講義資料

http://conf.msl.titech.ac.jp/Lecture/

統計力学・半導体

2020/4/24 課題

以下の4/23の課題について、解答が違っていた人は、理由も含めて
解答せよ

１. 厚さ 100 nmの a-SiO_2 の単位面積当たり静電容量 C_{OX} を求めよ。
a-SiO_2 の 比誘電率は ε_r = 11.9 とする。

２. TransferCurve.xlsxのデータから、飽和移動度を求めよ
電極幅 W = 300 μm, L = 50 μm とする。
飽和移動度を求める際の Vg、Vd は各自で選ぶこと。
その値を選んだ理由も説明せよ。

PowerPoint 等 のプレゼンテーションファイルにして提出
期限： 今日の17：00までに
できたところまでで可

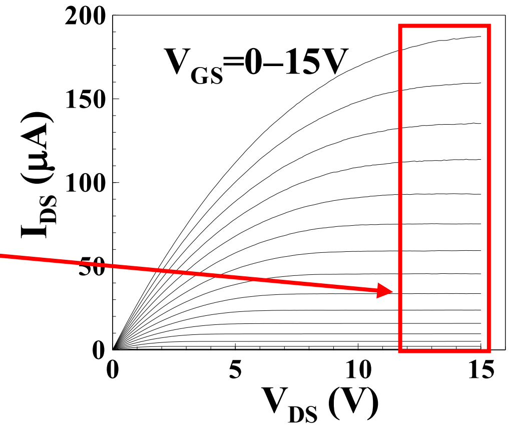
FET特性の解析: 飽和領域

$$I_{DS} = \frac{W}{L}\mu C_{OX}\left[(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - \frac{{V_{DS}}^2}{2}\right]$$

$$\mathbf{V_{DS} > V_p = V_{GS} - V_{th}}$$

$$I_{DS} = \frac{W}{2L}\mu C_{OX}(V_{GS} - V_{th})^2$$

a-IGZO TFT



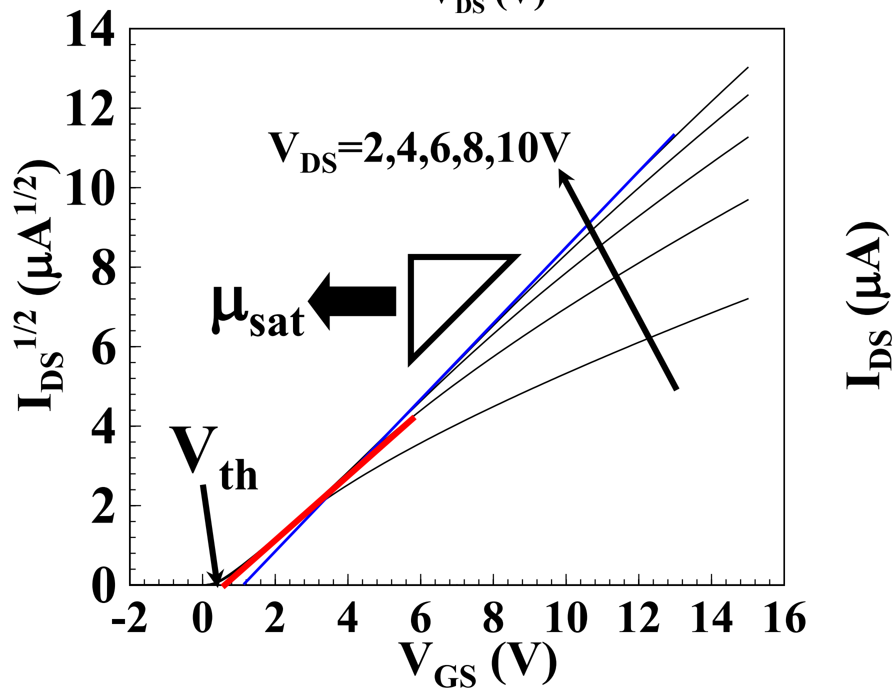
$$I_{DS}{}^{1/2} = \sqrt{\frac{W}{2L}\mu C_{OX}}(V_{GS} - V_{th})$$

$I_{DS}{}^{1/2}$ vs. V_{GS}をプロット

V_{GS}軸切片: V_{th}

傾き: 飽和移動度

Saturation mobility, μ_{sat}



キャリア輸送に関する参考文献

- 「薄膜トランジスタ」、薄膜材料デバイス研究会編、コロナ社、2010年第3刷
- 「半導体評価技術」、河東田隆 編著、産業図書、1989年
- 「半導体の電子物性工学」、太田英二、坂田亮 共著、培風館、2005年
- Physics of Semiconductor Devices, S.M. Sze, 1981年
- 「太陽電池の物理」、宇佐美徳隆、石原照也、中嶋一雄監訳、丸善、2010年
- Heavily doped semiconductors, Victor I. Fistul', Plenum Press, 1969
- 「熱電変換工学ー基礎と応用ー」、坂田亮 編、REALIZE INC.
- 「熱電材料の物質科学」、寺崎一郎、内田老鶴圃、2017年

Termoelectrics
熱起電力

Thermoelectricity: Boltzmann equation

太田英二、坂田亮著、半導体の電子物性光学、培風館 (2005)

Boltzmann-Bloch equation

$$\frac{df(\boldsymbol{k})}{dt} = -\frac{\boldsymbol{F}}{\hbar}\frac{\partial f(\boldsymbol{k})}{\partial \boldsymbol{k}} - \boldsymbol{v_k}\frac{\partial f(\boldsymbol{k})}{\partial \boldsymbol{r}} - \frac{f(\boldsymbol{k})-f_0(\boldsymbol{k})}{\tau(\boldsymbol{k})}$$

$\boldsymbol{v_k} = \frac{d\varepsilon(\boldsymbol{k})}{d\boldsymbol{k}}$: group velocity ⬄ $\boldsymbol{v_p} = \frac{\varepsilon(\boldsymbol{k})}{\boldsymbol{k}}$: phase velocity

Steady-state $\frac{df(\boldsymbol{k})}{dt} = -\frac{\boldsymbol{F}}{\hbar}\cdot\frac{\partial f(\boldsymbol{k})}{\partial \boldsymbol{k}} - \boldsymbol{v_k}\cdot\frac{\partial f(\boldsymbol{k})}{\partial \boldsymbol{r}} - \frac{f(\boldsymbol{k})-f_0(\boldsymbol{k})}{\tau(\boldsymbol{k})} = 0$

Non-uniform *T* and chemical potential $\boldsymbol{\eta}$: depend on position $\boldsymbol{r}$

$$\begin{aligned} f(\boldsymbol{k}) - f_0(\boldsymbol{k}) &= -\tau(\boldsymbol{k})\left(\frac{\boldsymbol{F}}{\hbar}\cdot\frac{\partial f(\boldsymbol{k})}{\partial \boldsymbol{k}} + \boldsymbol{v_k}\cdot\frac{\partial f(\boldsymbol{k})}{\partial \boldsymbol{r}}\right) \\ &= -\tau(\boldsymbol{k})\left(e\boldsymbol{E}\cdot\frac{\partial \varepsilon(\boldsymbol{k})}{\partial \boldsymbol{k}}\frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} + \boldsymbol{v_k}\cdot T\nabla\frac{\varepsilon-\eta}{T}\frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \varepsilon}\right) \\ &= -\tau(\boldsymbol{k})\frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \varepsilon}\boldsymbol{v_k}\cdot\left(e\boldsymbol{E} + T\nabla\frac{\varepsilon-\eta}{T}\right) \end{aligned}$$

Thermoelectricity: Boltzmann equation

太田英二、坂田亮著、半導体の電子物性光学、培風館 (2005)

$$\boldsymbol{J} = en \frac{\int (\boldsymbol{v_k} \otimes \boldsymbol{v_k}) \tau(\boldsymbol{k}) \left(-\frac{\partial f(\varepsilon)}{\partial \varepsilon}\right) \left[e\boldsymbol{E} + T\nabla \frac{\varepsilon - \eta}{T}\right] d\boldsymbol{k}}{\int f_0(\boldsymbol{k}) d\boldsymbol{k}}$$

$(\boldsymbol{v_k} \otimes \boldsymbol{v_k}) = (v_{k,i} v_{k,j})$: Direct product of vectors

$$\nabla \frac{\varepsilon - \eta}{T} = -\frac{\varepsilon - \eta}{T} \nabla T - \nabla \eta$$

Chemical potential $\boldsymbol{\eta}$ is a function of carrier density $\boldsymbol{n}(\boldsymbol{r})$

$$\boldsymbol{J} = \sigma \cdot \boldsymbol{E} + en \frac{\langle \tau \rangle}{m_e^*} \left[\frac{1}{T} \left(\frac{\langle \tau \varepsilon \rangle}{\langle \tau \rangle} - \eta + T \frac{\partial \eta}{\partial T} \right) \nabla T + \frac{\partial \eta}{\partial n} \nabla \mathrm{n} \right]$$

$$= \sigma \cdot \boldsymbol{E} + \sigma \left[S \nabla T + \frac{1}{e} \frac{\partial \eta}{\partial n} \nabla \mathrm{n} \right]$$

$$\boldsymbol{S} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{eT}} \left[\left(\frac{\langle \boldsymbol{\tau \varepsilon} \rangle}{\langle \boldsymbol{\tau} \rangle} - \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{T} \frac{\boldsymbol{\partial \eta}}{\boldsymbol{\partial n}} \right) \right]$$

熱起電力(Seebeck係数)

$$S = \frac{1}{eT}\left[\left(\frac{\langle\tau\varepsilon\rangle}{\langle\tau\rangle} - \eta + T\frac{\partial\eta}{\partial n}\right)\right]$$

$$S = -\frac{k}{e}\frac{\int\left(-\frac{\partial f}{\partial E}\right)D(E)v^2\tau\left[\frac{E-E_F}{kT}\right]dE}{\int\left(-\frac{\partial f}{\partial E}\right)D(E)v^2\tau dE} + \frac{1}{e}\frac{\partial E_F}{\partial T}$$ Seebeck係数

$$\tau = (m_e^*/2)^{1/2} l_0(T) E^{r-1/2}$$

縮退半導体：バンドが自由電子的な単一バンドで、**$\tau=\tau_0+((E-E_F)/E_F)\,\tau_1$** の場合

$$S \sim -\frac{k}{e}\frac{\pi^2}{3}\left(\frac{3}{2}+\frac{\tau_1}{\tau_0}\right)\frac{kT}{E_F}$$

$$\tau = \left(m_e^*/2\right)^{1/2} l_0\left(T\right)E^{r-1/2}$$

非縮退半導体：

$$S \sim -\frac{k}{e}\left(\frac{E_C-E_F}{kT}+r+2\right) = \boxed{-}\frac{k}{e}\left(\ln\frac{N_C}{\boxed{N_e}}+r+2\right)$$

