

アドミタンス測定によるMIS界面電子準位の評価 ~窒化物半導体界面への適用と解釈~

橋詰 保

北海道大学

量子集積エレクトロニクス研究センター

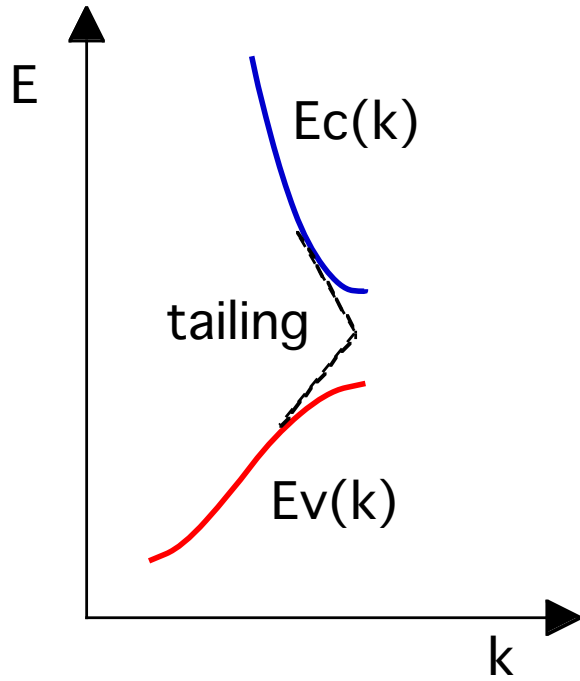
MIS構造

- ・トランジスタゲート構造、種々の表面安定化構造
- ・IS界面の電子捕獲準位
 - トランジスタの基本性能 (g_m 、チャネル移動度、・・・)
 - 動作安定性 (電流ドリフト、コラプス、・・・)

1. 表面・界面準位のモデル、電荷状態、基準エネルギー
2. 表面・界面準位の評価法
3. GaN MOS構造の評価例
4. AlGaIn/GaN HEMT MIS構造のCV特性の解釈
- (5. ドライエッチGaIn表面に形成したMOS構造)

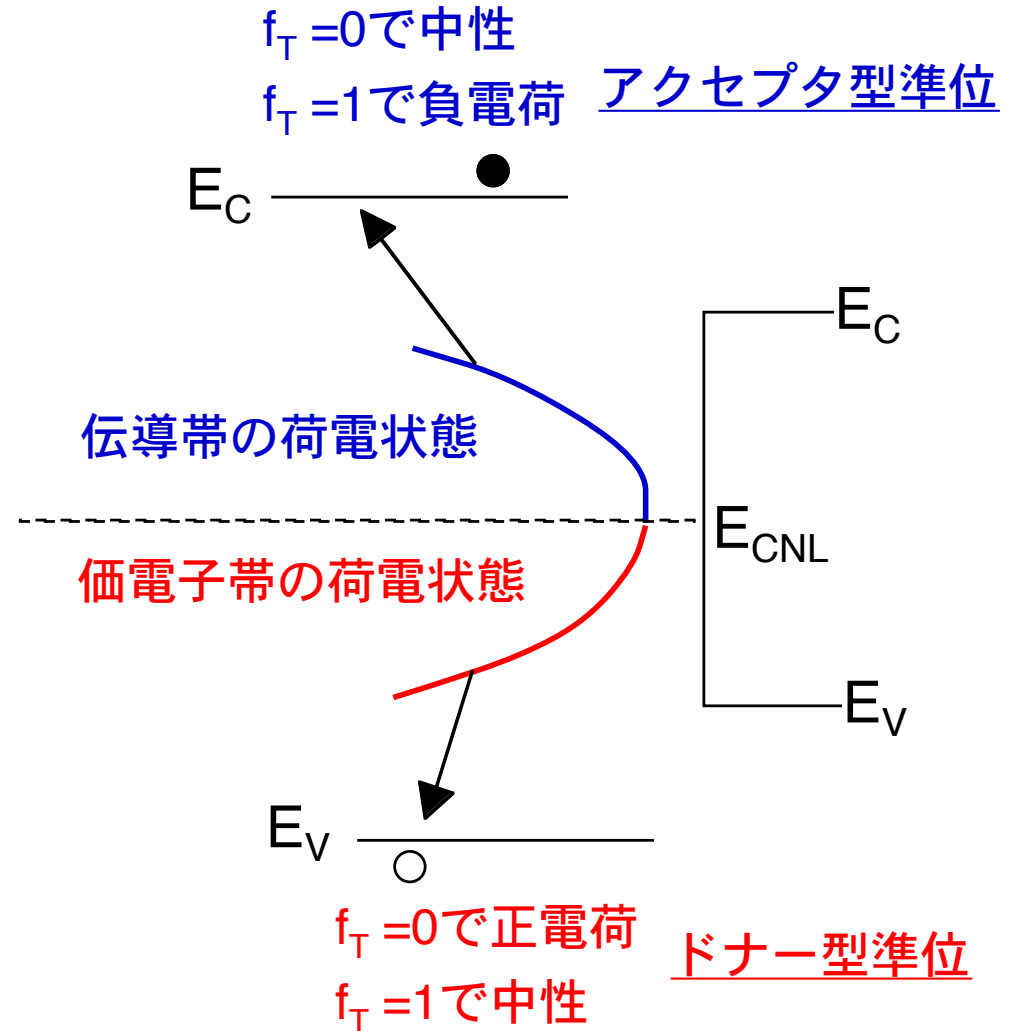
界面(表面)準位のモデル —本質的連続準位—

表面においては両バンドの分離が不十分
で、両バンドからのtailingが生じる



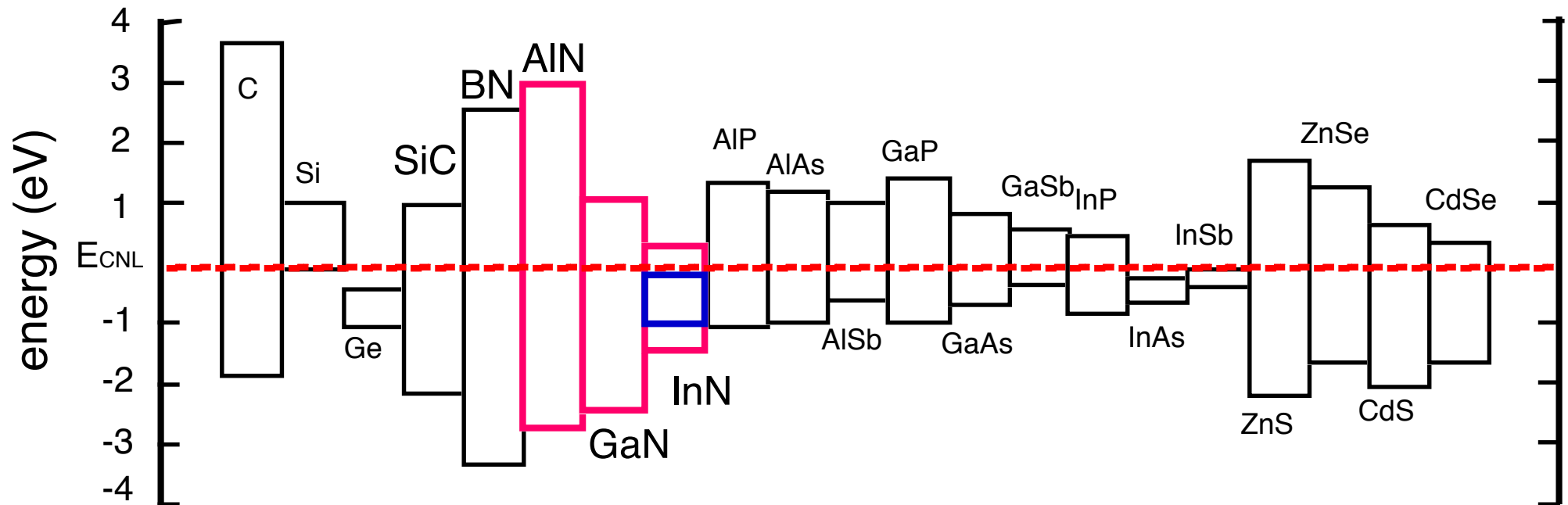
E_{CNL}

電荷中性準位
midgap準位
branch point
表面安定化準位



電荷中性準位とバンドラインナップ

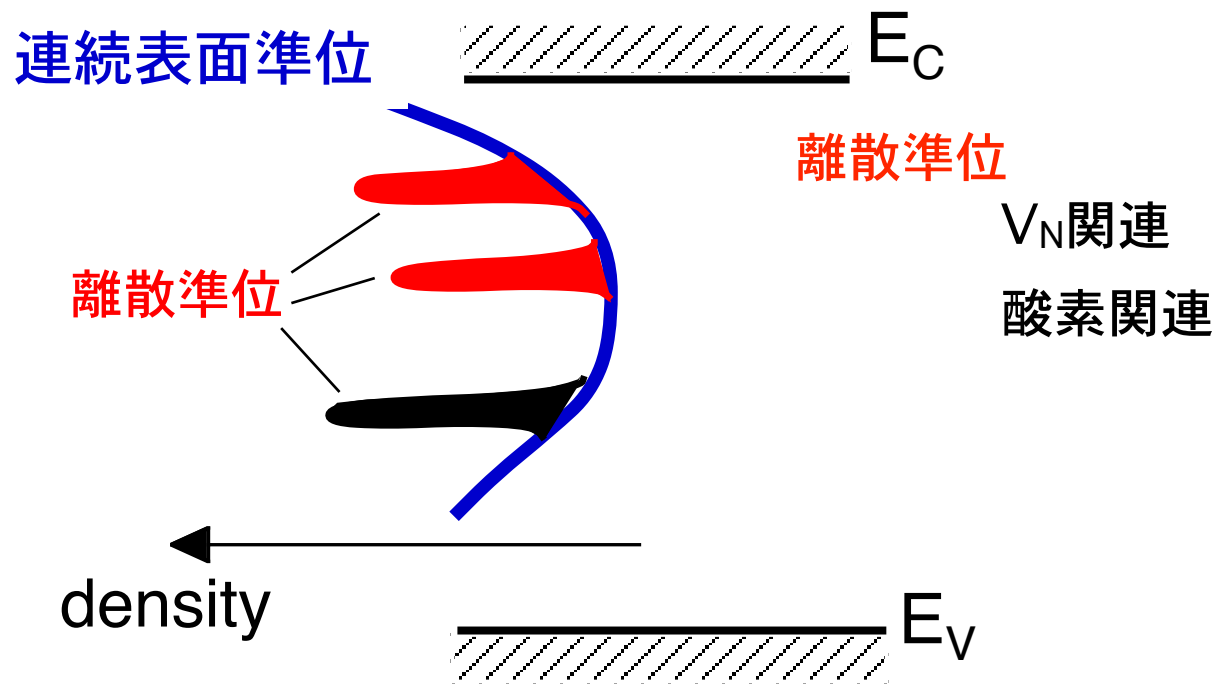
Band line-up for semiconductors based on E_{CNL}



E_{CNL} 電荷中性準位
midgap energy
branch point

Mönch
ASS, 117/118, 380(1997)

現実の表面準位



準位密度は表面状態により大きく異なる

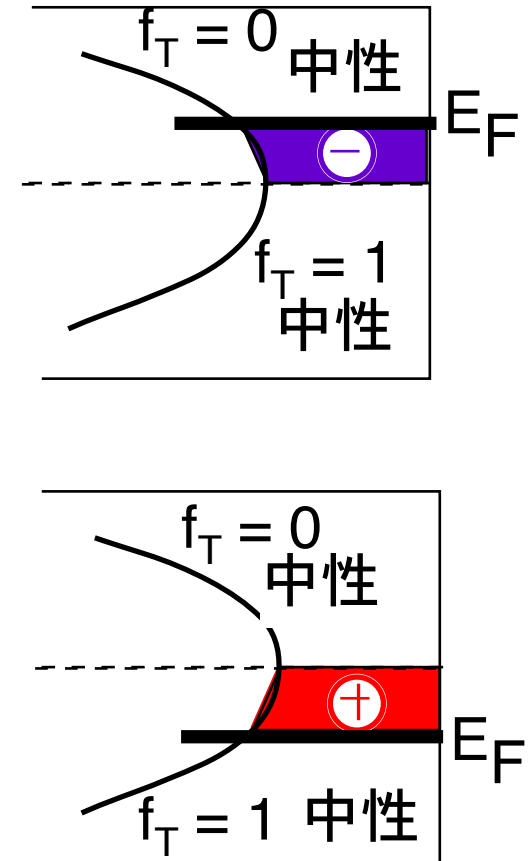
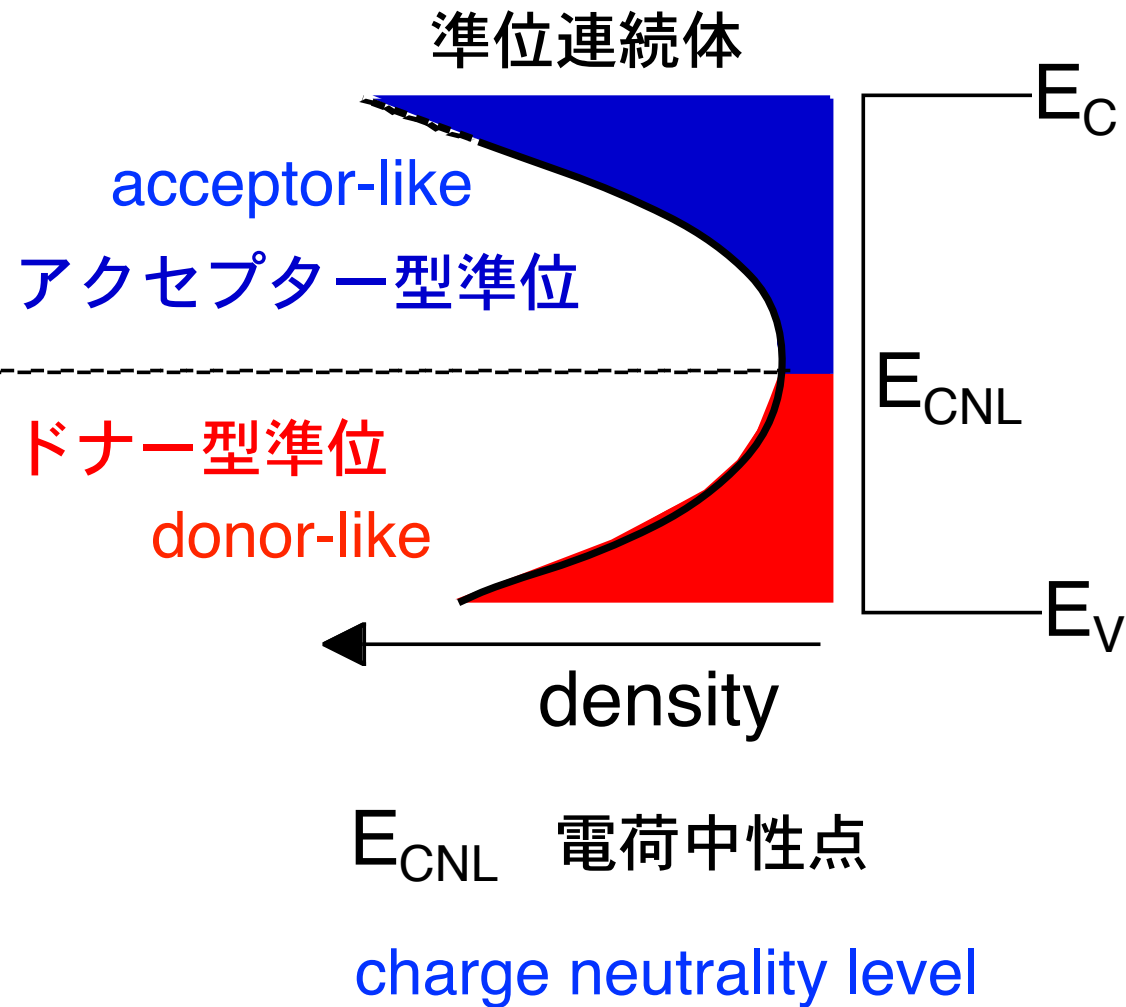
$$1 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$$

