

課題番号 : F-13-TT-0039
 利用形態 : 技術代行
 利用課題名 (日本語) : 単結晶 Si 及び SiC を用いた自己冷却デバイスの開発
 Program Title (English) : Development of self-cooling device using single-crystalline Si and SiC
 利用者名 (日本語) : 中津川 博
 Username (English) : H.Nakatsugawa
 所属名 (日本語) : 横浜国立大学大学院工学府システム統合工学専攻
 Affiliation (English) : Graduate School of Engineering ,Division of Systems Integration ,Yokohama National University

1. 概要 (Summary)

自己冷却デバイスは、金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)や絶縁ゲート型電界効果トランジスタ(IGBT)などのパワーデバイスからの発熱を低減化する為に提案され研究開発がなされてきた[1-6]。今回、我々は N 型単結晶 4H-SiC ウェハを用いた自己冷却デバイスを開発し、50A の電流を印加した時、パワーMOSFET 上部の平均温度が 3.4°C低減されることを確認した。これは、4H-SiC ウェハが自己冷却デバイスの候補材料の一つとして有力であることを示唆している。

2. 実験 (Experimental)

自己冷却デバイスは、市販のパワー MOSFET (IRF1324PbF, オン抵抗: 1.8mΩ: International Rectifier 社製) と (0001)面の単結晶 N 型 4H-SiC を組合せて構成されている。用いた単結晶 N 型 4H-SiC は 0.01 Ω cm~0.1 Ω cm の範囲の低抵抗ウェハであり、直径 50.8 ± 0.38mm、厚さ 330 μ m のウェハである。基板両表面、即ち、Si 面と C 面は化学機械研磨技術を用いて鏡面仕上げが施されている。オーミック接合を形成する為に、以下の手順で両表面に電極が設置された。両表面加工は豊田工業大学 ナノテク支援プラットフォームを利用して実施された。80°C10 分の条件で SCI 洗浄後、超純粋流水洗浄 5 分、1 分弱の DHF 浸漬、超純粋流水洗浄 5 分、150°C30 分乾燥、その後、1150°C24 時間ドライ O₂ の条件でウェハ酸化し、バッファード HF 液(BHF)浸漬 2 分の条件で熱酸化膜除去して、超純粋流水洗浄 5 分、150°C30 分乾燥した。洗浄処理された両表面に 300nm の膜厚で両面 Ni スパッタを施し、4H-SiC 基板と Ni 電極との間のオーミック接合を保持する為、清水長金属工業において、真空 1 分 1000°C の条件でアニーリング処理がなされ、両面銅鍍金処理が施された。

Fig.1 にパワー MOSFET と両表面に電極設置された

4H-SiC の I-V 特性を示す。パワー MOSFET と両表面に電極設置された 4H-SiC の抵抗値がそれぞれ 1.81mΩ と 0.55mΩ であり、特に、4H-SiC 基板と Ni 電極との間の良好なオーミック接合が保障され、ショットキー障壁の形成を考慮する必要の無いことが、防衛大学校において、確認された。

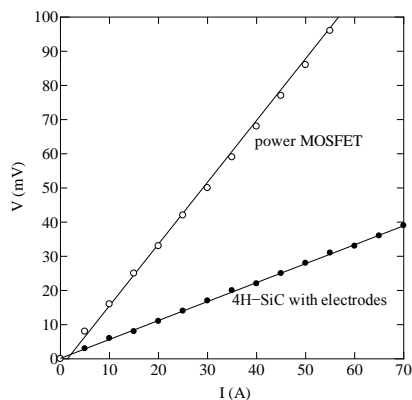


Fig 1. Current-voltage characteristic of power MOSFET and 4H-SiC with electrodes on both surfaces.

室温における 4H-SiC ウェハの電気伝導率(σ)、ゼーベック係数($|S|$)、熱伝導率(κ)はそれぞれ、 $\sigma = 62$ S/cm、 $|S| = 405 \mu$ V/K、 $\kappa = 490$ W/mK である。Fig.2 に、(a)自己冷却デバイスの評価に用いた実験装置、(b)パワー MOSFET のみ場合の概略図、(c)パワー MOSFET と N 型 4H-SiC ウェハを取り付けた場合の概略図を示す。パワー MOSFET、あるいは、パワー MOSFET と N 型 4H-SiC ウェハはフィンと水冷ヒートシンクとの間に固定された。ここで、フィン実験の最中はファンで空冷され続けている。白い矢印はゲート-ソース間に 10V の電圧を掛け、電流($I = 40$ A or 50A)が流れる方向を表している。冷却水循環装置(CA-1112; EYELA 製)を用いて、水冷ヒートシンク中の循環水の水温は約 3°C一定に保たれている。この実験系では、直流電源 (EX-1500L2; 高砂製作所製)を用いて白い矢印の方向

