

ニッポン放送賞

ペロブスカイト酸化物における界面ダイポールの
設計とトランジスタへの応用

～新たな酸化物デバイスを目指して～

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
物質系専攻 博士課程 3年

矢嶋 赳彬

1. 緒 言

「電気」とは、ミクロにみれば物質中の電子の流れのことである。社会の原動力として「電気」が主要な地位を占める以上、物質中の電子の流れやすさを理解することは科学の使命だと言える。それぞれの物質中で電子は固有の状態(電子準位)をとり、そのエネルギーは電子の流れやすさを決める重要なパラメータの一つである。特にトランジスタのような電子デバイスの場合、複数の物質が持つ電子準位のエネルギー位置関係が、デバイス特性を支配する。例えば2物質間で電子準位のエネルギーが接近していれば、電子はその界面を横切ってスムーズに流れるが、離れていれば電流は阻害される、といった具合である。このような界面における電子準位のエネルギー差は、結晶内部の電子準位がバンド構造をとることからバンドオフセットと呼ばれる。バンドオフセットは基本的に、界面を構成する物質の各電子準位によってほぼ一意に決定されることから、適切な電子準位を持つ物質の選択が電子デバイス設計の基礎となってきた。

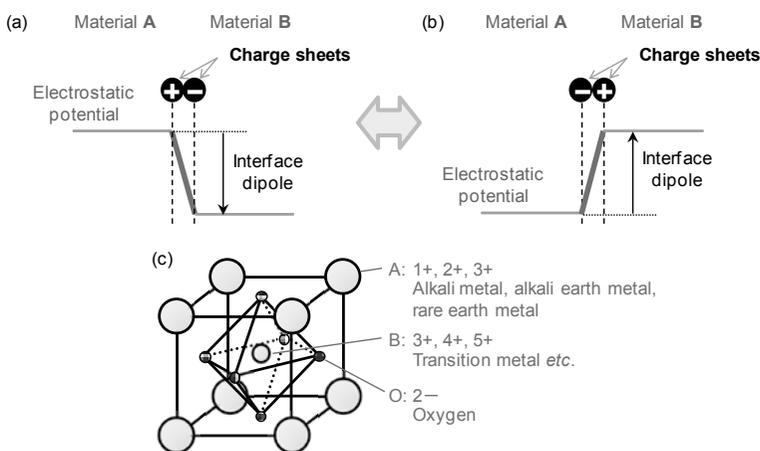


Fig. 1 (a, b)物質AとBの間の界面において、正と負の電荷層が作る界面ダイポールの概念図。
(c)ペロブスカイト構造(ABO_3)の模式図。

近年、薄膜作製技術の進歩によって、界面構造をナノスケールで制御することが可能になってきた。そこでは、界面近傍のナノスケール領域に正負の電荷層を配置することで、静電ポテンシャルのオフセットを作り出し(Fig. 1a,b)、同じ組み合わせの物質間でも任意の値にバンドオフセットを制御できると考えられる [1]。このような構造は界面ダイポールと呼ばれ、丁度、機械の接触部の動きをよくするために潤滑油が使われるように、界面で固定されていたバンドオフセットを電氣的潤滑油によってずらすようなものである。界面ダイポールは近年、シリコンやガリウムヒ素等へのオーミック接合の作製や、有機物における接合特性の改善に実際に利用されてきている [2,3]。本研究では次世代デバイス材料として期待される酸化物において、そのイオン結合性を利用することで、より大きな界面ダイポールの設計が可能なのではないかと考え、系統的な実験を行った。

今日酸化物は単なる支持体や絶縁体としてだけでなく、圧電素子や光触媒など、酸化物に固有の物性を活かした高機能電子デバイスの材料として利用されている。その中でもペロブ

スカイト酸化物 ABO_3 (Fig. 1c) は、液体窒素温度で超伝導を示す銅酸化物高温超伝導や磁場で抵抗が何桁も変化するマンガン酸化物超巨大磁気抵抗などの発見によって、機能的酸化物の一群として注目されている [4]。この物質は Fig. 1c に示すように、八面体の酸素イオン骨格によって支えられた特徴的な構造を持つ。その空隙に含まれる大小二種類の金属イオン (A と B) は、イオン半径が許す限り結晶構造を維持したまま自由に置換することができる。異なる価数を持つイオンで置換すれば結晶内にイオン電荷が導入され、電荷中立性のために電子またはホールがドーピングされる。従ってイオン置換は一般的なキャリアドーピングの手法として、ペロブスカイト酸化物のバルクの研究で広く用いられてきた。

