

Elektryczność statyczna w przemyśle elektronicznym

W artykule przedstawiono problemy zagrożeń związanych z wyładowaniami elektryczności statycznej (ESD), spotykane w przemyśle elektronicznym. Podano przykład stanowiska pracy spełniającego wymagania odnośnie ochrony przed wyładowaniami elektrostatycznymi.

Zjawisko ESD

Hasło „elektrostatyka“ nie-rozzerwalnie kojarzy się z greckim matematykiem i filozofem z VI w p.n.e. Talesem z Miletu, który stwierdził występowanie zjawiska przyciągania drobin różnych materiałów przez kawałek potartego bursztynu. Niestety, obecnie bardzo często jest to jedyne skojarzenie dotyczące elektrostatyki jakie ma większość absolwentów szkół średnich, a nawet i wyższych. Można tu zacytować zdanie jednego z uznanych w USA ekspertów w dziedzinie ochrony ESD w elektronice O. McKeevera: „Doświadczenie wskazuje, że dobrze wykształceni inżynierowie elektronicy i elektrycy, pracujący w przemyśle elektronicznym, mogą mieć zasadnicze problemy ze zrozumieniem występujących zjawisk elektrostatycznych. Na początku XXI wieku wielu inżynierów nie rozumie zasad elektrostatyki podanych przez Gilberta, Franklina czy Faradaya w XVI, XVIII czy XIX wieku“ [1]. Nie należy się zatem dziwić, że problem ochrony przed szkodliwym działaniem elektryczności statycznej, a zwłaszcza przed jej wyładowaniami - tzw. ESD (od ang. ElectroStatic Discharge) - był, a w Polsce jest nadal, niedoceniany.

O ile już w latach II wojny światowej stosowano ołowiane pojemniki dla diod mikrofalowych, umożliwiające ich bezpieczny (w sensie ESD) transport, to zlekceważenie tego problemu w ma-

szej produkcji elementów półprzewodnikowych doprowadziło, jak się ocenia, w jednym tylko 1982 r. w przemyśle USA do strat na poziomie 1 miliarda USD. Stanowiło to ok. 22% ogólnych start w przemyśle elektronicznym [2].

Zaobserwowany wzrost zagrożenia od ESD był naturalną konsekwencją rozwoju technologii elektronowej. Szczególnymi momentami było wprowadzenie technologii MOS oraz postępy w miniaturyzacji, polegające na zwiększeniu stopnia scalania. Wymienione czynniki spowodowały z jednej strony obniżenie maksymalnej wartości napięcia elektrostatycznego jakie mógł wytrzymać element oraz obniżenie poziomu maksymalnej mocy wprowadzanej do elementu podczas impulsu ESD, jaką mógł on wytrzymać bez obserwowalnych zmian własności.

Innym niebagatelnym czynnikiem pogłębiającym problem zagrożenia od ESD było coraz szersze wprowadzanie tworzyw sztucznych o bardzo dobrych właściwościach elektroizolacyjnych. Ładunek wprowadzony na elementy z takich materiałów podczas procesu technologicznego mógł utrzymywać się przez dłuższy czas, powodując wzrost zagrożenia podczas nagłego niekontrolowanego rozładowania.

