

# 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

$\text{SrTiO}_3$  : 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

$\text{KTaO}_3$  : 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  
 $\text{Co-TiO}_2$  : 電場誘起による室温強磁性の制御

# Collaborators

電場誘起超伝導 :  $\text{SrTiO}_3$  &  $\text{KTaO}_3$

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

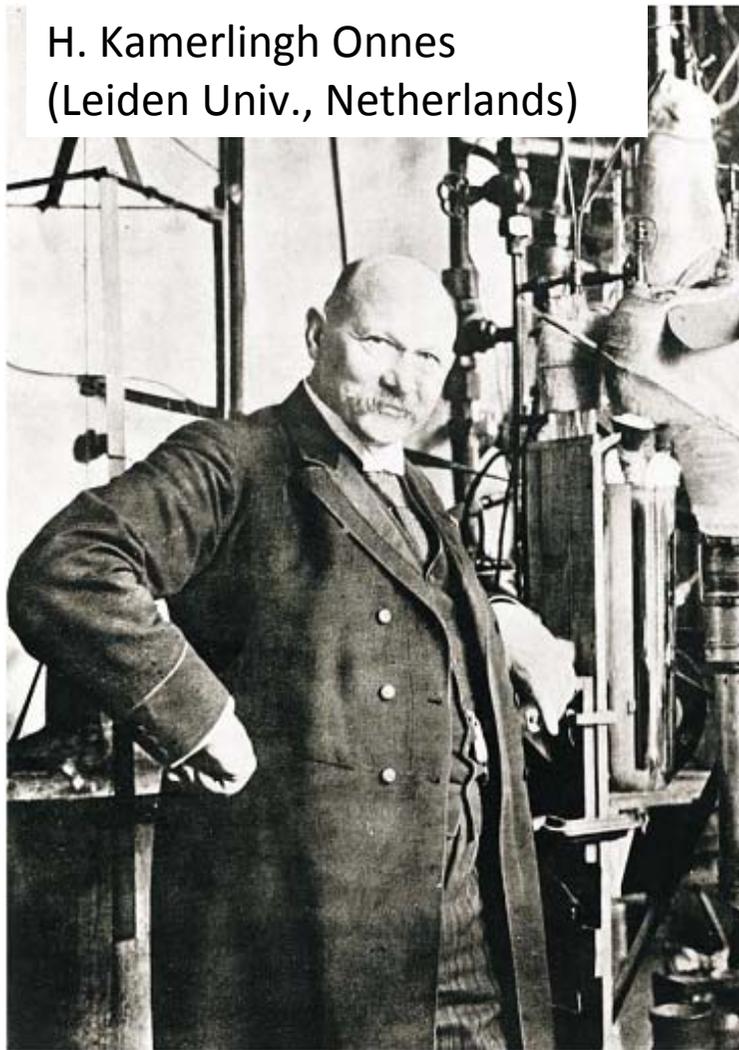


Y. Yamada



# 低温の探求

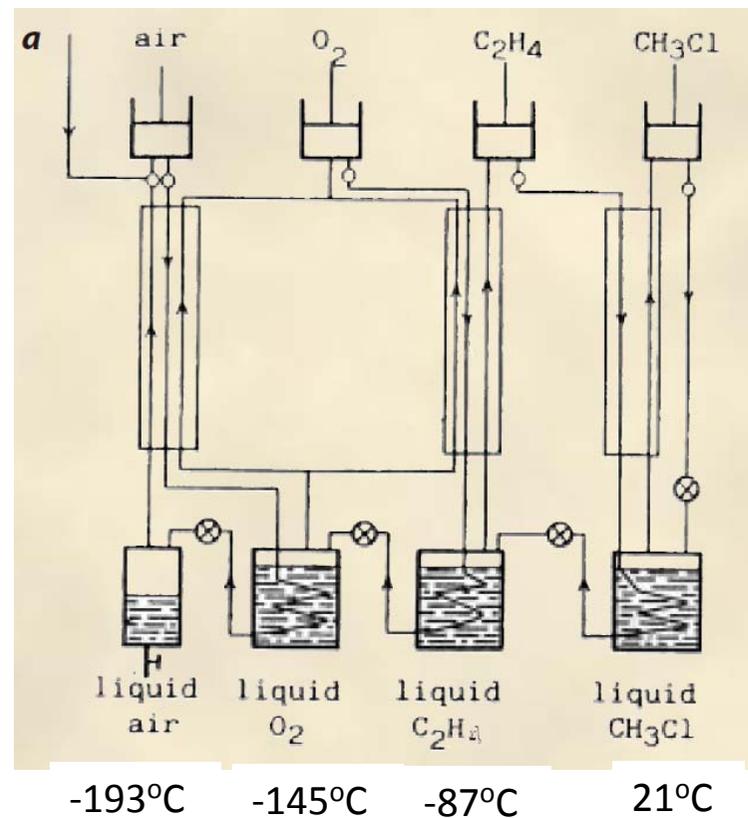
H. Kamerlingh Onnes  
(Leiden Univ., Netherlands)



Scientific American, March 1997.

1892年 液体窒素量産(14l/h)

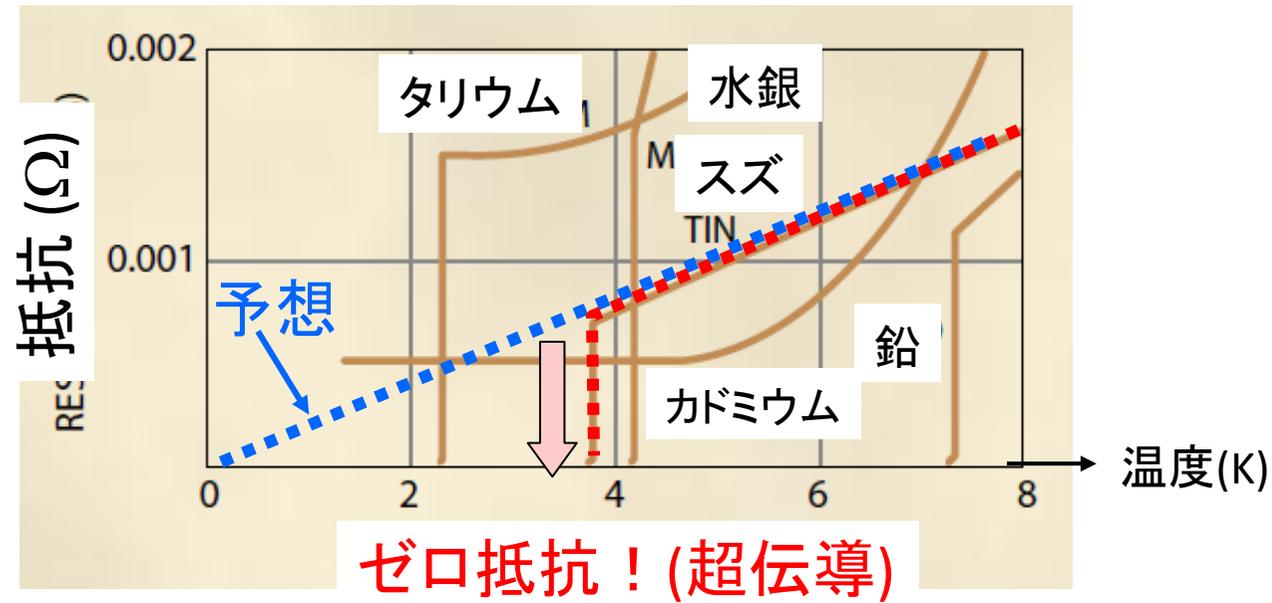
ジュール・トムソン冷却(冷蔵庫と同じ)



