

2009年3月

ペロブスカイト酸化物 SrTiO₃ と KTaO₃ への電界効果キャリアドーピング

物質系専攻 76144 松村 亮太

指導教員：高木 英典（教授）

キーワード：電界効果トランジスタ (FET), SrTiO₃, KTaO₃, 酸化物デバイス

【はじめに】

電界効果によるキャリアドーピングによって、様々な物質の電子相を変化、制御しようという研究が盛んにおこなわれている。中でも多彩な電子相を持つ酸化物に対する電界効果キャリアドーピングは、次世代エレクトロニクスへの応用の期待から、或いは酸化物界面の基礎物理学の立場から、特に精力的に研究されている分野である。

高温超伝導や、超巨大磁気抵抗などの、強い電子相関に起因する興味深い電子物性はペロブスカイト構造やその類似構造をもつ遷移金属酸化物で起こることが多い。このような物性の on/off を電界によって自在に制御することが電界効果キャリアドーピングのひとつの目標であるが、そのために酸化物へのキャリアドーピングの方法論を確立することが求められている。電界効果キャリアドーピングでは、キャリア注入する基板は非常に清浄で平坦な表面を持つことが要求されるため、今のところこの手法でキャリア数制御できることが実証されている酸化物は限られている。ペロブスカイト構造を持つ代表的な酸化物絶縁体であるチタン酸ストロンチウム (SrTiO₃) とタンタル酸カリウム (KTaO₃) は非常に清浄かつ平坦な表面を有する単結晶が容易に得られるうえに、絶縁体から半導体、金属（あるいは SrTiO₃ では超伝導）まで比較的少数のキャリアドーピングによって制御可能であることがわかっている。従って電界効果による電子相制御の研究において大変有望な物質である。

本研究では上述の酸化物基板上に電界効果トランジスタ (FET) を作製して電子をドーピングし、電子相を絶縁体から半導体に変化させることを目指すとともに、その先の物性制御を見据えて低温で動作する FET のためのデバイス作製条件を模索した。

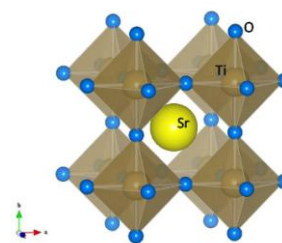


図1: ペロブスカイト構造 SrTiO₃

【有機物質パリレンを利用した FET】

FET は現代の電子工学に欠かせない素子の 1 つである。金属ゲート電極、ゲート絶縁体、半導体 (絶縁体) の積層構造を基本としており、ゲート電極と半導体間に電圧 (電界) をかけることでキャパシタの原理によって半導体界面に電荷を誘起する仕組みである (図 2)。キャリアドーピング実現のためには清浄で乱れの少ない半導体界面が要求されるが、それは乱れがあると電界によって注入された電子が界面付近のトラップ準位に捕獲されてしまい伝導に寄与することができないからである。デバイス作製過程において界面の乱れを抑制するために、まず平坦な表面を持つ酸化物単結晶を用いた。SrTiO₃ や KTaO₃ は酸化物薄膜成長のための非常に平坦な表面の

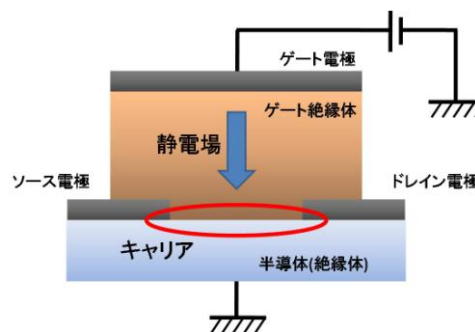


図2: 電界効果トランジスタの原理

からである。デバイス作製過程において界面の乱れを抑制するために、まず平坦な表面を持つ酸化物単結晶を用いた。SrTiO₃ や KTaO₃ は酸化物薄膜成長のための非常に平坦な表面の

