

デバイスシミュレーションの実際

Advance/DESSERT 事例紹介を含めて



平成23年6月17日

アドバンスソフト株式会社

デバイスシミュレーションの実際

はじめに

1. 非平衡電子輸送論の基礎

ボルツマン方程式とモンテカルロ法によるアプローチ

2. 輸送係数

3. 半導体中の生成・再結合過程

4. 量子効果について

5. 最近の話題から(事例紹介)

まとめ



輸送問題に対する第1原理式

Boltzmann equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll}$$

Current conservation

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = -q(G - R)$$

Momentum conservation

$$\frac{\partial}{\partial t} (m \mathbf{v}_d) + \mathbf{v}_d \cdot \nabla (m \mathbf{v}_d) + \frac{1}{n} \nabla (n k_B T) - \mathbf{F} = - \frac{m \mathbf{v}_d}{\tau_m(\omega)}$$

Energy conservation

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \mathbf{v}_d \cdot \nabla w + \frac{1}{n} \nabla (n \mathbf{v}_d k_B T - \kappa \nabla T) + q \mathbf{v}_d \cdot \mathbf{E} = - \frac{w - w_0}{\tau_w(\omega)}$$

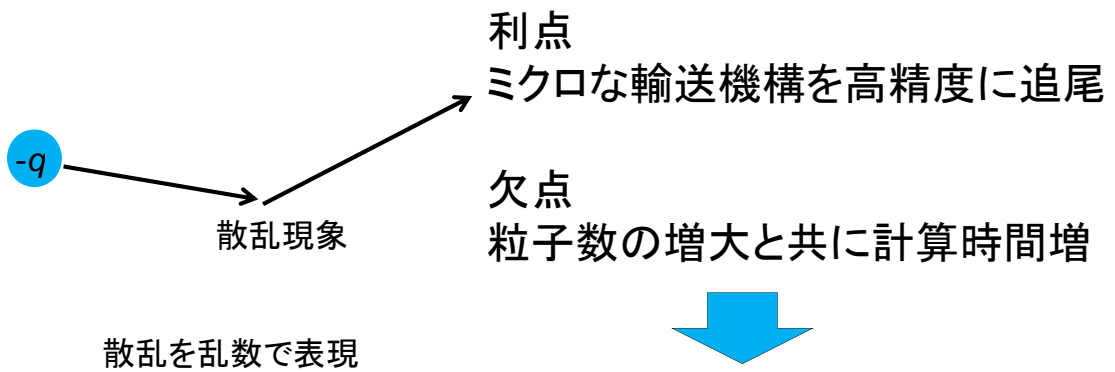
電流連続の式

<<非局所性モデル>>
電子速度は電界だけでなく
エネルギー(w)に依存

モンテカルロ法

電子1個1個を荷電粒子と見做し、ニュートン方程式を解く

$$\frac{dp}{dt} = F \quad \text{外力} F \text{は電場}$$



MCと流体モデルの組合せ

5

輸送問題に対する実用的アプローチ

Monte Carlo modeling

$$\frac{dp}{dt} = F$$

散乱、緩和レートの導出

Boltzmann equation

Momentum conservation

$$\frac{\partial}{\partial t}(mv_d) + v_d \nabla (mv_d) + \frac{1}{n} \nabla (nk_B T) - F = -\frac{mv_d}{\tau_m(w)}$$

Energy conservation

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v_d \nabla w + \frac{1}{n} \nabla (nv_d k_B T - \kappa \nabla T) + qv_d E = -\frac{w - w_0}{\tau_w(w)}$$

6

デバイスシミュレーションの実際

はじめに

1. 非平衡電子輸送論の基礎
ボルツマン方程式とモンテカルロ法によるアプローチ
 2. 輸送係数
 3. 半導体中の生成・再結合過程
 4. 量子効果について
 5. 最近の話題から(事例紹介)
- まとめ



7

移動度モデルの理論的考察

Thonber's scaling role[*] based on the Boltzmann equation

$$\frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t; \mathbf{F}(\mathbf{r}', t'))}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t; \mathbf{F}(\mathbf{r}', t'))}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t; \mathbf{F}(\mathbf{r}', t'))}{\partial \mathbf{p}}$$
$$= \sum_{p'} [R(\mathbf{p}, \mathbf{p}') f(\mathbf{r}, \mathbf{p}', t; \mathbf{F}(\mathbf{r}', t')) - R(\mathbf{p}', \mathbf{p}) f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t; \mathbf{F}(\mathbf{r}', t'))]$$

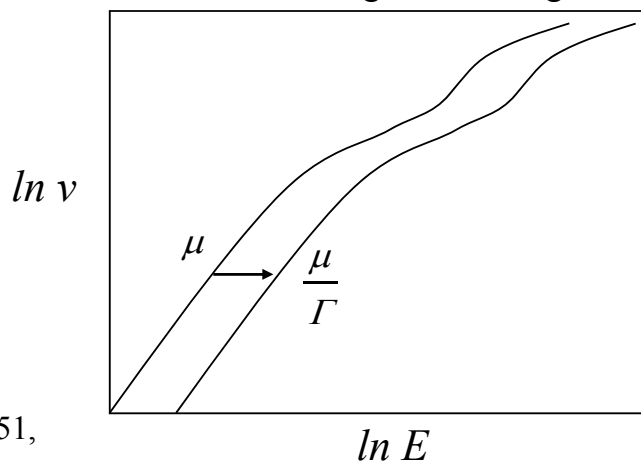
1) 定数倍スケーリング

$$r_{\Gamma} = \frac{r}{\Gamma}, \quad t_{\Gamma} = \frac{t}{\Gamma}$$

$$v_{\Gamma}(\mathbf{E}) = v(\mathbf{E} / \Gamma)$$

$$\mu_{\Gamma} = \frac{\mu}{\Gamma}$$

Scattering-role scaling



[*] K. K. Thornber, J. Appl. phys., vol. 51, no. 4, pp. 2127-2136, Apr. 1980

8

2) 運動量スケーリング

$$\frac{\partial f_A(Ar, Ap, t; F_A(r', t'))}{\partial t} + v(p) \frac{\partial f_A(Ar, Ap, t; F_A(r', t'))}{\partial r} + A^{-1} F_A(Ar, t) \frac{\partial f_A(Ar, Ap, t; F_A(r', t'))}{\partial p}$$

$$= \sum_{p'} [R(p, p') f_A(Ar, Ap', t; F_A(r', t')) - R(p', p) f_A(Ar, Ap, t; F_A(r', t'))]$$

$$\left. \begin{aligned} v_A(\mathbf{E}) &= Av(A^{-1}\mathbf{E}) \\ \mu_A &= A\mu A^{-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} v_\gamma &= \mathcal{W}(\mathbf{E} / \gamma) \\ \mu_\gamma &= \mu \end{aligned} \right.$$

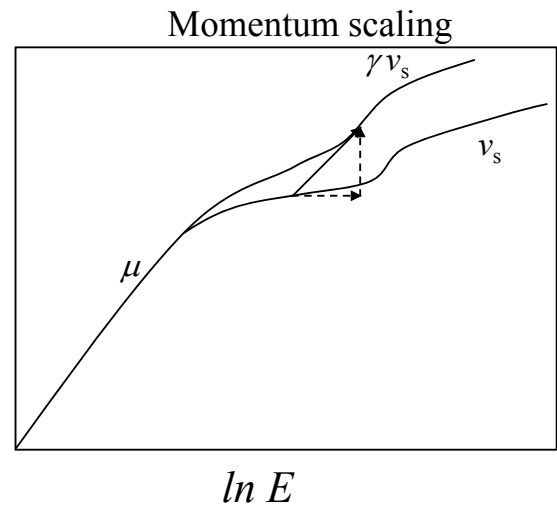
3) 混在スケーリング

$$v_{\Gamma A}(\mathbf{E}) = Av(A^{-1}\mathbf{E} / \Gamma)$$

$$\mu_{\Gamma A} = A\mu A^{-1}$$

$$v_{s\Gamma A}(\bar{\mathbf{E}}) = Av_s(\overline{A^{-1}\mathbf{E}})$$

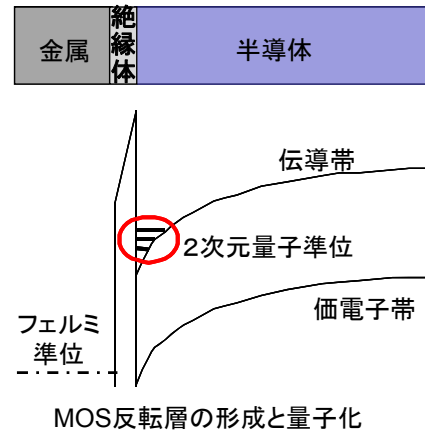
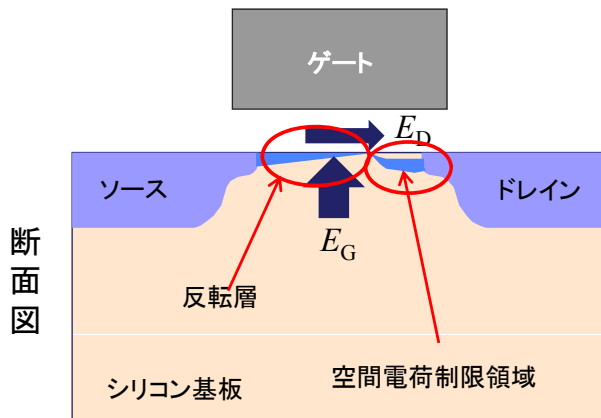
$\ln v$