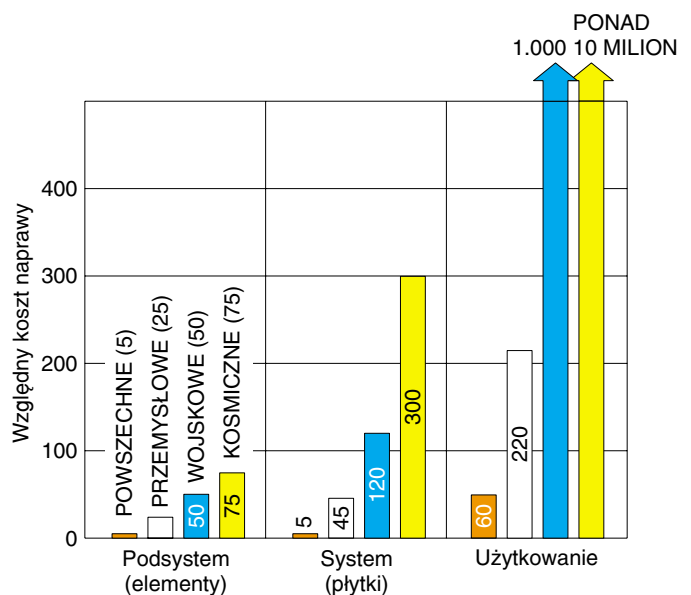
Poziom występujących zagrożeń ilustruje następujący przykład. Minimalne napięcie, przy którym człowiek odczuwa „ukłucie“ podczas wyładowania ESD jest na

poziomie 3..4 kV. Oznacza to, że dopiero wtedy, kiedy jego pojemność elektryczna naładowuje się do takiego właśnie poziomu, receptory bólu w opuszkach palców odbiorą podczas wyładowania nieprzyjemny sygnał. Pojemność elektryczna człowieka dorosłego, w zwykłym obuwiu na izolowanych podszewkach, jest na poziomie 150-300 pF. Zatem energia zgromadzona w takiej pojemności, poniżej poziomu odczuwania bólu przy wyładowaniu ESD, jest na poziomie 1 mJ. Warto tę wartość porównać z maksymalnymi dopuszczalnymi poziomami mocy impulsów ESD, jakie można doprowadzić bez zniszczenia do niechronionych elementów stosowanych we współczesnej elektronice [2]:

EPROM	0,5 mJ/s
CMOS	5,0 mJ/s
Schottky TTL	50 mJ/s

Przytoczone wyżej przykłady pokazują, że dopuszczalne moce są o jeden do trzech rzędów wielkości mniejsze od mocy impulsu powstającego podczas rozładowania ładunku zgromadzonego w pojemności związanej z ciałem człowieka. Jeśli wziąć pod uwagę, że podczas pracy na zwykłym stanowisku na ciele powstaje potencjał rzędu 1..3 kV, zaś podczas chodzenia po zwykłych wykładzinach potencjał na poziomie 10 kV, a nawet (przy niskich wilgotnościach powietrza) do 35 kV [3], to wszelki komentarz, dotyczący poziomu zagrożenia od ESD w takich warunkach, wydaje się zbędny.

Należy tu również podkreślić drugi z wymienionych czynników - szerokie stosowanie tworzyw sztucznych. Zastosowanie nieprzewodzących prądu wykładzin podłogowych, wykładzin powierzchni roboczych, ubrań, pojemników, narzędzi oraz innych elementów niezbędnych w technologii produkcji i montażu powodowało z jednej strony łatwą generację ładunku, podczas kontaktu czy pocierania przez inne elementy lub pracownika, z drugiej zaś utrzymywanie wysokich potencjałów przez dłuższy czas, podwyższając w zasadniczy sposób możliwość wystąpienia wyładowania elektrostatycznego.



Rys. 1.



Rys. 2.

Wpływ ESD na elementy i podzespoły

Uszkodzenia od ESD dzieją się na bezpośrednie, pośrednie i opóźnione. Pierwsze z nich są uszkodzeniami nieodwracalnymi i w największym uproszczeniu mogą być dwójakiego rodzaju: zależne od napięcia oraz zależne od energii wprowadzanej do obiektu podczas ESD. O ile jednak w technologii MOS problemy związane z elektrycznym przebicciem warstwy tlenku izolującego bramkę na skutek impulsu ESD wydawały się być dość naturalną przyczyną uszkodzeń, to bardzo duży udział uszkodzonych elementów wykonywanych w technologii bipolarnej (o wysokiej skali integracji), obserwowany w pierwszej połowie lat 70. przez firmę Westinghouse Adv. Tech. Lab. i oszacowany na 75% mógł budzić zdziwienie [1]. W drugim przypadku wyładowania ESD prowadziły na ogół do uszkodzeń związanych z wystąpieniem różnych lokalnych efektów cieplnych, takich jak odparowania metalizacji, lokalne przetopienia złączy i inne.

