

家電製品から送配電機器まで省エネに貢献するIGBT

IGBTs and IEGTs to Achieve Energy Saving in Various Applications from Home Appliances to Power Transmission and Distribution Equipment

中村 和敏 NAKAMURA Kazutoshi 早瀬 茂昭 HAYASE Shigeaki 小林 俊章 KOBAYASHI Toshiaki 子迫 修司 KOSAKO Shuji

IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスター）は、家庭用調理器具などの家電製品から電力分野の送配電機器まで様々な用途に使用されている。家電製品では、エアコンなどのモーター駆動装置や、電子レンジ・誘導加熱（IH：Induction Heating）調理器などにIGBTが、電力送配電分野では、高圧直流送電（HVDC）用などにIEGT（Injection Enhanced Gate Transistor）が、幅広く使用され、省エネのキーデバイスとして更なる低損失化が求められている。

東芝デバイス&ストレージ（株）は、家電製品用として数十kHzの周波数で動作する電圧共振用IGBTや、高耐圧で、導通損失低減が可能なIEGTなど、用途に合わせて構造を最適化した製品を開発した。その結果、従来製品と比べて電圧共振用IGBT製品では放射ノイズを低減しながら26%のスイッチング損失低減を、IEGT製品ではこれを適用したインバーターにおいて31%の損失低減を、実現している。

Insulated gate bipolar transistors (IGBTs) are widely used in various applications ranging from home appliances including motor drive units for air conditioners, microwave ovens, and induction heating (IH) cookers to equipment for electric power transmission and distribution systems. Moreover, due to the expansion of renewable energy systems, attention is being focused on injection-enhanced gate transistors (IEGTs), which can play a key role in energy saving for high-voltage DC (HVDC) power transmission systems due to their lower power loss.

In response to these diverse needs, Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has developed the following products by optimizing the structures of the respective devices: (1) voltage-resonant type IGBTs that can operate at switching frequencies of several tens of kHz for equipment such as home appliances, and (2) press-pack IEGTs with a high breakdown voltage and reduced conduction loss. The newly developed voltage-resonant type IGBTs achieve a 26% reduction in switching loss while also reducing noise compared with our previous products. Inverter systems using the newly developed press-pack IEGTs achieve a 31% reduction in loss compared with systems using our previous press-pack IEGTs.

1. まえがき

近年、持続可能な社会を実現するために、エネルギーを効率的に利用し、省エネに貢献するパワーエレクトロニクス技術への期待が高まっている。このような中、産業や、民生、自動車、インフラなどの幅広い分野の電力変換装置に用いられるパワーデバイスの需要が拡大している。

IGBTは、MOS（金属酸化膜半導体）ゲートによる電圧駆動とバイポーラ動作による低いオン電圧 $V_{ce(sat)}$ を両立したパワーデバイスである。他のパワーデバイスであるサイリスタより動作周波数が高く、パワー MOSFET（MOS型電界効果トランジスター）より大きい電力を制御できる。東芝デバイス&ストレージ（株）は、電子注入促進（IE）効果により低損失化したIEGT製品を開発し、IGBT製品と併せて、幅広い用途に提供してきた（図1）。

IGBT、IEGTの特性を向上させるためには、主に①チップ厚の調整、②MOS構造の改善、③ホール注入量の最適化が挙げられる（図2）。特に、②MOS構造の改善として

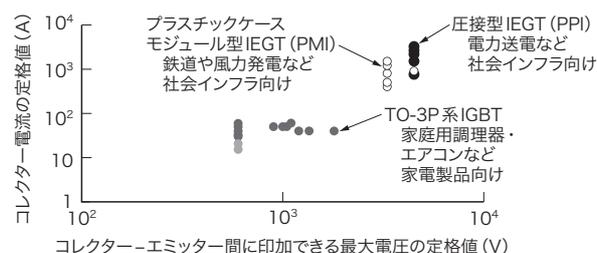


図1. 東芝のIGBT及びIEGTの定格

IGBT及びIEGTの幅広い製品を提供している。

Rated ranges of Toshiba IGBTs and IEGTs

は、ゲート-エミッター間容量 C_{ge} とゲート-コレクター間容量 C_{gc} の最適化によるスイッチング損失低減や、IE効果やチャネル抵抗の最適化による $V_{ce(sat)}$ 低減があり、用途によって設計指針が異なる。