[*] K. K. Thornber, J. Appl. phys., vol. 51, no. 4, pp. 2127-2136, Apr. 1980

9

MOSFET解析、局所モデル



古典的局所モデル

$$v = \mu(N_{\text{IMP}}, E_G) E_D \times f(\mu(N_{\text{IMP}}, E_G) E_D)$$

$$v = \mu(N, E_G) E_D \left[1 + \left(\frac{\mu(N, E_G) E_D}{v_c} \right)^2 \left(\frac{\mu(N, E_G) E_D}{v_c} + G \right)^{-1} + \left(\frac{\mu(N, E_G) E_D}{v_s} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

10

非局所性移動度モデル

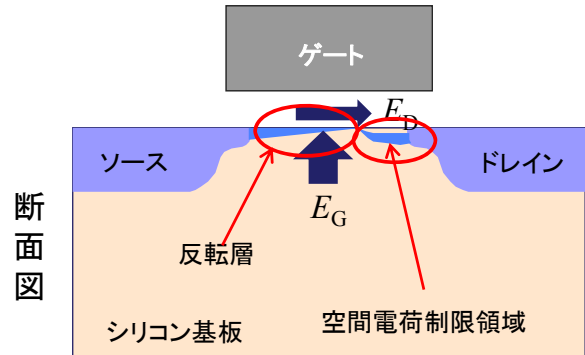
バルクモデル

$$\mathbf{v}_n = -\mu_n(w, N_I)\mathbf{E} - \frac{D_n(w, N_I)}{n} \nabla n - \mu_n(w, N_I) \nabla \left(\frac{k_B T_e}{q} \right)$$

MOS反転層モデル

$$E_{//} = (\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) / |\mathbf{J}|$$

$$E_{\perp} = |\mathbf{E} \times \mathbf{J}| / |\mathbf{J}|$$



$$\mathbf{v}_n = -\mu_n(w, E_{\perp}, N_I)\mathbf{E}_{//} - \frac{D_n(w, E_{\perp}, N_I)}{n} \nabla n - \mu_n(w, E_{\perp}, N_I) \nabla \left(\frac{k_B T_e}{q} \right)$$

拡張された移動度

デバイスシミュレーションの実際

はじめに

1. 非平衡電子輸送論の基礎
ボルツマン方程式とモンテカルロ法によるアプローチ
 2. 輸送係数
 3. 半導体中の生成・再結合過程
 4. 量子効果について
 5. 最近の話題から(事例紹介)
- まとめ



13

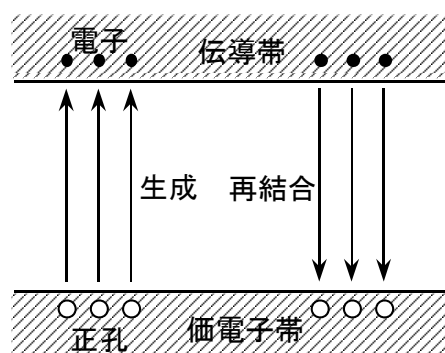
The generation/recombination rate is given by

$$R = R_{sp} + R_{SRH} + R_{Aug}$$

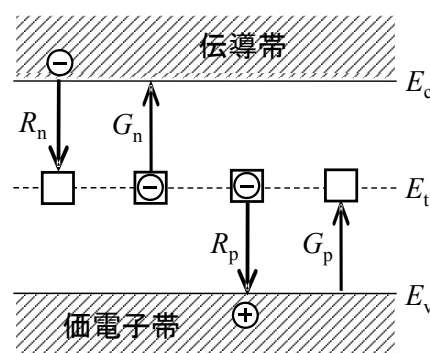
R_{sp} : 直接遷移型再結合率

R_{SRH} : 間接遷移型再結合率

R_{Aug} : オージェ型再結合率



直接再結合過程



電子 電子 正孔 正孔
捕獲 放出 捕獲 放出

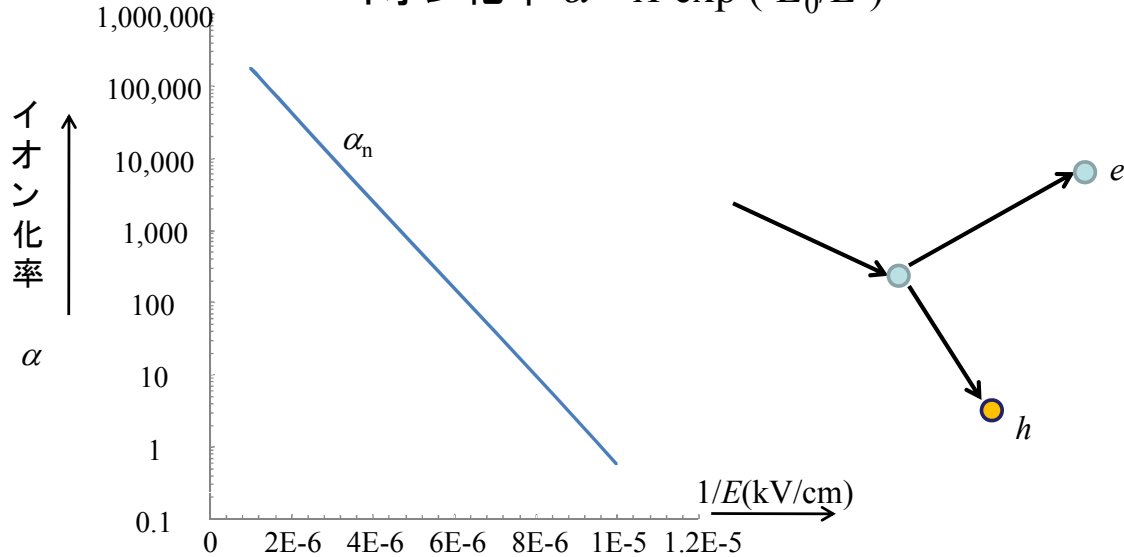
間接型再結合過程

生成過程例: 雪崩増倍機構

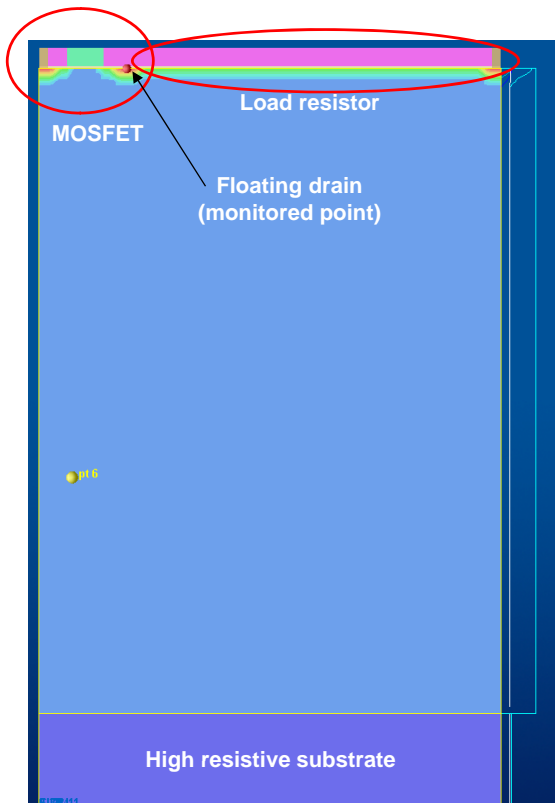
Avalanche multiplication model

$$G = \alpha_n n v_n + \alpha_p p v_p$$

$$\text{イオン化率 } \alpha = A \exp(-E_0/E)$$

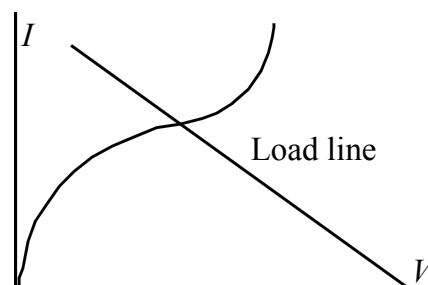
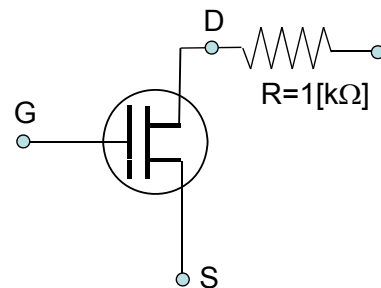