電子

$$S \sim +\frac{k}{e}\left(\frac{E_F-E_V}{kT}+r+2\right) = \boxed{+}\frac{k}{e}\left(\ln\frac{N_V}{\boxed{N_h}}+r+2\right)$$

正孔

ホッピング伝導 (small polaron): エントロピー輸送

$$S = \frac{k}{e}\ln\left(\frac{n}{N-n}\right)$$

熱起電力(Seebeck係数)

非縮退n型半導体：

$$S \sim -\frac{k}{e}\left(\frac{E_C - E_F}{kT} + r + 2\right) = -\frac{k}{e}\left(\ln\frac{N_C}{N_e} + r + 2\right)$$

$$n_e = N_C exp(-\beta(E_C - E_F))$$

$$N_C = 2\left(\frac{2\pi m_e{}^{*} k_B T}{h^2}\right)^{3/2}$$

Jonkerプロット

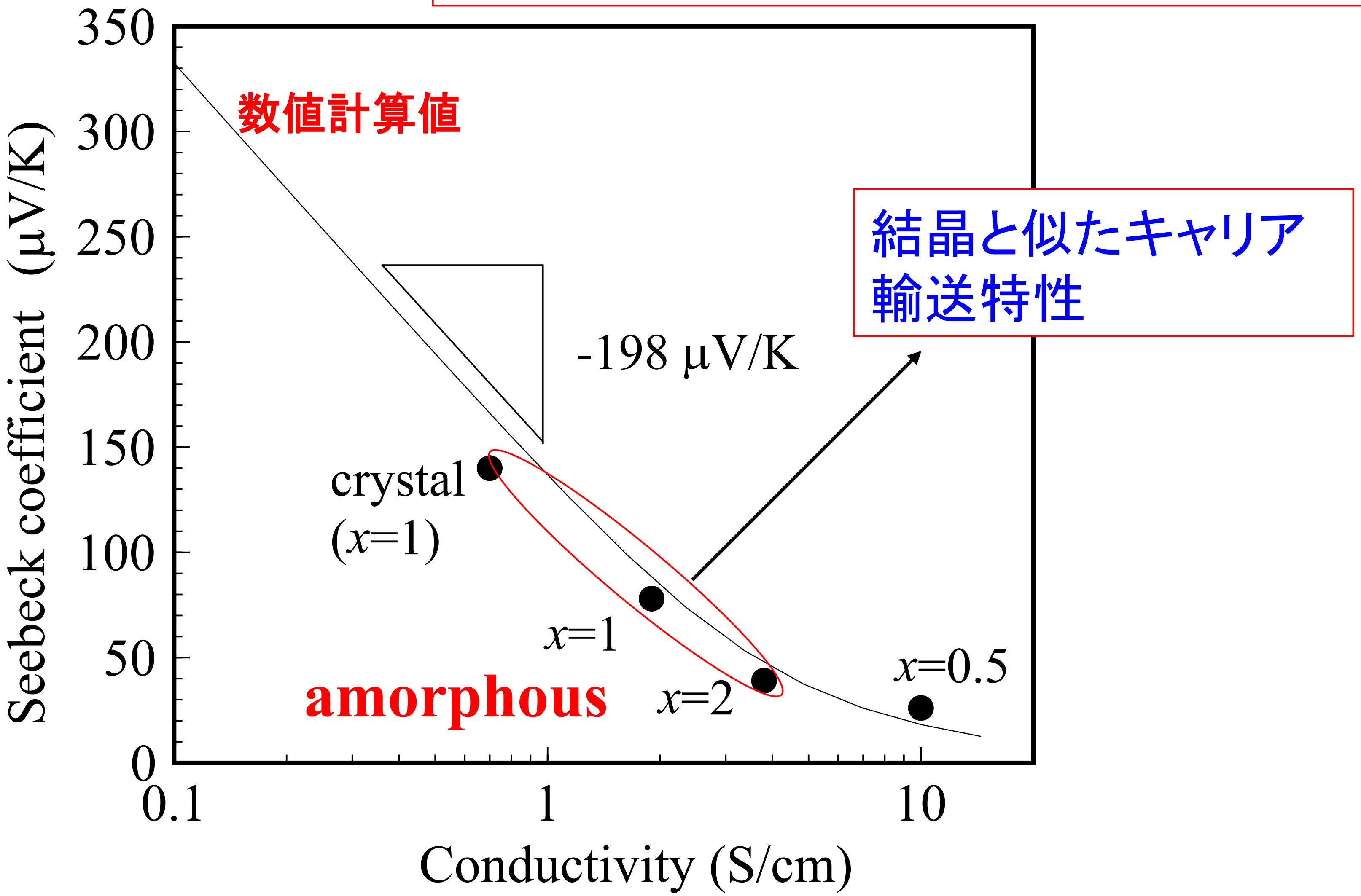
$$\boldsymbol{S} = -\frac{k}{e}[\ln N_C + r + 2 - \mathbf{ln}\,\boldsymbol{N_e}] = -\frac{k}{e}[\ln N_C + r + 2 + \ln e\mu - \mathbf{ln}\,\boldsymbol{\sigma}]$$

Jonkerプロットから有効質量を求める

$$\boldsymbol{S} = -\frac{k}{e}\left[\frac{3}{2}\ln \boldsymbol{m_e}^{*} + \ln 2\left(\frac{2\pi m_e{}^{*} k_B T}{h^2}\right)^{3/2} + r + 2 - \mathbf{ln}\,\boldsymbol{N_e}\right]$$

Jonker plot: ex. For p-type $x\mathrm{ZnO{\cdot}Rh_2O_3}$

$$n = \sigma / \mu / e \quad \Rightarrow \quad \boxed{S = -\frac{k}{e}(\log\sigma - \log\mu_h + A) \quad \frac{k}{e} = 198\mu\mathrm{V/K}}$$



G.H. Jonker, Philips Res. Repts 23 (1968) 131; Kamiya et al., Adv. Funct. Mater. 15, 968 (2004)

Mott's formula of Seebeck coefficient

寺崎一郎著、熱電材料の物質科学、内田老鶴圃 (2017)

$$\alpha_{xx} = \frac{1}{eT}\frac{\int D(E)\left(-\frac{\partial f_0}{\partial E}\right)v_x{}^2\tau(E)(E-E_F)dE}{\int D(E)\left(-\frac{\partial f_0}{\partial E}\right)v_x{}^2 dE}$$

$$\sigma(E) = D(E)v_x{}^2\tau \sim \sigma(E_F) + \sigma'(E_F)(E-E_F) + \cdots:$$

conductivity-like function (電気伝導率的関数)

分子 $\int D(E)v_x{}^2\tau(E)\left(-\frac{\partial f_0}{\partial E}\right)(E-E_F)dE$

$$= \int\left\{\sigma(E_F)(E-E_F) + \sigma'(E_F)(E-E_F)^2\right\}\left(-\frac{\partial f_0}{\partial E}\right)dE = \frac{\pi^2}{3}(kT)^2\sigma'(E_F)$$

分母 $\int D(E)\left(-\frac{\partial f_0}{\partial E}\right)v_x{}^2 dE = \int \sigma(E)\left(-\frac{\partial f_0}{\partial E}\right)dE = \sigma(E_F)$

$$\alpha_{xx} = \frac{\pi^2}{3}\frac{k}{e}(kT)\left.\frac{d\sigma(E)}{dE}\right|_{E=E_F}/\sigma(E_F) = \frac{\pi^2}{3}\frac{k}{e}(kT)\left.\frac{d\ln D(E)}{dE}\right|_{E=E_F}$$

Mottの公式

自由電子モデル $\alpha_{xx} = \frac{\pi^2}{3}\frac{k}{e}\frac{kT}{E_F}$

局在電子のSeebeck係数符号反転

局在状態でのVRH伝導の場合
（拡散係数をエネルギーに対して一定とする）。

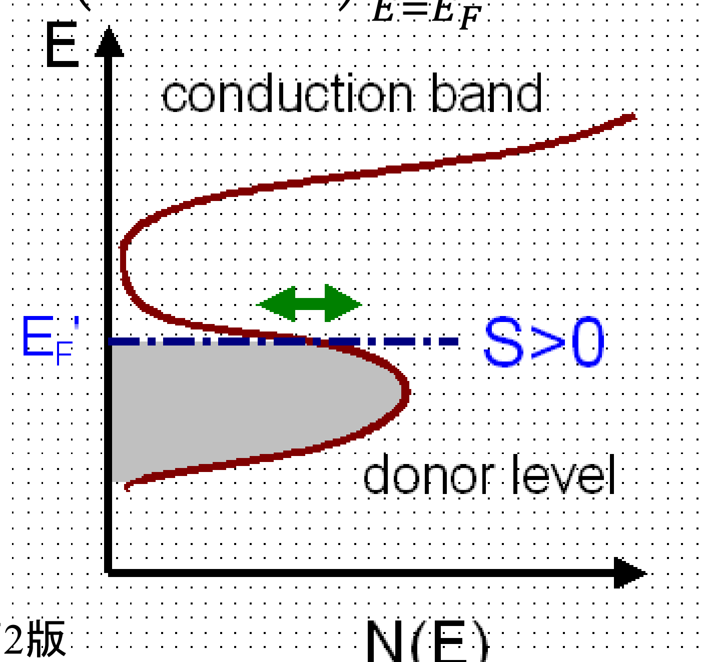
Mottの式:$S = \frac{\pi^2}{3}\frac{{k_B}^2 T}{e}\left(\frac{d\ln\sigma(E)}{dE}\right)_{E=E_F}$

$$\boldsymbol{\sigma(E) = D(E){v_x}^2\tau \sim \sigma(E_F) + \sigma'(E_F)(E-E_F) + \cdots :}$$

$$S = \frac{1}{2}\frac{k_B}{e}\frac{W^2}{k_B T}\left(\frac{d\ln D(E)}{dE}\right)_{E=E_F} = \frac{1}{2}\frac{{k_B}^2}{e}(T_0T)^{1/2}\left(\frac{d\ln D(E)}{dE}\right)_{E=E_F}$$

$$W = k_B\left(T_0T^3\right)^{1/4}$$

ホッピングの活性化エネルギー
に等しいと仮定する



G.H. Jonker, Philips Res. Repts 23 (1968) 131
I.P. Zvyagin, Phys. Stat. Sol. B58 (1973) 443
V.V. Kosarev, Sov. Phys. – Semicond. 8 (1975) 897
H. Overhof, Pys. Stat. Sol. B67 (1975) 709
P. Butcher, in Proc. 6th ICALS (1976) p.89
「非晶質材料の電気伝導」、ネビルモット著、現代工学社、2003年第2版

