

2012B1292

BL46XU

硬 X 線光電子分光による電子デバイス用 GaAs 表面の状態解析 HAXPES Analysis of GaAs Surface State for Electronics Devices

齋藤 吉広, 鶴見 大輔, 飯原 順次, 富永 愛子, 米村 卓巳, 山口 浩司
Yoshihiro Saito, Daisuke Tsurumi, Junji Iihara, Aiko Tominaga, Takumi Yonemura, Koji Yamaguchi

住友電気工業(株)
Sumitomo Electric Industries, LTD

電子デバイス用砒化ガリウム(GaAs)半導体の表面状態に関し、硬 X 線光電子分光(HAXPES)による分析を行った。特に、GaAs 表面の酸化物が GaAs 電子準位のエネルギーに与える影響について調べるため、酸化物量が異なると予想される 2 つの試料を作製し、Ga_{2p_{3/2}} 及び As_{2p_{3/2}} の光電子スペクトルを 2 水準の取り出し角で測定した。結果として、より多くの表面酸化物が確認された方の試料で、Ga 及び As のいずれのピークも低エネルギー側に 0.2 eV シフトすることが確認された。このシフトは界面近傍に固定された負電荷の存在を示唆しており、GaAs 表面酸化物が電子トラップの起源と推定される。また、酸化物の適切な制御により、耐圧特性に優れた GaAs 高電子移動度トランジスタを実現できるものと期待される。

キーワード： GaAs、HEMT、表面酸化物、SiN_x、硬 X 線光電子分光

背景と研究目的：

GaAs 半導体は、Si に比べて電子移動度が高く、また、半絶縁性基板が実現できるという特長を有している。これらを活かした GaAs 系高電子移動度トランジスタ(GaAs-HEMT)は、携帯端末用などの高出力トランジスタとして不可欠の電子デバイスとなっている。

更なる高出力化を図るには、トランジスタの耐圧向上が必要である。HEMT では電極部以外の GaAs チャンネル表面を、窒化ケイ素(SiN_x)などの絶縁膜で保護する必要がある。この界面状態は、耐圧に大きな影響を与えることが知られている。即ち、絶縁膜/チャンネルの界面に存在する「トラップ」が電子を捕獲し、寄生的に発生した空乏層が耐圧を向上させるという効果が考えられている(図 1 参照)。

従って、界面トラップの制御は重要な技術課題であるが、その実体やメカニズムについては詳細に解明されたとは言えない。そこで本研究では、硬 X 線光電子分光を用いて表面状態の異なる GaAs 試料を分析した。特に今回、トラップの原因の 1 つと言われている GaAs 表面の酸化物に着目し、その多寡により GaAs の電子準位エネルギーがどのような影響を受けるかを調べた。

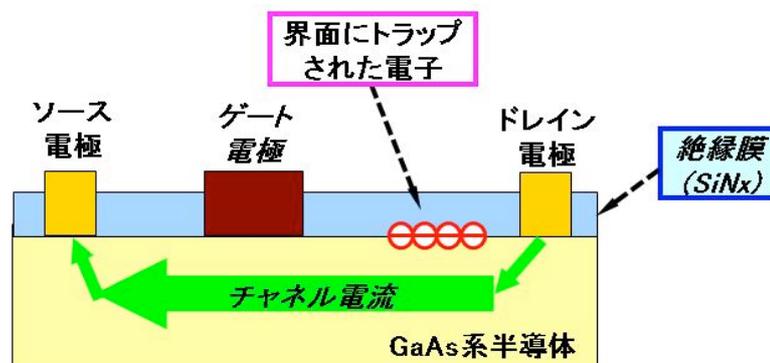


図 1. GaAs-HEMT の断面構造模式図

実験：

一般に、GaAs 表面には大気中室温でも酸化物が生成することが報告されている^[1]。そこで分析試料として、①GaAs/AuPd ②GaAs/SiN_x/AuPd の 2 種類を作製した。試料①は、n 型 GaAs 基板に、測定時のチャージアップ緩和のための AuPd (6 nm 厚) を蒸着したものである。この場合、GaAs 表面の酸化物は AuPd との界面にそのまま残留すると考えられる。一方の試料②では、GaAs 基板を酸洗浄した後に、PECVD で SiN_x 膜 (11 nm 厚) を堆積し、更に AuPd を蒸着している (cf. AuPd 蒸着は、試料①と同一バッチで実施)。このプロセスでは、①に比べて界面の残留酸化物量は少ないと予想される。なお、今回用いた GaAs 結晶の推定キャリア濃度は、 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ である。