雪崩増倍モデルの応用

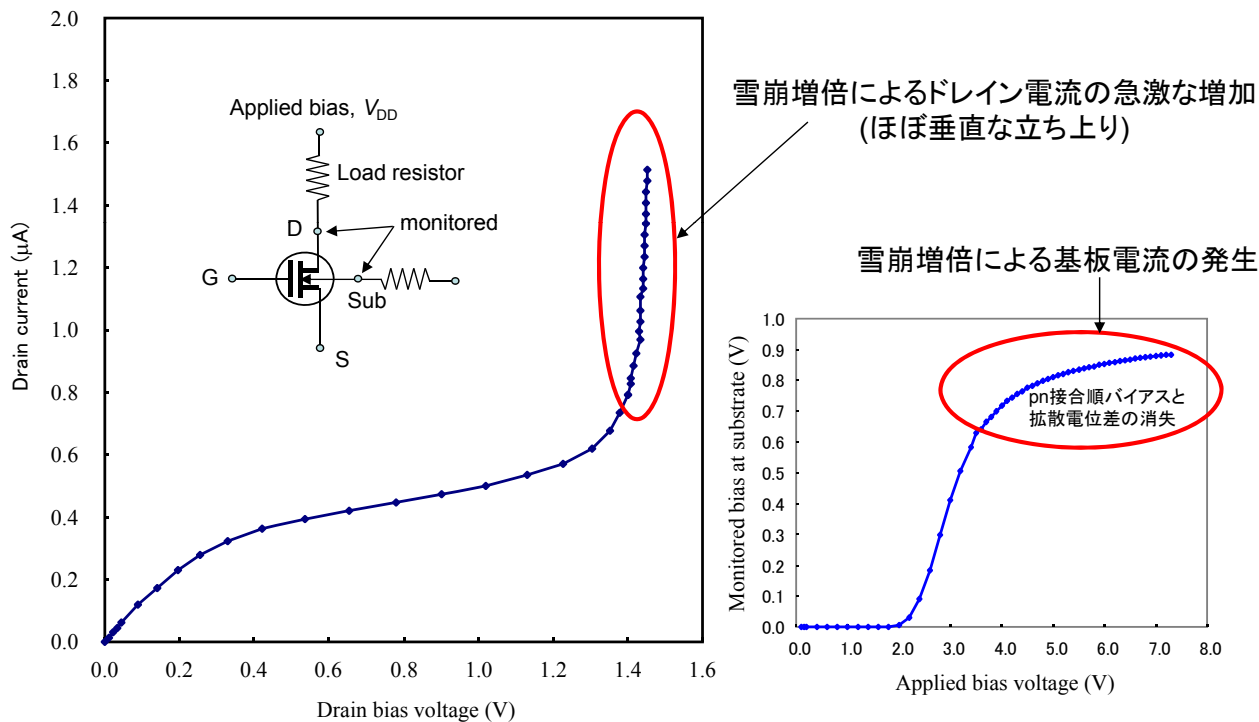


負荷抵抗付きMOSFETデバイス構造

ドレイン電極に負荷抵抗をつけて
 端末電圧の上昇を抑える。

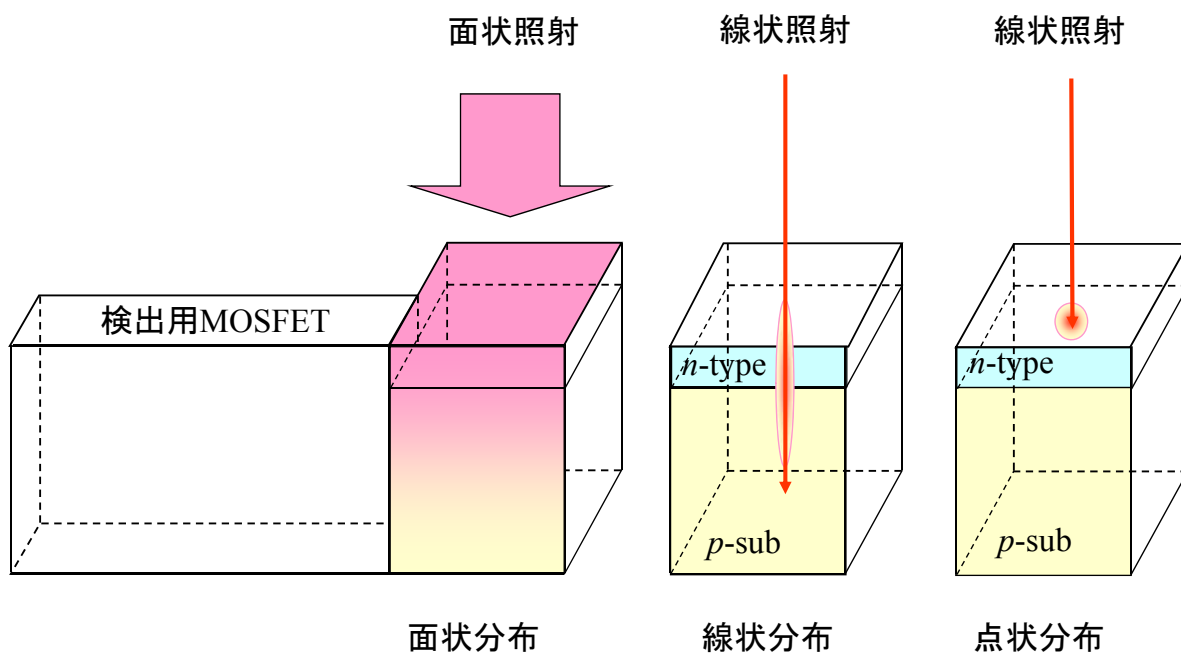


雪崩増倍モデルの応用



17

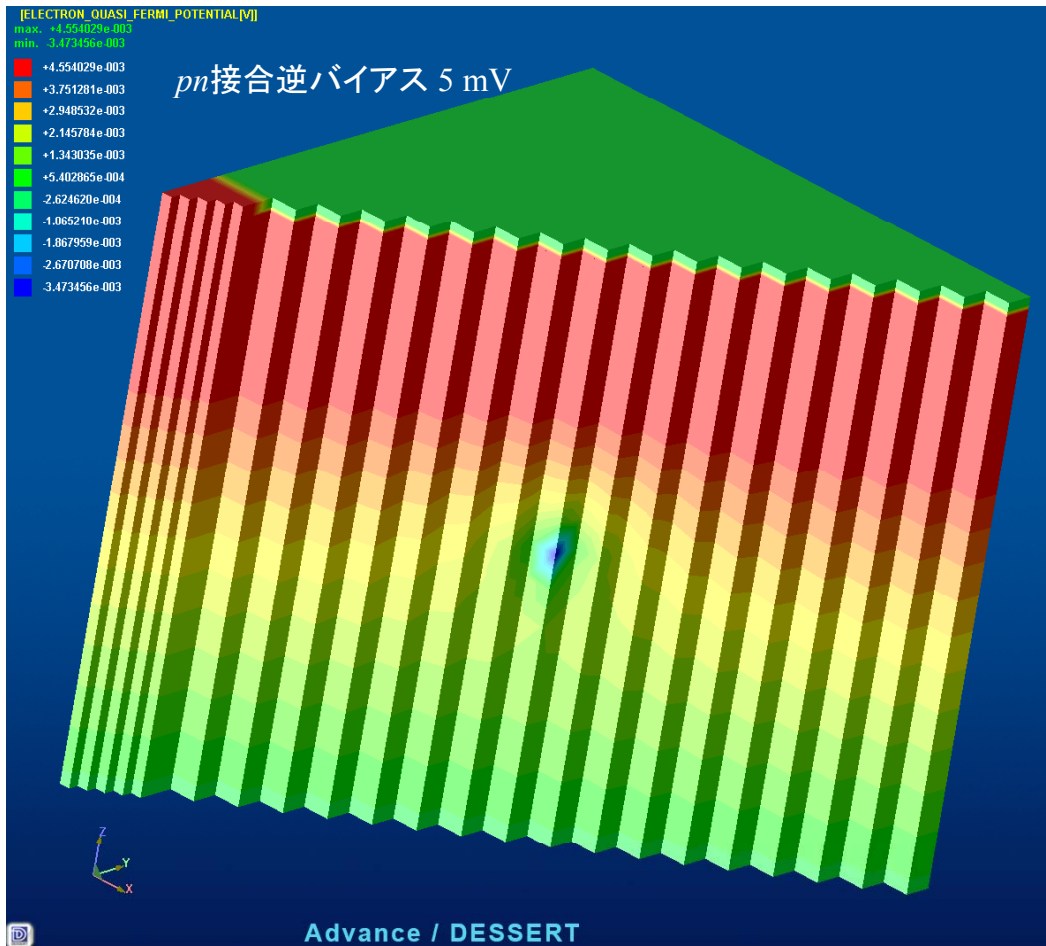
受光によるキャリア生成、高エネルギー線照射によるキャリア生成等



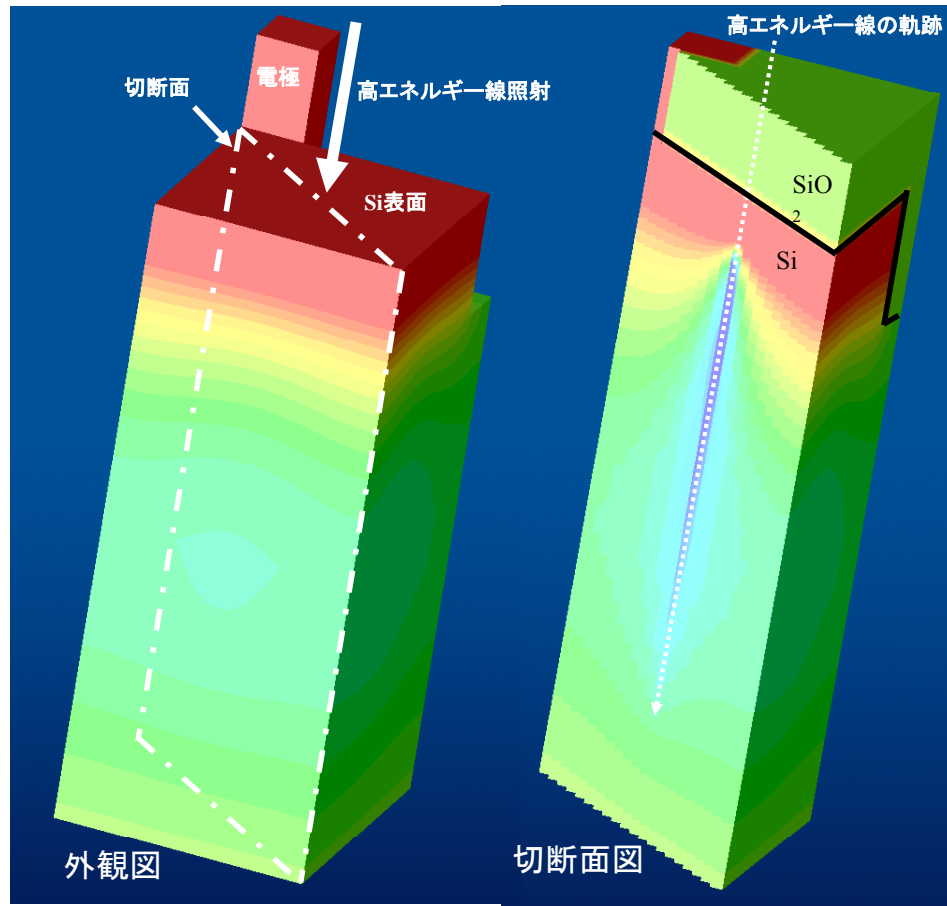
np接合に発生した電子・正孔対の空間分布モデル

18

生成キャリアの点状分布例



生成キャリアの線状分布例



デバイスシミュレーションの実際

はじめに

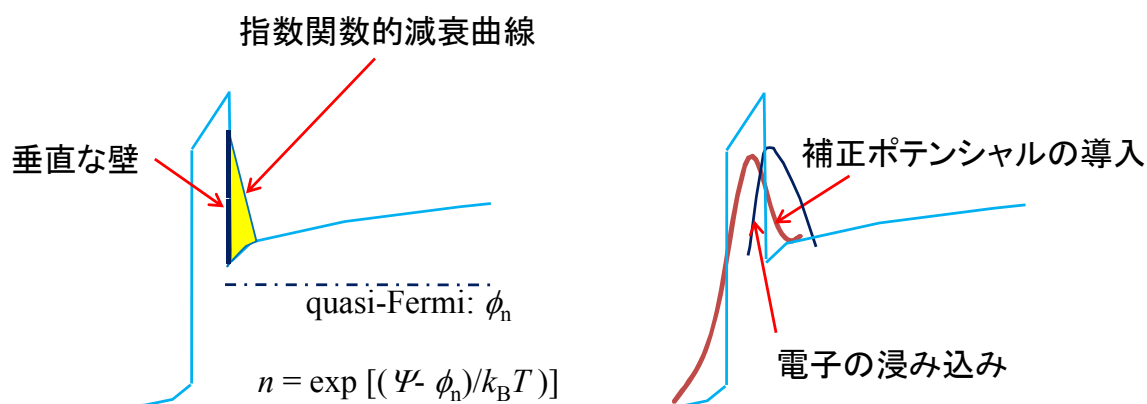
1. 非平衡電子輸送論の基礎
ボルツマン方程式とモンテカルロ法によるアプローチ
 2. 輸送係数
 3. 半導体中の生成・再結合過程