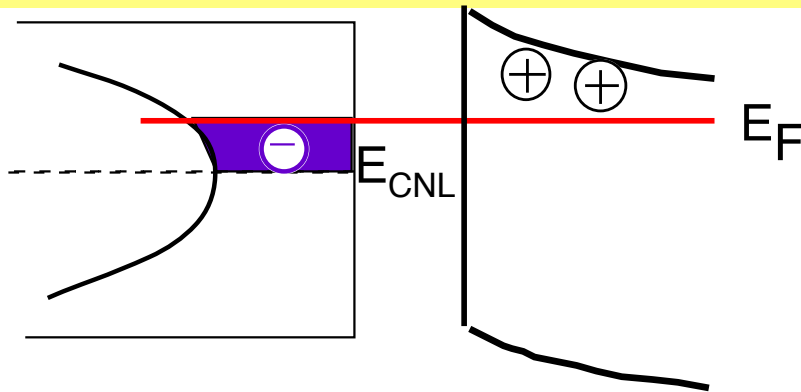
- ・ プロセス中の表面欠陥導入
- ・ 表面の化学吸着状態
- ・ 絶縁膜形成による化学結合の乱れ

準位連続体の荷電状態

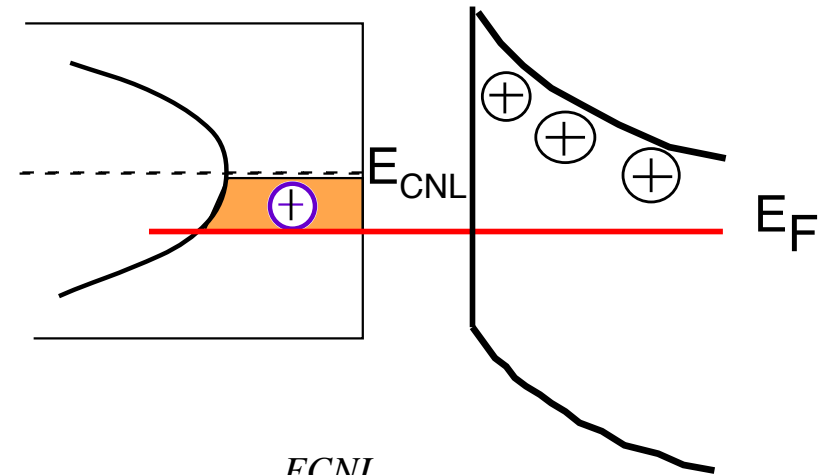
Charging condition for state continuum

荷電状態の変化





$$D_{it}^{-} = \int_{ECNL}^{EF} D_{it}(E) dE$$



$$D_{it}^{+} = \int_{EF}^{ECNL} D_{it}(E) dE$$

$D_{it}(E)$ in $[\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}]$

例1

Siにおいて $D_{it}(E) = 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ (均一)

表面準位全体の密度

$$= D_{it}(E) \times E_g = 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1} \times 1.0$$

$$= 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$$

例2

$1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ の密度は大きいのか?

Si MOSFETやGaAs FETにおける

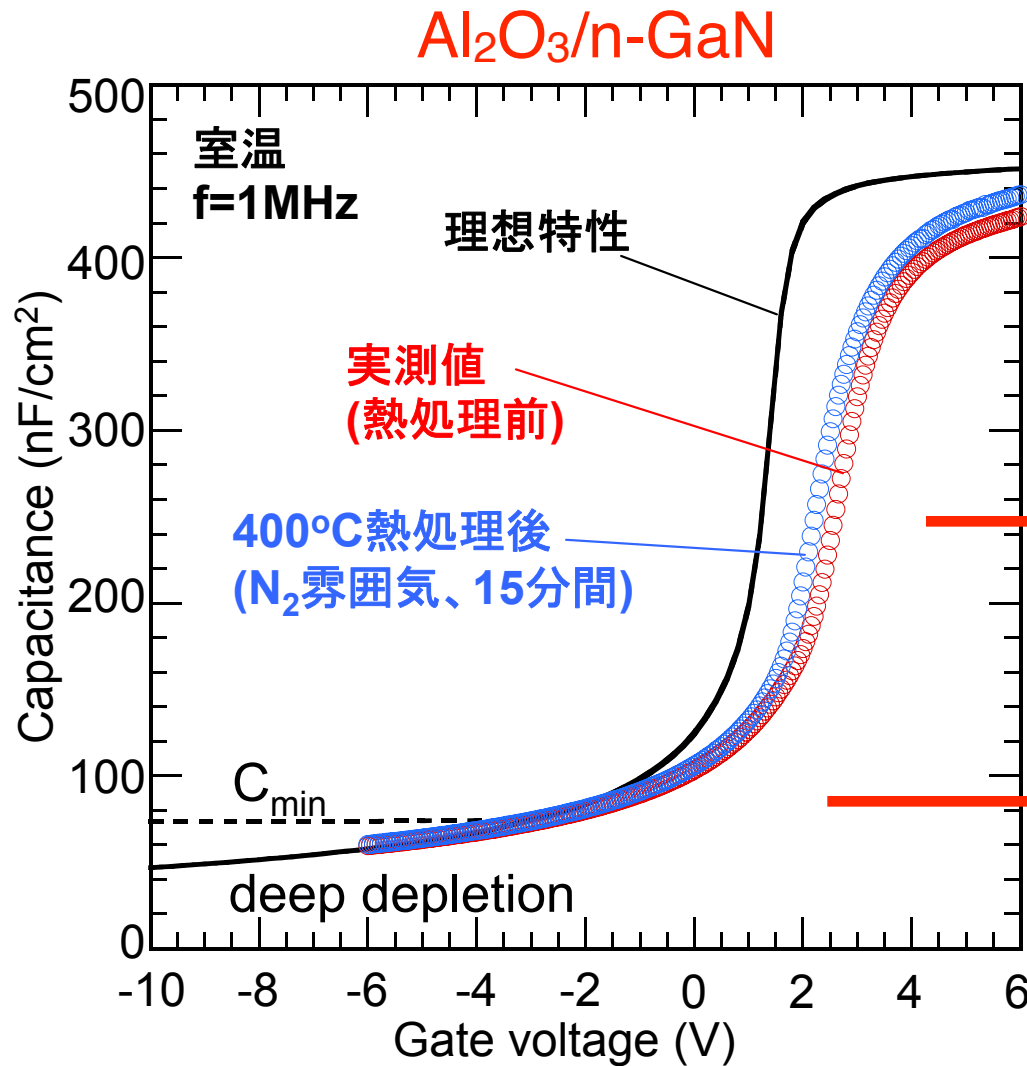
キャリア密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

最大値は?

MOS構造のアドミタンス評価

E.H. Nicollian & J.R. Brews
MOS Physics and Technology
Wiley, 2003

C-V特性の評価例



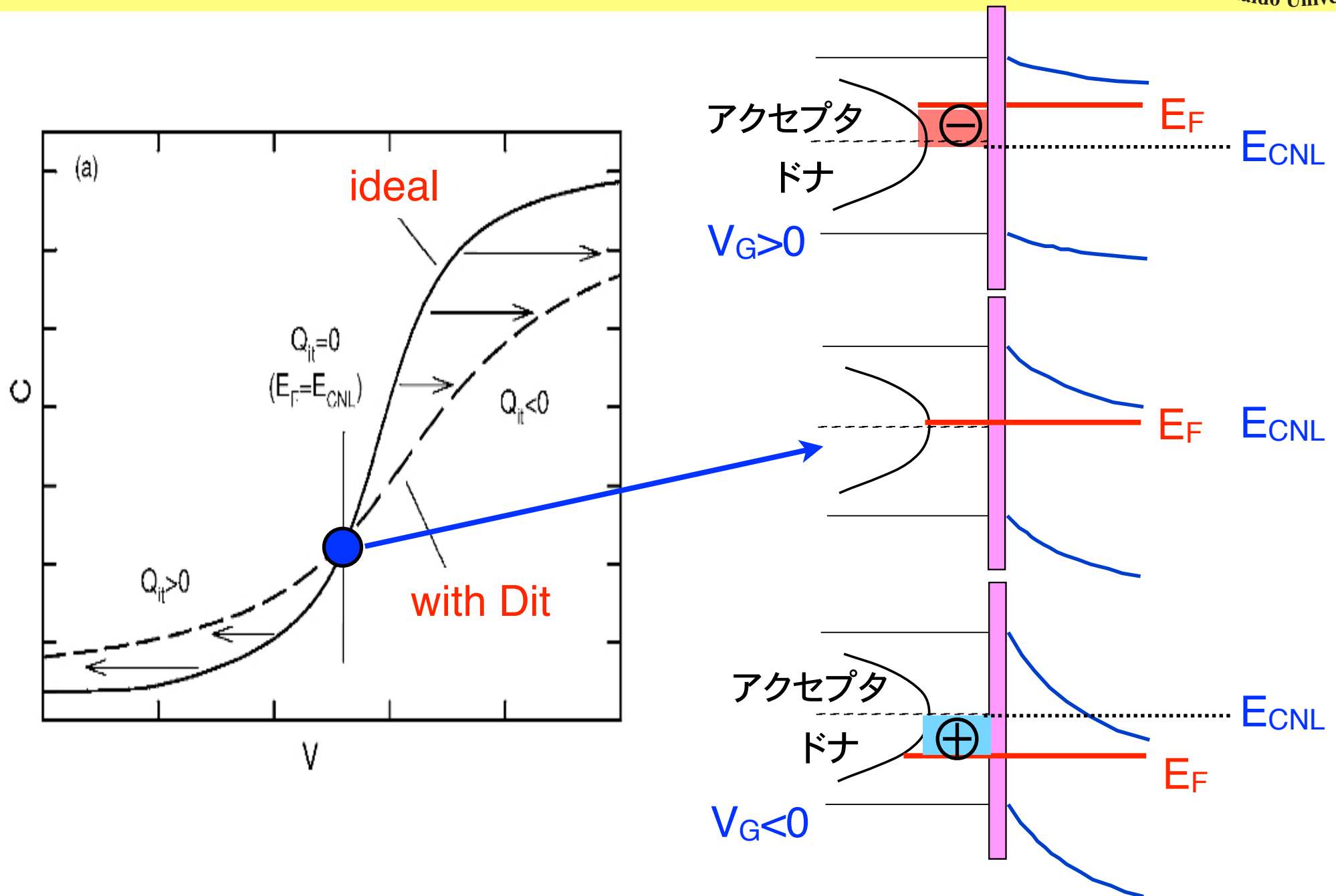
→ 酸化膜容量に近いか?

→ C-V曲線の傾きが理想特性よりゆるやかか?

→ C_{\min} , V_{TH} と近いか

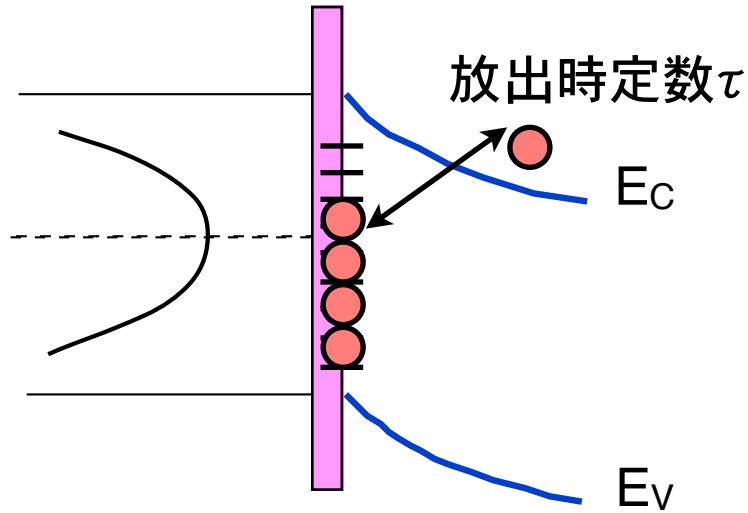
GaNやSiCなどでは
表面反転状態でも少数
キャリア発生が見えない

CV特性のStretch-out



界面準位の取り扱い—等価回路—

空乏状態—少数キャリア無視



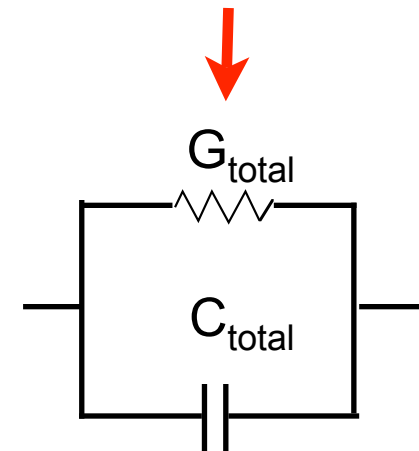
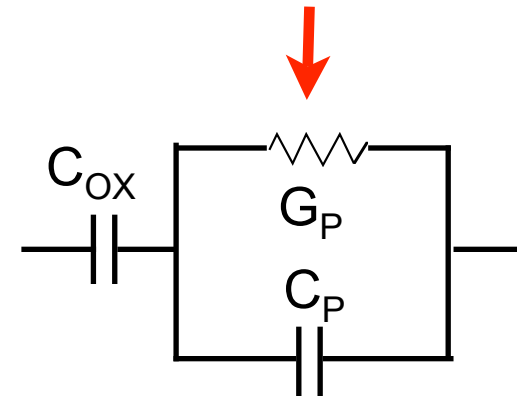
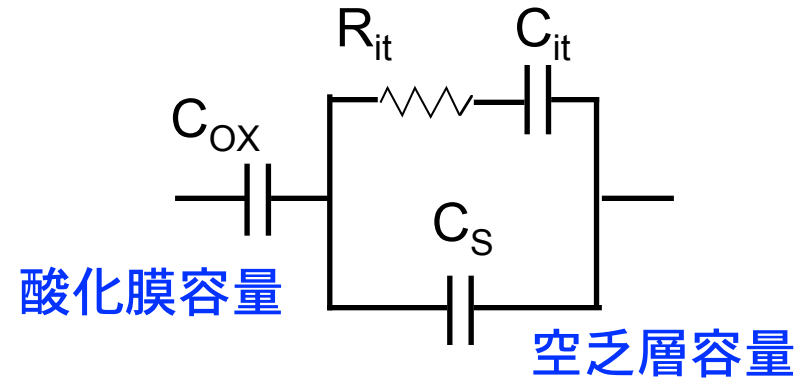
$$C_P = C_S + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$\frac{G_P}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$\tau(E) = C_{it} R_{it}$$

$$qD_{it} = C_{it}$$

$$D_{it} [\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}]$$



準位からのキャリア放出時定数

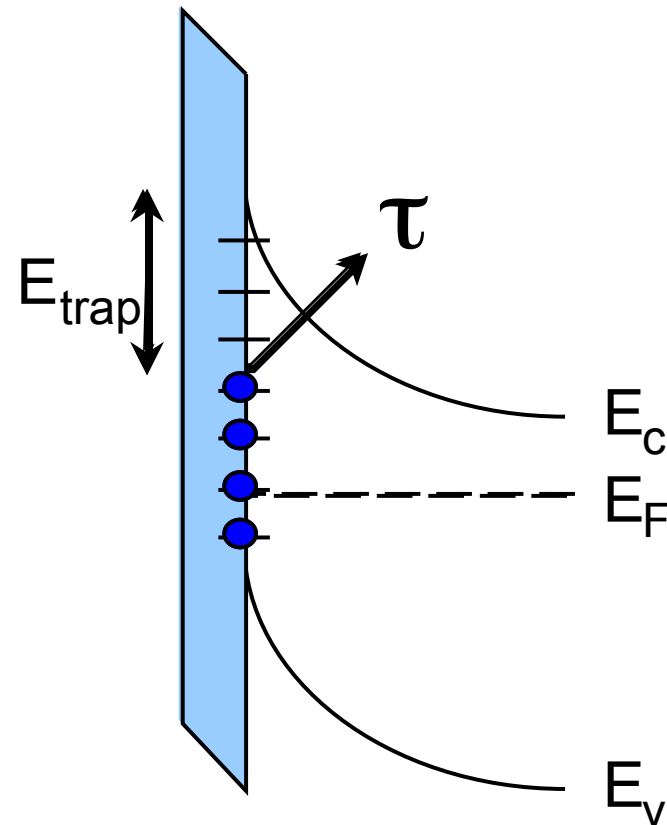
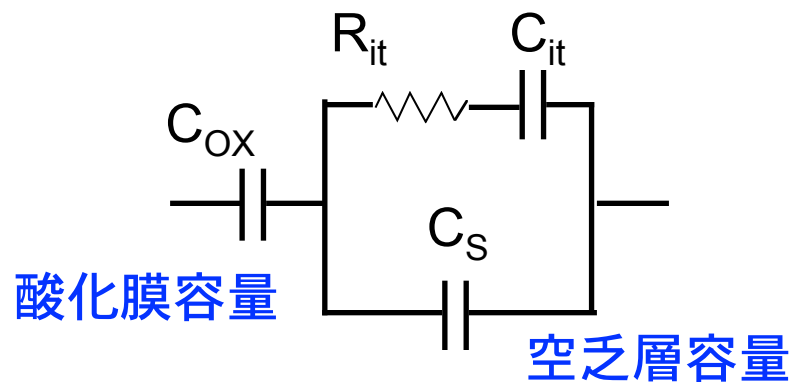
SRH統計から予想される
準位からの電子放出時定数

