

2017年11月26日

パワー・ダイオードの特性(rev.2)

松田順一
群馬大学

概要

- パワー・ダイオードの用途と特徴
- ショットキー・バリア・ダイオード
 - メタル・半導体コンタクト
 - 順方向特性
 - 逆方向特性
 - トレードオフ・カーブ、パワー消失と温度、バリア低下、エッジ終端構造
 - 高耐圧ショットキー・バリア・ダイオード
- PiNダイオード
 - 順方向特性(極低、低、高レベル注入)
 - 逆方向特性(リバース・リカバリー特性, ライフタイム制御)
 - ドーピング不純物
 - オーミック・コンタクト
 - 最大動作温度
- JBS (Junction Barrier Controlled Schottky) ダイオード
- MPS (Merged PiN/Schottky) ダイオード
- トレンド

(注)群馬大学アナログ集積回路研究会 第65回講演会(2007年7月20日)資料から抜粋

参考文献 B. Jayant Baliga, "Fundamentals of Power Semiconductor Devices," Springer Science + Business Media, 2008.

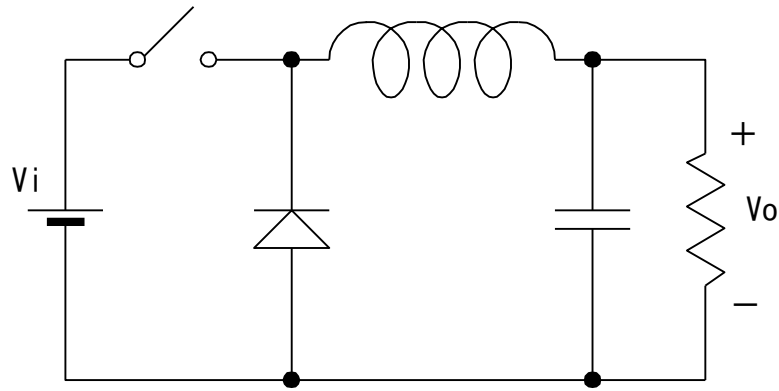
ダイオードの種類

- 整流ダイオード
 - 一般用、高速用、**ファースト・リカバリー・ダイオード**
- ショットキー・バリア・ダイオード
 - **整流用**、小信号用、高周波用
- ツェナー・ダイオード
 - ESD保護用、定電圧用
- 可変容量ダイオード
 - チューナー(AM, FM, UHF/VHFなど)用、VCO用
- 可変抵抗(PiNダイオード)
 - AGC(Auto Gain Control)用

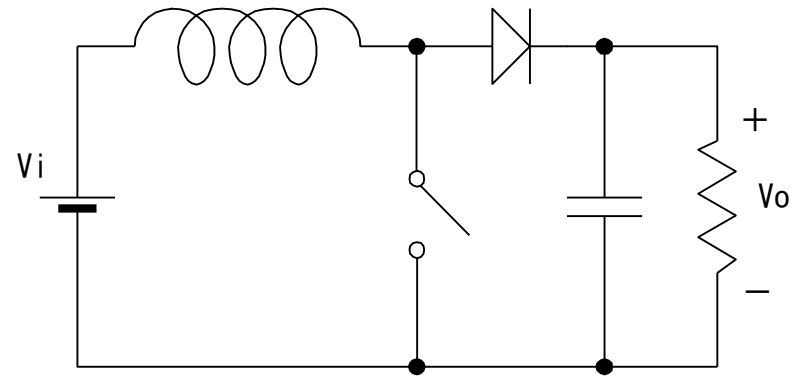
パワー・ダイオードの用途と特徴

- 用途 : DC-DCコンバータ、AC-DCコンバータ
 - 情報、家電、車載等の各種スイッチング電源
- 特徴
 - ショットキー・バリア・ダイオード
 - 低順方向電圧 V_F (0.5~0.6V)
 - リーク電流大
 - ユニポーラ
 - 逆特性リカバリー : 早い
 - PiNダイオード
 - 高順方向電圧 V_F (~0.9V)
 - リーク電流小
 - バイポーラ (伝導度変調により低抵抗化)
 - 逆特性リカバリー : 遅い