硬 X 線光電子分光の測定は、SPring-8 の BL46XU にて行った。上記 GaAs 試料の背面をカーボンテープでホルダーに固定し、かつ、上面の AuPd もカーボンテープで接地することで測定中のチャージアップの緩和を図った (cf. 中和銃は不使用)。光電子取り出し角 (TOA) は 80° と 30° の 2 水準、また、光電子検出には半球型電子アナライザを用い、50 meV ステップでスイープを行った。

なお、励起 X 線エネルギー (hv) を求めるため、純 Au の標準試料も別途測定している。得られた Au4f_{7/2} の運動エネルギー (KE) は 7854.95 eV であり、これに既知の束縛エネルギー (BE) である 84 eV を加えて、 $h\nu = KE + BE = 7938.95 \text{ eV}$ とした。

後述のように、今回の実験ではチャージアップを完全に抑制することはできなかった。チャージアップが生じた場合の束縛エネルギーは、 $BE = (h\nu - V_s) - KE$ となる (cf. V_s は、チャージアップによる光電子スペクトルのシフト量)。即ち、正確に BE を算出するには、KE だけでなく V_s の値も測定する必要がある。本研究では、Ga2p_{3/2} と As2p_{3/2} に加え、各試料の AuPd 中の Au4f_{7/2} も測定し、チャージアップによるシフトの補正に用いた。なお、試料に蒸着しているのは、純 Au ではなく Au:Pd=6:4 の合金である。その Au4f_{7/2} 束縛エネルギーは、化学シフトにより 84 eV ではなく 83.606 eV となることを別途確認済みである^[2]。

結果および考察：

まず、各試料の Au4f 光電子スペクトルの測定結果を図 2 に示す。これらはチャージアップによるシフトの補正を実施する前のものである。本来なら Au4f_{7/2} ピーク中心が 83.606 eV で重なるはずであるが、実際には②-30°を除き 0.04~0.09 eV の範囲で高エネルギー側へシフトしている。この結果から、6 nm 厚の AuPd 蒸着とカーボンテープによる接地でも、わずかながらチャージアップが発生しうることが分かる。しかし、この測定で得られた各試料の V_s を用いて、後述の Ga2p_{3/2} 及び As2p_{3/2} のスペクトルを補正することができるようになった。

なお、試料②の場合、TOA=80°で V_s=0.04 eV、同 30°で V_s=0 eV となっている。同一試料にも関わらず V_s が異なる理由としては、TOA 変更によって X 線ビームに対する試料位置 (及び X 線照射量) が微妙に変化し、結果的に光電子発生量が異なってしまった可能性が考えられる。

次ページの図 3 に、各試料の Ga2p_{3/2} 及び As2p_{3/2} 光電子スペクトルを示す。これらの横軸の BE は、図 2 の V_s を用いて補正されている。まず、試料①については、Ga 及び As のいずれも、GaAs 結晶のメインピークより高エネルギー側に明瞭なサブピークが現れ、かつ、TOA=80°よりも 30°の方が大きいことが確認された。これは GaAs 結晶よりも表面側に Ga あるいは As の酸化物が存在することを示している。一方、試

