

А. Э. САДЫКОВ, М. Н. ИМАНҚҰЛ

## АСА ЖОГАРЫ ЖИЛІКТІ ЭЛЕКТР-МАГНИТТІК ИМПУЛЬСТЕРДІҢ ӘСЕРЛЕРИНДЕ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҮРҮЛҒЫЛАРДЫҢ ИСТЕН ШЫҒУЫ

Аса жоғары жиіліктік электр-магниттік импульстерінің әсерінде электрондық құрылғылардың істен шығу түрлері, сонымен катар жартылай өткізгіштік элементтердегі тесілу механизмдері қарастырылған. Аса жоғары жиіліктік электр-магниттік импульстердің ықпалдарының әсерінен пайда болған «электрлік тосқауылдау» эффектісі мен апаттық істен шығулары келтірілген. Элементтердің жылдамдатылған істен шығуларынан алдын-ала сақтандыру үшін шара ретінде терможаттығу белгіленген.

Аса жоғары жиілікті (microwave) электр-магниттік өрісінде материалдардың анықтаушы қасиеттері өзгеріске ұшырайды. Беттік эффект ықпалынан металдар мен қорытпалардың өткізгіштік қасиеттері тәмендейді; поляризация құбылышының нәтижесінде диэлектрлік өтімділік өзгереді, соның нәтижесінде диэлектрикте шығындар көбейеді; гиромагниттік эффекттен ферриттердің магниттік өтімділігі өзгереді.

Мысалы, жерге қосу қыска сымының белсенді (active) кедергісі 1 кГц жиілікте 0,01 Ом, ал беттік эффект әсерінен ол 1 ГГц жиілікте 0,1 Ом-ға дейін өседі. Осыдан басқа сымда 5 Ом-ға тең индуктивтік кедергі пайда болады. Жиіліктің жұмыс диапазонының жоғары шекарасына жақындаған кезде, электр тізбегінің элементтерінің жұмысы құшті өзгереді [1].

Аса жоғары жиіліктік (АЖЖ) үлкен қуатты электромагниттік импульстер (ЭМИ) электрондық құрылғылардың қорғаныс қабілеті тәмен түйіндеріне (түйіспелеріне, contact) әсер еткенде оны ешқандай тікелей түйіспесіз жұмыс істейу режимінен шығара алады. Қуатты импульс әсерінен істен шығып қалған электрондық құрылғы келесі істен шығуларға ие болу мүмкін:

- апаттық (жөндеуге келмейтін) істен шығу (жұмыс істейу қабілетінің қайтымсыз жоғалуы);

- уақытша (қалпына келетін) істен шығу: жұмыс істейу қабілетін қалпына келтірген кезде электрондық құрылғының параметрлері тәмендейді (нашарлайды) немесе қалпына келеді, бірақ электрондық құрылғының уақытша істен шығу ұзақтығы милисекундтан ондаған минуттарға дейін созыла алады;

- функционалды істен шығу, бұл жағдайда сұлбалар мен атқаруышы құрылғылар жалған жұмыс істейу мүмкін.

Электромагниттік импульс жартылай өткізгіштік элементтерінде қорек көзі тізбектері, жалғаушы (қосатын) кабельдер, корпустың технологиялық санылауары арқылы әсер етеді. Сонымен

катар, жартылай өткізгіштік элементтеріне қорек көзі тізбектері, қосатын кабельдер, корпустың (қаптаманың) технологиялық санылауары арқылы әсер етеді. Жартылай өткізгіштік компоненттерде бірінші эффектілер пайда болады, бұл жартылай өткізгіштік компоненттердің (элементтердің) көлденен қимасы арқылы токтың орнықсыз таралуы, көп жағдайда ол тасқындық және туннелдік тесілі өтуімен және бекітпе астындағы (подзатворный) диэлектриктің тесілуімен анықталады. Екінші кезектегі эффектілер, олар жартылай өткізгіштік элементтердің «электрлік тосқауылдау (бұғаттау, blocking)» эффектісіне әкеleді, бұл эффект қорек көзі тізбегінде, кіріс және шығыс тізбектерінде токтың күрт артуына әкеleді. Бұл жөндеуге келмейтін істен шығу болып саналады.

Келтірілген тесілу механизмдеріне келесі кернеулер тиісті:

- туннелді механизм;
- $U_T > 7B$  – тасқындық механизм;
- $5B < U_T < 7B$  – аралас механизм;
- $U_T = 5...8B$  – бекітпе астындағы (подзатворный) диэлектриктің тесілу механизмі.

