

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.382:678.019.3

ЗАВИСИМОСТЬ ОБРАТИМЫХ И НЕОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ОТ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

© 2023 г. В. Г. Усыченко^а, Л. Н. Сорокин^{б, *}, А. А. Сасункевич^с

^а АО «Светлана-Электронприбор»,

просп. Энгельса, 27, лит. С, Санкт-Петербург, 194156 Российская Федерация

^б Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН,
14-я линия Васильевского острова, 39, Санкт-Петербург, 199178 Российская Федерация

^с Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198 Российская Федерация

*E-mail: sorokinln@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022 г.

После доработки 01.04.2023 г.

Принята к публикации 07.04.2023 г.

Проанализированы механизмы обратимых и необратимых отказов, происходящих у полупроводниковых СВЧ-приборов, микросхем и микропроцессоров при воздействии мощных электромагнитных импульсов, следующих как одиночно, так и периодически. Показано, что у микропроцессоров отказы обоих видов порождаются электротепловыми неустойчивостями, которые развиваются в пренебрежимо малых объемах прибора. Объяснены зависимости пороговой энергии отказов от амплитуды, длительности и частоты следования импульсов. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S0033849423120197, EDN: YDGBZL

ВВЕДЕНИЕ

Безотказность работы современных технических устройств, находящихся под воздействием мощных импульсных электромагнитных помех, зависит в основном от стойкости полупроводниковых приборов (ПП), находящихся в их составе. Давно установлено [1, 2], что стойкость отдельных ПП (один ПП на одном полупроводниковом кристалле, например, диод или транзистор) определяется количеством рассеиваемой в них электрической мощности импульса, превышение порогового значения которой приводит к тепловому разрушению — необратимому (катастрофическому) отказу. Мощность импульсной помехи столь велика, что мощность сигналов, циркулирующих в самом ПП, не имеет значения. Созданы различные и взаимно непротиворечивые аналитические модели [3–7] теплового нагрева и разрушения отдельных ПП при воздействии одиночных прямоугольных (или приведенных к прямоугольному виду) электрических импульсов разной длительности τ . Энергия импульса выделяется в активной области ПП, называемой источником тепла: обычно это область, содержащая переход или барьер, из которой тепло растекается по всему объему ПП. Модели с погрешностью порядка не-

скольких десятков процентов качественно верно объясняют [8] наблюдающиеся на практике пороговые зависимости мощности импульсов от их длительности, превышение которых приводит к разрушению отдельных ПП.

Позднее явления теплового нагрева и разрушения обнаружили у более сложных видов ПП — в микросхемах, микроконтроллерах [9, 10]. При этом у микроконтроллеров, микропроцессоров и некоторых других типов цифровых микросхем помимо необратимых отказов наблюдаются и обратимые отказы в виде зависания, обычно устраняемого перезапуском питания.

Отказы обоих видов могут происходить при воздействии не только одиночных, но и периодически следующих менее мощных импульсов. Например, зависают персональные компьютеры разных поколений [11–13].

Для отдельных СВЧ ПП создана также модель необратимых отказов [14, 15], возникающих по причине автозапуска эффекта постепенного (от импульса к импульсу) накопления тепла, развивающегося при соответствующем подборе амплитуды, длительности и частоты следования импульсов. Но до сих пор отсутствуют адекватные модели развития обратимых и необратимых отка-

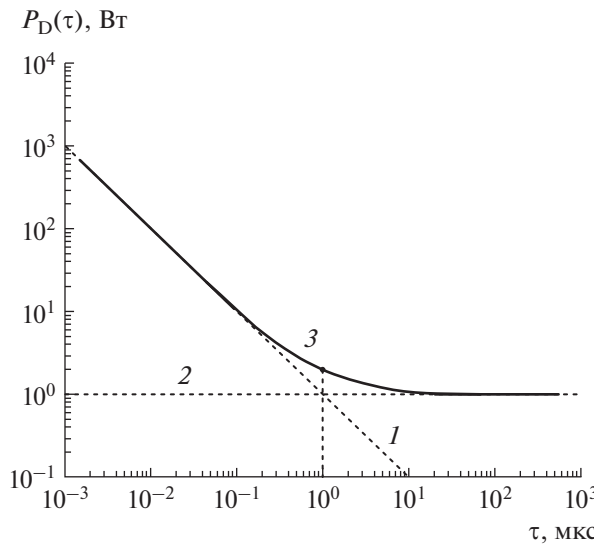


Рис. 1. Типичная зависимость пороговой мощности $P_D(\tau)$ отказов типа “D” у СВЧ ПП сантиметрового диапазона от длительности τ одиночных импульсов: 1 – адиабатический нагрев $P_D(\tau) \propto 1/\tau$; 2 – квазистатический нагрев $P_D(\infty) = \text{const}(\tau)$; 3 – зависимость $P_D(\tau)$.

зов у микросхем, находящихся под периодическим воздействием достаточно мощных электромагнитных импульсов. Цель статьи – разобраться с природой этих явлений.

1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В Российской Федерации [16] и в ряде других стран необратимые отказы, приводящие к полной потере работоспособности ПП, называют отказами типа “D”; обратимые отказы, устраняемые перезапуском питания, классифицируют как отказы типа “C”. Отказы типа “D” наблюдаются у ПП любого вида независимо от того, подключен он к источнику питания или нет. Отказы типа “C”, наряду с отказами типа “D”, наблюдаются только у некоторых типов цифровых микросхем, таких как микропроцессоры и микроконтроллеры. Пороговая энергия импульса, вызывающего обратимый отказ типа “C” у работающей цифровой микросхемы, подключенной к источнику питания, меньше необходимой для появления у нее же отказа типа “D”. Таким образом, отказ типа “C” запускается энергией воздействующего импульса, а существует во времени благодаря источнику питания. В этом принципиальное различие между этими двумя видами отказов.

