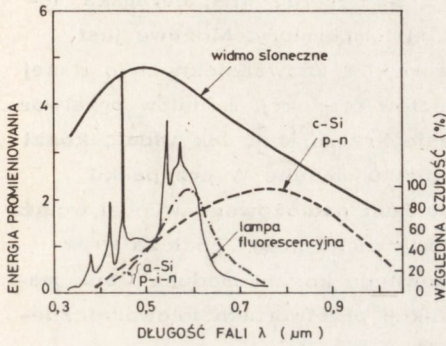
Rys. 2 przedstawia spektralną zależność współczynnika absorpcji amorficznego krzemu niedomieszkowanego i domieszkowanego w porównaniu z krzemem monokrystalicznym i widmem promieniowania słonecznego. Współczynnik absorpcji zarówno amorficznego krzemu niedomieszkowanego, jak i domieszkowanego, jest więcej niż o rząd wielkości większy, niż krzemu



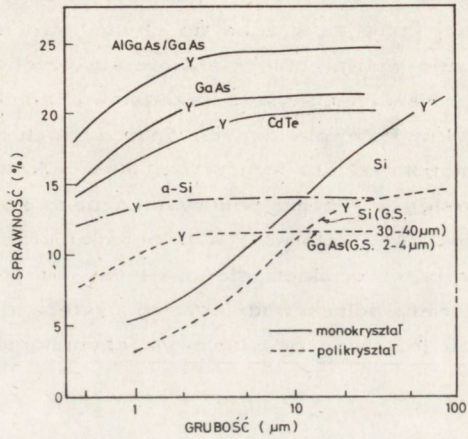
Rys. 2. Spektralna zależność współczynnika absorpcji a-Si:H i krystalicznego Si przy promieniowaniu słonecznym AM1

monokrystalicznego dla obszaru najintensywniejszego promieniowania słonecznego w okolicy $\lambda = 0,5 \mu m$. Co więcej, dla amorficznego krzemu typu p pozostaje on większy również w zakresie bliskiej podczerwieni. Szerokość optycznej przerwy zabronionej uwodornionego a-Si:H zawiera się w granicach 1,7-1,8 eV, czyli jest bliska optymalnej ze względu na sprawność przetwarzania energii słonecznej. Ponadto a-Si:H ma bardzo dobrą fotoprzewodność w wi-

działnym zakresie promieniowania. Stosunek fotoprzewodności do przewodności ciemnej σ_{ph}/σ_d jest rzędu 10^5-10^7 , a σ_d jest rzędu $10^{-9}-10^{-11} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ [8, 9]. Przetworniki fotowoltaiczne o strukturze p-i-n wykonane z a-Si:H mają charakterystykę spektralną prawie identyczną z charakterystyką promieniowania lampy fluorescencyjnej (rys. 3).



Rys. 3. Porównanie spektralnej czułości a-Si złącza p-i-n, monokrystalicznego Si złącza p-n z widmem promieniowania słonecznego i lampy fluorescencyjnej



Rys. 4. Sprawność przetworników fotowoltaicznych w funkcji grubości materiału

2. Możliwość domieszkowania w szerokim zakresie.

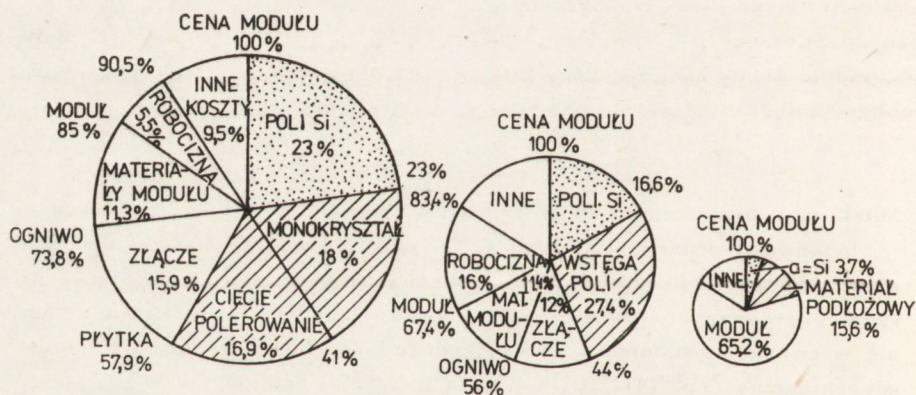
Możliwość zmiany typu i wielkości przewodności w bardzo szerokich granicach od 10^{-12} do $1 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ jest niezwykle ważną właściwością tetraedrycznie związanych amorficznych półprzewodników. Domieszkowanie uzyskuje się w czasie narastania warstwy, precyzyjnie mieszając silan z gazem domieszkującym (np. PH_3 , B_2H_6). Jest niezwykle istotne, że w podobny sposób można uzyskać nowe materiały bazujące na amorficznym krzemie (np. a-SiC:H, a-Si-Ge:H, a-Si-Sn:H) o różnej szerokości przerwy zabronionej i domieszkować je [10-12].