$$\tau_e = \frac{1}{\sigma_e v_{TH} N_C} \exp\left(\frac{E_C - E_T}{kT}\right)$$

σ : 捕獲断面積

v_{TH} : キャリア熱速度

$$\tau(E) = C_{it} R_{it}$$



界面準位の算出法—高周波CV法—

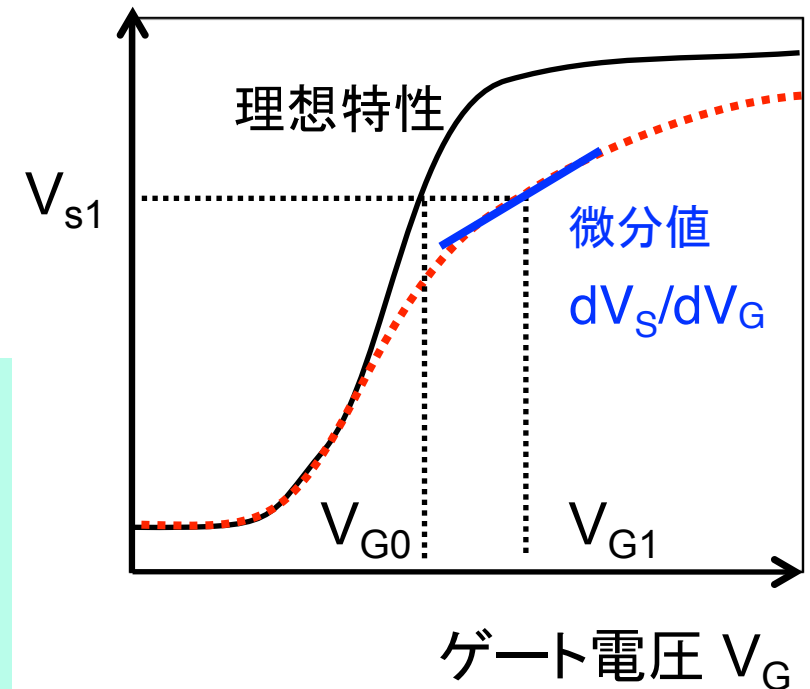
$$V_G = V_{OX} + V_S = \frac{Q_S(V_S) + Q_{it}(V_S)}{C_{OX}} + V_S$$

$$dV_G = \frac{1}{C_{OX}} \left[\frac{dQ_S}{dV_S} dV_S + \frac{dQ_{it}}{dV_S} dV_S + C_{OX} dV_S \right]$$

$$= \frac{1}{C_{OX}} [C_{OX} + C_S(V_S) + C_{it}(V_S)] dV_S$$

$$D_{it}(V_S) [cm^{-2}eV^{-1}] = \frac{C_{OX}}{q} \left[\frac{1}{\frac{dV_S}{dV_G}} - 1 \right] + \frac{C_S(V_S)}{q}$$

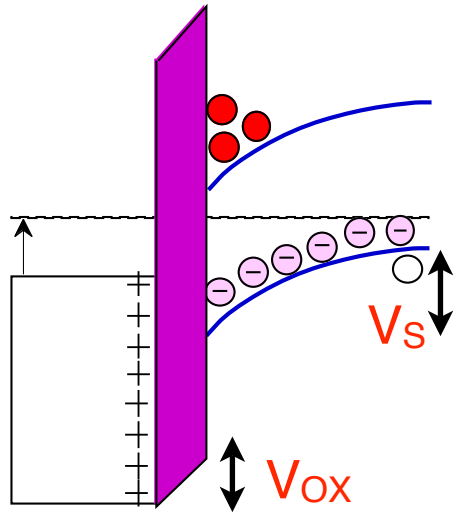
表面ポテンシャル V_S



- 1) 実験容量値から各ゲート電圧 V_G に対応する表面ポテンシャル V_S を算出し、
 $V_G - V_S$ 特性より $V_G - (dV_S/dV_G)$ 特性を求める。
- 2) 着目する V_S に対応する理想空乏層容量 C_S を計算する。
- 3) 表面ポテンシャル V_S の位置の界面準位密度を求める

ゲート電圧 V_G と表面ポテンシャル V_S の関係

ポアソン方程式
$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_S} = -q \frac{p - n + N_D - N_A}{\epsilon_S}$$



$$Q_S = \mp \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} \sqrt{\left[\exp(-\beta V_S) + \beta V_S - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[\exp(\beta V_S) - \beta V_S - 1 \right]}$$

$$\beta = \frac{q}{kT}$$

$$n_{p0} = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$$p_{p0} = n_i \exp\left(\frac{E_i + E_F}{kT}\right)$$

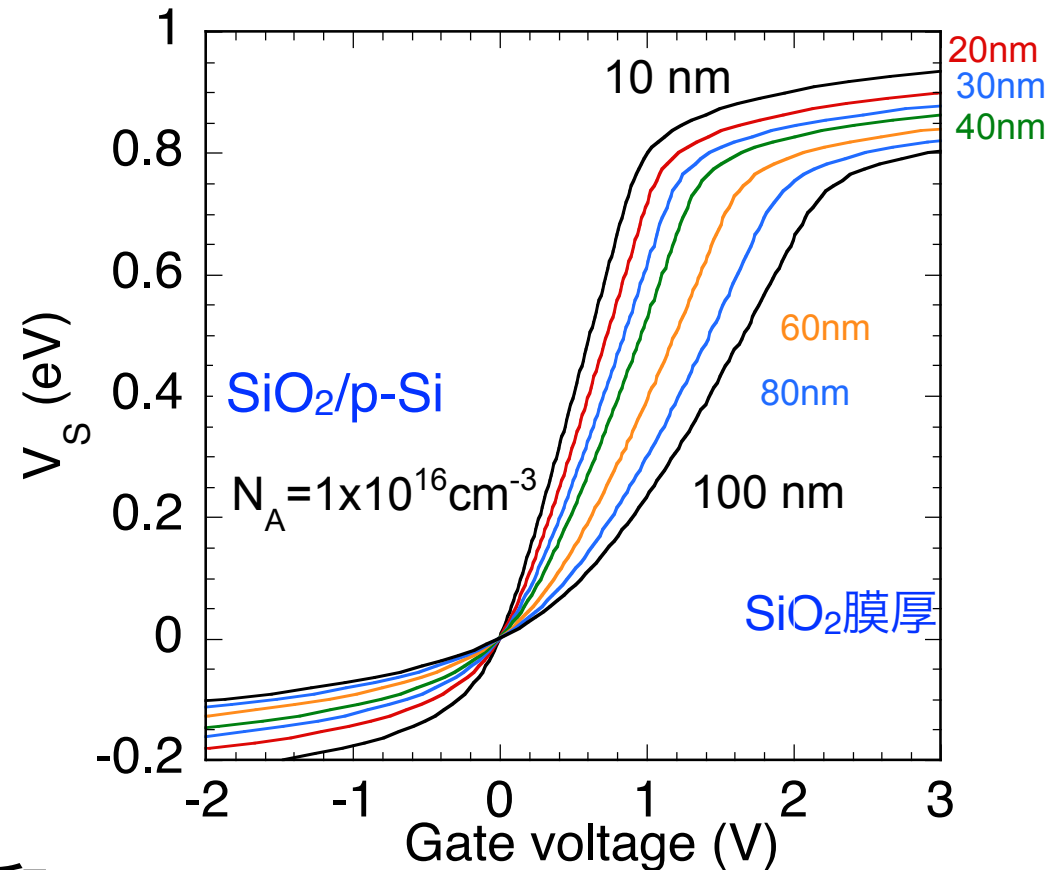
$$V_G = \frac{Q_S(V_S)}{C_{OX}} + V_S = \frac{Q_S(V_S)}{d_{OX}/\epsilon_{OX}} + V_S$$

V_S を与えて Q_S を計算する



その Q_S を使って V_G を計算する

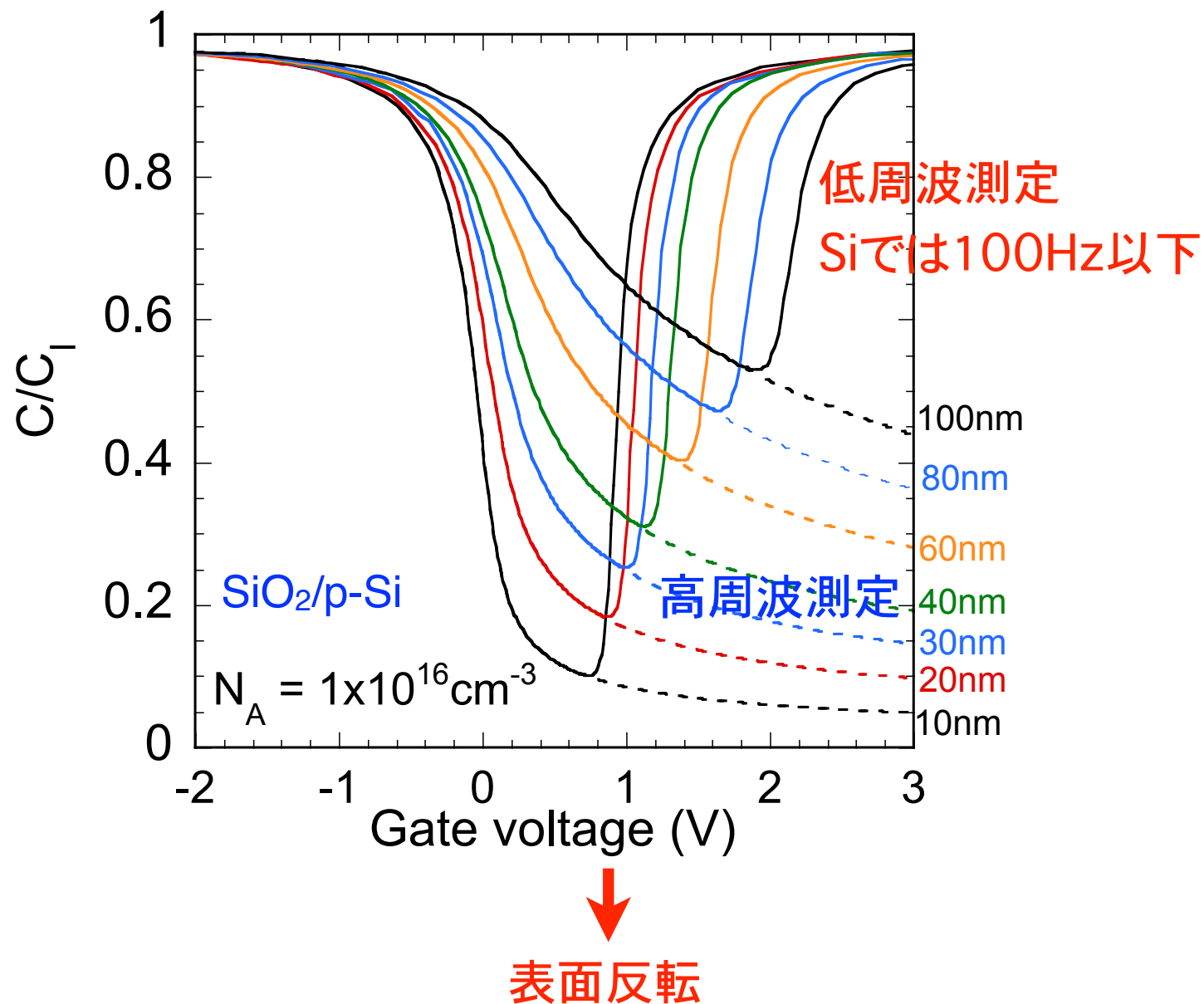
Q_S は空乏層電荷と反転電子密度の和



理想C-V特性

$$C = \frac{C_S C_{OX}}{C_S + C_{OX}}$$

$$C_S = \frac{dQ_S}{dV_S}$$



高周波CV法における注意点

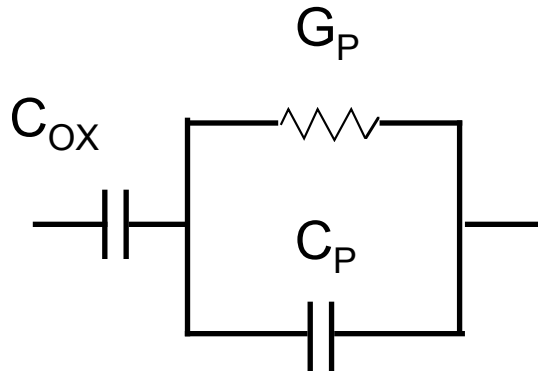
1) 理想CV曲線の計算

- ・絶縁膜容量と不純物密度の正確な算出

2) 解析の仮定

- ・界面準位は測定信号に追随しない
- ・界面準位の荷電状態は表面ポテンシャルに従う

コンダクタンス法



単一準位の場合

$$\frac{G_P}{\omega} = \frac{C_{it}\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$\omega\tau=1$ で最大値

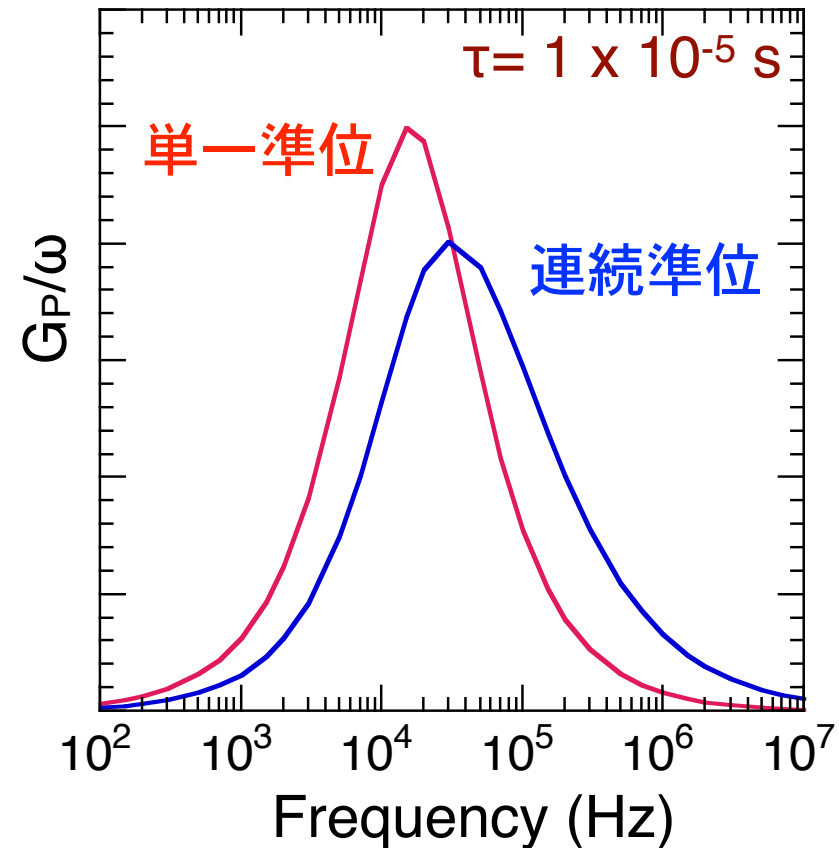
$$\left(\frac{G_P}{\omega}\right)_{MAX} = \frac{C_{it}}{2}$$