В общем случае, пороговое значение критической мощности $P_{кр}(\tau)$, рассеиваемой в отдельном ПП одним прямоугольным импульсом длительностью τ , нагревающим его до некоей критиче-

ской температуры $T_{кр}$, в рамках тепловой модели Таска [4] описывается формулой вида

$$P_{кр}(\tau) = (A/\tau + B/\sqrt{\tau} + C)(T_{кр} - T_0), \quad (1)$$

где постоянные A , B , C зависят от размеров и свойств полупроводника; T_0 – начальная температура. Отказ типа “D” происходит при нагреве активной области ПП (в модели Таска это небольшой шар в центре неограниченного полупроводникового кристалла) до температуры $T_{кр} \approx T_D$ плавления полупроводника. У многих транзисторов и диодов СВЧ-диапазона [8], а также у различных типов микросхем [9] постоянная B близка к нулю, и в пределе $B = 0$, зависимость (1) принимает вид

$$P_D(\tau) = \left[\frac{c_V V}{\tau} + \frac{4\pi}{3} \chi d \right] (T_D - T_0), \quad (2)$$

где c_V и χ – теплоемкость единицы объема и теплопроводность полупроводника; d и V – диаметр и объем нагреваемой током активной области.

В тепловой модели [7] активной областью является не шар, а прямоугольный параллелепипед, из центра которого выделяющееся тепло диффундирует к его границам и далее. Если взять параллелепипед с квадратным основанием, длина сторон которого d , то приведенная к виду (2) формула модели [7] отличается от формулы Таска лишь вторым слагаемым: $\pi \chi d$ вместо $(4/3)\pi \chi d$. Относительно небольшое (в 1.33 раза) различие означает, что в рассматриваемых задачах определяющим является объем активной области, а не ее форма.

Зависимость (2) приведена на рис. 1 в двойном логарифмическом масштабе. Она представляет собой сумму двух асимптотических прямых (1 и 2), пересекающихся при длительности $\tau = \tau_D$. Наклонная линия 1 описывает адиабатический нагрев активной области коротким $\tau \leq \tau_D$ импульсом, за время воздействия которого тепло не успевает покинуть ее объем. Пороговая зависимость мощности выгорания при адиабатическом нагреве связана с длительностью импульса законом пропорциональности $P_D(\tau) \propto 1/\tau$. Горизонтальная линия 2 описывает квазистационарный нагрев активной области длинным $\tau \geq \tau_D$ импульсом, при воздействии которого мощность, втекающая в активный объем, равна мощности, вытекающей из него. На асимптоте 2 пороговый уровень мощности выгорания $P_D(\tau > \tau_D) = P_D(\infty) = \text{const}(\tau)$ постоянен, т.е. не зависит от длительности импульса.

Общая для адиабатического и квазистатического нагрева абсцисса τ_D пересечения асимптот 1 и 2 есть постоянная времени отказа типа “D”, наступающего при достижении в активной области

температуры выгорания T_D . У многих СВЧ ПП сантиметрового диапазона [8] экспериментальные зависимости $P_D(\tau)$, как и зависимость, изображенная на рис. 1, характеризуются постоянной времени порядка $\tau_D \approx 10^{-6}$ с, мощностью выгорания порядка $P_D(\tau_D) \approx 1$ Вт и энергией выгорания $\tau_D P_D(\tau_D) \approx 10^{-6}$ Дж.

У СВЧ ПП “виновником” отказов типа “D” является электротепловая неустойчивость S-типа, развитие которой заканчивается электрическим пробоем с образованием тонкого токового шнура, в котором выделяемая энергией импульса температура превышает температуру плавления полупроводника. При остывании ПП эта избыточная температура рассеивается в прилегающих к шнуру областях, разрушая кристалл за пределами шнура. При этом, как показывает микроскопический анализ [8], выгорает активная область СВЧ ПП с находящейся в ней частью барьера или перехода.

Вызываемые одиночными импульсами отказы типа “D” у микросхем [9] в графическом отображении подобны рис. 1, при этом мощности выгорания $P_D(\tau_D)$ у них и у СВЧ ПП сопоставимы по порядку.

Отказы типа “C” у работающих микропроцессоров, микроконтроллеров и некоторых других типов цифровых микросхем также описываются формулой (2), но с иными индексами начальной $T_p > T_0$ и критической температуры $T_C < T_D$. Пороговая зависимость мощности $P_C(\tau)$ отказов типа “C” подобна изображенной на рис. 1 и располагается ниже зависимости $P_D(\tau)$, так как требуемая для такого отказа мощность импульса меньше. На этом формальное сходство зависимостей $P_D(\tau)$ и $P_C(\tau)$ заканчивается.

Иногда удобнее использовать пороговые уровни отказов не в виде зависимости мощности $P_D(\tau)$, а в энергетическом представлении, которое в приближении прямоугольного импульса получается умножением формулы (2) на его длительность:

$$\Theta_D(\tau) = \tau P_D(\tau) = \left[c_V V + \frac{4\pi d}{3} \chi \tau \right] (T_D - T_0). \quad (3)$$

В этом приближении при $\tau \leq \tau_D$ пороговая энергия минимальна, постоянна и равна $\Theta_D(\tau) = c_V V (T_D - T_0)$, асимптота адиабатического нагрева горизонтальна; при $\tau \geq \tau_D$ энергия и асимптота квазистатического нагрева растут пропорционально τ :

$$\Theta_D(\tau) = \frac{4\pi d}{3} \chi \tau (T_D - T_0).$$

В точке $\tau = \tau_D$ пересечения асимптот энергии равны.