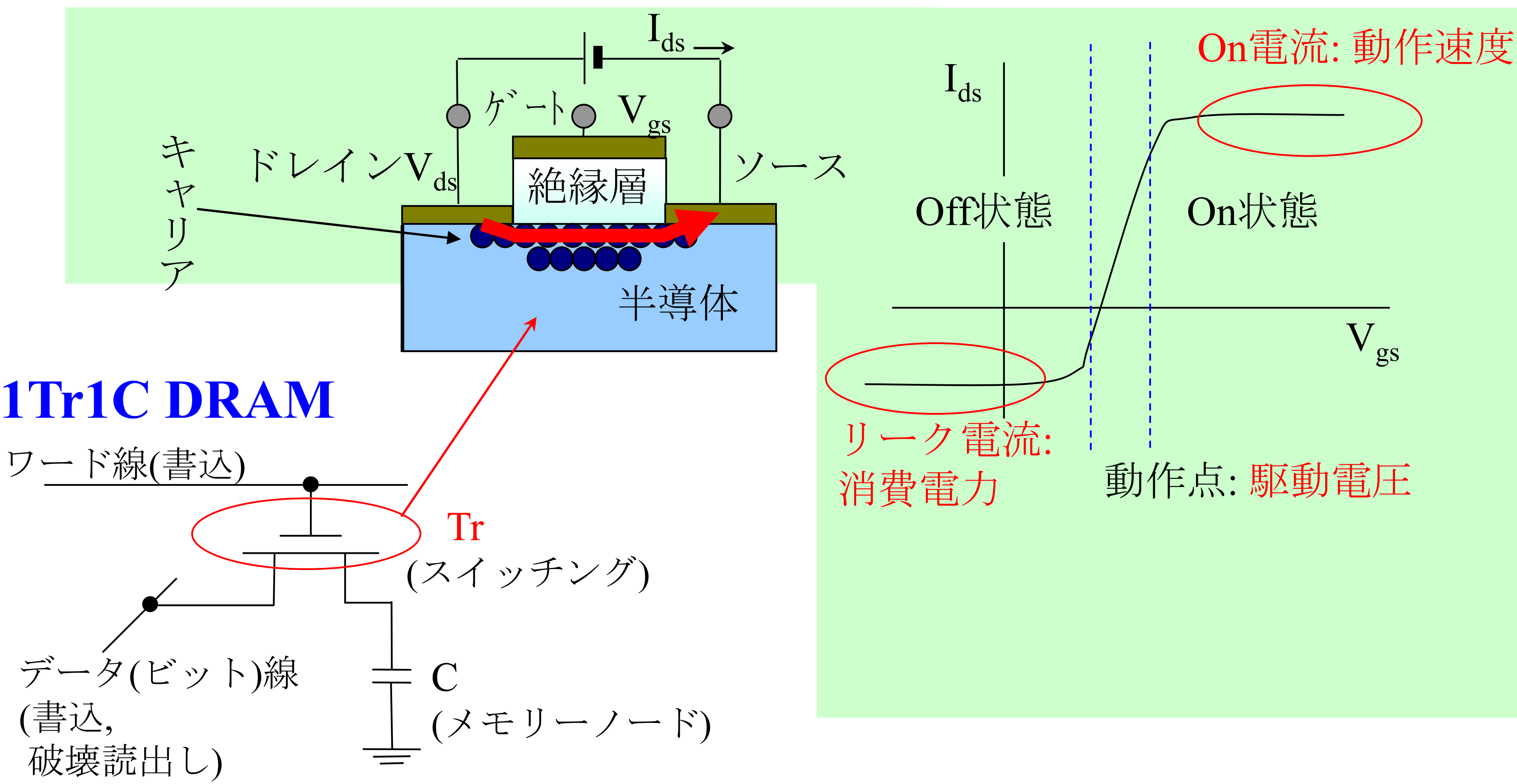
Field-effect mobility

電界効果移動度

電界効果トランジスタ(FET)の基本動作

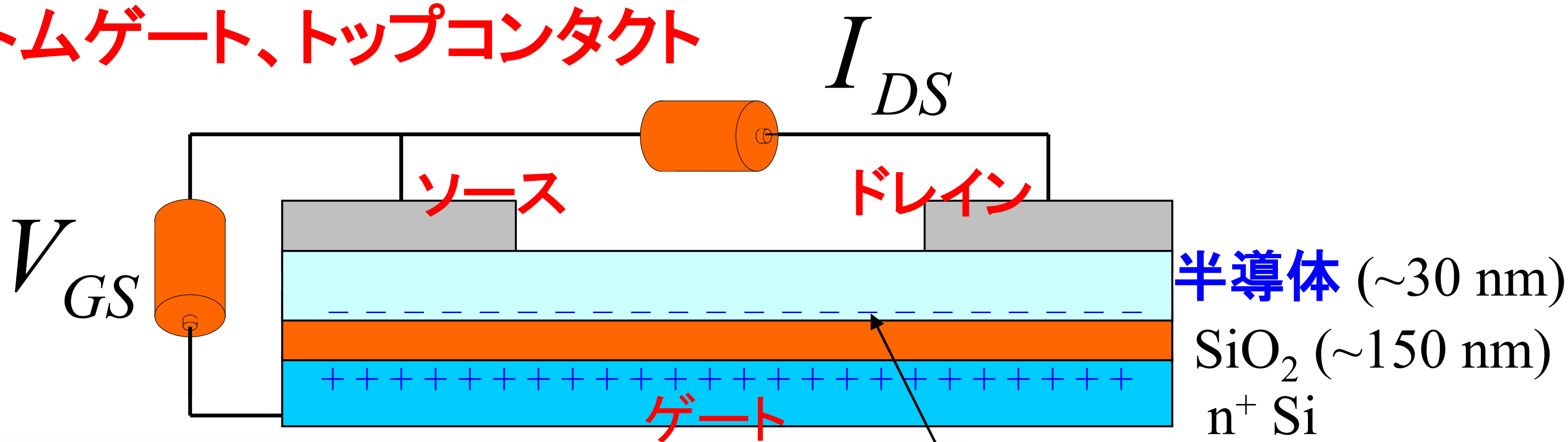
トランジスタの基本機能

1. 増幅機能　　　ゲート電圧に電流が比例する領域を利用
2. スイッチ機能　ゲート電圧による大きな電流の変調を利用

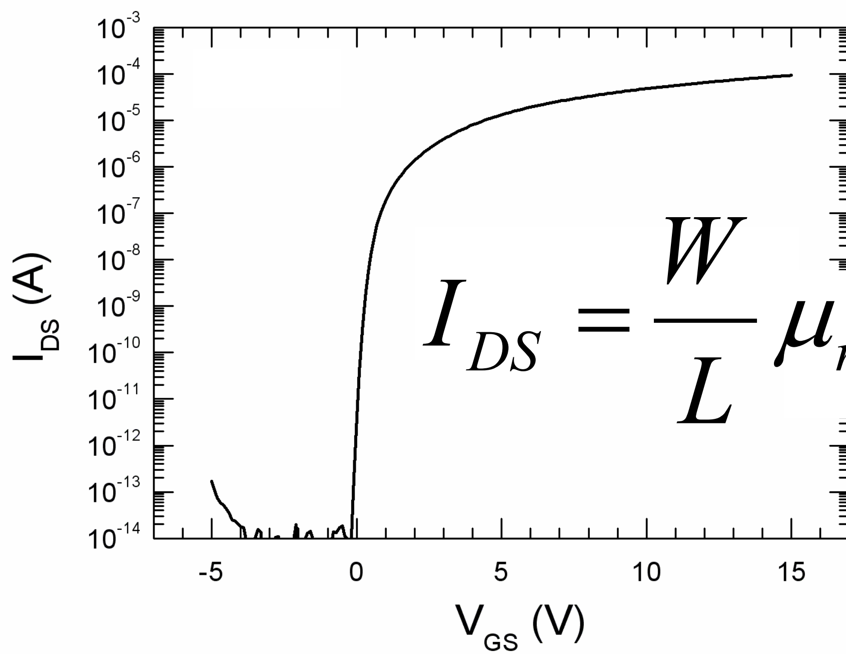


TFTの構造と動作原理

ボトムゲート、トップコンタクト



$$Q_{ind} \approx C_g \left(V_{GS} - V_{th}\right)$$



$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_{mobile} C_g \left(V_{GS} - V_{th}\right) V_{DS}$$

理想的な場合

MOSFETの電流-電圧特性（第0近似）

・ゲート絶縁体にかかる電圧V_{OX}が一定とみなせる場合

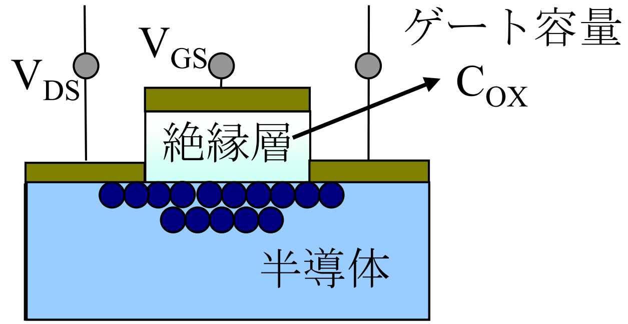
$$V_{DS} << V_{GS}$$

ゲート絶縁体にたまる電荷

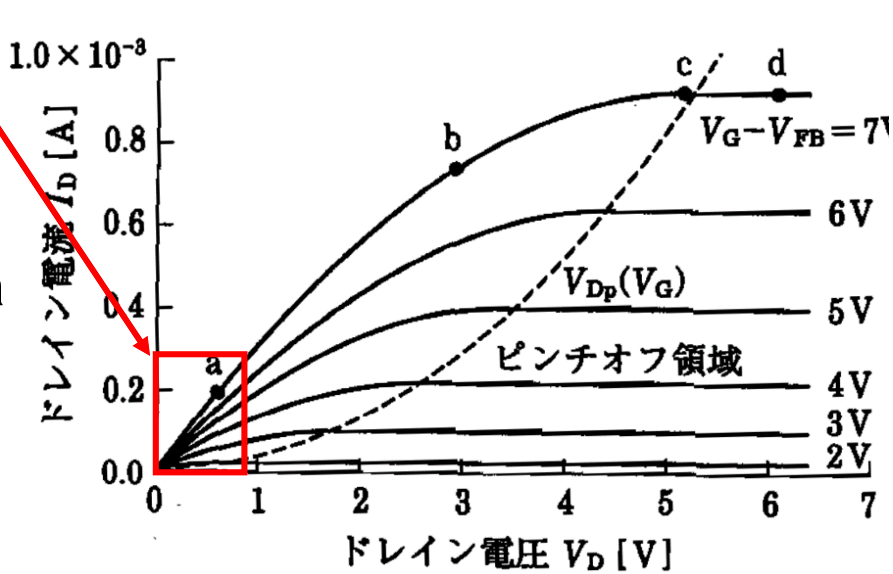
$$Q_s = V_{OX} C_{OX} \sim [V_{GS} - V_{th}] C_{OX}$$

