

電気二重層トランジスタを用いた酸化物半導 体の超伝導制御

第30回無機材料に関する最近の研究成果発表会
2013年1月28日

東京大学総合文化研究科相関基礎科学系
JSTさきがけ

上野和紀

Outline

イントロダクション

超伝導体の電界効果

電気二重層トランジスタ

SrTiO_3 : 電場誘起による初めての絶縁体-超伝導転移

電場誘起による超伝導制御

KTaO_3 : 電場誘起を用いた超伝導体の発見

最近の展開

二次元超伝導: 電場誘起超伝導の物理的性質

Co-TiO_2 : 電場誘起による室温強磁性の制御

Collaborators

電場誘起超伝導 : SrTiO_3 & KTaO_3

東北大金研

T. Nojima



野島研

S. Nakamura



東北大金研

川崎研

(現:東大物工)



東北大金研

岩佐研

(現:東大物工)



電場誘起超伝導 : 二次元性評価

京大理物 前野研

Y. Maeno



前野研

S. Yonezawa



電場誘起強磁性

東北大金研川崎研

(現 : 東大理化・長谷川研)

T. Fukumura

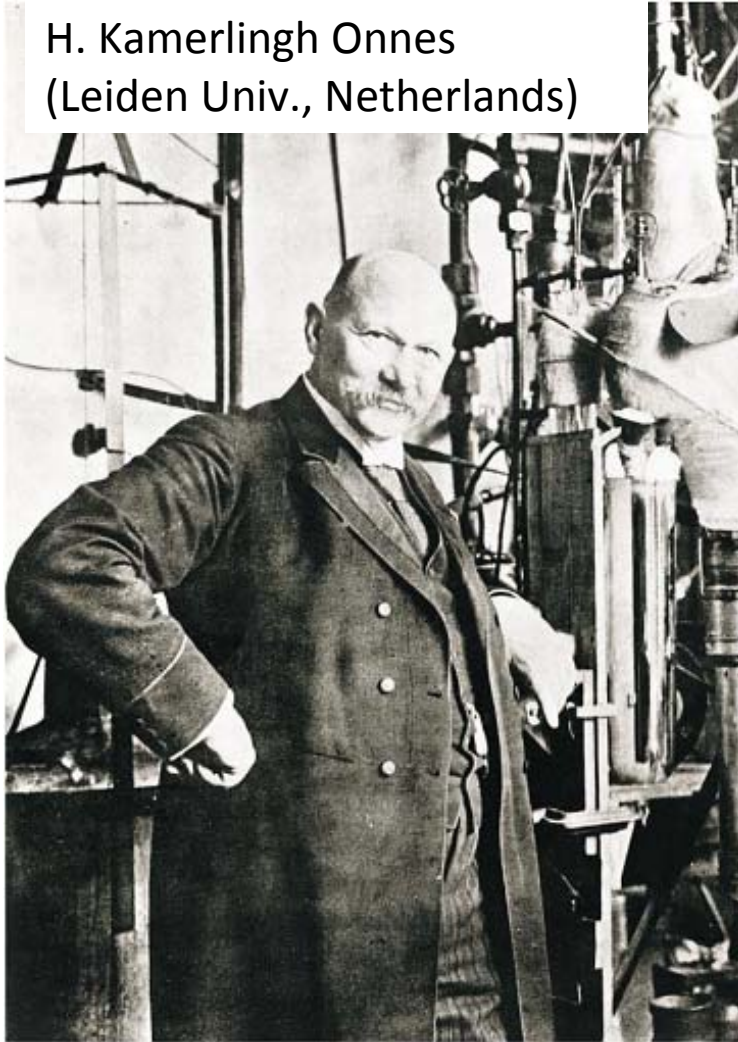


Y. Yamada



低温の探求

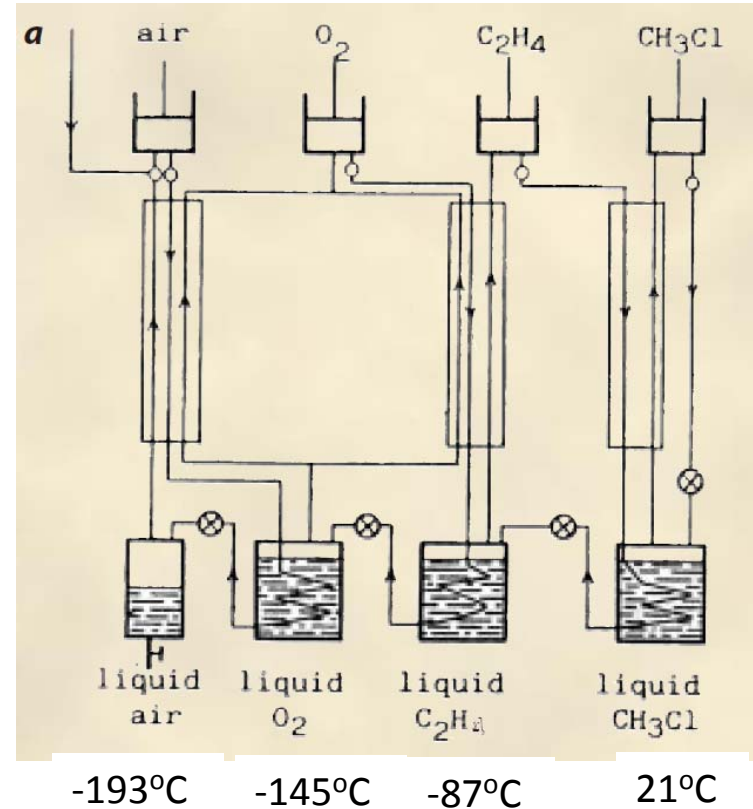
H. Kamerlingh Onnes
(Leiden Univ., Netherlands)



Scientific American, March 1997.

1892年 液体窒素量産(14l/h)

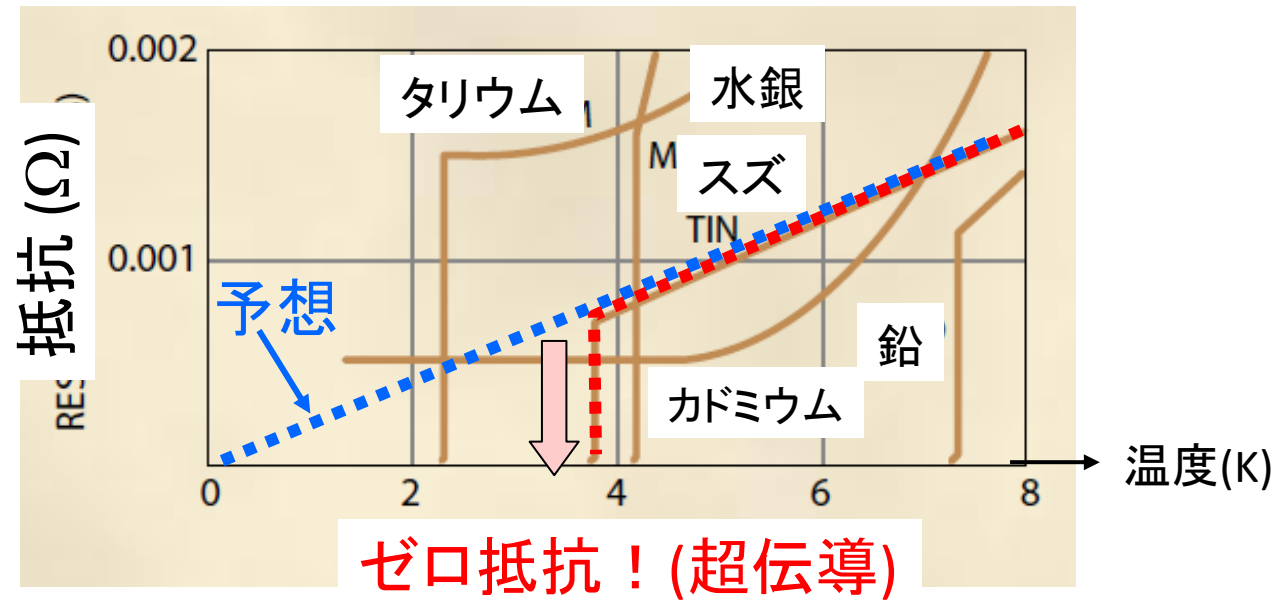
ジュール・トムソン冷却(冷蔵庫と同じ)



