

Elektrostatický výboj a jeho vliv na spolehlivost integrovaných obvodů (1. část)

Pavel Horský

Odolnost proti vlivu elektrostatického výboje (ESD) je u integrovaných obvodů základním požadavkem vedoucím k dosažení jejich vysoké spolehlivosti. V článku je přehled modelování vlivu elektrostatického výboje, dále jsou zde uvedena poškození, která může způsobit, příští číslo bude obsahovat opatření při konstrukci integrovaného obvodu, jež mohou být použita ke zvýšení jeho odolnosti proti vlivu elektrostatického výboje.

Robustness of integrated circuits against electrostatic discharge (ESD) is one of the key requirements to achieve their high reliability. In this paper an overview of ESD modeling for testing of integrated circuits is presented. ESD caused failures and precautions which could be used to improve ESD robustness of integrated circuits are discussed.

1. Úvod

Rozvoj automatizace a výpočetní techniky je umožněn pokroky v oblasti integrovaných obvodů (*Integrated Circuits – IC*), zvláště technologie MOS. Stálému zmenšování rozměrů prvků v IO je v literatuře věnována dostatečná pozornost, ale málo je mezi technickou veřejností známo, že je nutné na všech úrovních, včetně úpravy zapojení již při návrhu obvodů, řešit i jejich odolnost proti vlivu statické elektřiny. Tato problematika a vliv výsledků jejího řešení na spolehlivost elektronických zařízení jsou stále více aktuální. Je zapotřebí ji řešit nejen při konstrukci finálních zařízení, ale i při navrhování integrovaných obvodů. Zejména moderní submikronové součástky jsou velmi citlivé na elektrostatické výboje a vyžadují dobrou ochranu všech vývodů proti nim. Pro dosažení vysoké spolehlivosti IC je nutné porozumět tomu, jak vzniká poškození, a dělat vhodné testy. V článku jsou popsány způsoby a mechanismy, kterými působí elektrostatický výboj na součástky, a výsledek tohoto působení. Všechny obvody CMOS, u nichž to funkce umožňuje, mají vestavěny ochranné prvky, které by měly případný proud vyvolaný ESD bezpečně odvést. Přesto je při manipulaci s IC zapotřebí dodržovat pravidla zacházení s elektrostaticky citlivými součástkami, jak na to upozorňuje symbol na obr. 1.

2. Co je to elektrostatický výboj

Elektrostatický výboj (*electrostatic discharge, ESD*) vznikne, dojde-li k postupnému vytvoření elektrostatického napětí mezi předmětem a jeho okolím a poté k spontánnímu výboji v podobě impulzu elektrického proudu. Ve velmi krátké době přeskočí elektrický výboj a vznikne vysoké napětí a velký proud. Jestliže je místem takového výboje integrovaný obvod, může být poškozen či zničen.

Podle původu lze zdroje ESD dělit na dvě skupiny:

- přírodní zdroje,
 - zdroje uměle vytvořené lidskou činností.
- Obecně se rozeznávají dva způsoby vzniku elektrostatického výboje:
- elektrostatický výboj mezi nabitým předmětem (např. lidským tělem) a uzemněným obvodem (např. když člověk manipuluje s elektrickým zařízením nebo integrovaným obvodem),
 - elektrostatický výboj mezi nabitým obvodem a uzemněným zařízením (např. při strojové manipulaci s integrovanými obvody, při dotyku testovacím nástrojem apod.).

V tab. 1 jsou uvedeny příklady velikosti elektrostatického napětí při běžné práci v laboratoři a jeho závislost na vlhkosti prostředí [1]. V praxi je elektrostatický výboj většinou spojen s lidskou interakcí.

Následkem elektrostatického výboje může být funkční či parametrické poškození obvodu nebo i latentní poškození, které nelze zjistit testovacími přístroji, ale projeví se až při následném použití v praxi (po čase). ESD tak snižuje spolehlivost integrovaných obvodů. Výrobci integrovaných obvodů testují citlivost na ESD každého nového výrobku jako součást standardního procesu zavádění nových produktů do výroby v souladu s požadavky jejich zákazníků.