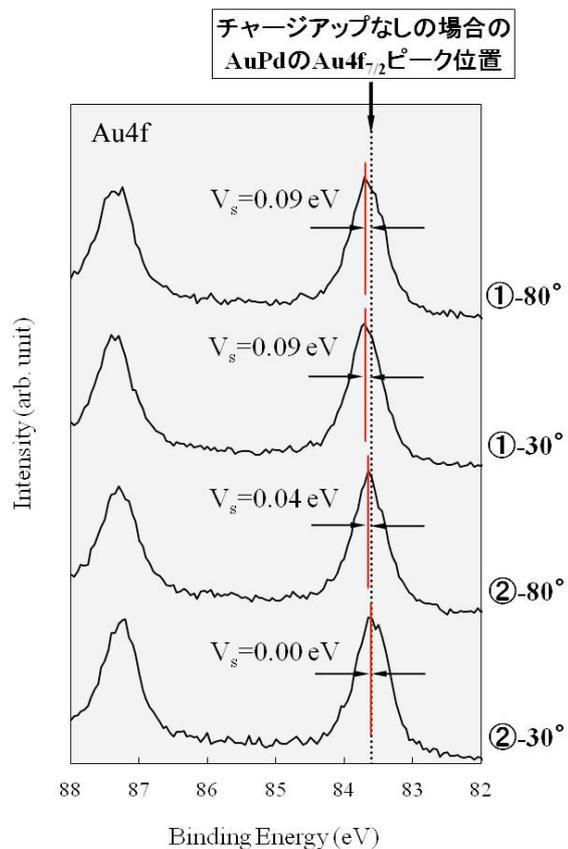


図 2. 各試料の Au4f スペクトル

料②では、このようなサブピークは見られず、GaAs/SiN_x 界面の酸化物は極めて少ないと言える。

また、図 3 において破線で示したメインピーク位置を試料間で比較すると、Ga2p_{3/2} と As2p_{3/2} のいずれも、②に比べ①の方が低エネルギー側に約 0.2 eV シフトしている。一方、同一試料におけるメインピーク位置の TOA 依存性に注目すると、全試料 Ga2p_{3/2} と As2p_{3/2} のいずれも、TOA=80° と 30° でほぼ同じピーク位置となっている。

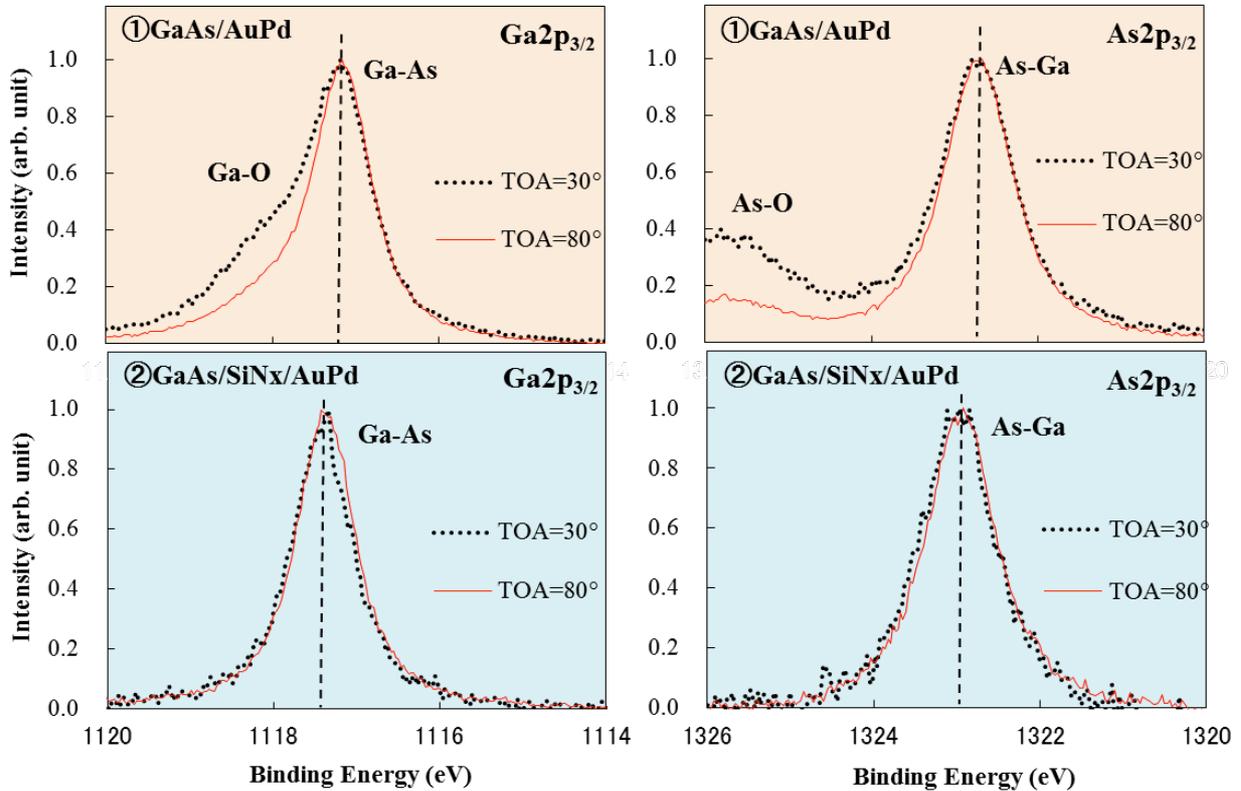


図 3. 各試料の Ga2p_{3/2} 及び As2p_{3/2} の光電子スペクトル

図 4 に、今回の測定結果から推定される試料断面構造、及び、GaAs バンド構造を模式的に示す。

まず、界面酸化物の試料間の差に関しては、事前の予想通りの結果であった。即ち、酸洗浄に続く SiN_x 膜堆積により、界面に残留する酸化物量は大幅に低減されるものと考えられる。