電流 I_{DS}

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu Q_s V_{DS} \sim \frac{W}{L} \mu C_{OX} [V_{GS} - V_{th}] V_{DS}$$



ピンチオフが現れないが、
低V_{DS}では良い近似



・Gradual Channel Approximation

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu C_{OX} \left[\left(V_{GS} - V_{th} \right) - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS}$$

FET特性の解析: 飽和領域

$$I_{DS} = \frac{W}{L}\mu C_{OX}\left[(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - \frac{{V_{DS}}^2}{2}\right]$$

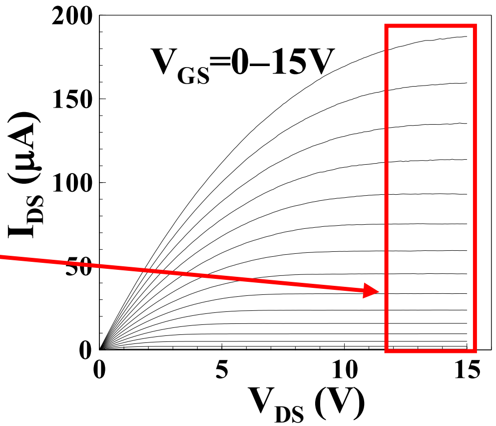
$V_{DS} > V_p = V_{GS} - V_{th}$

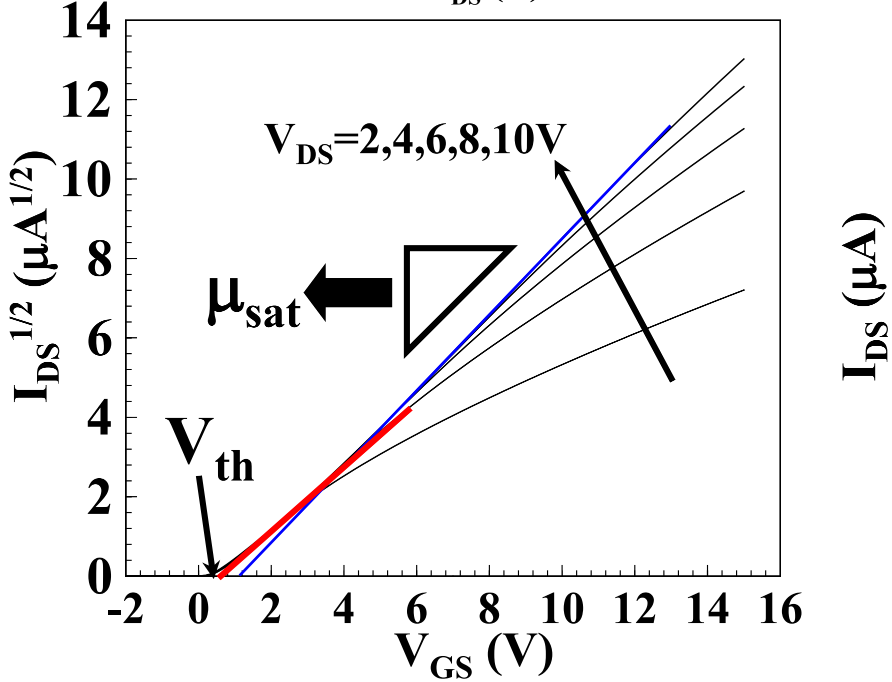
$$I_{DS} = \frac{W}{2L}\mu C_{OX}(V_{GS} - V_{th})^2$$

$$I_{DS}^{1/2} = \sqrt{\frac{W}{2L}\mu C_{OX}}(V_{GS} - V_{th})$$

$I_{DS}^{1/2}$ vs. V_{GS}をプロット
V_{GS}軸切片: V_{th}
傾き: 飽和移動度
Saturation mobility, μ_{sat}

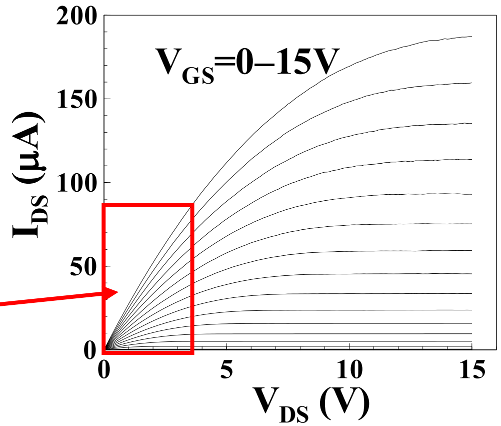
a-IGZO TFT





FET特性の解析: 線形領域

$$I_{DS} = \frac{W}{L}\mu C_{OX}\left[(V_{GS}-V_{th})V_{DS}-\frac{{V_{DS}}^2}{2}\right]$$



$V_{DS} << V_p\ (V_{GS})$ (e.g., << 0.1 V)

$$I_{DS} = \frac{W}{L}\mu C_{OX} V_{DS}(V_{GS}-V_{th})$$

I_{DS}はV_{DS}に比例:
I_{DS} vs. V_{GS}をプロット
V_{GS}軸切片: V_{th}
傾き: 線形領域移動度

有効移動度 (effective mobility): μ_{eff}

$$\mu_{eff} = g_{DS}\frac{L}{WC_{OX}(V_{GS}-V_{th})}$$

$$g_{DS} = \frac{dI_{DS}}{dV_{DS}}$$ **Drain conductance**

電界効果移動度 (field-effect mobility): μ_{FE}

$$\mu_{FE} = g_m\frac{L}{WC_{OX}V_{DS}}$$

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}}$$ **Transconductance**

Space charge limited current (SCLC)

空間電荷制限電流

大電流条件での熱電子放出電流:
空間電荷制限電流(SCLC)(電子放出)

「荷電粒子ビーム工学」, コロナ社

真空に放出された電荷が形成する静電ポテンシャルが無視できない場合

電子の速度 $v(x)$, 真空中の静電ポテンシャル $V(x)$は x の関数

$$\frac{1}{2}mv(x)^2 = eV$$

電流連続の条件 $j(x) = en(x)v(x) = j$

Poissonの方程式 $$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \frac{en_e(x)}{\varepsilon_0} = \frac{J}{\varepsilon_0}\left(\frac{m_e}{2eV}\right)^{1/2}$$

$\frac{dV}{dx}$ **を両辺にかけて積分** $$\left(\frac{dV(x)}{dx^2}\right)^{1/2} = \frac{4J}{\varepsilon_0}\left(\frac{m_e}{2e}\right)^{1/2} V^{1/2} + C$$

最大の電流が流れる条件 $E(0) = 0$ として解く

$$V = \left(\frac{3}{4}\right)^{4/3}\left(\frac{4J}{\varepsilon_0}\right)^{2/3}\left(\frac{m_e}{2e}\right)^{1/3} x^{4/3}$$

$$J = \frac{4\varepsilon_0}{9}\left(\frac{2e}{m_e}\right)^{1/2}\frac{V^{3/2}}{d^2}$$

Child-Langmuirの式

Ohmの法則は成立しない

空間電荷制限電流(SCLC)

外部から注入された電荷が物質内の
自由電荷密度に比べて無視できない場合

$$v(x)=\mu\frac{dV}{dx}\qquad J(x)=en_e(x)v(x)=J$$

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2}=\frac{en_e(x)}{\varepsilon_r}=\frac{J}{\varepsilon_r\mu}\left(\frac{dV}{dx}\right)^{-1}$$

$$J=\frac{9}{8}\varepsilon\mu\frac{V^2}{d^3}$$

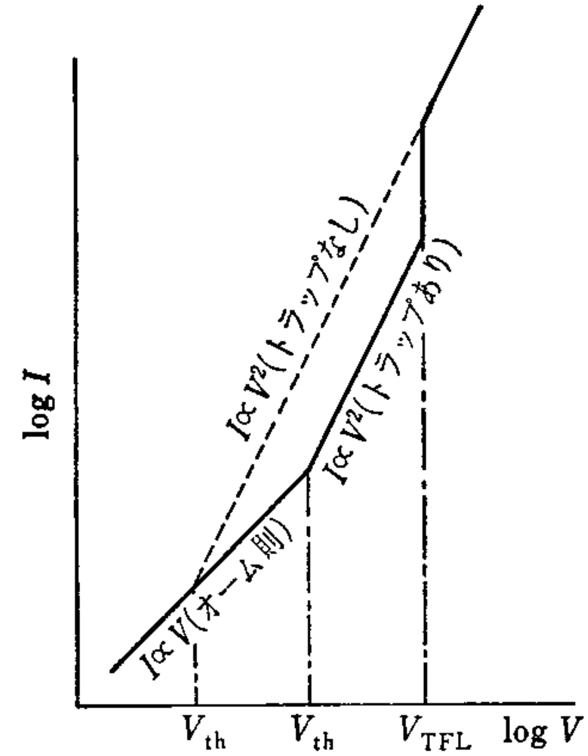


図 3.18　空間電荷制限電流

SCLC with trap state: $h(E)=\frac{H_t}{E_t}\exp\left(-\frac{E}{E_t}\right)$

$$J=e^{1-l}\mu_pN_v\left(\frac{2l+1}{l+1}\right)^{l+1}\left(\frac{l}{l+1}\frac{\varepsilon}{H_t}\right)^{l}\frac{V^{l+1}}{d^{2l+1}}$$

$$l=T_c/T=E_t/k/T$$

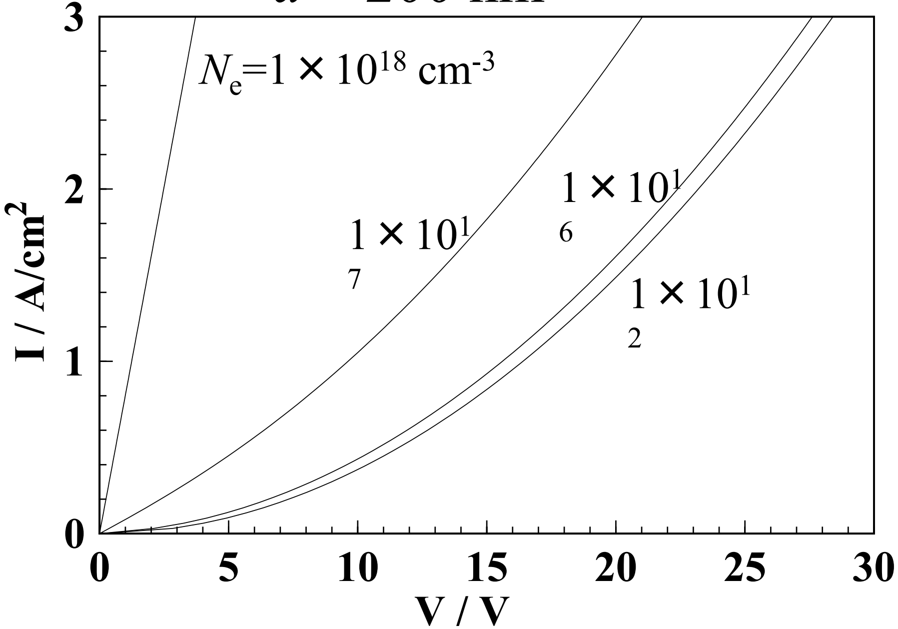
V. Kumar, S.C. Jain, A.K. Kapoor, J. Poortmans, R. Mertens, *Trap density in conducting organic semiconductors determined from temperature dependence of J-V characteristics*, JAP **94** (2003) 1283.