 4. 量子効果について
 5. 最近の話題から(事例紹介)
- まとめ



21

流体モデルにおけるトンネルモデル

極薄ゲート酸化膜の量子効果補正

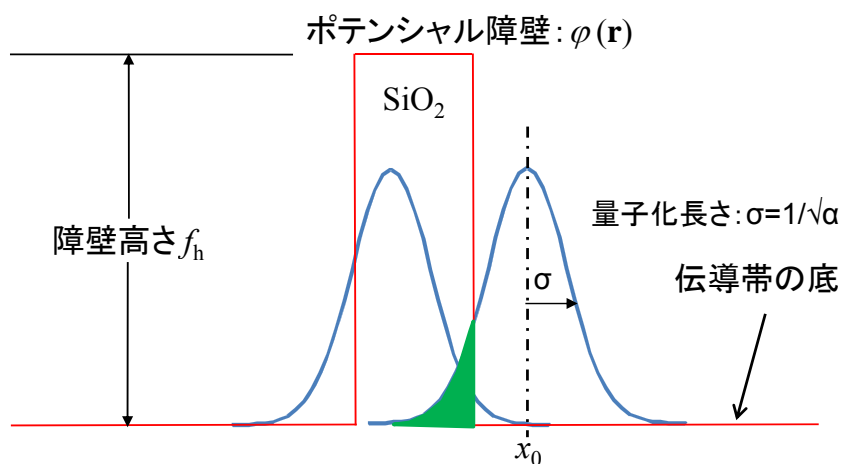


R. P. Feynman and A. R. Hibbs, "Quantum Mechanics and Path Integrals", McGraw Hill, 1965

22

量子効果補正のモデル化

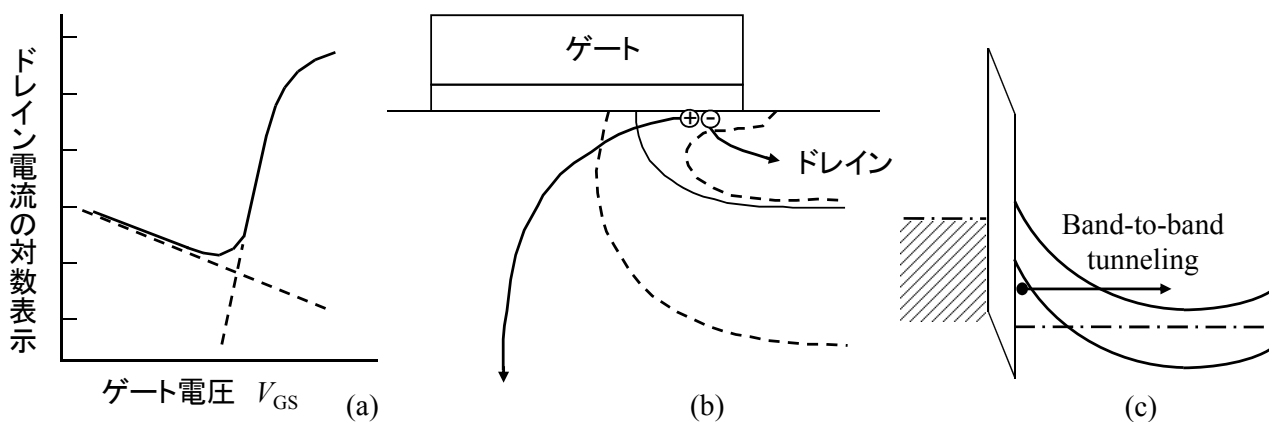
$$\tilde{\varphi}(r_0) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{d}{2}} \int \varphi(\mathbf{r}) e^{-\alpha(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)^2} d\mathbf{r}$$