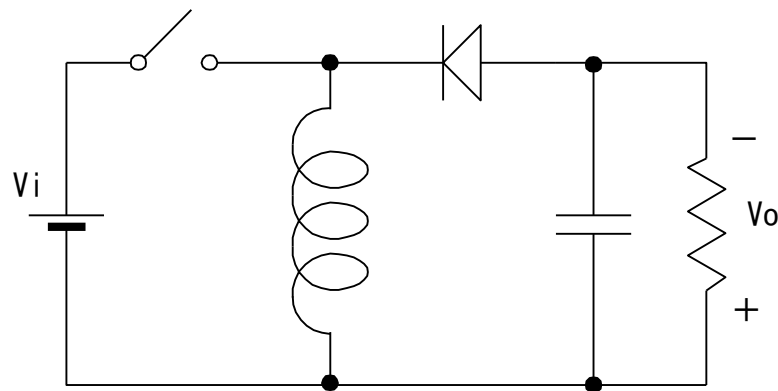
DC-DCコンバータの基本回路



降压型

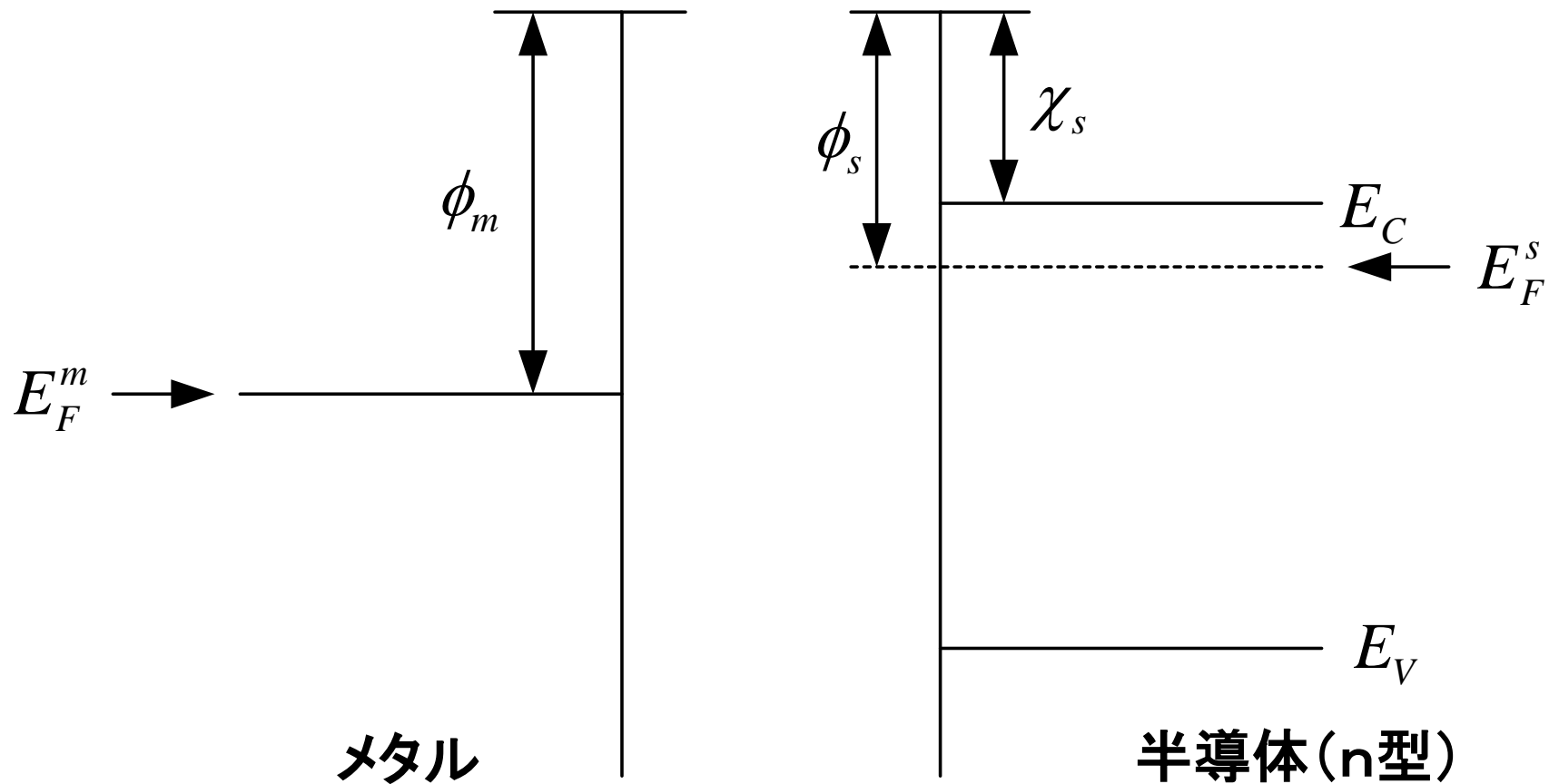


昇圧型

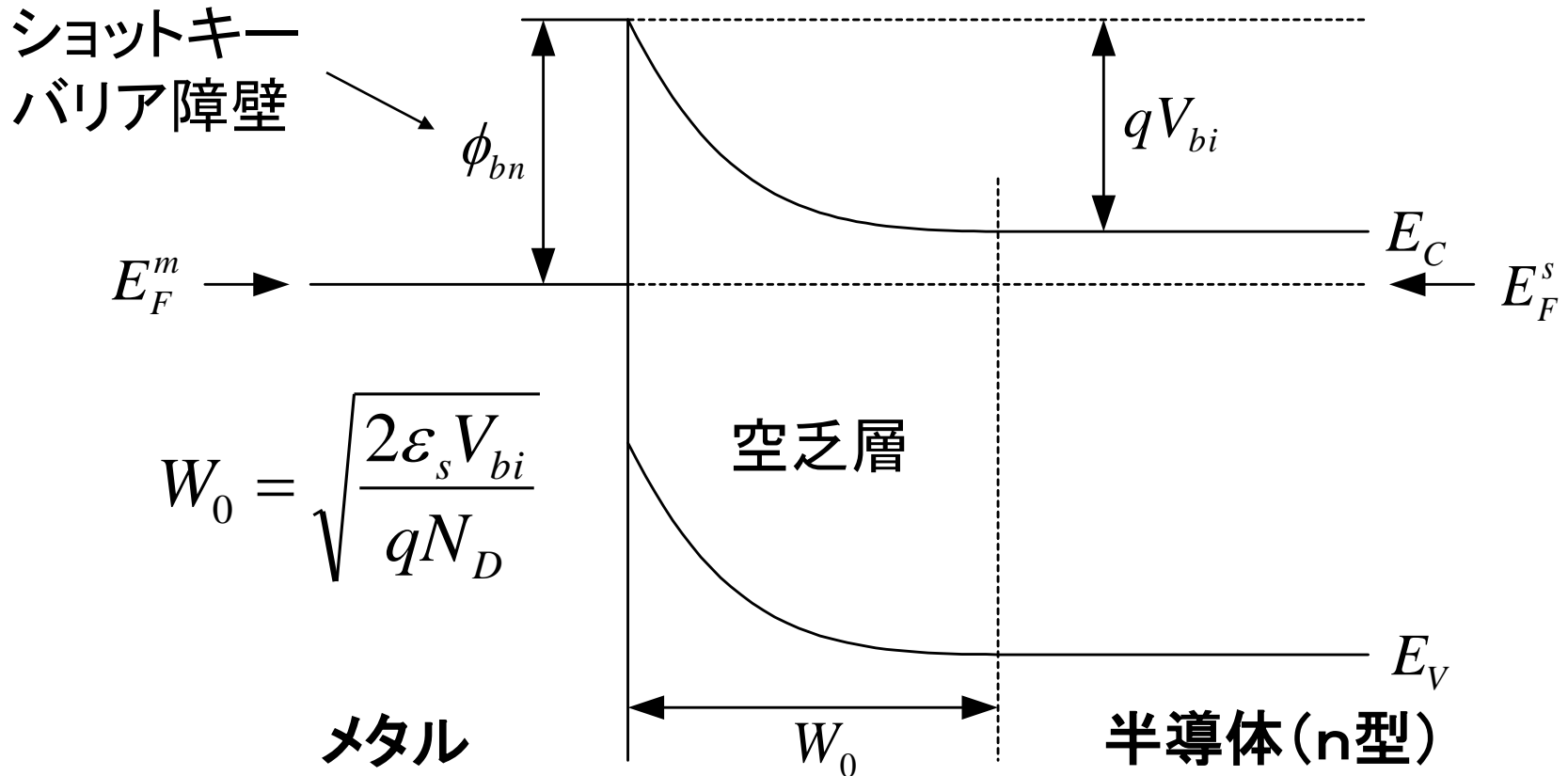


昇降压型

エネルギー・バンド —メタルと半導体：分離—

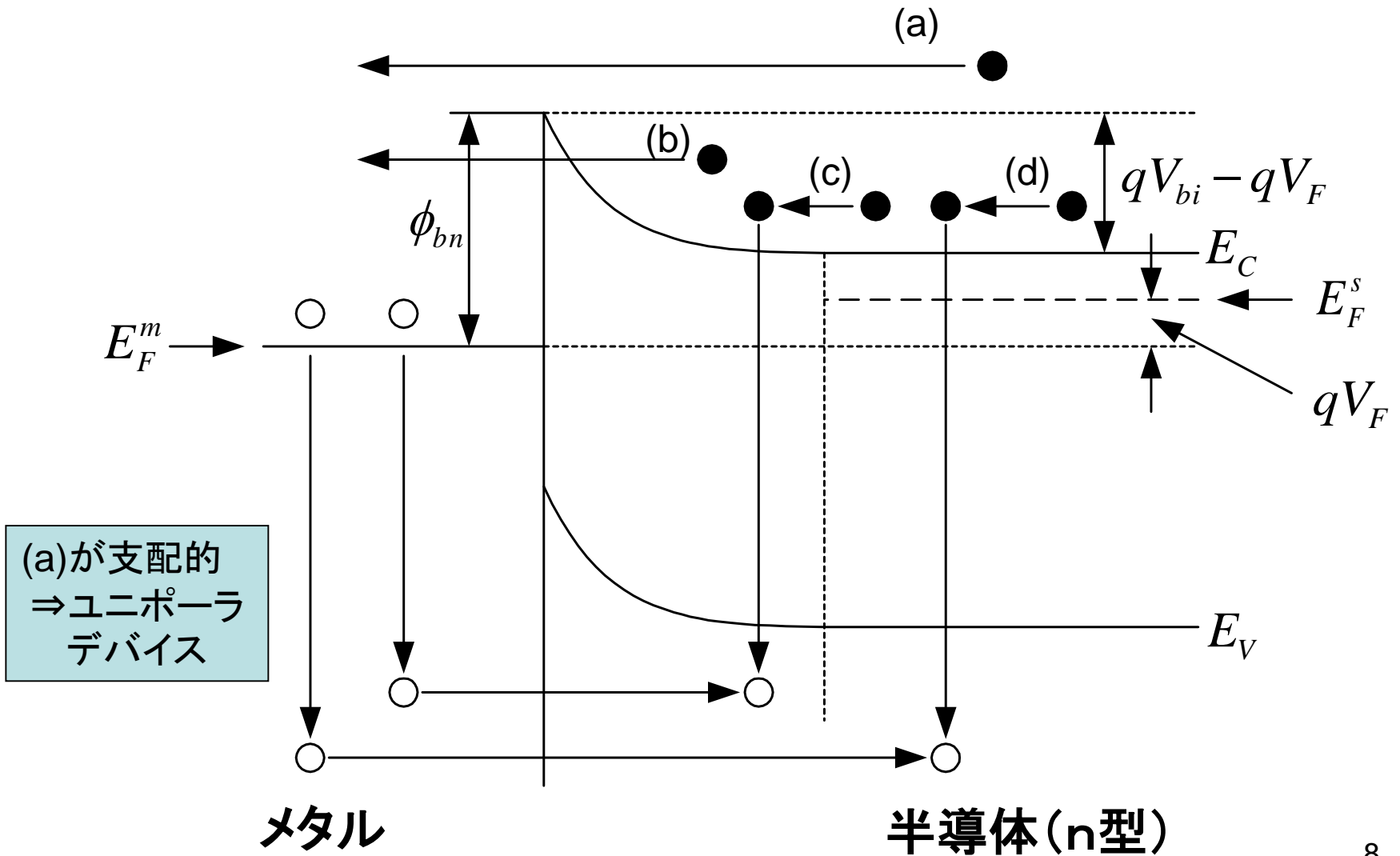


エネルギー・バンド —メタルと半導体：接触—



$$qV_{bn} = qV_{bi} + (E_C - E_F^s) = (\phi_m - \phi_s) + (E_C - E_F^s)$$

順方向電導におけるエネルギー・バンド



電流電圧特性

- ショットキー・バリア界面を横切る電流
– 熱電子放出

$$J = AT^2 e^{-(q\phi_{bn}/kT)} \left[e^{(qV/kT)} - 1 \right]$$

A : 実効リチャードソン定数

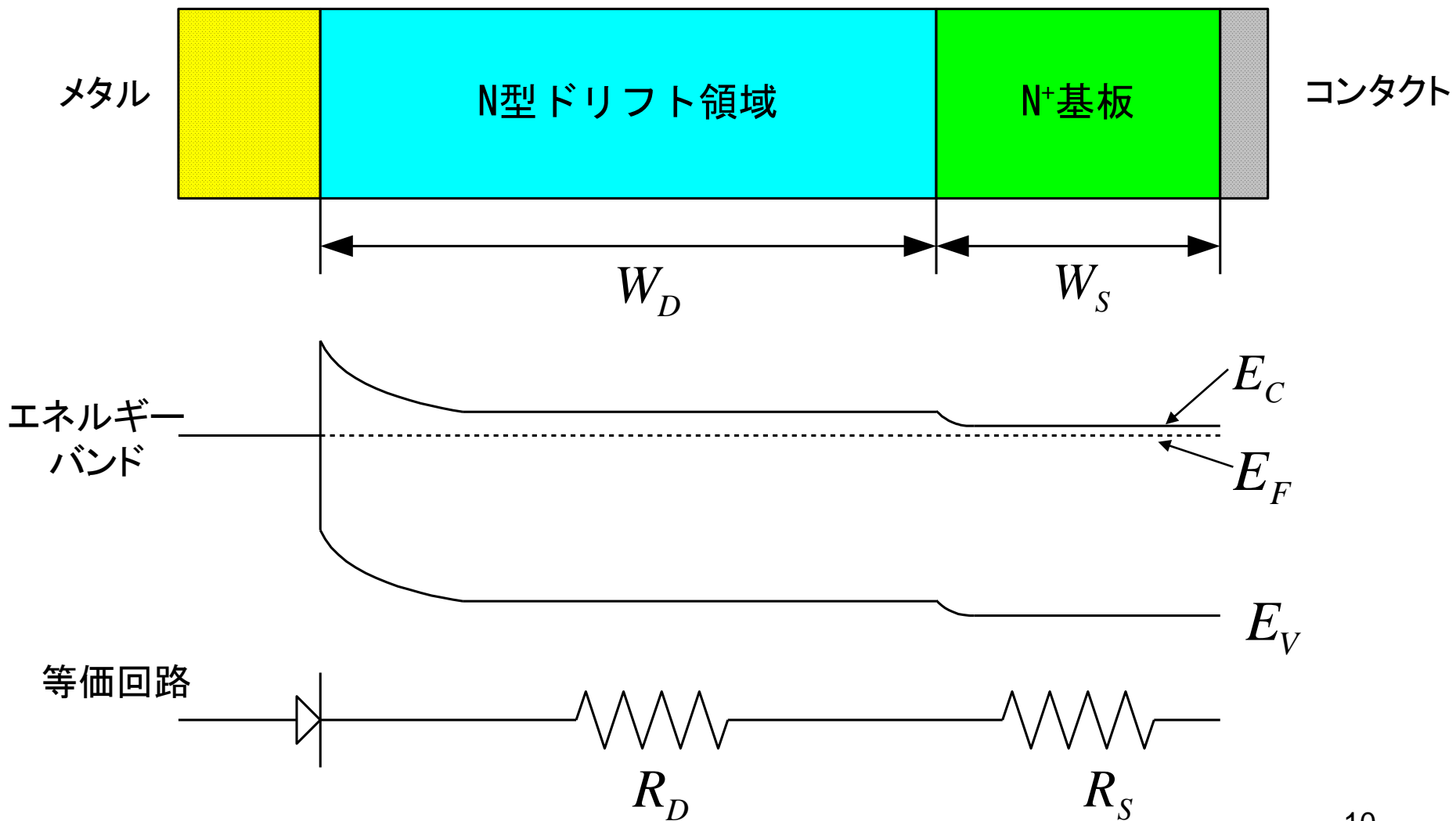
$$A = 110 \text{ A/cm}^2/\text{K}^2 \quad (\text{N型Si})$$

$$A = 140 \text{ A/cm}^2/\text{K}^2 \quad (\text{N型GaAs})$$

T : 絶対温度、 q : 電子電荷、 k : ボルツマン定数、

ϕ_{bn} : バリア高さ、 V : 印加電圧

ショットキー・パワー・ダイオードのエネルギー・バンド



順方向電流特性

- 順方向電流

$$J_F = AT^2 e^{-(q\phi_{bn}/kT)} e^{(qV_{FB}/kT)}$$

V_{FB} : ショットキー・バリアを横切る電圧

- 順方向全電圧降下

$$V_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_F}{J_S}\right) + R_S J_F$$