空間電荷制限電流 vs Ohmic電流

オーミック電流: $J = \sigma E$

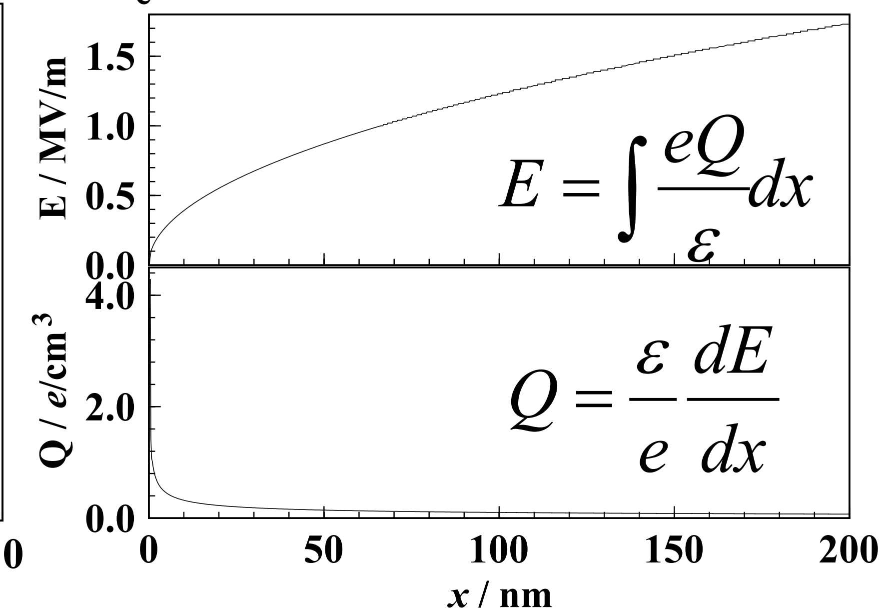
空間電荷制限電流: $J = \dfrac{9}{8}\varepsilon\mu\dfrac{E^2}{d}$

$\varepsilon_r = 3.0\ \varepsilon_0$
$\mu_e = 1\times10^{-4}\ \mathrm{cm^2/Vs}$
$d = 200\ \mathrm{nm}$



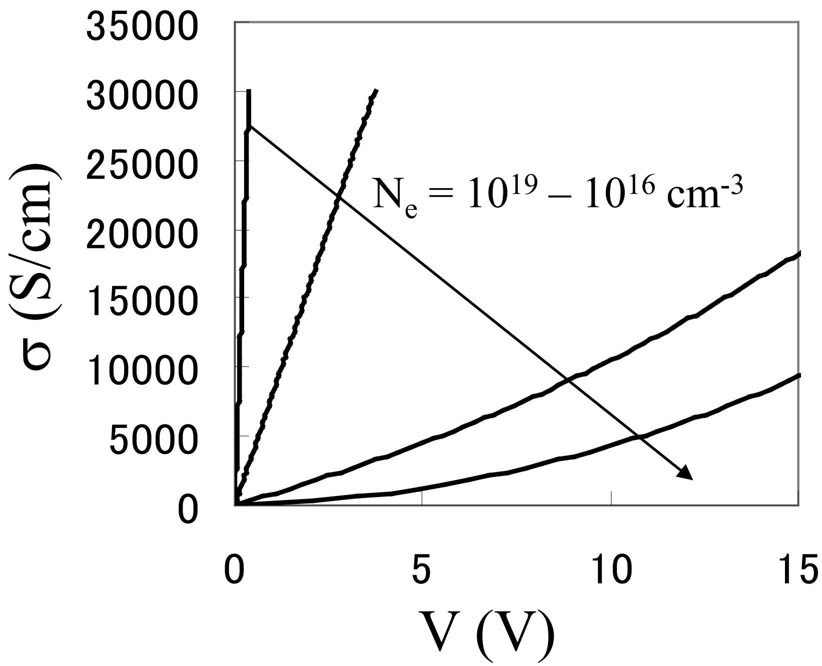
$N_e = 1\times10^{12}\ \mathrm{cm^{-3}}$

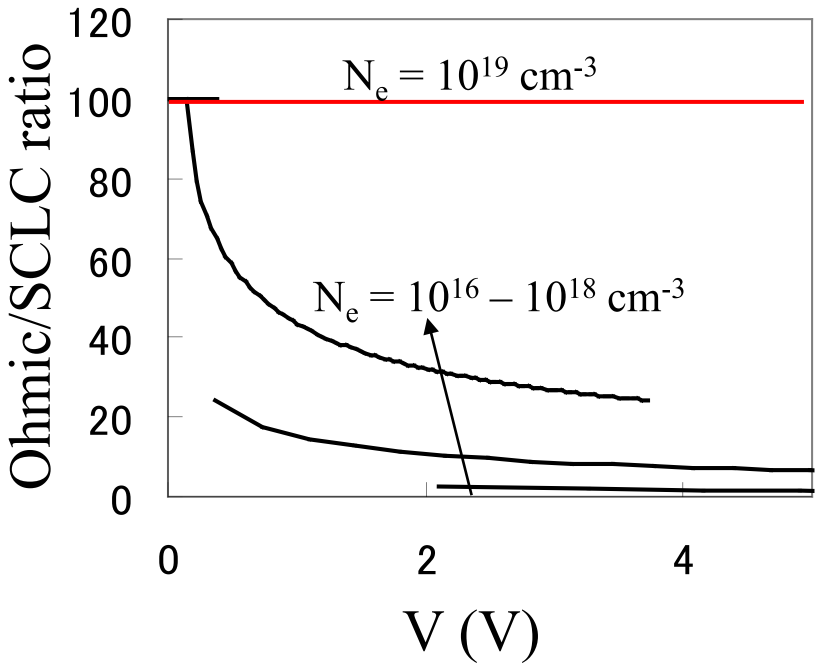
$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$



空間電荷制限電流(SCLC) – オーミック

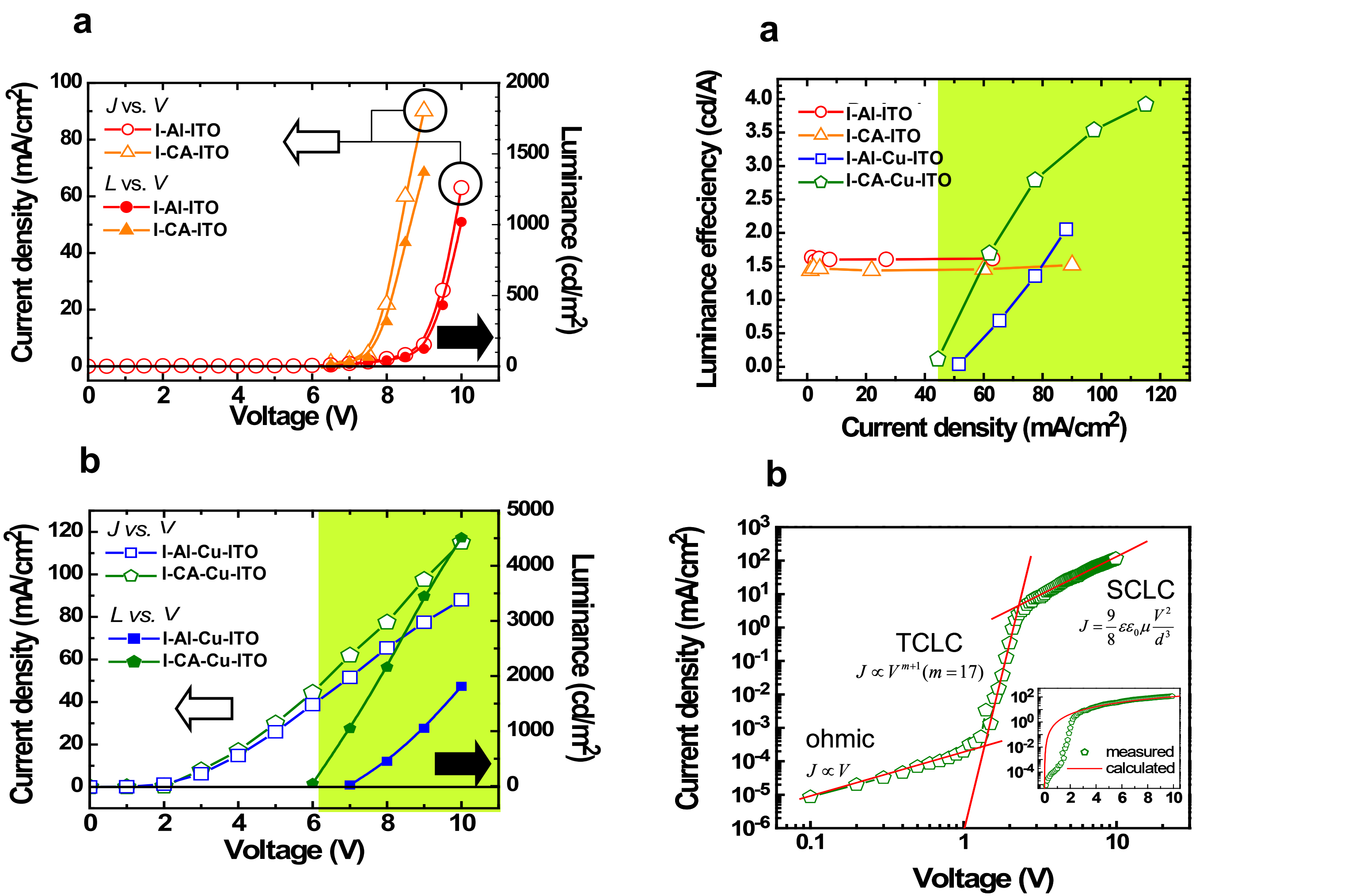
d = 200 nm
$\varepsilon_r = 3\varepsilon_0$
$\mu = 10^{-4}$ cm^2/Vs