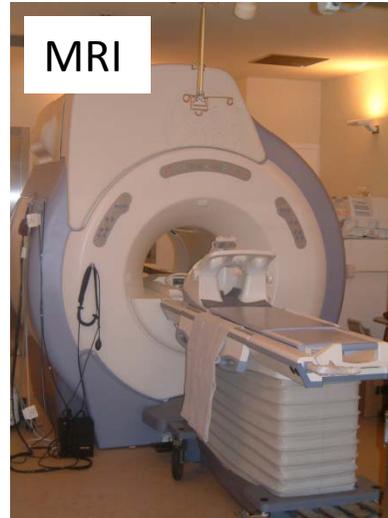
1895年 ヘリウムの発見

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<sup>®</sup>の100倍)



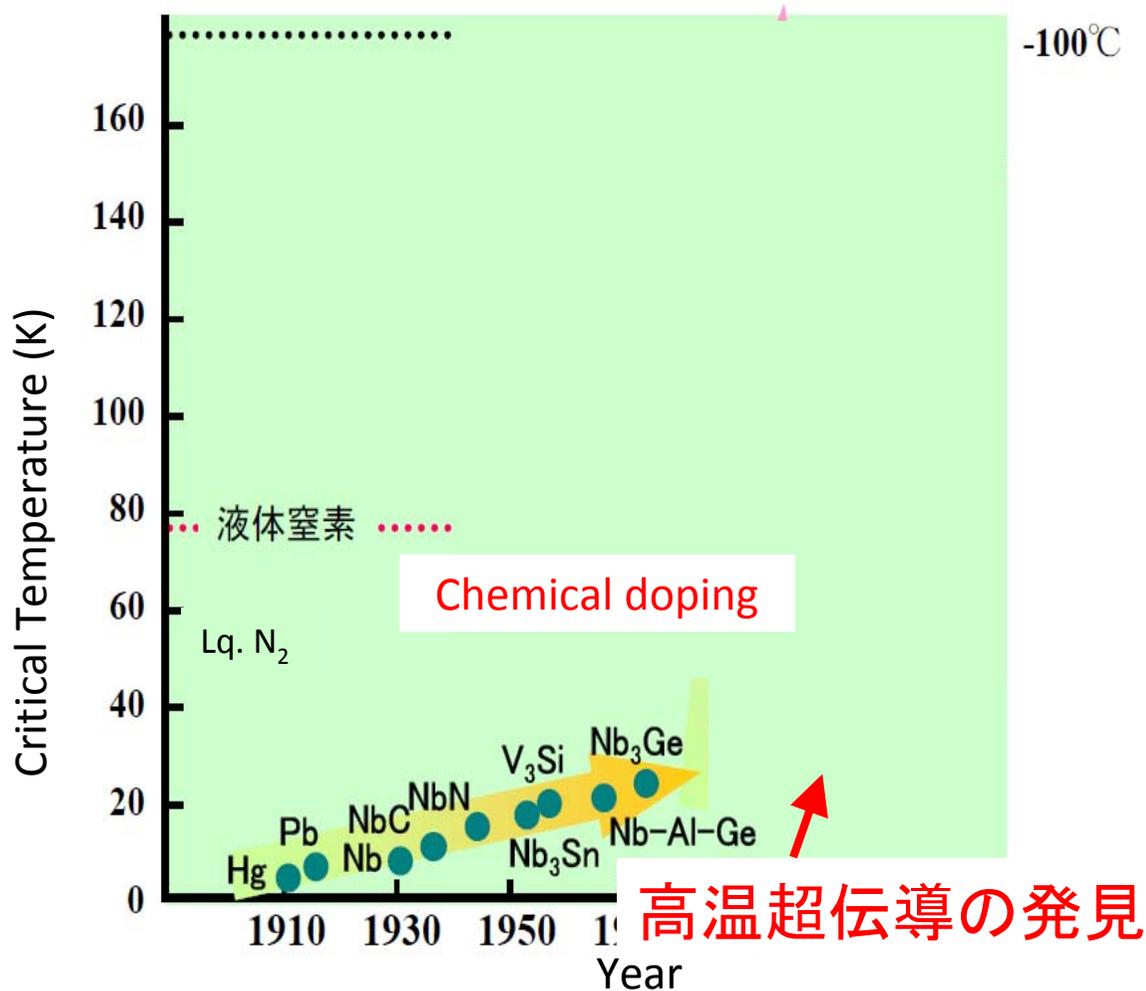
# 超伝導転移温度の向上

Alloying (合金化)