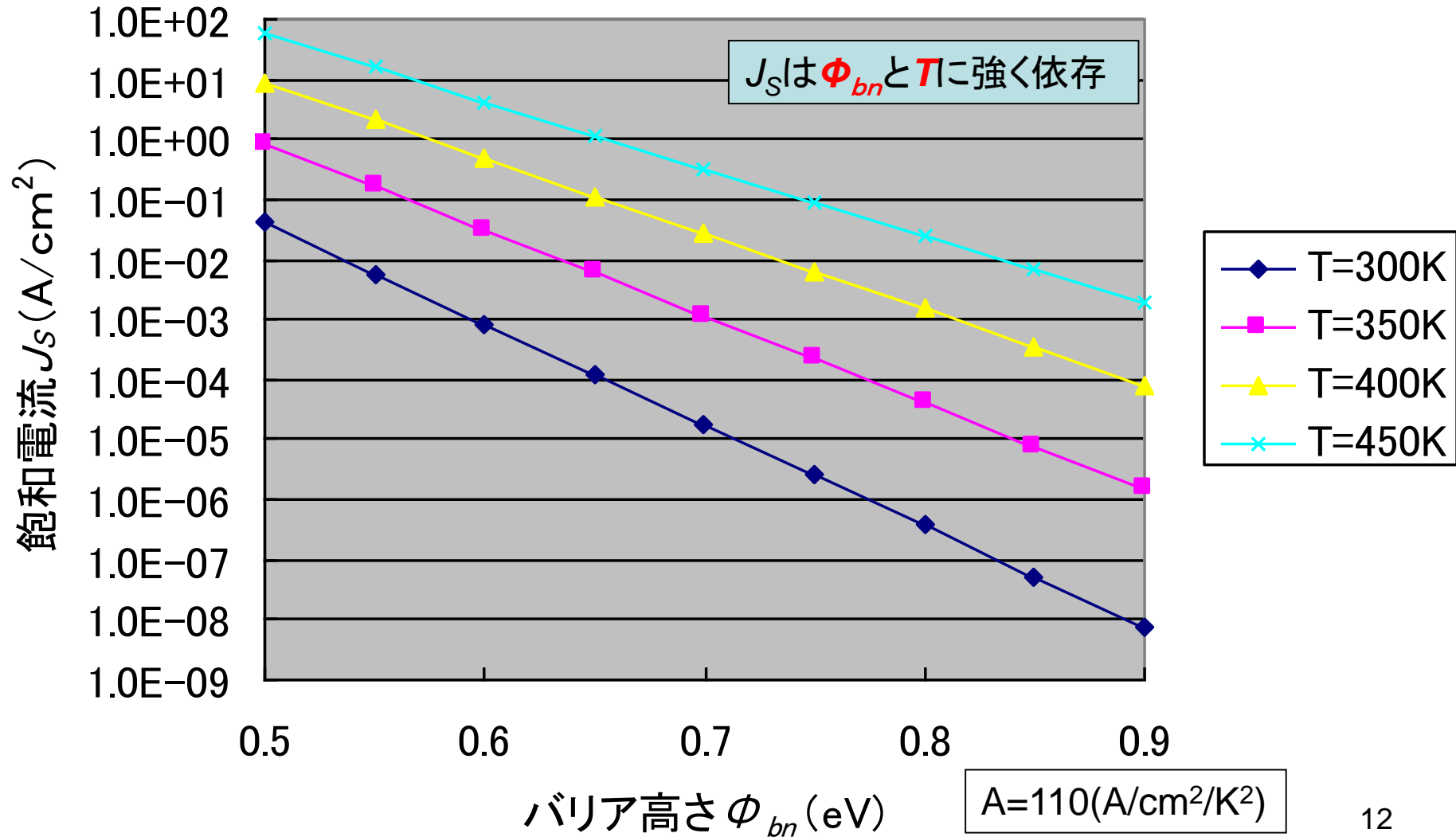
$J_S = AT^2 e^{-(q\phi_{bn}/kT)}$: 飽和電流

R_S : 全直列抵抗 (単位面積当り)