C12A7e$^-$/Cu$_x$Se OLEDの例

Yanagi et al., J. Phys. Chem. C 113 (2009) 18379



Electronic conduction in polycrystals

多結晶半導体の伝導

移動度のあいまいさ

$\sigma = en\mu$

任意性なく測定できるのはσだけ

ドリフト移動度: $\mu_d = \mu_{drift}/E$　物理的な定義

伝導度移動度: $\sigma = en\mu$

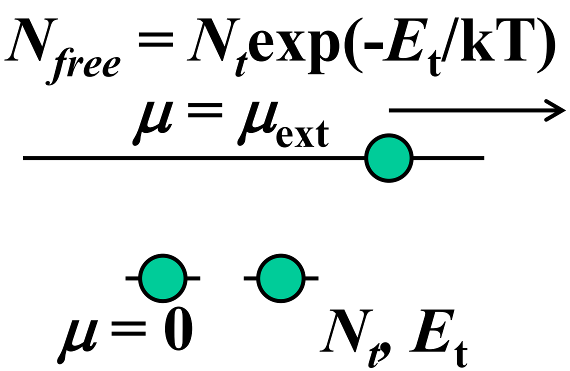
μはnの選択によって変わる

n: Hall効果 => Hall移動度

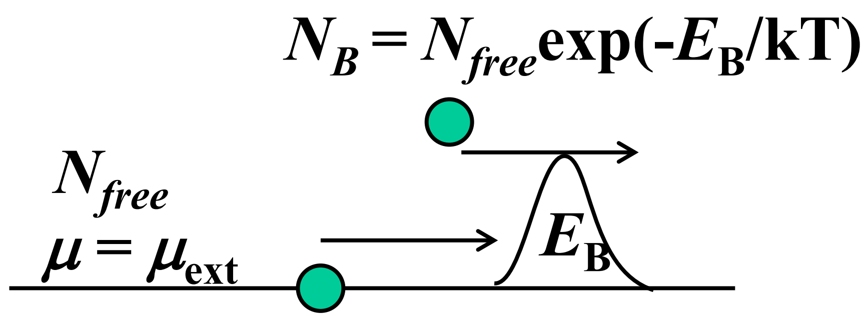
光吸収 => 光学移動度

電界誘起 => 電界効果移動度

非均質材料の場合は？



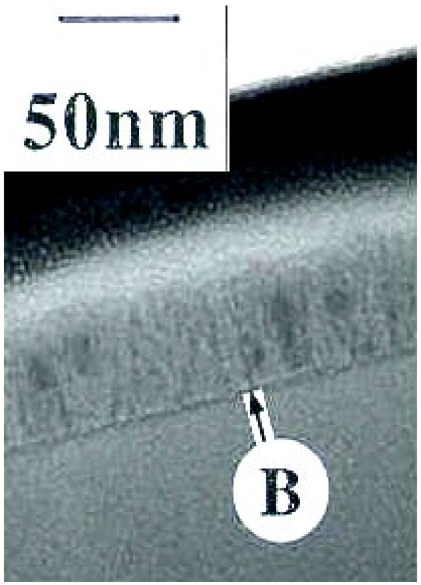
$\mu = \sigma / N_t$ or σ / N_{free}



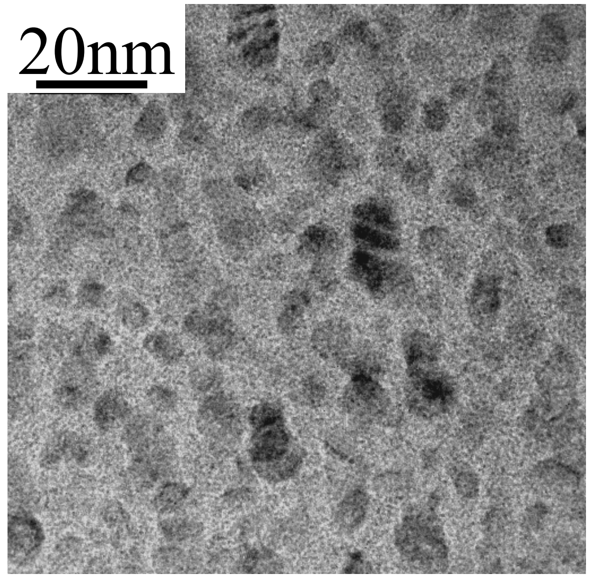
$\mu = \sigma / N_{free}$ or σ / N_B

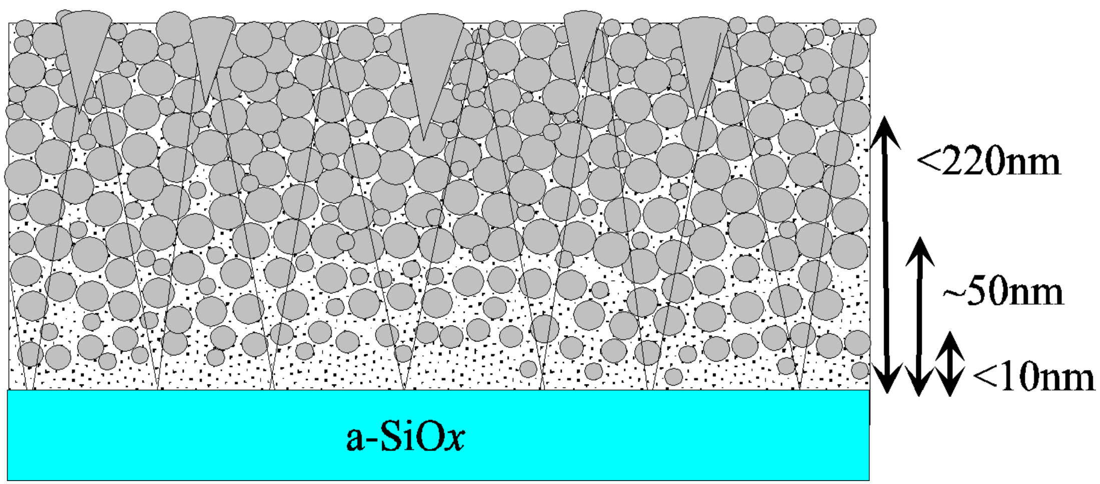
多結晶シリコンの微構造

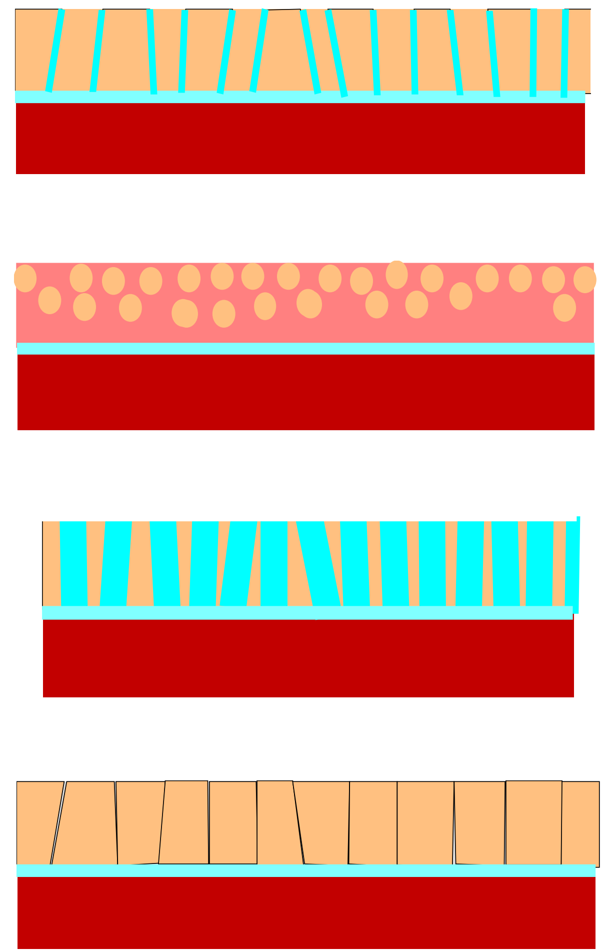
Cross-section



Plan view







多結晶半導体における粒界の役割

- アモルファス層 (amorphous tissue): 局所移動度が小さい
  PECVD低温 微結晶シリコン μc-Si:H
  低移動度 <10 cm^2/Vs
  結晶化率と移動度に正の相関

- 多結晶粒界層
  ・局所移動度が小さい: ひずんだ結合
  ・散乱中心
  ・ポテンシャル障壁
  Setoモデル
  粒界欠陥濃度、ドープ濃度により移動度が大きく変化
  ・粒界構造:
  X線回折rocking curve測定、EBSD (電子後方散乱回折)