本研究ではこのイオン置換の手法をペロブスカイト酸化物界面の数原子層に適用することで正負の電荷対を形成し (Fig. 1a, b)、界面ダイポールを作製できるのではないかと考えた。ペロブスカイト酸化物におけるイオン置換は、先述のように結晶構造をあまり変化させないことから固溶限界を持たないことが多く、巨大な界面ダイポールを形成できると考えられる。これまで、ペロブスカイト酸化物界面のイオン電荷によって界面へ局所的にキャリアドーピングする手法が、2次元電子系の研究に利用されてきた [5,6] が、界面ダイポールに関する系統的な研究は行われていない。こうした背景を受けてここでは、ペロブスカイト酸化物界面における界面ダイポールを利用したバンドオフセット制御技術を確立し、実際にそれを応用して革新的デバイスを作製することを目的とした。

2. 実験

ペロブスカイト酸化物試料の作製にはパルスレーザー堆積法を用いた。これは薄膜と同じ組成を持つ焼結体または単結晶表面に高エネルギーのパルスレーザーを集光し、形成されるプラズマ内部に加熱基板を配置することで薄膜成長する手法である。焼結体表面の集光部が超高温まで加熱されるため、高融点を有する酸化物材料にも適用でき、また3元素以上から成るペロブスカイト酸化物の場合でも焼結体と薄膜の組成ずれが小さいという利点を持つ。界面ダイポールの作製のためには界面に1~2原子層 (uc: 1 uc ~ 4 Å) の挿入層を入れる必要があるが、これは製膜中に電子線の表面回折像を観察することで行った。作製した試料に関して、原子間力顕微鏡によって表面起伏の評価を、またX線回折や走査型透過電子顕微鏡によって結晶構造の評価を行い、試料が基板及び薄膜全体を通してコヒーレントなペロブスカイト構造を有することを確認した。界面ダイポールの大きさは、電流電圧 (I - V) 特性や電気容量電圧 (C - V) 特性といった電気測定 (全て半導体側を接地) と、内部光電子分光 (IPE) 及びX線光電子分光 (XPS: KEK, Photon Factory, BL2C の 800 eV 放射光を利用) などの分光測定とから、多角的な評価を行った。本研究の全ての測定は室温で行っている。

3. 酸化物界面における界面ダイポールの設計

界面ダイポールを設計する系として、ここでは金属半導体界面に形成されるショットキー接合を取り上げた。この界面は、金属の仕事関数と半導体の電子親和力の差によってショットキー障壁を形成し、金属から半導体への電子の流れを阻害するために整流特性を示す。このショットキー障壁の高さ (Schottky Barrier Height: SBH) は、界面ダイポールが作り出す静電ポテンシャルのオフセット (Fig. 1a, b) によって変化することから、SBH を測定することで界

面ダイポールの大きさを評価することができる。

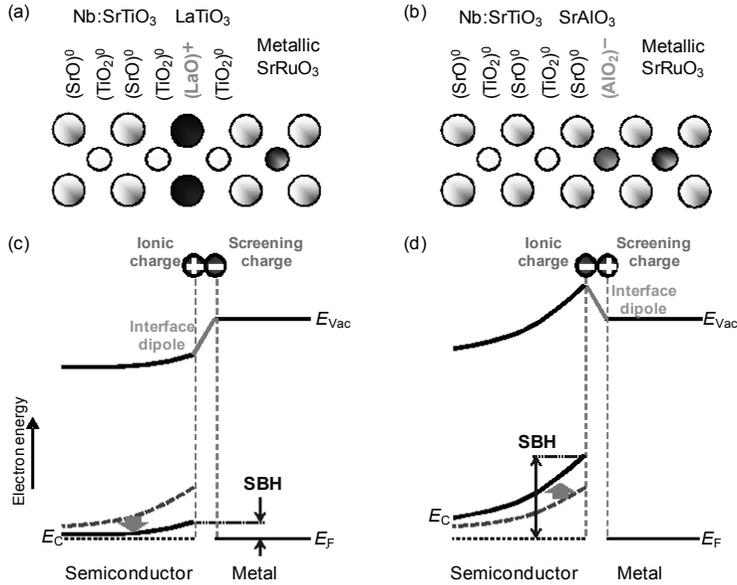


Fig. 2 SrRuO₃/Nb:SrTiO₃ショットキー接合において、(a) Sr²⁺ ⇒ La³⁺ 置換及び、(b) Ti⁴⁺ ⇒ Al³⁺ 置換によって正及び負の電荷を導入した時の、イオン配列の模式図。酸素イオンは省略している。(c, d) この挿入イオン電荷と金属遮蔽電荷との間の界面ダイポールによって変化した、SrRuO₃/Nb:SrTiO₃ショットキー接合のバンドダイアグラム。 E_{Vac} 、 E_C 、 E_F はそれぞれ真空準位、Nb:SrTiO₃伝導電子帯下端、フェルミ準位を表す。