Feynmanによる実効ポテンシャル

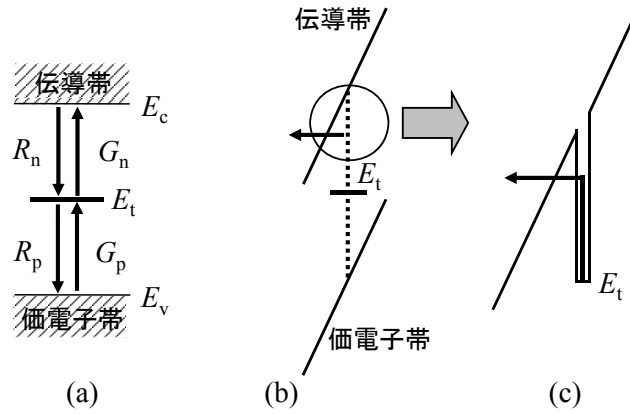
23

Band-to-band tunneling Gate-induced drain leakage (GIDL)



Band-to-band tunneling によるGate-induced drain leakage の概念図
(a) 電流－電圧特性 (b) MOSFETの構造とリーク電流の発生 (c) バンド構造図

Trap-assisted tunneling model



間接型再結合過程におけるトンネル効果
 (a) 零電界 (b) 強電界中のトンネル効果 (c) 拡大図

ライフタイム組込モデル

$$R_{trap} = \frac{np - n_1 p_1}{\frac{\tau_p}{1 + \Gamma_p} (n + n_1) + \frac{\tau_n}{1 + \Gamma_n} (p + p_1)} \quad \Gamma = 2\sqrt{3\pi} \times \frac{E}{B} \times \exp\left[\left(\frac{E}{B}\right)^2\right]$$

非平衡電子輸送論 ー 半導体デバイスシミュレーションー アドバンスソフト出版事業部 25

デバイスシミュレーションの実際

はじめに

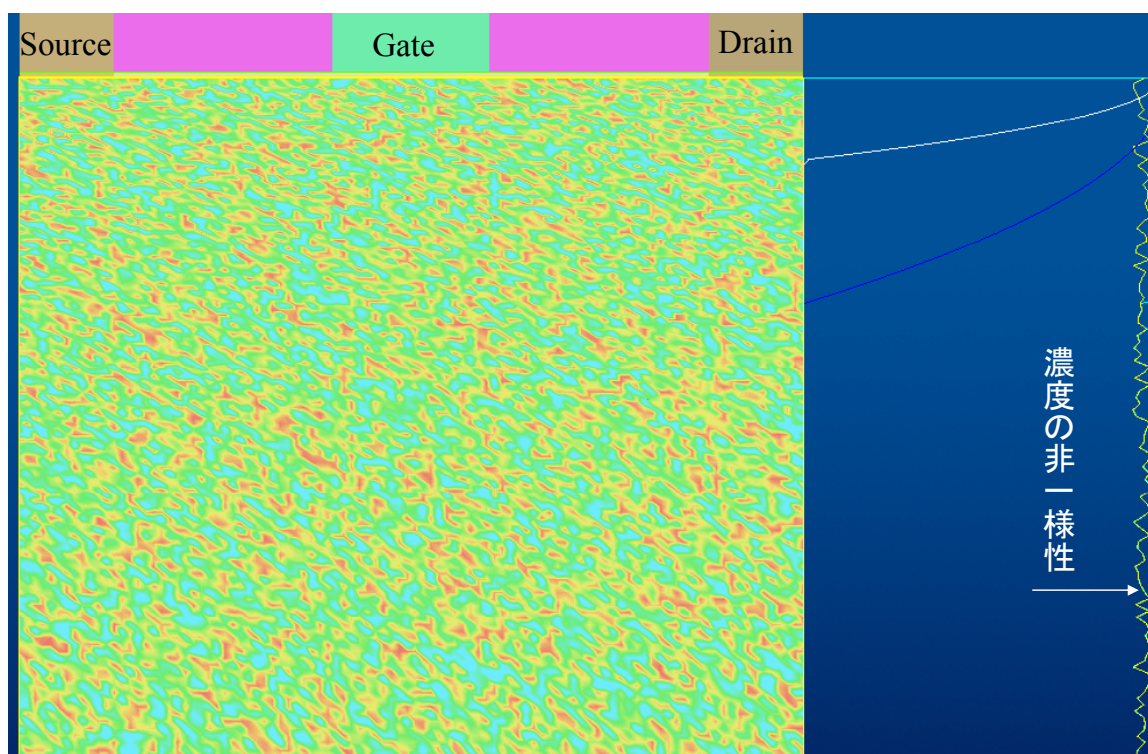
1. 非平衡電子輸送論の基礎
ボルツマン方程式とモンテカルロ法によるアプローチ
2. 輸送係数
3. 半導体中の生成・再結合過程
4. 量子効果について
5. 最近の話題から(事例紹介)