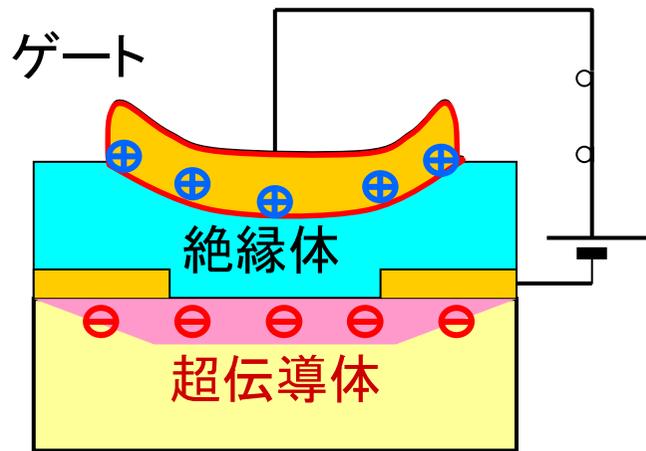


Chemical doping

化学的に絶縁体を超伝導に



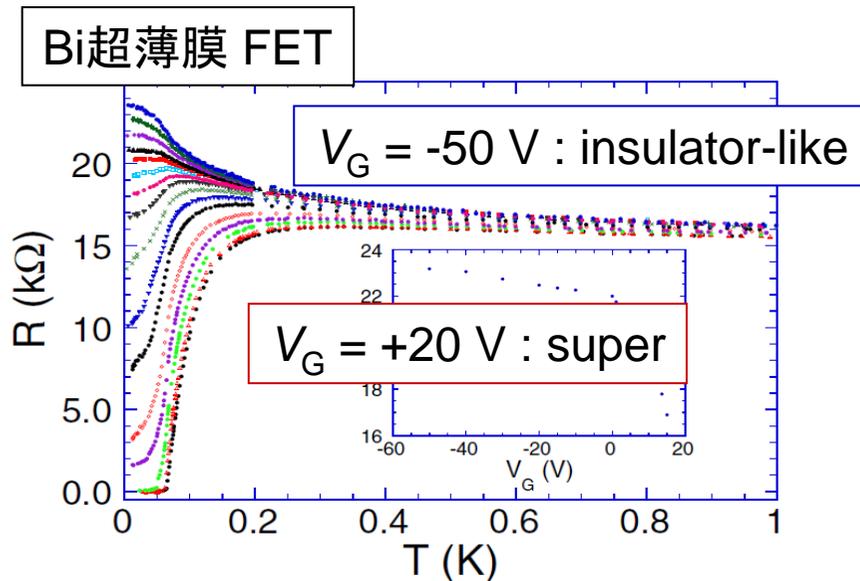
# 超伝導体を用いた電界効果トランジスタ



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

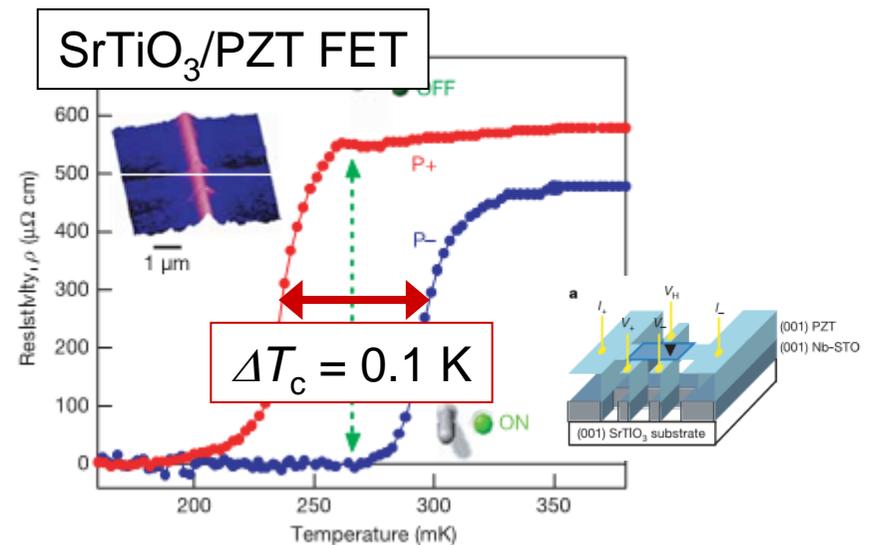
R. E. Glover, et al.,  
 Phys.Rev.Lett. 5, 248 (1960)

*Insulator-Superconductor transition*



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

*T<sub>c</sub> modulation*



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

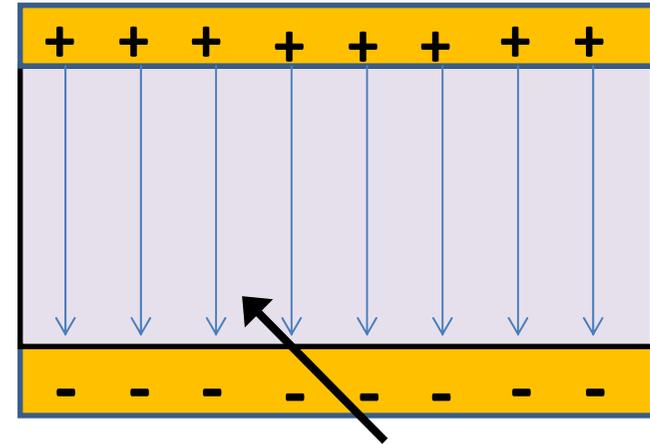
# Electric double layer transistor (EDLT)

## Conventional capacitor

Capacitance : pF ~  $\mu\text{F}$  ( $10^{-12}$  -  $10^{-6}$ )



$d =$   
0.1-10  $\mu\text{m}$



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  $\epsilon_s$ )  
微細構造化 (circled  $d$ )

薄膜・高耐圧化

MISFETのキャリア濃度( $N_s$ )

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

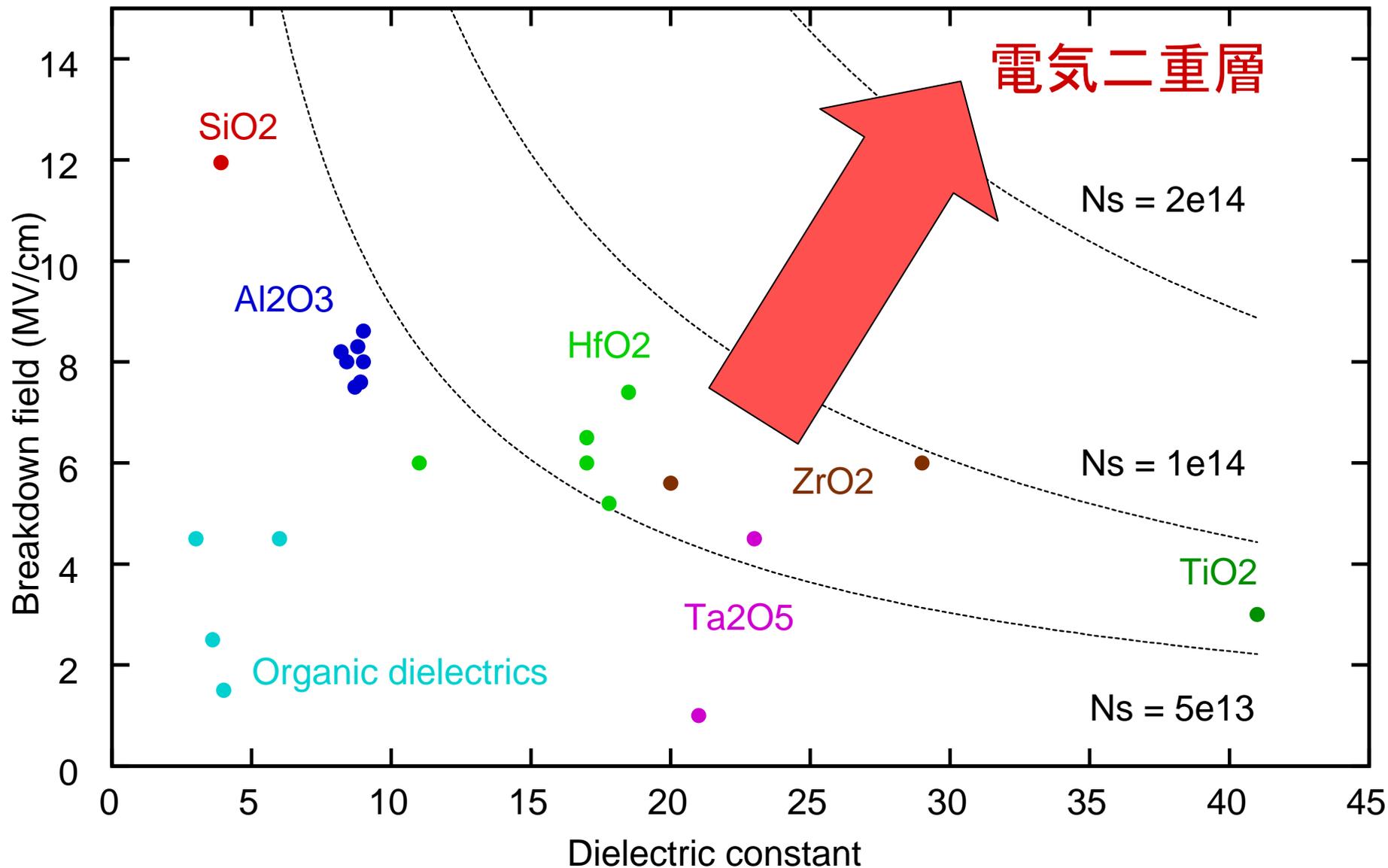
(circled  $\frac{V}{d}$ )