Uszkodzenia pośrednie są to różnego typu zakłócenia od ESD mogące spowodować fałszywe wyzwalanie układów logicznych. Uszkodzenia te są możliwe do usunięcia przez wykasowanie i ustawienie właściwego stanu.

Uszkodzenia opóźnione są zależne od czasu i polegają na tym, że pojedyncze wy-

ładowanie ESD nie powoduje widocznych zmian we właściwościach elementu. Następne, kolejne wyładowania prowadzą jednak po pewnym czasie do uszkodzenia nieodwracalnego. Występuje tu efekt kumulacji narażeń.

Należy podkreślić fakt, że o ile uszkodzenia bezpośrednie i pośrednie są łatwe do zidentyfikowania, to uszkodzenia opóźnione, z racji subtelnych zmian, mogą być trudne do wykrycia podczas rutynowej kontroli. Jest to o tyle istotne, że tego rodzaju uszkodzenia mogą prowadzić do istotnego skrócenia czasu życia elementu. Wpływa to na koszt ewentualnej wymiany elementu czy naprawy urządzenia oraz na image firmy produkującej takie elementy. Nabiera to szczególnego znaczenia w przypadku urządzeń o specjalnym przeznaczeniu (zdrowie, militaria, kosmos), gdzie koszt naprawy zainstalowanego urządzenia może być nieporównywalny z kosztami uszkodzonego elementu. Zilustrowano to na rys. 1.

Jak widać z rys. 1, szybka identyfikacja uszkodzenia od ESD oraz unikanie ESD w dalszych etapach procesu technologicznego obiektu finalnego ma fundamentalne znaczenie jeśli chodzi o koszty ewentualnej naprawy czy też niezawodność.

Jak widać z wyżej podanych wartości energii, podatność na uszkodzenia od ESD zależy od rodzaju ele-

mentu. Między innymi dla celów porównawczych wprowadzono pojęcie czułości napięciowej elementu na uszkodzenia od ESD. Ponieważ ładunek elektryczny może się gromadzić na różnych obiektach, takich jak człowiek, narzędzia, maszyny, sposób jego rozładowania oraz skutek, w rozumieniu uszkodzenia, będą zależne od elektrycznych właściwości układu rozładowania. Podstawowe układy rozładowania zostały zastąpione modelami [4][5]. W przypadku badań ESD z ciała człowieka stosuje się model HBM (od ang. Human Body Model), w którym pojemność ciała człowieka przyjmuje się równą 100 pF, zaś rezystancję rozładowania modeluje rezystor o wartości 1500 Ω . Czułość napięciowa jest zależna od modelu i jest to maksymalna wartość napięcia, przy której ESD (dla modelu HBM rozładowanie pojemności 100 pF naładowanej do tego napięcia przez rezystancję 1500 Ω w obwodzie zawierającym badany element) nie prowadzi do bezpośredniego uszkodzenia badanego elementu [6]. Typowe wartości czułości napięciowej dla modelu HBM przedstawiono poniżej.

Układy specjalne	10 - 100 V
MOS - VLSI (przed 1990 r.)	100 - 300 V
VLSI (współczesne)	1000 - 3000 V
Bipolarne (przed 1990 r.)	400 - 6000 V
Bipolarne (współczesne)	2000 - 8000 V
Bipolarne, mocy	7000 - 25000 V
Rezystory warstwowe	1000 - 5000 V

Jak można wywnioskować z powyższych danych, większość współczesnych elementów posiada zintegrowane z układem podstawowym układy zabezpieczające, a ściślej obniżające czułość napięciową na uszkodzenia od ESD. Tak jest w istocie, ponieważ czułość elementów niechronionych, wykonanych w technologiach MOS, CMOS jest na ogół na poziomie 30 - 200 V.