1895年 ヘリウムの発見

1908年 ヘリウム液化の実現-269°C (4.2 K)

超伝導の発見

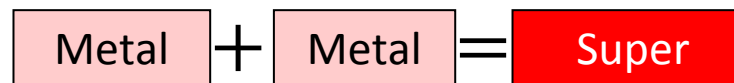


超伝導磁石：7T – 15 T
(ピップエレキバン[®]の100倍)



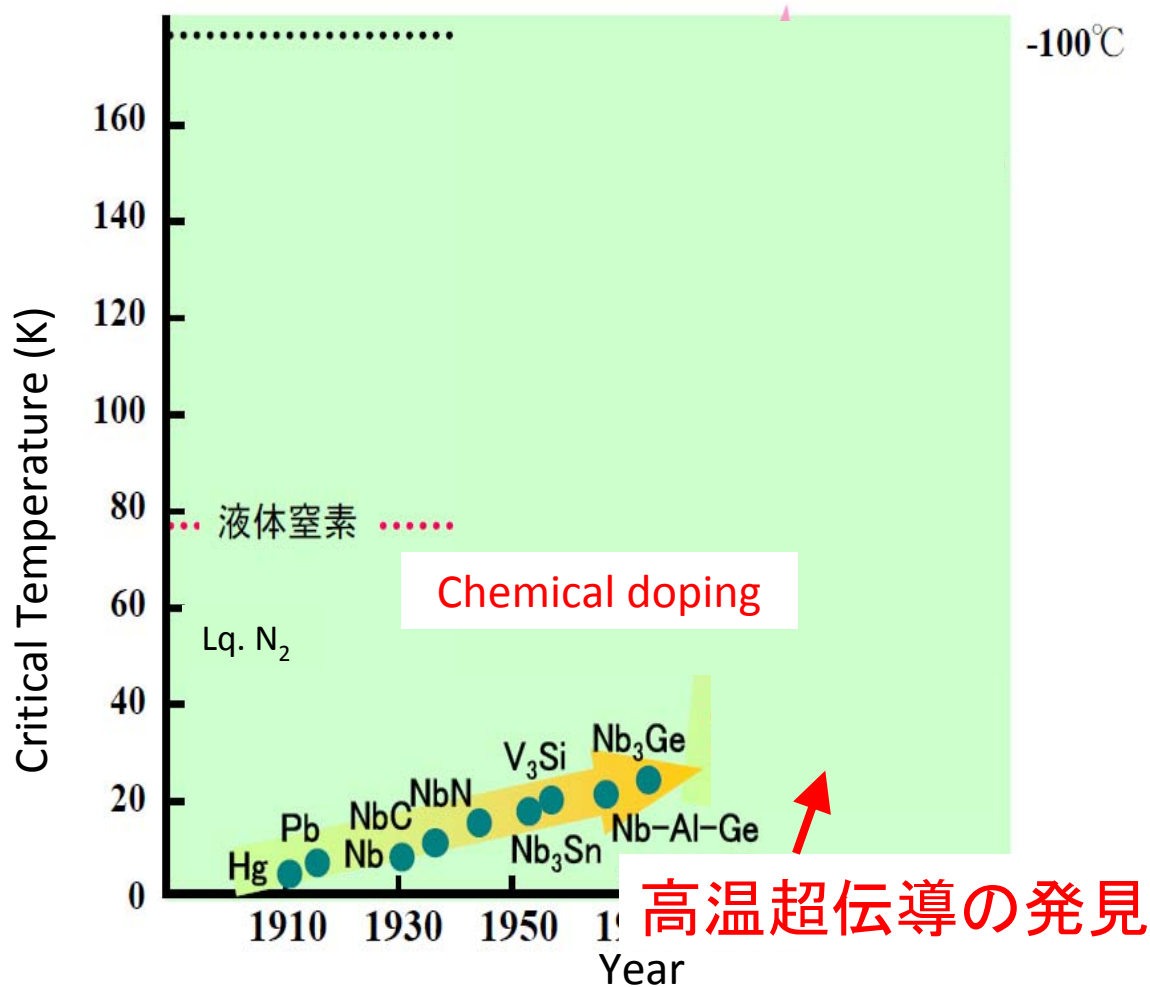
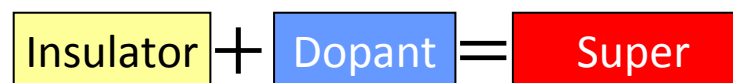
超伝導転移温度の向上

Alloying (合金化)