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

アルミナ碍子: 100 kV/cm

SiO<sub>2</sub> 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

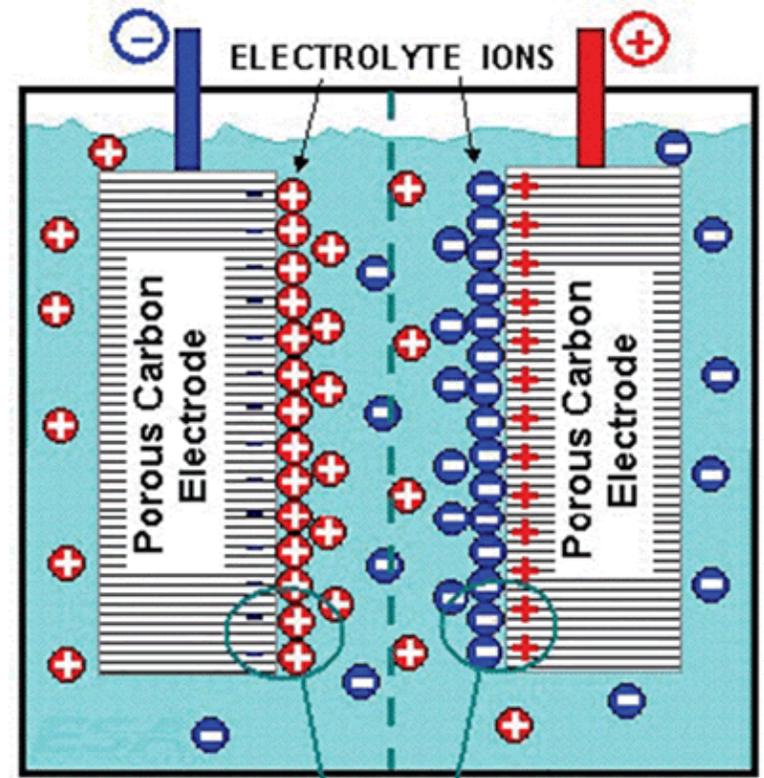


# Electric double layer transistor (EDLT)

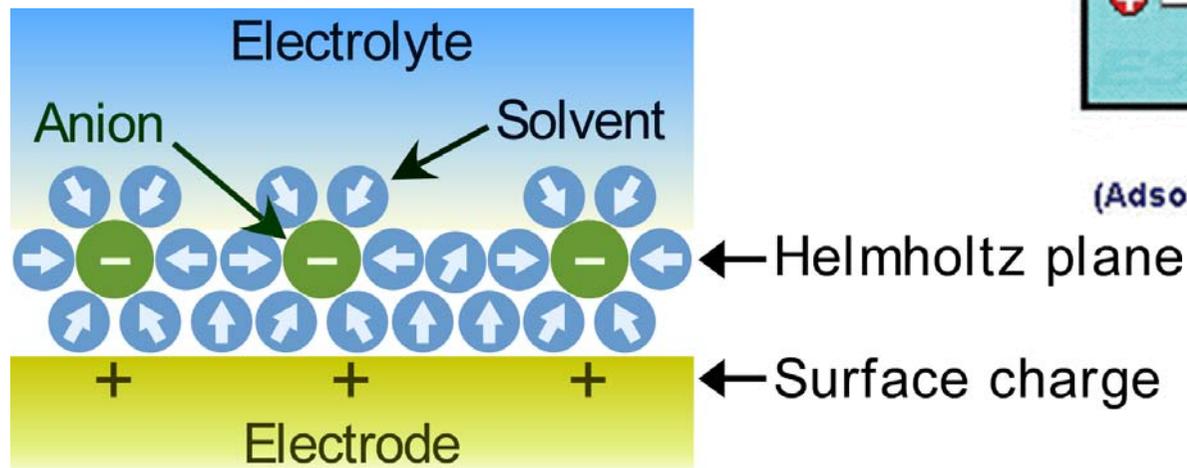
## EDLC : Electric Double Layer Capacitor

(Supercapacitor)

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

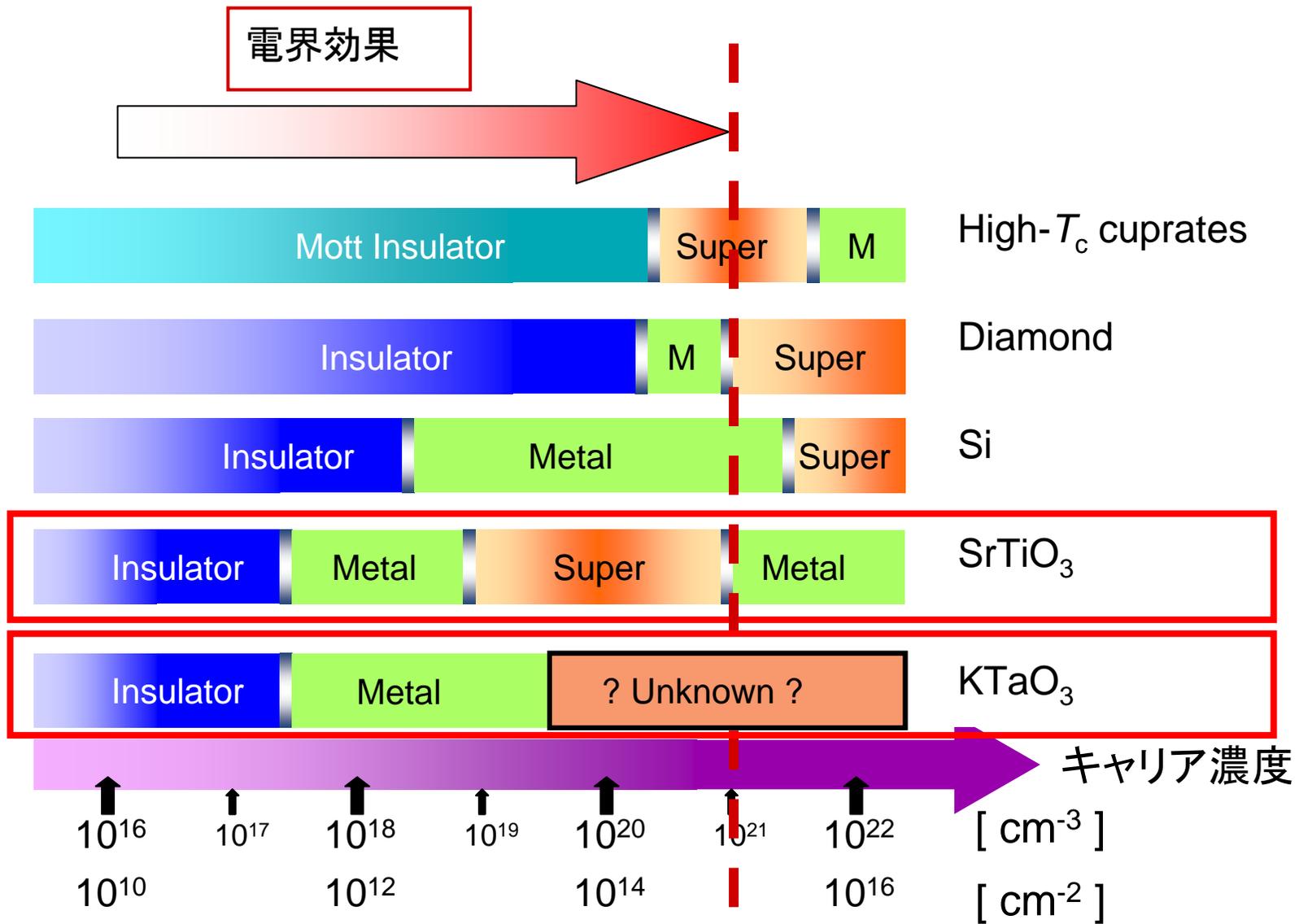


Double Layer Capacitors  
(Adsorbed layers of ions and solvated ions)