ショットキー接合は、代表的な *n* 型酸化物半導体である Nb:SrTiO₃ (Nb = 0.01 wt%) と、良好な金属特性を示す SrRuO₃ との間に形成した。このショットキー接合は理想的な電気特性を示し、光電子分光の結果とも合致することが過去に報告されている [7,8]。界面ダイポールの作製のために、TiO₂ 終端 Nb:SrTiO₃ 基板上に LaTiO₃ 及び SrAlO₃ を 0 ~ 2 uc 堆積した。その上に SrRuO₃ 薄膜を堆積することで、SrRuO₃/Nb:SrTiO₃ 界面に対して、Sr²⁺ ⇒ La³⁺ (Fig. 2a) または Ti⁴⁺ ⇒ Al³⁺ (Fig. 2b) のイオン置換を行った構造が作られる。この置換後の構造はそれぞれ正または負のイオン電荷を持ち、形式的に (LaO)⁺、(AlO₂)⁻ と表した。(LaO)⁺ 正電荷の場合、金属側に負の遮蔽電荷が誘起され、SBH を減少させるような界面ダイポールが形成される (Fig. 2c)。逆に (AlO₂)⁻ 負電荷の場合、金属側には正の遮蔽電荷が誘起され、SBH を増加させるような界面ダイポールが形成される (Fig. 2d)。このように、界面に導入したイオン電荷と金属側の遮蔽電荷との間に界面ダイポールを作製することを試みた。

Fig. 3a は *I-V* 特性の片対数プロットであり、挿入層の有無にかかわらず、整流性を示す全ての接合で、正バイアス領域の $\log|I|$ が *V* に対して直線的に増加する理想的な特性が得られた。この直線領域の傾きから得られる理想化定数は 1 ~ 1.2 であり、熱放出モデルとよく合致する。(LaO)⁺ 正電荷の挿入量を増加させるに従って、*I-V* 曲線は低電圧側へ移動し SBH は減少した。一方 (AlO₂)⁻ 負電荷を挿入した場合、曲線は高電圧側へ移動し SBH は増加した。

SBH が界面ダイポールによって変化する様子は、電気測定以外にも XPS によって、より

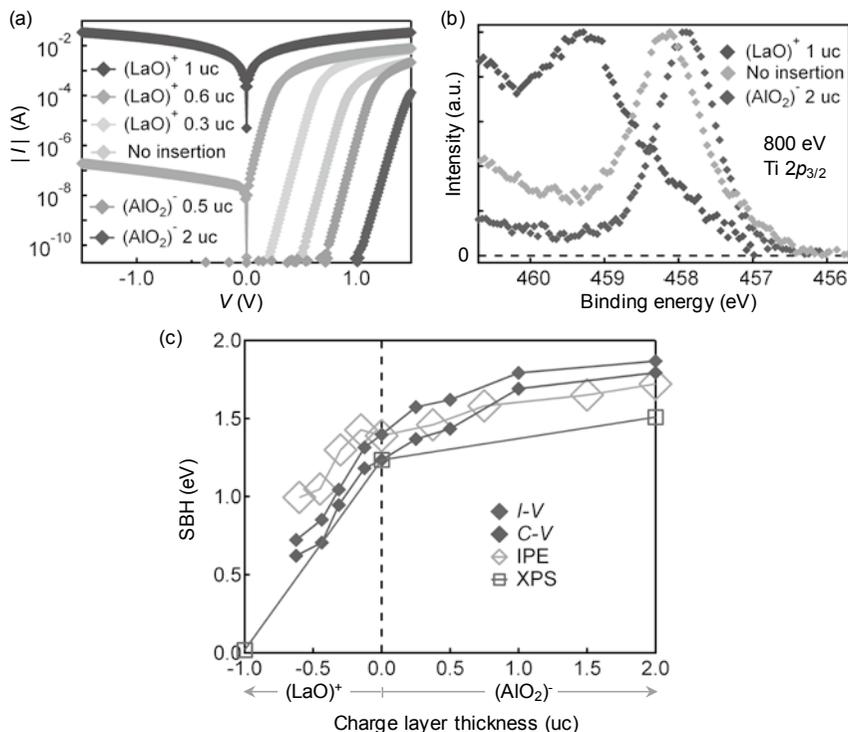


Fig. 3 SrTiO₃/Nb:SrTiO₃ショットキー接合に $(\text{LaO})^+$ 正電荷及び $(\text{AlO}_2)^-$ 負電荷を挿入した時の、室温における (a) I - V 特性と、(b) XPSスペクトル。(c) I - V 、 C - V 、IPE、XPS測定から得られたSBHの挿入電荷依存性。