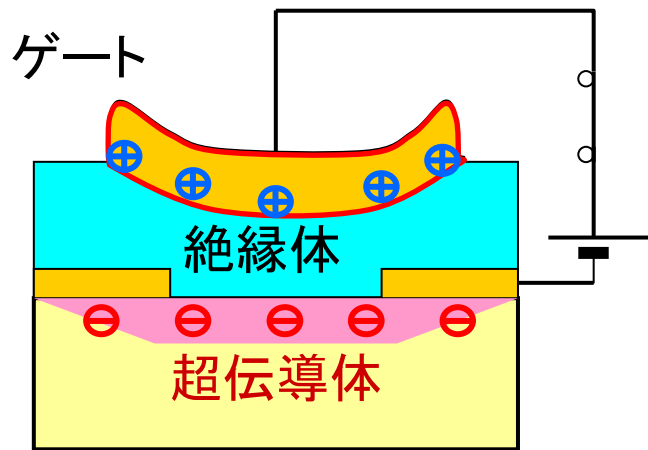


Chemical doping

化学的に絶縁体を超伝導に



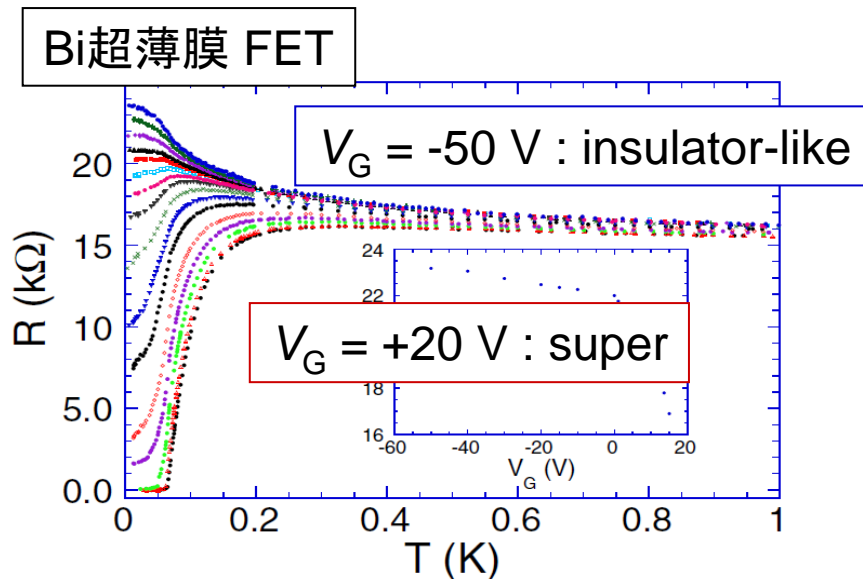
超伝導体を用いた電界効果トランジスタ



1960 : Si MOSFETの発明
 1960:トランジスタによる
 初めての超伝導制御

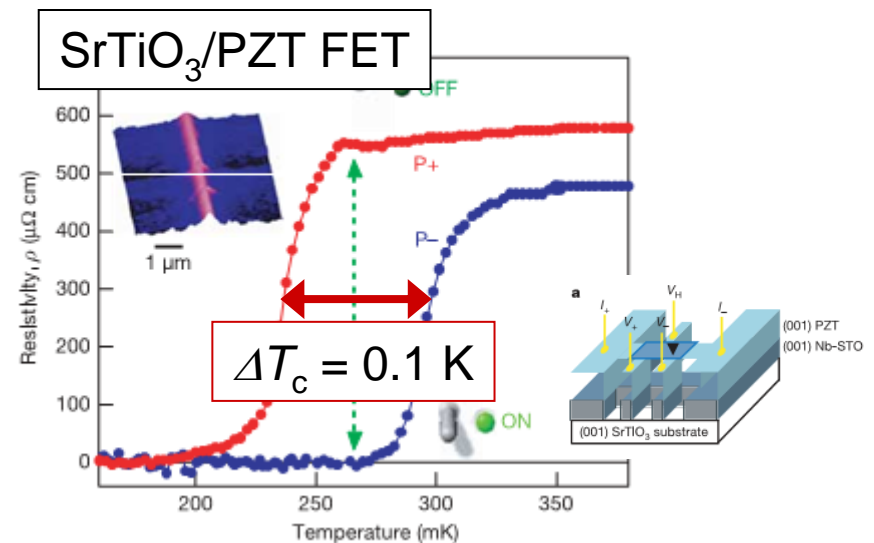
R. E. Glover, et al.,
 Phys.Rev.Lett. 5, 248 (1960)

Insulator-Superconductor transition



K. A. Parendo, et al.,
 Phys. Rev. Lett. 94, 197004 (2005)

T_c modulation



K.S.Takahashi et al, Nature 441, 195 (2006)

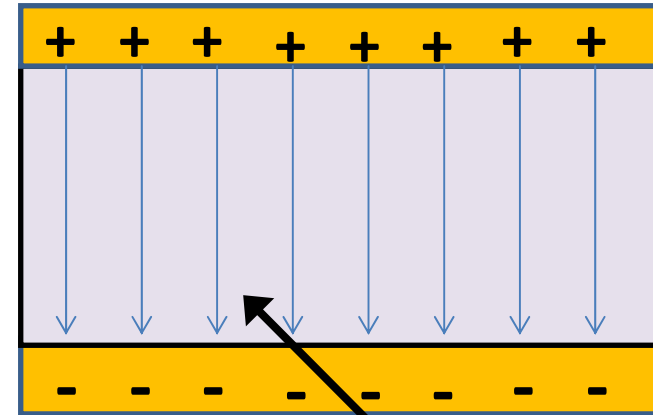
Electric double layer transistor (EDLT)

Conventional capacitor

Capacitance : pF ~ μF (10^{-12} - 10^{-6})



$d =$
0.1-10 μm



誘電体 ; 誘電率 $\epsilon = 10 - 1000$

従来の高性能化

(積層セラミックコンデンサ, $10\mu\text{F}$)

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{d}$$

強誘電体 (circled ϵ_s)
微細構造化 (circled d)

薄膜・高耐圧化

MISFETのキャリア濃度(N_s)

$$N_s = \frac{Q}{S} = \frac{CV}{S} = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{V}{d}$$

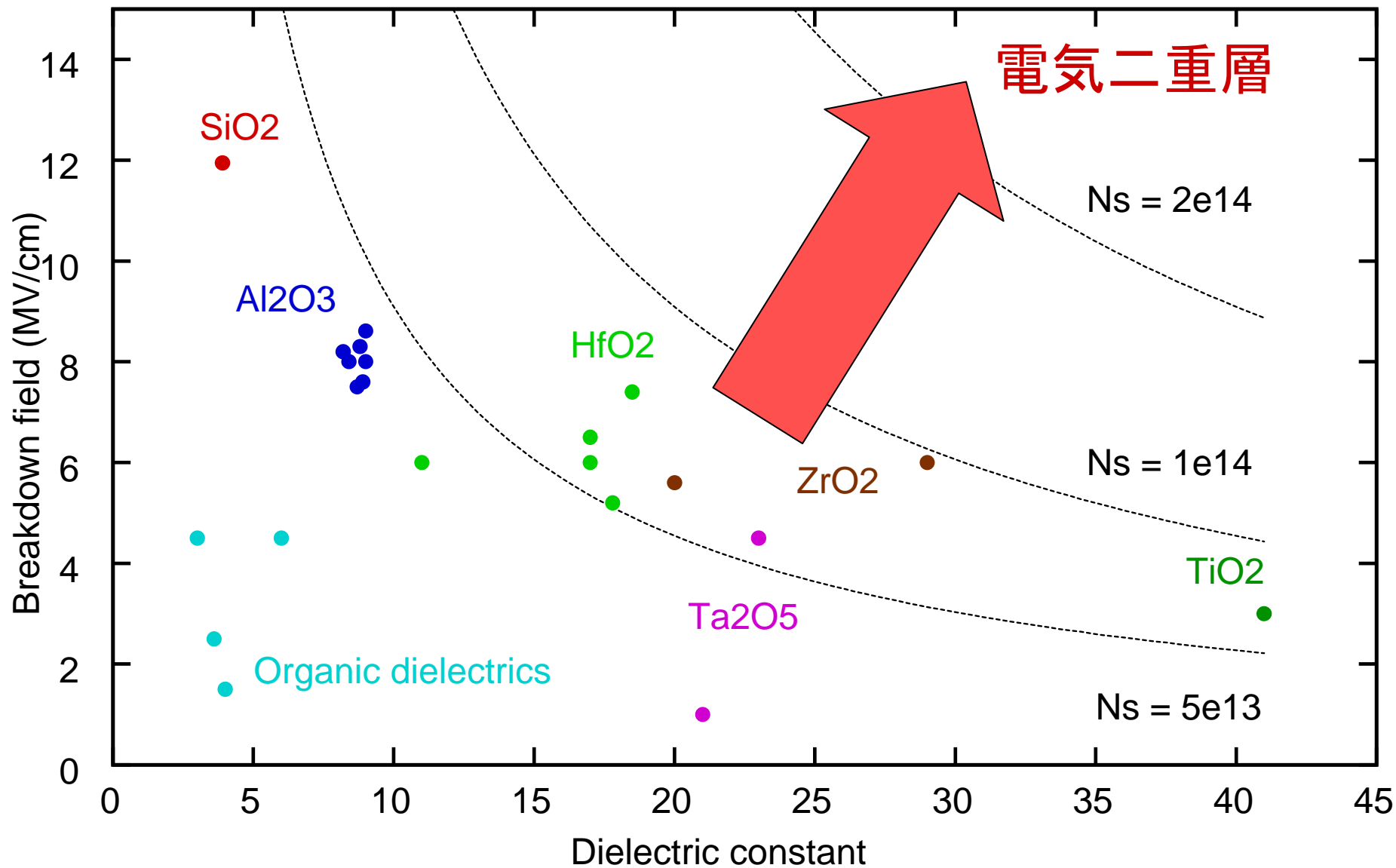
(circled $\frac{V}{d}$)