3. Prosta i tania technologia

W celu ustalenia optymalnej grubości obszaru aktywnego przetwornika fotowoltaicznego wykonanego z różnych materiałów przeprowadzono systematyczne obliczenia, których rezultaty przedstawiono na rys. 4 [13]. Optymalna grubość materiału potrzebna do otrzymania najbardziej efektywnego pod względem kosztów i sprawności przetwornika fotowoltaicznego została oznaczona przez Y. Otrzymane wyniki wskazują, że wielkość ta w przypadku a-Si:H wynosi jedynie 0,5-0,7 μm w zależności od struktury przetwornika. Wartość ta została zweryfikowana eksperymentalnie i jest mniejsza niż gru-

bość wszystkich pozostałych rozważanych materiałów. Stosunek optymalnych grubości a-Si:H i krzemu krystalicznego jest mniejszy niż 1/500. Dlatego też ze względu na małe zużycie energii i zasobów naturalnych przy produkcji, a-Si:H jest idealnym materiałem na przetworniki fotowoltaiczne, na które zapotrzebowanie gwałtownie wzrasta.

Ze względu na swoją strukturę amorficzną a-Si:H może być osadzany na tanie niekrystaliczne podłoża, takie jak szkło, stal nierdzewna, ceramika, folia, które są grzane do stosunkowo niewielkiej temperatury. Możliwe jest więc wytwarzanie cienkowarstwowych przetworników fotowoltaicznych o dużej powierzchni. Rys. 5 przedstawia analizę kosztów produkcji modułów przetworników fotowoltaicznych opartych o trzy rodzaje krzemu [14]. Jak widać, koszt monokryształu wynosi ok. 60% całkowitego kosztu modułu. W przypadku wstęg z krzemu polikrystalicznego koszt materiału podłożowego wynosi wciąż ok. 44%. Natomiast w przypadku krzemu amorficznego koszt podłoża wraz z przetwornikiem stanowi tylko ok. 16% całkowitego kosztu modułu. Cena materiału półprzewodnikowego użytego do produkcji przetwornika fotowoltaicznego jest więc podstawowym czynnikiem determinującym jego cenę.



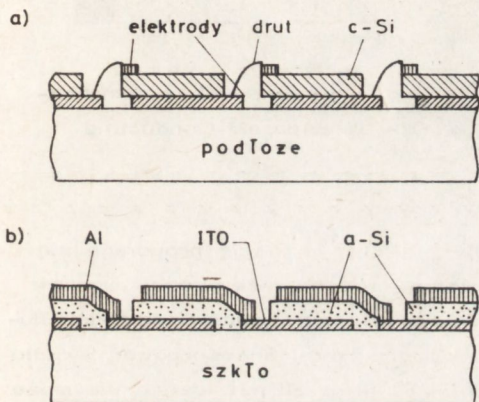
Rys. 5. Analiza kosztów wytworzenia przetworników fotowoltaicznych na krzemie o różnej strukturze. Obliczenia zostały wykonane przy założeniu produkcji przetworników z krzemu monokrystalicznego i polikrystalicznego (złącza p-n) 10 MW_p/rok, a dla amorficznego Si (złącza p-i-n) 100 MW_p/rok.

Cały przetwornik na a-Si:H może być wytwarzany w jednej komorze reakcyjnej poprzez wprowadzanie odpowiedniej mieszaniny gazów. Istnieje przy tym możliwość stosowania konwencjonalnej fotolitografii. Masowy proces produkcji tych przetworników jest więc prosty i tani. Np. Skarp - ECD produkuje przetworniki na taśmie ze stali nierdzewnej o długości 300 m, szerokości

40 cm i grubości 0,2 mm w ciągłym w pełni zautomatyzowanym procesie technologicznym [15].