$$qD_{it}=C_{it}$$

連続準位の場合

$$\frac{G_P}{\omega} = \frac{C_{it}}{2\omega\tau} \ln[1 + (\omega\tau)^2]$$

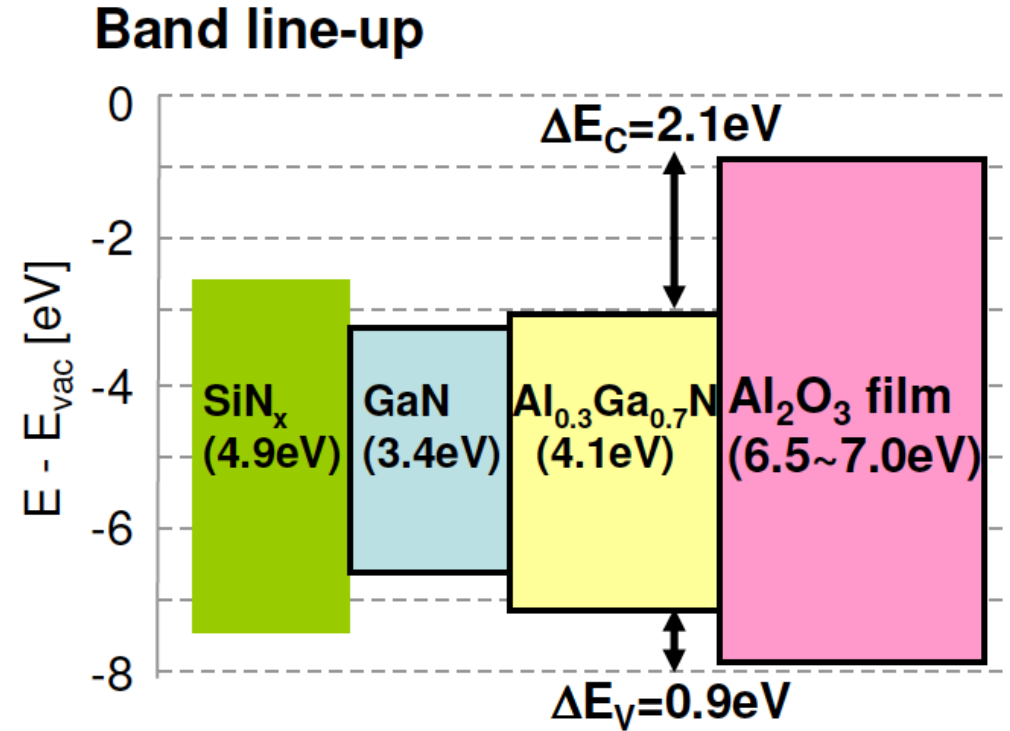
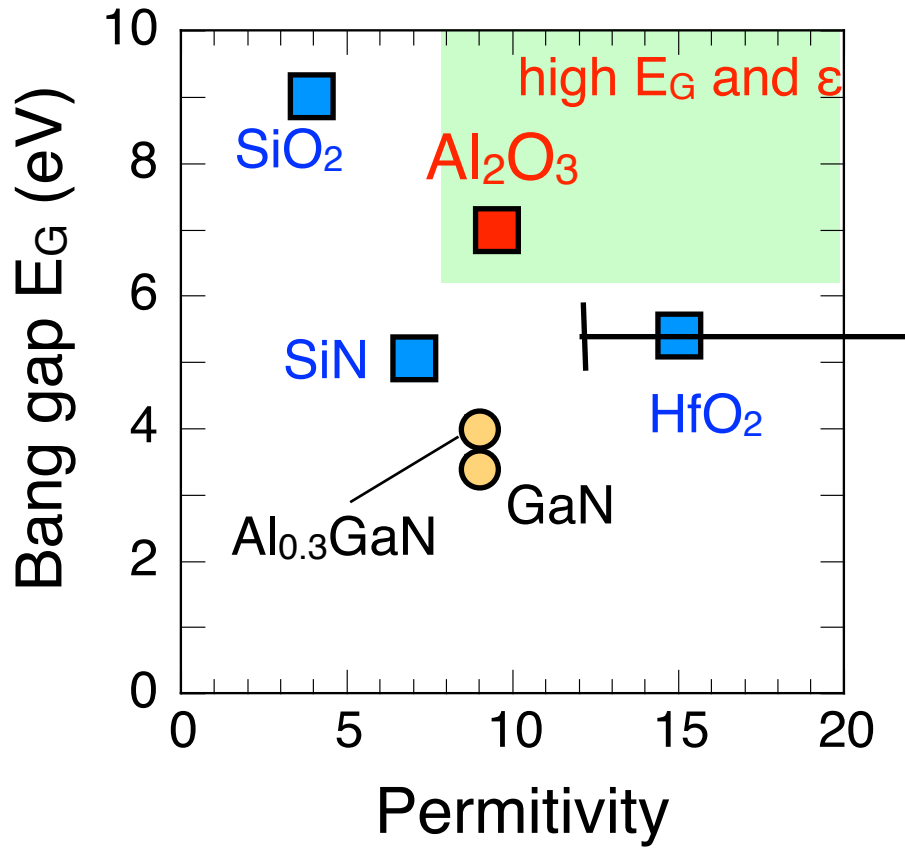
$\omega\tau \sim 2$ で最大値



- ・感度高い
- ・対応する準位のエネルギー位置?
- ・CV法との併用が必須

GaN MOS構造の評価

ワイドギャップ半導体への絶縁膜選択の難しさ

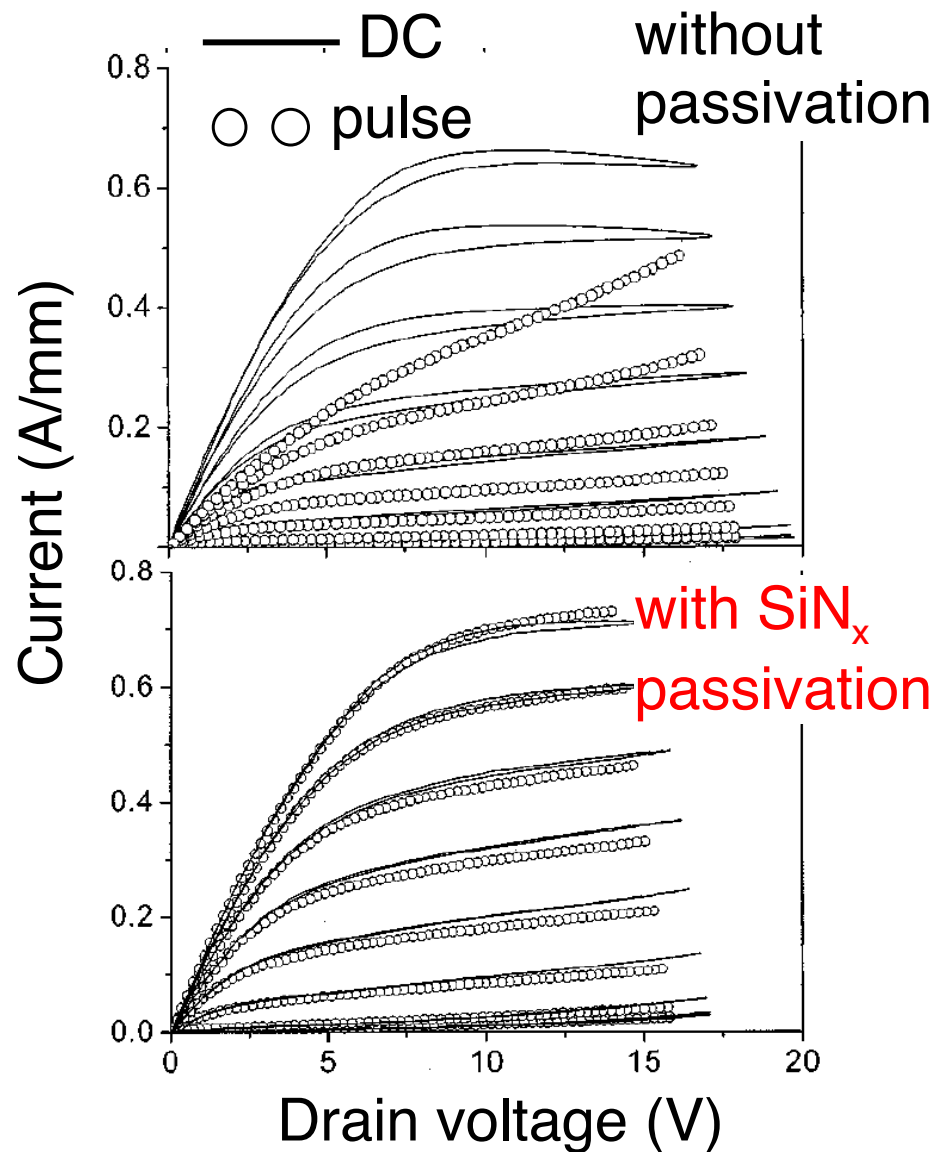


T. Hashizume *et al.*

J. Vac. Sci. Technol. B, **21**(4), (2003), 1828

SiN膜の表面不活性効果

SiN膜の優れた不活性特性

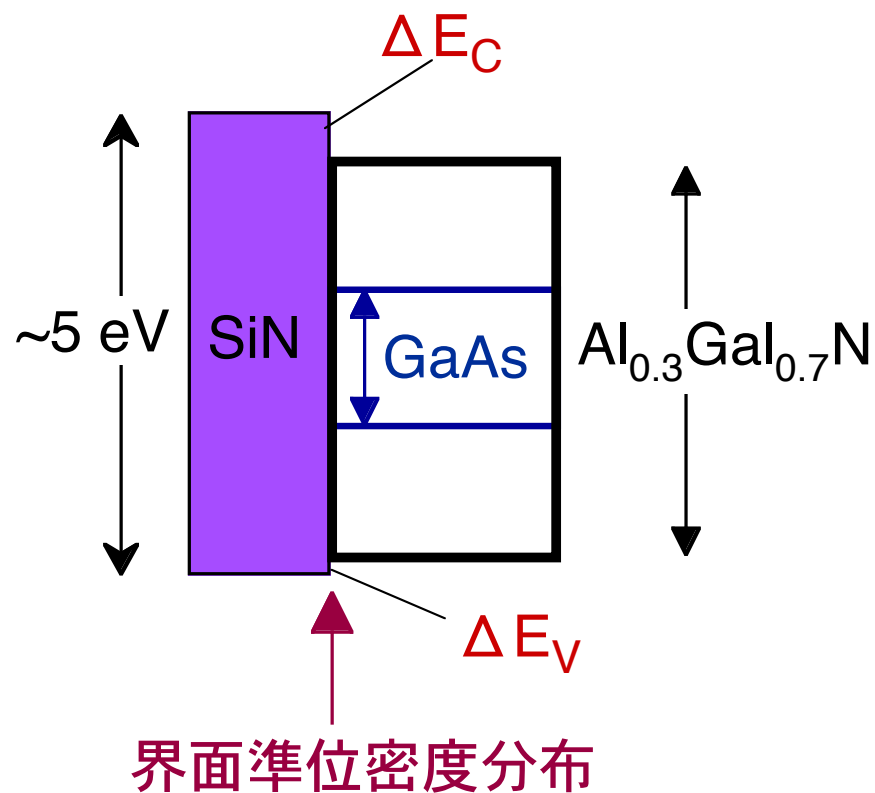


北大G

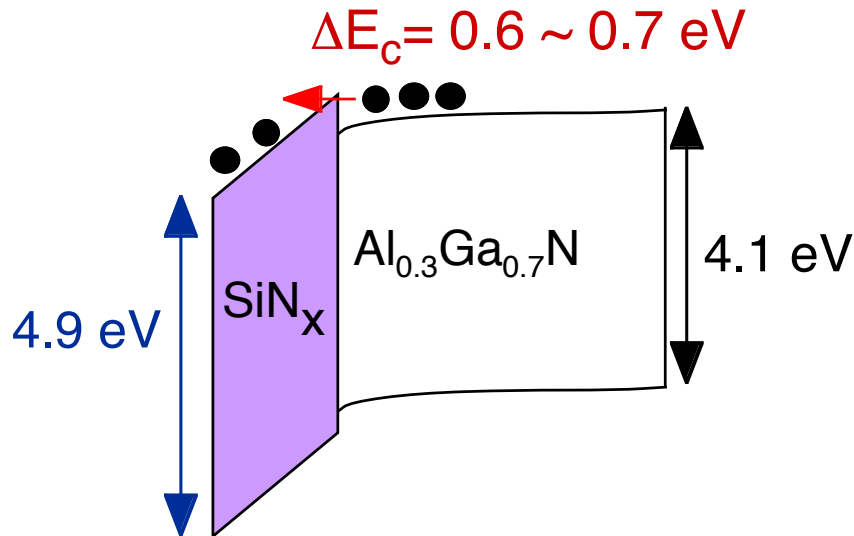
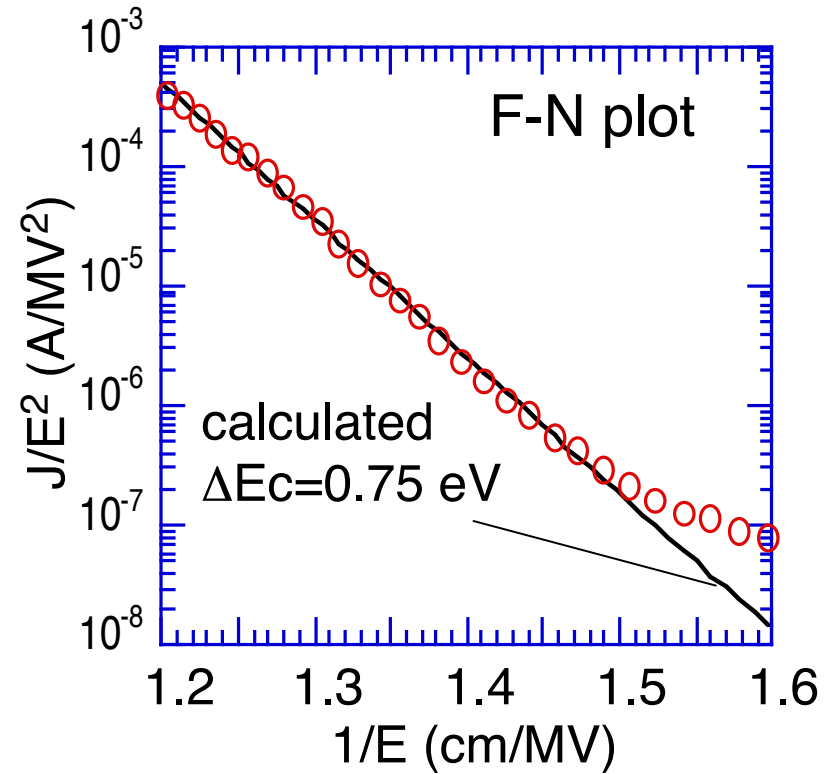
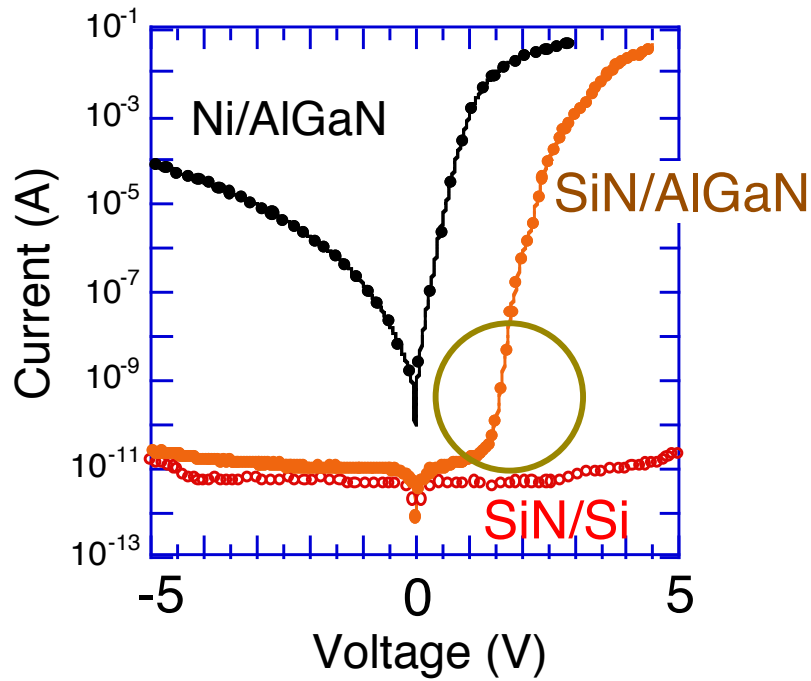
EMC (1999)、Physica E (2000)