まとめ

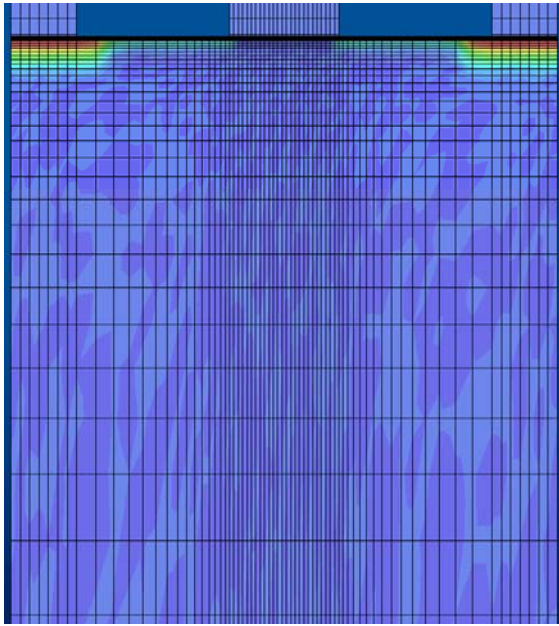
27

非一様不純物濃度分布の例

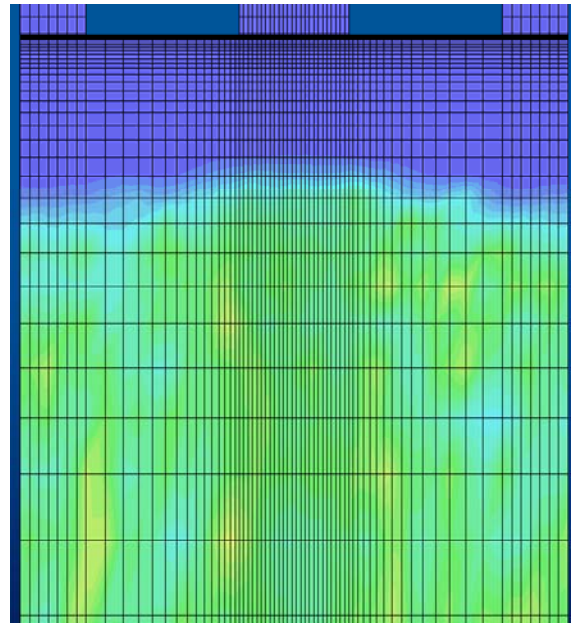


28

メッシュへの変換

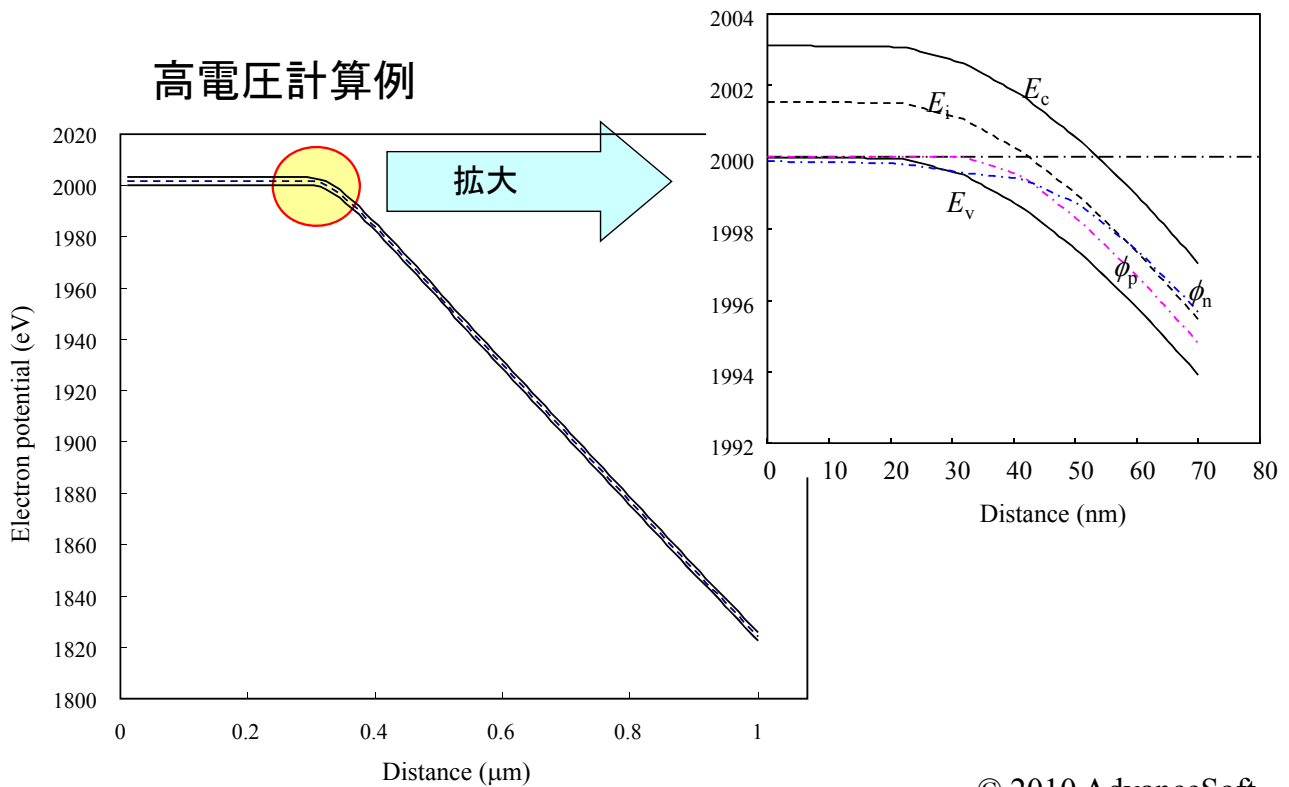


非一様不純物濃度分布

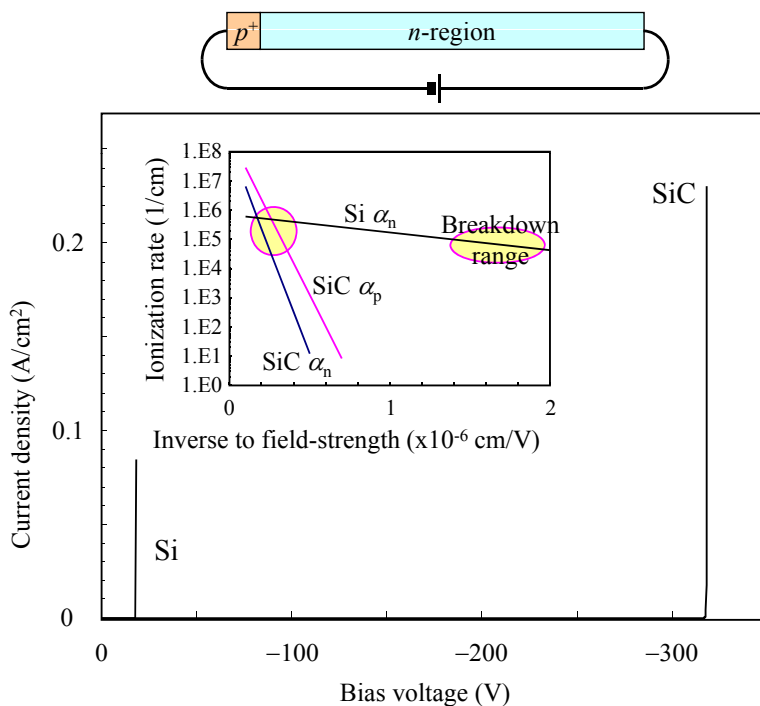


正孔密度分布

ワイドギャップ半導体ダイオードの計算例



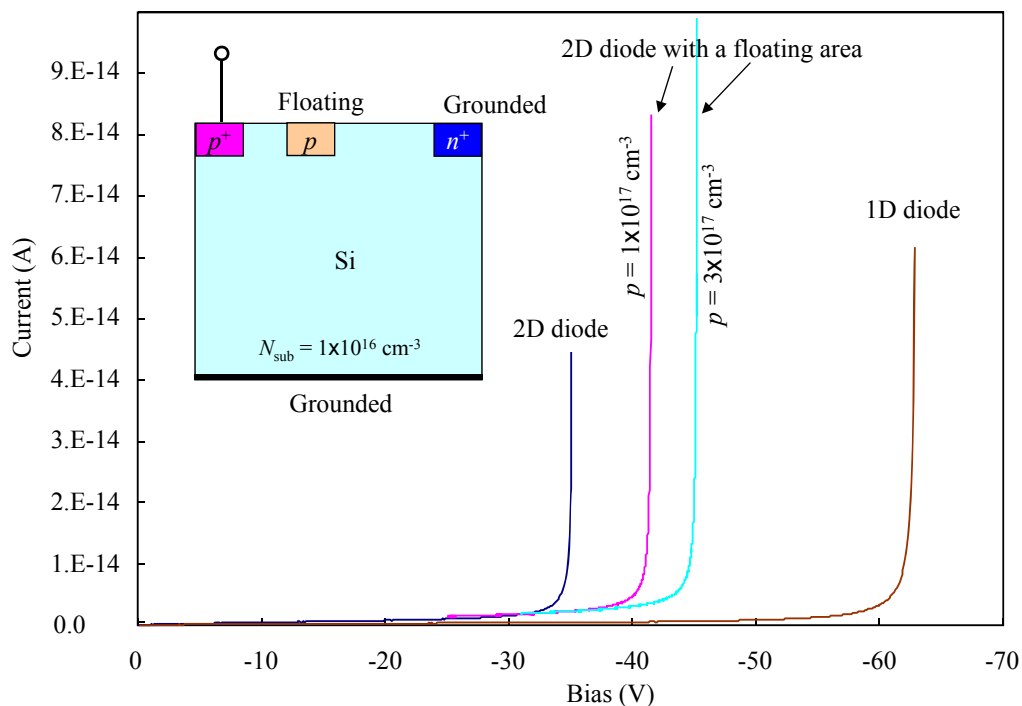
ワイドギャップ半導体ダイオード における雪崩増倍解析例



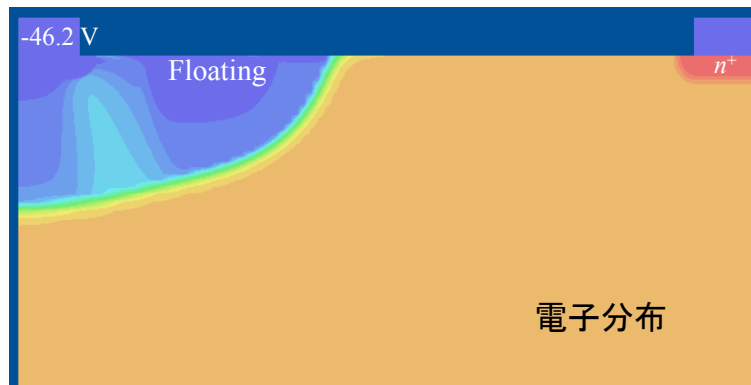
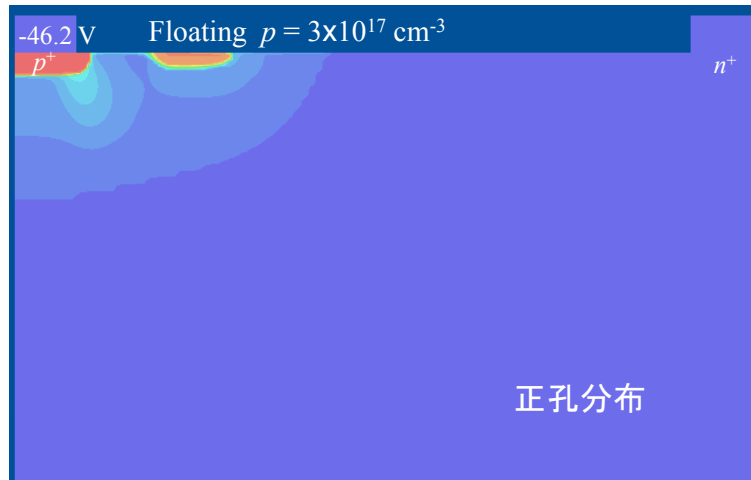
31