3. Testovací modely ESD

Výrobci a uživatelé integrovaných obvodů vyvinuli metody testování ESD na základě příkladů elektrostatických výbojů z praxe. *Human Body Model* (HBM) představuje manipulaci člověka s IC a *Charged Device Model* (CDM) představuje automatickou manipulaci s IC. Test ESD má simulovat různé známky namáhání [1].

3.1 Human Body Model

Human Body Model (HBM; model lidského těla) je nejběžněji používaný model k charakterizování citlivosti IC na poškození působením ESD. Tento model využívá simulaci elektrostatického výboje, který se může objevit, jestliže se lidské tělo dotkne elektronického zařízení. Test představuje výboj od stojícího člověka přes jeho prst. Byl stanoven normou MIL STD-883 (*Test Method Standard – Microcircuits*) jako metoda 3015.X. Tato norma definuje proudovou křivku pro výboj



Obr. 1. Symbol upozorňující na potřebu používat opatření pro zacházení s elektrostaticky citlivými součástkami

z kondenzátoru o kapacitě 100 pF přes rezistor o odporu 1,5 k Ω . Používané hodnoty elektrického napětí jsou obvykle mezi 1 000 V až 8 000 V, v závislosti na typu použití IC.

3.2 Machine Model

Machine model (model strojního zařízení) byl vyvinut v devadesátých letech minulého století v Japonsku jako nejhorší případ modelu lidského těla. Tento model představuje výboj od sedícího pracovníka přes kovový dobře vodivý nástroj a je modelován obvodem RC ($C = 200$ pF, $R = 0$ Ω). Představuje nízkaimpedanční výboj s velkým proudem, který pro malou impedanci zátěže vlivem parazitní sériové indukčnosti osciluje. Vybíjecí obvod je podobný jako pro model lidského těla. Poškození způsobená při testování modelem strojního zařízení jsou většinou podobná jako poškození způsobená testy modelem

lidského těla, ale nastávají již při daleko nižších úrovních napětích.

3.3 Charged Device Model

Charged Device Model (CDM; model elektrostaticky nabitě součástky) má hlavní význam při automatické manipulaci s IC. Má simulovat výboj z nabitého integrovaného obvodu jedním z jeho vývodů do nízkoimpedančního uzemnění. Simuluje reálné případy ESD v průběhu automatické manipulace, značení, zvedání a umístování.

4. Typy poškození

Vlivem elektrostatického výboje se vytvářejí různé typy poškození [2]. Nejběžnější selhání integrovaného obvodu vlivem elektrostatického výboje se projevuje jako zvětšený zbytkový proud (*leakage*) nebo zkrat odporového charakteru některých vstupních a výstupních vývodů (pinů). Ostatní běžná poškození jsou např. nadměrný napájecí proud, funkční poruchy nebo občas i odpojené vývody. Poškozené vývody způsobující selhání IC mohou být někdy identifikovány měřením voltampérových charakteristik jednotlivých vývodů poškozeného IC. Poškození uvnitř IC lze však velmi obtížně zjistit měřením charakteristik jednotlivých vývodů.

Následky poškození IC vlivem elektrostatického výboje jsou obvykle fatální a jedinou možností nápravy je vyměnit celý poškozený IC. Přetížení vlivem elektrostatického výboje může někdy způsobit jen skryté vady nebo zhoršení parametrů, jako např. větší svodové proudy, které nejsou indikovány během měření parametrů a funkčnosti integrovaného obvodu po přetížení způsobeném elektrostatickým výbojem. Tyto skryté vady mohou ovlivnit životnost zařízení a jeho spolehlivost, proto jsou znalosti o nich velmi důležité.

Poškození IC lze zařadit do tří kategorií:

- roztavení vodivých spojů nebo rezistorů,
- poškození polovodičových přechodů nebo kontaktů,
- poškození dielektrické izolace.

Dále se rozlišuje poškození podle toho, jaký mechanismus je způsobil:

- poškození vlivem velkého proudu (roztavení vodivých spojů nebo rezistorů, roztavení polovodičových přechodů, poškození kontaktů mezi polovodičem a spoji),
- poškození vlivem velkého napětí (průraz dielektrické izolace).

