

Al ドープ 4H-SiC 中の最近接ホッピング (NNH) の伝導キャリア ~新しい NNH 伝導機構モデルの提案~

Conduction Carriers in Nearest-Neighbor Hopping (NNH) Conduction in Al-Doped 4H-SiC ~New Conduction Mechanism Model for NNH Conduction~

大阪電気通信大学¹, 産総研 先進パワーエレクトロニクス研究センター²

○(M1) 成田智哉¹, 岩槻光栄¹, 日高淳輝¹, 松浦秀治¹,

紀世陽², 江藤数馬², 児島一聡², 加藤智久², 吉田貞史²

Osaka Electro-Communication University¹, AIST Advanced Power Electronics Research Center²

○Tomoya Narita¹, Mitsuhide Iwatsuki¹, Atsuki Hidaka¹, Hideharu Matsuura¹,

Shiyang Ji², Kazuma Eto², Kazuaki Kojima², Tomohisa Kato², Sadashi Yoshida²

Mail: mf24a010@oecu.jp

1. はじめに

Al 濃度 (C_{Al}) が 10^{19} cm^{-3} 以上の高濃度 Al ドープ p 型 4H-SiC 試料において、p 型半導体にもかかわらず低温領域で Hall 係数 ($R_H(T)$) が負になることが報告されている[1]。そして C_{Al} が $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の 4H-SiC では低温領域で最近接ホッピング (NNH) 伝導が現れる事も分かった。 $R_H(T)$ が負になる事を明らかにするために、NNH 伝導に寄与する伝導キャリアに関して考察した。

2. 実験および結果

Al ドープ p 型 4H-SiC エピ膜試料を CVD 法で n 型 4H-SiC 基板上にエピタキシャル成長させた。 C_{Al} が $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の Al 単独ドープ試料と、 C_{Al} が $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ で N 濃度 (C_N) が $2.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (C_{Al} の 20% 程度の C_N) をコドープした N コドープ試料の 2 種類を作製した。東陽テクニカ製 ResiTest8400 にて 30 ~ 300 K の温度範囲で、van der Pauw 法による抵抗率 ($\rho(T)$) の測定及び、Hall 効果測定による $R_H(T)$ の測定を行った。図 1 に $\rho(T)$ を示す。図 2 に $R_H(T)$ から求めた Hall キャリア密度 ($n_H(T)$) の温度依存性を示す。図 1 より NNH 伝導領域での $\rho(T)$ が、Al 単独試料より N コドープ試料の方が低いこと、かつ温度上昇に従い両試料とも $\rho(T)$ が低下することが分かった。図 2 より両試料ともに NNH 伝導領域で $R_H(T)$ が負であり、温度上昇及び N コドープで $n_H(T)$ が増加することが分かった。

3. 考察

p 型半導体では正孔を伝導キャリアと考える (従来モデル)。この場合、図 3 に示すように温度上昇により正孔がアクセプタ準位 (E_A) から価電子帯へ励起することでアクセプタサイトの正孔密度が減少する。一方、N コドープによりドナー (ドナー準位: E_D) がアクセプタサイトの正孔を捕獲し、アクセプタサイトの正孔密度が減少する。しかし従来モデルでは Hall キャリアを正孔と考えるので、図 2 に示すように (1) $R_H(T)$ が NNH 伝導領域で負になることと、(2) 温度上昇に従って $n_H(T)$ が増加すること及び (3) N コドープにより $n_H(T)$ が増加することが説明できない。そこで、これらの矛盾点を全て定性的に解決できる、新たな伝導機構モデルを提案する。

図 3 に示されている正孔で占有されていないアクセプタサイトは、電子で占有されているアクセプタサイトと同じであるので、図 4 のように電子で占有されたアクセプタサイトを考えることができる。そして、ホッピングの方向 (赤で描かれた矢印) は正孔と電子は反対方向である。新モデルでは、アクセプタサイトで少ない方のキャリアを考える。つまり、NNH 伝導が現れるのは極低温のためフェルミ準位が E_V と E_A との間にあるので、アクセプタサイトでは電子の方が少ない。

新モデルでは NNH 伝導領域でホッピングするのは電子と考えるので、図 2 に示すように $R_H(T)$ は負になる。次に、図 4 に示すように温度上昇によって価電子帯の電子がアクセプタサイトに励起され、図 2 に示すようにアクセプタサイトの電子密度が増加するため、図 1 のように $\rho(T)$ が下がる。さらに、N コドープでも N ドナーの電子がアクセプタに捕獲され、図 2 に示すようにアクセプタサイトの電子密度が増加するため、図 1 に示すように同じ温度でも Al 単独ドープ試料より N コドープ試料の方が $\rho(T)$ は減少する。図 1、図 2 に示すように温度上昇に従って Al 単独試料と N コドープ試料の $\rho(T)$ 及び $n_H(T)$ の差が小さくなる。価電子帯から励起する電子は温度上昇で増加するが、N から提供される電子は温度に関わらず一定のため、温度上昇に伴う電子密度の増加割合が N コドープ試料では Al 単独ドープ試料より小さい。したがって、温度上昇に伴う $\rho(T)$ 及び $n_H(T)$ の差が小さくなることが説明できる。

4. まとめ

NNH 伝導では、ドープドント (ドナーまたはアクセプタ) 準位で少ない方のキャリアが伝導に寄与する伝導機構モデルを提案した。そして、 C_{Al} が $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の p 型 4H-SiC 試料では、電子によるホッピングで考えることで、NNH 伝導領域での実験結果 ($\rho(T)$ 及び $n_H(T)$ の温度依存性および $R_H(T)$ の符号) を矛盾無く定性的に説明できた。

【参考文献】 [1] H. Matsuura, et al.: Materials Science Forum. Vol.963(2019), p. 324.

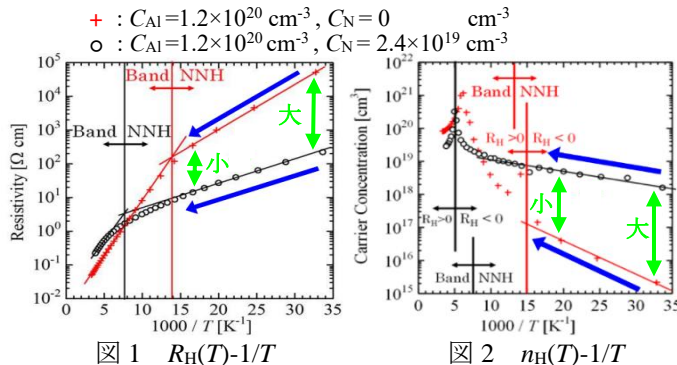


図 1 $R_H(T)-1/T$

図 2 $n_H(T)-1/T$

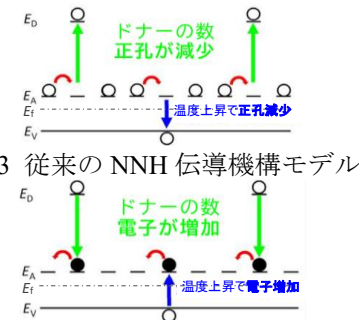


図 3 従来の NNH 伝導機構モデル



図 4 新しい NNH 伝導機構モデル