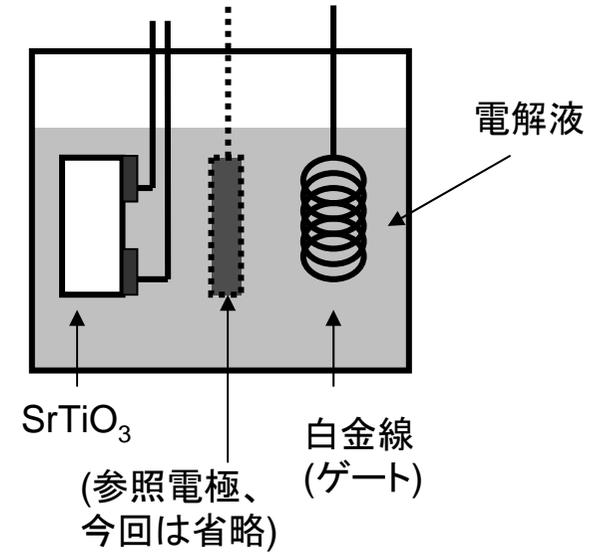
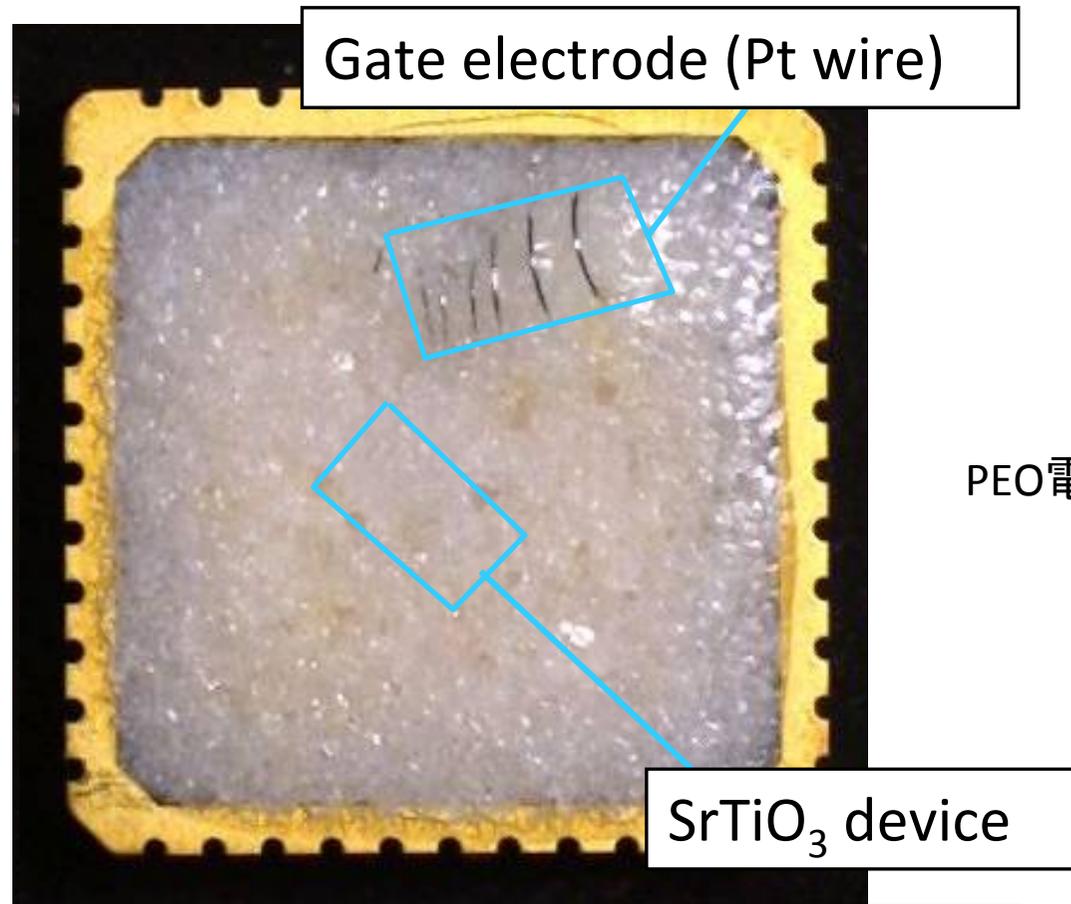
<http://www.ic.gc.ca/>