4. Możliwość uzyskania dużego napięcia z jednego podłoża.

Napięcie otrzymane z jednego konwencjonalnego przetwornika fotowoltaicznego na krystalicznym krzemie (jedna płytka podłożowa) jest mniejsze niż 1 V. Z punktu zastosowań praktycznych, napięcia od 1,5 do 12 V wymagane są w urządzeniach elektronicznych powszechnego użytku, a setki woltów w urządzeniach mocy. Stąd też przetworniki na krystalicznym Si muszą być połączone w sposób jak na rys. 6a. Prowadzi to do wyższego kosztu modułu i zmniejsza jego niezawodność.



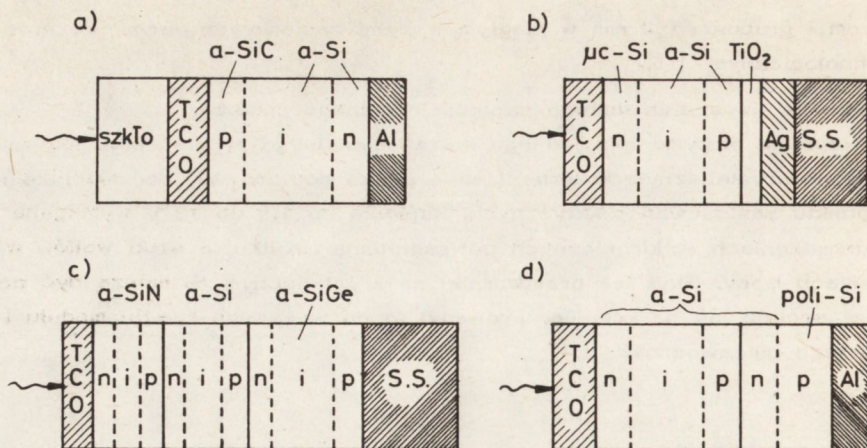
Rys. 6. Struktura kaskadowa przetwornika fotowoltaicznego

- a) krzem monokrystaliczny,
- b) krzem amorficzny (ITO - Indium-Tin-Oxide)

Z drugiej strony, przetwornik fotowoltaiczny na a-Si:H może generować duże napięcie z jednego podłoża mając strukturę zintegrowaną jak na rys. 6b [16]. Ponadto zmniejszają się straty mocy powodowane rezystancją kontaktów i doprowadzeń, drastycznie maleje ilość połączeń zewnętrznych i zwiększa się niezawodność.

Prace nad przetwornikami fotowoltaicznymi na amorficznym Si rozpoczęły się w 1974 r. Jednakże największy postęp w zwiększaniu wydajności przetwarzania energii słonecznej nastąpił po 1978 roku. Wydajność przetworników o małej powierzchni ($\leq 1 \text{ cm}^2$) wynosiła 4,5% w 1978 r., osiągnęła 10,1% w połowie 1982 r., a obecnie wynosi 11,5% ($V_{OC}=870 \text{ mV}$, $I_{SC}=18,9 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0,7$ - struktura p-i-n) [17]. Wydajność przetworników (struktura p-i-n) o powierzchni 50 cm^2 wynosiła 2% w 1979 r., a w chwili obecnej przetworniki o powierzchni ok. 1000 cm^2 mają wydajność w granicach ok. 8% [18]. W przypadku heterozłącza a-Si:H/a-SiGe:H i a-Si:H/poli Si wydajności wynoszą, odpowiednio 8,6% [11] i 12,5% [19].

Obliczona teoretycznie sprawność przetwarzania struktury p-i-n wynosi ok. 17%. Liczba ta została uzyskana przy założeniu, że prawie 80% padającego pro-