絶縁耐圧 $E_{\text{max}} = V_{\text{max}}/d$

アルミナ碍子: 100 kV/cm

SiO₂ 絶縁層: 10 MV/cm

固体絶縁層での耐圧と最大蓄積キャリア濃度

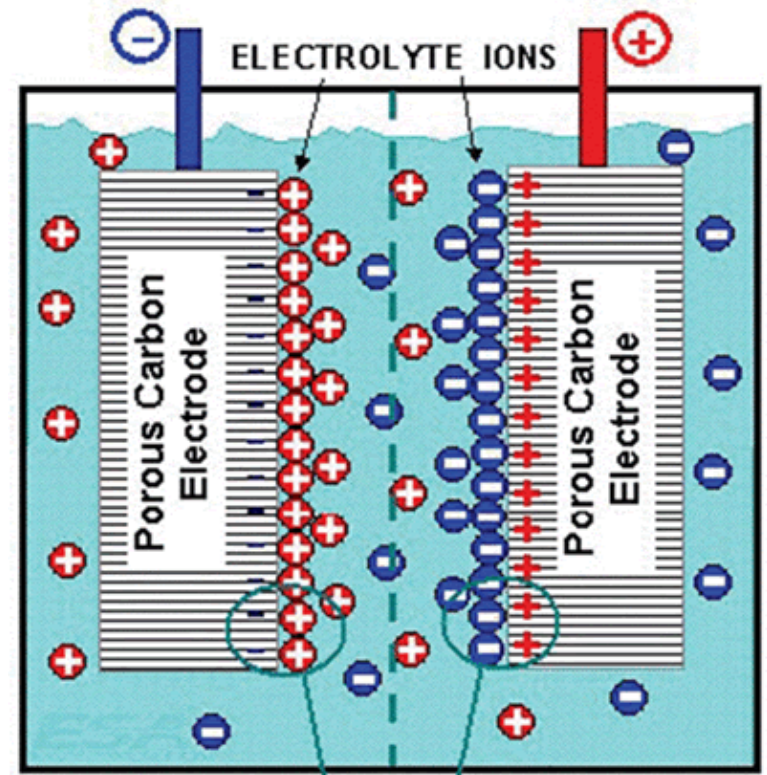


Electric double layer transistor (EDLT)

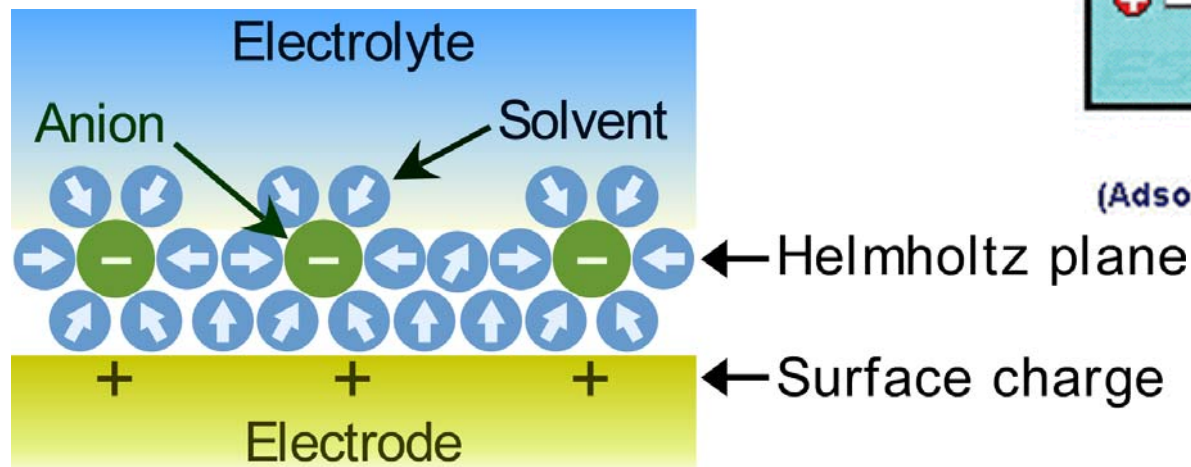
EDLC : Electric Double Layer Capacitor

(Supercapacitor)

Capacitance : mF ~ kF ($10^{-3} - 10^3$)

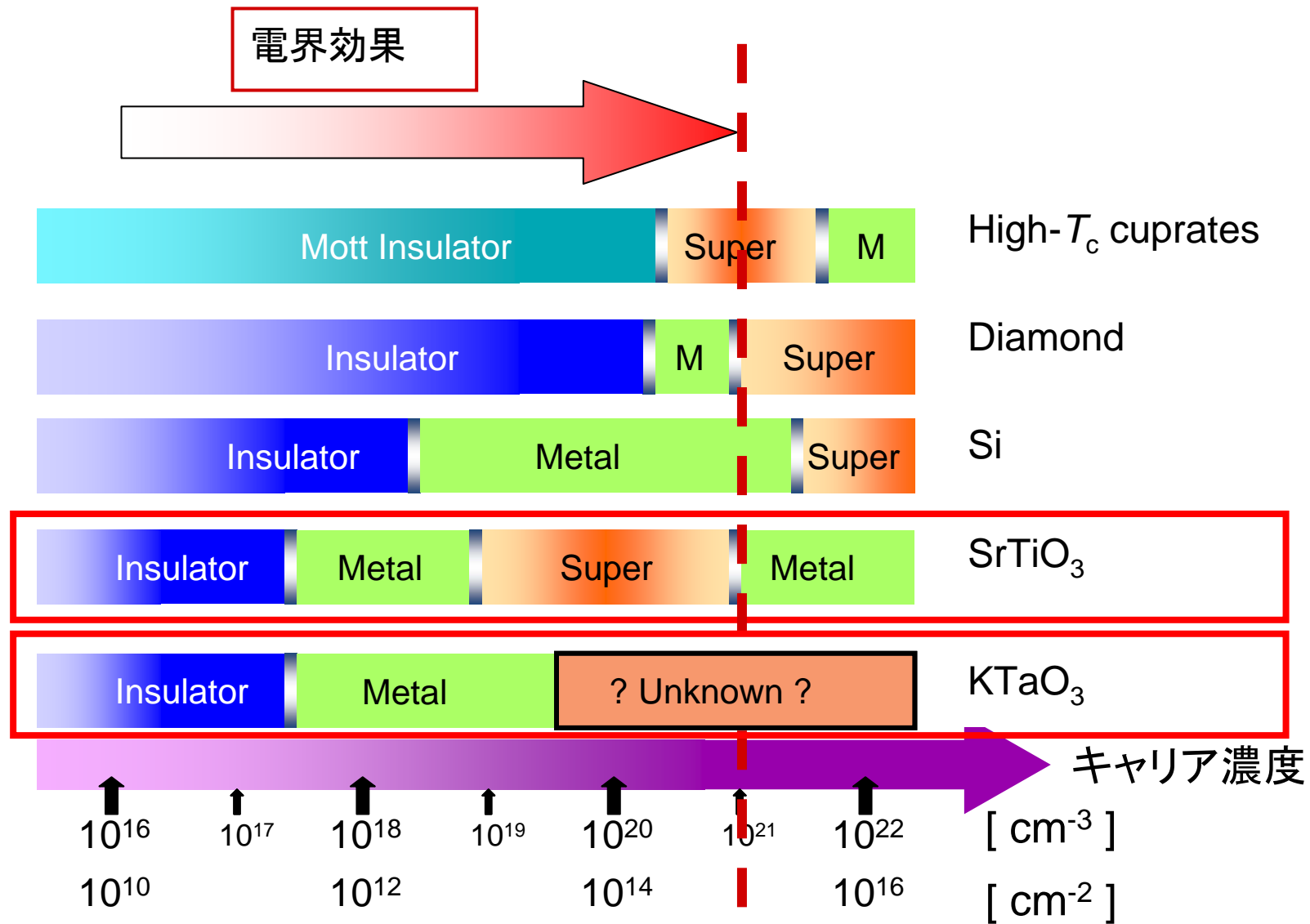


Double Layer Capacitors
(Adsorbed layers of ions and solvated ions)