ここでは、家電製品向け電圧共振用IGBTと、高圧直流送電向けIEGTの、MOS構造の改善による損失低減について述べる。

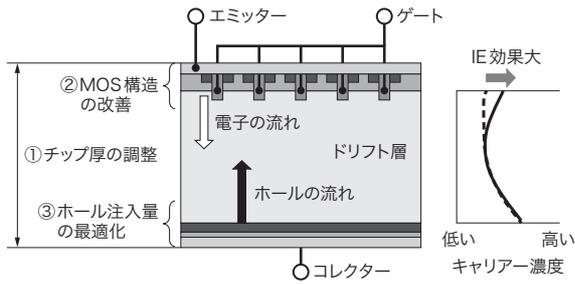


図2. IGBTとIEGTの特性向上のためのデザインパラメーター

IGBTとIEGTの特性を向上させるためのデザインパラメーターは、主に、①チップ厚の調整、②MOS構造の改善、③ホール注入量の最適化の三つである。

Design parameters to improve characteristics of IGBT and IEGT

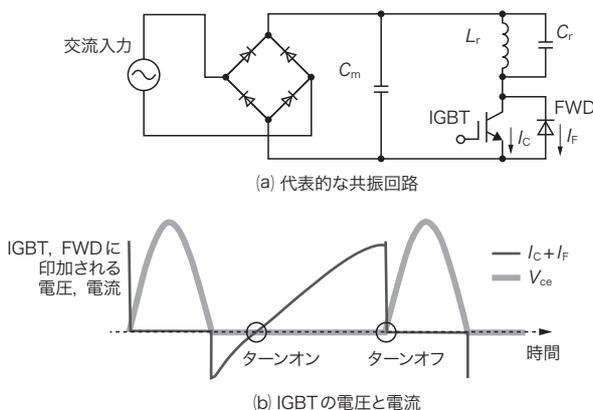
2. 家電製品向け電圧共振用IGBTの低損失化

2.1 電圧共振回路

電圧共振回路は、IH調理器や電子レンジなどの家電製品に应用されている。代表的な回路は、ダイオードブリッジ、共振用コイル L_r と共振用コンデンサー C_r の並列回路、スイッチング用IGBT、及びFWD (Free Wheeling Diode) で構成される (図3(a))。図3(b)は、スイッチング用IGBT及びFWDに印加される電圧と電流を示す。電流が負の期間は、並列に接続されたFWDに電流が流れる。図のように、スイッチング時に電流若しくは電圧を低く抑えることで、スイッチング損失を低減している。

2.2 従来製品の課題と対策

EMI (電磁干渉) の放射ノイズは、IGBTのスイッチング



C_m : 平滑コンデンサー I_f : FWDを流れる電流
 V_{ce} : コレクター-エミッター間電圧

図3. IGBTを用いた電圧共振回路の応用例と動作波形

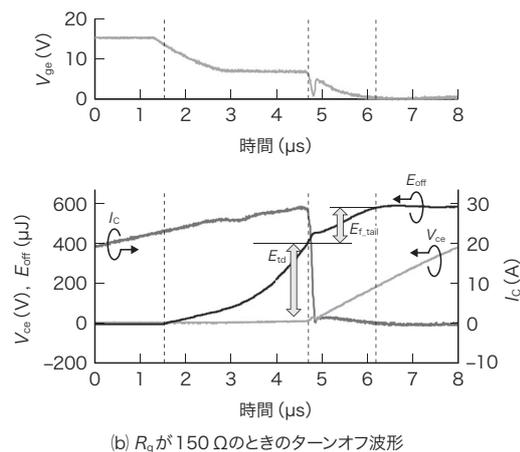
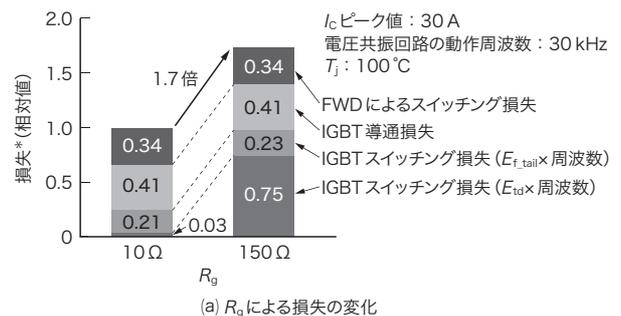
IGBTは、IH炊飯器や、IH調理器、電子レンジなどの共振回路に使用される。

