



HBM, MM, CDM, czyli

ładunki statyczne w natarciu

Układy elektroniczne, a zwłaszcza mikroskopijnej wielkości struktury układów scalonych łatwo mogą zostać uszkodzone przez duże napięcia i prądy, występujące podczas rozładowania ładunków elektrostatycznych (ESD - electrostatic discharge). Ładunki statyczne powstają wskutek tak zwanego efektu tryboelektrycznego. Przykładowo, chodząc po dywanie lub wykładzinie ze sztucznego włókna, czy nawet posługując się najzwyklejszymi torebkami z polietylenu możemy naładować swoje ciało czy dotykane przedmioty do wysokiego napięcia rzędu kilkuset woltów lub nawet kilkunastu tysięcy woltów. Z punktu widzenia elektryczności chodzi tu o naładowanie pojemności i zgromadzenie w niej energii. Choć wchodzące tu w grę pojemności są stosunkowo małe, ze względu na duże napięcie, zmagazynowana ilość energii jest znaczna. Energia ta może bardzo łatwo doprowadzić do nienaprawialnego uszkodzenia struktury półprzewodnika. Potężny impuls prądu rozładowania może po prostu stopić połączenie, natomiast wysokie napięcie może nieodwracalnie przebić złącze lub dielektryk.

Większości elektroników problem ładunków statycznych kojarzy się z uszkodzeniami układów CMOS i małych tranzystorów MOSFET. Problem dotyczy także całych modułów, na przykład kart i pamięci komputerowych. Mniej brana pod uwagę jest możliwość stopniowej degradacji parametrów, prowadząca w końcu do uszkodzenia, dotycząca wszelkich delikatnych układów analogowych, w tym także bipolarnych. Nieprzypadkowo producenci układów analogowych, na przykład wzmacniaczy operacyjnych, umieszczają na opakowaniach i w specyfikacjach stosowne ostrzeżenia oraz zalecenia przechowywania i montażu, dotyczące układów bipolarnych.

Konstruktorzy współczesnych układów scalonych włożyli wiele trudu, by zmniejszyć ich podatność na uszkodzenie. Na przykład we wszystkich układach CMOS na wejściach są umieszczone obwody zabezpieczające. Jednak umieszczenie skutecznych obwodów ochronnych na wejściach układów

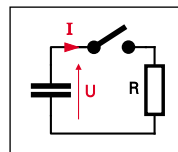
analogowych, na przykład ultraprecyzyjnych wzmacniaczy operacyjnych miałyby się z celem, ponieważ każdy taki obwód pogarsza w jakiś sposób właściwości układu. Ale nawet układy scalone z zabezpieczeniami nie są całkowicie bezpieczne. W wyjątkowo niesprzyjających warunkach rozładowanie ładunków statycznych może uszkodzić niemal każdy układ scalony, który przecież zawiera delikatne struktury mikroskopijnej wielkości.

Choć dla wielu elektroników temat wydaje się bardzo tajemniczy, ogólna zasada jest oczywista: naładowana do wysokiego napięcia pojemność rozładowuje się po zaistnieniu sprzyjających okoliczności przez końcówkę układu scalonego. Prąd zawsze płynie w zamkniętym obwodzie. Ilustruje to w uproszczeniu **rysunek 1**.

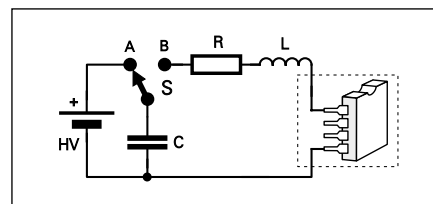
W praktyce jest wiele różnych możliwości i trudno byłoby je wszystkie wymienić. Jedną z częściej występujących sytuacji jest rozładowanie pojemności ciała ludzkiego przez końcówkę układu scalonego. Generalnie nie chodzi o sam moment dotknięcia do końcówki, tylko o powstanie sytuacji umożliwiającej przepływ prądu w zamkniętym obwodzie przez strukturę i przez ewentualne obwody zabezpieczające.

Na przykład po dotknięciu palcami przez osobę „naładowaną” (względem ziemi) kilku wyprowadzeń układu scalonego zwykle nie dzieje się jeszcze nic strasznego. Małe napięcie tych końcówek i całego układu scalonego szybko ładuje się do napięcia, do którego naładowana jest osoba. Problem pojawia się w chwilę później, przy wkładaniu kostki do podstawki. Przypuśćmy, że najpierw kontakt z podstawką mają końcówki, które nie są dotknięte palcami. I właśnie w tym krótkim ułamku sekundy może popłynąć duży prąd rozładowania pojemności ciała przez palce, dotknięte końcówki i dalej przez wewnętrzne struktury układu, do innych końcówek, do podstawki i do masy.

