

絶縁体が電界効果で超伝導体に変身

超伝導体は、電気を流しても発熱せず損失がないので、電子工学分野や、エネルギー分野、輸送分野などで一大革命を招くと期待される。超伝導セラミックスに代わり高温超伝導体の夢を十分叶えるには、新しい物質系の開発が必須である。近年、酸化物の組成制御など、おもに化学的手法で超伝導材料の新しい芽が現れてきた(2008年8月号, p.10参照)。では、化学的手法以外に新しい超伝導材料を開発する道はないのか。

東北大学の川崎雅司と上野和紀らは、電気的手法(電界効果)により、絶縁体を超伝導状態に転移させた(K. Uenoほか, *Nat. Mater.*, 7, 855 (2008))。電界効果で絶縁体が超伝導状態になるのは今回が初めてである。電圧に対して転移は可逆であり、超伝導のオン・オフを電圧で制御できた。

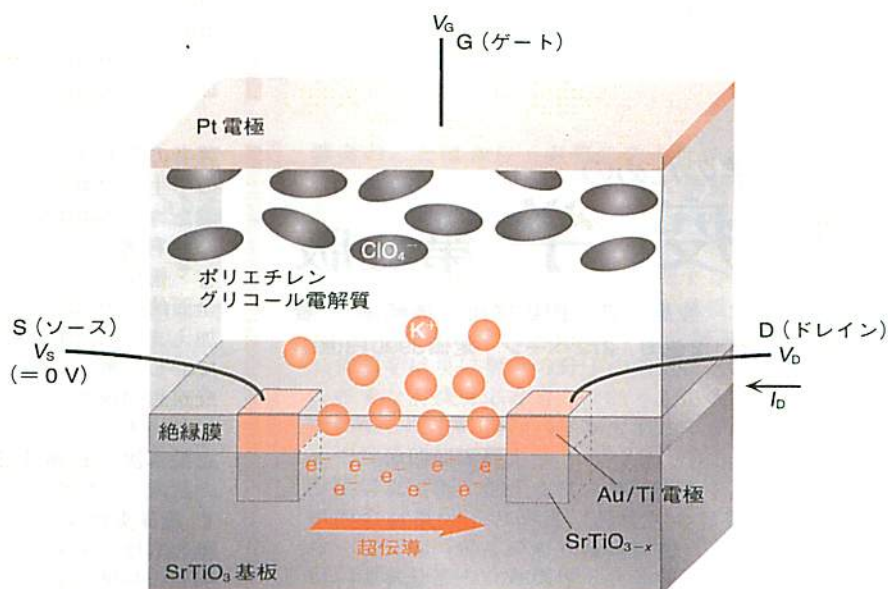
超伝導転移温度 T_c は、0.4 K(臨界面抵抗に到達)であるが、今後 T_c の向上に期待が寄せられる。

ダイヤモンドは高価でちょっと、という際に買うのが人工宝石のチタン酸ストロンチウム(SrTiO_3)である。単結晶は透明で高屈折率であり、合成が容易でしかも安価である。材料科学的には、不純物の添加や酸素の引抜きで電子 e^- が生成し電気が通り、熱変換素子などをつくれる。川崎と上野らは、この SrTiO_3 を絶縁体として用いた。

今回の設計思想は、携帯電話や携行型計算機などで集積回路中に使われる代表的な能動素子、すなわち電界効果トランジスタ(FET)に基づいている。しかしFET中では半導体の導通を制御できても、今回のように絶縁体を超伝導体にするのは難しかった。

今月のFLASH

- 絶縁体が電界効果で超伝導体に変身
- 大気中 NF_3 の初観測に成功
- 1個の金ナノ粒子触媒のふるまいを見る
- デンキウナギのように“発電”するには
- NASAの気温データの間違いをボランティアが指摘



電氣的に電荷担体濃度を上げると、超伝導が発現。凹みの開口部は $15\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 。