ガードリング付きダイオード解析例

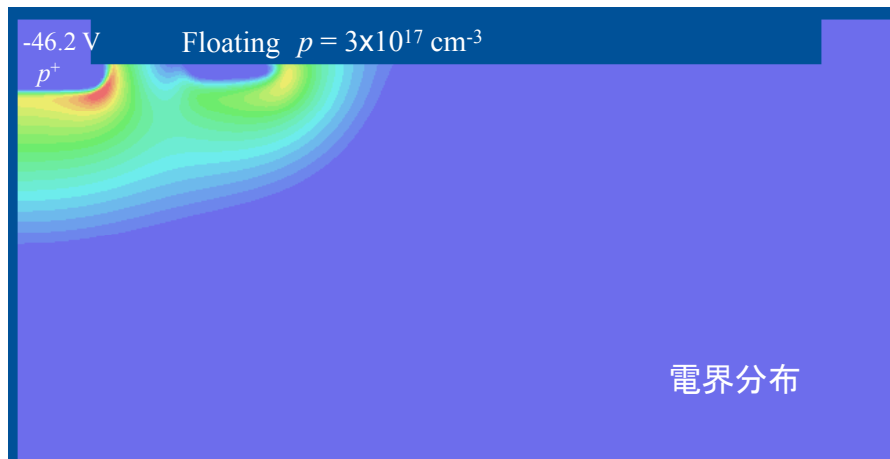
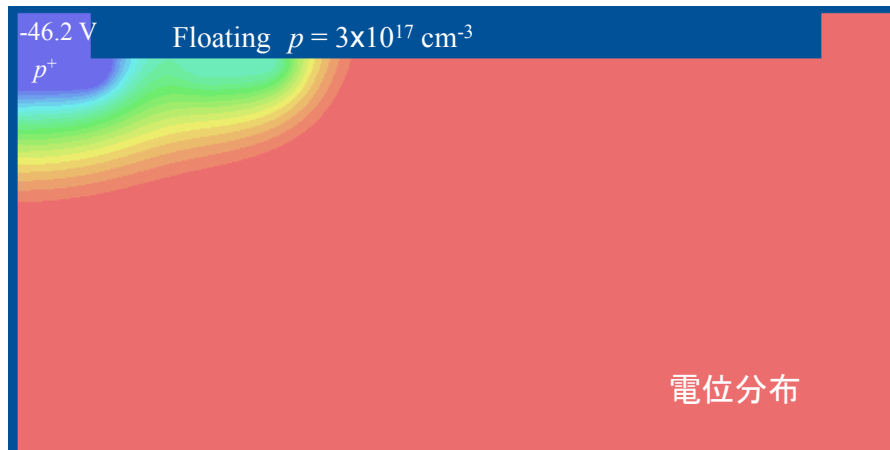
電氣的浮遊領域の解析例