Формулы (2) и (3) описывают воздействие на ПП одиночных импульсов. Ничто не мешает использовать их и для описания явлений, порождаемых сериями импульсов, мощность $P(\tau)$ и энергия $\Theta(\tau) = \tau P(\tau)$ каждого из которых меньше, чем у одиночных импульсов. При этом отказ достигается посредством запуска эффекта накопления тепла, возможного при их периодическом воздействии с частотой F , превышающей некоторое пороговое значение.

2. ОТКАЗЫ ТИПА “D” У СВЧ ПП

Пороговые уровни отказов типа “D” у отдельных ПП (имеются в виду СВЧ ПП сантиметрового диапазона) удовлетворительно объясняются [8] в рамках тепловых моделей [4–7]. Взяв за основу формулу (2) и рис. 1, оценим значения величин, характеризующих выгорание ПП при воздействии одиночных импульсов. Воспользовавшись адиабатической частью этой формулы, найдем рассеянную в объеме V активной области ПП пороговую энергию прямоугольного электрического импульса $P_D(t)$, длительность которого равна предельной длительности $\tau = \tau_D$ асимптоты I :

$$\begin{aligned} \Theta_D(\tau_D) &= \int_0^{\tau_D} P_D(t) dt = P_D(\tau_D) \tau_D = \\ &= \int_{T_0}^{T_D} c_V(T) V dT \approx \langle c_V \rangle V (T_D - T_0). \end{aligned} \quad (4)$$

В этом выражении $\langle c_V \rangle$ — удельная теплоемкость полупроводника, усредненная в диапазоне температур интегрирования; объем V активной области полагаем не зависящим от температуры. Из (4) найдем этот объем:

$$V \approx \frac{P_D(\tau_D) \tau_D}{\langle c_V \rangle (T_D - T_0)}. \quad (5)$$

Подставив типичное для СВЧ ПП значение энергии выгорания $\tau_D P_D(\tau_D) \approx 10^{-6}$ Дж, взятое из рис. 1, и полагая, что $\langle c_V(T) \rangle \approx 2.04 \times 10^6$ Дж/(м³ К), $T_D = 1690$ К, $T_0 = 300$ К, получим значение $\bar{V} \approx 3.5 \times 10^{-16}$ м³, которое пометим “шапочкой”. Цилиндр с таким же объемом и диаметром $\hat{d} = 20 \times 10^{-6}$ м имеет высоту $h = \frac{4\bar{V}}{\pi \hat{d}^2} = 1.1 \times 10^{-6}$ м. По порядку величины такие размеры типичны для активных областей СВЧ-диодов и транзисторов, работающих на частотах менее 10 ГГц.

В точке пересечения $\tau = \tau_D$ адиабатической и квазистатической асимптот складываемые, находя-

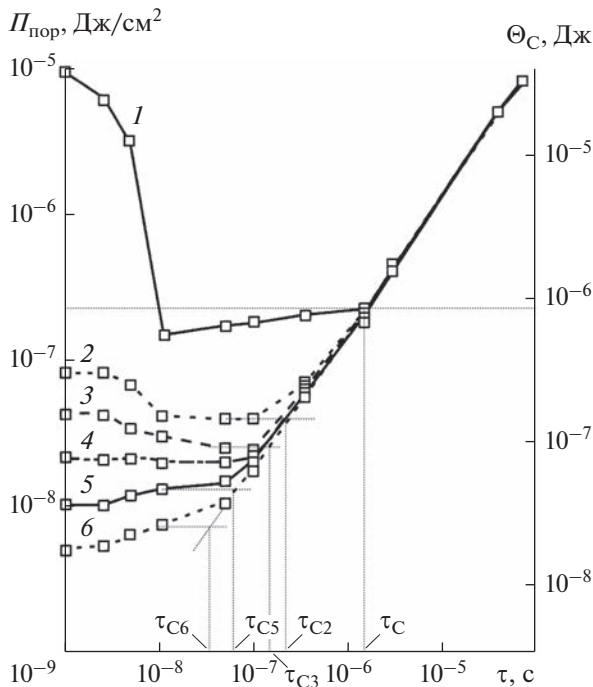


Рис. 2. Зависимости пороговой плотности энергии отказов типа “С” у ПК от длительности воздействующих СВЧ-импульсов при различных частотах повторения: одиночные импульсы (1), $F = 25$ (2), 50 (3), 100 (4), 200 (5) и 400 Гц (6); правая ось – пороговая энергия СВЧ- импульса, рассеиваемая в процессоре ПК.

щиеся в квадратных скобках формулы (2), равны. Из их равенства найдем время тепловой релаксации отказа типа “D”

$$\tau_D = \frac{3c_V V}{4\pi\chi d}. \quad (6)$$

У кремния при увеличении температуры от комнатной $T_0 = 300$ К до температуры плавления $T_D = 1690$ К удельная теплоемкость c_V , монотонно стремясь к насыщению, возрастает в 1.5 раза, а теплопроводность χ , насыщаясь, уменьшается в 6.7 раза, поэтому при $d = \text{const}$ значение τ_D возрастает примерно в 10 раз. Но поскольку τ_D принадлежит границе области статического нагрева, то значения теплоемкости $c_V = 2.45 \times 10^6$ Дж/(м³ К) и теплопроводности $\chi \approx 20$ Вт/(м К) в формуле (6) определены при температуре плавления. Формулы (6) и (5) не связаны между собой. Подставив в (6) полученные выше значения объема $\hat{V} \approx 3.5 \times 10^{-16}$ м³ и диаметра $\hat{d} = 20 \times 10^{-6}$ м цилиндра, получим $\tau_D \approx 0.5 \times 10^{-6}$ с, что одного порядка с постоянной τ_D на рис. 1.