に電流が流れ、ペルチェ熱流と熱伝導はパワーMOSFET からファンで空冷されているファンによって構成される上部に移動している。勿論、熱伝導はパワーMOSFET から水冷ヒートシンクによって構成される下部にも移動している。自己冷却デバイスがパワーMOSFET から排熱されるジュール熱を除去するかどうかを検証する為に、赤外線サーモグラフィ (TVS-200EX; NEC Avio 製) を用いて温度分布の時間依存性を 10 分毎 1 時間測定し、InfReC analyzer (NS9500; NEC Avio 製) ソフトウェアを用いて赤外線サーモグラフィの画像データを解析した。パワーMOSFET と N 型 4H-SiC ウェハのジュール熱を見積もる為、ドレイン-ソース電極間の電圧 V_{DS} も同時に測定した。

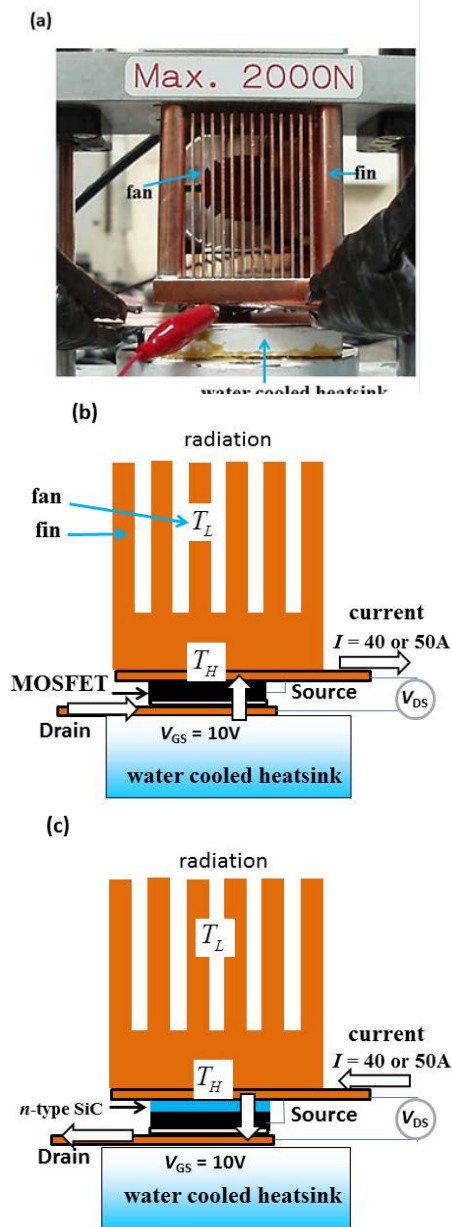


Fig 2. Experimental setup using self-cooling device measurements.

3. 結果と考察 (Results and Discussion)

自己冷却デバイス内部の熱輸送を一次元モデルを用いて見積もると、ペルチェ効果、ジュール熱、熱伝導によって示される冷却部での熱流束 Q は(1)式で与えられる。

$$Q = |S| T_H I - \frac{1}{2} R I^2 + K (T_H - T_L) \quad (1)$$

ここで、 I 、 R 、 K は、それぞれ、電流、抵抗、冷却部での熱コンダクタンスである。熱流束 Q を見積もる為に、 $|S| = 405 \mu\text{V/K}$ 、 $R = 1.81 \text{ m}\Omega + 0.55 \text{ m}\Omega$ 、 $T_H = 290\text{K}$ 、 $T_L = 289.5\text{K}$ 、 $\kappa = 490 \text{ W/mK}$ 、4H-SiC の厚さ $330\mu\text{m}$ 、そして冷却部の接触面積 16mm^2 を考慮に入れると、

$$Q = 0.117[\text{V}]I - 1.18[\text{m}\Omega]I^2 + 11.9[\text{W}] \quad (2)$$

を得る。Fig.3 に示す通り、冷却部での熱流束 Q は電流 I に関する放物線の関数になるので、冷却に寄与する熱流束の最大値は $I = 50\text{A}$ と解析的に見積もられる。

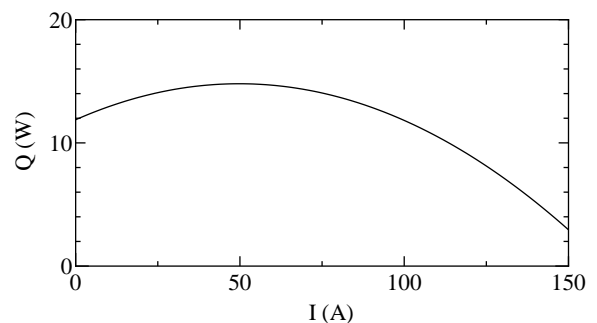


Fig 3. Heat flux Q as a function of electric current I .