Example of voltage-resonant circuit using IGBT and its operating waveform

動作で発生しやすく、周辺のデバイスや機器の誤動作などにつながる。電気用品安全法の改正により放射ノイズの規格が厳格化され、特に170 MHz未満のノイズを抑える必要がある。IGBTを駆動するゲート抵抗 R_g を大きくすることでスイッチング速度を低下させ、ノイズを抑制できるが、逆に損失悪化を招く。

IGBTの従来製品GT60PR21では、ゲート抵抗 R_g を10Ωから150Ωにすることで、ノイズを規格内に抑えたが、トータル損失が1.75倍に悪化した (図4(a))。IGBTの導通損失(0.41)に対してスイッチング損失(0.98)は約2.4倍と大きく、高周波動作が必要なこの用途において、スイッチング損失の低減が重要であることが分かる。ターンオン損失はIGBTのコレクター電流 I_c 、電圧がほぼゼロの状態でのスイッチングであるため、ターンオフ損失に比べて十分小さい。

図4(b)に、 R_g が150Ω、ジャンクション温度(T_j)が125°CにおけるGT60PR21のターンオフ波形例を示す。 V_g がほ



V_g : ゲート-エミッター間電圧 E_{off} : 1回当たりのターンオフ損失
 * R_g が10Ωのときの損失の合計を1として規格化

図4. 従来製品を用いた電圧共振回路の損失シミュレーション結果とターンオフ波形

放射ノイズを抑制するために R_g を大きくすると、従来製品は、ミラー期間中のスイッチング損失が大幅に増える。

Loss simulation and turn-off waveform of voltage-resonant circuits using previous IGBT products

ば一定となるミラー期間を含む、ゲート電圧 V_g が 15 V の 90% になってから I_C がピーク値の 90% になるまでの期間に発生するスイッチング損失 (E_{td}) と、その後ターンオフするまでの期間の損失 (E_{tail}) とを比較すると、 E_{td} が大きいことが分かる。そこで、 R_g を低減しても放射ノイズが規格内であること、及び E_{td} を低減することの二つの条件を満たすように、MOS 構造を最適化した。

2.3 放射ノイズの低減

図5は、二つの異なる MOS 構造 (チップサイズ、裏面構造、チップ厚は同一) のオン状態における、電子と正孔の濃度のシミュレーション結果である。タイプAは、タイプBより IE 効果を促進することで表面のキャリアー濃度を増やしており、導通損失の観点では優れている。

図6は、市販の卓上型 IH 調理器に、試作したタイプAとタイプBの素子を搭載し、 R_g はともに 62Ω として、放射ノイズを測定した結果である。タイプBは、30 MHz で約 5 dB μ V/m 以上の放射ノイズを抑制できることが分かる。IGBT では、ホール電流がコレクター電極からゲート電極付

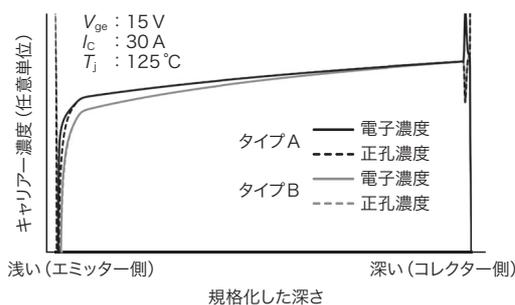


図5. シミュレーションによるオン状態のキャリアー分布

二つの異なる MOS 構造の、オン状態における電子と正孔の濃度のシミュレーション結果を示す。タイプAの方が表面のキャリアー濃度を高く設計しているため、導通損失が小さい。

Simulated on-state carrier distribution

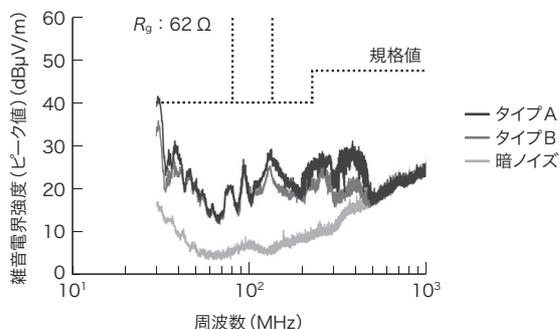


図6. 二つの MOS 構造の放射ノイズ比較

表面のキャリアー濃度を高めたタイプAの方が放射ノイズは大きい。

Comparison of radiated noise using two different surface structures

近を流れるため、ホール電流によってゲート電極に電荷が誘起され、 V_g に影響を与えることが知られている⁽¹⁾。このことから、タイプAの方が表面のホール濃度が高いため V_g の変動が起きやすく、最終的に I_C に影響を与え、放射ノイズが悪化したと考える。

