

物性から見たパワーデバイス用半導体材料

Properties of Semiconductor Materials for Power Devices

○須田 淳 (京大院工)

○Jun Suda (Kyoto Univ.)

E-mail: suda@kuee.kyoto-u.ac.jp

パワーデバイスの最も重要な性能指標は、耐圧(V_b)とオン抵抗(R_{on})である。簡単な考察から両者の関係として次の式(ユニポーラリミット)を導くことができる。

$$R_{on} \cdot A = \frac{4 V_b^2}{\epsilon \mu E_{crit}^3}$$

オン抵抗は絶縁破壊電界(E_{crit})の 3 乗に反比例するので、絶縁破壊電界が大きいワイドギャップ半導体材料は、高耐圧で低オン抵抗なパワーデバイス実現に圧倒的に有利となる。

ところでパワーデバイスの絶縁破壊はなだれ(アバランシェ)破壊であり、絶縁破壊電界という考え方は近似にすぎない。アバランシェ破壊は空乏層内で、インパクトイオン化によるキャリア生成の無限ループが形成されることによる。高電界でも空乏層幅が狭ければループは形成されず絶縁破壊には至らない。耐圧は、単位距離キャリアが電界方向に走行したときに何組の電子-正孔対を生成するかというインパクトイオン化係数(電界強度の関数)という物性値から数値計算(イオン化積分)により求める必要がある。このようにして求めた破壊電圧から、その時の最大電界を見かけ上の絶縁破壊電界としているのである。例えば 4H-SiC では、600V 耐圧では 3.0MV/cm、開発の中心である 1~3kV 耐圧では 2.5MV/cm、超高耐圧の 20kV では空乏層幅は 230 μm と大きくなるため 1.85MV/cm となる[1]。1~3kV の議論をする上では 2.5MV/cm と考えて差し支えないと言える。材料間で絶縁破壊電界を比較する場合には、耐圧を揃えた上で議論しないと正確な比較にはならないので注意が必要である。

材料の良さを最大限に引き出すデバイス設計を行うためにはインパクトイオン化係数の正確な値が必要になる。Si や GaAs などでは詳細に調べられている。測定方法としては、電界集中やリークがない理想的なフォトダイオードを作製し、逆バイアス印加と共にアバランシェ増倍により光電流が増倍される様子を詳細に解析することから求める。講演では京都大学で進めてきた 4H-SiC についての測定結果を紹介したい[1]。

詳細な物性値が分かればその材料のユニポーラリミット、理論限界が明らかになる。次はそれを作製できるかということになる。高耐圧素子を実現するためには、空乏層を広げる必要があり、そのためには低いドーピング密度で所望の厚さのエピ層を再現性良く得る技術が必須となる。ドーピング密度が低くなると、残留不純物、真性点欠陥によるドーピングや補償が問題になってくる。4H-SiC はこの点では大変優等生であり、かなり前から $10^{14}cm^{-3}$ 台のドーピングが制御できている。リアクターや原料ガスにドーパントやトラップとなる不純物が存在しないこと、真性点欠陥密度が $10^{13}cm^{-3}$ 以下と小さいことが幸いしている。一方 GaN に関しては、 $10^{16}cm^{-3}$ 後半が現状のトップデータである。GaN で高耐圧デバイスを実現するためには、不純物の取り込みメカニズムや点欠陥生成などの学理に基づくエピ技術の開発が重要となる。

[1] H. Niwa, J. Suda, and T. Kimoto, "Temperature Dependence of Impact Ionization Coefficients in 4H-SiC," Material Science Forum, 778-780 (2014), 461.