車載用半導体製品の信頼性を高める EMC・熱設計フロントローディング技術

Front-Loading of EMC and Thermal Design Technologies to Improve Reliability of Automotive Semiconductor Products

江上 孝夫 EGAMI Takao 小松 輝充 KOMATSU Terumitsu 伊見 仁 IMI Hitoshi 永田 真 NAGATA Makoto

近年, EV (電気自動車)の普及や自動運転技術の発展により,自動車に搭載される電子制御ユニット(ECU: Electronic Control Unit)が増加している。ECUの信頼性を確保する上で,実装される半導体製品での電磁両立性(EMC: Electro Magnetic Compatibility)と熱に起因した問題解決が重要になる。また,次世代自動車の開発が加速する中で,手戻りを防ぎ,開発期間を短縮するには,EMC・熱設計のフロントローディング技術が求められている。

そこで、東芝デバイス&ストレージ(株)は、車載用半導体製品の信頼性を高めるため、EMC・熱設計に対するフロント ローディング技術の開発に取り組んでいる。アナログICでは、ノイズ解析のシミュレーション精度の向上や、IC内のデバイス 間相互で熱の影響を考慮に入れた電気-熱連成シミュレーションを可能にする環境を構築した。また、ディスクリートパワー デバイスでは、パワー MOSFET (金属酸化膜半導体型電界効果トランジスター)を使用するスイッチング回路などに適用 できる電気-熱連成シミュレーション技術を開発している。

In recent years, the dissemination of electric vehicles and the development of autonomous driving technologies have led to an increase in the number of electronic control units (ECUs) installed in automobiles. In order to assure the reliability of these ECUs, there is a need to solve issues related to the electromagnetic compatibility (EMC) and thermal effects of semiconductor products. An approach to the front-loading of EMC and thermal design technologies is therefore required to reduce the impact of process retrogression and shorten development periods in line with the international trend in the development of next-generation automobiles.

With this as a background, Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has been making efforts to develop front-loading technologies for the EMC and thermal design of automotive semiconductor products. In the field of analog integrated circuits (ICs), we have established development environments that make it possible to improve the accuracy of noise simulations and perform electrothermal circuit simulations taking into consideration the interconnections among devices on an IC. In the field of discrete power devices, we are also developing an electrothermal circuit simulation method for switching applications using power metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs).

1. まえがき

EVや自動運転技術の普及で,ECUが増加するとともに, 開発する半導体の技術難易度が高くなってきている。また, 車両開発期間の短縮化に伴い,EMCや熱などの不具合によ る開発の手戻りが問題となってきた。EMC特性と熱特性は, 二律背反になる場合が多く,開発初期段階での擦り合わせ が重要となる。そのため,東芝デバイス&ストレージ(株) では,EMC・熱設計のフロントローディングに対する取り組 みを行っている。

車載用電子機器のEMC規制は,近年,自動運転の拡大 に伴い,安全を確保するための誤動作対策としてますます 重要性が増してきている。また,2016年から,我が国でも, UNECE (国際連合欧州経済委員会)が定めた安全規則 ECE R10 (ECE Regulation No. 10) が適用されたことによ り、当社では、2015年から半導体EMC評価室 (2018年 にISO 17025 (国際標準化機構規格 17025)の認定を取 得)を立ち上げ、IEC (国際電気標準会議規格)などの国 際規格について、社内での測定技術・評価レベルの向上と 製品開発へのフィードバックを図ってきた。

熱対策は、車載用アナログICとしての10A出力のモー タードライバーICに限らず、車載用MCU (マイクロコント ローラーユニット)としては高位のマルチコアCPUでも重要 である。また、ECUでディスクリートパワーデバイスが使用 されている場合も同様である。

したがって、車載用半導体では、熱シミュレーションが必 須となっている。当社は、これまで筐体(きょうたい)を含め たモデルによる熱シミュレーションを、エンジンコントロール ICやADAS(先進運転支援システム)関係マイコンなどの 開発に適用してきたが,更にディスクリートパワーデバイス への適用に向けて新しい取り組みも開始した。ここでは,こ れらの取り組みについて述べる。

