自動車に使われるパワーデバイス

高良昭彦*1·横尾秀和*2·櫻井秀樹*1.4·鈴木英夫*3

Power Devices Used in Automobiles Technology

Akihiko KOHRA^{*1}, Hidekazu YOKOO^{*2}, Hideki SAKURAI^{*1,4} and Hideo SUZUKI^{*3}

*1 Institute of Semiconductor and Electronics Technologies, ULVAC, Inc., 2500 Hagisono, Chigasaki, Kanagawa, 253-8543, Japan
 *2 Advanced Electronics Equipment Division, ULVAC, Inc., 2500 Hagisono, Chigasaki, Kanagawa, 253-8543, Japan
 *2 Advanced Electronics Equipment Division, ULVAC, Inc., 2500 Hagisono, Chigasaki, Kanagawa, 253-8543, Japan

*3 Institute of Semiconductor and Electronics Technologies, ULVAC, Inc., 1220-14, Suyama, Susono, Shizuoka, 410-1231, Japan *4 IMaSS, Nagoya University

Situation surrounding the car industry has changed dramatically. The target of technological development has been shifted to electric vehicle (EV) or full cell vehicle (FCV). Battery, motor and power device represent the most essential technologies for EV and FCV. Power device is a semiconductor element which works as a switch to convert the electric power, e.g., metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) and insulated gate bipolar transistor (IGBT). Most of the current power device technology is based upon silicon (Si) wafer. Silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) attract attention as the next generation due to their high voltage resistant property with low electric resistance, which is suitable for power device. ULVAC works on productivity enhancement of thin Si wafer process equipment, ion implantation equipment for SiC, and process development of activating annealing to form p-type region in GaN power device based upon Magnesium (Mg) ion implantation.

1.) はじめに

昨今,車社会を取り巻く環境が変化してきている。 これまでは、車の快適性や利便性が重要視されていた。 しかし、CO₂ による地球温暖化や高齢化による交通 事故などのため、環境負荷低減や安全性が重要視され てきている。そのため、世界各国で plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), electric vehicle (EV), full cell vehicle (FCV)、等の開発が進められている。 その中で重要な車載部品が電池、モータをコントロー ルする power control unit (PCU) などのパワーエレ クトロニクスである。

2. パワーエレクトロニクスの応用と パワーデバイス

パワーエレクトロニクスとは、交流や直流を各機器 に最適な形に変換する技術であり、Fig.1 のように自動 車や家電など幅広く使用されている。自動車がガソリ ンエンジン車から PHEV, EV などに移行するに伴い、

- *1(株)アルバック 半導体電子技術研究所(〒253-8543 神奈川 県茅ケ崎市萩園 2500)
- *²(株)アルバック 電子機器事業部(〒253-8543 神奈川県茅ケ 崎市萩園 2500)
- *³(株)アルバック 半導体電子技術研究所(〒410-1231 静岡県 裾野市須山 1220-14)
- *4 ImaSS 名古屋大学

バッテリとモータ間の相互の電力変換を適正に行う ために PCU が用いられている。PCU には IGBT が 使われている。Metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) と insulated gate bipolar transistor (IGBT) は、コストパフォーマンスが高く、 機能、性能が良く駆動回路が簡単で壊れにくいため、 パワーデバイスの主役として用いられている。 MOSFET は、小容量で高速でスイッチングする用途 に適している。IGBT は、MOSFET のドレイン側に P 層を追加したデバイス構造であり、大電流高耐圧のア



プリケーションに適している。IGBT は,特性改善の ために微細ゲート構造と薄ウェーハ化の技術開発が進 んでいる。また,低コスト化のために薄ウェーハの大 径化(200mm→300mm)の適用も開始されている。

3. パワーデバイスの材料

パワーデバイスの基板として代表的な物は Si, SiC, GaN があげられる。現在パワーデバイスの主流は, Si であり, Si-MOSFET, Si-IGBT 製品が多数使用されて いる。Si の大きな利点は, ウェーハ cost が低いことで ある。Si ウェーハは, 1 枚数千 ~ 数万円であるが, SiC ウェーハは数万円からと高く, GaN ウェーハに 至っては, 2 インチサイズで数十万と高価である。し かし,次世代のパワーデバイス材料として, Table 1 のようにバンドギャップが大きく, 絶縁耐圧が高く, また電子移動度が大きい SiC や GaN, ダイヤモンドが 期待されている。この特徴を生かして, PCU の小型化, 高効率化が可能であり, 省スペース化, 省エネルギー 化が可能である。

