熱・電気連成解析による Si パワーMOSFET の発熱特性の検証 Evaluation of Heat Generation of Si Power MOSFET using Electro-Thermal Analysis

○木伏 理沙子 (富山県立大) 正 畠山 友行 (富山県立大) 正 石塚 勝 (富山県立大)

Risako Kibushi, Tomoyuki Hatakeyama and Masaru Ishizuka

Toyama Prefectural University, 5180 Kurokawa, Imizu, Toyama 939-0398

This paper describes thermal and electrical properties of Si power MOSFET. The problem of hot spot in submicron scale Si MOSFET has been widely known. Recently, Si power MOSFET is key device in a lot of area, for example car electronics. In Si power MOSFET, high voltage is applied and high current is generated. Therefore, heat generation becomes higher and thermal management is important. In this paper, thermal and electrical properties of Si power MOSFET is evaluated with Electro-Thermal Analysis and fundamental heat generation phenomenon of Si power MOSFET is discussed. Further, generation of hot spot is also discussed.

Key Words: Si Power MOSFET, Electro-Thermal Analysis, Heat Generation, Thermal Management

1. はじめに

近年、電子機器は小型化・高集積化が進み、熱管理が重要となっている。電子機器内部の主要部品である半導体デバイスの性能は温度依存性が強く、高温では性能が低下する。そのため、半導体デバイスの温度管理は、電子機器発展のために非常に重要である。近年は、カーエレクトロニクスを代表として、多くの産業分野で機器の電子化が進んでおり、そこで用いられるパワー半導体デバイスの熱管理の重要性が増している。⁽¹⁾

本研究では、パワー半導体デバイスとして広く用いられている Si パワーMOSFET に着目し、熱管理のための発熱特性を検証した。論理回路用のサブミクロン Si MOSFET では、内部に数 nm~ μm スケールのホットスポットの発生が知られている。⁽²⁾ Si パワーMOSFET も、動作原理が同様であるため、ホットスポットの発生が懸念される。MOSFET の熱管理の際、通常は MOSFET の平均温度で管理する。そのため、平均温度を上回るホットスポットでは、局所的に誤作動や故障の原因が生じている可能性が否めない。そこで、Si パワーMOSFET の基本的な発熱・電気特性を、熱・電気連成解析を用いて解析し、ホットスポットの発生に關して議論する。

2. 解析モデル

図 1 に解析モデルを示す。モデル上面にソース電極・ゲート電極があり、下面にドレイン電極がある縦型 MOSFET を解析対象とした。ゲート酸化膜厚さは、 $0.1\ \mu\text{m}$ とした。

Fig. 1 Modeled Si power MOSFET

ソース及びドレイン電極近傍の n^+ 領域は、電子数密度を $10^{25}\ \text{l/m}^3$ と設定し、 n^- 領域は $10^{22}\ \text{l/m}^3$ とした。

3. 熱・電気連成解析

サブミクロンスケールの Si MOSFET や、Si パワー MOSFET のように、内部に大きな電界 ($1 \times 10^7\ \text{V/m}$ 以上) が生じるデバイスでは、電子温度と結晶格子温度が非平衡状態となる。そのため、本研究では、この非平衡性を考慮可能な熱・電気連成解析を用いる。支配方程式を以下に示す。⁽²⁾

$$\nabla^2 \phi = \frac{q}{\epsilon} (N_D - n_e - N_A + n_h) \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e \mathbf{v}_e) = -R \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_e m_e^* v_e}{\partial t} - q n_e \nabla \phi + \nabla \cdot (n_e k_B T_e) = \frac{n_e m_e^* v_e}{\tau_m} \quad (3)$$

$$\frac{\partial W_e}{\partial t} + \nabla \cdot (v_e W_e) - q n_e v_e \cdot \nabla \phi + \nabla \cdot (v_e n_e k_B T_e) - \nabla \cdot (\kappa_e \nabla T_e) = -\frac{W_e - W_{e0}}{\tau_E} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_L}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa_L \nabla T_L) = \frac{W_e - W_{e0}}{\tau_E} \quad (5)$$