次に、GaAs 結晶のピーク位置について考察する。今回、Ga2p_{3/2} と As2p_{3/2} のピークが低エネルギー側へシフトしたのは、界面酸化物が多い試料①の方であった。このようなシフトは、界面近傍に固定された負電荷の存在を示唆するものと考えられる。即ち、界面酸化物が電子トラップの起源となっている可能性が高い。Ga2p_{3/2} と As2p_{3/2} は内殻準位であるが、耐圧に影響する伝導帯についても、トラップのため同じ方向にシフトしていると予想される。

また、いずれの試料でもメインピークの位置に TOA 依存が見られなかった理由として、n-型 GaAs のキャリア濃度が $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ と低かったことが考えられる。このような低濃度では、仮に電子が界面にトラップされていても、GaAs 表面近傍のバンド曲がりは無視できるレベルとなり、分析深さが 10 nm 程度の硬 X 線光電子分光から得られる束縛エネルギーは、深さ方向で一定と見なせると考えられる。

最後に、デバイス技術面の課題である GaAs-HEMT 耐圧向上については、GaAs 表面酸化物を絶縁膜界面に残留させ、GaAs 表面電位を上昇させることが有効であると考えられる。

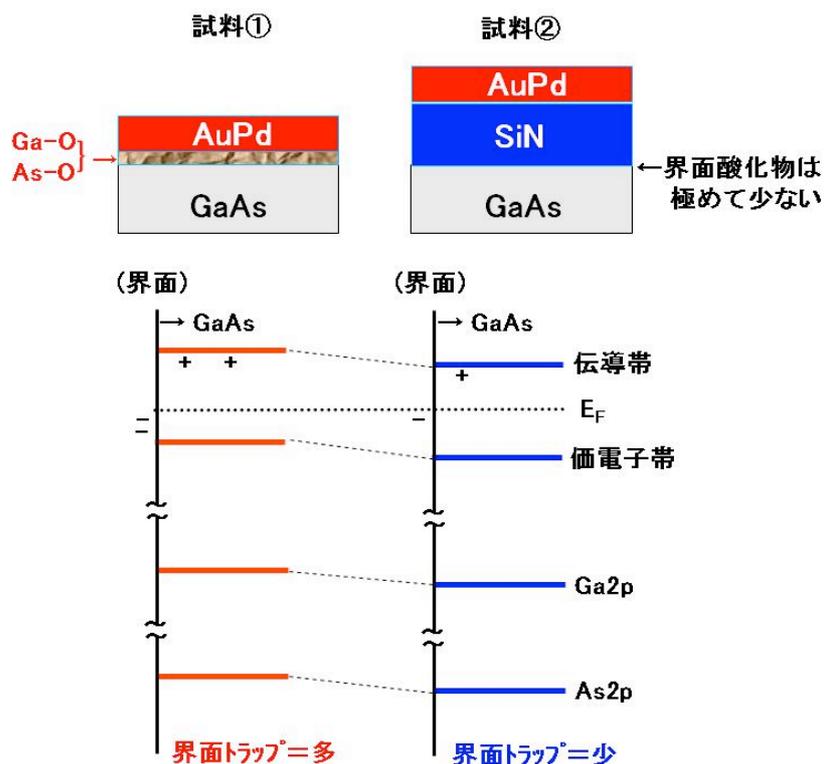


図 4. 推定される試料界面の構造、及び GaAs バンド構造の模式図

謝辞：

硬 X 線光電子分光の測定において、多大な尽力を頂いた JASRI の孫珍永様、陰地宏様、及び崔芸涛様に深謝いたします。また、分析試料の作製とデータ解析での議論でお世話になった住友電工デバイスイノベーション(株)の小山健二様と駒谷務様に心より感謝いたします。

参考文献：

- [1]G. P. Schwartz et al: *J. Electrochem. Soc. Solid-State Sci. and Tech.*, **Oct.** 2269 (1980).
- [2]館野泰範ら：平成 22 年度 重点産業利用課題成果報告書(2010B), 2010B1847.

© JASRI

(Received: February 12, 2013; Accepted: November 1, 2013; Published: December 10, 2013)