УДК 621.382.049.77

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ НА НАДЁЖНОСТЬ КМОП-ПЛИС СЕМЕЙСТВА KINTEX-7 НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ И УРАВНЕНИЯ АРРЕНИУСА

Яцкевич Я.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, yana.yatskevi4@gmail.com

Аннотация: в работе рассматривается проблема теплового старения высокопроизводительных КМОП-программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) на примере микросхемы Xilinx Kintex-7 XC7K325T. Предложена методика количественной оценки влияния условий охлаждения на надёжность изделия на основе тепловой модели и уравнения Аррениуса. Выполнены расчёты температуры кристалла для двух сценариев: естественная конвекция и принудительный обдув со скоростью воздушного потока 250 LFM. Показано, что снижение температуры кристалла с 113,8 °C до 95,4 °C обеспечивает увеличение средней наработки на отказ в 2,8 раза. Результаты подтверждают критическую важность активного охлаждения для обеспечения требуемого уровня надёжности высокопроизводительных ПЛИС.

Ключевые слова: тепловое сопротивление, надёжность, уравнение Аррениуса, ПЛИС, Kintex-7, температура кристалла, срок службы, активное охлаждение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых проблем современной микроэлектроники является рост удельной рассеиваемой мощности при одновременном уменьшении размеров активных элементов [1]. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) нашли широкое применение в системах обработки сигналов, телекоммуникациях, промышленной автоматике и аэрокосмической отрасли. При этом требования к их надёжности непрерывно ужесточаются, особенно при эксплуатации в герметичных корпусах с ограниченным тепловым режимом.

Основным фактором, ограничивающим надёжность, является температура кристалла. Согласно модели Аррениуса, скорость протекания деградационных процессов (диффузия, электромиграция, старение диэлектрика затвора) экспоненциально зависит от температуры [2]. При этом даже незначительное снижение температуры перехода обеспечивает кратный рост времени наработки на отказ.

В большинстве инженерных методик оценка срока службы выполняется на основе усреднённых значений теплового сопротивления и мощности, что не всегда учитывает реальные условия охлаждения и тепловую инерционность конструкции. В настоящей работе предлагается подход, основанный на построении тепловой модели «кристалл – корпус – среда» и последующем расчёте срока службы по уравнению Аррениуса. В качестве объекта исследования выбрана КМОП-ПЛИС Xilinx Kintex-7 XC7K325T в корпусе FFG900.

II. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ

В качестве объекта исследования выбрана микросхема Xilinx Kintex-7 XC7K325T в корпусе FFG900 (31×31 мм). Выбор обусловлен высокой логической ёмкостью (326080 логических ячеек) и широким распространением данного семейства в системах средней и высокой производительности. Технические характеристики, используемые в расчётах, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики микросхемы

Техпроцесс	28 нм
Логические ячейки	326080
Типовое тепловое сопротивление кристалл-среда (θ_{JA}) без обдува	~8,6 °C/Вт
Тепловое сопротивление кристалл-среда (θ_{JA}) с обдувом 250 LFM	~6,3 °C/Вт
Тепловое сопротивление переход-корпус (θ_{JC})	~0,24 °C/Вт
Максимальная допустимая температура кристалла ($T_{j\,max}$)	125 °C
Типичная мощность (средняя загрузка)	~8 Вт

Для описания теплового состояния микросхемы используется эквивалентная тепловая цепь, представленная на рисунке 1. В данной модели тепловой поток от кристалла к окружающей среде проходит последовательно через несколько слоёв: кристалл – источник тепловыделения, имеющий собственную теплоёмкость, но для установившегося режима рассматривается как источник теплового потока; корпус – включает в себя термоинтерфейс между кристаллом и корпусом, материал корпуса, контактные площадки и выводы; радиатор или печатная плата – внешние элементы, через которые осуществляется отвод тепла. В зависимости от конкретной конструкции, именно эта часть теплового тракта вносит наибольший вклад в общее тепловое сопротивление и является наиболее управляемой с инженерной точки зрения; окружающая среда – воздух или другая среда, в которую отводится конечное тепло.

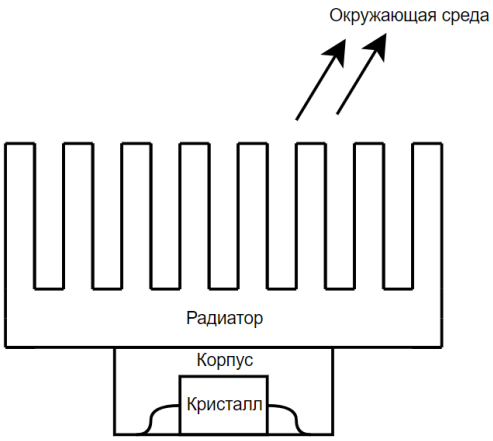


Рисунок 1. Эквивалентная тепловая цепь

Уравнение теплового расчёта, для определения температуры перехода полупроводникового компонента определяется выражением:

$$T_j = T_a + P \cdot \theta_{JA}, \quad (1)$$

где T_j – температура перехода, T_a – температура окружающей среды, P – рассеиваемая мощность компонента, θ_{JA} – тепловое сопротивление «переход-окружающая среда».