# キャリアドーピングによる超伝導

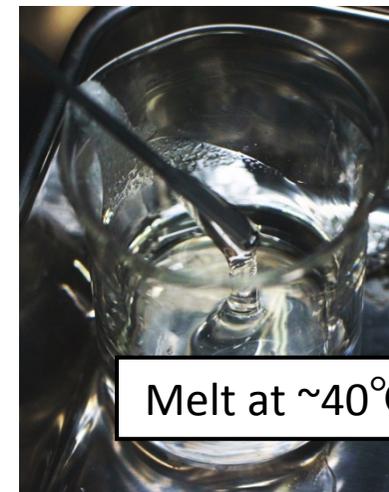


# Device structure of SrTiO<sub>3</sub> EDLT

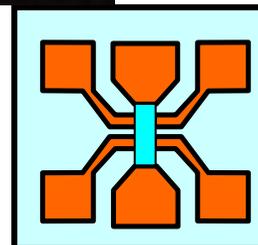
EDL cell



PEO電解液

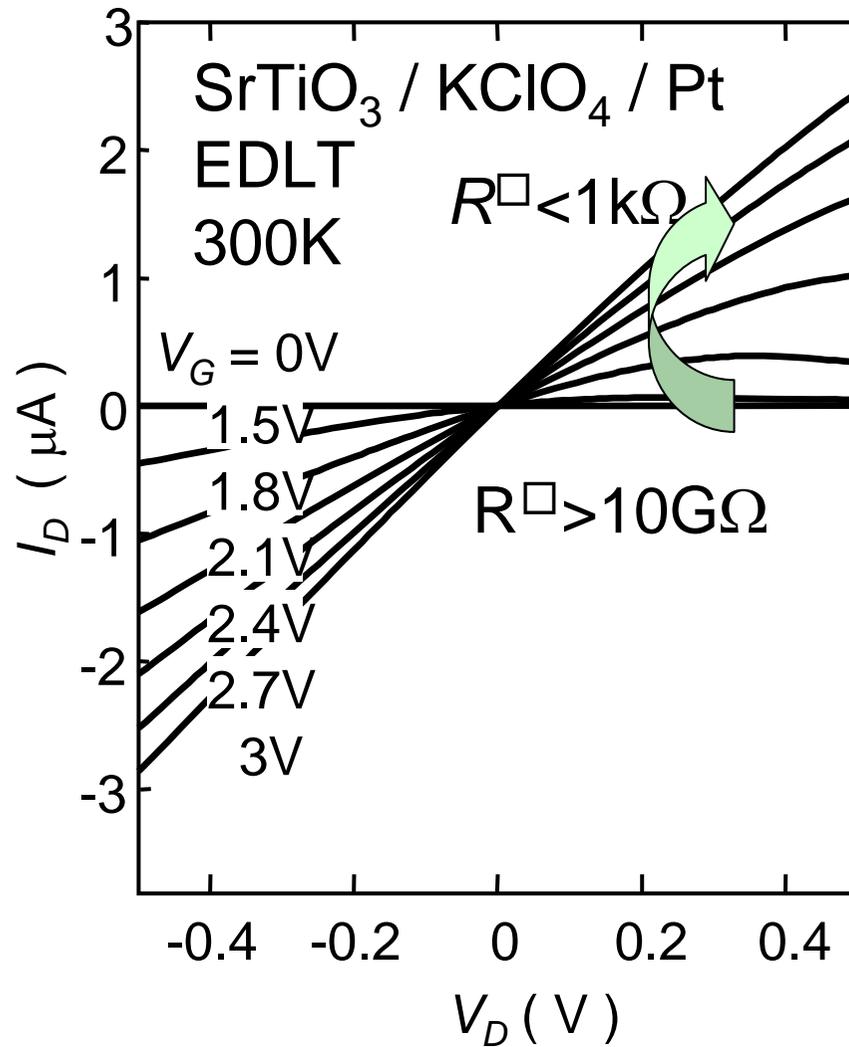


Dipped in glovebox

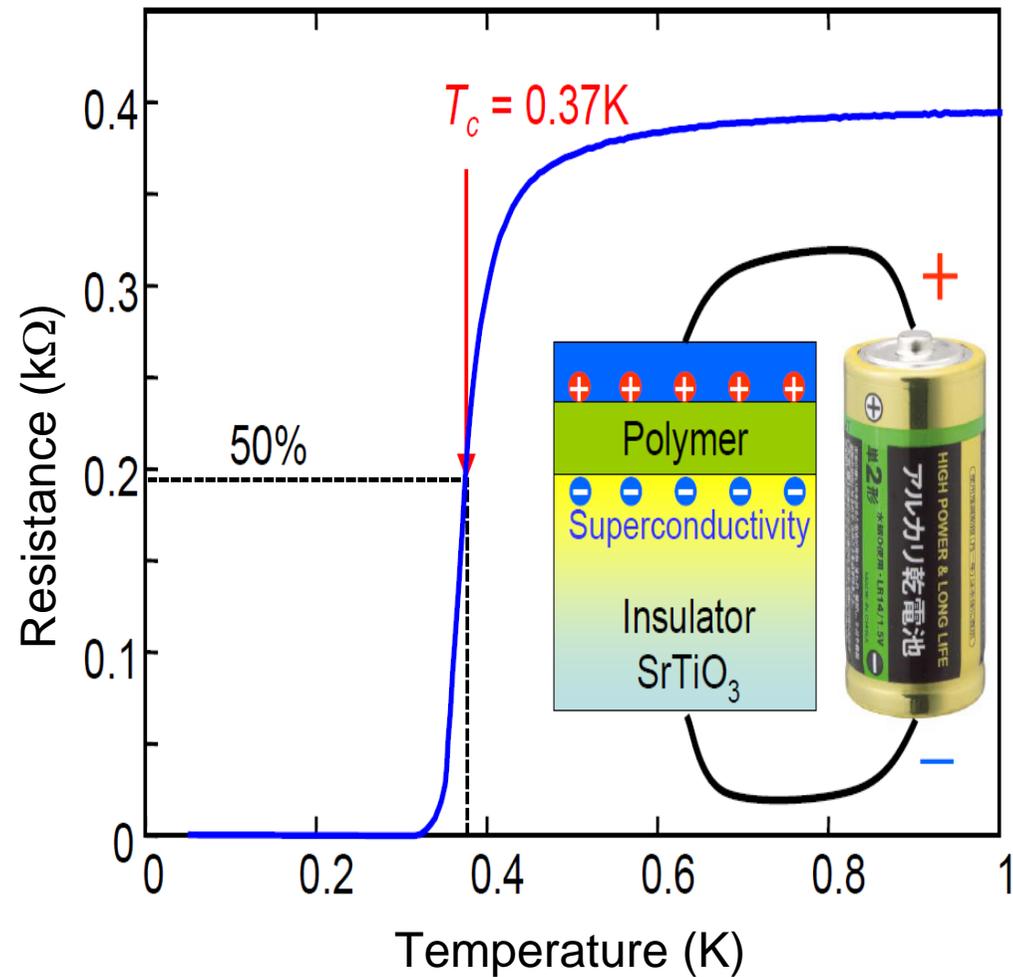


# Superconductivity in SrTiO<sub>3</sub> EDLT

## Output characteristics



## R-T curve at low T

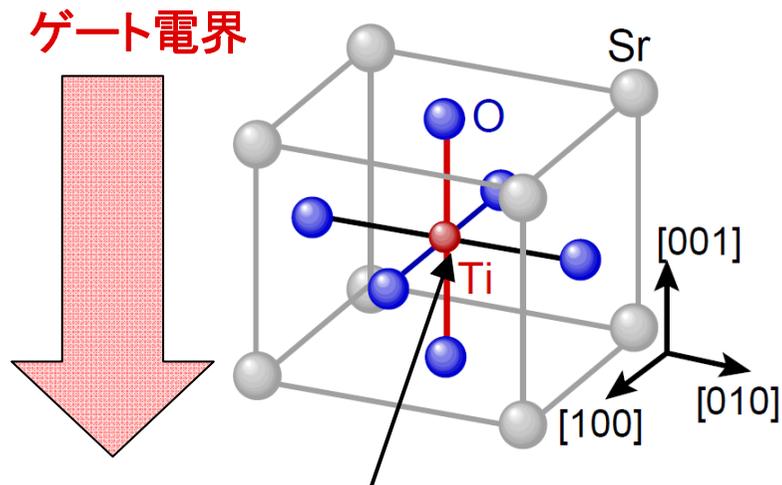