コーネル大

EDL (2000)、RF出力特性の改善

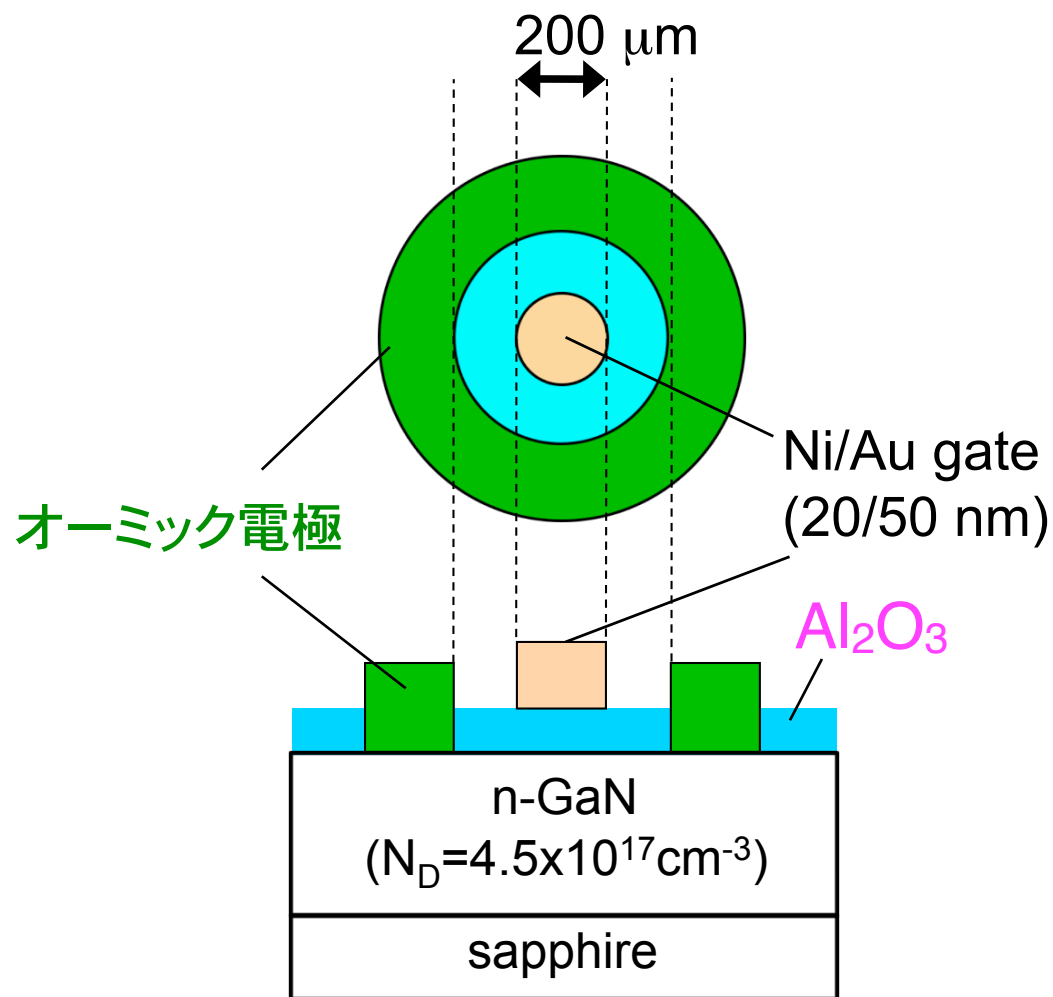


SiN_x膜のAlGaNに対するバリア効果



Fowler-Nordheim機構
による漏れ電流

Al₂O₃/n-GaN構造の作成プロセスと評価



ALDによるAl₂O₃堆積



オーミック電極

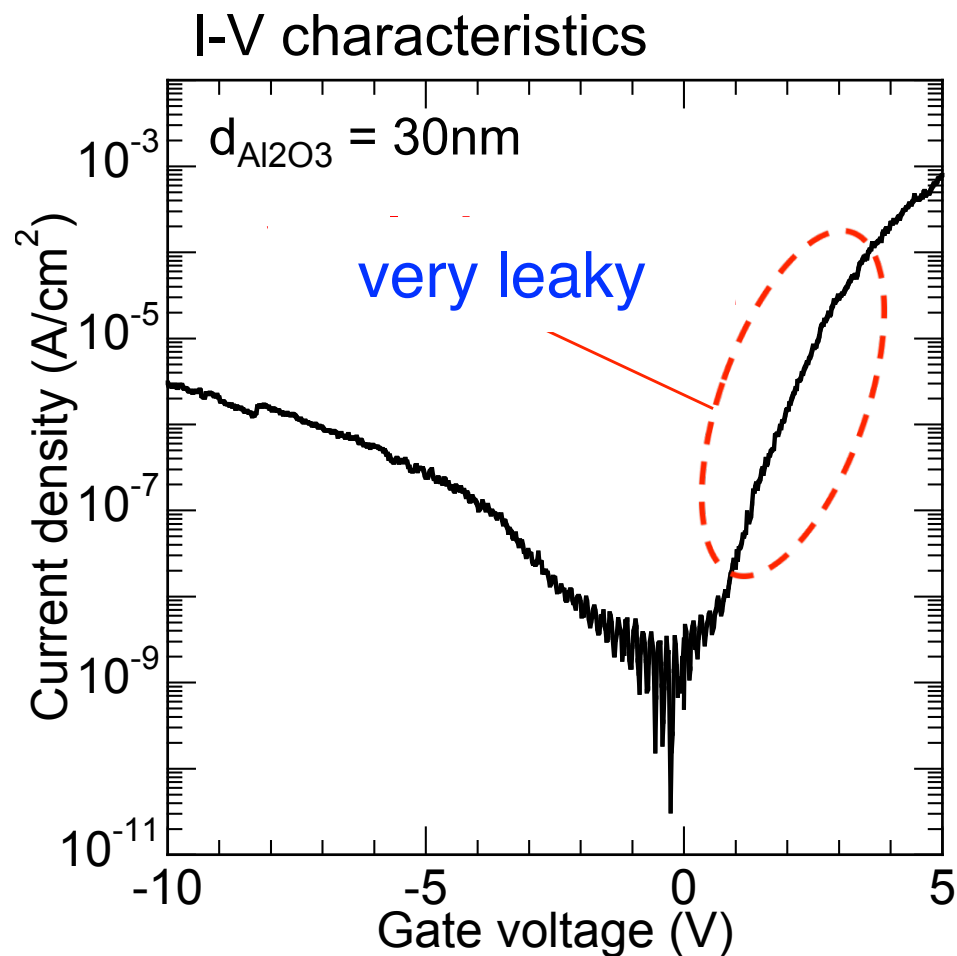
800°Cアニール



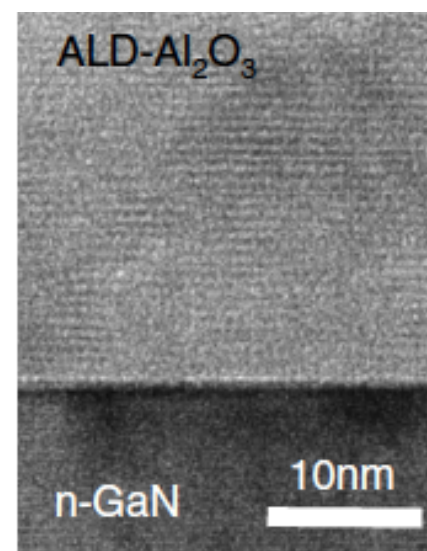
ゲート電極蒸着

高温熱処理による微結晶化

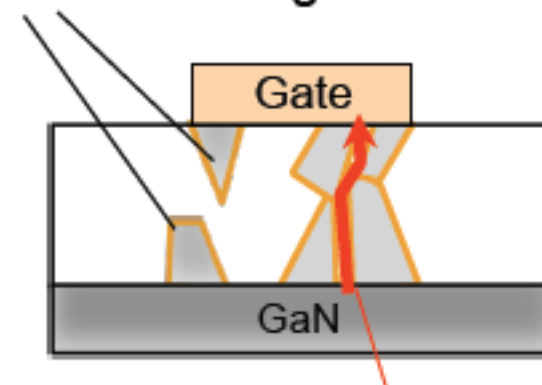
— 深刻な漏れ電流 —



800°Cアニール中に Al_2O_3 が微結晶化



(generated during 800°C anneal)



多数の粒界を通したリーク

Ohmic-firstプロセス

—アモーフラス状態の維持と漏れ電流の抑制—

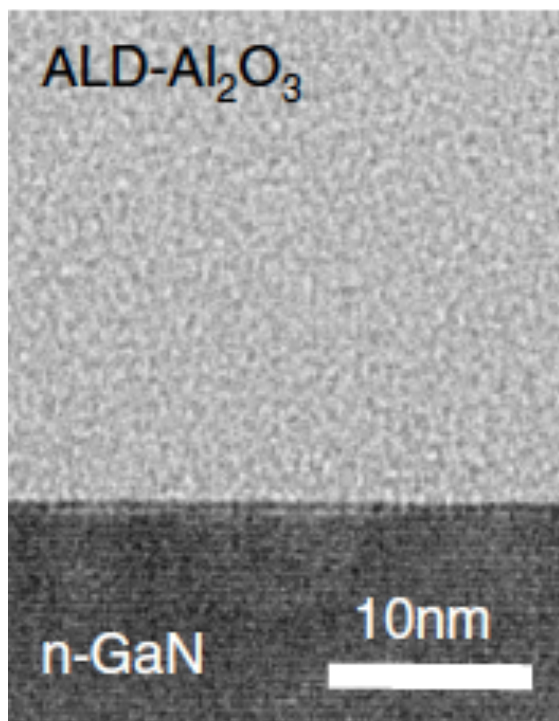
表面保護膜



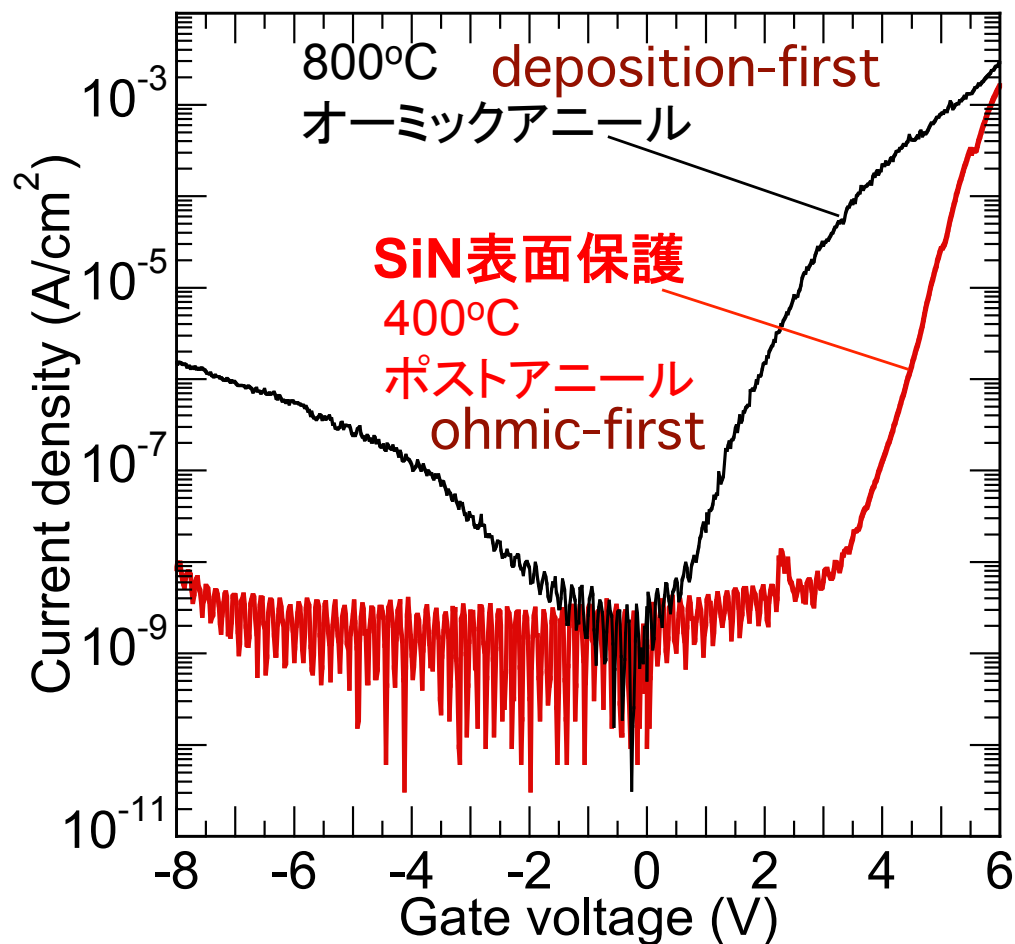
Ohmic電極 (800°Cアニール)



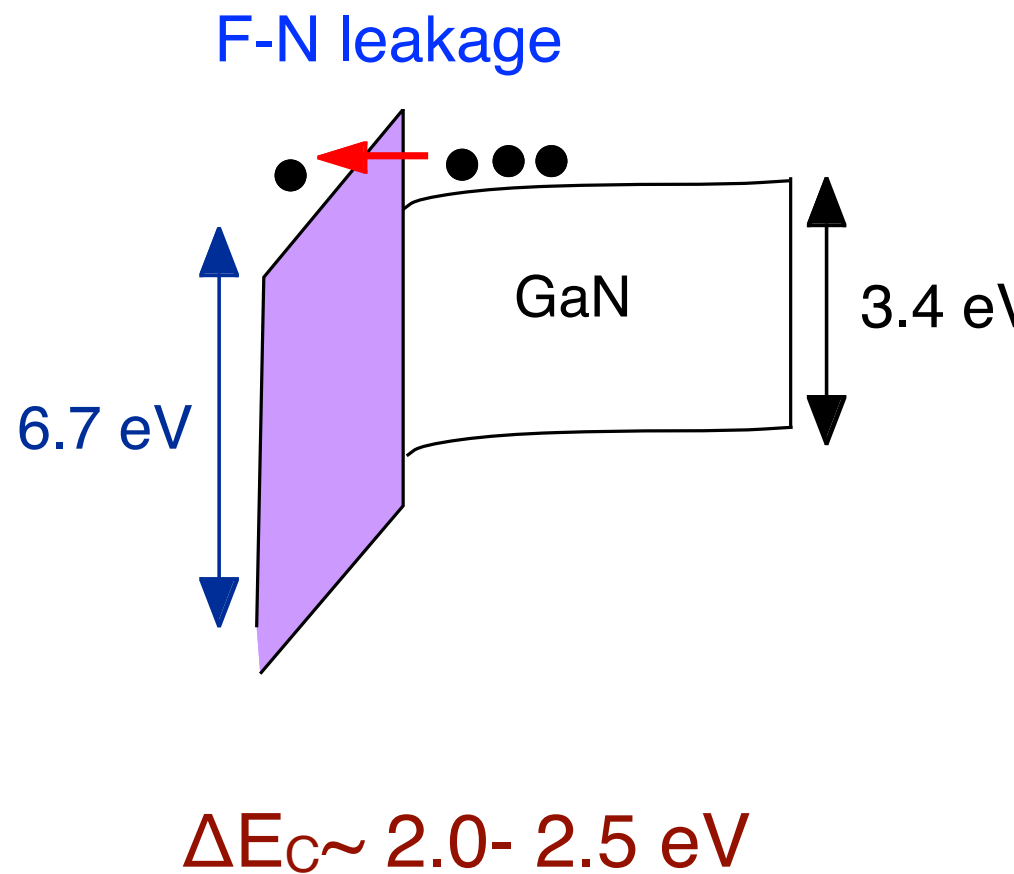
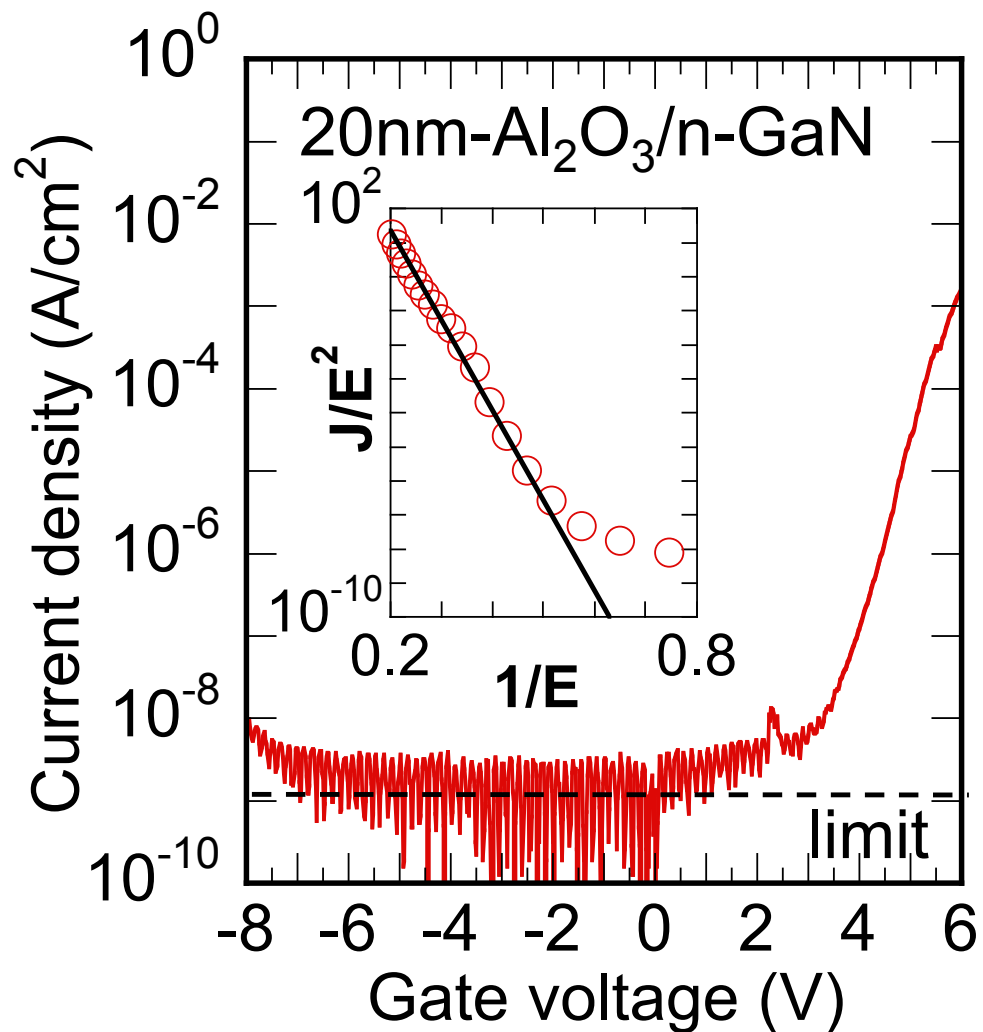
Al₂O₃膜の堆積