2. EMC解析のフロントローディングへの取り組み

従来は、EMCでの不具合解析のために車載用ICにプロー ビングすると、測定系の影響で動作の実測が困難であった。 そこで、ノイズを受けるEMS (Electromagnetic Susceptibility:電磁感受性)試験であるDPI (Direct Power Injection)ノイズ印加時の誤動作解析について、国立大学法 人 神戸大学 永田 真教授の研究室と、OCM (On Chip Waveform Monitor)を用いたEMCの共同研究^{(1), (2)}を行 い、現象の確認と回路シミュレーションへのフィードバック を行った。ここで、OCMは、チップに搭載し、回路の特性 やICレイアウトの影響を小さくしてモニターする電子プロー ブである。

DPIノイズ印加時に, DMOS (二重拡散型金属酸化膜半 導体)からSi (シリコン)基板にノイズが印加される様子を 模式的に示したのが図1である。このように, ノイズがIC端 子や配線層に伝搬し, Si基板を通して回路内のほかの素子 に回り込んで, 誤動作の主な要因となる。

今回, OCM, LIN (Local Interconnect Network)トラ ンシーバー, 及びCAN (Controller Area Network)トラン シーバーを搭載したTEG (Test Element Group)を, 車載



図1. DMOSからSi基板へのDPIノイズの伝搬

DMOSの出力段から、IC 端子や、配線層、Si 基板にノイズが伝搬し、各素子に回り込んで誤動作の要因になる。

Propagation of direct power injection (DPI) noise from doublediffused MOS (DMOS) to silicon substrate 用BiCD (バイポーラー+CMOS (相補型MOS)+DMOS) -0.13 μm (40 V) プロセスで開発した (図2)。内部回路 ノードやSi基板の,周波数や位相を含む電圧変化を,0~ 40 Vまで詳細に観測することができる。



図2. OCM TEGのブロック図

DPIノイズを印加したときの内部回路ノードやSi基板の電圧変化を測定する ためのもので、LINトランシーバー、CANトランシーバー、及びOCMの各 ブロックで構成される。

Block diagram of on-chip waveform monitor (OCM) test element group (TEG) $% \left(\mathcal{A}_{\mathrm{CM}}^{\mathrm{T}}\right) =0$







(b) DPIノイズレベルの実測値とシミュレーション値の比較

図3. LINトランシーバー内のOCMによるDPIノイズレベルの実測 値とシミュレーション値の比較

LINトランシーバーにOCMを5か所配置している。OCMのそれぞれの箇 所で、DPIノイズレベルの実測値とシミュレーション値がほぼ一致しているこ とが分かる。

Comparison of measured and simulated values of DPI noise level at each location of OCM in LIN (Local Interconnect Network) transceiver

LINトランシーバーにおけるOCMの配置例,及びその OCMでのDPIノイズレベルの実測値と、ノイズ解析・検証 ツールによるシミュレーション値の比較を、図3に示す。永 田教授らの研究により、今までのEMC解析に使用されてき た線形素子モデルのCPM (Chip Power Model)に、保 護ダイオードまでを含めた非線形モデルECPM (Extended Chip Power Model)を付加することで、OCMの位置ごとに、 Si基板内の距離と周辺の素子に応じたDPIノイズレベルを、 OCMでの実測とシミュレーションで一致させることができた。

また、このLINトランシーバー部へのDPIノイズ印加を シミュレーションしたものが図4(a)である。右下のLINバス 端子から印加されたDPIノイズ強度を、赤色(強)から青色 (弱)への変化で視覚的に確認できる。更に、DPIノイズ印 加のあり/なしで誤動作をシミュレーションした結果を図4(b) に示す。入力端子(T_x)からの信号で動作しているLINバス 端子に、DPIノイズを印加すると、内部ノードが誤動作して 出力端子(R_x)から誤パルスが発生している。このシミュレー ション結果は、OCMでの実測結果と一致している。





(b) 誤動作のシミュレーション結果

図4. LINトランシーバーへのDPIノイズ印加時のノイズレベル分布 と誤動作のシミュレーション結果

DPIノイズを印加すると、内部ノードの誤動作で、R_x端子に誤パルスが発生 することがシミュレーションで再現されている。

Results of simulations of DPI noise level distribution and waveform data with and without DPI noise application of LIN transceiver