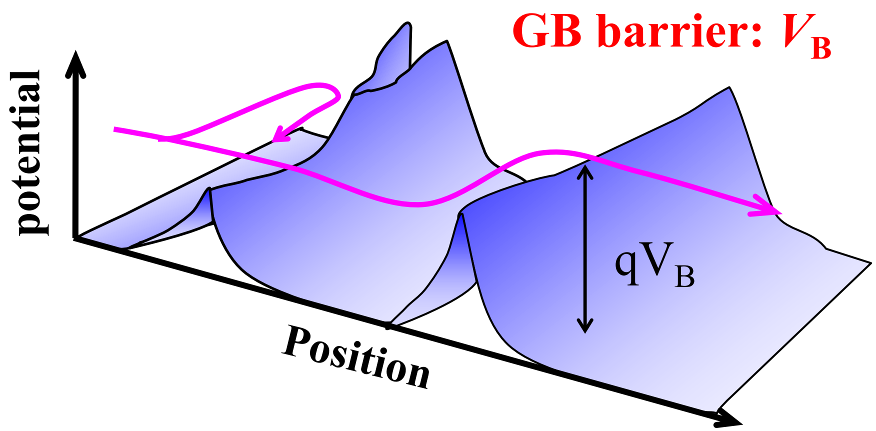
結晶粒内の特性

光学移動度（自由キャリア吸収）とHall移動度の比較

・高移動度 ELA poly-Siでは比較的小さい影響

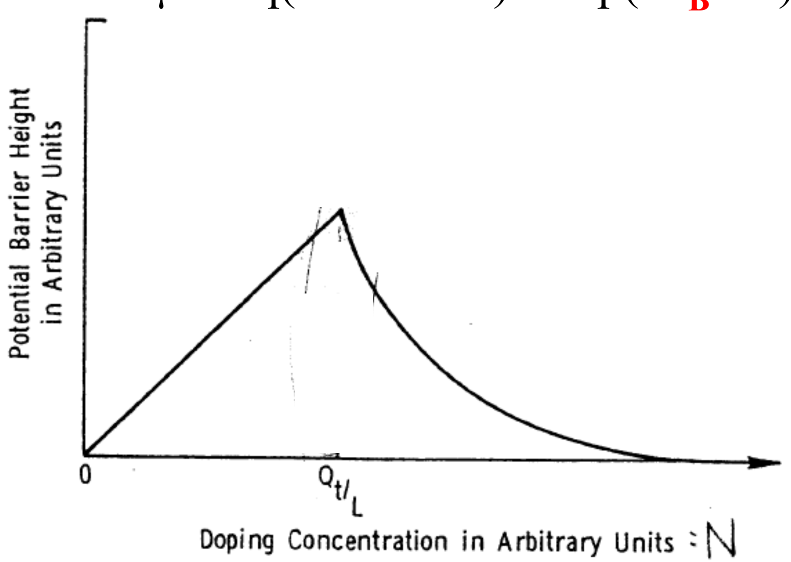
・低移動度 PECVD μc-Si:Hでは重要

Carrier transport in poly-semiconductors

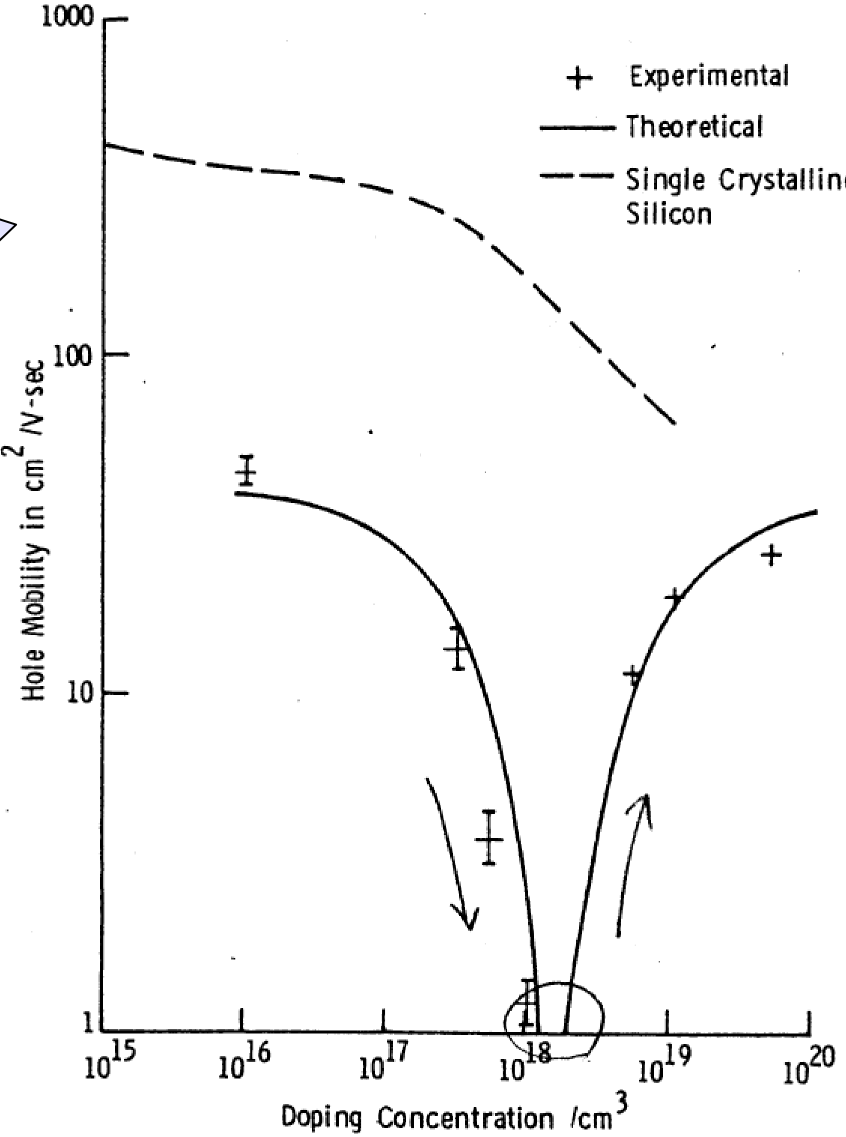


$$I(V) = 2qn_P\left(\frac{kT}{2\pi\, m^*}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{qV_B}{k_BT}\right)\sinh\left(-\frac{qV}{2nk_BT}\right)$$

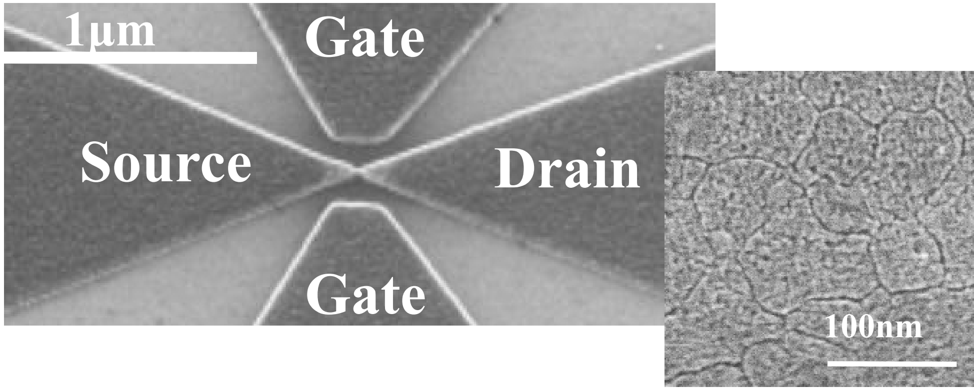
$$\mu = Lq(1/2\pi m^* kT)^{1/2}\exp(-V_B/kT)$$



John Y.W. Seto, JAP 46 (1975) 5247

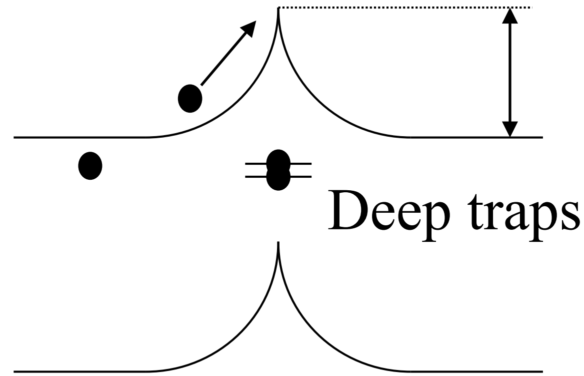


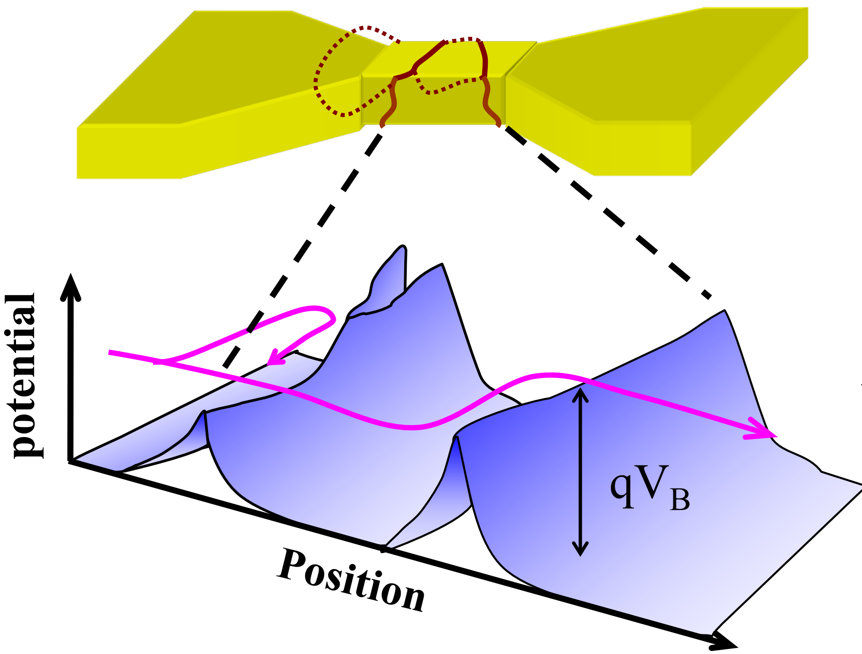
ナノワイアデバイスによる少数粒界の伝導



Furuta et al., Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L615 (2001)

