

学位論文審査の結果の要旨

報告番号	先端科学技術甲第 152 号	氏名	金子 博昭
論文題目	FPGA 搭載プロセッサの高温試験に関する研究		
論文審査委員会	委員 (主査)	教授	金杉 昭徳
	委員 (副査)	教授	小松 聡
	委員 (副査)	教授	田所 貴志
	委員 (副査)	教授	和田 成夫
	委員 (副査)	准教授	佐藤 修一

FPGA (Field Programmable Gate Array) は、ユーザが自由に回路を変更可能な集積回路 (IC) である。従来は研究開発における試作が主な用途であったが、現在では大規模化・高性能化が進み、多品種少量生産向けの様々な製品に採用されている。

IC は高温環境において性能が低下するため、出荷時に高温印加試験が行われる。通常の IC は出荷時に回路が確定しており、半導体メーカーが試験を行うが、FPGA の場合は FPGA を採用しているセットメーカーが試験をする必要がある。

従来からプログラマブルなデバイスとして、マイコン (マイクロコントローラ) は幅広く利用されている。マイコンでは実行するプログラムによって、発熱量が劇的に変わることは無いが、FPGA では設計された回路によっては大幅な温度上昇を引き起こす可能性がある。その結果 FPGA の性能低下をもたらし、場合によっては破損する恐れもある。しかし、FPGA 用 CAD における消費電力見積り機能は、極めて精度が悪く、実用的ではない (数十倍大きく、あるいは数十分の一小さく見積られる場合がある)。そこで実測を行う必要があるが、従来用いられている恒温槽は巨大かつ高価であり、回路設計の現場で使用することは容易ではない。

以上の背景のもとに、本論文は FPGA を内部から発熱させる加熱器の研究についてまとめている。FPGA の高温試験を対象とする研究はまだ少ない。従来手法では発熱効率があまり高くなく、また製造プロセスの異なる FPGA には再設計を必要とする。さらに、温度を可変できる内部加熱器は、あまり見受けられない。そこで本論文は FPGA 加熱方式の確立を目的とし、目標温度と製造プロセスが変更されても、制御パラメータの動的な変更により柔軟に対応できる高効率な加熱器を提案している。

本論文で提案している拡張駆動加熱器の加熱モジュールは、リングオシレータに、発振信号を FPGA 内に拡張して駆動するための駆動段を加えている。駆動段では、配線チャネルにも発熱を生じさせ、発熱効率を高めている。提案する加熱器は、遅延段数と駆動段数、活性化する加熱モジュール数からなる制御パラメータを変化させる構成となっている。その結果、加熱目標温度に対して制御パラメータの変更で対応できる有利性を提供している。

提案する加熱器は、あえて発熱しにくい低消費電力の中規模 FPGA に実装して実験を行

っている。加熱モジュールを 1,000 組実装し、3 種類の制御パラメータ、遅延段数 (1~63)、駆動段数 (63~1)、活性化加熱モジュール (1~1,000) を組み合わせて実験を行い、チップ温度へ与える影響を解析した。チップ温度を民生機器の推奨動作温度の上限である 85℃ に加熱するには FPGA リソース占有率が 29%、また絶対最大定格温度 125℃ まで加熱するにはリソース占有率が 54% となった。この結果から、提案した内部加熱器は実用上許容できるリソースで十分な加熱能力を示している。

また本論文では、加熱器に加えて、試験対象としてのプロセッサおよび機械語モニタを FPGA に実装した実験環境を開発している。プロセッサにはオープンアーキテクチャである RISC-V に基づいた独自命令セットを実装し、機械語モニタはモニタ機能をハードウェアとして実装している。目標温度とチップ温度から制御パラメータを動的に変更し、熱制御器が目標温度への加熱を制御した結果、非制御時に比して 1/2 程度の時間で安定状態へ到達させることを見出した。

さらに恒温槽と提案する加熱器の加熱均一性の違いを調べるために、赤外線熱画像を用いて温度計測を行った。その結果、提案する加熱器は、小領域による部分的・集中的な回路加熱ができることが示されている。

最後に、低コスト FPGA 加熱方式の確立のために研究・開発した内部加熱器の構成とその応用研究の成果は、FPGA の設計段階と製造段階における高温試験への応用およびそれらを用いたシステム開発への貢献が期待できると結論付けている。

これらの成果は、

金子博昭, 金杉昭徳, “FPGA チップ温度制御用リングオシレータ加熱器の実装と評価”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J103-C, No.11, pp. 473–482 (2020 年 11 月)

として報告されている。

以上、本論文において著者が検討して得た知見は、設計段階のみならず、製造段階および運用段階における高温試験にも極めて有用であると判断できることから、本論文の価値は工学的、工業的な観点からも十分に評価できる。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。