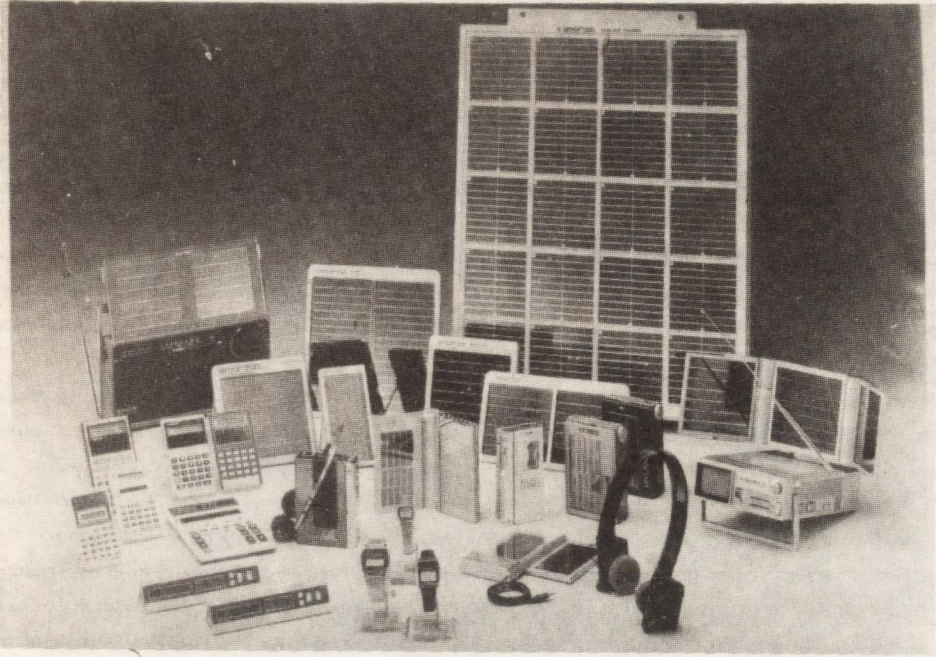


Rys. 7. Struktury przetworników fotowoltaicznych wykonanych z amorficznego krzemu i związków pochodnych (TCO - Transparent-Conducting Oxide)

mieniowania tracone jest bezpowrotnie. Ażeby poprawić sytuację proponuje się struktury złożone ze złącz p-i-n kilku materiałów o różnej szerokości przerwy zabronionej (rys. 7). Np. struktura (c) może absorbować światło o krótkiej długości fali za pomocą przetwornika z a-Si:N:H, może również absorbować światło o długiej fali za pomocą przetwornika z a-SiGe:H lub a-SiSn:H, czego nie może robić struktura wytworzona jedynie z a-Si:H. Można się spodziewać, że wydajność tego typu przetworników osiągnie wartość rzędu 24%. Nie występuje tu problem dopasowania sieci krystalicznej, otwierając jednocześnie nowe możliwości niedostępne dla ogniw na krzemie monokrystalicznym lub polikrystalicznym.

Produkcja przetworników fotowoltaicznych na a-Si:H wyniosła ok. 7 MW_p w 1984 r., co stanowi ok. 1/3 całej światowej produkcji przetworników i udział ten będzie wzrastał z roku na rok [20]. Przetworniki fotowoltaiczne na a-Si:H są produkowane głównie w Japonii i znajdują zastosowanie w wyrobach elektronicznych powszechnego użytku (rys. 8) lub do generacji małych mocy (rys. 9).

Innym badanym zastosowaniem a-Si:H jest jego przydatność w przemianie fototermicznej. Ze względu na dużą absorpcję warstw domieszkowanych borem (rys. 2) trwają prace nad przetwornikami fototermicznymi *m.in.* o strukturze SiO₂/TiO₂/a-Si:H:B/Al [21]. Hybrydowe przetworniki fotowoltaiczno-fototermiczne o całkowitej sprawności 50-60% są obecnie testowane przez Sanyo Electric Company. W Osaka istnieje eksperymentalny dom (rys. 9) wyposażony w moduły fotowoltaiczne o mocy 2 kW_p i wyżej wymienione hybrydowe przetworniki o całkowitej mocy odpowiadającej 10 kW_p energii elektrycznej. Tego typu hybrydy mogą mieć istotne znaczenie w wykorzystaniu a-Si:H dla przetwornika energii słonecznej.



Rys. 8. Wyroby rynkowe, w których zastosowano przetworniki fotowoltaiczne z amorficznego krzemu

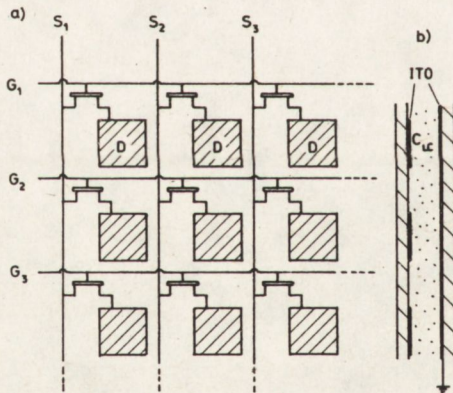


Rys. 9. Dom w Osaka (Japonia) wyposażony w przetworniki fotowoltaiczne z amorficznego krzemu