Oczywiście w praktyce zazwyczaj sytuacja nie jest aż tak jasna, obwód „masy” nie jest jednoznacznie określony (zwykle chodzi o uziemienie), niemniej prąd zawsze płynie w zamkniętym obwodzie, być może przez jakieś dodatkowe pojemności. Generalnie można tu mówić najpierw o ładowaniu pojemności, a potem o jej rozładowaniu *przez* element. Prąd przepływa pomiędzy końcówkami elementu półprzewodnikowego *przez* strukturę. Ten sam prąd rozładowania płynie też przez inne obwody, np. rezystancję ciała itp. Na dokładniejszym schemacie zastępczym należałoby więc uwzględnić występujące dodatkowe rezystancje i indukcyjności. Ilustruje to **rysunek 2** - w pozycji A przełącznika S pojemność C jest ładowana do wysokiego napięcia. Potem, po przełączeniu S do pozycji B, pojemność rozładowuje się przez rezystancję R, indukcyjność L i przez strukturę półprzewodnikową narażanego elementu.



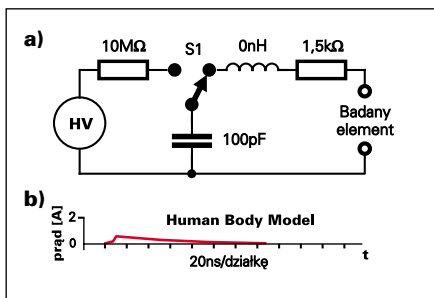
Rys. 1



Rys. 2

Aby w powtarzalny sposób określić odporność układów na uszkodzenia, wprowadzono standardowe sposoby i warunki pomiaru właśnie według **rysunku 2**. Już w późnych latach 60. na potrzeby armii amerykańskiej wprowadzono tzw. Human Body Model, czyli model ludzkiego ciała. Kondensator o pojemności 100pF jest ładowany do wysokiego napięcia (zwykle 400V ... 2kV) i potem rozładowywany przez rezystor i badany element. Schemat HBM z wartościami według amerykańskiej normy (MIL-STD-883) pokazany jest na **rysunku 3a**, a kształt wyjściowego impulsu prądowego na **rysunku 3b**. W zależności od napięcia, przy którym badany element nie ulega uszkodzeniu, określa się klasy

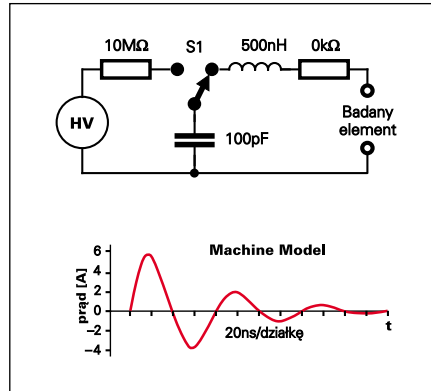
i oznaczenia, ewentualnie podaje się napięcie próby, w zakresie kilkuset woltów do kilku kilowoltów. Tylko zupełnie niezorientowani, natrafwszy w katalogu na wzmiankę typu: ESD - 2kV sądzą, że element wytrzyma bez uszkodzenia dowolny impuls o napięciu 2kV. Tymczasem dotyczy to zwykle sytuacji z rysunku 3a, gdzie prąd jest relatywnie mały. Trzeba wiedzieć, że model HBM odwzorowuje przeciętne, inaczej średnie warunki spotykane w praktyce. Dość duża rezystancja ograniczająca prąd, brak indukcyjności, stwarzają stosunkowo łagodne warunki testu, co słabo odzwierciedla sytuacje skrajne występujące w rzeczywistych warunkach. Aby sprawdzać odporność dla takich skrajnych przypadków wprowadzono w 1976 nowy model, nazwany MM (machine model). Ma on związek z sytuacjami występującymi podczas automatycznych testów układów scalonych za pomocą maszyn-automatów, ale odzwierciedla też skrajne przypadki związane z dotknięciem przez człowieka. W modelu MM rezystancję ograniczającą prąd zmniejszono do zera, a za to wprowadzono indukcyjność, przez co impuls prądowy ma charakter tłumionych oscylacji sinusoidalnych. Schemat MM i kształt impulsu testowego są pokazane na rysunku 4. Jak widać, testy z pomocą modelu MM stawiają badanemu elementowi dużo wyższe wymagania, niż przy modelu HBM.



Rys. 3

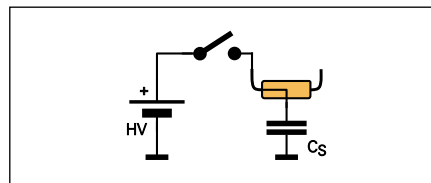
W pewnym uproszczeniu można powiedzieć, że modele HBM i MM dotyczą sprawdzania odporności układu scalonego na uszkodzenie na drodze między końcówkami wejściowymi, a masą. Niewiele mają natomiast wspólnego z samym dotknięciem przez człowieka do końcówek. Tymczasem nie tylko amatorzy intuicyjnie czują, że już samo dotknięcie końcówek, bez żadnego połączenia z masą, niesie pewne zagrożenie. W takim intuicyjnym podejściu jest sporo prawdy. W tym wypadku jednak nie chodzi o przepływ prądu przez struktury scalone, tylko przepływ prądu związany z ładowaniem się pojemności struktury scalonej. Chodzi o pojemność struktury względem masy (ziemi), która nie jest stała i wynosi zwykle 1...20pF. Rysunek 5 ilustruje ładowanie tej pojemności, oznaczonej Cs. W chwili dotknięcia dowolnej końcówki przez „nałado-