直接的に評価することができる。XPSでは、試料に照射されたX線によって放出される光電子の運動エネルギーから、電子の内殻準位のエネルギー(フェルミ準位に対する束縛エネルギー)を知ることができる。界面ダイポールによって金属側に対する半導体側の静電ポテンシャルが変化すると、半導体側の内殻準位とSBHとが同じだけ変化するため、内殻準位の束縛エネルギーからSBHの変化を知ることができる。Fig. 3bの緑のスペクトルは界面挿入層のないSrRuO₃/Nb:SrTiO₃接合におけるTi $2p_{3/2}$ 内殻準位を表しており、 $(\text{LaO})^+$ 正電荷の導入による高束縛エネルギー側へのシフト(青のスペクトル)はSBHの減少を、 $(\text{AlO}_2)^-$ 負電荷の導入による低束縛エネルギー側へのシフト(赤のスペクトル)はSBHの増加を示している。

以上2種類の測定結果に C - V 測定及びIPEの結果も加え、SBHを挿入電荷に対してプロットしたものがFig. 3cである。界面挿入層のないSrRuO₃/Nb:SrTiO₃接合のSBHが約1.2eVであるのに対し、 $(\text{LaO})^+$ 正電荷層1ucの導入によってSBHはほぼ消滅し、逆に $(\text{AlO}_2)^-$ 負電荷層2ucの挿入によってSBHは1.7eVまで増加した。この傾向はFig. 2c, dに描いた界面ダイポールの効果をきれいに再現しており、金属や半導体の物質の種類とは独立に任意の値のSBHを設計できることを実証した。さらに、1.7eVという制御範囲は、シリコンや有機半導体等の他の材料界面における値よりも大きく、イオン置換が容易なペロブスカイト酸化物界面ならではの強みだと言える。

4. 酸化物オーミック接合への障壁導入

上記のように任意の値にバンドオフセットを制御できるならば、同一の半導体を用いた n^+/n オーミック接合 (Fig. 4a) にも、界面ダイポールによって人工的な障壁を形成できるはずである (Fig. 4b)。このように当然オーミック接合だと考えられてきた界面をショットキー接合へ変調できれば、これまでの半導体ヘテロ接合の常識を超えたデバイス設計への道が開ける。ここでは SrTiO_3 において、電子を高濃度ドーピングした n^+ 半導体 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ と、低濃度ドーピングした n 型半導体 Nb:SrTiO_3 との間に接合を形成し、界面ダイポールによるショットキー障壁の形成を試みた。

実験では Fig. 4c に示すように、 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3/\text{Nb:SrTiO}_3$ 界面へ、 SrAlO_3 挿入層による $\text{Ti}^{4+} \Rightarrow \text{Al}^{3+}$ 置換によって負電荷を導入した。 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ の高濃度の電子がこの負電荷を遮蔽し、間に界面ダイポールを形成すると考えられる。実際に設計通りの界面ダイポールを実現するには、 10^{-5} Torr の低酸素圧アニールによって、 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ の酸化を防ぎつつ、界面の酸素欠損を除去する必要があった。Fig. 4d の I - V プロットに示すように、元々オーミックだった $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3/\text{Nb:SrTiO}_3$ 接合は、 2uc 以上の $(\text{AlO}_2)^-$ 挿入層によってショットキー接合へと変化した。その特性は正バイアス領域で電流が印加電圧の指数関数となる熱放出モデルに従い、理想的なショットキー接合が形成されていると言える。 I - V 特性と C - V 特性から得られた SBH は、 3uc の $(\text{AlO}_2)^-$ 負電荷挿入によって 1eV 以上まで上昇した。本結果は、いかなる界面においても自在にバンドダイアグラムを設計できることを示唆しており、ペロブスカイト酸化物を用いた電子デバイスの作製に大きな自由度を与える。