Туннелді тесілудің кернеуі келесі өрнектен анықталады:

$$U_{TT} = \varepsilon \varepsilon_0 E_{TT}^2 \left[ (1/N_a + 1/N_d)/2q \right] - \varphi_T, \quad (1)$$

мұндағы  $\varepsilon$  – диэлектрлік өтімділік;  $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрлік тұрақтысы;  $q$  – электронның заряды;  $E_{TT}$  – электрлік өрісінің шектік (аумалы, critical) кернеулігі, ол туннелді (tunnel) тесілуге алып келеді;  $N_a$  – акцепторлардың концентрациясы;  $N_d$  – донорлардың концентрациясы;  $\varphi_T$  – жылулық потенциал.

$U_{T,cr}$  тасқындық тесілудің кернеу мөлшері р-p-ауысуының пішініне (түріне) тәуелді және осылай анықталады:

$$U_{TAC.T} = \varepsilon \varepsilon_0 E_{TAC.T}^2 N^{-0.75} d_0 / 2q, \quad (2)$$

мұндағы  $E_{TAC.T}$  - электр өрісінің шектік кернеулігі, ол тасқындық тесілуге алып келеді;  $N$  - қоспалар концентрациясы;  $q$  - электронның заряды;  $d_0$  - диэлектриктің қалындығы.

Бекітпе астындағы диэлектриктің тесілуі  $U_{BAD.T}$  кернеуімен сипатталады, ол келесі формуламен анықталады:

$$U_{BAD.T} = E_{BAD.T} \cdot d_0, \quad (3)$$

мұндағы  $E_{BAD.T}$  - электр өрісінің шектік кернеулігі, ол бекітпе астындағы диэлектриктің тесілуіне алып келеді;  $d_0$  - диэлектриктің қалындығы.

Екінші кезектегі эффектілер пайда болған кезде, жартылай өткізгіштік компоненттердің жылулық екінші кезектегі тесілуі және «электрлік тосқауылдау (blocking)» болады. Жылулық екінші кезектегі тесілу кезінде аз уақыт ішінде (1...10 мкс) активті (белсенді) қолемде недөүір жылу энергиясы бөлінеді, соның нәтижесінде жартылай өткізгіштік компоненттердің жұмысына ақаулану (закымдалу, damage) тигізіледі [2].

Жылулық энергияның бөлінуі өсерінен жартылай өткізгіштік элементтердің құрылымын киарататын қуат мөлшері осылай анықталады:

$$P_J = A(1/\tau_H) + B(1/\tau_H^{0.5}) + C, \quad (4)$$

мұндағы  $\tau_H$  - аса жоғары жиіліктік импульстің үзактығы;  $A, B, C$  - жылу өткізуілік тендеуінің шешілудегі коэффициенттер, олар жартылай өткізгіштің құрылымының геометриясына, оның пайдалы ауданына, жылу сыйымдылығына, материалдың жылу өткізгіштігіне, закымдалудың температурасына, жылудың сейілту талаптарына және өсер ететін импульстің қасиетіне (төртбұрышты және басқа да пішінді) тәуелді.

Жылу өткізгіштік - өзара өрекетке түйісітін бөлшектердің молекула мен атомдардың қатынасы кезінде жылу энергиясымен алмасу процесі.

Айта кететін мәселе, металл-тотық-жартылай өткізгіш (MOS) текті технологиясында құрылғы (жабдық) электр және жылу энергиясын аз пайдаланып (қабылдап) бөледі, бұл жүйенің жалпы сенімділігіне өсерін тигізеді.

ЭМИ - шапшаң, өрекетті цифрлық құрылғылардың негізгі белгісі болып саналады. Шапшаң өрекетті цифрлық сұлбалардың құрастыруышлары, көп жағдайда, танылмайтын деңгейге дейін бұрмаланған цифрлық сигналдармен жұмыс жасайды.

АЖЖ ЭМИ жартылай өткізгіштік құрылғыларына (аспаптарына) өсер еткенде, интегралдық микросхемаларға, құрылғы ішінде екінші кезектегі электрондардың резонанстағы (резонанс жағдайындағы) қолеммен өрекеттескенде «ішкі АЖЖ ЭМИ пайда болады. Ол токтың қорек көзі тізбегінде және кіріс және шығыс тізбектерінде күрт артуына себеп болады. Үлкен мәндегі токтың өтүі өсерінен оқшаулама (isolation) жануы мүмкін немесе ішкі жартылай өткізгіштік құрылымы тесілуі мүмкін (бұл құбылыс «электрлік тосқауылдау» деген атқа ие). Жартылай өткізгіштік элементтердің қалыпты жұмыс істеу қабилеттілігі осындай эффект пайда болса бұзылады және эффекттің өсері аяқталғаннан кейін қайтадан қалпына келмейді.