このように、DPIノイズ印加時のシミュレーション精度が向 上したため、回路や、レイアウトデータ、パッケージなどの 情報から、IEC 62132-4規格に沿った、DPIノイズ耐量の 事前予測が可能になり、フロントローディングに適用できる。 また、この技術は、IC内部のノイズ解析にも応用可能であ る。DC(直流)-DCコンバーターや大電流モータードライ バーにおいて、スイッチング時のEMSの誤動作解析を行うこ とで、アグレッサー素子(ノイズ発生側)の影響を受けて誤 動作するビクティム素子(ノイズ受動側)の特定などにも応用 ができ、不具合検証に使用している。

この要素技術を用いて、現在, CAN-FD (CAN with Flexible Data Rate)トランシーバーや, LIN及びCXPI (Clock Extension Peripheral Interface)トランシーバーを開発中 である。

3. 熱設計のフロントローディングへの取り組み

3.1 BiCDでの電気-熱連成シミュレーション

BiCD-0.13 µmプロセスでは、パッケージや、PCB (プリント回路基板)、ヒートシンク、筐体を含めた過渡的な熱シミュレーションは、既に実施していたが、更に、それぞれの熱モデルを持ったデバイス間で、相互に影響する熱シミュレーションも可能にした。

この例を、図5に示す。DMOS出力段(M1A, M1B)と 小信号部には、それぞれのSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)モデルに自己発熱モ デルを追加し、また、DMOS出力段と小信号部の間には、 熱伝導モデルを追加してある。通常のSPICEシミュレーショ ンでの温度シミュレーションは、例えば、ジャンクション温



図5. IC内のデバイスに追加した熱等価回路モデル DMOS出力段や、小信号部などの各デバイスにおけるSPICEモデルに、熱 回路モデル(自己発熱モデルや熱伝導モデル)を追加した。

Thermal equivalent circuit model with self-heating and heat transfer models added to SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) model 度*T*_jを125 ℃に固定して,電気的特性は*T*_jを一定として解 析するため,時間軸での変化をシミュレーションすることが できなかった。しかし,この熱モデル(自己発熱モデル又は 熱伝導モデル)の付加により,大電流を流すアプリケーショ ンの場合に,DMOSの自己発熱によってダイ(Die)内部 の温度が過渡的に上昇する特性を,時間軸の変化としてシ ミュレーションすることが可能となった。

DMOSの出力波形を含む、電気-熱連成のSPICEシミュ レーション結果を、図6に示す。パルス幅変調信号でDMOS がオン/オフを繰り返す度に、素子の温度が上昇/下降を繰 り返しながら全体として徐々に上昇していることが分かる。ま た、自己発熱によりDMOSがオンのときの出力電流の全体が 下降していることや、小信号部の消費電流の全体が僅かだが 少しずつ減少していることが、シミュレーションで確認できる。

3.2 ディスクリートパワーデバイスの連成シミュレーション ECU開発のフロントローディングのために、ディスクリー トパワーデバイスの電気-熱連成シミュレーションを行った。 三相ブラシレスモーター用のインバーターに、電気-熱連成 シミュレーションを応用した例について述べる。

マルチドメイン EDA (Electronic Design Automation) ツールを用いた, SPICE モデルと熱モデルから成るシステム



図6. 電気-熱連成シミュレーション結果

図5のSPICEモデルを使用して、デバイス温度、DMOS出力電流、小信 号部消費電流について、電気-熱連成シミュレーションを行った。

Results of electrothermal circuit simulations

での連成シミュレーション例を**図7**に示す。三相ブラシレス モーター用のインバーター駆動回路にあるパワー MOSFET (MOS電界効果トランジスター)^{(3),(4)}のSPICEモデルには, 熱モデルを付加しており,自己発熱のシミュレーションが可 能である。また,ベクトル制御モデル,基板モデル,ヒート シンクモデル,モーターモデルは、マルチドメインツールで 記述したものを適用している。