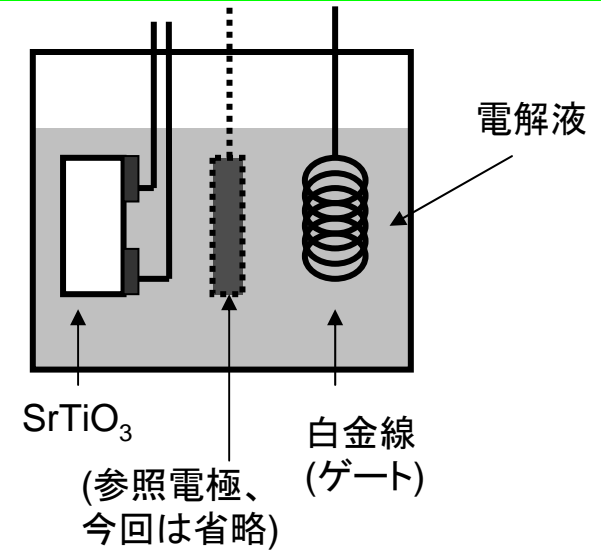
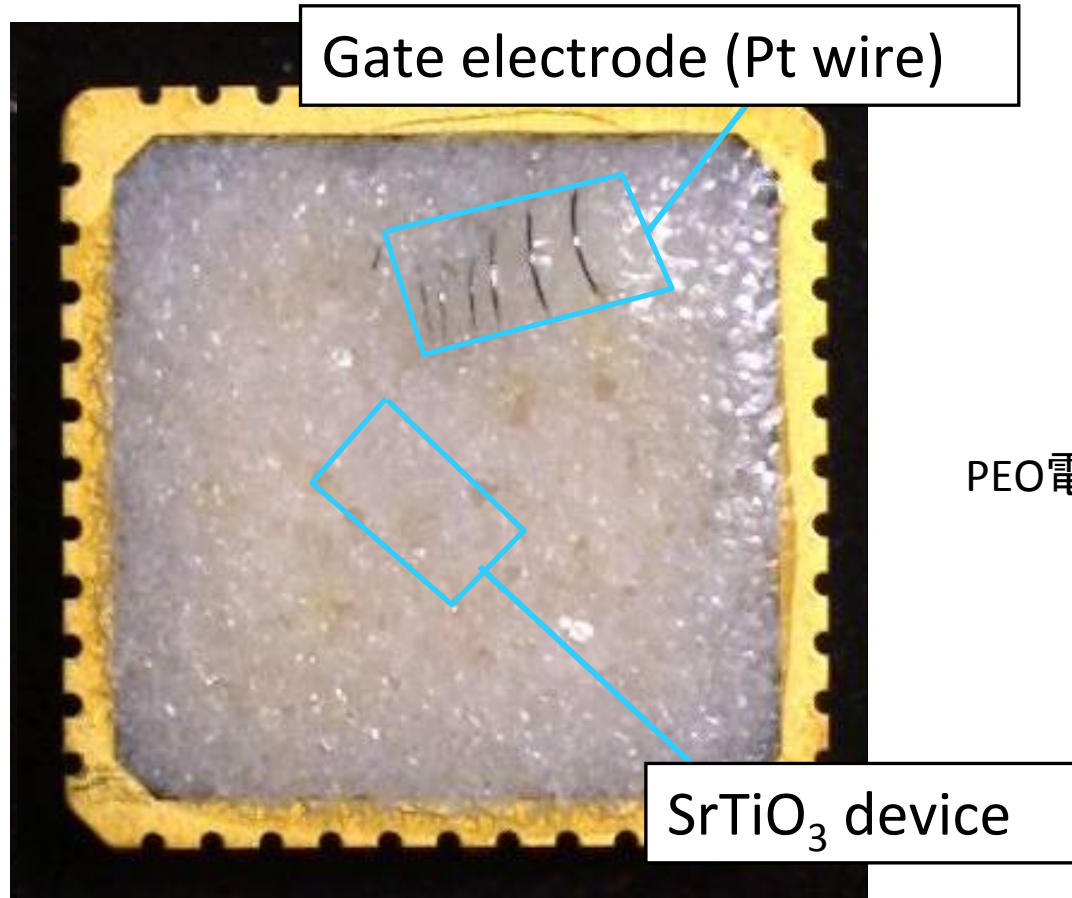
<http://www.ic.gc.ca/>