K. Ueno, *Nature Materials*, **7**, 855 (2008)

# KTaO<sub>3</sub> EDLT

SrTiO<sub>3</sub>

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



KTaO<sub>3</sub>

SrTiO<sub>3</sub> 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

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

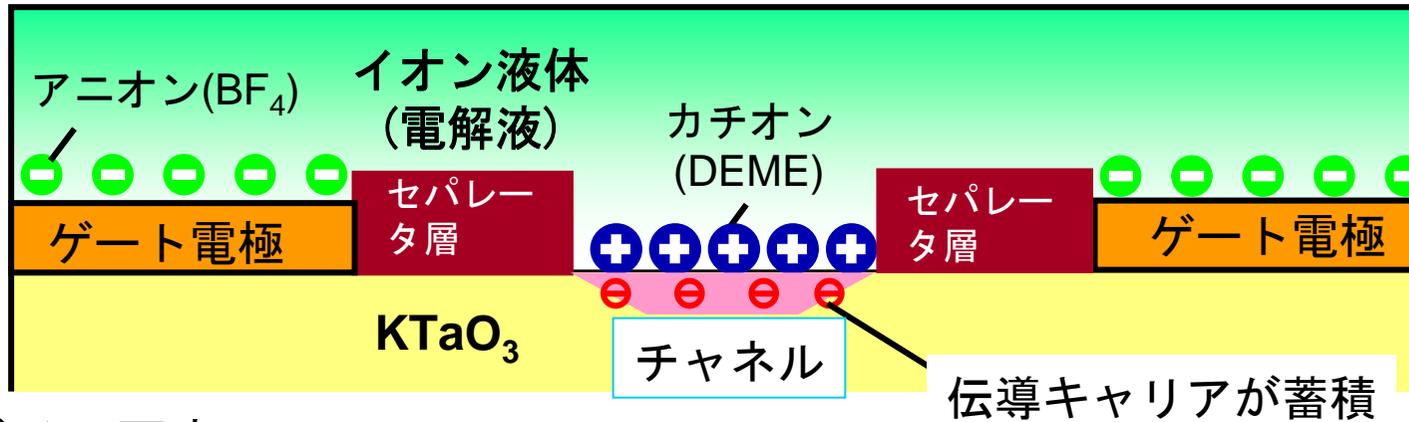
KTaO<sub>3</sub> へ電気二重層トランジスタ作成

不純物ドーピングで不可能な  
高キャリア濃度の実現

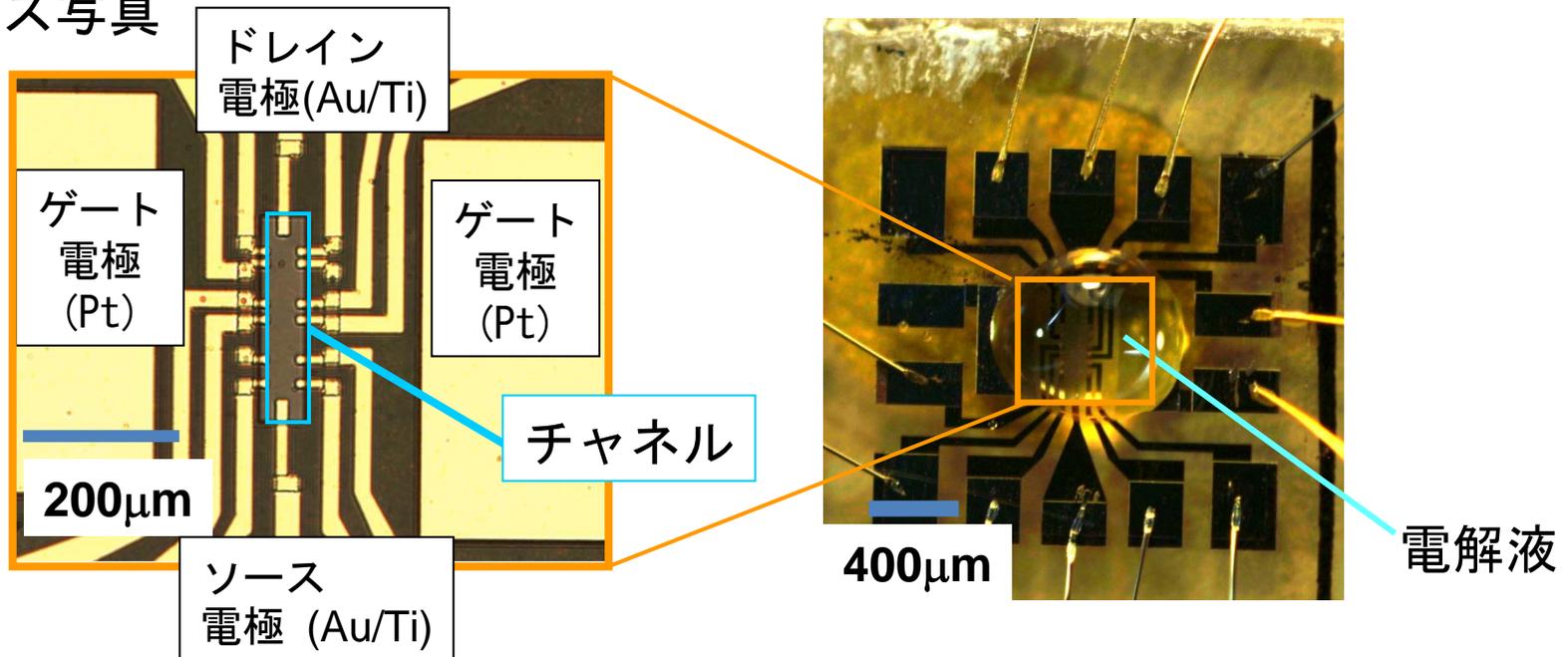