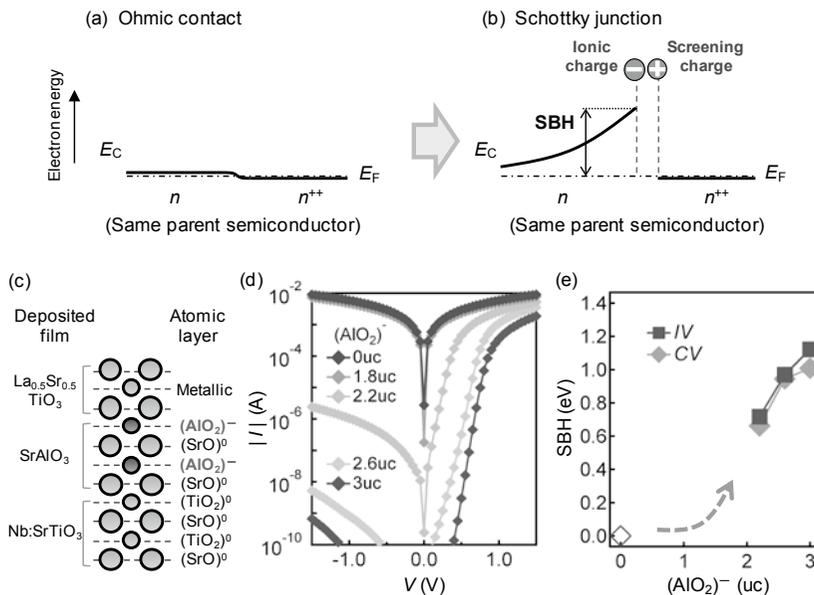


Fig. 4 (a) n/n^+ 半導体界面に形成されたオーミック接合と (b) 界面ダイポールを挿入してショットキー接合となった界面のバンドダイアグラムの模式図。 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3/\text{Nb:SrTiO}_3$ 界面に $(\text{AlO}_2)^-$ 負電荷を導入して界面ダイポールを導入した時の (c) イオン配列の模式図 (酸素イオンは省略)、(d) 室温 I - V 特性、(e) I - V 及び C - V 測定から得られる SBH。

5. 酸化物ホットエレクトロントランジスタの作製

上記のように界面ダイポールによって接合障壁を生成、増大させることで、接合のリーク電流を指数関数的に抑制することができる。この技術を活用し、ペロブスカイト酸化物から成るホットエレクトロントランジスタの作製を試みた [9]。接合のリーク電流がホットエレクトロントランジスタの動作を阻害することが過去に報告されており [10]、界面ダイポールによってこの問題を解決できると思われる。

ホットエレクトロントランジスタは、バイポーラトランジスタのベースの半導体を金属に置き換えたもので、2つのショットキー接合が金属層を共有した構造を持つ (Fig. 5a)。ここではエミッタとコレクタの半導体には SrTiO_3 を使い、ベース金属には伝導電子がスピン分極したハーフメタル特性を示すことが知られている $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 50 uc を使用した (Fig. 5b)。エミッタのショットキー接合から放出された電子が、ホットエレクトロン (フェルミ準位より高いエネルギーをもつ非平衡電子) として金属内をバリスティック伝導し、コレクタのショットキー接合に回収されることで動作する。このエミッタからコレクタへの電子伝達の収率 (電流伝達率) を、異なるベース膜厚に対して調べることで、ベースに用いた物質内部でのホットエレクトロンの平均自由行程を求めることができる [11]。他の物理パラメータを一切仮定することなく平均自由行程を求められるため、ペロブスカイト酸化物のように電子同士の相互作用が複雑な物質の基礎研究に極めて有用である。特に $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ の電気伝導は電子の電荷、スピン、軌道の影響を強く受け複雑なふるまいをするが、平均自由行程を、ホットエレクトロンのエネルギー、温度、磁場といった様々なパラメータに対して調べることで、各散乱機構の影響を分離し定量的な解析が可能だと考えられる。