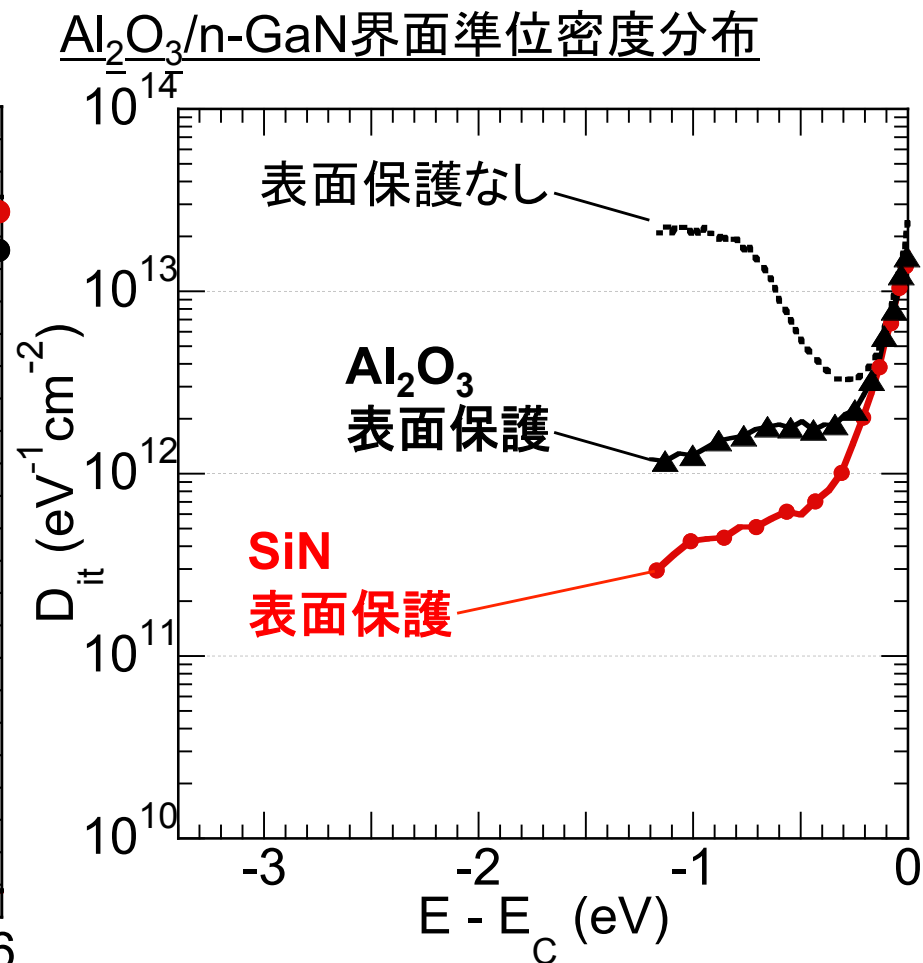
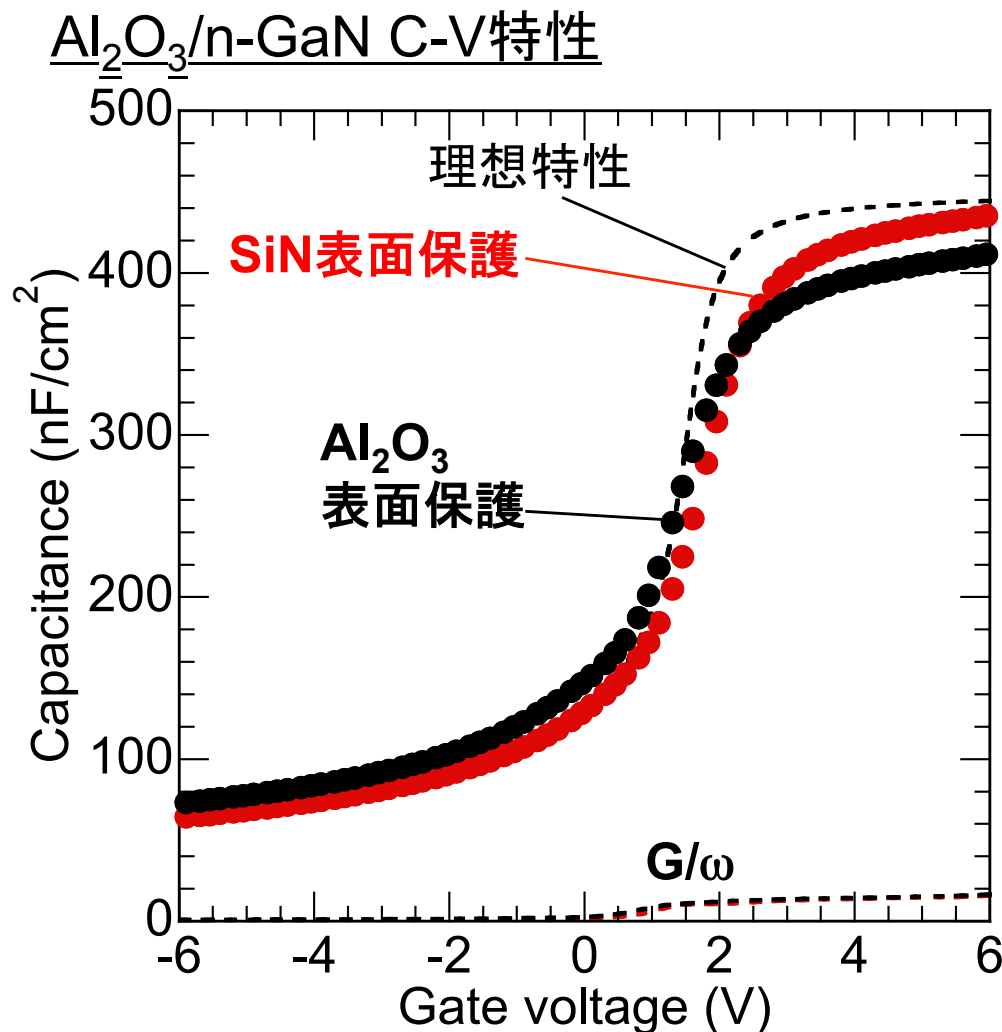
20nm-Al₂O₃/n-GaN I-V特性



F-N leakage current at forward bias



CV特性と界面準位密度分布



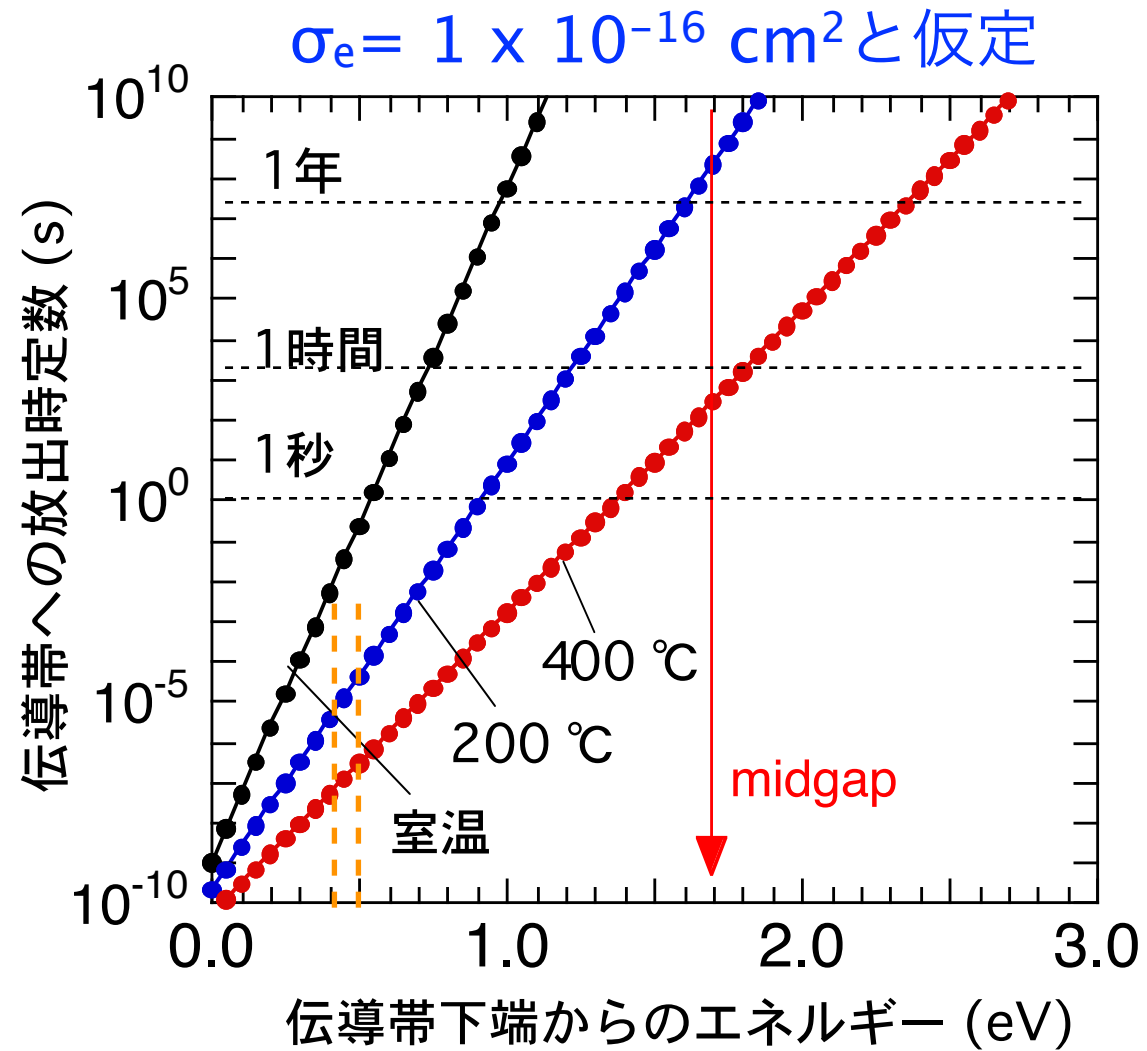
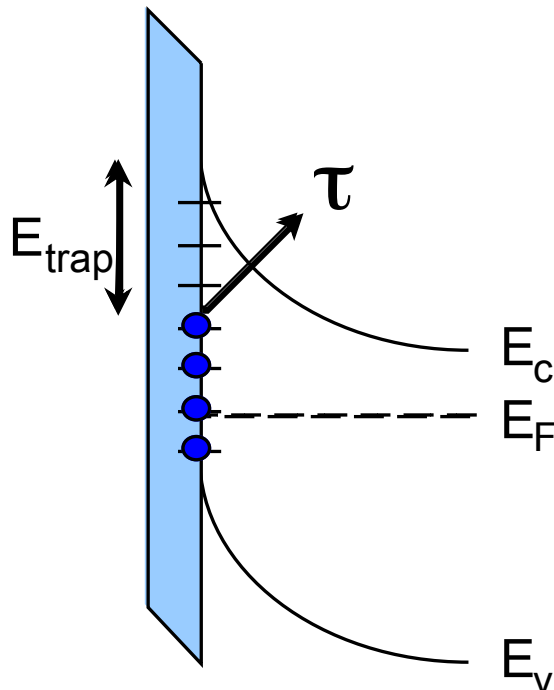
- 表面保護プロセスにより、オーミックアニール時の欠陥導入を低減
- SiN表面保護により $D_{it0} = 2 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 程度の界面準位

準位からのキャリア放出時定数

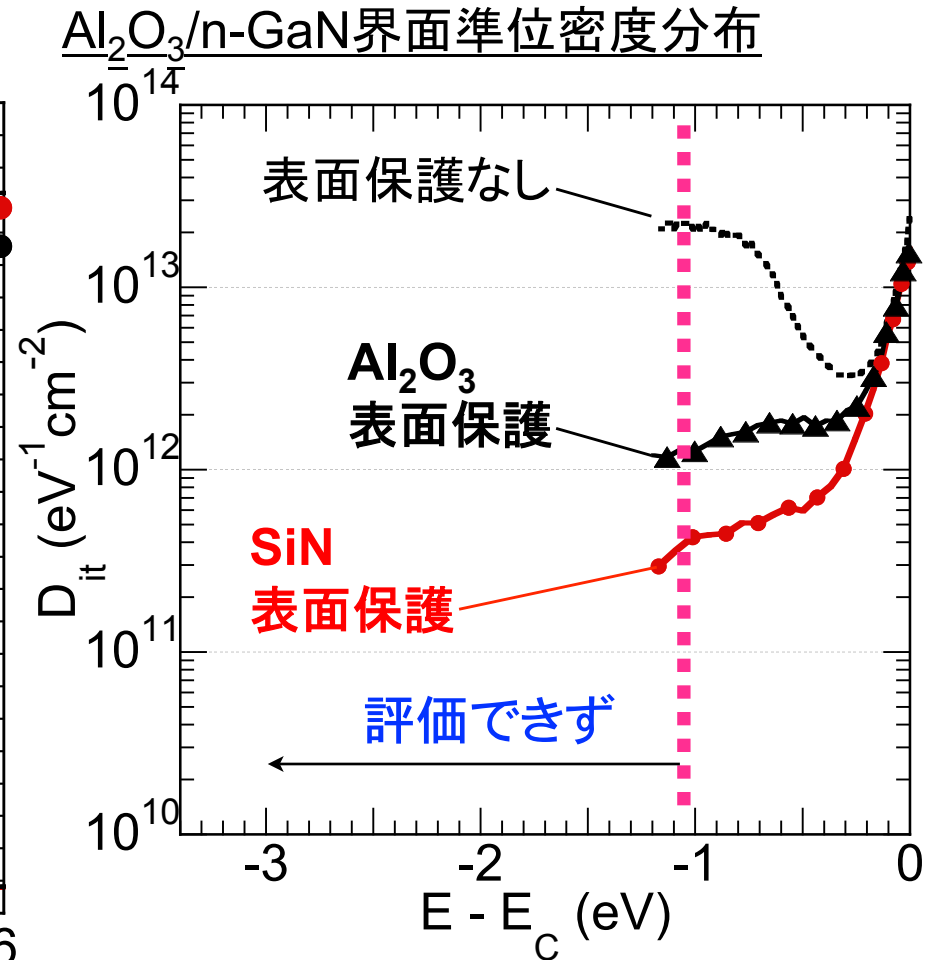
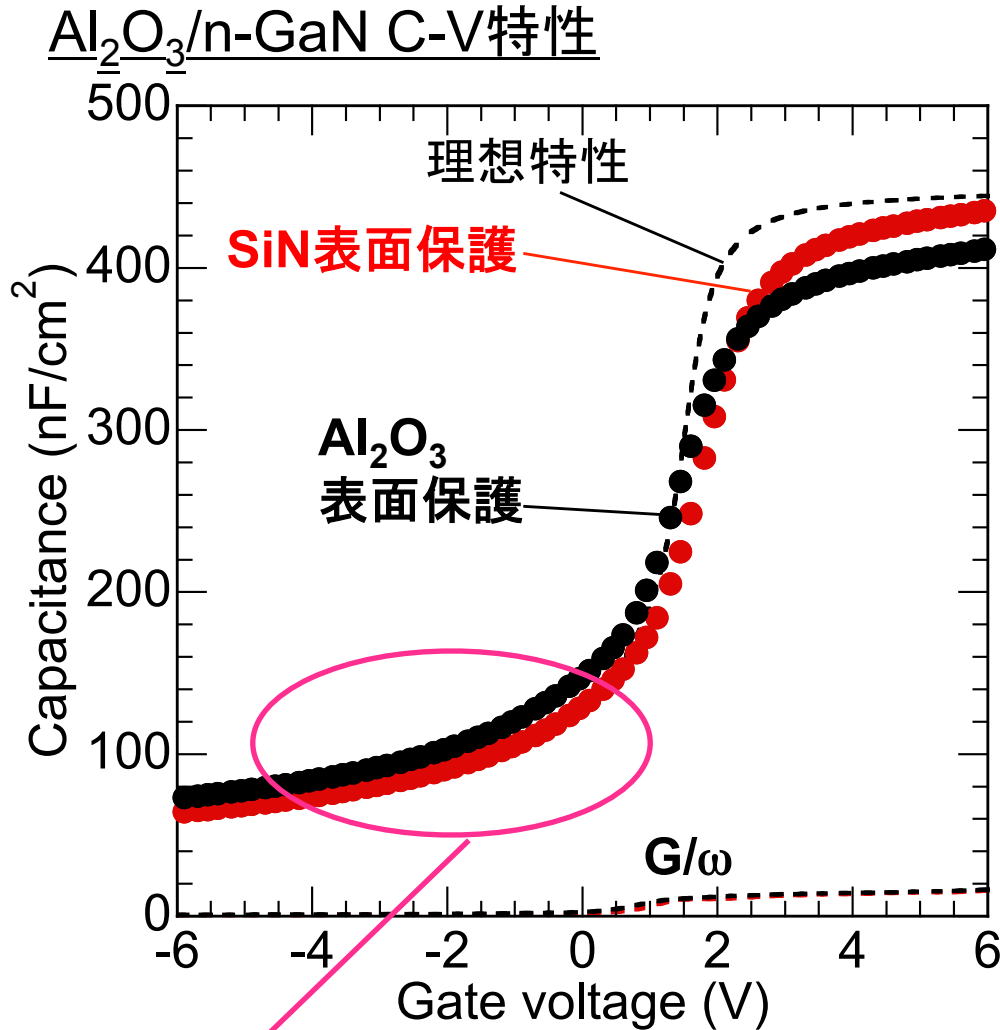
SRH統計から予想される
準位からの電子放出時定数