⇒ ドリフト領域、基板、コンタクト抵抗

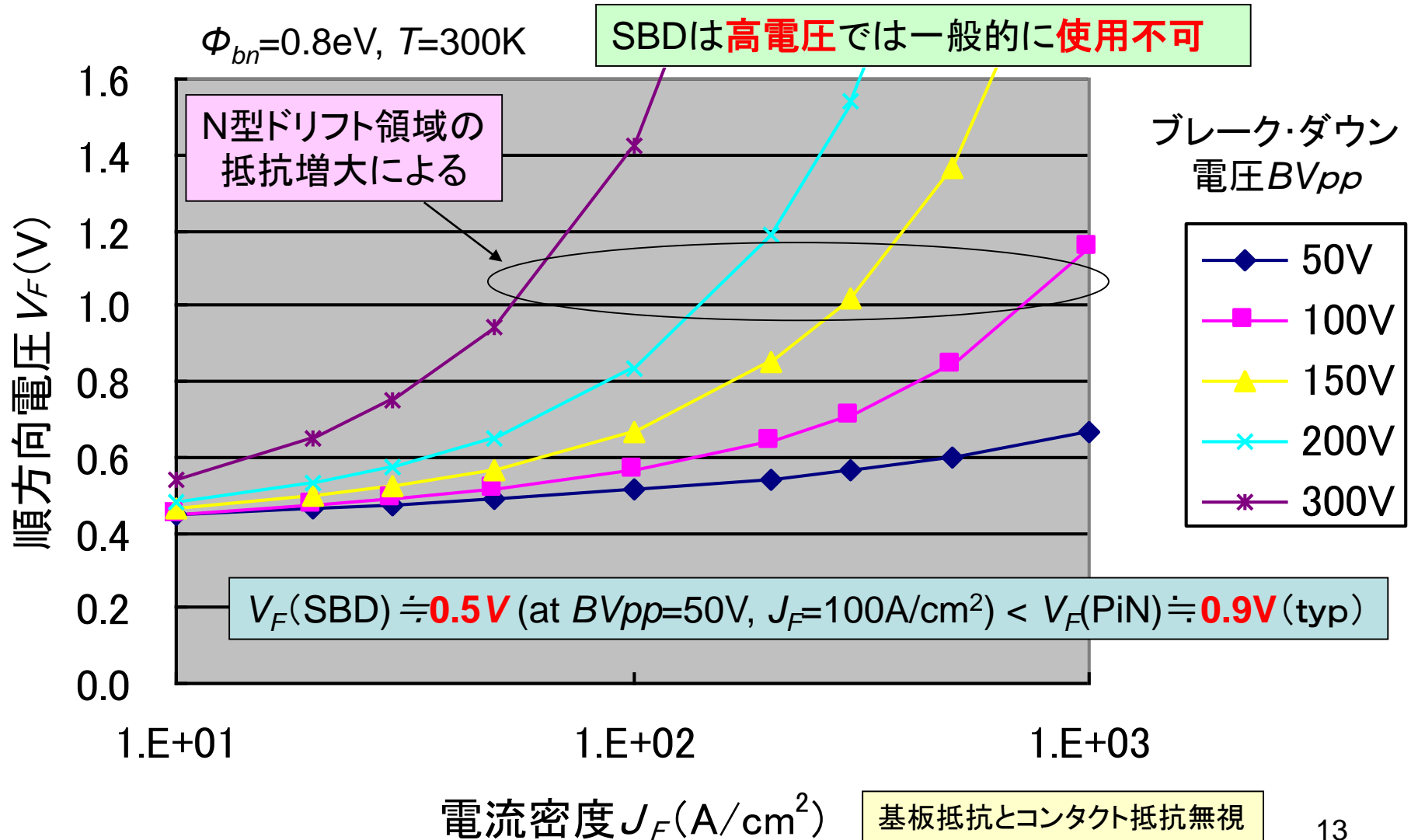
飽和電流のバリア高さ依存性

—ショットキー・バリア・ダイオード—



ブレーク・ダウン電圧の順方向特性への影響

—ショットキー・バリア・ダイオード—



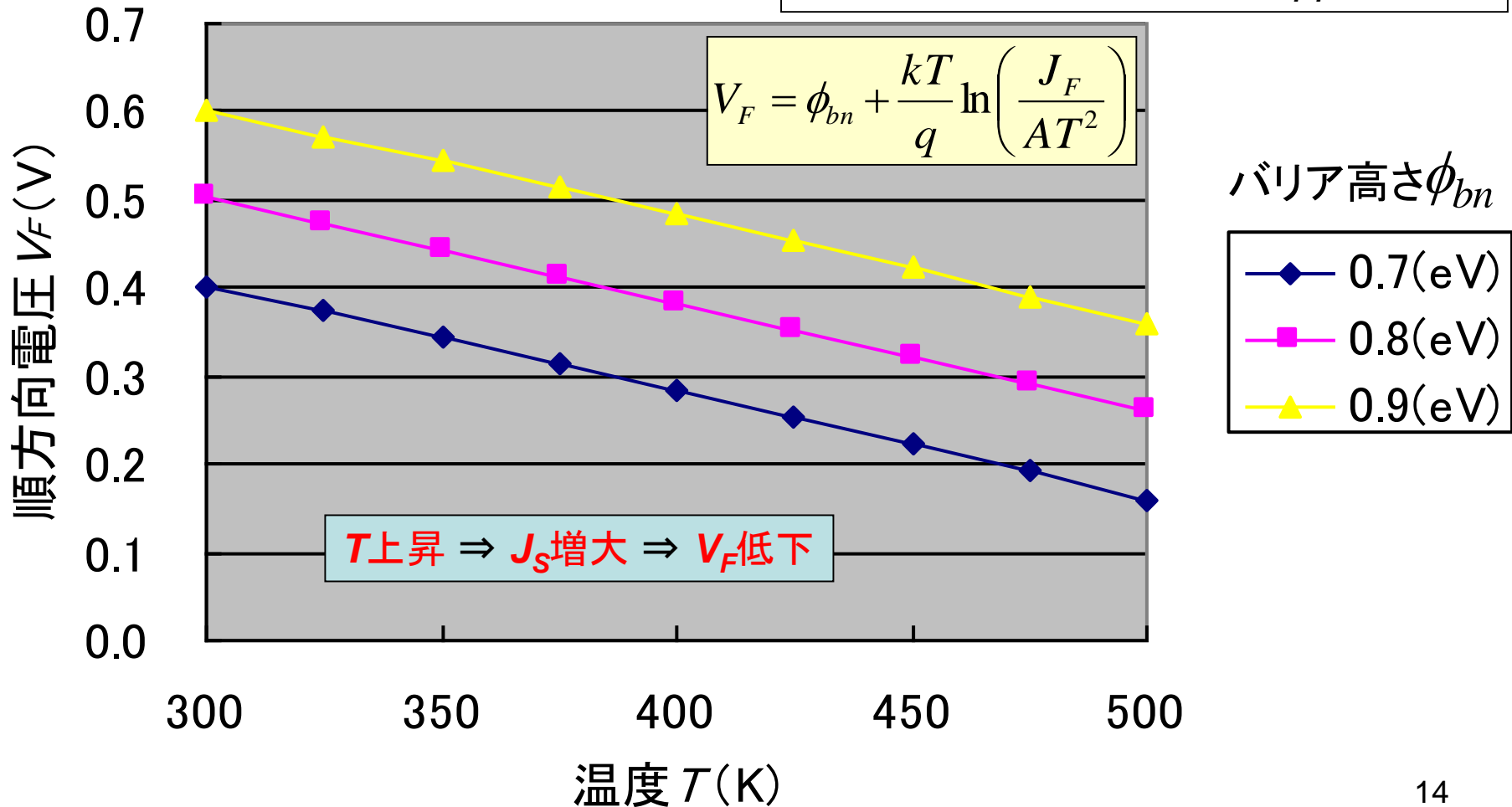
順方向電圧の温度依存性

—ショットキー・バリア・ダイオード—

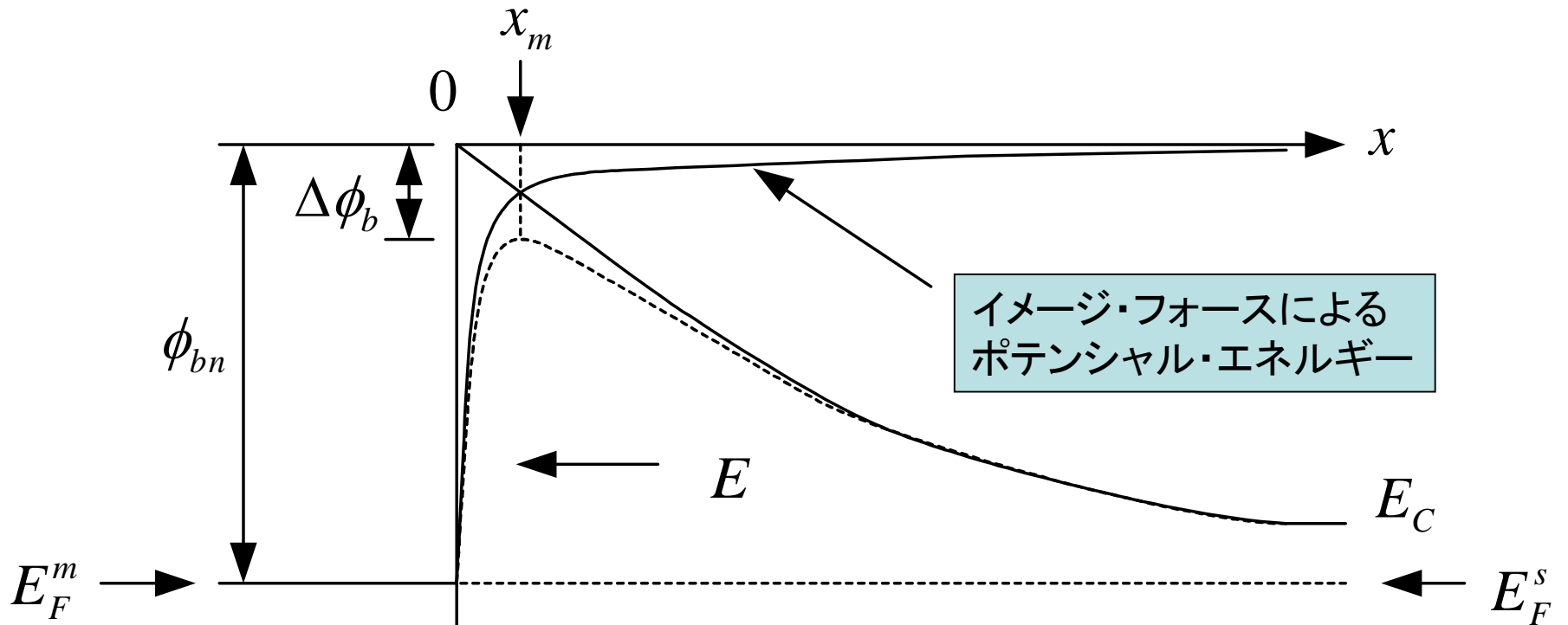
$$J_F = 100 \text{ A/cm}^2$$

低ブレークダウン電圧の場合: $BV_{pp} (\approx 50\text{V})$

$$V_F = \phi_{bn} + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_F}{AT^2} \right)$$



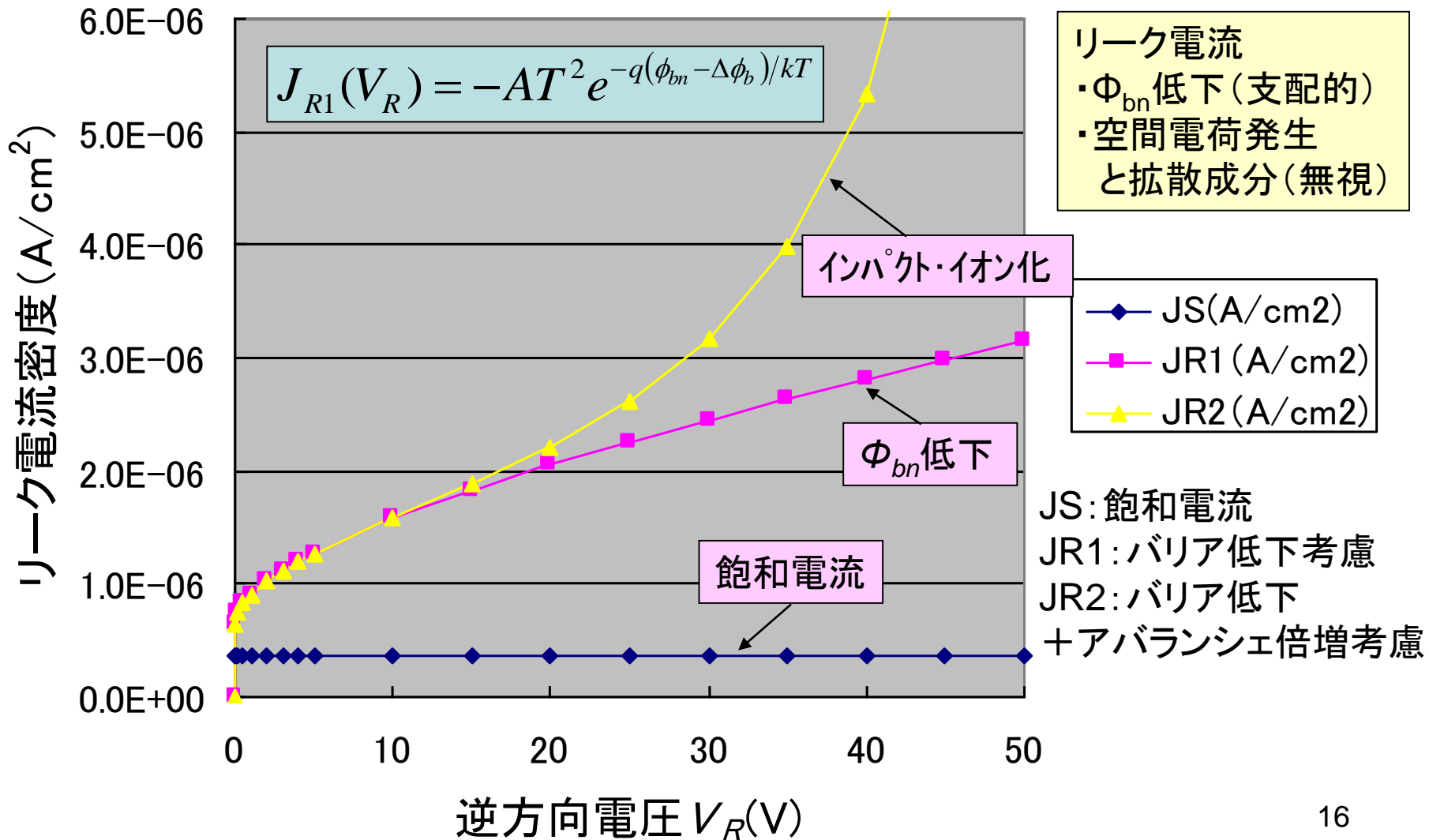
イメージ・フォースによるショットキー・バリア低下



$$\Delta\phi_b = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s}}, \quad E_m = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s} (V_R + V_{bi})}$$