以上より、ノイズ低減の観点では、IE 効果を抑制した MOS 構造の方が適していることが分かった。

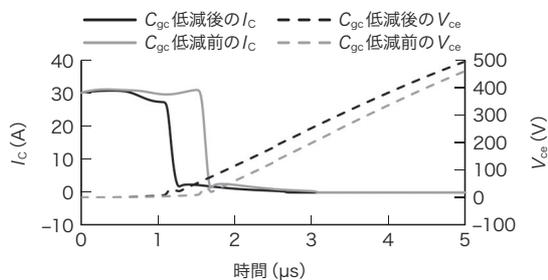
2.4 ミラー期間中の損失低減

電圧共振回路のターンオフ動作において、 C_r の作用で V_{ce} の上昇が抑制される。そのため、ハードスイッチングの用途とは異なり、スイッチング初期ではドリフト層の空乏化が十分に促進されず、 C_{gc} は低下しにくい。このことから、ミラー期間を短くするためには C_{gc} の低減が有効である。

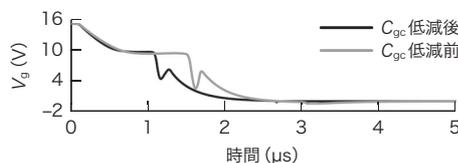
図7は、 C_{gc} 低減による E_{td} 改善効果のシミュレーション結果である (チップサイズ、裏面構造、及びチップ厚は同一)。 C_{gc} 低減のためにトレンチ形状などを最適化した。 C_{gc} 低減により、 E_{td} が約 27% 低減することを確認した。

2.5 最適化した新製品と従来製品との比較

IE 効果と C_{gc} の調整により、放射ノイズとスイッチング損失の両方を低減した。IE 効果を抑制すると導通損失が大きくなるため、チップ厚の最適化により、同一 $V_{ce(sat)}$ で従来



(a) I_C と V_{ce} の比較



(b) V_g の比較

項目	ミラー時間 (C_{gc} 低減前を1としたときの比率)	E_{td} (C_{gc} 低減前を1としたときの比率)
C_{gc} 低減前	1	1
C_{gc} 低減後	0.65	0.73

(c) ミラー時間と E_{td} の比較

図7. C_{gc} 低減によるターンオフ波形の比較

C_{gc} を下げることで、ミラー期間中の損失を低減する。

Comparison of simulated turn-off waveforms with and without gate-collector capacity reduction

製品に比べてスイッチング損失を低減した。更に、FWDはIGBTチップ内に一体形成(RC-IGBT: Reverse Conductive IGBT)した。ドリフト層をIGBTとFWDで共有化することで、別々に形成する場合よりチップサイズを縮小できた。図8(a)は、従来製品GT60PR21と新製品GT30J110SRAの1回当たりのターンオフ損失 E_{off} を、 $R_g=150\ \Omega$ で比較したものである。GT30J110SRAは、ほぼ同一の $V_{ce(sat)}$ で、 E_{off} を従来製品に比べて26%低減した。GT30J110SRAの放射ノイズは、 $R_g=62\ \Omega$ でも規格内に入っていることを確認しており(図8(b))、 R_g に62 $\ \Omega$ を適用することで、更に E_{off} を低減できる。

3. HVDC向けIEGTの低損失化

3.1 HVDC

電力送配電分野では、大容量・長距離送電の高効率化に適した方式として、世界中でHVDCの導入が進んでいる。従来の高圧交流送電と比較して、陸上送電で800 km以上、海底ケーブル送電で50 km以上の送電距離では、HVDCがコスト的に有利である。HVDCシステムには、スイッチング素子にサイリスターを用いた他励式と、IEGTなどの電流遮断能力を持つ素子を用いた自励式がある。これまでのHVDCシステムは他励式が主流であったが、自励式に