$$\tau_e = \frac{1}{\sigma_e v_{TH} N_C} \exp\left(\frac{E_C - E_T}{kT}\right)$$

σ : 捕獲断面積



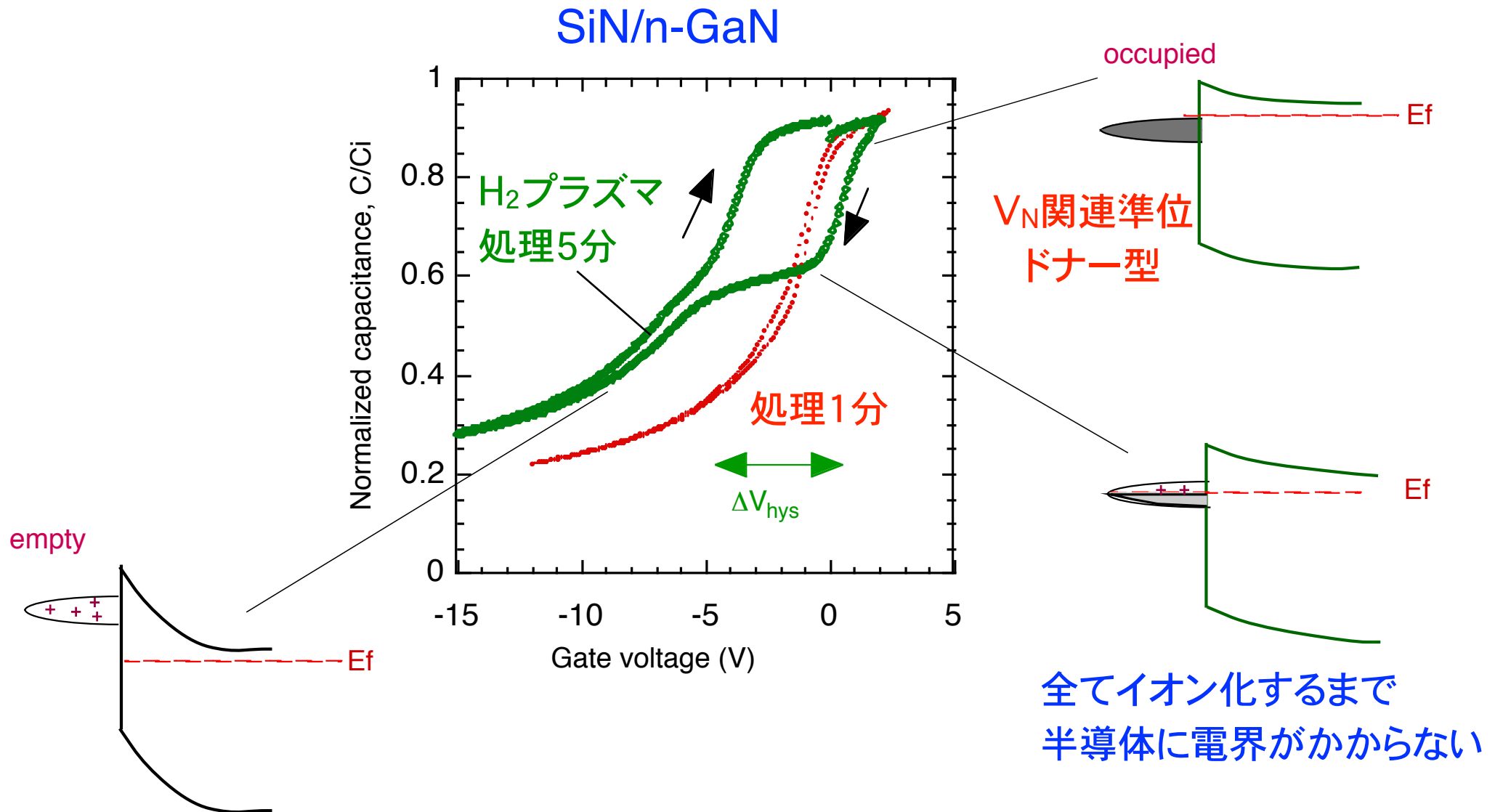
CV特性と界面準位密度分布



見かけ上計算値とほぼ一致(低い密度の報告多い)

→ エネルギーが深いため荷電状態変化せず

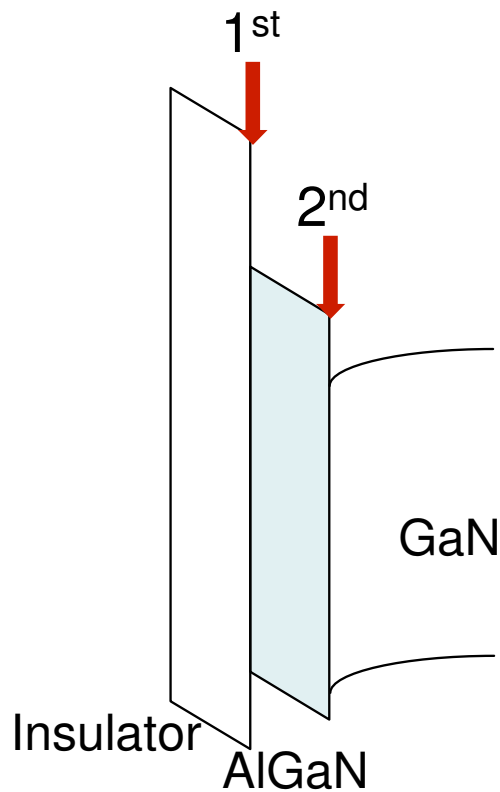
離散準位が存在する場合のC-V曲線例



AlGa_N/Ga_N HEMT MIS構造の C-V特性の解釈

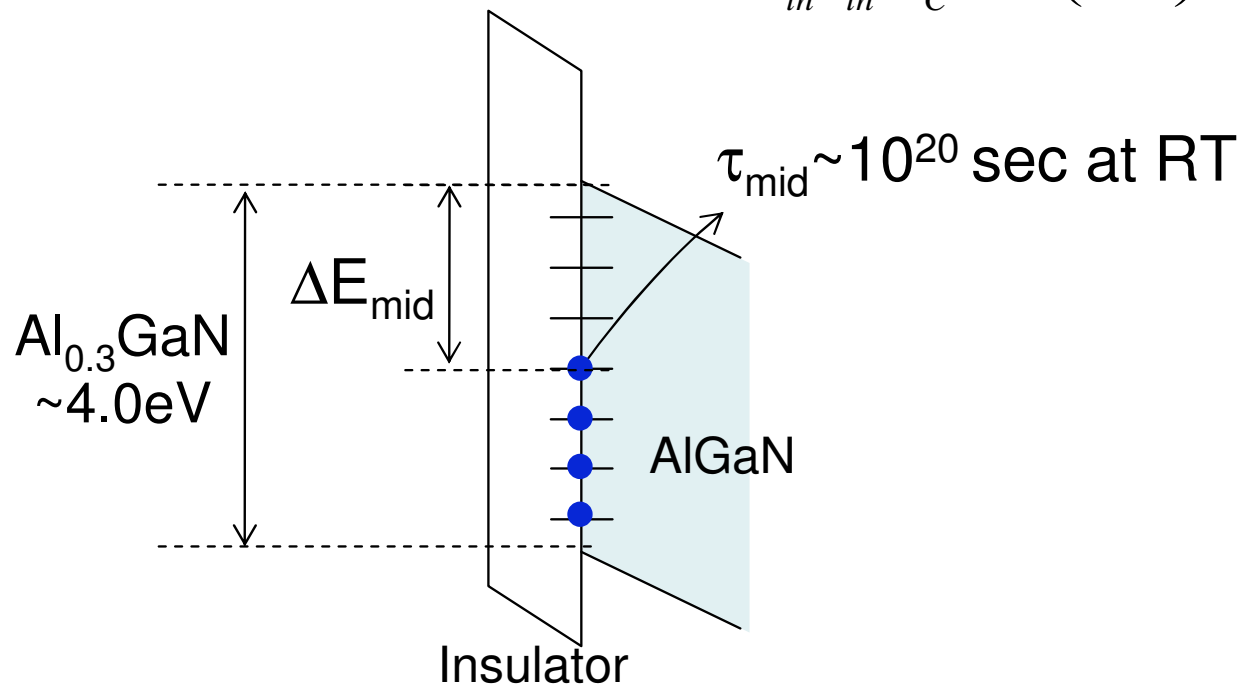
MOS HEMT構造のCV特性解釈の難しさ

- Two interfaces:



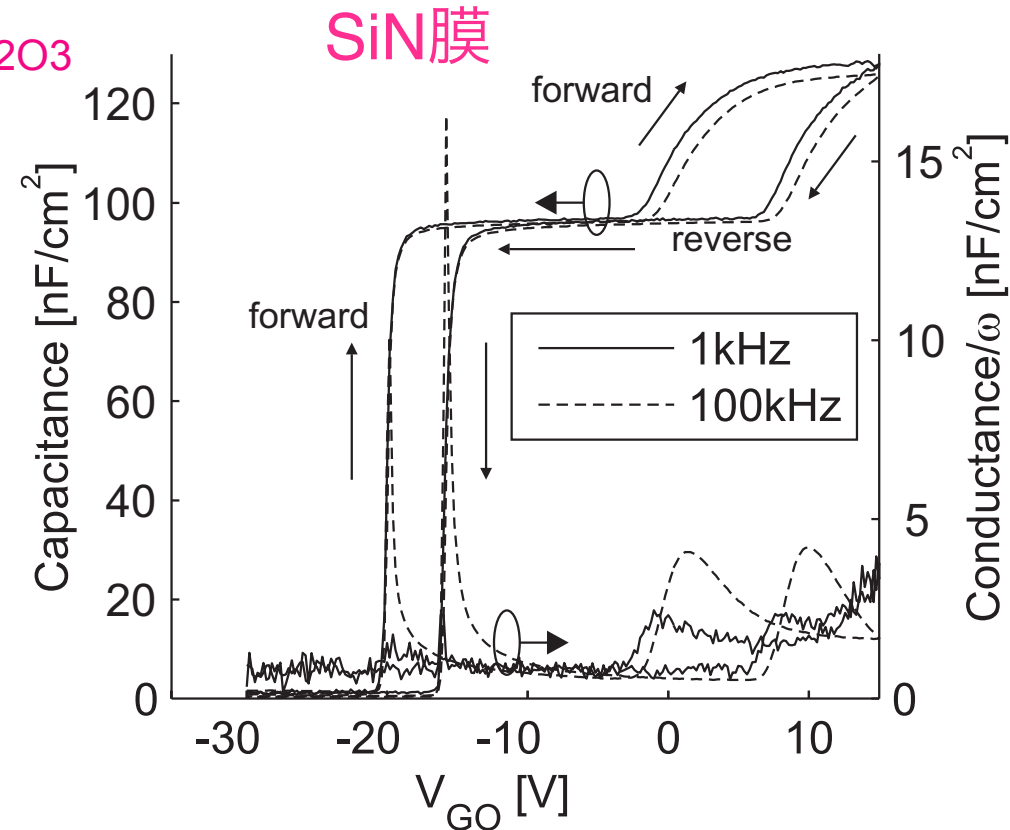
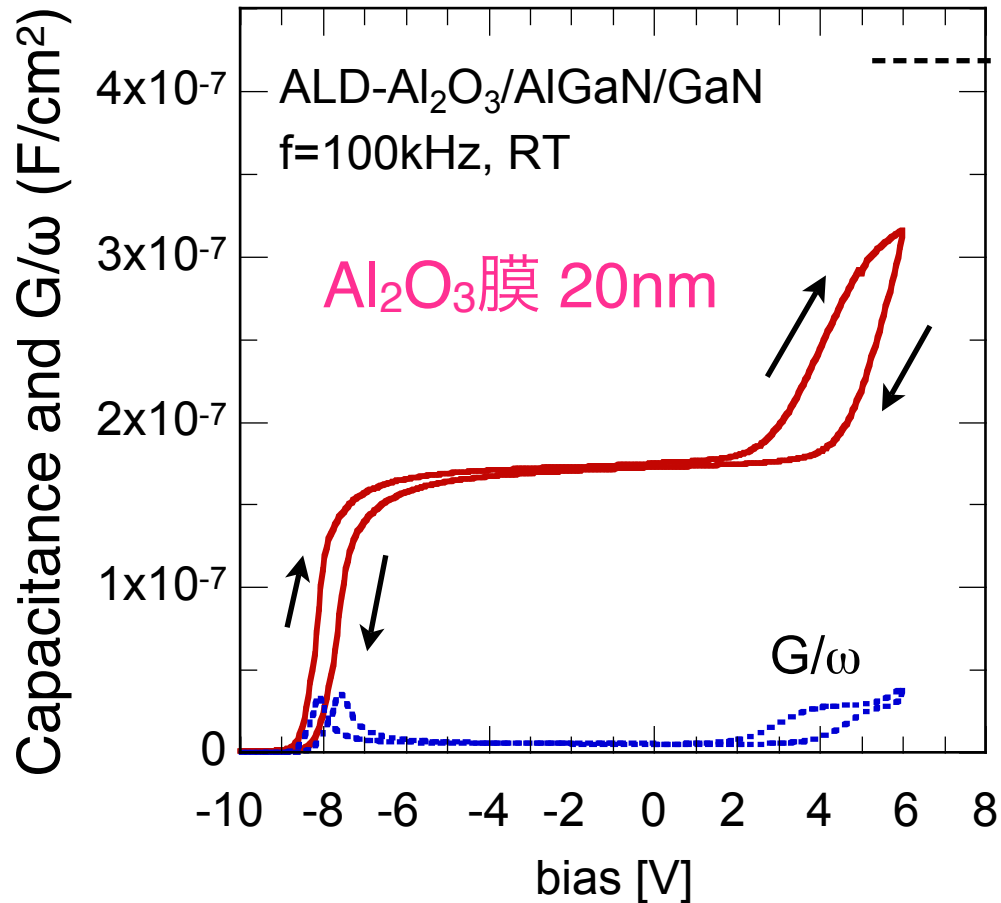
- Shockley-Read-Hall statistic