4.) アルバックの取り組み

4.1 Si-IGBT の対応装置

アルバックでは、1997 年より薄ウェーハ対応 IGBT 向けイオン注入装置(150~100µm 厚 Si 薄ウェーハ 対応)を販売している。IGBT の性能向上を目的とし、 デバイスメーカから薄ウェーハの裏面よりフィールド ストップ(Field Stop, FS)層に深い注入層を作る要求 があり駆動電力の損失軽減やスイッチング速度の特性 改善が求められている。アルバックでは、それに対応 したイオン注入装置「SOPHI - 400」(Fig.2)を販売し ている。リン(P)イオンを 2.4MeV のエネルギーで 注入することが可能である。また、本装置では水素 (H)を使用した FS 層の形成も可能であり、約 4µm の深いプロファイルになる。

逆 導 通 IGBT (Reverse Conducting (RC) - IGBT)
 は IGBT とダイオードが1 チップ化になった構造である。
 薄ウェーハの裏面のコレクタ部のp型部をn型に

Material	Band-gap (eV)	Breakdown field (MV/cm)	Saturation speed (xE7cm/s)	Mobility (cm2/Va)
Si	1.1	0.3	1.0	1350
SIC	3.3	2.8	2.2	1000
GaN	3.4	3.0	2.4	2000
Diamond	5.5	>10	1.5	4500

Table 1Physical property comparison of various
semiconductor materials

反転するために低加速・高濃度処理をする要求がある。

従来のイオン注入装置は低加速・高濃度の処理をお こなう場合,処理時間が長くなり生産性が低いという 問題があった。「SOPHI - 400」は加速部に新たにレン ズ機構を搭載し従来比で3倍程度の電流が取得できる ようになり,生産性の向上を実現した。

本装置は 200mm ウェーハで販売しているが,薄 ウェーハ対応 300mm 装置も販売開始する。

また,薄ウェーハ対応スパッタリング装置も量産工 場で数多く使用されている。薄ウェーハの割れを回避 するための Ni 成膜による応力コントロールをする特 長を持つ。こちらの薄ウェーハ対応 300mm 装置 「SME - 300」も販売開始予定である。

4.2 SiC 向けイオン注入装置

SiC は Si よりも拡散係数が非常に小さいため,より 深い領域へ注入を実現するには熱拡散技術は使用でき ない。そのため,高加速注入が必要とされている。また, 4H-SiC 基板を用い高濃度のイオン注入を行った場合, アニール後に結晶が 3C の結晶構造に転移してしまう ため高温で注入する必要がある。ただし,低濃度の注 入を行う場合は 4H の結晶構造を維持していることが 知られている。高温での処理を行う場合はフォトレジ ストが使用できないため,酸化膜マスク等を使用しな くてはならない。低濃度での注入の場合は,工程数が 増えてしまうが,常温注入が可能であるためフォトレ ジストが使用可能である。また,プロセス的には,高 濃度注入の場合は高温注入で処理することでの特性改 善ができることが知られているが,逆に低濃度では低 温で処理した方が,特性が良いことも知られている。





本装置では高温及び冷却プラテンの2つのプラテンが 搭載されており、高温及び常温のプロセスが対応でき るようになっている。

また、本装置の注入エネルギーはシングルイオンを 用い 400keV, トリプルイオンを用いて 1200keV まで の注入が可能となっている。

SiC 用イオン注入装置「IH - 860PSIC」Fig.3 は 2019 年より、イオンソース部の改良により従来の「IH-860PSIC」のビーム電流に対し, 30% 程度の電流アッ プを実現している。また、レンズ機構の改良が行われ 100kV 以下の低エネルギー領域の電流は 200% 程度の 電流増加を達成し、生産性を大幅に改善し「IH-860PSICII | の販売を開始した。