リーク電流特性

—ショットキー・バリア・ダイオード—



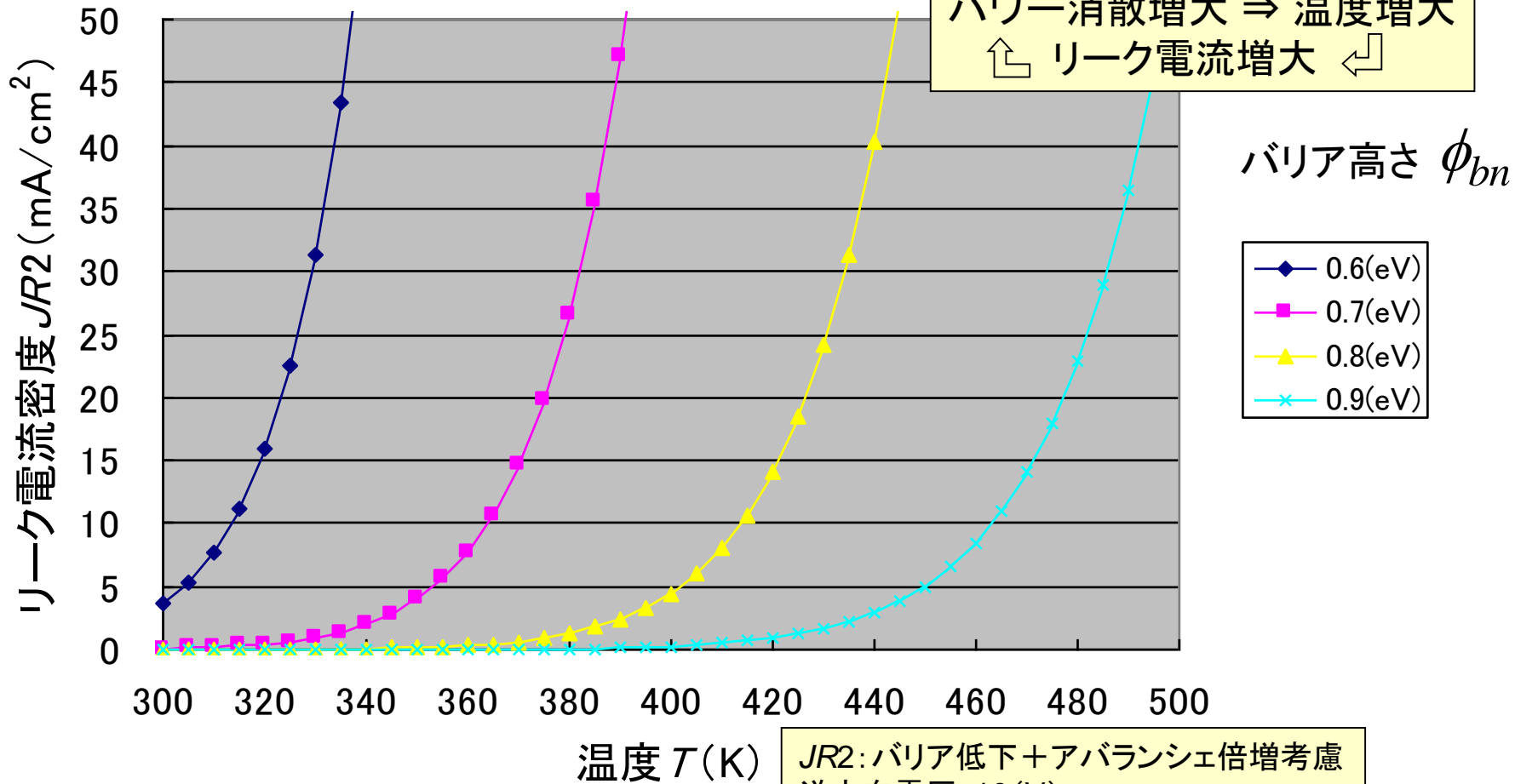
リーク電流の温度依存性

—ショットキー・バリア・ダイオード—

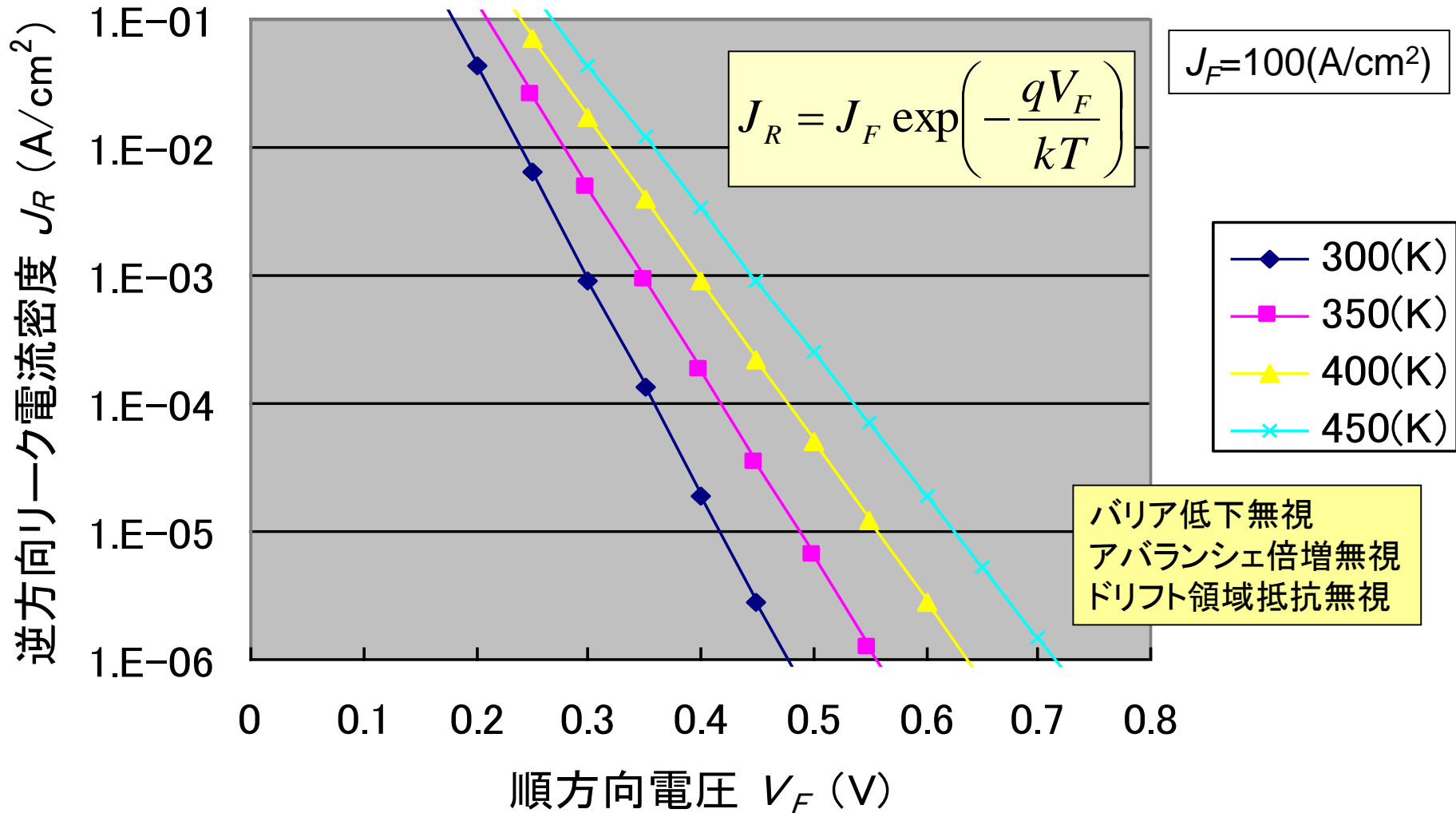
熱暴走(正帰還)

パワー消散増大 \Rightarrow 温度増大

\uparrow リーク電流増大 \leftarrow



順方向電圧と逆方向リーク電流のトレードオフ

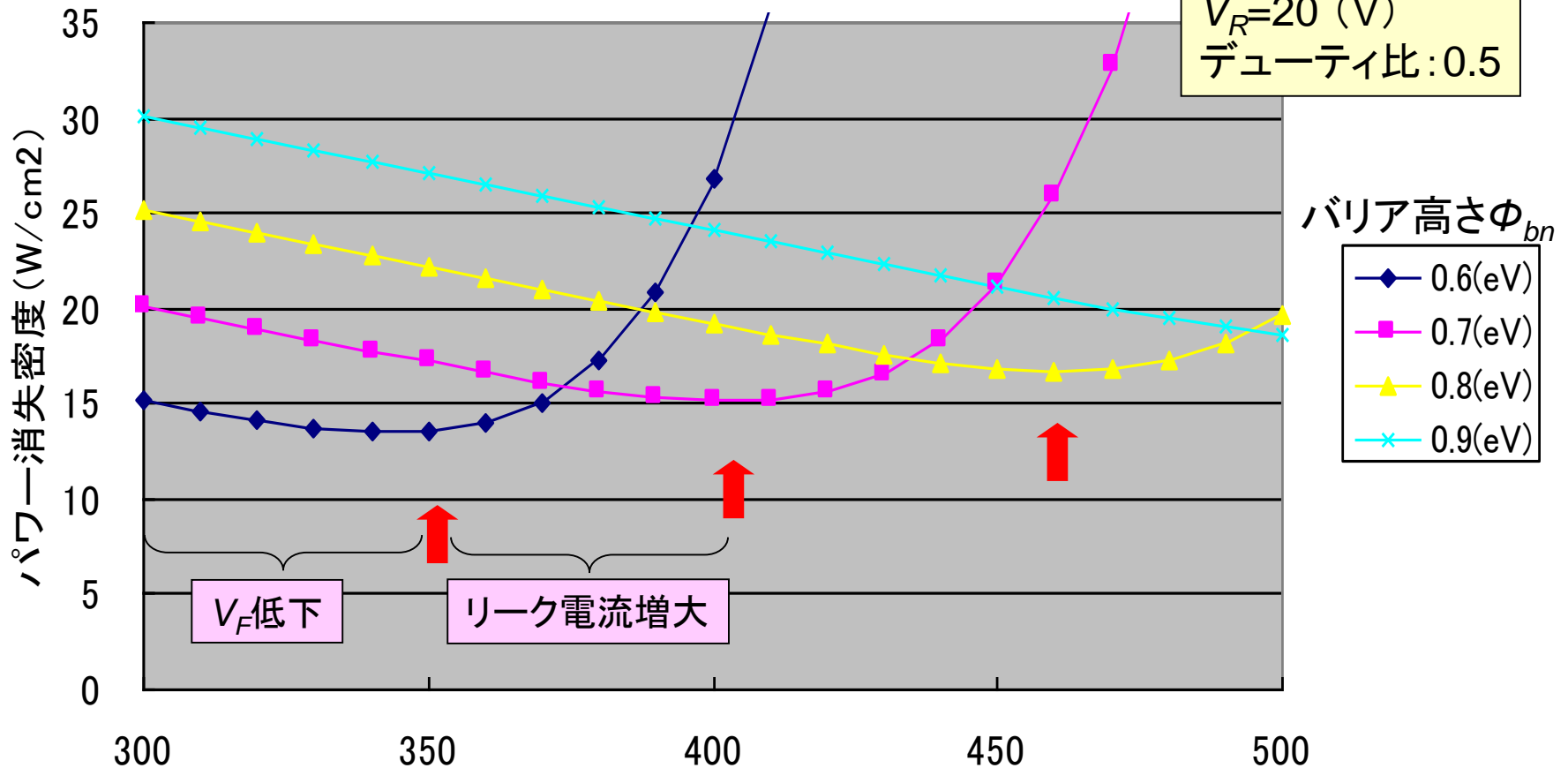


トレードオフは ϕ_{bn} から決定
 ⇒ Siを他の半導体に変えても改善されない。(低耐圧の場合)