(001)単結晶基板を入手することができるためこれを利用している．さらに，基板上に成膜するゲート絶縁膜には有機物であるパリレン(Parylene)を用いた．パリレンは有機ポリマー Poly-*para*-xylylene の略称であり，その類縁化合物の総称である．パリレンの成膜は基板を室温に保ちながら行うことが可能であるため，基板へのダメージが少ないといわれており，従って酸化物界面を清浄に保つことができる．ゲート電極には金を，ソースドレイン端子と4端子測定用の電圧端子にはアルミニウムを，それぞれ抵抗加熱によって蒸着した(図3)．

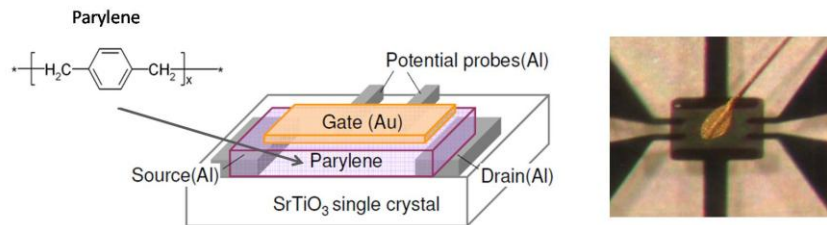


図3: パリレンを利用した酸化物FET. 概略図およびサンプル写真

【デバイス動作】

作製したデバイスの測定には高抵抗測定可能な半導体パラメータアナライザーを使用している．室温大気中でゲート電圧を印加し，ドレイン電流の応答を測定した．図4はKTaO₃-FETのゲート電圧-ドレイン電流，及びドレイン電圧-ドレイン電流特性である．SrTiO₃-FET においても同様の特性を示すデバイスの作製に成功している．このFETではゲート電圧が20Vを超えるとドレイン電流が急激に増加している．これは20V(閾値電圧)以下でドーピングされた電子は伝導帯下にあるトラップ準位を埋めるために伝導には寄与しないが，トラップ準位が全て埋まるまでゲート電圧を上げるとそれ以降にドーピングされた電子は伝導帯に入って電気伝導に寄与すると考えられる．パリレンを利用したKTaO₃-FETではOn/Off比が10⁴，電界効果移動度が室温で0.1cm²/Vsを超えるデバイスを作成することに成功している．ちなみに我々のSrTiO₃-FETでは移動度は0.04cm²/Vsが最高であり，KTaO₃のそれよりも小さい．これはKTaO₃の伝導帯が空間的な広がりから来しているからであると考えられる．

【低温でのデバイス動作】

興味深い電子相の多くは比較的低温で出現することが多い．従って必然的に電界効果ドーピングも低温で行う必要がある．室温においてはたとえトラップ準位が存在していたとしても，熱的に伝導帯に励起される電子が多数あるためゲートの閾値電圧は比較的低い．しかし低温では熱励起がなくなるために閾値が大きくなる傾向にある(図5)．ゲート絶縁膜の耐圧は決まっているため，低温ではキャリアドーピングによって伝導帯に電子を注入することは一般

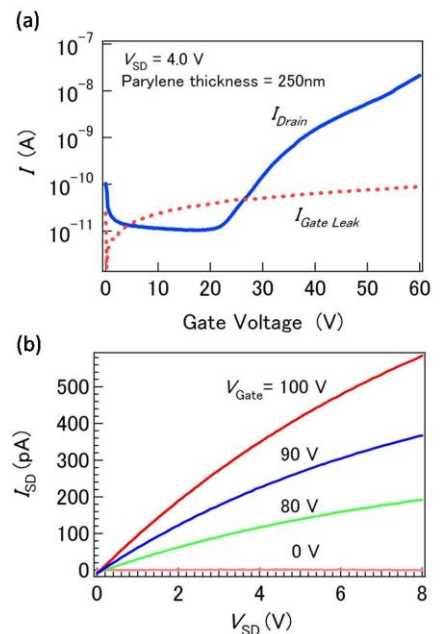


図4: (a)KTaO₃-FETのゲート電圧に対するドレイン電流.(b)ドレイン電圧に対するドレイン電流.