超伝導の発現

# プレーナ構造電気二重層トランジスタ

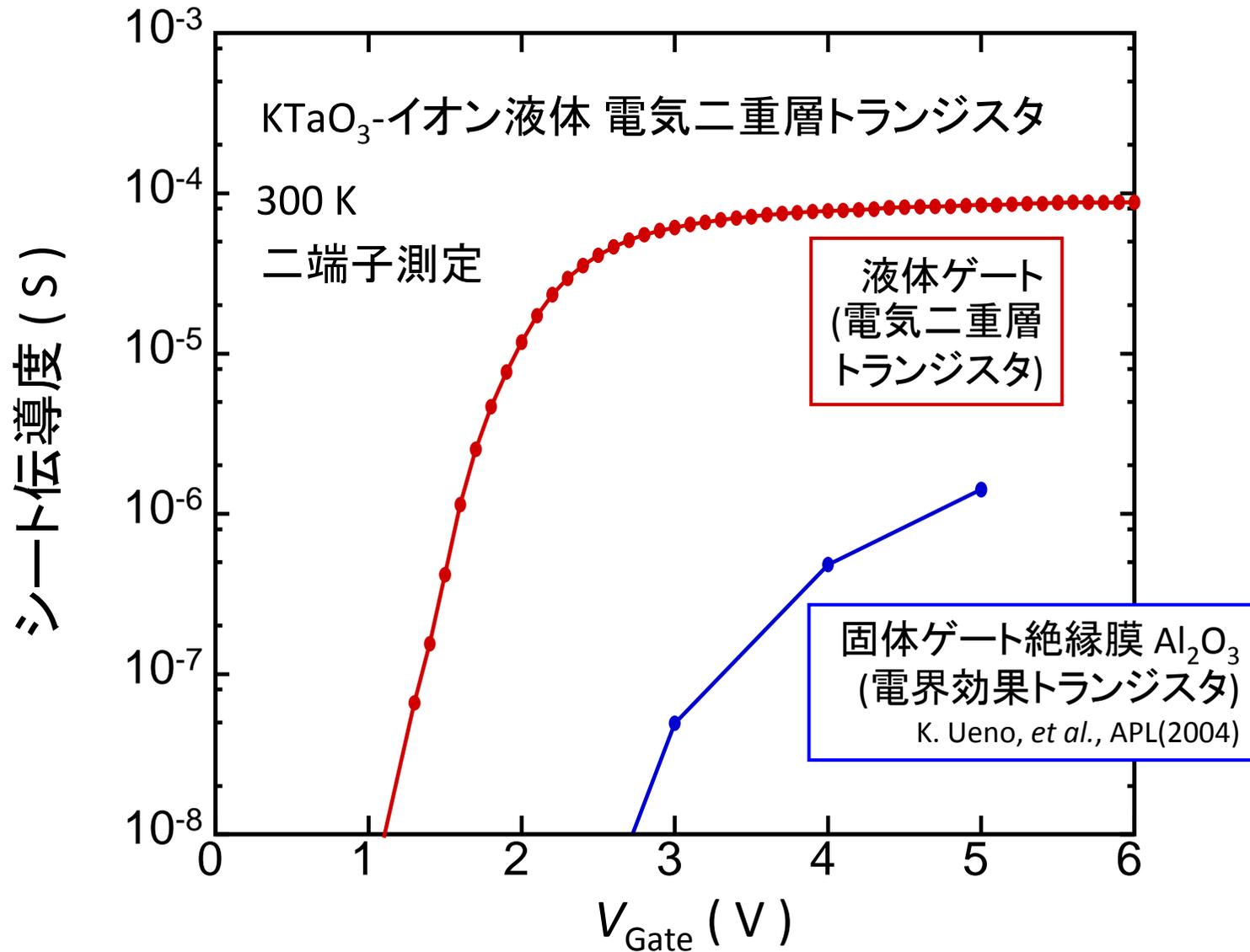
プレーナ構造デバイスの断面図



デバイス写真

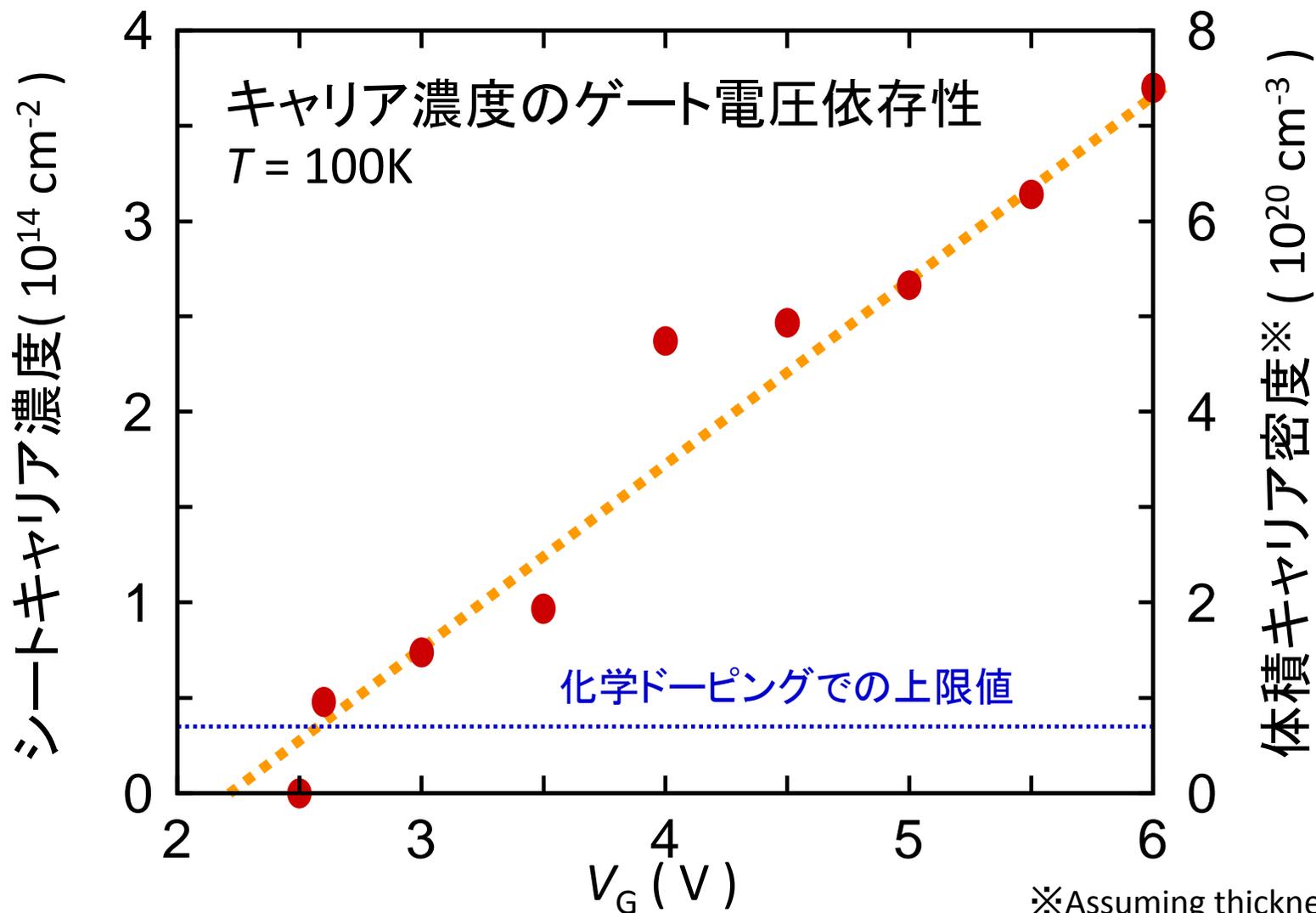


# KTaO<sub>3</sub> EDLT : Device characteristics at 320 K



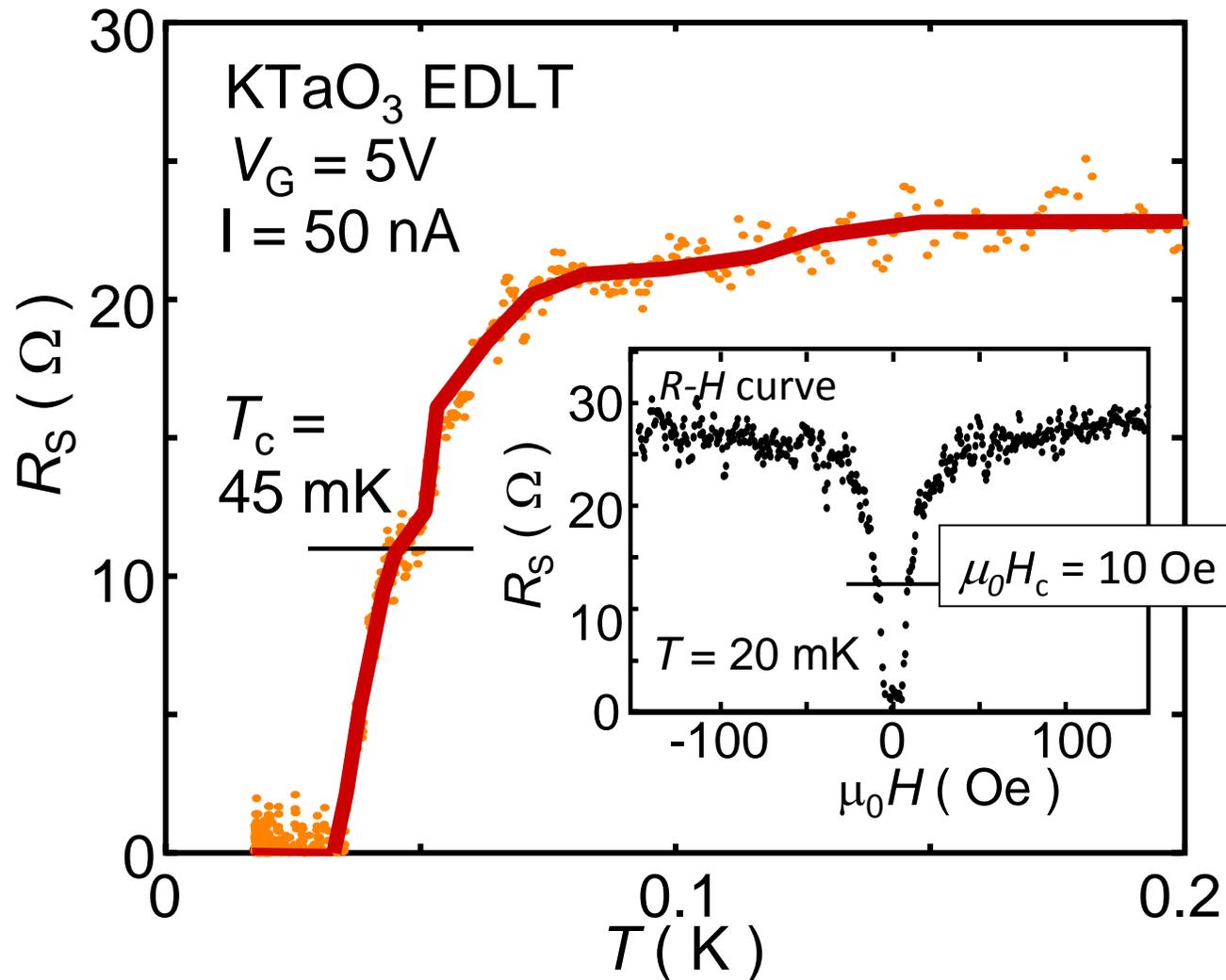
※KTaO<sub>3</sub> では $V_G=6V$ まで電気化学反応せず

# KTaO<sub>3</sub> 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 KTaO<sub>3</sub> 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