パワー消失と温度との関係

—パラメータ: バリア高さ—

$J_F=100$ (A/cm²)
 $V_R=20$ (V)
 デューティ比: 0.5



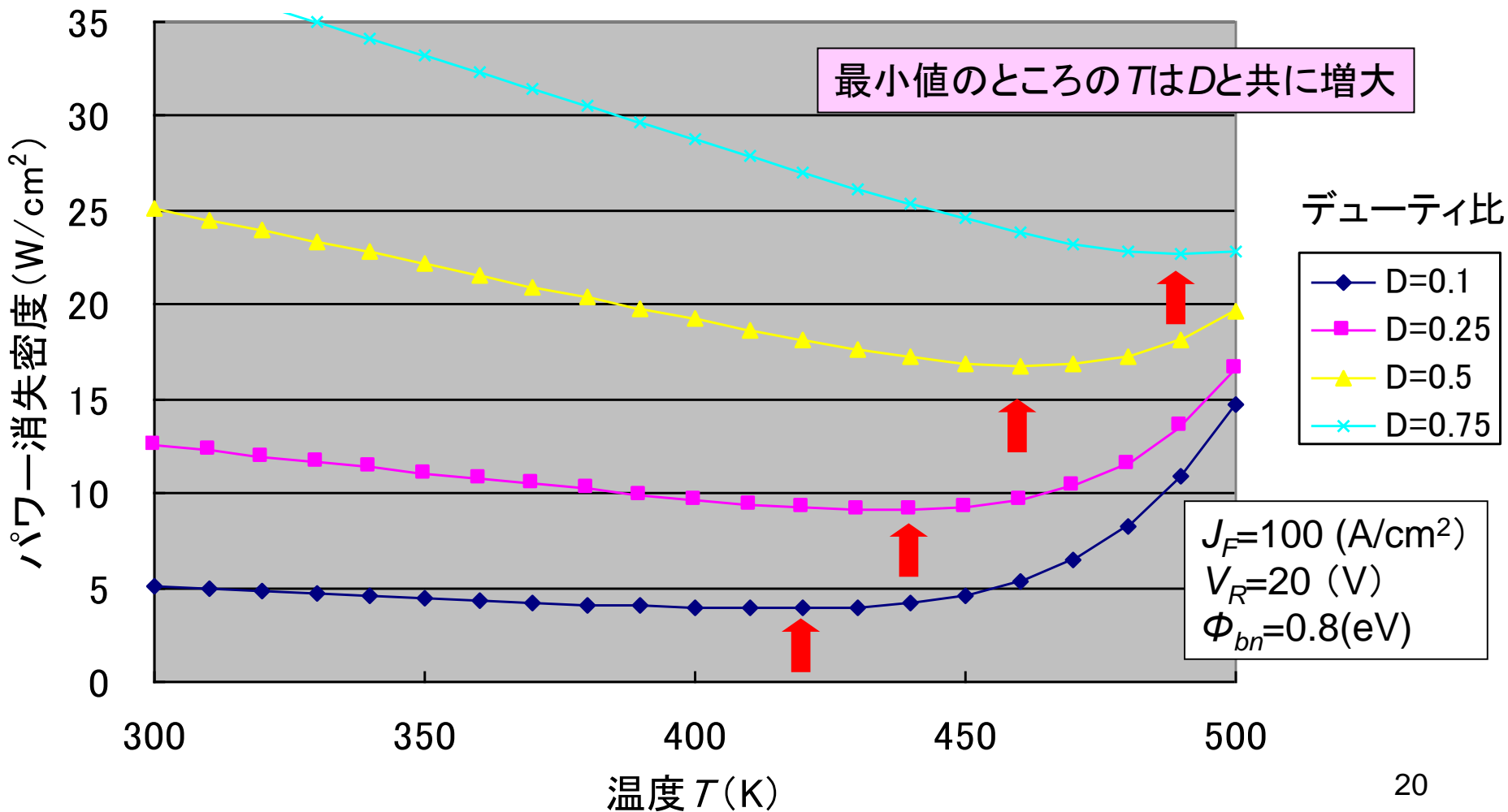
$$P_D = J_F V_F \frac{t_{on}}{T} + J_L V_R \frac{(T - t_{on})}{T}$$

温度 T (K)

ϕ_{bn} は最低0.7(eV)以上必要

パワー消失と温度との関係

—パラメータ: デューティ比—



ショットキー・バリア高さ

メタルの仕事関数とショットキー・バリア高さ(n型Si上のメタル)⁽¹⁾

メタル	Cr	Mo	Pt	W
仕事関数 (eV)	4.5	4.6	5.3	4.6
バリア高さ (eV)	0.57	0.61	0.81	0.61

シリサイドのショットキー・バリア高さ(n型Si上のシリサイド)⁽²⁾

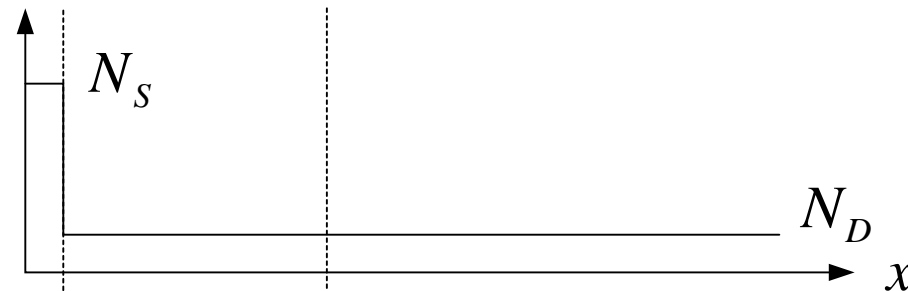
シリサイド	CrSi ₂	MoSi ₂	PtSi ₂	WSi ₂
バリア高さ (eV)	0.57	0.55	0.78	0.65

(1) E. H. Rhoderick and R.H. Williams, "Metal-Semiconductor Contacts," pp. 48-55, 2nd Edition, Oxford Science, Oxford, 1988.

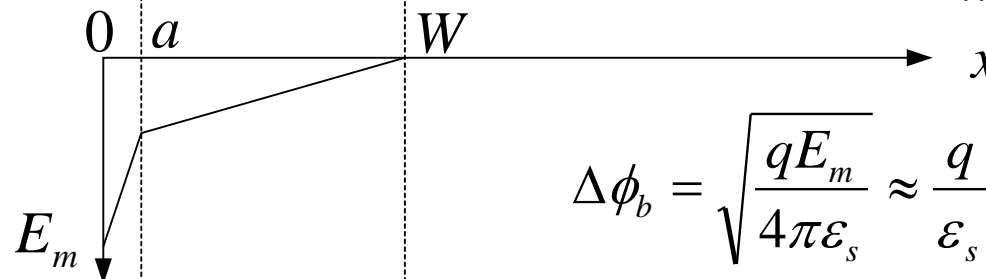
(2) B. Jayant Baliga, "Fundamentals of Power Semiconductor Devices," p.194, Springer Science + Business Media, 2008.

ショットキーバリアの低下 —表面での高ドーピング—

ドーピング密度



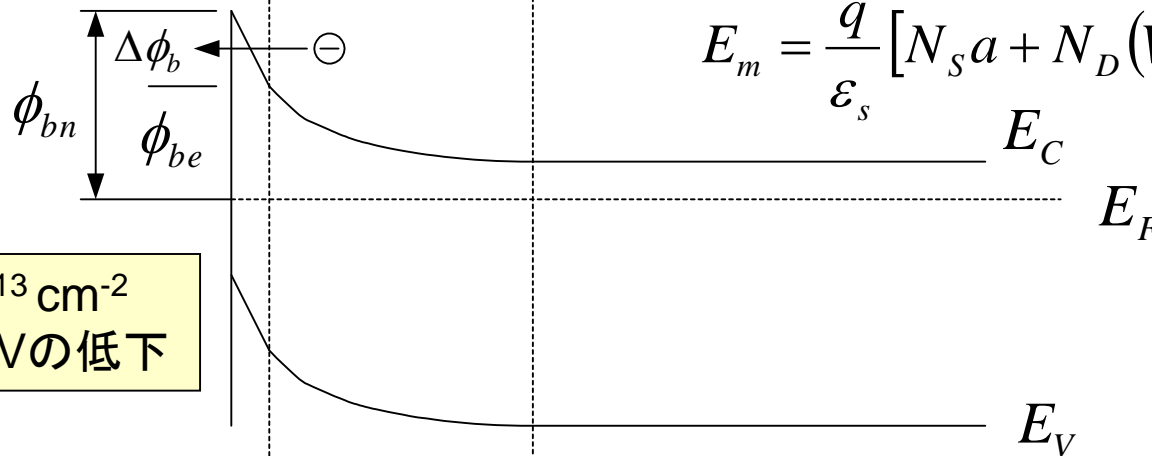
電界



$$\Delta\phi_b = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s}} \approx \frac{q}{\epsilon_s} \sqrt{\frac{aN_S}{4\pi}}$$