wanego” człowieka, w krótkim ułamku sekundy popłynie prąd i zostanie naładowana maleńka pojemność Cs (zamiast źródła napięcia HV można byłoby też narysować pojemność ciała ludzkiego, która jest znacznie większa niż pojemność elementu Cs).



Rys. 4

Rys. 5

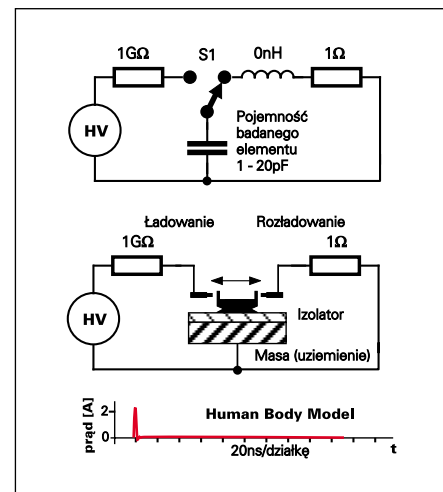


uwzględniając takie zagrożenie, związane z ładowaniem pojemności elementu względem ziemi, opracowano kolejny model, zwany CDM (charged device model). Rysunek 6 ilustruje sposób przeprowadzania pomiarów i uzyskiwany impuls prądu.

Należy mieć świadomość, że omówione modele i prowadzone przy ich pomocy ściśle określone normami testy stosowane są głównie względem elementów o specjalnym przeznaczeniu (wojskowe, lotnicze, kosmiczne, ewentualnie medyczne). Elementom powszechnego użytku poświęca się znacznie mniej uwagi. Często w podstawowych katalogach nie ma żadnej informacji dotyczącej ESD, ewentualnie występuje tylko krótka wzmianka lub zalecenie ostrożności.

Warto jeszcze zwrócić uwagę, jakie parametry mają impulsy testowe oraz te występujące w realnych warunkach. I właśnie takie króciutkie impulsy potrafią w ułamku sekundy zniszczyć kosztowny układ scalony. Przykładowo w metodzie HBM ze względu na dużą wartość rezystancji impuls prądu jest stosunkowo niewielki, zwykle nie przekracza 1A, a czas trwania jest rzędu dziesiątych części mikrosekundy. Przy modelu MM nawet przy napięciu 400V szczytowy prąd przekracza 5A, a czas narastania pierwszego impulsu prądowego wynosi typowo 14ns, a gasnące drgania mają częstotliwość 10...15MHz. Przy metodzie CDM (400V) impuls prądu ma nawet ponad 2 ampery, a jego czas trwania wynosi tylko około 2 nanosekund.

Ponieważ uszkodzeń wynikających z ESD nie można naprawić ani skompensować, jedynym ratunkiem jest ZAPOBIEGANIE. Praktyka pokazuje, że uszkodzenia związane z ESD nie są częste, co po części wynika z zastosowania obwodów ochronnych, a po części z przypadkowo sprzyjających warunków przechowywania i montażu. Ośmiela to amatorów do zupełnego lekceważenia niebezpieczeństwa. O ile zdarzające się sporadycznie przypadki uszkodzenia układów logicznych CMOS (raz na kilkadziesiąt kostek) można pominąć choćby ze względu na cenę traconych układów, o tyle nie należy lekceważyć szkodliwego wpływu ESD na precyzyjne układy analogowe. Kolejne rozładowania nie uszkodzą układu całkowicie, tylko na przykład zwiększą prądy upływu czy obniżą precyzję poniżej granicy podanej w katalogu. Powinni o tym pamiętać zwłaszcza konstruktorzy, bowiem o takie trudne do uchwycenia przypadki najłatwiej właśnie podczas eksperymentów i budowania prototypów.



Rys. 6

Aby radykalnie zmniejszyć prawdopodobieństwo uszkodzenia podczas pracy warto:

- uziemić grot lutownicy,
- pracować na metalowym, uziemionym blacie stołu
- przechowywać delikatne układy w antystatycznych szynach, torebkach lub wetknięte w czarną gąbkę
- nie nosić ubrań z tworzyw sztucznych (np. z polaru)

Przy pracy z najdelikatniejszymi i kosztownymi układami analogowymi i cyfrowymi warto też uziemić nie tylko lutownicę, masy i obudowy przyrządów pomiarowych, ale i własne ciało oraz zwiększyć wilgotność powietrza, np. z rozpylając w pomieszczeniu trochę wody.

Piotr Górecki