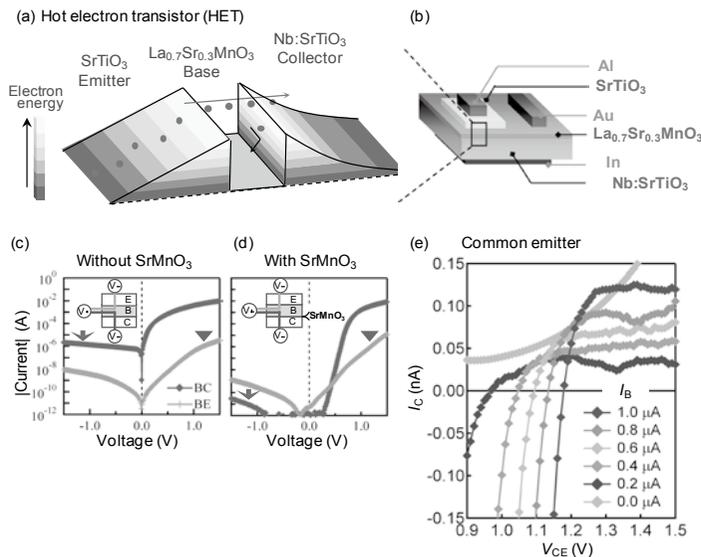


Fig. 5 $\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Nb:SrTiO}_3$ ホットエレクトロントランジスタの (a) バンドダイアグラムと (b) 試料の模式図。ベース/コレクタ界面に SrMnO_3 1 uc を (c) 挿入した時と (d) 挿入しなかった時の、ベース/コレクタ (BC) 及びベース/エミッタ接合 (BE) の室温 I - V 特性。 (e) ホットエレクトロントランジスタの室温におけるエミッタ接地出力特性。ベース電流を $0 \sim 1 \mu\text{A}$ まで $0.2 \mu\text{A}$ おきに変化させている。 [9]

ベース/コレクタ、ベース/エミッタのショットキー接合の I-V 特性を Fig. 5c に示す。トランジスタ動作時には、ベース/エミッタには電子注入のため順バイアスが(青三角)、ベース/コレクタにはコレクタを制御電極であるベースから電氣的に隔離するため逆バイアスが印加される(赤矢印)。Fig. 5c に示すデバイスでは、後者のリーク電流が前者の注入電流と同程度存在し、トランジスタ動作は見られない。そこでベース/コレクタのリーク電流を抑制するため、ベース/コレクタ界面に SrMnO_3 1uc を挿入した。 SrMnO_3 は $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ に対して $\text{La}^{3+} \Rightarrow \text{Sr}^{2+}$ のイオン置換をした構造をもつため、 SrMnO_3 挿入は界面への負電荷挿入に対応し、SBH が増大する (Fig. 2d) [12]。結果、Fig. 5d に示すようにベース/コレクタのリーク電流は、5 ケタ減少してエミッタからの注入電流よりも十分に小さくなり、トランジスタ動作のための必要条件が満たされた。

このように SrTiO_3 (200 uc) / $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (50 uc) / SrMnO_3 (1 uc) / Nb: SrTiO_3 構造を用いることで、室温でのトランジスタ動作に成功した。Fig. 5e はエミッタ接地でベース電流 (I_B) を一定値に固定し、コレクタ電圧 (V_{CE}) に対してコレクタ電流 (I_C) をプロットしたものである。 I_C が V_{CE} に依存しない領域はトランジスタの活性領域と呼ばれ、 I_C がエミッタからの伝達電流だけで決まっていることを意味している。また活性領域における I_C が I_B に比例して増加しているのは、エミッタからの注入電流が I_B に比例して増加するためである。電流伝達率は 1.2×10^{-4} と極めて小さいが、これはベースに用いた $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 内部でのホットエレクトロンの平均自由行程が極めて小さいためである。過去の研究ではしばしばベース内部にエミッタとコレクタをつなぐピンホールが形成され、それを介した電流によってホットエレクトロントランジスタとは異なる機構 [13] でトランジスタ動作することが報告されている。本研究では詳細な電気測定から、エミッタとコレクタの間に電圧帰還が存在しないことを明らかにし、トランジスタ動作がピンホール電流によるものではなくホットエレクトロンによるものであるという確証を得た。

6. 酸化物におけるホットエレクトロン分光

作製したホットエレクトロントランジスタは、電子間相互作用が強い酸化物金属における、ホットエレクトロンの挙動を調べるための基礎的デバイスとなる。しかし一部の電極でピンホール電流が観測されるなど、上記の構造では再現性に問題があることが判明した。これは作製したベース/エミッタ接合の面積が 0.1 mm^2 と大きく、確率的に存在するピンホールを取りこんでしまうためだと考えられる。そこで SrTiO_3 薄膜のエミッタを走査プローブに置き換え (Ballistic Electron Emission Microscopy: BEEM)、プローブからベース金属に向かって局所的に電子を注入する構造を用いることで、その実効的な面積を約 10^{-9} mm^2 まで小さくした。その結果ホットエレクトロントランジスタ動作の再現性はほぼ 100 % となり、ピンホールの影響を回避することが可能となった。BEEM 測定のパンドダイアグラムは先述のトランジスタのもの (Fig. 5a) に近い。異なる点として、エミッタ (走査プローブ) / ベース (金属薄膜) 間が真空を介したトンネル接合であるため、その距離と印加電圧によって注入電子の量だけでなくエネルギーも同時に制御できるという利点を持つ。つまりホットエレクトロンの平均自由行程を各エネルギーに対してプロットする、ホットエレクトロン分光が可能となる。