Таким образом, сравнение теории с экспериментом показывает, что воздействие одиночных электрических импульсов на СВЧ ПП сантиметрового диапазона удовлетворительно описывается формулой (2): необратимые отказы типа “D” происходят [8] в результате развития электротепловой неустойчивости и последующего разрушения (плавления) активной области ПП, содержащей переход.

Переходя к задаче о влиянии частоты следования импульсов на отказы типа “D” у СВЧ ПП, выберем на рис. 1 такую длительность τ и такую мощность $P(\tau)$ импульса, энергия которого $\tau P(\tau)$ меньше, чем пороговое значение $\tau P_D(\tau)$ энергии одиночного импульса. Нас интересует вопрос: при каких значениях энергии, длительности и частоты F следования таких импульсов возникает эффект накопления тепла в ПП, приводящий к его выгоранию. Полное решение этой задачи численным, аналитическим и экспериментальным методами изложено в работах [8, 14, 15]. Приведем основные результаты.

Пусть первый импульс длительностью τ нагревает активный объем V до температуры $T_1 < T_D$. По окончании действия импульса температура снижается по закону $T(t) = T_1 \exp(-t/\tau_D)$ и к моменту $t > \tau_D$ прихода второго импульса принимает значение $T_{01} > T_0$. Для запуска эффекта накопления тепла нужно, чтобы к этому моменту приращение температуры $\Delta T = T_{01} - T_0$ в нагреваемой области превысило некое определенное значение, которое можно регулировать, укорачивая интервал времени между импульсами, увеличивая частоту их следования F и длительность τ . При типичном для СВЧ ПП значении $\tau_D \approx 10^{-6}$ с (см. рис. 1) это приводит к величинам такого порядка: $F \approx 10^6$ Гц, $\tau \approx \tau_D$, скважность импульсов $(F\tau)^{-1} \leq 10$.

3. ОТКАЗЫ ТИПА “С” У МИКРОПРОЦЕССОРОВ

В работе [11] переднюю панель персонального компьютера PC386DX-40, работающего в режиме тестирования ячеек памяти, фронтально облучали СВЧ-импульсами с несущей частотой $f_0 \approx 2.8$ ГГц, длительность и частоту следования которых меняли в широких пределах. Измеренные зависимости пороговой плотности энергии отказов типа “С” у микропроцессора ПК представлены на рис. 2 (левая ось ординат). Правая ось ординат построена нами для удобства перевода плотности электромагнитной энергии в единицы электрической энергии, используемой в модели Таска.

Из рисунка видно, что при длительности импульсов $\tau \geq 10$ нс полученные кривые в опреде-

ленной мере подобны пороговым зависимостям, вытекающим из тепловой модели Таска, отличаюсь от них лишь степенью гладкости. Но при воздействии одиночных импульсов длительностью $\tau < 10$ нс происходит резкое (на полтора-два порядка) превышение ожидаемого уровня энергии. Аналогичные явления при таких же коротких длительностях наблюдались [8] и при изучении отказов типа “D” у транзисторов 2Т3120. Дадим им физическое объяснение, исходя из предположения, что отказы обоих типов возникают в результате развития электротепловых неустойчивостей.

Стимулированная выделением тепла перестройка физического состояния ПП, приводящая к обратимому или необратимому отказу, происходит при превышении температурного порога в течение некоторого конечного интервала времени. При воздействии сверхкороткого одиночного импульса необходимый интервал времени не достигается. Недостаток можно компенсировать увеличением энергии импульса, что и демонстрирует резкий подъем кривой I .

При воздействии последовательности импульсов увеличение частоты их следования влияет на скорость перестройки состояния, так как процесс нагрева, растягиваясь во времени, требует от импульсов меньше энергии, и кривые на рис. 2 все больше принимают вид зависимости Таска, описываемой формулой (3): адиабатическая асимптота горизонтальна, асимптота квазистатического нагрева наклонна и меняется пропорционально τ .

Зависимость I на рис. 2 описывает воздействие одиночных импульсов, и на участке $\tau \geq 10$ нс к ней применима формула (3). Будем ее использовать при описании отказов типа “С”, заменив индексы у некоторых величин:

$$\Theta_C(\tau) = \tau P_C(\tau) = \left[c_V V + \tau \frac{4\pi}{3} \chi d \right] (T_C - T_p). \quad (7)$$

Здесь T_p — температура стационарно работающего микропроцессора, T_C — пороговая температура активной области, превышение которой приводит к зависанию процессора.