Wyświetlacze ciekłokrystaliczne

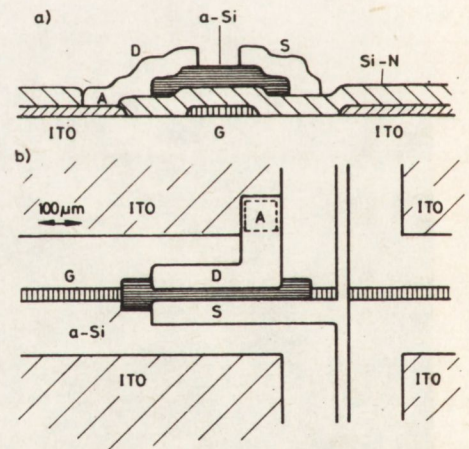
Z roku na rok wzrasta zainteresowanie płaskimi wyświetlaczami o dużej powierzchni. Ocenia się [22], że produkcja wyświetlaczy ciekłokrystalicznych będzie stanowiła od 1987 roku ok. 70% światowej produkcji wyświetlaczy z powodu niskiego kosztu produkcji i minimalnego poboru mocy. Ze względu na pożądaną dużą powierzchnię wyświetlaczy konieczne jest ich sterowanie za pomocą tranzystorów cienkowarstwowych. Z wielu rozważanych materiałów, amorficzny krzem wydaje się być jednym z najbardziej obiecujących. Wykorzystanie cienkowarstwowych tranzystorów wykonanych z amorficznego Si do sterowania wyświetlaczy ciekłokrystalicznych i w innych zastosowaniach było ostatnio przedmiotem kilku artykułów przeglądowych [23, 24].

Rys. 10a przedstawia schematyczny diagram kilku elementów panela wyświetlacza ciekłokrystalicznego [25]. Tranzystor włączony jest w róg każdego elementu matrycy. Tranzystory połączone są za pomocą prostokątnych ścieżek G_1 , G_2 ,... i S_1 , S_2 ,... łączących odpowiednio bramki i źródła. Kontakt każdego drenu, D, dołączony jest do kwadratów wykonanych z ITO. Z przekroju bocznego (rys. 10b) widać, że ciekły kryształ znajduje się pomiędzy podłożem z tranzystorami a płytką szklaną pokrytą ITO, zwartą do masy. Rys. 11a pokazuje przekrój pojedynczego tranzystora, a rys. 11b ilustruje geometrię tranzystora jako elementu matrycy.



Rys. 10. Schemat części matrycy wyświetlacza ciekłokrystalicznego sterowanego tranzystorami cienkowarstwowymi wykonanymi z amorficznego krzemu