は、有効電力とは独立して無効電力を制御できることや、ブラックスタートが可能であること、多端子化が容易であるなどの特長があり、近年採用が進んでいる。

このような中、当社は、両面冷却による高い冷却能力と気密封止による耐候性を持つ圧接型IEGT(PPI)の製品化に注力してきた。最新の製品では大電流・低損失特性を実現し、自励式としては世界最大規模の $\pm 800\ \text{kV}$ 、5 GWのHVDCシステムに採用された。

3.2 MOS構造の最適化

図9に、PPIの構造を示す。PPIは、ボンディングワイヤを用いず、銅電極に複数のチップを並列に圧接することで電氣的に接続している。両面から放熱できるためパワー密度の向上が可能であり、また回路がオープンになるおそれが少ないという特長がある。はんだやボンディングワイヤによる接続がないため、熱疲労による劣化が少なく、高い信頼性を実現している。

IEGTは電圧定格が高く、ドリフト層の抵抗がチャネル抵抗に比べて非常に大きいため、バイポーラー動作を重視した設計を行い、導通損失を抑えることが重要である。図10は、シミュレーションによるオン状態のキャリア分布を示したものである。従来製品では、表面領域のキャリア濃度

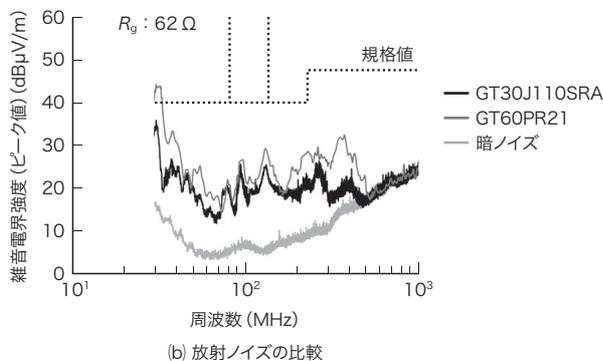
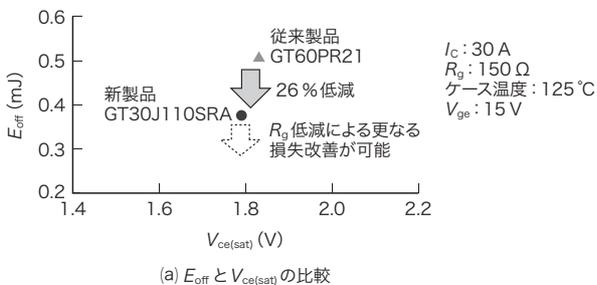


図8. 新製品と従来製品とのターンオフ損失と放射ノイズの比較
新製品は、ほぼ同一の $V_{ce(sat)}$ で、従来製品に比べて E_{off} を26%低減した。
Comparison of turn-off loss and radiated noise of previous and newly developed IGBTs

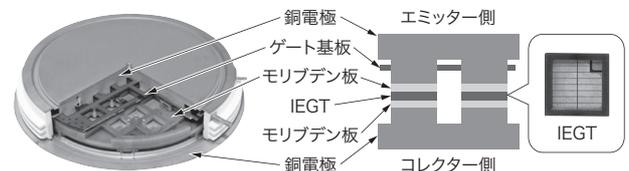


図9. PPIの構造

圧接により、複数のチップを電氣的に並列接続することで、パワー密度と信頼性の向上を実現している。
Structure of pressure-contact type IEGT

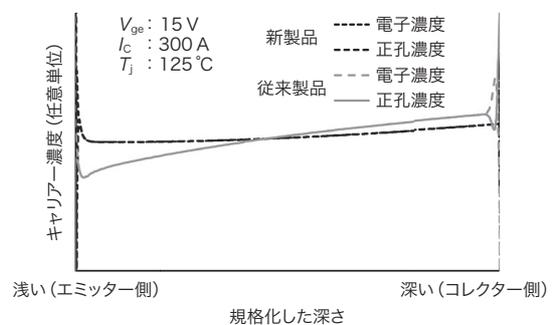


図10. シミュレーションによるオン状態のキャリアー分布

従来製品と新製品のオン状態のキャリアー分布を比較すると、新製品の方が表面領域のキャリアー濃度が高い。
Simulated vertical carrier distribution in on-state