Опишем процедуру пересчета плотности энергии падающих на переднюю панель ПК электромагнитных импульсов в рассеиваемую ими в процессоре энергию, используемую в модели Таска. На рис. 2 выбрали характерную для одиночных импульсов точку с координатами $\tau_C \approx 1.5 \times 10^{-6}$ с и $\Pi_{\text{пор}} = 2 \times 10^{-7}$ Дж/см², в которой пересекаются адиабатическая линия (кривая I) и линия квазистатического нагрева (наклонная прямая). В этой точке нашли амплитуду напряженности электрического поля СВЧ-импульса $E_m = \sqrt{2\Pi_{\text{пор}} Z_0 / \tau}$, [В/м]

($Z_0 = 120\pi$ -волновое сопротивление пустого пространства), подставив которую в формулу [17]

$$\Theta_C(\tau_C) = P_C(\tau_C) \tau_C = \frac{c^2 G_r E_m^2 \tau_C}{8\pi Z_0 f_0^2 \beta^2},$$

вычислили рассеянную в микропроцессоре энергию $\Theta_C \approx 9 \times 10^{-7}$ Дж, вызвавшую отказ типа “С”. В этом выражении: c — скорость света; $G_r \geq 1$ — усредненный (порядка 1) коэффициент усиления подключенных к портам микропроцессора проводников, воспринимающих СВЧ-поле; $\beta^2 \geq 1$ — коэффициент ослабления электромагнитного поля. Если воспринимающие поле проводники, подсоединенные к портам процессора, не экранированы специальным образом, то $\beta^2 \approx 1$. При этом коэффициенты β^2 и G_r равны по порядку величины и в определенной мере компенсируют друг друга, поэтому их приняли равными.

Рассчитанная в точке пересечения энергия $\Theta_C(\tau_C) \approx 9 \times 10^{-7}$ Дж практически совпала с типичной энергией отказа типа “D” у СВЧ ПП (см. рис. 1). Совпадение случайное, но возникает вопрос: почему при существенном различии размеров и внутреннего устройства двух видов ПП постоянные времени τ_C и τ_D у них сопоставимы.

Из практики известно, что во время работы микропроцессор нагревается до температуры $T_p \approx 340$ К. Известно также [18, разд. 1.4], что при температурах $T > 800$ К концентрация собственных носителей заряда в кремнии превышает $n_i > 10^{17}$ см⁻³, что может сказаться на работоспособности транзисторов процессора. Поэтому появление отказов типа “С” наиболее вероятно, когда под воздействием энергии импульсов температура в активной области окажется в пределах интервала (340 < T_C < 800) К. Сделаем оценки.

Первое и второе слагаемые в квадратных скобках формулы (7) описывают адиабатическую и квазистатическую асимптоты нагрева, см. рис. 1. При $\tau = \tau_C$ асимптоты пересекаются, и из равенства слагаемых найдем диаметр

$$d \approx \sqrt{\frac{8\chi\tau_C}{c_V}} \quad (8)$$

и объем $V \approx \pi d^3 / 6$ той области процессора, которая за время длительности импульса $\tau_C \approx 10^{-6}$ с нагреется до температуры T_C . Приняв $T_C = 800$ К, подставив $\chi(T_C) = 42.2$ Вт/(м К), $c_V(T_C) = 2.12 \times 10^6$ Дж/(м³ К), найдем $d \approx 1.26 \times 10^{-5}$ м, $V \approx 1.05 \times 10^{-15}$ м³, что одного порядка с объемом $\bar{V} \approx 3.5 \times 10^{-16}$ м³ выгорания активной области отдельных СВЧ ПП. При температуре $T_C = 400$ К,

близкой к нижней границе отказов типа “С”, получим объем $V \approx 4.56 \times 10^{-15} \text{ м}^3$, который на порядок больше.

Таким образом, у процессора объем активно нагреваемой области зависит от пороговой температуры T_C , поскольку она определяет значения коэффициентов c_V и χ формулы (8). Причем объем этой области примерно на шесть порядков меньше объема кристалла стандартного микропроцессора, площадь которого $\sigma \approx 7 \times 7 \text{ мм}^2$. Если на нагрев активного объема расходуется энергия импульса порядка $\Theta_C(\tau) \approx 10^{-6} \text{ Дж}$ (см. рис. 2, кривая 1), то для нагрева всего процессора до такой же температуры T_C понадобится примерно 1 Дж.

Будем считать, что у испытанного в [11] компьютера PC386DX-40 микропроцессор по своей структуре не отличается от процессора 80386DX20, у которого площадь кристалла $\sigma \approx 42 \text{ мм}^2$, минимальный структурный размер [13] равен $\mu = 1.5 \times 10^{-6} \text{ м}$, а число транзисторов 275000. Полагаем, что на каждый такой транзистор приходится объем, эквивалентный объему куба со стороной $l = 2\mu = 3 \times 10^{-6} \text{ м}$. Тогда при температуре $T_C = 800 \text{ К}$ активно нагреваемая область процессора вмещает в себя 39 элементарных транзисторов. При более низкой температуре T_C число элементарных транзисторов растет пропорционально увеличению объема активной области.

Наиболее нагреваемой областью процессора с центрально симметричным дизайном является центр микросхемы, откуда отток тепла затруднен из-за малых градиентов температуры между расположенными там транзисторами. Наряду с температурой $T(t)$ в этой же области коэффициент удельной теплоемкости $c_V(T)$, отвечающий в формуле (7) за количество накопленного тепла, является наибольшим, а коэффициент теплопроводности $\chi(T)$, отвечающий за его растекание, — наименьшим. При достижении пороговой температуры T_C часть элементарных транзисторов меняет свое физическое состояние и их нормальное функционирование прекращается. Перезапуск питания возвращает их к обычному состоянию.

В течение времени воздействия электрического импульса процессор представляет собой открытую нелинейную диссипативную систему. В таких системах тепловые явления могут развиваться не однородно по всему объему, а в режимах с “обострением” [19], когда число степеней свободы системы резко сокращается, процесс локализуется, стягиваясь к малому объему, в котором температура достигает максимального значения. Это сродни уже упомянутому в разд. 2 неоднородному распределению (“шнурованию”) тока по сечению СВЧ ПП, что типично для неустойчивостей

с S-образной вольтамперной характеристикой. По-видимому, подобная (но не катастрофическая) локализация тепловых процессов в относительно малом объеме происходит и при нагреве процессора электрическим импульсом: энергии импульса недостаточно для шнурования тока, но при наличии источника питания ее хватает для появления отказа типа “С”. Представим эту область локального нагрева в виде цилиндра, ось которого совпадает с осью симметрии процессора.