Fig. 6a は、電流伝達率をエミッタ電圧 (~ ホットエレクトロンのエネルギー) に対してプ

ロットしたものである。ホットエレクトロンは、そのエネルギーがベース/コレクタ SBH(1.1 eV)を超えたところでコレクタに到達できるようになり、電流伝達率は電圧の2乗に比例して立ち上がる [14]。さらにベース膜厚を増加させると、ベース内部でホットエレクトロンが緩和する確率が増えることから、電流伝達率が減少する。

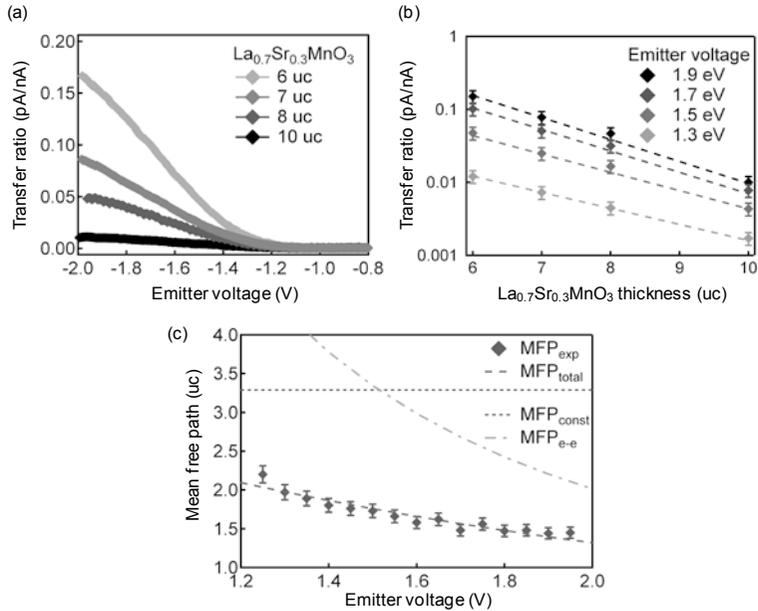


Fig. 6 (a) 6～10 uc までの各 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 膜厚に対する室温 BEEM 測定における、電流伝達率のエミッタ電圧依存性。(b) (a) のプロットを、1.3～1.9 eV までの各エミッタ電圧に対する、電流伝達率の $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 膜厚依存性としてプロットしなおしたものの。(c) (b) の片対数プロットの傾きの逆数から得られる、 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 膜厚内部でのホットエレクトロンの平均自由行程 MFP_{exp} の、エミッタ電圧依存性。 $\text{MFP}_{\text{total}}$ はモデルによるフィッティング、 $\text{MFP}_{\text{e-e}}$ と $\text{MFP}_{\text{const}}$ はモデルにおける電子電子散乱とホットエレクトロンエネルギーに依存性のない散乱の寄与を表し、 $1/\text{MFP}_{\text{total}} = 1/\text{MFP}_{\text{e-e}} + 1/\text{MFP}_{\text{const}}$ を満たす。

ホットエレクトロンの伝達率は、界面における散乱とベース薄膜内部での散乱の2つの要因で決まる。ここでベース膜厚を変えた時に後者のみが変わることから、両者を分離することができる。実際 Fig. 6b のように、電流伝達率をベース膜厚に対して片対数プロットしたとき、その傾きの絶対値は平均自由行程の逆数に、切片はベース膜厚がゼロの極限、つまり界面散乱率の逆数に等しくなる。

このようにして求めたホットエレクトロンの平均自由行程を、そのエネルギー(エミッタ電圧)に対してプロットしたのが Fig. 6c の MFP_{exp} である。これをモデル ($\text{MFP}_{\text{total}}$) でフィッティングすることで、電子電子散乱の寄与 ($\text{MFP}_{\text{e-e}}$) と、エネルギーに依存しないその他の散乱の寄与 ($\text{MFP}_{\text{const}}$) とに分離することができる。ホットエレクトロンのエネルギーが小さくなりフェルミ準位に近づくにつれて、電子電子散乱の寄与は減り平均自由行程は $\text{MFP}_{\text{const}}$ (= 3.3 uc) に近づくと考えられるが、これは抵抗値から単純金属のバンド分散を仮定して見積もられる平均自由行程 (~ 1 uc) と桁で一致している。正確な値が異なるのは電子間相互作用の