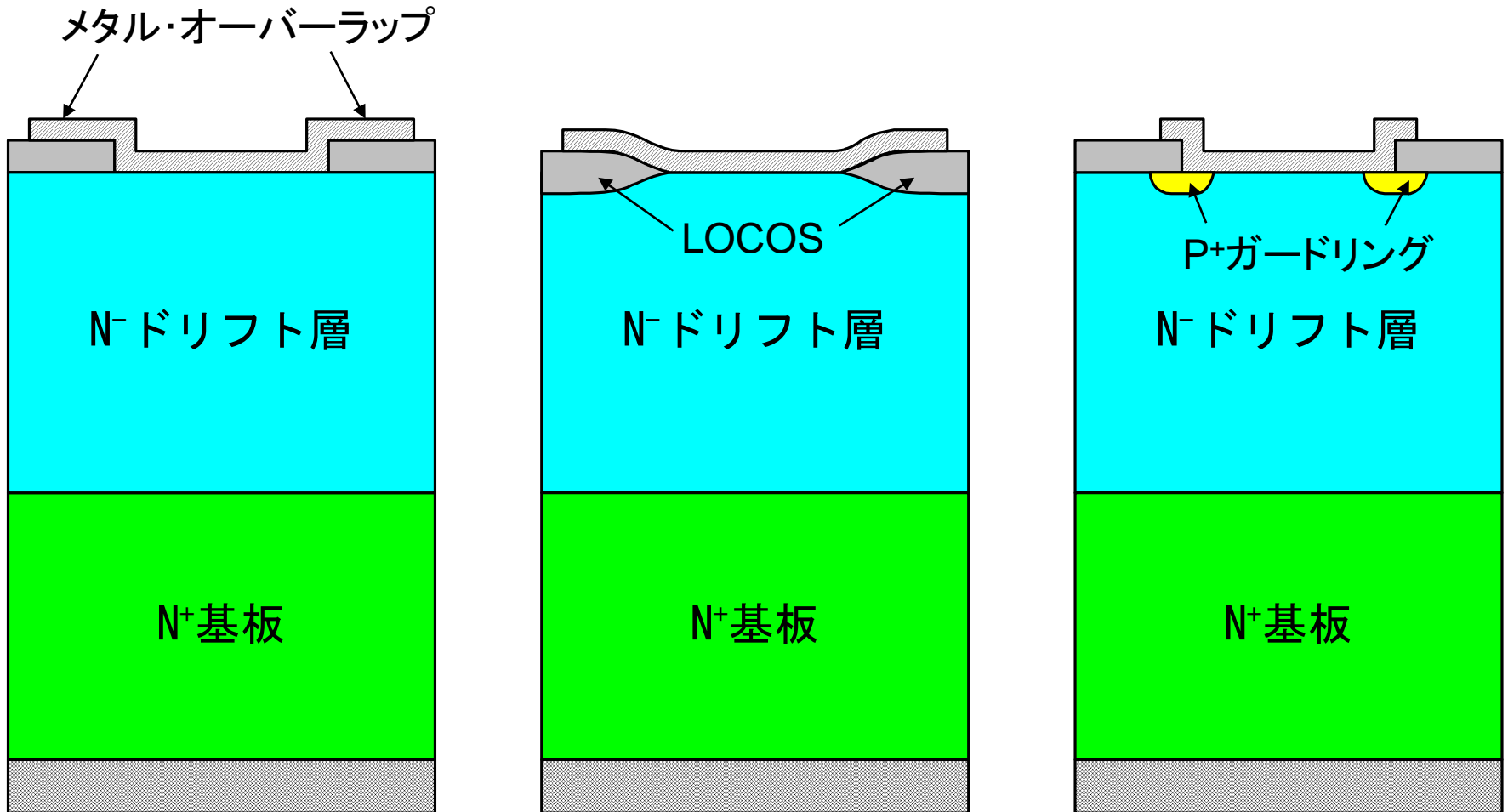
$$E_m = \frac{q}{\epsilon_s} [N_S a + N_D (W - a)]$$

バンド図



ドーピング量: $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
 $\Delta\phi_b$: 0.05 ~ 0.20 eV の低下