Tab. 1. Elektrostatické napětí jako funkce relativní vlhkosti

Elektrostatické napětí (kV)	20 % RH	80 % RH
Chůze po podlahové krytině z PVC	5	3
Chůze po syntetickém koberci	15	7,5
Vyjmutí IO (DIP) z plastové přepravy	0,7	0,4
Zdvihnutí plastové tašky	20	0,6
Posun polystyrénové krabice po koberci	18	1,5
Přiložení odsávačky cínu	8	1,0
Použití mrazicího spreje na plošný spoj	15	5,0

4.1 Roztavení vodivých spojů nebo rezistorů

K roztavení vodiče nebo rezistoru může dojít u tenkých kovových spojů, tenkovrstvých nebo tlustovrstvých rezistorů a křemíkových polykrystalických rezistorů nebo spojů. Tento druh poškození IC lze nejnáze pochopit. Vlivem velkého proudu, který vzniká z ESD a prochází velmi tenkými spoji nebo rezistory na IC, se tyto vodiče působením Jouleova tepla ohřívají. Je-li překročena teplota tavení křemíku nebo vodiče, dochází k jeho poškození.

4.2 Poškození polovodičových přechodů nebo kontaktů

K poškození polovodičových přechodů nebo kontaktů dochází, jestliže se mělký polovodičový přechod PN (např. přechod emitor-báze u bipolárních tranzistorů nebo přechod *drain-source* u tranzistorů MOS) dostane do lavinového průrazu. Proud prudce naroste a následně nastane destruktivní průraz. Sled událostí, který většinou způsobí poškození polovodičového přechodu a může vést k poškození kontaktů, je takovýto:

- napětí na závěrně polarizovaném přechodu PN překročí napětí lavinového průrazu,
- druhý průraz může nastat tehdy, ohřeje-li se vlivem průchodu proudu přechod PN na teplotu, při níž tepelná generace nosičů náboje překročí generaci nosičů náboje způsobenou lavinovým průrazem,
- místem druhého průrazu protéká velmi velký proud a způsobuje velmi lokální zahřívání materiálu,
- lokální zahřívání urychluje termální generaci nosičů náboje a to způsobuje další lokální růst proudu, tedy kladnou zpětnou vazbu; vyvrcholením je roztavení křemíku, když teplota překročí 1 415 °C,
- je-li teplota dostatečná k roztavení kovového vodiče v oblasti kontaktu mezi kovovým vodičem a křemíkem, elektrické pole může způsobit, že se roztavený kov dostane do oblastí polovodičového pře-

chodu a způsobí odporový zkrat polovodičového přechodu.

Po skončení elektrostatického výboje, když se materiál ochladí a opět ztuhne, je profil dotace přechodu PN poškozen, protože během roztavení materiálu se promíchaly legovací látky. Přetavení navíc způsobí změny krystalické mřížky křemíku. Změny v profilu dotací přechodu PN současně se změnami krystalické mřížky způsobí snížení závěrného napětí přechodu PN. V závislosti na vážnosti poškození přechodu PN se mohou objevit různé projevy poškození IC, od mírného zvětšení svodového proudu, které nemá vliv na funkčnost obvodu, až po výrazné zvětšení proudu, které má za následek nefunkčnost IC. Pokud se kov v přilehlé oblasti kontaktu mezi polovodičem a spojem roztavil a migroval do oblastí polovodičového přechodu, vzniká odporový zkrat, který má většinou za následek nefunkčnost IC.

4.3 Průraz dielektrika

K poškození dielektrické izolace dochází, když napětí na dielektrické izolaci (např. z oxidu křemíku nebo nitridu křemíku) během elektrostatického výboje překročí dielektrickou pevnost a nastane průraz. Tento jev vzniká především u výboje, jehož velmi rychlá nabíjezná hrana proudu a jeho velmi vysoká hodnota způsobí vznik vysokého napětí uvnitř IC.

Sled událostí, který způsobí průraz dielektrika, je takovýto:

- závěrné napětí dielektrika je překročeno (obvykle se to projeví na submikronové části na hraně, rohu, stupni nebo na dielektrické vrstvě),
- tímto bodem proteče relativně velký proud, který vyvolá lokální přehřátí,
- v tomto místě se vytvoří přetavený amorfní nebo polykrystalický křemík.

(dokončení v příštím čísle)
Dr. Ing. Pavel Horský,
ON Design Czech, s. r. o.

www.automa.cz

**nové webové stránky
s vylepšeným vyhledávačem
a možností stahovat články v PDF**