Исходя из (7), по окончании короткого $\tau \leq \tau_C$ одиночного импульса пороговая энергия обратимого отказа типа “С”, накопленная в активном объеме V цилиндра при адиабатическом нагреве, равна

$$\tau P_C(\tau) = c_V V (T_C - T_p). \quad (9)$$

Выразим ее в единицах температуры

$$T_C - T_p = \frac{\tau P_C(\tau)}{c_V V}. \quad (10)$$

Эта энергия частично излучается вовне через торцы цилиндра, но в основном растекается в стороны, диффундируя к границам процессора с постоянной времени [7]

$$\tau_a = \frac{a^2 c_V}{4\pi\chi}, \quad (11)$$

где $a \approx 6.5 \text{ мм}$ — длина стороны кристалла процессора Intel 386DX, χ/c_V — коэффициент тепловой диффузии. Поскольку накопленная за время $\tau \leq \tau_C$ энергия, а значит, и температура сосредоточены в малом объеме цилиндра, то диффузия в окружающие области кристалла протекает при рабочей температуре $T_p \approx 340 \text{ К}$ процессора, которая и определяет значения коэффициентов $c_V(T_p)$ и $\chi(T_p)$. Подставив в (11) численные значения этих величин, получим $\tau_a \approx 5 \times 10^{-2} \text{ с}$.

По окончании действия импульса температура цилиндра снижается по закону

$$T(t) = T_C \exp(-t/\tau_a) + T_p. \quad (12)$$

В энергетическом представлении наклонная прямая на рис. 2, из координатных точек τ_{Cj} которой (см. пунктирные линии) выходят кривые 2–6, является асимптотой квазистатического нагрева (см. комментарии к формуле (3)). Пороговая мощность отказа на этой прямой постоянна при любой длительности одиночного импульса, поэтому можно положить $P(\tau) = P_C(\tau_C)$; но энергия импульса пропорциональна $k = \tau/\tau_C$. При этом формула (10) принимает вид

$$q = k(T_C - T_p) = k \frac{\tau_C P_C(\tau_C)}{c_V V}. \quad (13)$$

Рассмотрим теперь воздействие коротких $\tau < \tau_c$ импульсов малой энергии $\tau P_c(\tau_c) < \tau_c P_c(\tau_c)$, следующих с пороговой частотой F , превышение которой приводит к отказу типа “С” в результате накопления тепла. Вместо (9) будем использовать уравнение

$$\tau P_c(\tau_c) = c_V V (T_n - T_p), \quad (14)$$

где $T_n < T_c$ — температура цилиндра в момент окончания n -го импульса; $n = 0, 1, 2 \dots$. Энергию $\tau P_c(\tau_c)$ первого и всех последующих импульсов полагаем одинаковой.

Если период следования $1/F$ и длительность τ импульсов соотносятся как $1/F \gg \tau$, то из (12) следует, что по окончании действия любого n -го импульса цилиндр будет остывать по закону

$$T_n(t) \approx T_n \exp(-\gamma) + T_p, \quad (15)$$

где $\gamma = 1/\tau_a$. Полагая время τ_a тепловой релаксации и теплоемкость цилиндра $c_V V$ постоянными величинами, исходя из (14), сразу после прихода первого импульса будем иметь температуру $T_1 = q + T_p$; после прихода второго импульса получим температуру $T_2 = q + q \exp(-\gamma) + T_p$, после третьего $T_3 = q + q \exp(-\gamma) + q \exp(-2\gamma) + T_p$. После n -го импульса

$$T_n = q[1 + \exp(-\gamma) + \exp(-2\gamma) + \dots + \exp(-n\gamma)] + T_p = q \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-n\gamma) + T_p. \quad (16)$$

При $|\exp(-\gamma)| < 1$ ряд сходится к сумме

$$S(n) = \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-n\gamma) = \frac{1}{1 - \exp(-\gamma)}.$$

Сходимость быстрая: с погрешностью в единицы процентов максимум достигается при

$$n \geq 50F\tau_a.$$

При этом отказ типа “С” произойдет, спустя пороговое время

$$\Delta t = n/F \approx 50\tau_a.$$

Превышение пороговой энергии импульсов ведет к непропорционально быстрому уменьшению Δt .

Отказ типа “С” происходит после прихода n -го импульса, когда накапливаемая в объеме цилиндра температура T_n превысит температуру отказа T_c . При этом вместо (16) получим

$$T_c \approx \frac{q}{1 - \exp(-\gamma)} + T_p.$$

Отсюда найдем пороговую частоту следования импульсов

$$F \approx \frac{1}{-\tau_a \ln(1 - \tau/\tau_c)} = \frac{1}{-\tau_a \ln(1 - k)}. \quad (17)$$

Видно, что частота, с превышения которой запускается процесс накопления тепла, обратно пропорциональна постоянной времени τ_a остывания активного объема. Это правило является общим для ПП любого вида, так как процесс накопления, базирующийся на модели Таска, математически описывается для всех видов одинаково. Например, в разд. 2 говорилось, что у СВЧ ПП, у которых постоянная времени тепловой релаксации $\tau_D \approx 1 \times 10^{-6}$ с, частота $F \propto 1/\tau_D$ порядка 1 МГц; множитель $\ln(1 - k)$ учитывает влияние относительной энергии импульсов.