ために、単純金属のバンド分散を仮定した後者の見積もりが正確でないことを示唆している。MFP_{const} はスピン散乱、フォノン散乱、La-Sr イオン配列の無秩序性からの散乱を含むが、磁場や温度を変化させることでさらにそれぞれの寄与へと分離できると考えられる。このようにホットエレクトロントランジスタを用いることで、これまで他のパラメータから独立に算出することが難しかった強相関電子系におけるホットエレクトロンの平均自由行程を正確に求めることに成功した。

7. まとめと展望

本研究では次世代デバイスへの応用が期待されるペロブスカイト酸化物において初めて、界面ダイポールを用いたバンドオフセット制御技術を開拓した。特にペロブスカイト酸化物が、他の物質に比べて大きな界面ダイポールを形成できることを明らかにし、酸化物デバイスの可能性を広げた。さらにこの技術によって、ペロブスカイト酸化物を用いたホットエレクトロントランジスタの作製が可能となり、電子間相互作用が強い物質における電気伝導を研究するための新たな足掛りを構築した。これらの結果は、界面ダイポールという基本的概念を元に、基礎と応用の両面から酸化物エレクトロニクスの分野を前進させるものだといえる。

一方でペロブスカイト酸化物における界面ダイポールに関して未解明な部分があり、特にオングストローム領域にどれだけ大きなダイポールが形成できるのか、化学的、熱力学的観点から考察する必要がある。もしワイドギャップ半導体のバンドギャップに匹敵する大きさの界面ダイポールが作製できれば、界面の電子構造を自由に反転させることが可能になり、不純物ドーピングすることなしに *pn* 接合が作製できるなどこれまでの常識を超えた電子デバイス設計への道が開ける。またホットエレクトロントランジスタを用いた電子間相互作用の研究は未だ緒に就いたばかりである。様々なペロブスカイト酸化物におけるホットエレクトロンの平均自由行程を系統的に調べることで、一電子近似では記述できない電子間相互作用に関する理解を深め、酸化物の強みを生かした電子デバイスの作製が可能になると思われる。

謝 辞

本研究は東京大学大学院新領域創成科学研究科の尾鍋研太郎教授、スタンフォード大学応用物理学科のファン・ハロルド教授、疋田育之助教、ベル・クリストファ助教の指導の元遂行されました。XPS 測定は東京大学工学系研究科の尾嶋正治教授、高エネルギー加速器研究機構の組頭広志教授、スタンフォード大学の蓑原誠人博士、BEEM 測定はフローニンゲン大学のバナジ・タマリカ助教、ラナ・ゴラヴ氏との共同研究によるものです。その他試料の構造や光学特性に関する有用な情報を、コーネル大学のミュラ・デイヴィッド教授、フィッティング・コウコティス・レナ博士、マンディ・ジュリア氏、東京大学物性研究所の秋山英文准教授、吉田正裕博士から頂きました。試料作製に関しては、東京大学物性研究所のミック・リップマー准教授、東京大学理学部の高木英典教授、高山知弘助教からご支援頂きました。本論文をまとめるにあたり、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] J. M. Shannon, *Solid-State Electron.* **19**, 537 (1976).
- [2] B. E. Coss *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 222105 (2009).
- [3] I. H. Campbell *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 3528 (1997).
- [4] M. Imada, A. Fujimori, and Y. Tokura, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1039 (1998).
- [5] A. Ohtomo and H. Y. Hwang, *Nature* **427**, 423 (2004).
- [6] H. W. Jang *et al.*, *Science* **331**, 886 (2011).
- [7] Y. Hikita, Y. Kozuka, T. Susaki, H. Takagi and H. Y. Hwang, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 143507 (2007).
- [8] M. Minohara, I. Ohkubo, H. Kumigashira and M. Oshima, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 132123 (2007).
- [9] T. Yajima, Y. Hikita and H. Y. Hwang, *Nature Mater.* **10**, 198 (2011).
- [10] D. J. Monsma, J. C. Lodder, T. J. A. Popma and B. Dieny, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 5260 (1995).
- [11] S. M. Sze, C. R. Crowell, G. P. Carey and E. E. LaBate, *J. Appl. Phys.* **37**, 2690 (1966).
- [12] Y. Hikita, M. Nishikawa, T. Yajima and H. Y. Hwang, *Phys. Rev. B* **79**, 073101 (2009).
- [13] C. O. Bozler and G. D. Alley, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-27**, 1128 (1980).
- [14] L. D. Bell, W. J. Kaiser, M. H. Hecht and L. C. Davis, *J. Vac. Sci. Technol. B* **9**, 594 (1991).