電界効果で超伝導を実現 (K. Uenoほか, *Nat. Mater.*, 7, 856 (2008) を参考に作成)

その理由は、FETでは電荷担体の e^- を高密度にして超伝導を招くためにゲート電圧 V_G を上げると、ゲートを隔離している膜が絶縁破壊してしまうからである。今回、隔離に高分子電解質のポリエチレングリコール(PEG)を使うことでこの問題を解決した(図)。

$SrTiO_3(100)$ 面に設けた細長い凹みの両端は、電子欠乏で電気が通る $SrTiO_{3-x}$ にしてあり、Au/Ti電極を介してドレインとソースになる。PEGはこの凹みとゲートの間に満たされる。ソースを基準として、ゲートに V_G をかけ、ドレインにはドレイン-ソース間の電流 I_D の源であるドレイ

ン電圧 V_D をかけた。超伝導はドレイン-ソース間の $SrTiO_3$ で起こる。

PEGの使用という工夫に加えて重要な点は、電気二重層という電気化学的な概念を導入したことである。一般に、電気二重層を使った大容量のコンデンサーは、電子機器の保守電源に使われている。今回PEGには過塩素酸カリウム($KClO_4$)が溶かしてあり、 V_G によりゲート表面に ClO_4^- 、ドレイン-ソース間の $SrTiO_3$ 表面に K^+ が近寄る。この K^+ に誘われて $SrTiO_3$ 内部の表面近くに e^- が集まり電気二重層ができた。これで電荷担体の e^- は高密度になり、超伝導に至った。川崎と上野らはこのFETを“電気二重層ト

ランジスター”とよんでいる。300 Kでは通常のFETとして作動し、300~2 Kでは I_D からわかる面抵抗は V_G に依存して1~2桁減り、0.4 Kで臨界面抵抗に達した($V_G = 3.0$ V)。

金属膜に負電荷を貯めると T_c が変わるとの先駆的な報告(1960年)がなされたのち、 $SrTiO_3$ は超伝導体として好ましいとわかっていたし、FETもつくられていた。また、PEG/過塩素酸塩を使うことや、酸化亜鉛(ZnO)の“電気二重層FET”における絶縁体-金属の転移も知られていた。川崎と上野らはこれらの知見をうまく活用し、超伝導体の新物質系を発芽させたといえる。

環境科学 大気中 NF_3 の初観測に成功

温室効果ガスの候補である NF_3 の寿命は CO_2 の5倍、地球温暖化係数GWPは約17000倍もある。昨年の生産量は約4000トン、主用途は半導体や液晶の製造で大気への排出は2%とされてきた。

このたび米国スクリプス海洋研究所のR. F. Weissらは、大気中の NF_3 を初観測し、排出量の多さを再認識させた(R. F. Weissほか、*Geophys. Res. Lett.*, 35, L20821 (2008))。

大気の採取地は、北半球と南半

球の合計3カ所である(図、NASAが出資しオゾン層破壊物質を調べてきた全地球的観測網AGAGEの観測所を2カ所含む)。

今回AGAGEのガスクロマトグラフィー/質量分析計(GC/MS)への注入前に行う試料調製を工夫し、吸着と精留によって、 CO_2 をはじめとする他の気体と分けて NF_3 を分析することに成功した。

NF_3 を多く使う北半球のみでの排出を考えたモデルを用いて(図)、 NF_3 濃度の変化を表現した

ところ、両半球で NF_3 濃度は年々ほぼ指数関数的に増加した。全地球ではこの30年で約0.02 pptから0.454 pptに至り、昨年は生産量の16%に及ぶ620トンの NF_3 が排出したことが判明した。2006年でも、見積りは140トン/年であったが、観測の結果、4倍の563トン/年となった。

NF_3 は1960年代にロケット燃料の酸化剤として使われ始め、昨年になって観測が必要と提言された(本誌2008年10月号、p. 13参照)。