粒界ポテンシャル障壁: V_B





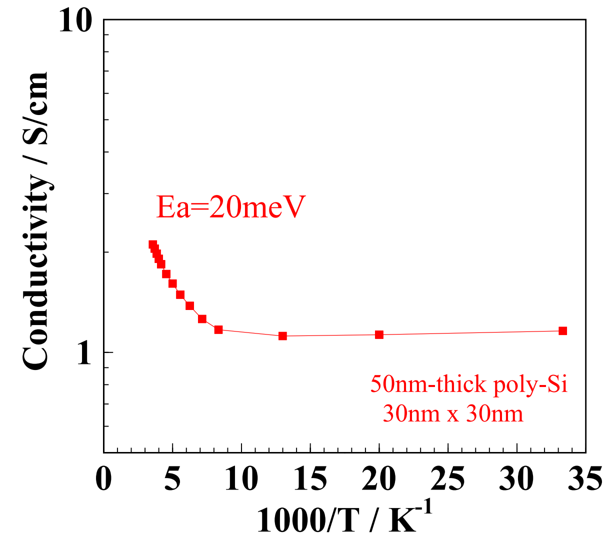
$$I(V) = 2qn_P\left(\frac{kT}{2\pi m^*}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{qV_B}{k_BT}\right)\sinh\left(-\frac{qV}{2nk_BT}\right)$$

$$\mu = Lq(1/2\pi m^* kT)^{1/2}\exp(-E_B/kT)$$

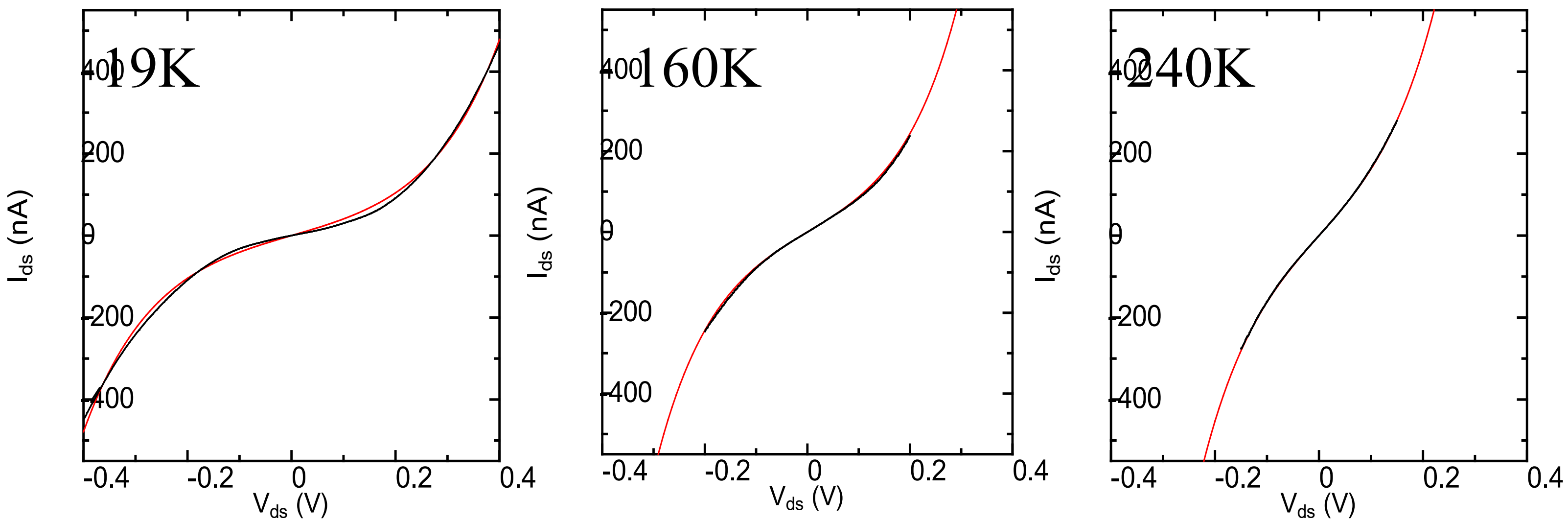
J.Y.W. Seto, *The electrical properties of polycrystalline silicon films*, J. Appl. Phys. 46 (1975) 5247.

Double-Schottky barrier-controlled transport in poly-Si

Kamiya et al., MRS Proc. **664**, A16.2 (2001)



$$I(V) = 2qn_P\left(\frac{kT}{2\pi m^*}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{qV_B}{k_BT}\right)\sinh\left(-\frac{qV}{2nk_BT}\right)$$

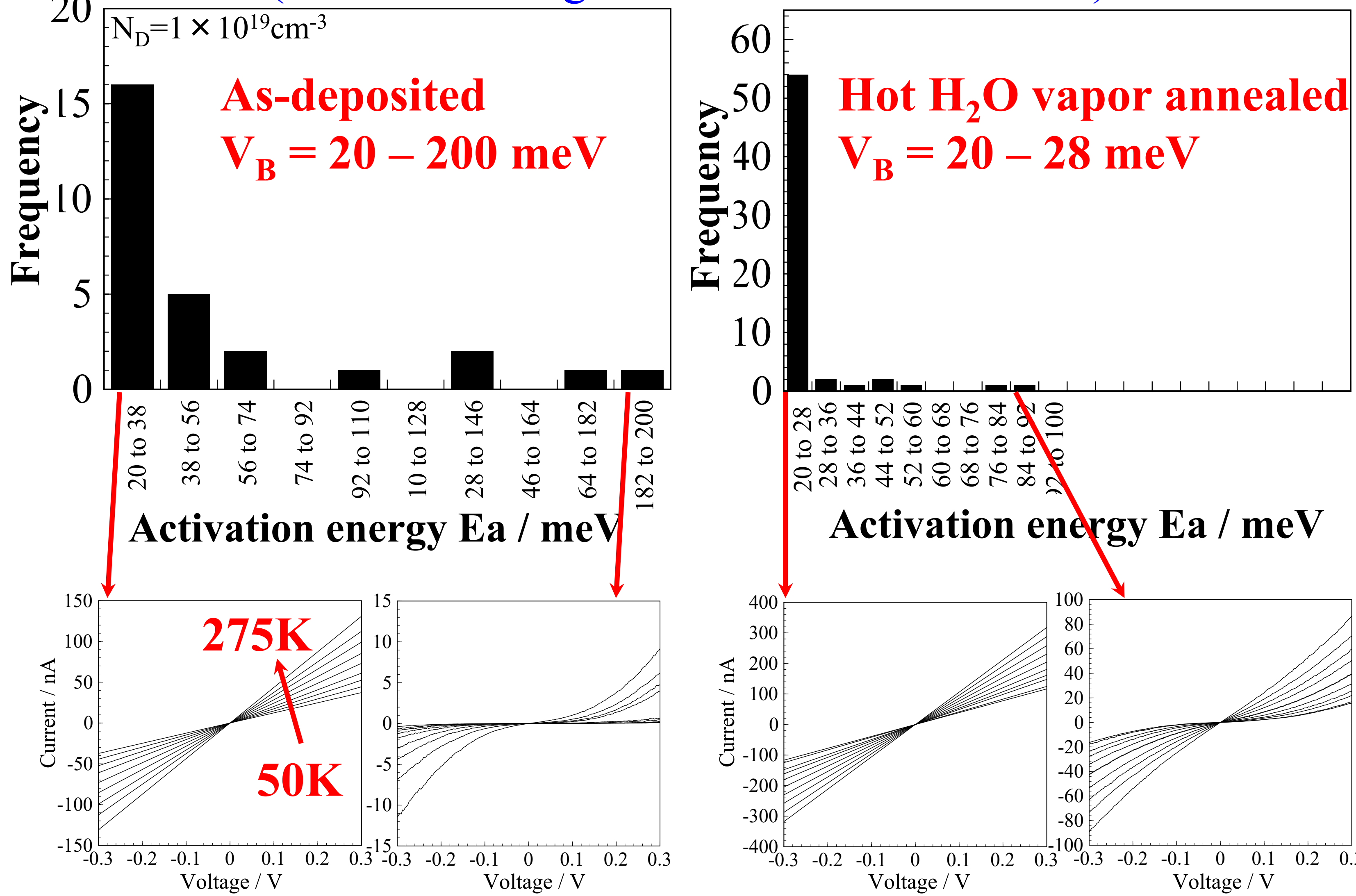


Black: experimental data
Red: fitting results

E_a=10meV-80meV

Distribution in poly-Si GB potential height

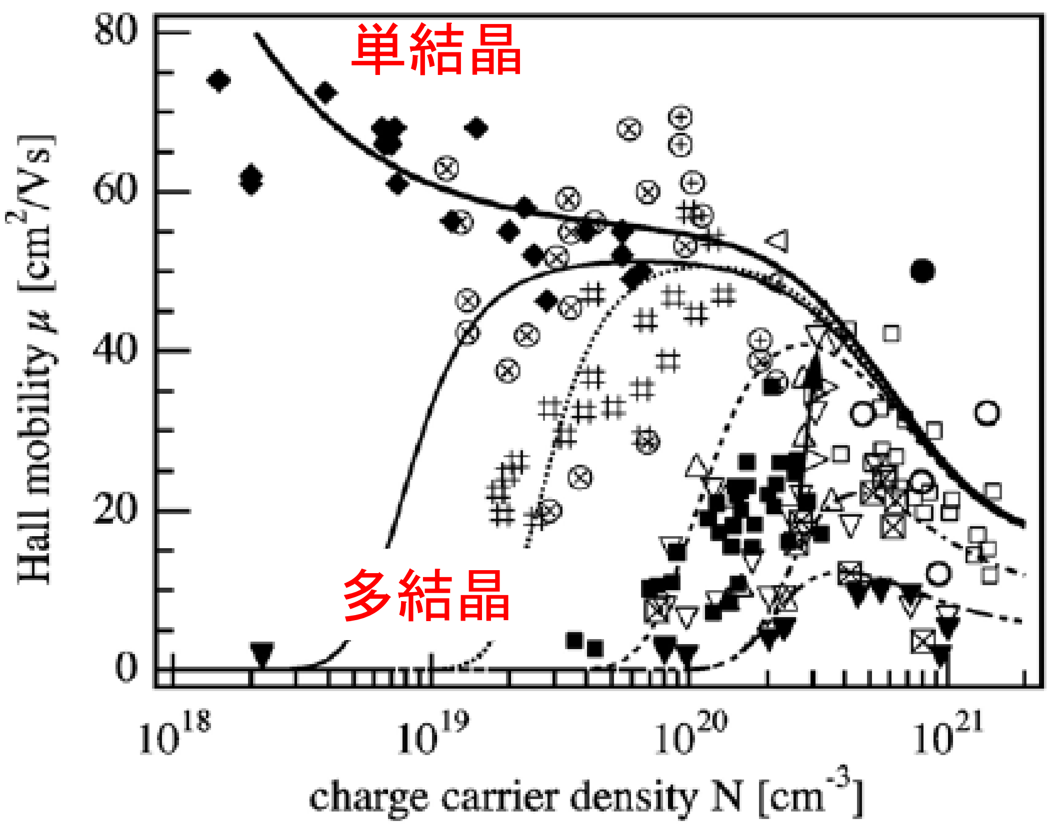
(measured using 20-50nm wide nanowires)



*T. Kamiya et al, JVSTB **21**, 1000(2003)*

多結晶ZnOの輸送特性

Ellmer et al., Thin Solid Films **516** (2008) 4620



DC mobility (Hall) vs in-grain mobility (FCA)

T. Sameshima, K. Saitoh, N. Aoyama, M. Tanda, M. Kondo, A. Matsuda, S. Higashi, Analysis of free-carrier optical absorption used for characterization of microcrystalline silicon films, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 66 (2001) 389

P- / B-doped mc-Si:H: 100 W RF PECVD, 180^{o}C, SIH4/PH3,B2H6/H2
ELA: 28 ns XeCl excimer laser, 160 to 360 mJ/cm^2, 5 pulses