Z problemem czułości napięciowej związane są pewne mity. Jednym z nich by-

ła opinia, że układy MOS-VLSI czy też CMOS uodporniają się na ESD po zamontowaniu ich na płytce drukowanej. Mit ten wynika z faktu, że układy pracy zawierają zwykle inne elementy „blokujące“ element najczulszy, obniżając czułość całego układu czy podzespołu. Należy podkreślić fakt, że ESD może mieć również destrukcyjny wpływ na elementy pasywne, takie jak rezystory czy kondensatory cienkowarstwowe.

Kontrola i ochrona przed ESD

Podjmując działania ochrony elementów i podzespołów od ESD, należy wziąć pod uwagę, że około 50-60% uszkodzeń wynika z kontaktu elementu z naładowanym obiektem, 30-40% z kontaktu naładowanego elementu z uziemionym obiektem i około 10% z innych przyczyn, jak np. ESD od ładunku indukowanego silnymi polami elektrycznymi.

Aspekt ekonomiczny zagadnienia ochrony zależy od rodzaju stosowanej technologii oraz czułości elementów i może wyglądać jak w przypadku firmy Western Electric, w której nakłady na ochronę od ESD zwróciły się w 2300% [1].

Podjęcie działań ochrony od ESD uzależnione jest głównie od wiedzy decydentów, niekiedy opartej na następujących fałszywych przesłankach [1]:

- elementy przewodzące nie są zagrożone przez ESD;
- materiały oznaczone jako „antystatyczne“ nie generują ładunku;
- problem uszkodzeń od ESD dotyczy jedynie elementów w technologii MOS;
- podwyższenie wilgotności powietrza powyżej 40% likwiduje problem;
- jonizacja powietrza likwiduje problem;
- nie ma żadnych problemów z ESD.

Ochrona przed ESD obejmuje obniżanie potencjałów elektrostatycznych w środowisku zawierającym czułe elementy, jak również ograniczanie prądów rozładowania ESD. Kontrola i ochrona przed ESD musi łączyć w sobie:



Rys. 3.

- edukację personelu;
- bezpieczne (w sensie ESD) opakowania;
- bezpieczne (w sensie ESD) miejsce pracy.

Podstawą ochrony przed ESD jest wprowadzanie elementów czułych na ESD tzw. ESDS (od ang. ElectroStatic Discharge Sensitive

device) oraz ich wyprowadzanie ze strefy chronionej tzw. EPA (od ang. Electrostatically Protected Area) wtedy i tylko wtedy, jeśli znajdują się w zabezpieczających je opakowaniach. Opakowania winny spełniać określone wymagania zarówno w zakresie własno-

ci elektrycznych, jak i oznakowania.

Manipulowanie elementami czułymi na ESD dopuszcza się jedynie w obszarze EPA, w warunkach, kiedy urządzenie, personel, płaszczyzna robocza, jak i wszelkie elementy na stanowisku pracy posiadają ten sam potencjał równy potencjałowi ziemi. W obszarze EPA zabronione jest stosowanie oraz wprowadzanie jakichkolwiek źródeł pól elektrycznych. Należy pamiętać, że źródłem takim może być element, który łatwo przeoczyć np. zwykły długopis.

Uproszczony schemat obszaru EPA, ilustrujący podane wyżej zasady ochrony przed ESD, przedstawiono na **rys. 2**. Należy zwrócić uwagę, że wszystkie elementy w obszarze EPA dołączone są do uziemienia przez rezystor ograniczający o wartości rzędu 1 MΩ. Strefa taka musi być odpowiednio oznakowana, a wstęp do niej posiada jedynie personel

w ubraniu spełniającym stosowne wymagania. Szczegółowe wymagania dotyczące strefy chronionej EPA podano w normach [6, 7].

Oprócz wymagań natury elektrycznej, wyposażenie współczesnego stanowiska pracy gwarantującego wyeliminowanie strat spowodowanych ESD musi spełniać wiele innych warunków. Wśród nich można wymienić warunki dotyczące ergonomii, modularności czy kompleksowości rozwiązania problemu ESD.