- a) widok czotowy,
- b) przekrój boczny

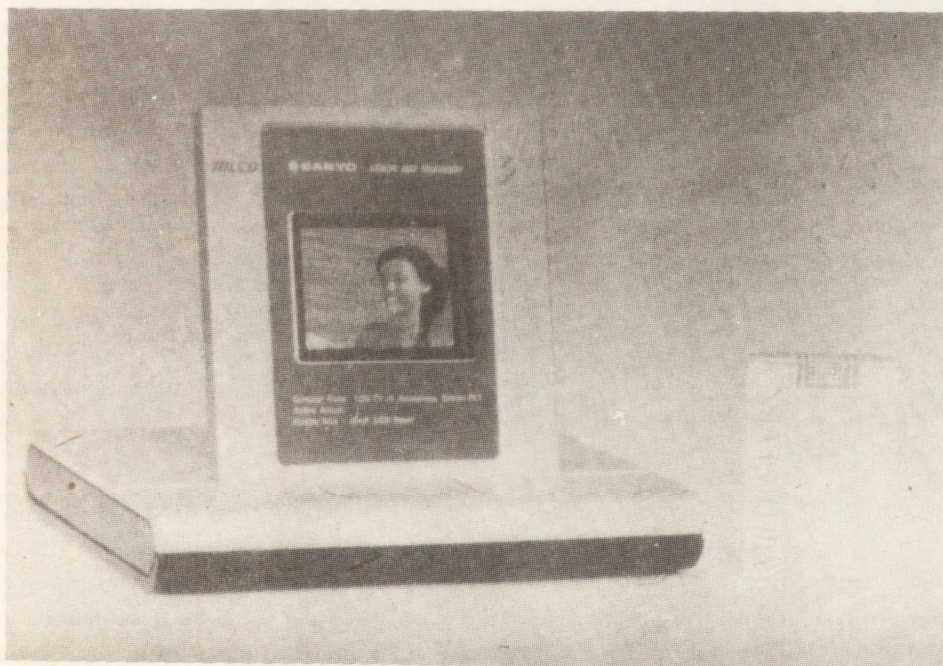


Rys. 11. Schemat pojedynczego cienkowarstwowego tranzystora

- a) przekrój boczny,
- b) TFT jako część matrycy

Tranzystory cienkowarstwowe są wytwarzane w następujący sposób. Metalowa elektroda (bramka) o szerokości 30 μm naparowywana jest na podłoże szklane. Następnie cienka warstwa dielektryczna (ok. 0,3 μm amorficznego SiN_x) jest osadzona za pomocą metody PECVD z mieszaniny SiH_4 i NH_3 . Warstwa a-Si:H też ok. 0,3 μm grubości jest osadzona na dielektryk za pomocą rozkładu SiH_4 w wyładowaniu jarzeniowym. Oba te procesy zachodzą w temperaturze ok. 300°C, co jest istotną zaletą technologiczną. Końcowym etapem jest wytwarzanie odpowiednich elektrod źródła i drenu na powierzchni a-Si:H. Różne aspekty związane z wytwarzaniem a-Si FET są szczegółowo przedyskutowane w pracy [23]. Tranzystor taki charakteryzuje się małym prądem w stanie wyłączonym (10^{-11} A), stosunkiem prądów w stanie włączonym i wyłączonym $\approx 10^8$, potencjał konieczny do wysterowania elementu ciekłokrystalicznego osiągany jest w czasie ok. 10 μs , połową ruchliwością 0,3 $\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ i napięciem progowym 4 V. Ważnym czynnikiem w rozwoju a-Si PETów jest powtarzalność i jednorodność charakterystyk elementów matrycy. Dotychczas osiągnięte wyniki są zachęcające.

Szacuje się [26], że więcej niż 20 firm elektronicznych aktywnie rozwija badania nad tranzystorami cienkowarstwowymi do wyświetlaczy ciekłokrystalicznych i wiele z nich ma już gotowe prototypy. Najbardziej efektywnym jest ekran telewizora kolorowego (7,5 cm) mający 240x222 elementów obrazowych zademontrowanych przez Sanyo [27] (rys. 12) i kolorowy monitor graficzny



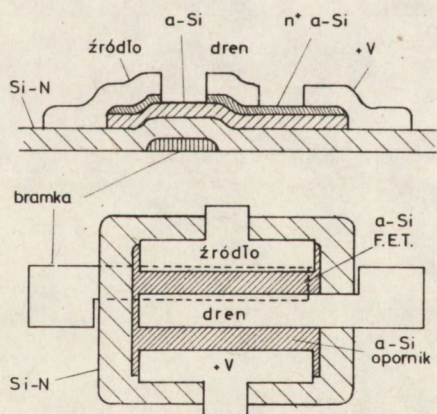
Rys. 12. Telewizor kolorowy z ekranem ciekłokrystalicznym (7,5 cm) sterowanym przez 52800 a-Si TFT

(17,5 cm) o 325x325 elementów obrazowych wyprodukowanych przez Hosiden [28]. Potencjalny rynek dla wyświetlaczy ciekłokrystalicznych o dużej powierzchni jest ogromny i obserwując duży postęp w dziedzinie a-Si FETów wydaje się, że rynkowa produkcja wyświetlaczy ciekłokrystalicznych z tymi tranzystorami jest możliwą w niezbyt odległej przyszłości.

Układy logiczne i przetworniki obrazu

Pokazano, że istnieje możliwość wytwarzania scalonego inwertera składającego się z tranzystora cienkowarstwowego połączonego szeregowo z opornikiem (rys. 13) [29]. Poprzez rozszerzenie tego układu możliwe jest wytwarzanie bramek logicznych NAND i NOR, bistabilnego multiwibratora i rejestru przesuwającego [29]. Ten ostatni jest szczególnie interesujący z punktu widzenia scalonych układów cienkowarstwowych sterujących panele ciekłokrystaliczne.

Czynnikiem, który najbardziej ogranicza zastosowania a-Si PETów w układach logicznych, jest ich częstotliwość graniczna. Jest ona przede wszystkim określana czasem potrzebnym do naładowania pojemności układu. Tranzystory opisane powyżej mogą naładować 1 pF do kilku V w czasie poniżej 1 μ s tak, że praca przy częstotliwościach rzędu kilku MHz byłaby możliwa w pewnych zastosowaniach. Maksymalną częstotliwość pracy szacuje się na ok. 100 MHz [30].