Сделаем оценки для микропроцессора. Из кривой 1 рис. 2 следует, что отказ типа “С” происходит при воздействии одиночного импульса длительностью $\tau_c \approx 1.5 \times 10^{-6}$ с. При этом температура активной области достигает значения T_c , которое можно оценить по формуле (10)

$$T_c = \frac{\Theta(\tau_c)}{c_V V} + T_p,$$

зная среднюю температуру работающего процессора $T_p \approx 340$ К и теплоемкость нагреваемой области. Подставив взятое из рис. 2 (см. кривую 1) значение $\Theta(\tau_c) \approx 9 \times 10^{-7}$ Дж и определенные выше при граничной температуре $T_c = 800$ К объем цилиндра $V = 1.05 \times 10^{-15}$ м³ и коэффициент $c_V \approx 2.12 \times 10^6$ Дж/(м³ К), получим $T_c \approx 740$ К. Теплоемкость изменилась, подставив уточненное значение c_V , получим более точную оценку верхней пороговой температуры $T_c \approx 725$ К.

На рис. 3 сплошными кривыми представлены рассчитанные по формуле (17) теоретические зависимости относительной энергии $k = \tau/\tau_c$ импульсов от частоты F при трех значениях τ_a , меняющихся десятикратно. На этом же рисунке приведена штриховая кривая 4, построенная по результатам измерений (квадратики вдоль кривой) при подстановке в (17) найденных нами из рис. 2 значений τ_{cj} , используемых при вычислении относительной энергии $k = \tau_{cj}/\tau_c$ импульсов, следующих с разными частотами.

Кривая 4 расположена между зависимостями 1 и 2, рассчитанными для постоянных времени τ_a , равных 0.5 и 0.05 с, из которых $\tau_a \approx 5 \times 10^{-2}$ с определена по формуле (11) для процессора Intel 386DX. Однако кривая 4 в среднем ближе к зави-

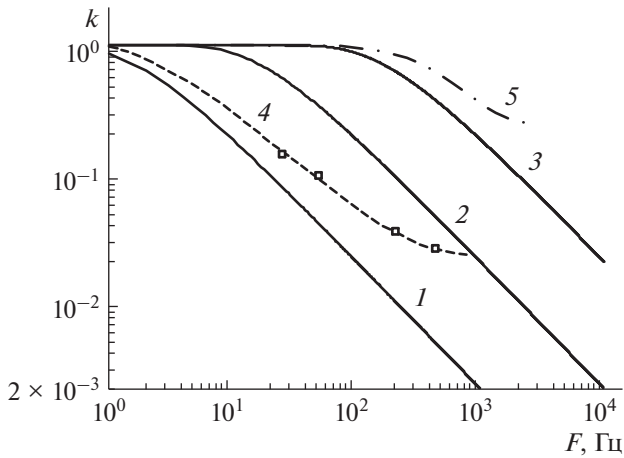


Рис. 3. Зависимость относительной энергии импульсов, приводящих к отказам типа “С” (кривые 1–4) и типа “D” (кривая 5) от частоты их следования: расчет по формуле (17) для трех времен релаксации процессора, $\tau_a = 0.5$ (1), 0.05 (2) и 0.005 с (3); кривая 4 построена по экспериментальным данным работы [11], кривая 5 взята из [9].

симости 1, чем 2. Это может быть вызвано разными причинами, включая более сложное влияние температуры на теплоемкость и теплопроводность полупроводника.

При воздействии одиночного импульса время остывания не ограничено и тепло из активного объема растекается по процессору при постоянной температуре T_p . Но при повышении частоты F следования импульсов температура в объеме процессора постепенно возрастает и тем заметнее, чем больше произведение энергии импульсов на F . При этом особенно быстро снижается коэффициент теплопроводности χ , что в формуле (11) приводит к увеличению τ_a и смещению расчетных кривых 1–3 на рис. 3 влево. При этом кривая 2 будет приближаться к экспериментальной зависимости 4. Помимо этого, кривая 4 отличается от теории тем, что по мере увеличения частоты F она стремится к насыщению, словно “упирается в какое-то препятствие”.

Известно, что для уверенного приема амплитудно-модулированного сигнала необходимо, чтобы его мощность превышала мощность собственных шумов приемника в полосе его пропускания. Аналогично, при воздействии периодической последовательности импульсов процесс накопления тепла возможен, если энергия (13) импульсов, выраженная в единицах температуры $(T_C - T_p)k$, превышает среднюю амплитуду температурных флуктуаций ΔT в области цилиндра. Исходя из кривой 4 (см. рис. 3) в рассматриваемом случае $k \approx 0.01$ и флуктуации имеют порядок

$\Delta T \approx 0.01(T_C - T_p)$. Мы не знаем точных значений температур T_p и T_C работающего микропроцессора. Положив, например, $T_p = 360$ К, $T_C = 600$ К, получим $\Delta T \approx 2.5^\circ\text{C}$, что по порядку может быть пределом, ограничивающим снизу зависимость 4 на рис. 3.

4. ОТКАЗЫ ТИПА “D” У МИКРОСХЕМ

Экспериментальные исследования отказов типа “D” у различных микросхем [9] показали, что при воздействии одиночных радиоимпульсов пороговые зависимости мощности выгорания P_D (τ) подобны изображенным на рис. 1. При этом постоянные времени отказов в основном находятся в диапазоне значений $1 \leq \tau_D \leq 5$ мкс, которые типичны [8] для СВЧ ПП малой и средней мощности. Поскольку по размерам микросхемы несопоставимо больше СВЧ ПП, то ограниченный диапазон значений τ_D свидетельствует о том, что отказы типа “D” происходят у них также в результате развития электротепловой неустойчивости и шнуrowания тока.