キャリアドーピングによる超伝導

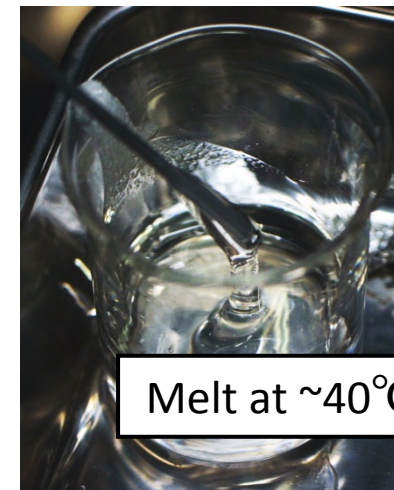


Device structure of SrTiO₃ EDLT

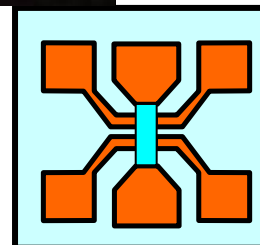
EDL cell



PEO電解液

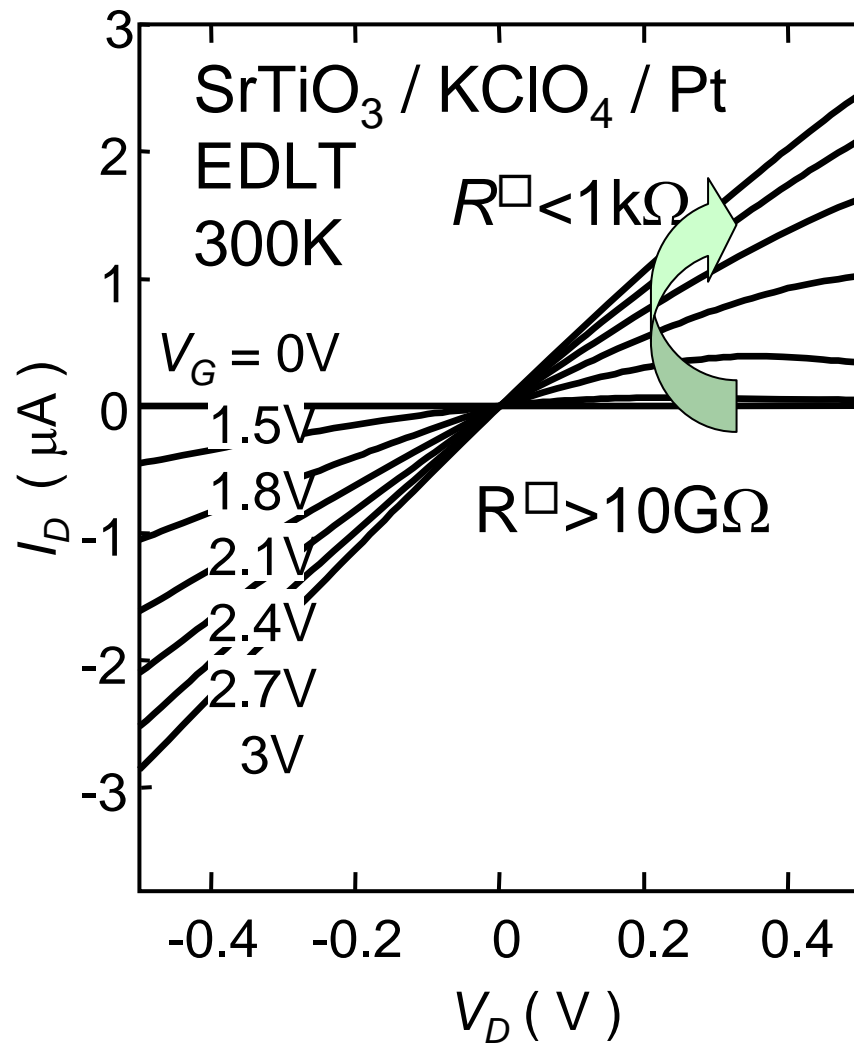


Dipped in glovebox

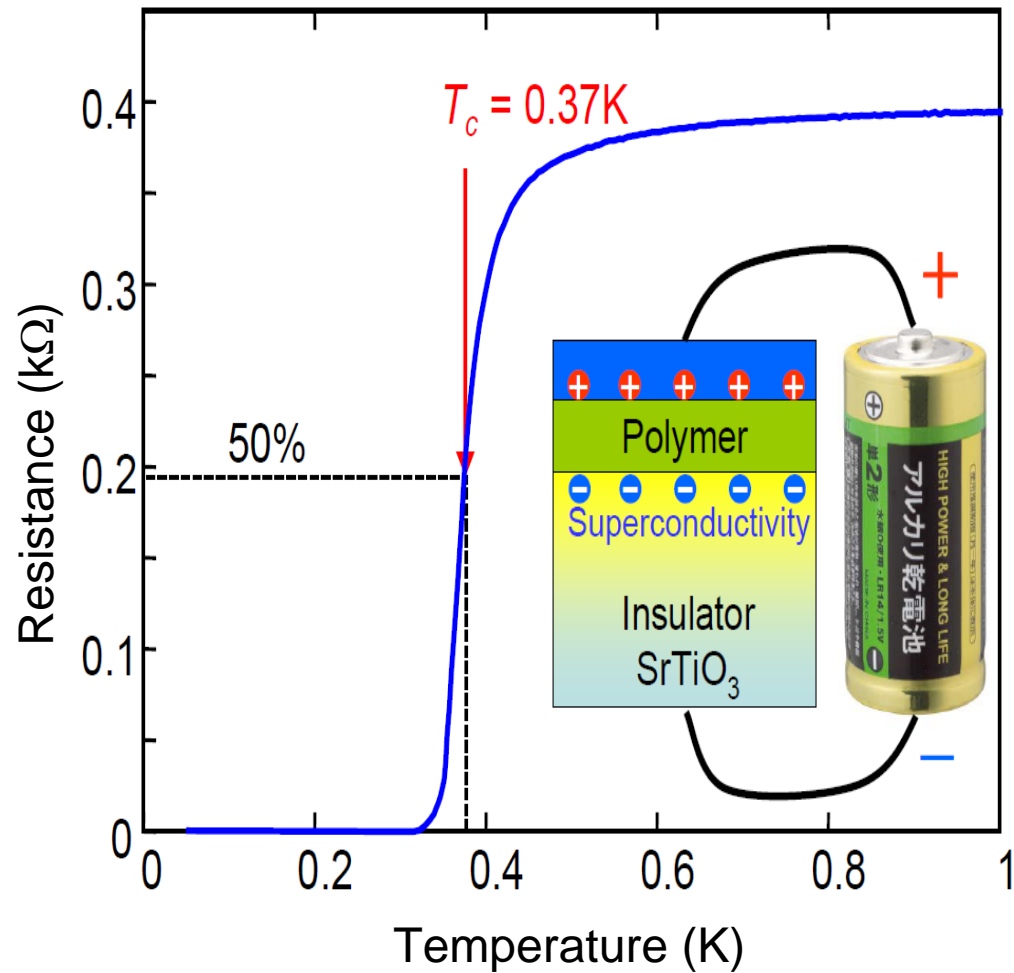


Superconductivity in SrTiO₃ EDLT

Output characteristics



R-T curve at low T

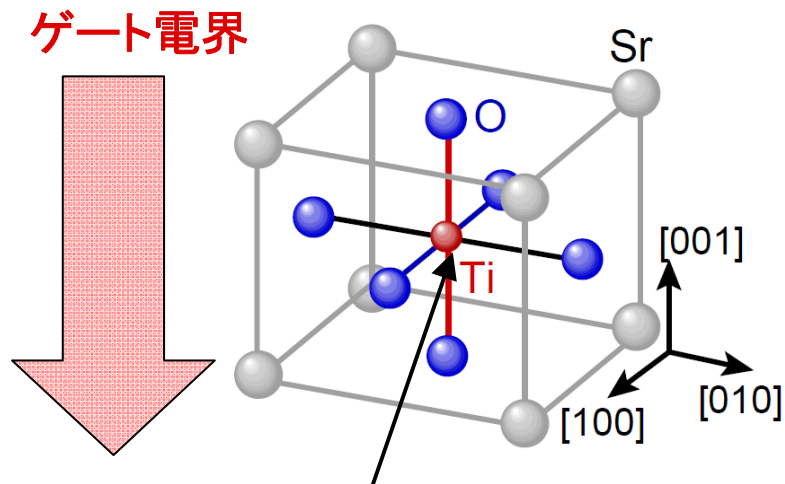


K. Ueno, *Nature Materials*, **7**, 855 (2008)

KTaO₃ EDLT

SrTiO₃

- cubic 対称性
- 105K で tetragonal に変化、0.4K の超伝導



Conduction band:
Ti 3d → Ta 5d

KTaO₃

SrTiO₃ の類似物質

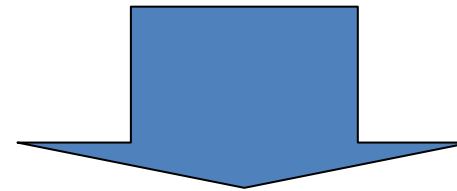
- 透明酸化物半導体
- 高品質の単結晶が入手可能
- 低温で高移動度
- Ta 5d バンド :