Emission time constant $\tau = \frac{1}{\sigma_{th} v_{th} N_C} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$



midgapからEvまでの界面準位の
応答時間が極めて長い

広い範囲でバイアス掃引した場合のCV特性

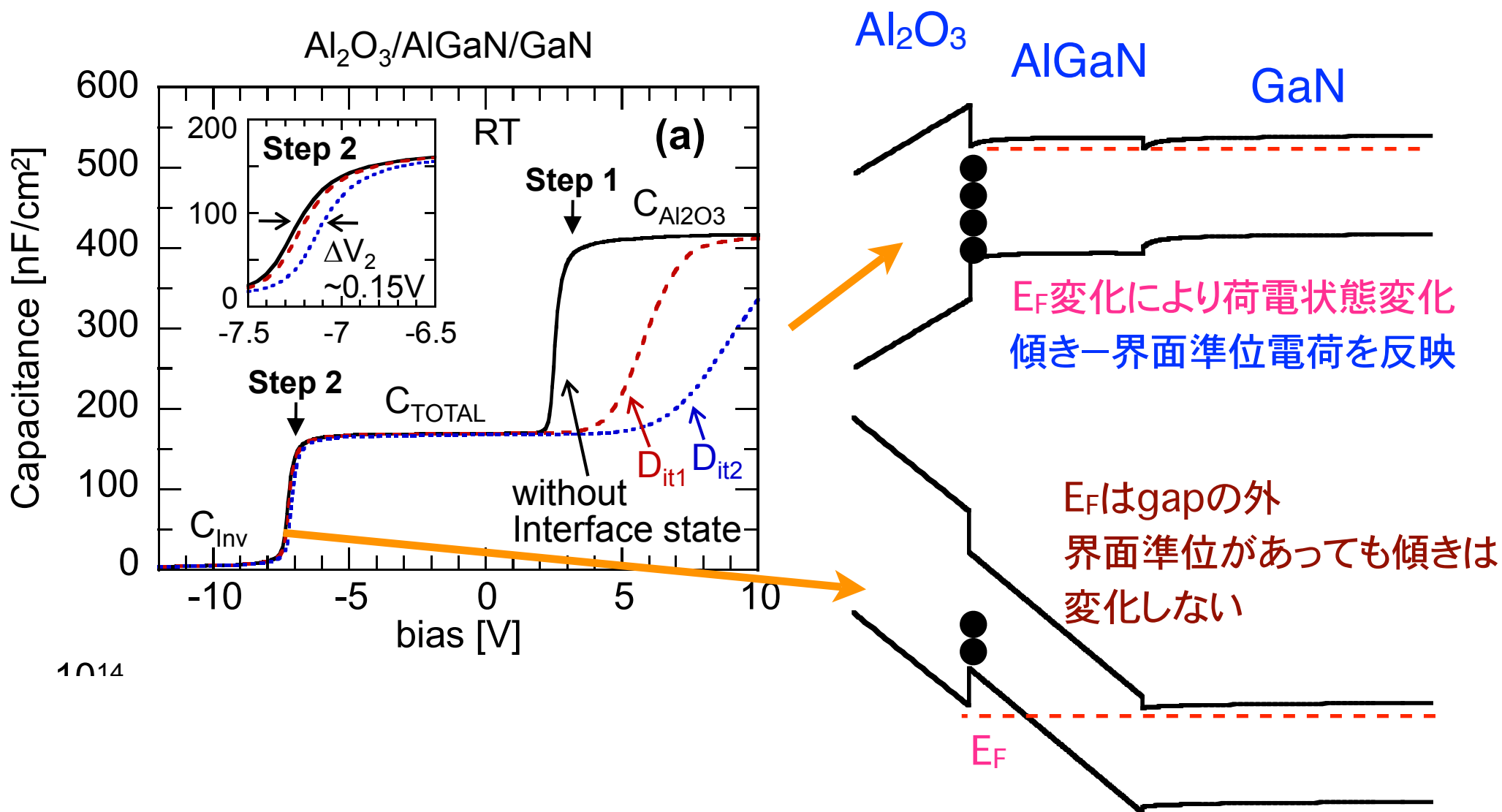


他のグループからの報告

- ・2-stepのCV曲線
- ・各stepで傾きとヒステリシスの違い

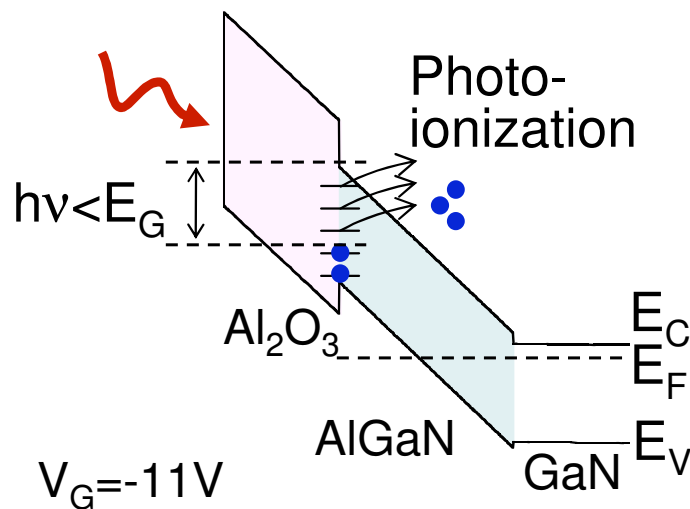
コンダクタンスのチェックが重要

HEMT MOS構造のCV特性の解釈—計算—

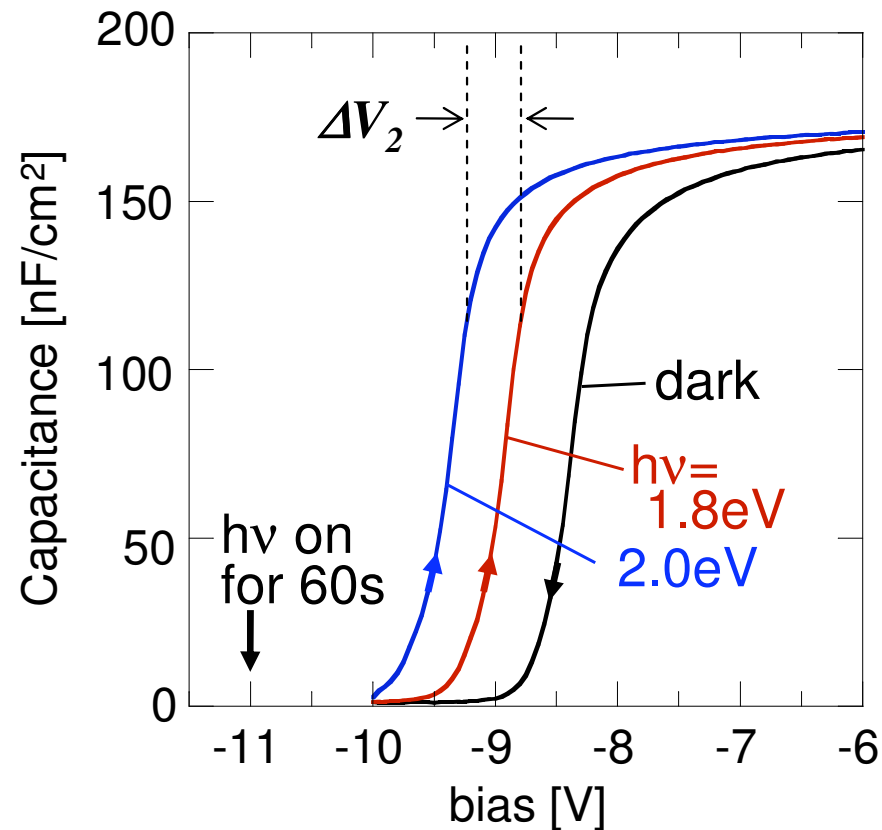
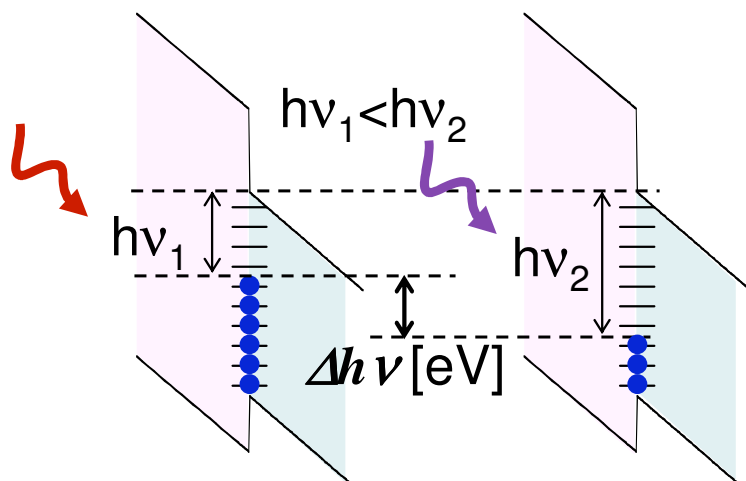


光支援CV解析法

- Photo-ionization of interface state



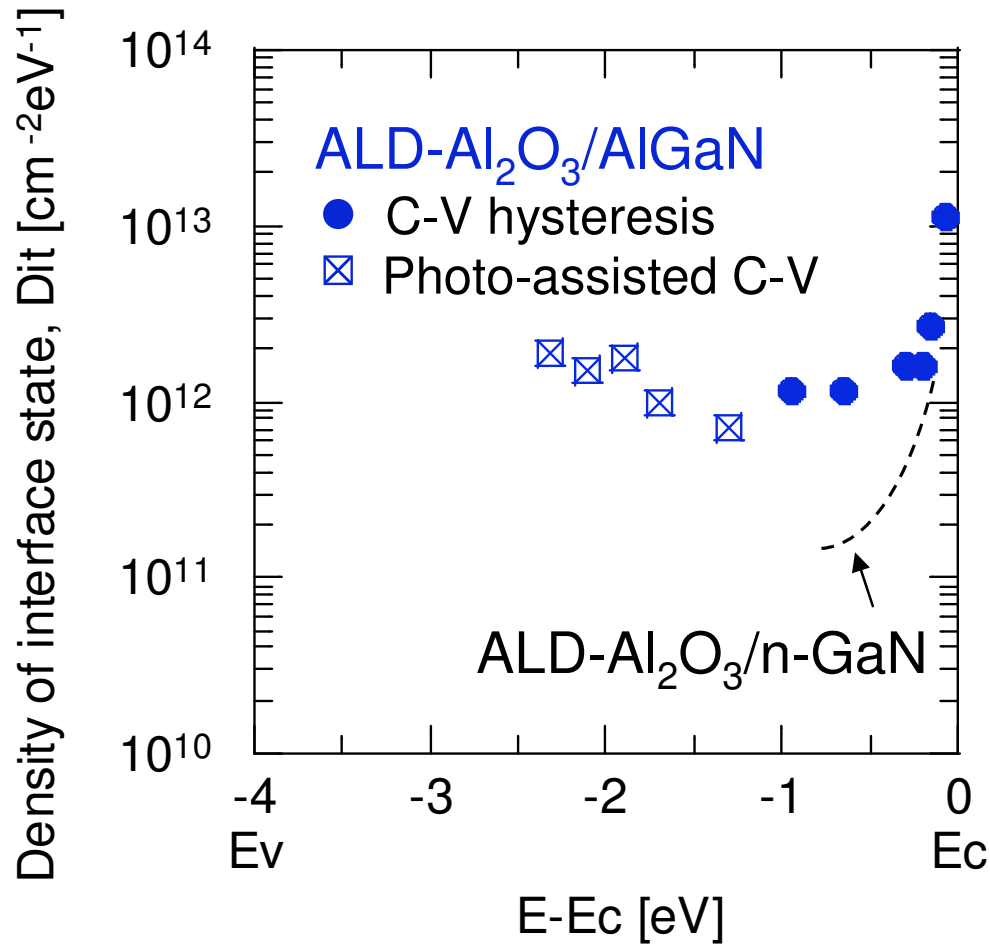
- D_{it} estimation



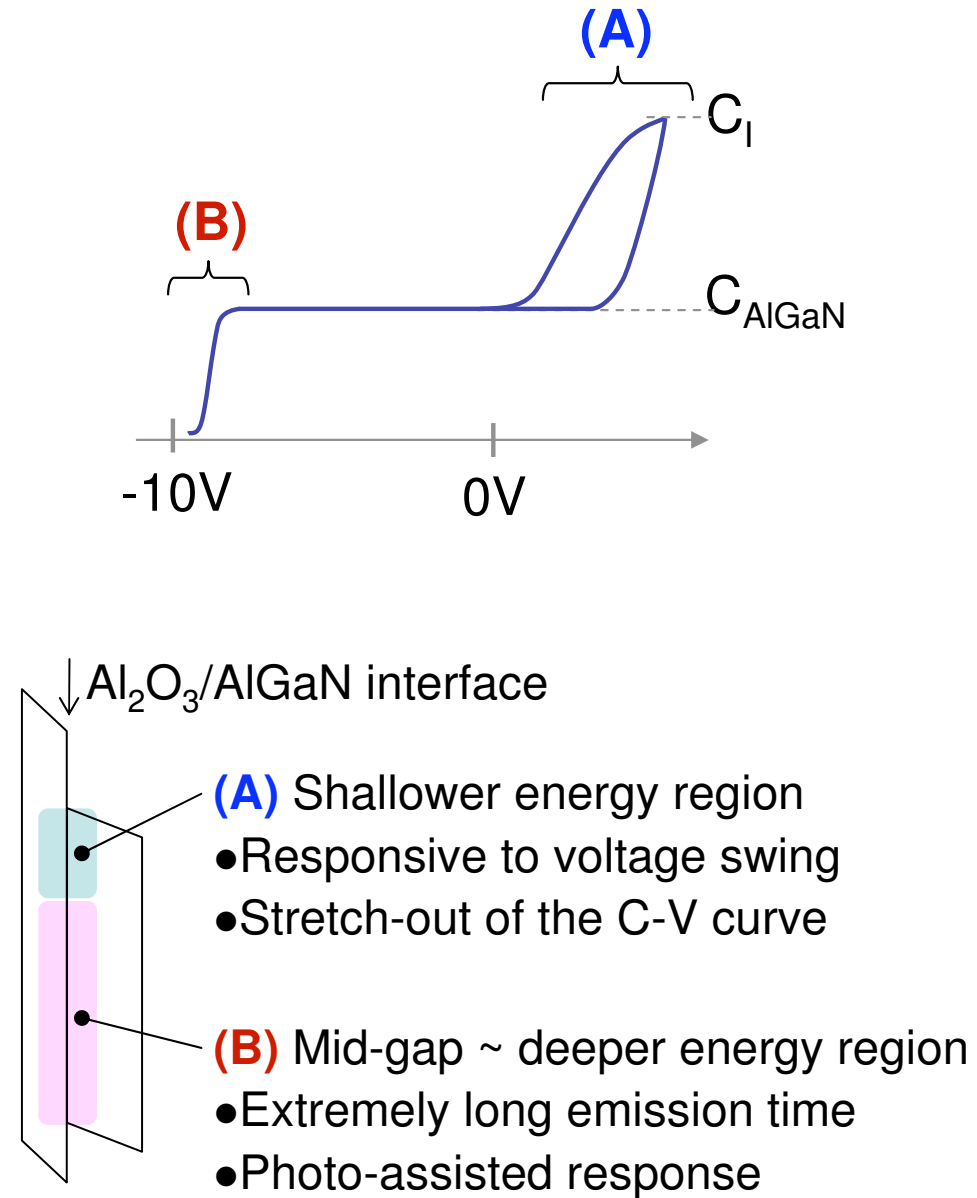
- Hysteresis : Parallel shift
→ Consistent with calculation
- Estimation of interface state $D_{it}(E)$

$$D_{it}(E) = C_{AlGaN} \cdot \Delta V_2 / (q \cdot \Delta h\nu)$$

界面準位密度分布の見積もり



MOS HEMT構造では
初めての評価例



まとめ

1) 広い禁制帯の窒化物半導体へのMIS構造

- ・絶縁膜の選択
- ・深いエネルギー位置の界面準位の評価

高温 or 光支援

2) HEMTへのMIS構造

- ・CV特性の解析に十分な注意が必要
- ・ E_G 以下の光支援CV法が有力な評価法

3) ドライエッチ面へのMIS構造

- ・界面準位密度は高くなるが、表面処理やアニールで制御可能

E.H. Nicollian & J.R. Brews
MOS Physics and Technology
Wiley, 2003