Из сказанного в предыдущем разделе следует, что у микропроцессоров температуры отказов типа “D” и типа “С” различаются более чем в два раза (1690 и 725 К). Эксперименты показывают [10], что у разных типов цифровых микросхем пороговая энергия одиночных импульсов, вызывающих отказы типа “D”, в 5...20 раз больше, чем у отказов типа “С”. И в этом превышении основную роль играет не столько разница пороговых температур T_D и T_C , сколько наличие у портов защитных диодов, в которых рассеивается значительная часть падающей на микросхему электромагнитной энергии.

На рис. 3 проведена “характерная зависимость” [9] порогового уровня повреждения микросхемы транзисторно-транзисторной логики 133 серии от частоты следования радиоимпульсов (кривая 5). На частотах, приближающихся к $F = 100$ Гц, начинается снижение пороговой энергии импульсов, которое быстро стремится к насыщению, и на частоте $F \approx 2000$ Гц относительная энергия оказывается примерно в 4 раза меньше, чем у одиночного импульса, достигая уровня $k \approx 0.24$. Авторы считают, что снижение порога связано с накоплением дефектов.

Но у кремниевых приборов быстрое накопление дефектов, наблюдаемое при частотах следования порядка 1 МГц, происходит [20] в диапазоне нормированной энергии импульсов $0.5 \leq k \leq 1$, в который уровень $k \approx 0.24$ не попадает. Вместе с тем из десяти транзисторов 2Т3120, экспериментально обследованных в [8, 15], только у одного процесс накопления тепла развился при $k \approx 0.08$; у

остальных — при $0.12 < k < 0.33$, куда попадает и уровень $k \approx 0.24$. Поэтому есть основания считать, что при воздействии последовательности импульсов отказы типа “D” у микросхем происходят преимущественно в результате развития эффекта накопления тепла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные оценки показывают, что у СВЧ ПП, у микропроцессоров, микроконтроллеров и микросхем отказы типа “C” и типа “D”, возникающие при воздействии мощных электромагнитных импульсов, происходят в результате развития электротепловой неустойчивости. В ходе этой неустойчивости все линии тока стягиваются в тонкий шнур, внутри которого образуется область повышенной температуры, ответственной за появление как обратимых отказов типа “C” у микропроцессоров и микроконтроллеров, так и необратимых отказов типа “D” у любых видов ПП.

Отказы типа “C” и типа “D” могут возникать при воздействии как одиночных импульсов большой амплитуды, так и последовательности менее энергичных импульсов. В процессах с накоплением тепла частота следования будет тем меньше, чем больше постоянная времени остывания ПП, пропорциональная (11) квадрату размера его кристалла. Поэтому у микропроцессоров и микросхем наблюдаемая в опытах частота повторения порядка десятков-сотен герц, а у СВЧ ПП — порядка мегагерц.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-06010). Исследования по данной тематике проводятся в рамках бюджетной НИР FFZF-2022–0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рикетс Л.У., Бриджес Дж., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. М.: Атомиздат, 1979.
2. Whalen J.J., Calcaterra M.C., Thorn M.L. // IEEE Trans. 1979. V. MTT-27. № 12. P. 1026.
3. Wunsh D.C., Bell R.R. // IEEE Trans. 1968. V. NS-15. № 6. P. 244.
4. Taska D.M. // IEEE Trans. 1970. V. NS-17. № 6. P. 364.
5. Arkhipov V.I., Astvatsaturyan E.R., Godovitsyn V.I., Rudenko A.I. // Int. J. Electronics. 1983. V. 55. № 3. P. 395.
6. Абидов М.А. Статические характеристики диодных структур. М.: Радио и связь, 1989.
7. Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S. // Solid-State Electronics. 1990. V. 33. № 5. P. 553.
8. Усыченко В.Г., Сорокин Л.Н. Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. М.: Радиотехника, 2017.
9. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. // РЭ. 2011. Т. 56. № 3. С. 370.
10. Nitsch D., Camp M., Sabath F. et al. // IEEE Trans. 2004. V. EMC-46. № 3. P. 380.
11. Юшков Ю.Г., Чумерин П.Ю., Артеменко С.Н. и др. // РЭ. 2001. Т. 46. № 8. С. 1020.
12. Hoad R., Carter N., Herke D., Watkins S. // IEEE Trans. 2004. V. EMC-46. № 3. P. 390.
13. Camp M., Garbe H. // IEEE Trans. 2006. V. EMC-48. № 4. P. 829.
14. Усыченко В.Г., Сасункевич А.А., Сорокин Л.Н. // РЭ. 2016. Т. 61. № 5. С. 484.
15. Сасункевич А.А., Сорокин Л.Н., Усыченко В.Г. // РЭ. 2016. Т. 61. № 7. С. 702.
16. ГОСТ Р 51317.2.5–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. М.: Госстандарт России, 2001. <https://meg-anorm.ru/Data/109/10975.pdf>.
17. Усыченко В.Г., Сорокин Л.Н., Усыченко А.С. // РЭ. 2020. Т. 65. № 12. С. 1234.
18. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. М.: Мир, 1984.
19. Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука, 1987.
20. Сасункевич А.А., Сорокин Л.Н., Усыченко В.Г. // РЭ. 2013. Т. 58. № 6. С. 635.