Takie właściwości ma linia firmy TRESTON Sp. z o.o. Ponieważ proces technologiczny musi się odbywać w warunkach eliminujących ESD, materiały stosowane na stanowisku pracy, takie jak: płaszczyzna robocza, półki, pojemniki, wózki itp. winny w kontrolowany sposób (przez rezystancję ograniczającą) rozpraszać pojawiający się czy generowany ładunek elektryczny. Oprócz stanowiska również pra-

cujący na nim operator winien być uziemiony. Łączy się to z koniecznością zastosowania opasek nadgarstkowych (rys. 3), krzesła (rys. 4) oraz opasek na obuwie o właściwościach rozpraszających. Doświadczenie pokazuje, że jedynie zastosowanie zintegrowanego systemu kontroli rozpraszania ładunku pozwala bezpiecznie prowadzić operacje w obszarze EPA i uniknąć niszczącego wpływu ESD.

Efektywność pracy w zakresie montażu, testowania czy serwisu wymaga właściwego zaprojektowania stanowiska pracy również pod względem ergonomicznym. Liczba operacji możliwych do wykonania na stanowisku pracy podczas jednej zmiany jest zatem bardzo istotnie ograniczona, aby wymiary stanowiska były możliwie optymalnie dobrane do potrzeb operatora. Wysokość powierzchni pracy, półek, wózków, jak i innych elementów wyposażenia winna być dobrana tak, by współgrała z fizyczną budową operatora. Możliwość łatwego i szybkiego przystosowania stanowiska pracy do wymagań operatora jest bardzo istotna w przypadku pracy zmianowej, zwłaszcza gdy budowa fizyczna kolejnego operatora odbiega znacznie od pracującego na wcześniejszej zmianie. Między innymi pod tym kątem zostały opracowane stanowiska pracy firmy TRESTON, w których przewidziano ręczną

(za pomocą dźwigni) lub za pomocą napędu elektrycznego regulację wysokości. Podobnie pojemniki na najbardziej istotne komponenty i akcesoria winny mieć możliwość łatwej regulacji ustawienia.

Bezpieczne stanowiska pracy firmy TRESTON odpowiadają międzynarodowym przepisom ochrony od ESD, określonych w normie europejskiej EN 61340-5-1, tłumaczonej obecnie na język polski [7]. Firma TRESTON znajduje się w rejestrze firm odpowiadających wymaganiom ISO 9001, zaś produkowane w niej wyposażenie produkcyjne posiada odpowiedni znak bezpieczeństwa (TUV) [8].

Literatura

- [1] O.J. McAteer, Electrostatic Discharge Control, McGraw-Hill Publishing Comp. N.Y. (1989).
- [2] G.S.P. Castle, Electrostatic problems in the electronics industry. Electrostatics Summer School. Dept. Of Electrica Eng. Univ. Of Southampton. Sept. 1988.
- [3] A.G. Bailey, ESD - The Problems it causes in Electronics. Industrial Electrostatics, Hazards., Southampton, 1990.
- [4] DOD Standard 1686 (1980) lub IEC 61340-3-1: Electrostatics - Part 3-1: Electrostatic discharge simulation - Human body model (HBM) - Component testing (w przygotowaniu)

- [5] IEC 61340-3-1: Electrostatics - Part 3-2: Electrostatic discharge simulation - Machine model (MM) - Component testing (w przygotowaniu)
- [6] PN-EN100015-1 Ochrona przyrządów czułych na wyładowania elektrostatyczne. Wymagania ogólne. (1998).

- [7] IEC 61340-5-1 lub ekwiwalent PN-IEC/TR 61340-5-1, Ochrona przed elektrycznością statyczną przyrządów elektronicznych. Wymagania ogólne. (w przygotowaniu)
- [8] TRESTON Sp. z o.o. Informacja handlowa: www.treston.com, e-mail: treston@pol.pl



Rys. 4.