32



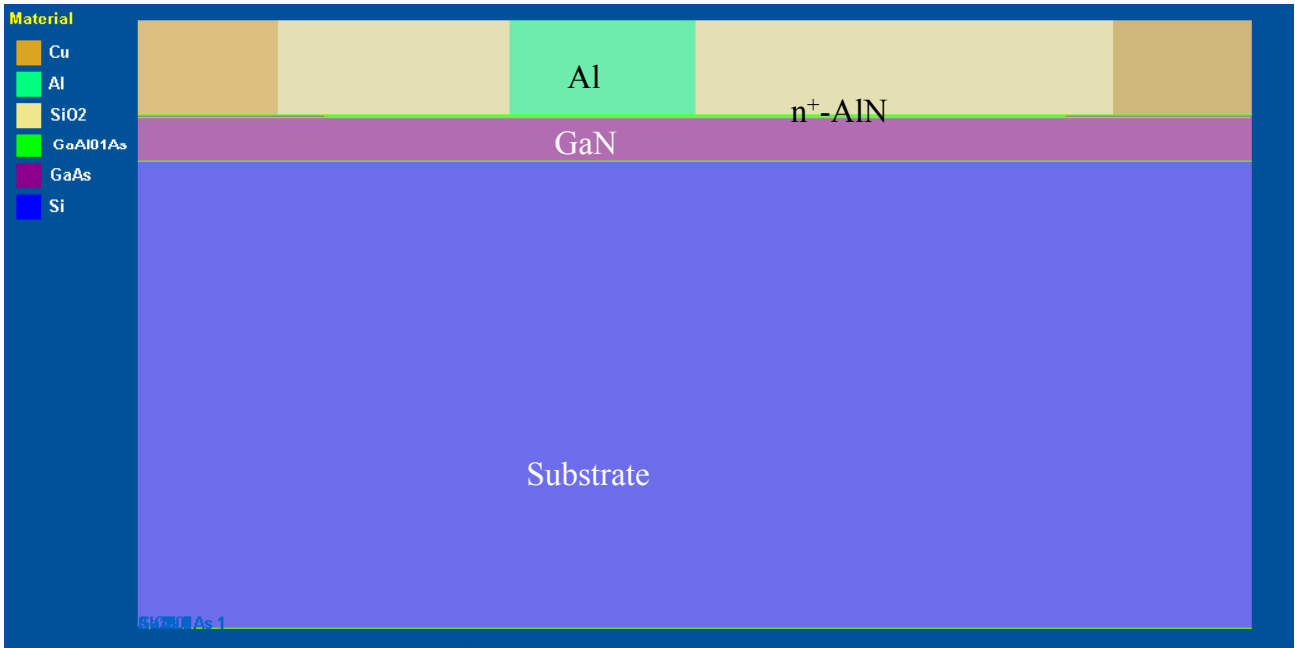
33



34

Wide-gap semiconductor 解析例

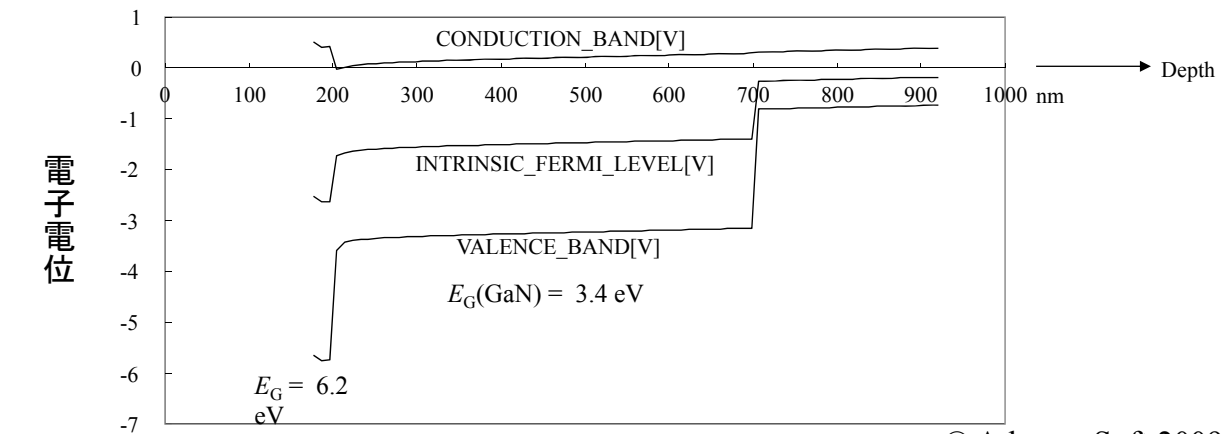
GaN ($E_G = 3.4 \text{ eV}$) HEMT への適用例



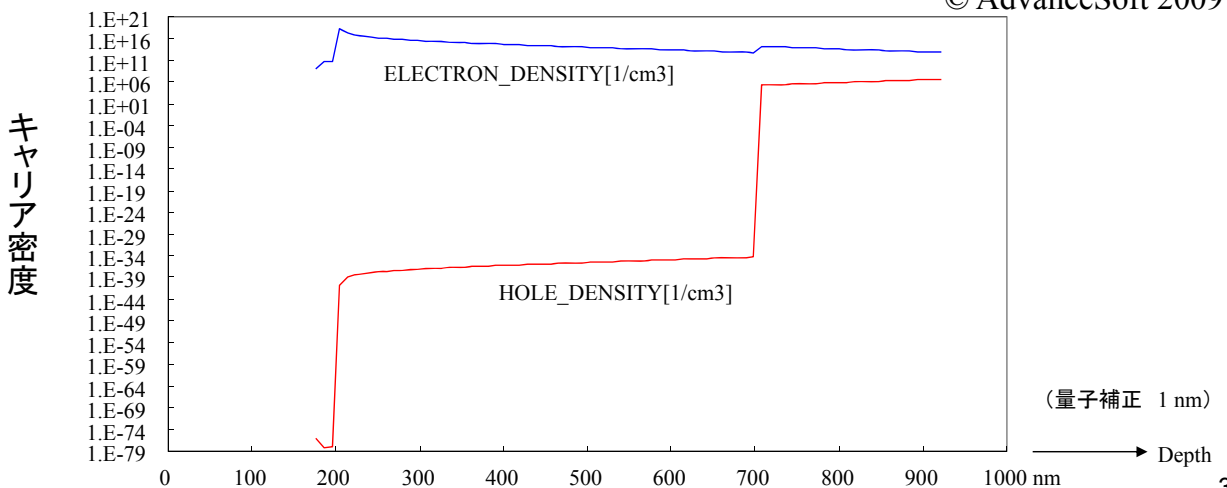
Advance/DESSERT 解析例

© AdvanceSoft 2009

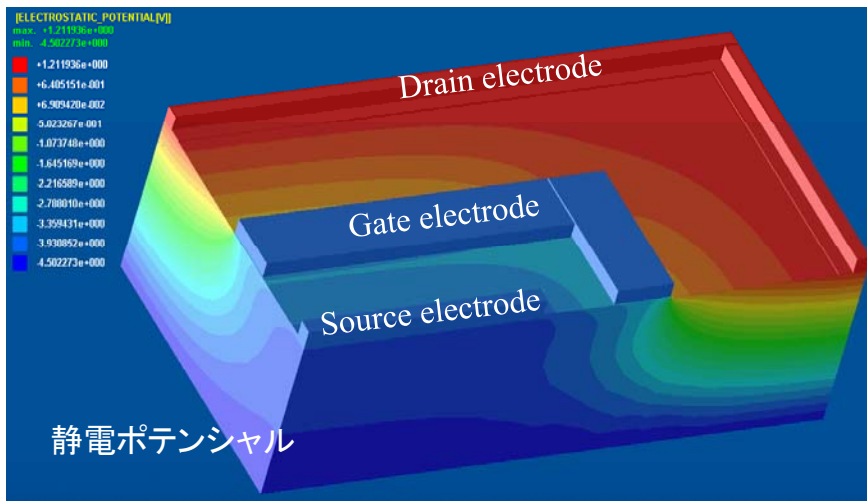
35



© AdvanceSoft 2009

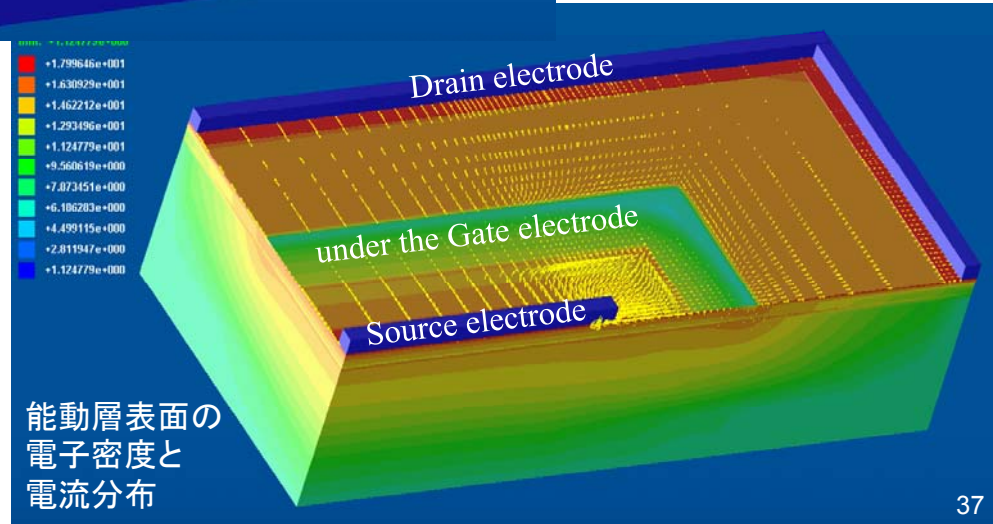


36



GaN HEMT 3次元解析

$$V_D = 5 \text{ V}, V_G = 0 \text{ V}$$



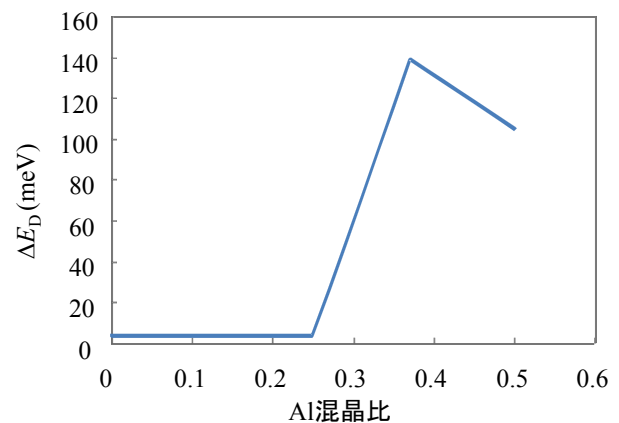
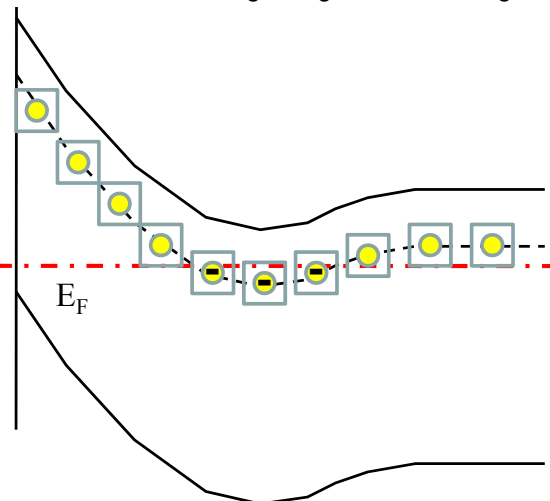
© AdvanceSoft 2009

37

GaAs/GaAlAs HEMT におけるDXセンターの影響

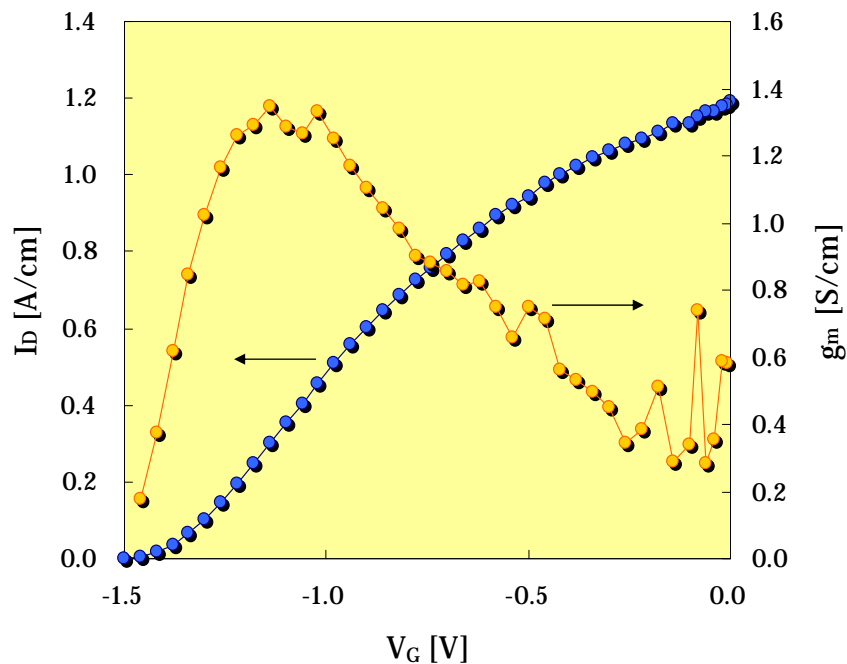
$$N_D^+ = \left(1 - \frac{1}{1 + g^{-1} \exp[(E_D - E_F)/k_B T]}\right) \times N_D = \frac{1}{1 + g \cdot \exp[(E_F - E_D)/k_B T]} \times N_D$$

g : the ground-state degeneracy of the donor impurity level



38

I_D - V_G 曲線, g_m 曲線 ($V_D=1.2[V]$)



39



デバイスシミュレーションの実際

ご清聴を感謝申し上げます



平成23年6月17日

アドバンスソフト株式会社

40