Rys. 13. Scalony inverter z amorficznego krzemu

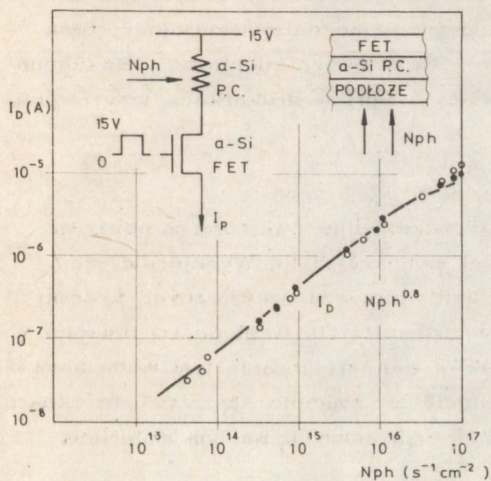
Duża fotonowatliwość a-Si:H umożliwia zintegrowanie elementów światłoczułych z układem scalonym. Przykładem może być adresowany przetwornik obrazu pokazany na rys. 14 [29]. Pokazano, że prąd wyjściowy elementarnego elementu scalonego zmienił się od ok. 10 μ A (10^{17} fotonów/s \cdot cm 2 - światło białe) do ok. 10 nA (10^{13} fotonów/s \cdot cm 2) [31]. Tak duży zakres zmian, zapewniający doskonałą szarą skalę, mógłby być osiągnięty z czasami ok. 20 μ s sugerując, że w zasadzie mniej niż 100 ms wymagane byłoby do odczytania informacji z 1000

liniowej matrycy. Dalsze badania tego typu zastosowań prowadzone są w kilku światowych laboratoriach.

Trwają również prace nad przyrządami pamięciowymi na a-Si:H [32]. Jest to elektrycznie programowany, trwały element pamięciowy, który z punktu widzenia szybkości, napięć pracy i stabilności jest korzystnie porównywalny z krystalicznymi tranzystorami MNOS lub FAMOS używanymi obecnie na trwałe programowane pamięci.

Innym zastosowaniem amorficznego krzemu są przyrządy CCD będące jak dotąd w fazie badań laboratoryjnych. Wytworzono prototypowy przyrząd z pięcioma brankami i uzyskaną sprawność transferu prawie 99,6% [33].

Cienkowarstwowe tranzystory z amorficznego Si mogą być również scalone w postaci trójwymiarowej. Inwertery wytworzone na podłożu kwarcowym mają dwie warstwy tranzystorów izolowane przez CVD SiO₂.

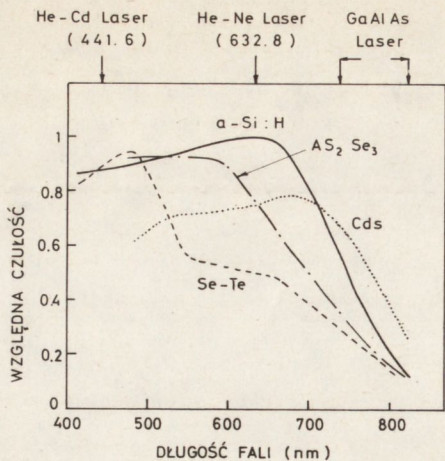


Rys. 14. Schemat scalonego czujnika obrazowego i jego prąd wyjściowy I_D w funkcji intensywności promieniowania

Fotodetektory

Trwają intensywne badania fotodetektorów z amorficznego Si ze względu na dużą czułość a-Si:H w widzialnym zakresie promieniowania (rys. 15). Typowymi zastosowaniami, będącymi już produktami rynkowymi są fotodetektory (o strukturze złącza p-i-n) czułe na cały zakres promieniowania widzialnego lub czułe na określoną długość fali promieniowania [34]. Jednym z zastosowań (a-Si fotoopornik), nad którym obecnie koncentruje się badania są detektory do kopiarek. Są one szybsze niż detektory z CdS i można produkować urządzenia o większej powierzchni.

Atrakcyjne własności fizyczne a-Si:H spowodowały gwałtowny rozwój badań nad nowymi typami przetwarzania obrazów [35, 36]. Wymagania co do warstwy przewodzącej w elektrofotografii i vidiconach są podobne. Zaletami a-Si:H w sto-



Rys. 15. Porównanie względnej czułości amorficznego krzemu i kilku innych materiałów stosowanych w elektrofotografii i vidiconach

sunku do amorficznego Se, który jest typowym materiałem kserograficznym są: wysoka rezystywność, duża fotoczułość, duża mechaniczna wytrzymałość, brak toksyczności, mniejsza rekombinacja ekscytonowa, większa ruchliwość. Szczególnie zaawansowane są prace nad zastosowaniem a-Si:H w drukarkach laserowych.