強いスピン軌道相互作用

- 0.01 K まで超伝導転移せず

$$(n_{\max} = 7 \times 10^{19} \text{cm}^{-3})$$

KTaO₃ へ電気二重層トランジスタ作成

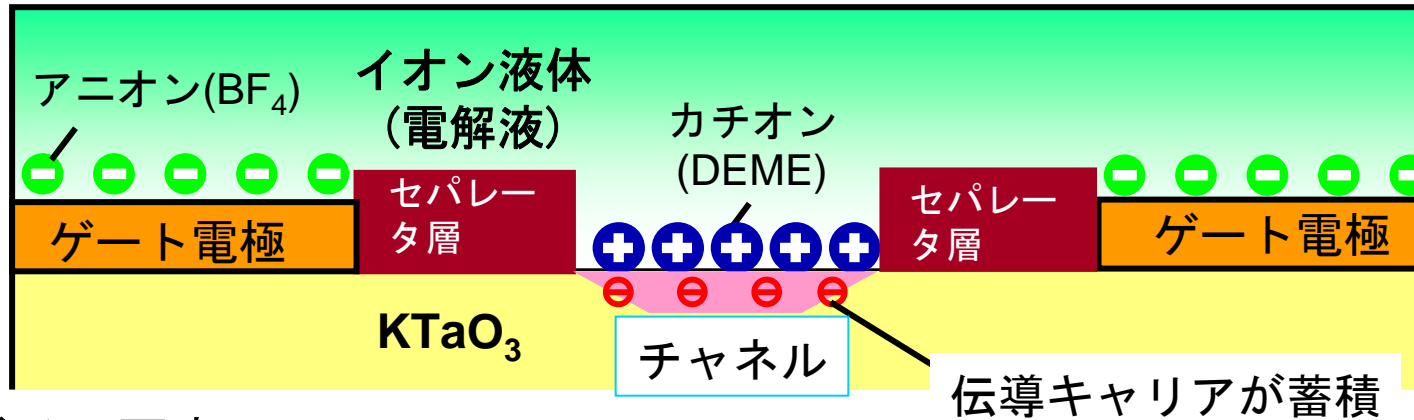


不純物ドーピングで不可能な
高キャリア濃度の実現

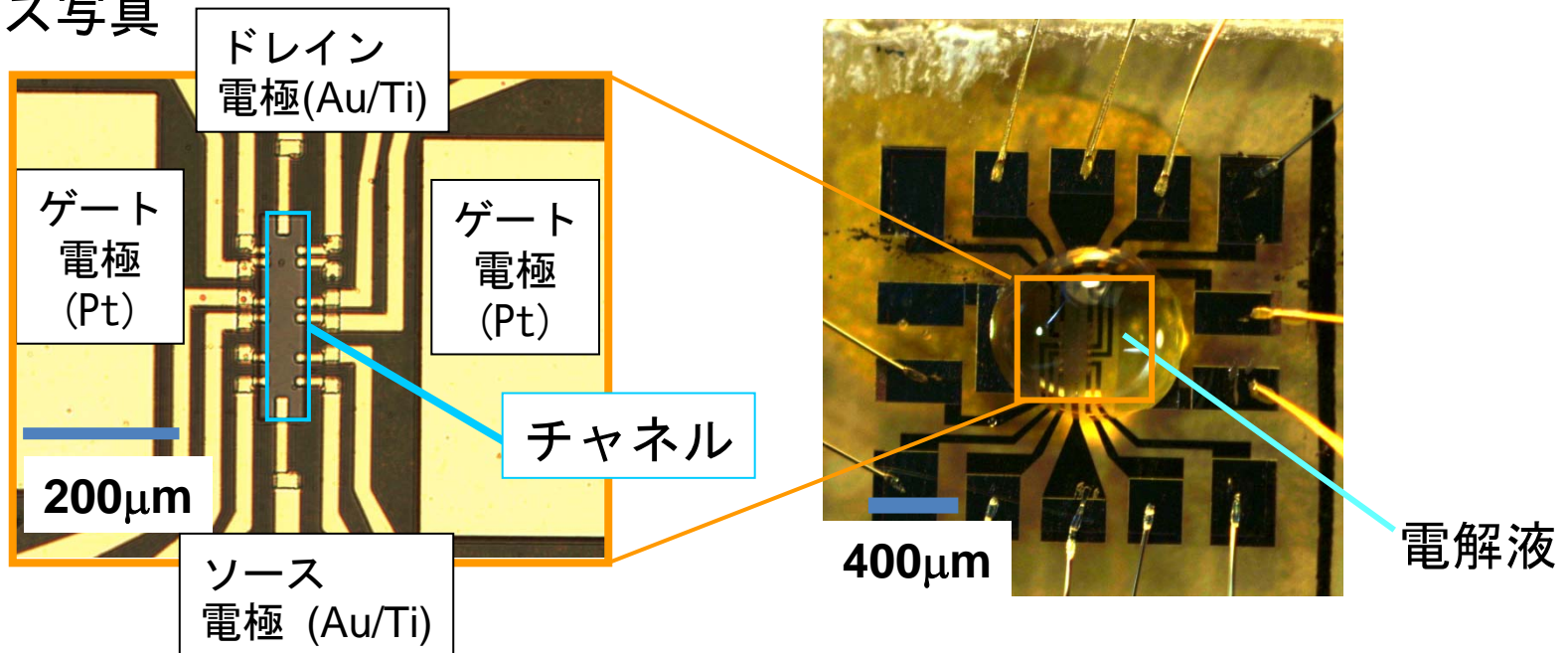
超伝導の発現

プレーナ構造電気二重層トランジスタ

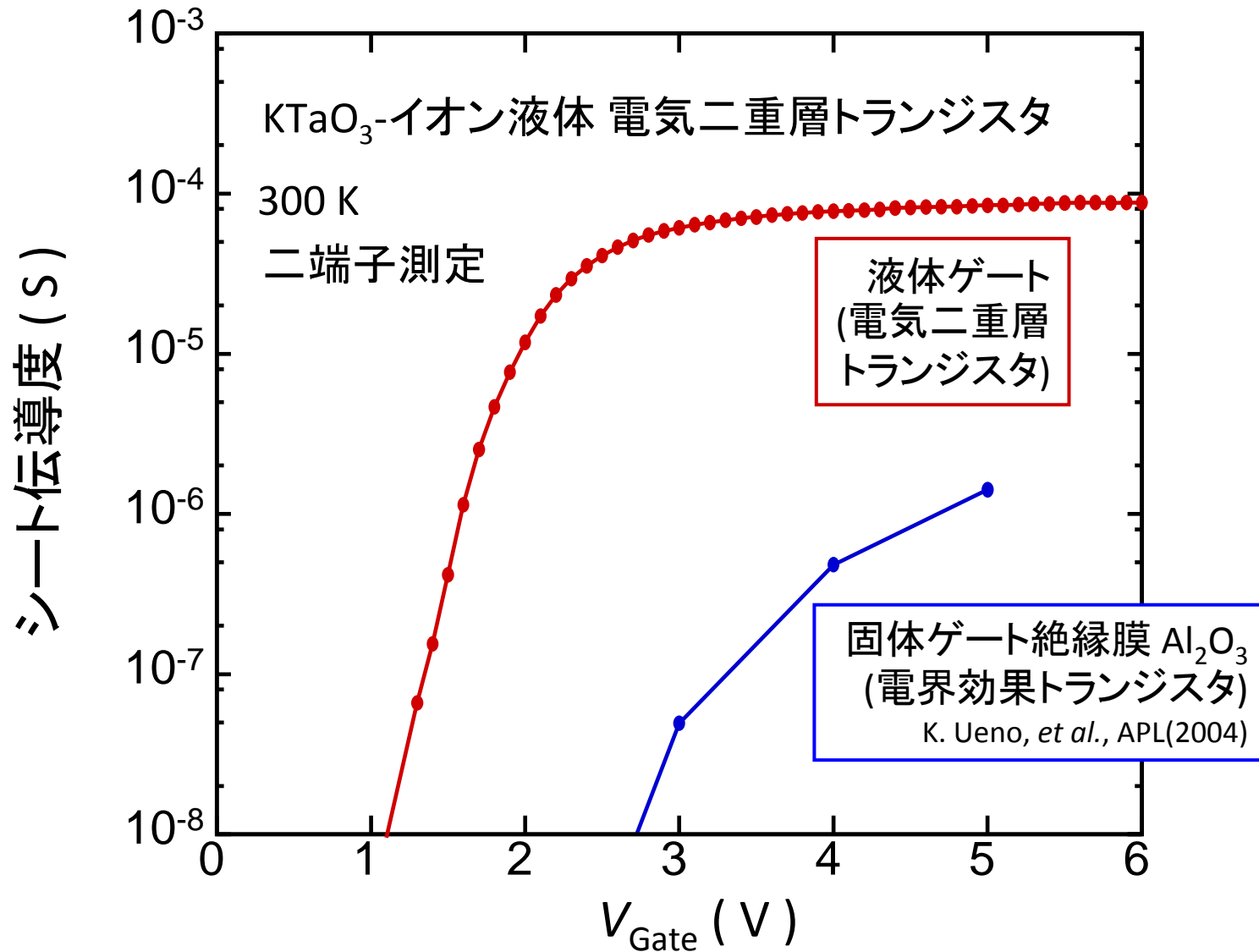
プレーナ構造デバイスの断面図



デバイス写真

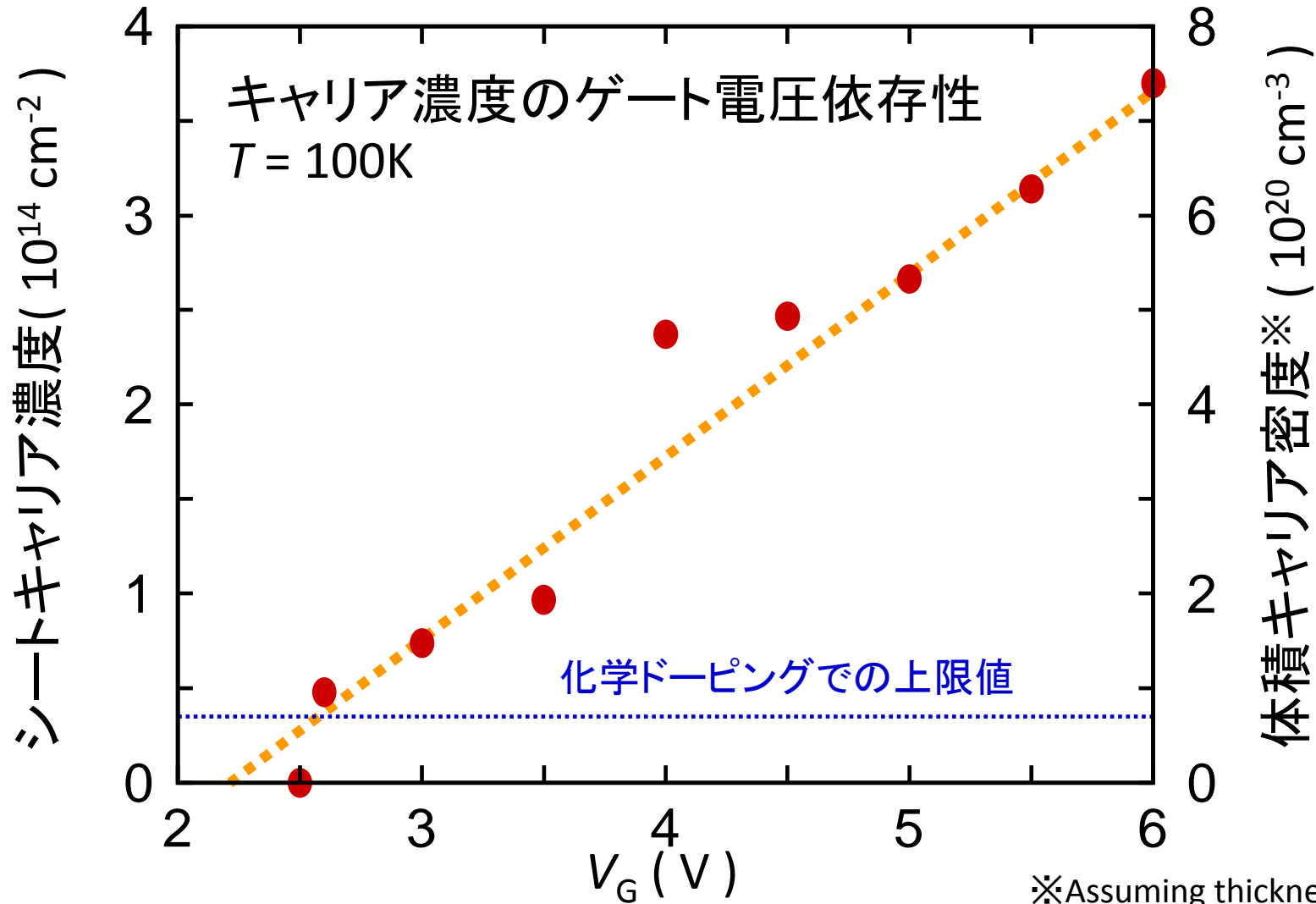