Fig.2(b)に示す通り、パワーMOSFET はフィン(上部)と水冷ヒートシンク(下部)との間に固定されている。50A の電流は、パワーMOSFET のゲート-ソース間に 10V の電圧の下で、ドレイン電極からソース電極の方向へ流れている。パワーMOSFET によって発生するジュール熱は 4.53W と見積もられる。実際、ドレイン-ソース電極間の電圧 V_{DS} は 0.09V で一定である。パワーMOSFET 上部と下部の温度の時間依存性を Fig.4 に示した。パワーMOSFET 上部と下部の平均温度はそれぞれ 27.2(5)°C と 7.9(4)°C である。ここで丸括弧内の数字は標準偏差を表している。

Fig.2(c)に示す通り、N 型 4H-SiC とパワーMOSFET も同様にフィン(上部)と水冷ヒートシンク(下部)との間に固定され、50A の電流が上部から下部の方向へ流れている。パワーMOSFET と N 型 4H-SiC によって発生するジュール熱は 5.90W と見積もられる。実際、ドレイン-ソース電極間の電圧 V_{DS} は 0.13V で一定である。パワーMOSFET 上部と下部の温度の時間依存性を

Fig.4 に示した。パワーMOSFET 上部と下部の平均温度はそれぞれ 23.8(4)°Cと 8.4(6)°Cである。特に、パワーMOSFET 上部の平均温度が N 型 4H-SiC を付与したパワーMOSFET を導入することで 3.4°C減少した。これは 4H-SiC ウェハが自己冷却デバイスの候補材料の一つであることを強く示唆している。

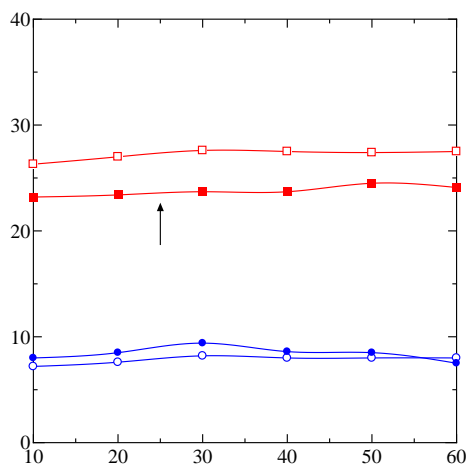


Fig 4. Time dependence of temperatures on the upper side and on the lower side of power MOSFET when $I = 50A$.

4. その他・特記事項 (Others)

参考文献

- [1] S.Yamaguchi, ULVAC **52** (2007) 14.
- [2] H.Nakatsugawa, K.Nagasawa, Y.Okamoto, S.Yamaguchi, S.Fukuda, and H.Kitagawa, J. Electron. Mater. **38** (2009) 1387.
- [3] S.Fukuda, T.Kato, Y.Okamoto, H.Nakatsugawa, H.Kitagawa, and S.Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 031301.
- [4] H.Nakatsugawa, T.Sato, Y.Okamoto, T.Kawahara, and S.Yamaguchi, 9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conference Proceedings **1449** (2012) 548.
- [5] S.Fukuda, Y.Sabi, T.Kawahara, and S.Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 054201.
- [6] H.Nakatsugawa, Y.Okamoto, T.Kawahara, and S.Yamaguchi, J. Electron. Mater. DOI: 10.1007/s11664-013-2856-9 (2013) in press.

用語説明

用語	説明
パワーデバイス	アナログ半導体に属する電力制御用の半導体素子であり、整流ダイオード、パワートランジスタ (Power MOSFET、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT))、サイリスタ、ゲートターンオフサイリスタ (GTO)、トライアックなどがある。

電子冷却 (ペルチェ冷却)	2種類の金属の接合部に電流を流すと、片方の金属からもう片方へ熱が移動するというペルチェ効果を利用した板状の半導体素子。直流電流を流すと、一方の面が吸熱し、反対面に発熱が起こる。電流の極性を逆転させると、その関係が反転し高精度の温度制御に適している。
自己冷却デバイス	パワーデバイスとヒートシンクとの間に P 型もしくは N 型の熱電素子を挟み、P 型素子の場合は上から下へ、N 型素子の場合は下から上へ、パワーデバイス自身に流れる電流を流すことによってペルチェ熱の吸熱と放熱が発生し、熱伝導とペルチェ冷却の両者を利用して冷却を行うシステムである。
熱伝導率	熱伝導において、熱流束密度 (単位時間に単位面積を通過する熱エネルギー) を温度勾配で割った物理量。SI 単位は $W/(m \cdot K)$ であり、 $W/(cm \cdot K)$ も使われる。
電気抵抗率	どんな材料が電気を通しにくいかを比較するために、用いられる物性値である。単に、抵抗率 (resistivity)、比抵抗 (specific electrical resistance) とも呼ばれる。SI 単位は $\Omega \cdot m$ であり、慣例的に $\Omega \cdot cm$ も使われる。
ゼーベック効果	物体の温度差が電圧に直接変換される現象(熱電効果)。逆に電圧を温度差に変換するペルチェ効果もある。

5. 論文・学会発表 (Publication/Presentation)

- (1) H.Nakatsugawa and Y.Okamoto, Solid State Device and Materials (SSDM2014), 平成 26 年 9 月 8 日~11 日 (発表予定日).

6. 関連特許 (Patent)

なし。