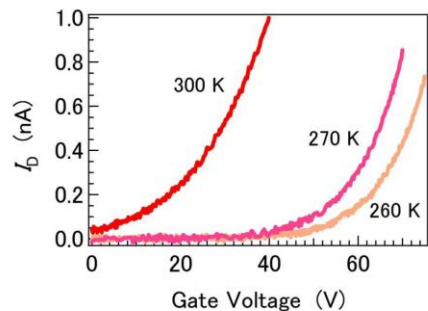


図5: 低温ではゲートの閾値電圧が上昇する. 試料はKTaO₃-FET

に困難になる傾向がある。動作に成功している温度は 200K 程度である。現在それ以下の低温で動作するデバイスの作製に向けて研究を継続している。

【絶縁体へのキャリア注入】

低温でも動作するデバイスを作製するためには、閾値を小さく、パリレン膜の絶縁破壊をなるべく抑える必要がある。我々の作製したデバイスの傾向として、ほぼ同じパリレン膜厚、ソース、ドレイン及びゲート膜厚を持つデバイスにおいては、ゲートゼロでの抵抗が小さい FET の方が、絶縁破壊を起こすゲート電圧が低くなる。逆に抵抗が大きいデバイスは比較的絶縁破壊までの電圧が大きい傾向にある。これは SrTiO₃, KTaO₃ のいずれにもあてはまる。これは、何らかの原因でごくわずかにキャリアがドーピングされている FET の方が絶縁破壊しにくいことを示唆している(図6)。

先行研究により、ゲート印加時のキャリア密度には場所による不均一性があることが示唆されている。チャンネル層はキャリア密度の大きなドメイン同士がつながり導伝性パスをなすことで形成される。この考えに基づくと、あらかじめ少量のドーピングを行うことはドメインの成長と連結を促進するはずである。結果的に低いゲート閾値でパスが形成され、さらにチャンネル層が全体に広がることによって小さなドメインに電場が集中し絶縁破壊に至るのを防止する、と考えられる。

これは低温で動作するデバイス作製のヒントを与えてくれると思われる。基板をアニールすることでほんのわずかな酸素欠損を生じさせ、フェルミ準位を変調させることによって閾値電圧を低下させるとともに絶縁破壊電圧を上昇させることもできる可能性がある。

また低温では、ソースドレイン電極として使用されているアルミニウム金属と酸化物とのショットキー障壁のためさらなる閾値電圧の上昇が起こっていることが考えられる。わずかな酸素欠損によるドーピングは酸化物側のキャリア密度を増加させてショットキー障壁を小さくし、よりオーミックな接合特性を得られる可能性がある。本研究では絶縁体基板へのドーピングとわずかに酸素欠損を導入した基板へのドーピングについて、チャンネル層の不均質性に基づいて議論し、低温測定に耐えうるデバイスの提案をおこなっている。

【参考】

H. Nakamura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 133504(2006)

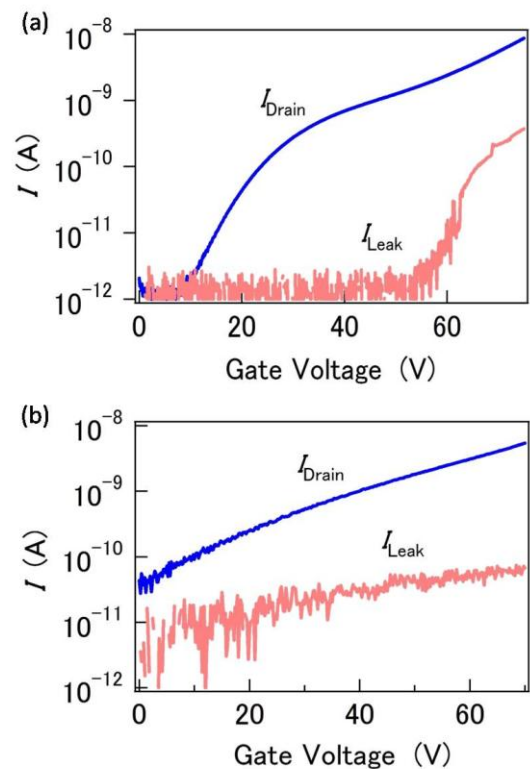


図6:(a)絶縁体STOからのキャリアドーピング。(b)わずかに酸素欠損を入れたSTOへのキャリアドーピング。