KTaO₃ EDLT : Device characteristics at 320 K



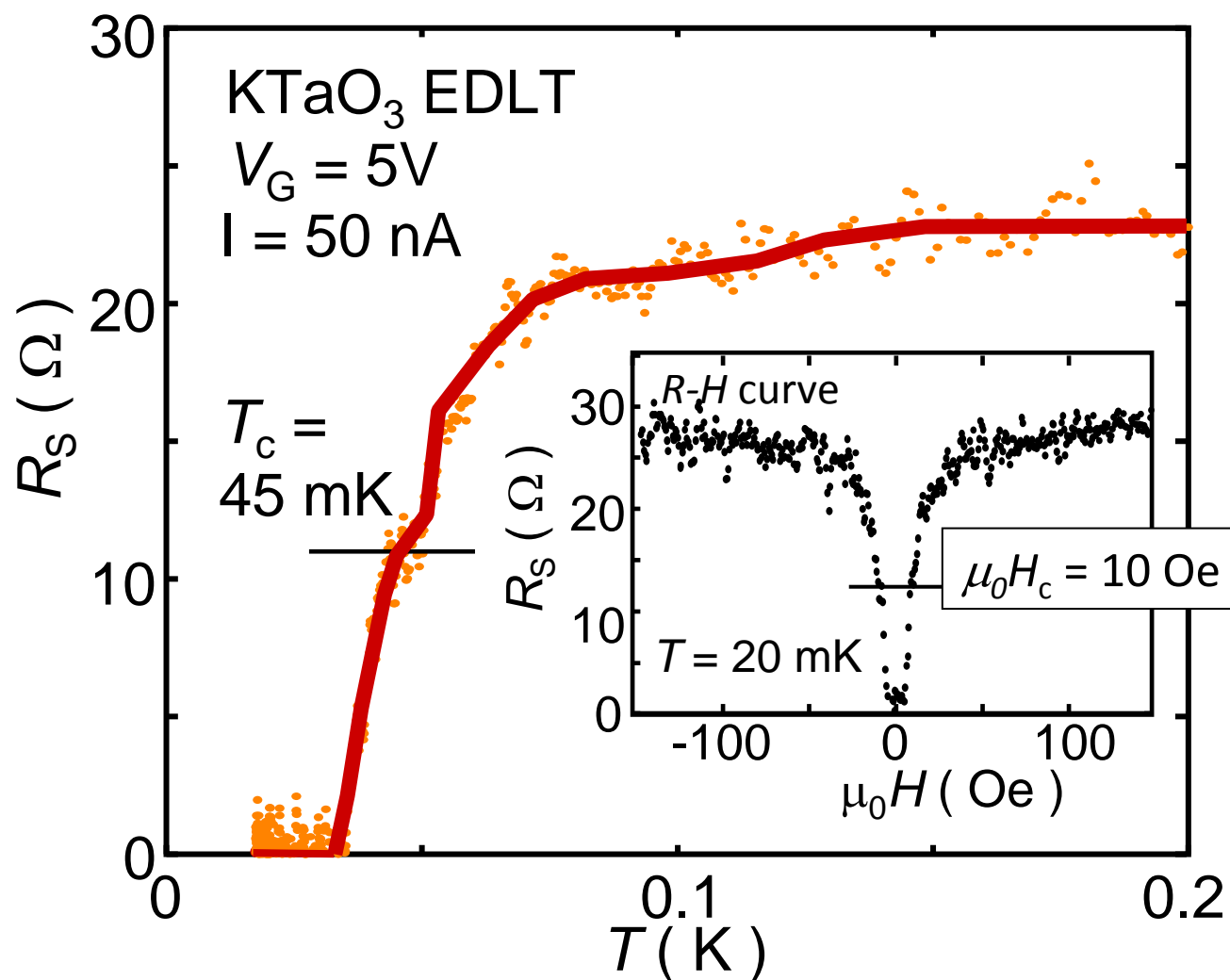
※KTaO₃ ではV_G=6Vまで電気化学反応せず

KTaO₃ EDLT : Gate bias dependence of charge density



化学ドーピングの限界を大きく上回るキャリア誘起

極低温での超伝導の発見



Superconductivity emerged on KTaO₃ surface

まとめ

超伝導物性：
電場によるキャリアのその場制御
二次元超伝導

電気二重層トランジスタによる
電場誘起キャリアドーピング

新物質開発

電場誘起による従来は
不可能だった新規超伝導体

スピントロニクス応用

強電界・高キャリア濃度制御
による新デバイス開発