また、本装置は SiC 基板の反り等にも対応できるよ うになっている。

「IH - 860PSICII」は GaN 用イオン注入に対応させ GaN プロセス向けにも販売していく予定である。

	Ion implantation	Anneal
Equipment	IMX-3500 (Magnesium)	HT-RTA59HD
Maker	ULVAC,Inc.	ADVANCE RIKO,Inc.
Main condition	1E19/cm ³ 300nm-box-deep	$1 { m atm}$ N $_2$ Flow, 1300°C

Table 2 Experimental equipment and conditions

4.3 イオン注入による縦型 GaN パワーデバイス

アルバックは、「省エネルギー社会の実現に資する 次世代半導体研究開発」というテーマで名古屋大学と 共同で開発を行い、G a Nパワーデバイス市場の拡大に 備えている。その中で Mg イオン注入による縦型 GaN p 型層の形成のために、ドーパントの活性化技術につ いて検証を行っている。

Mg イオン注入後にドーパントの活性化や、注入に よって発生した結晶欠陥の回復のためにアニールを 行っているが、常圧下では GaN が熱分解して窒素が抜 ける問題がある。本稿では、世界で初めて成功した超 高圧高温アニールでの p 型活性化について報告する。

4.3.1 活性化アニールと GaN 分解時の温度圧力状態

Table 2 に示す装置を利用して, GaN 基板にイオン 注入を行い,常圧下で活性化アニールを行った。アニー ル後は, Fig.4 のように GaN が熱分解して, 表面荒れ が発生し無数の Ga の塊が見られた。

Fig.5 に GaN の温度圧力状態図¹⁾を示す。図からも 分かる通り常圧で行う活性化アニール領域(1200℃付 近)は、GaN がガリウムと窒素に分解している領域で ある。



22



4.3.2 Mg+Nイオン注入と超高圧アニール

イオン注入装置を用いて、GaN に Mg イオン注入を 行い、保護膜無しで超高圧高温アニール装置を用いて 活性化アニールを行った。アニール後のサンプルの低 温カソードルミネッセンス(Cathode luminescence, CL)測定を行った結果では、Fig6²⁾のように Mg 活性 化の指標であるドナーアクセプタ対(Donor acceptor pair, DAP)強度が顕著に増加していた。また、窒素 空孔指標であるグリーンルミネッセンス(Green luminescence, GL)は、DAP の peak と比較してほと んど無視できるレベルであった。さらに、Mg+N イ オン注入と超高圧 N2 アニールの組み合わせを行うこ



とによって, GL を抑制したまま DAP 強度がより増加 する。Mg のイオン注入に N を共注入することによっ て, 窒素空孔 (Nitrogen vacancy, VN)の欠陥補償が 可能である。

4.3.3 Mg+N イオン注入と超高圧 N2 アニールの 電気特性

Mg+N イオン注入と超高圧 N2 アニールを行った GaN 基板上に電極を形成して, pn ダイオード作製に よる I-V 特性確認を行った。Fig.7²⁾のように整流特性 と EL 発光を確認でき, キャリアが形成されているこ とが分かった。また, ホール効果測定では, Mg イオ



23



ン注入と超高圧アニールにより活性化され,アクセプ タが形成されていることが実証された。

ホール効果測定の温度依存性を Fig8²⁾ に示す。キャ リア濃度,移動度ともに p 型 GaN エピ膜と同等の傾 向を示した。

4.)まとめ

自動車におけるパワーデバイスの占める領域が大き くなっている。その中でアルバックは、Si-IGBT デバ イス、SiC デバイスなどのパワーデバイスの作製に必 要なイオン注入装置の販売を行っている。また、GaN デバイス向けには、イオン注入を用いた活性化プロセ スの検証を行っており、社会に貢献するため、未来に 向けた装置開発を行っている。

文 献

- 1) J. Karpinski et al.: J.Cryst.Growth 66, (1984)1
- 2) H. Sakurai, M. Omori, S. Yamada, Y. Furukawa, H. Suzuki, T. Narita, K. Kataoka, M. Boćkowski, J. Suda and T. Kachi: Advanced Program, Int. Workshop on SPIE2019 PHOTNICS WEST OPTO Session6: Doping 10918-30