この制御システムでの時間変化におけるモーターの測 定結果を、図8に示す。図8(a)はモーター速度指令値と モーター回転速度を示す。モーター速度指令値は、0から 500 rpmまで加速し、500から300 rpm、300から0 rpm まで減速させている。また、この条件でのモータートルク波 形を図8(b)に示す。モーター回転速度が上昇すると正方向 のトルクが増加し、モーター回転速度が低下すると負方向 のトルクが増加している。加えて、トルクを大きくするときは モーター電流(U相, V相, W相)が増加し、トルクを小さ くするときはモーター電流が減少する(図8(c))。このモー ター電流の増減に伴って、インバーター駆動回路のパワー MOSFET (U相, V相, W相)のハイ側, ロー側における ドレイン電流に対応したそれぞれのTは、過渡的な熱で変 化することが確認できた(図8(d))。また、モーター電流が 流れているときは、パワー MOSFETの自己発熱で右上がり の熱特性を示すので、この熱特性を考慮してヒートシンクな ど筐体の最適設計が可能になる。



図7. MOSFETを使用するモータードライバーの電気-熱連成シ ミュレーション用モデル

電気-熱連成シミュレーションをする回路ブロックは、ベクトル制御モデル、 基板モデル、インバーター駆動回路、ヒートシンクモデル、モーターモデル で構成されており、インパーター駆動回路にあるパワー MOSFETの SPICE モデルには、熱モデルが付加してある。

Electrothermal circuit simulation model for three-phase brushless motor driver using MOSFETs



図8. モーターの測定結果

時間変化とともに、モーター回転速度や、モータートルク、モーター電流 波形, MOSFETのT_jが, モーター速度指令値に沿って変化しているのが 分かる。

Results obtained by simulations of motor driving parameter and MOSFET junction temperature changes over time

これらの技術により、開発での手戻り削減などへの大きな 貢献が可能になってきている。また、今後、シミュレーショ ンの負荷を軽くすることで、様々な顧客が容易に電気-熱連 成シミュレーションを実施できるように、更なる改良を行って いく。

4. あとがき

車載用アナログICにおける, EMC・熱設計に対するフロ ントローディング技術の開発環境を構築した。

現在は、ディスクリートパワーデバイスも含めた、フロント ローディング技術の開発を進めている。今後も、EMCと熱 のシミュレーション時間を更に短縮する手法などを検討し, 顧客のECU開発に貢献していく。

文 献

- (1) Taniguchi, K. et al. "Susceptibility Evaluation of CAN Transceiver Circuits with In-Place Waveform Capturing under RF DPI". Proc. The 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo). St. Petersburg, Russia, 2017-07, IEEE. 2017, p.59-63.
- (2)Tsukioka, A. et al. "Simulation Techniques for EMC Compliant Design of Automotive IC Chips and Modules". 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). Angers, France, 2017-09, IEEE. 2017, p.420-425.
- (3) 大藏厳太郎. 車載用電子制御ユニットの高性能化と小型化に貢献する 新世代LV-MOS. 東芝レビュー, 2014, 69, 8, p.16-19.
- (4) 山口正一, ほか, エネルギー利用率の向上に寄与する半導体デバイスの 歩みと今後の動向、東芝レビュー、2017、72、5、p.2-7、<http:// www.toshiba.co.jp/tech/review/2017/05/72_05pdf/a02.pdf>, (参照 2018-07-06)



江上 孝夫 EGAMI Takao 東芝デバイス&ストレージ(株) 車載戦略部 Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



小松 輝充 KOMATSU Terumitsu 東芝デバイス&ストレージ(株) ミックスドシグナル IC 事業部

アナログ開発第二部 Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.

伊見



仁 IMI Hitoshi 東芝デバイス&ストレージ(株) 半導体研究開発センター パッケージソリューション技術開発部 Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.

永田 真 NAGATA Makoto, D.Eng. 神戸大学 大学院 科学技術イノベーション研究科 教授 博士(工学) 電子情報通信学会·応用物理学会·IEEE· エレクトロニクス実装学会会員 Kobe Univ. Graduate School of Science, Technology and Innovation