Температуру окружающей среды внутри корпуса принята равной T_a = 45 °C, что соответствует наихудшим условиям эксплуатации в герметичном промышленном корпусе.

Для прогнозирования срока службы используется уравнение Аррениуса, связывающее времена до отказа при двух температурах:

$$ln\frac{L_2}{L_1} = \frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_{j2}} - \frac{1}{T_{j1}}\right), \quad (2)$$

где L_1, L_2 – время до отказа при температурах, T_{j1} и T_{j2}, E_a – энергия активации (для КМОП-микросхем E_a=0,6 эВ), k_B=8,617·10^{-5} эВ/К – постоянная Больцмана.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ

Расчет надежности по Аррениусу показывает во сколько раз дольше проживет микросхема с радиатором по сравнению со схемой без радиатора.

При тепловом сопротивлении кристалл-среда без обдува θ_{JA} = 8,6 °C/Вт температура перехода составляет 113,8 °C. Полученное значение очень близко к максимально допустимой температуре кристалла 125 °C, что негативно скажется на надёжности изделия. При тепловом сопротивлении кристалл-среда с обдувом 250 LFM (вентилятор среднего уровня) θ_{JA} = 6,3 °C/Вт температура перехода составляет 95,4 °C. Следовательно разница снижения температуры двух случаев составляет 18,4 °C.

После подстановки всех полученных значений в модель Аррениуса получим, что при переходе от естественной конвекции к принудительному обдуву со скоростью 250 LFM срок службы ПЛИС увеличивается примерно в 2,8 раза. Даже относительно небольшое снижение температуры на 18,4 °C обеспечивает кратный рост надёжности благодаря экспоненциальному характеру зависимости скорости деградации от температуры.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые расчёты подтверждают, что активное охлаждение является критическим фактором, определяющим достижимый уровень надёжности высокопроизводительных ПЛИС. Следует отметить, что предложенная методика имеет ряд упрощений: использование усреднённых значений θ_{JA} из технической документации не учитывает нестационарные тепловые режимы, пространственное распределение температуры по кристаллу и зависимость параметров от температуры. Тем не менее, полученные результаты дают ясное количественное представление о масштабе влияния охлаждения на надёжность и могут служить основой для принятия инженерных решений на ранних этапах проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

[1] National Research Council. The Future of Computing Performance: Game Over or Next Level? – Washington, D.C.: The National Academies Press, 2011. – 185 с.

[2] JEDEC Standard JESD85A. Methods for Calculating Failure Rates in Units of FITs. – JEDEC Solid State Technology Association, 2021. – 22 с.

[3] Ларин А.А., Новиков А.В. Основы физики надежности интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 2019. – 320 с.

[4] AMD (Xilinx). Kintex-7 FPGAs Data Sheet: DC and AC Switching Characteristics. DS182, v2.17, 2022. – 87 с.

[5] JEDEC Standard JESD51. Methodology for the Thermal Measurement of Component Packages (Single Semiconductor Device). – JEDEC Solid State Technology Association, 1995. – Методика тепловых измерений, определение T_j и θ_{JA}.

[6] JEDEC Standard JESD51-6. Integrated Circuit Thermal Test Method Environmental Conditions – Forced Convection (Moving Air). – JEDEC Solid State Technology Association. – Стандарт для измерения тепловых характеристик при принудительном обдуве (LFM).

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF COOLING CONDITIONS ON THE RELIABILITY OF KINTEX-7 CMOS FPGAs BASED ON A THERMAL MODEL AND THE ARRHENIUS EQUATION

Y. Yatskevich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
yana.yatskevi4@gmail.com

Abstract: the paper addresses the problem of thermal aging of high-performance CMOS field-programmable gate arrays (FPGAs) using the Xilinx Kintex-7 XC7K325T device as a case study. A methodology is proposed for quantitative assessment of the influence of cooling conditions on device reliability based on a thermal model and the Arrhenius equation. Junction temperatures were calculated for two scenarios: natural convection and forced airflow at 250 LFM. It is shown that reducing the junction temperature from 113,8 °C to 95,4 °C provides a 2,8-fold increase in the meantime to failure. The results confirm the critical importance of active cooling for ensuring the required reliability level of high-performance FPGAs.

Keywords: thermal resistance, reliability, Arrhenius equation, FPGA, Kintex-7, junction temperature, service life, active cooling.