Жартылай өткізгіштік құрылғыларында «электрлік тосқауылдау» эффектісінен зақым пайда болады. Ол мына формуламен анықталады:

$$E_{A.ET} = \frac{dI}{dt}, \quad (5)$$

мұндағы  $E_{A.ET}$  - өсер ететін импульстің жылдамдығының шебінің (фронттының) үдей түсін немесе азаюын сипаттайтын, яғни өсер ететін импульстің аумалы (critical) жылдамдығымен анықталады (дәлелдеп айтқанда, импульс шебінің үдей түсіү немесе азаюымен сипатталады).

Жоғарыда айтып кеткен жартылай өткізгіштік элементтерде пайда болатын эффектілерді (құбылыштарды, өсерлерді) ескере келе, электрондық құрылғыға АЖЖ ЭМИ өсер еткенде қалпына келмейтін істен шығудың комплекстік қорсеткішін таба аламыз:

$$E = \max [E_{TT}; E_{TAC.T}; E_{BAD.T}; E_{A.ET}]. \quad (6)$$

Сонымен, жартылай өткізгіштік элементтердегі АЖЖ ЭМИ өсер еткенде, қайтадан қалпы келмейтін (апаттық) істен шығулардың пайда болуындағы себеп жылулық екінші ретті тесілу және «бұғаттау (тосқауылдау) эффектісі». Олар импульстік аумалы  $I_A$  токтың жылдамдығының үлғаюымен анықталады.

Аталған критерийлер электрондық құрылғыны қалпына келмейтін істен шығулардың қорсеткіштерін анықтайтын. Олар радиоэлектрондық құрылғыларының қорғаныс деңгейінің бағалау әдістемесінде қолданылуы мүмкін. Сонымен қатар сұлбаны таңдаған кезде, радиоэлектрондық құрылғыларын АЖЖ ЭМИ өсерінен қорғау үшін техникалық өндеуді жасаған кезде қолданылады.

Компьютерлік техникада қолданылатын тактылық синхронизациялау генераторларда жедел істен шығуларды алдын алу үшін оларды шекті рұқсаттық электрлік режимінде және қоршаған ортасын жоғары рұқсат етілген температурасында үзак термоэлектрлі жаттығулардан өткізеді. Бұл генератордың сенімділігін арттырады. Шекті рұқсаттық жоғары температурада жұмысқа пайдалану ескіру процесін үдетеңді және кремнийлік электронды сұлбалардың тездете істен шығуға ие болуына өсер етеді. Термоэлектрожаттығудан кейін құрылғы термоциклдеуден өткізіледі, яғни бірінен соң бірі температуралы құрт жоғарыла-тып, оны курт тәмендету. Бұл сапасыз дәнекерленген элементтерді үзіп тастайды. Жедел сынақтың соңғы кезінде әр бөлшек жоғары импульстік кернеуінің бірнеше циклінде сыналады, содан кейін ол дайын бөлшектердің функционалды параметрлері бойынша тексеруден өтеді.

Осы жедел сынақтан өткен сенімділікті бөлшектерге бұл өсер етегін ықпалдар зиян келтірмейді. Осындай сынақтан өтпеген бөлшектердің істен шығу қарқындылығы жоғары және оларды қолданысқа жиберген кезде үлкен көлемдегі шығындар болуы мүмкін. Осы түрдегі жедел сынақтарды барлық жартылай өткізгіш аспаптарды шығарған кезде қолданады. Қоңтеген сенімсіз бүйымдарды (жұмысқа пайдалану кезінде жедел істен шығуға бейімделген) калыпты жағдайда қолданған кезде, істен шығады, егер оларды қысқа уақытқа шектік рұқсаттық режимінде қолданса.

## ӘДЕБИЕТ

1. Джонсон, Говард В., Грэхем, Мартин. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии / Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 624 с.

2. Бородай П.Н., Мырова Л.О. Обоснование методов защиты телекоммуникационных систем с учетом воздействия источников сверхширокополосных электромагнитных излучений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. Т. 4, №1-3. С. 124-125.

## Резюме

Рассмотрены виды отказов электронных устройств, а также механизмы пробоя в полупроводниковых элементах при воздействии электромагнитных импульсов сверхвысокой частоты. Приведены эффекты «электрического блокирования» и катастрофического отказа при влиянии электромагнитных импульсов сверхвысокой частоты. Отмечена термотренировка как мера предупреждения ускоренного отказа элементов.

## Summary

Types of failures of an electronic equipment, and mechanisms of breakdowns in semi-conductor elements under the influence of electro-magnetic pulse of microwave were observed. The effect of “an electrical blocking” and crashing failure under. The influence of electro-magnetic pulses of a microwave were given. Thermal-training us a wag of a notification of a acceleration element failure were marked.

Поступила 4.11.08г.