5. PODSUMOWANIE

Technologia krzemu krystalicznego jest nierozdzielnie związana z pewnymi ograniczeniami, a mianowicie wielkość i koszt monokryształu. Wydaje się, że w tej sytuacji najbardziej konkurencyjnymi zastosowaniami amorficznego krzemu są tanie i o dużej powierzchni przyrządy elektronowe. Ze względu na unikalne własności amorficznego krzemu i jego związków zainteresowanie tym materiałem gwałtownie wzrasta. W ciągu ostatnich dziesięciu lat zmieniło się z czysto akademickiego na masową produkcję przyrządów elektronowych na tym materiale.

(Tekst dostarczony 1985,06,21)

LITERATURA

1. "The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon", Ed. by J.D. Joannopoulos and G. Lucovsky, in Topics in Applied Physics Vol. 55 and 56, Springer - Verlag, 1984
2. J. Non-Crystal Solids 59 and 60 (1983) - Proc. of X International Conference on Amorphous and Liquid Semiconductors, Tokyo, 1983
3. Spear W.E., LeComber P.G., J. Non-Crystal Solids, 8-10 (1972) 727
4. Spear W.E., LeComber P.G., Solid State Commun. 17 (1975) 1193
5. Spear W.E. et al., Appl. Phys. Lett. 28 (1976) 105
6. Carlson D.E., Wronski C.R., Appl. Phys. Lett. 28 (1976) 671
7. Paul W., Anderson D.A., Solar Energy Mat. 5 (1981) 229
8. Pietruszko S.M. et al., J. Appl. Phys. 52 (1981) 859
9. Pietruszko S.M. et al., Phil. Mag. B 43 (1981) 357
10. Tawada Y. et al., Appl. Phys. Lett. 39 (1981) 237
11. Kuwano Y. et al., 16th IEEE Photovol. Spec. Conf. San Diego (USA) 1982
12. Matsuda A. et al., 16th IEEE Photovol. Spec. Conf. San Diego (USA) 1982
13. Hamakawa Y., Surf. Sci. 86 (1979) 444
14. Hamakawa Y., J. Physique, Colloq. C4, 42 (1981) 1131
15. Blieden H.R., Proc. SPIE. 428 (1983) 66
16. Kuwano Y., Ohnishi M., J. Physique, Colloq. C4, 42 (1981) 1155
17. Nakano S. et al., Int. PVSEC - 1, Kobe, 1984
18. Sakai H. et al., 17th IEEE Photovol. Spec. Conf., New York, 1984
19. Hamakawa Y., J. Non-Crystal Solids 59-60 (1983) 1265
20. Kuwano Y., Int. PVSEC - 1. Kobe 1984
21. Okuyama M. et al., Solar Energy Mater. 3 (1980) 405
22. Bindra A.K., Electronics, March 22/1984, 113
23. "Comparison of Thin Film Transistor and SOI Technologies" Ed. by H.Y. Lam and M.J. Thompson, MRS Symp. Vol. 33, 1984
24. IEEE Trans. ED 30/5/ (1983)
25. Snell A.J. et al., Appl. Phys. 24 (1981) 357
26. Powell M.J., Proc. IV Int. Display Research Conf. (EURODISPLAY), Paris 1984, 131
27. Yamano M. et al. Annual Research Report, Sanyo Electric Company, 1984
28. Ugai Y. et al., SID Symp. Digest (1984) 308
29. LeComber P.G. et al., J. Physique, Colloq. C4, 42 (1981) 423
30. Sze S.M., Physics of Semiconductor Devices, p. 573. Wiley (Interscience), New York 1969
31. Snell A.J. et al., Appl. Phys. A34 (1984) 175
32. Owen A.E. et al., J. Non-Crystal Solids 59-60, (1983) 1273
33. Kishida S. et al., J. Non-Crystal Solids 59-60 (1983) 1281
34. Nakano S. et al., Tans. of the Japan Soc. of Appl. Phys., (Fall Meeting) (1981) 4a-Z-16
35. Nakayama Y. et al., J. Non-Crystal Solids 59-60 (1983) 1231
36. Ondris M. et al., J. Non-Crystal Solids 59-60 (1983) 1243