式 (1) はポアソンの式、式 (2) は連続の式、式 (3) は運動量保存式、式 (4) は電子に対するエネルギー保存式、式 (5) は熱伝導方程式である。 ϕ は電位、 q は素電荷、 ϵ はシリコンの誘電率、 N_D はドナー密度、 N_A はアクセプター密度、 n はキャリア数密度、 t は時間、 $\mathbf{v}$ は速度、 R は生成・再結合、 m^* は有効質量、 k_B はボルツマン定数、 T は温度、 τ は緩和時間、 κ は熱伝導率である。また、下付きの e は電子、 h は正孔、 m は運動量、 E はエネルギー、 L は結晶格子を表す。エネルギー緩和時間は $0.3\ \text{ps}$ で一定とし、運動量緩和時間は移動度から算出した⁽²⁾。 W_e は電子のエネルギー、 W_{e0} は結晶と平衡状態の電子のエネルギーであり、それぞれ以下のように表される。

$$W_e = \frac{1}{2} n_e m_e^* v_e^2 + \frac{3}{2} n_e k_B T_e \quad (6)$$

$$W_{e0} = \frac{3}{2} n_e k_B T_L \quad (7)$$

4. 解析条件

電位の境界条件は、ソース・ドレイン電極で電極電位一定とし、ゲート酸化膜下は酸化膜内部と電界が保存するとした。それ以外は勾配ゼロとした。電子数密度は、ソース・ドレイン電極で初期密度一定、それ以外は勾配ゼロとした。速度は、ソース・ドレイン電極で自由流入出、それ以外は界面に垂直な成分をゼロとした。電子温度は、ソース・ドレイン電極で結晶格子温度と等しいとし、それ以外は勾配ゼロとした。結晶格子温度は、ドレイン電極で 350 K 一定、それ以外は勾配ゼロとした。

以上の境界条件を用いて、ソース電極をグランドとし、ゲート電極に 10 V を与え、ドレイン電圧を変化させて発熱・電気特性の検証を行った。解析は、電子系に対して 250 ps まで解析を行った。

4. 結果及び考察

図 2 に、ドレイン電圧とドレイン電流の関係を示す。ドレイン電圧の上昇に伴って、ドレイン電流は増加する傾向にあるが、ドレイン電圧が 30 V のときピークを迎え、その後減少する傾向にある。MOSFET は一定のゲート電圧の場合、ドレイン電圧の増加に伴いドレイン電流は上昇し、飽和する傾向を示す。そのため、図 2 に見られるドレイン電圧の増加に伴うドレイン電流減少の傾向は、自己発熱によるデバイスの温度上昇がもたらした結果と解釈できる。

Fig. 2 Drain current

図 3 に、ドレイン電圧と最高結晶格子温度の関係を示す。グラフから、ドレイン電圧の増加に伴い、結晶格子温度はほぼ直線的に上昇していることがわかる。結晶格子温度の最大値は、いずれの場合もゲート電極下 p 領域と n 領域の接合部で生じていた。

図 4 に、ドレイン電圧 20 V の場合の、電位、電子数密度、電子温度、結晶格子温度の分布を示す。グラフの底面の x, y が図 1 の x, y に対応している。いずれのグラフも、ソース及びゲート電極近傍の分布を示している。図 4(a)から、ゲート電極下 p 領域と n 領域の接合部において、電位の勾配が大きくなり、大きな電界が発生していることがわかる。図 4(b)から、ゲート電極近傍の p 領域の電子数密度が高くなっており、電子チャンネルが形成されていることが見て取れる。そのため、このチャンネル領域で大きな電流が流れていることが予測される。図 4(c)を見ると、電子温度は電子チャンネル内の大きな電界が生じている部分で、局所的に大きな値を示していることがわかる。また、図 4(d)から、電子温度の高温部位と対応する部分の結晶格子温度が局所的に高くなり、ホットスポットの発生が確認できる。最大電子温度が 900 K を超えているのに対して、結晶格子

温度は 570 K 弱となっている。このことから、電子温度と結晶格子温度が非平衡状態となっていることが確認できる。

Fig. 3 Maximum lattice temperature

Fig. 4 Distribution of electrical potential, electron number density, electron and lattice temperature

以上の結果より、MOSFET の温度上昇に伴いドレイン電流が減少する傾向が見られること、電子温度が局所的に高くなることに起因する結晶格子温度のホットスポットが Si パワー MOSFET においても発生することが明らかとなった。

5. まとめ

熱・電気連成解析を用いて Si パワー MOSFET の発熱・電気特性を検証した。その結果、Si パワー MOSFET においても、サブミクロン Si MOSFET と同様に、ホットスポットが発生することが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、経済産業省の「IT イノベーションプログラム」に基づき、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託された「立体構造新機能集積回路 (ドリームチップ) 技術開発」プロジェクトにおいて実施された。

参考文献

- (1)大曾根, 他, 機論 (B 編), 71-708 (2005), 2147.
- (2)Hatakeyama, T. et al., JTST, 3-1 (2008), 45.