項目	新製品 ST3000GXH31A	従来製品 ST3000GXH24A
$V_{ce(sat)}$ (V)	2.5	3.5
E_{on} (J)	11.6	22
E_{off} (J)	19.7	17

E_{on} : 1回当たりのターンオン損失

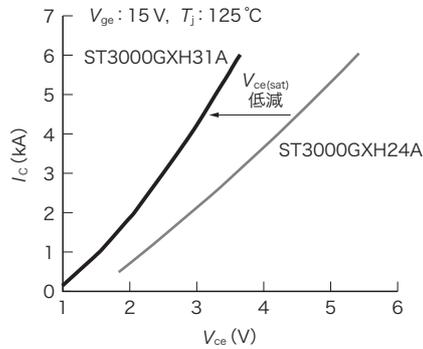


図11. 新製品ST3000GXH31Aの電気特性

従来製品に比較して、大幅に $V_{ce(sat)}$ を低減させた。

Electrical characteristics of newly developed ST3000GXH31A IEGT

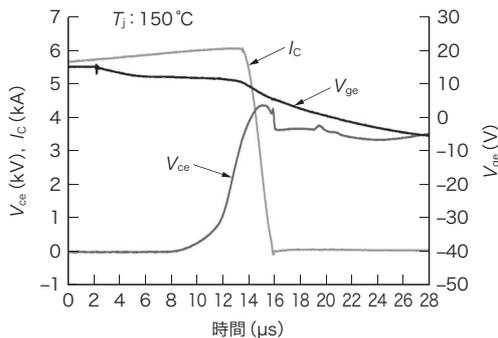
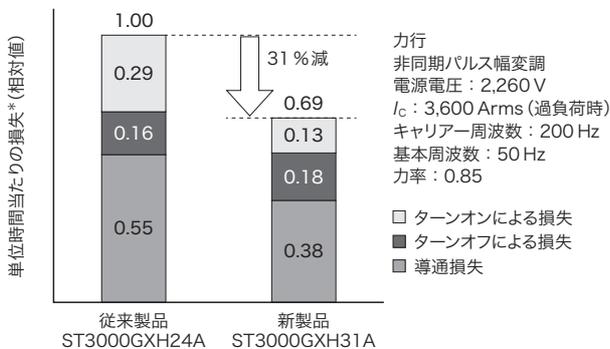


図12. ST3000GXH31Aのターンオフ波形

定格の2倍の電流値におけるターンオフ波形であり、問題なく遮断できている。

Turn-off waveform of ST3000GXH31A (double rated collector current)



*従来製品の損失の合計を1として規格化

図13. 従来製品とST3000GXH31Aとの損失比較

新製品ST3000GXH31Aは、従来製品に比較して、2レベルインバーターのトータル損失が31%低減された。

Comparison of loss of previous product and ST3000GXH31A

が低下しており、抵抗が高かった。そこで、IE効果をより促進させるため、トレンチ構造を採用し、表面のキャリア濃度を上昇させた。この結果、従来製品より大幅に $V_{ce(sat)}$ を低減させた製品を実現した(図11)。

一方、キャリア濃度を高めると、遮断耐量が低下する。この問題も、キャリア分布の最適化で解決した。図12は、定格の2倍にあたる電流値のターンオフ波形であり、問題なく遮断できている。

HVDCでは、比較的低いキャリア周波数で使用するため、 $V_{ce(sat)}$ の低減が、インバーター動作時の損失改善に有効である。図13に示すように、2レベルインバーターのトータル損失を、従来製品に比べて31%低減した。

4. あとがき

家電製品向けの電圧共振用IGBTと、送配電機器向けのHVDC用IEGTのそれぞれにおいて、主にMOS構造に着目して用途に合わせた改善を行い、損失を低減した技術について述べた。

今後も、用途に合わせて最適化した製品を市場に提供することで、省エネ化に貢献していく。

文献

- (1) Omura I. et al. Oscillation effects in IGBT's related to negative capacitance phenomena. IEEE Trans. Electron Devices. 1999, 46, 1, p.237-244.



中村 和敏 NAKAMURA Kazutoshi
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部
ハイパワーデバイス技術部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



早瀬 茂昭 HAYASE Shigeaki
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部
ハイパワーデバイス技術部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



小林 俊章 KOBAYASHI Toshiaki
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部
ハイパワーデバイス技術部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



子迫 修司 KOSAKO Shuji
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部
姫路半導体工場 技術部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.