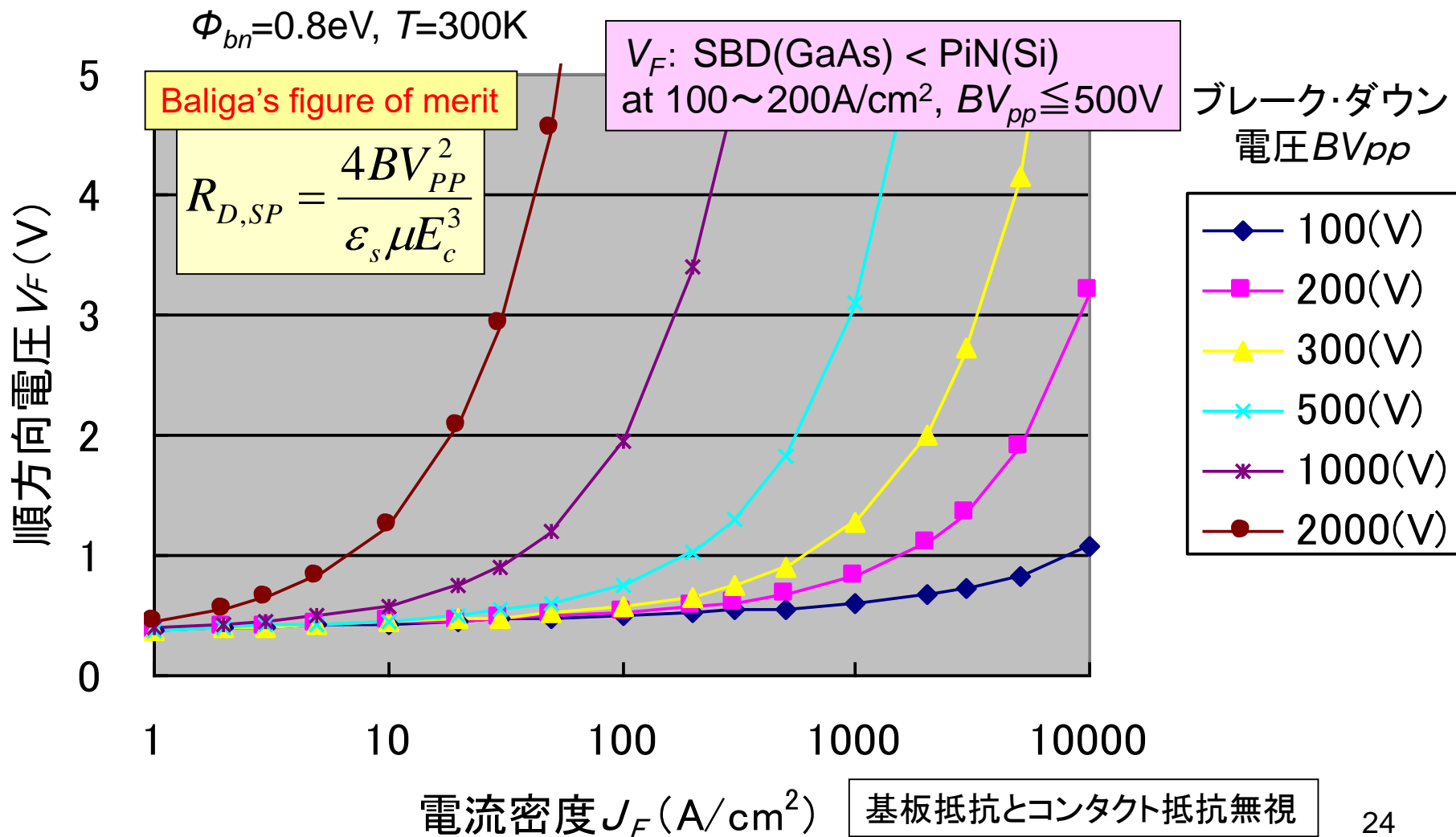
エッジ終端構造



エッジ終端の電界緩和

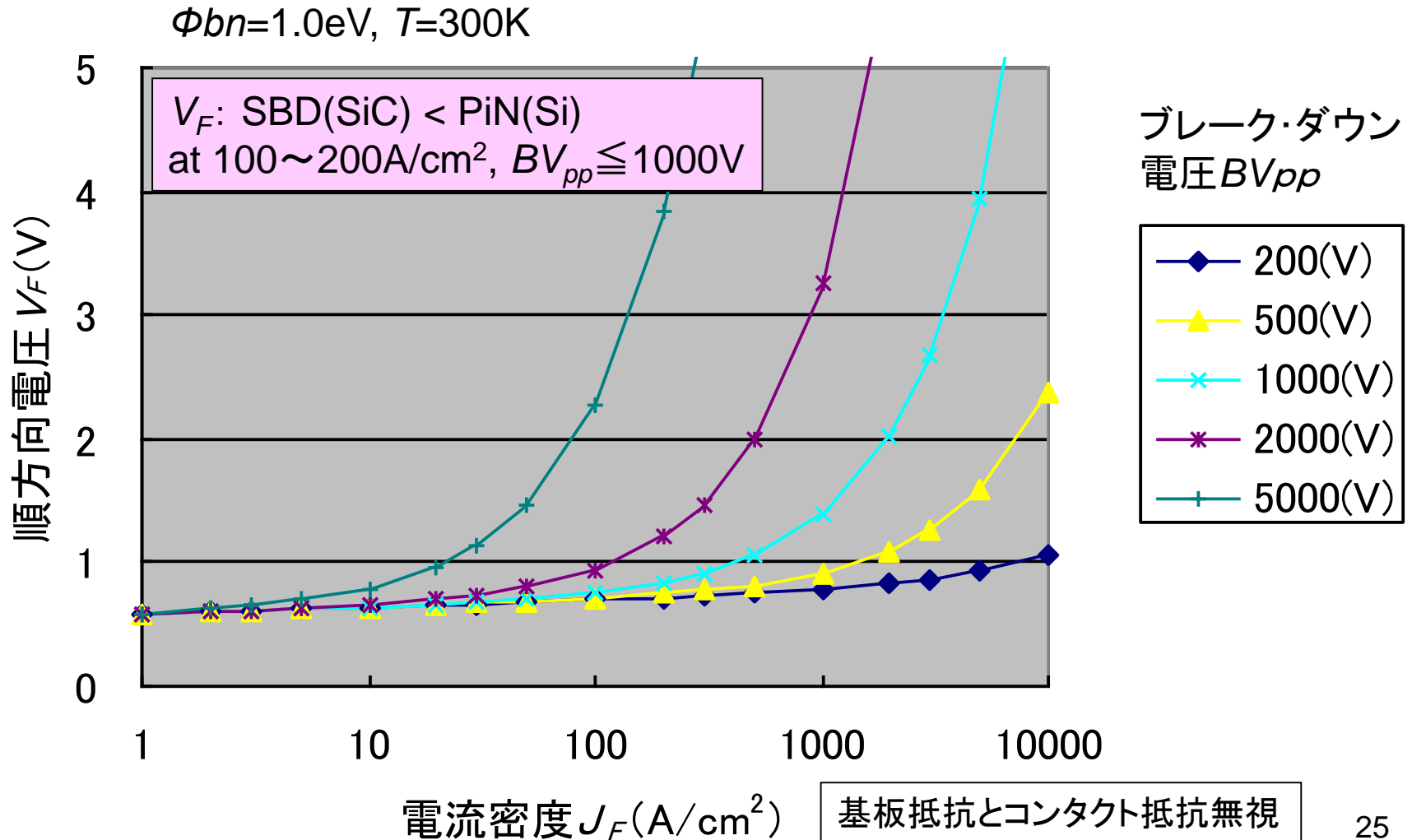
高電圧ショットキー・バリア・ダイオード: GaAs

— ブレーク・ダウン電圧の順方向特性への影響 —



高電圧ショットキー・バリア・ダイオード: 6H-SiC

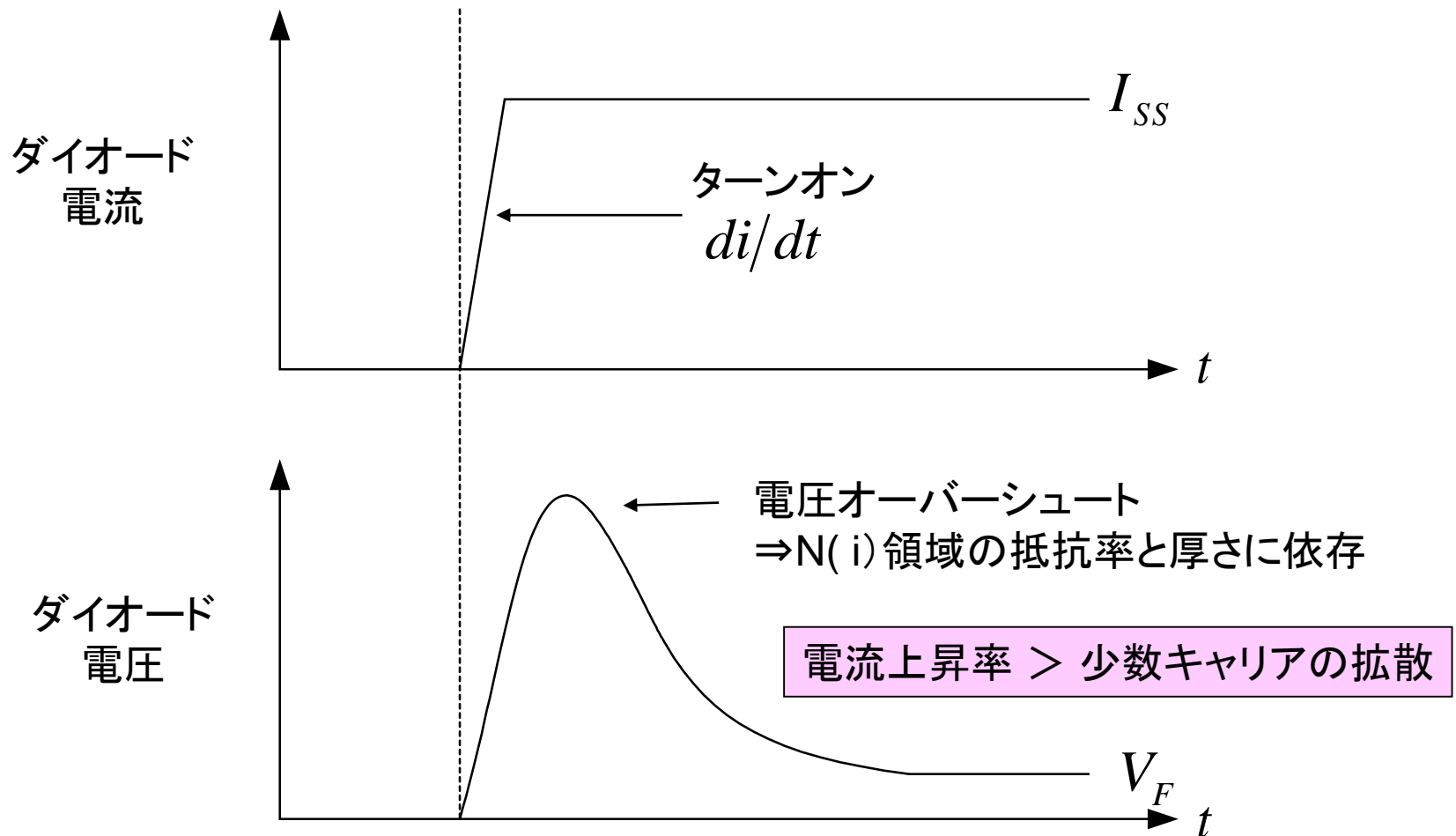
—ブレーク・ダウン電圧の順方向特性への影響—



PNダイオードの特性

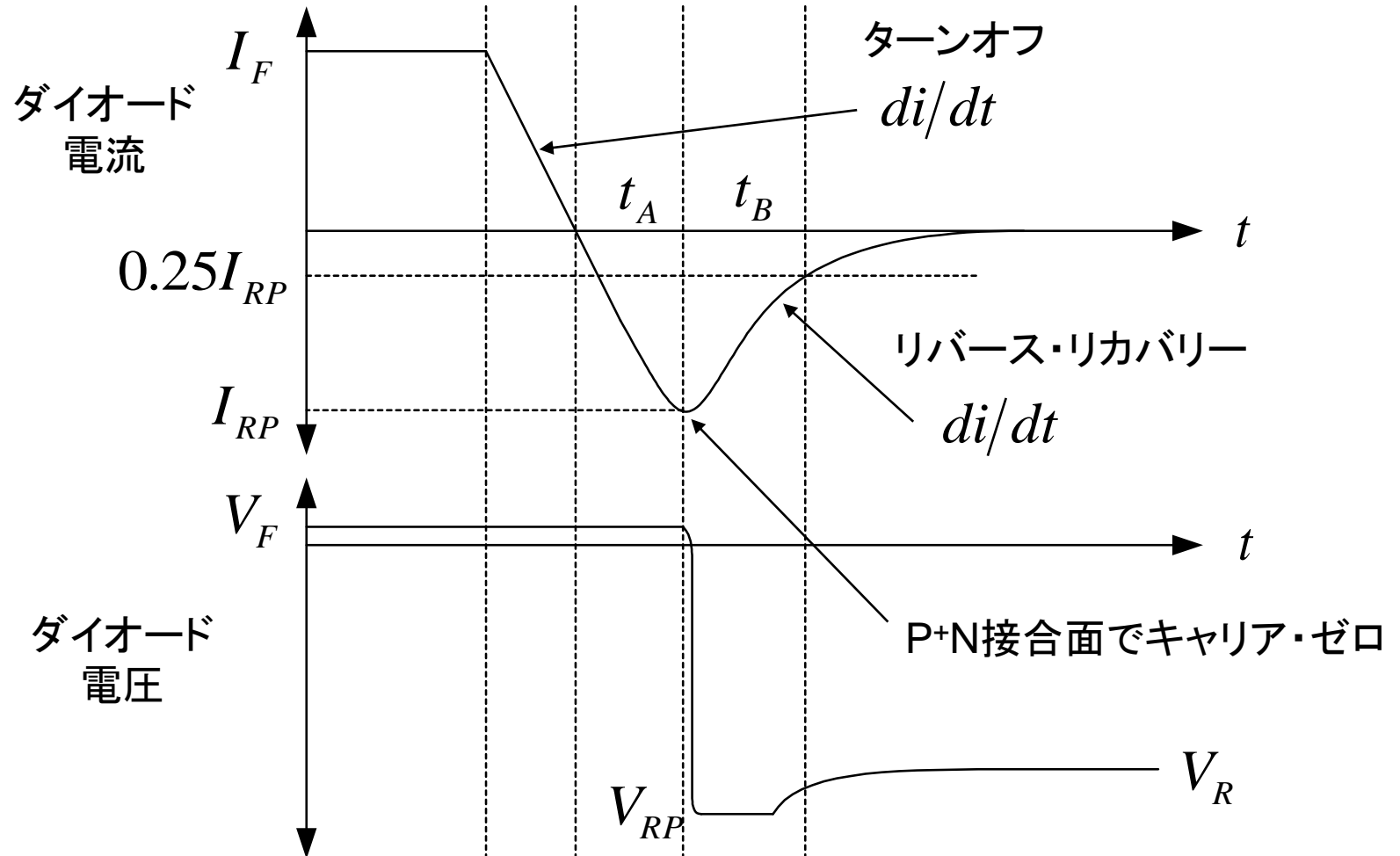
- フォワード・リカバリー特性
 - 電圧オーバーシュート(高 di/dt のターンオン時に発生)
 - 理由:ターンオン時から定常状態へ向けてN(i)領域の抵抗変化
 - { ターンオン時高抵抗:N(i)領域への不十分な少数キャリア注入
 - { 定常時低抵抗:N(i)領域への十分な少数キャリア注入
- リバース・リカバリー特性
 - 逆電流(ターンオフ時に発生)
 - 理由:N(i)領域に蓄積された少数キャリアの除去
 - 電圧オーバーシュート
 - 理由:回路内インダクタンスを流れるリバース・リカバリー di/dt
- N(i)領域の設計
 - 必要な逆耐圧を確保後、N(i)領域の抵抗低減

フォワード・リカバリー特性 -PiNダイオード-



リバース・リカバリー特性

—PiNダイオード—



順方向電流(極低/低レベル注入) —PiNダイオード—

- 極低レベルの注入

- 空乏層内の再結合電流

$$J_F = \frac{qn_i W_D}{2\tau_{SC}} \left(e^{\frac{qV_a}{2kT}} - 1 \right)$$

- 低レベルの注入

- 中性領域へ注入された少数キャリアの再結合電流

- 少数キャリア ≪ 多数キャリア

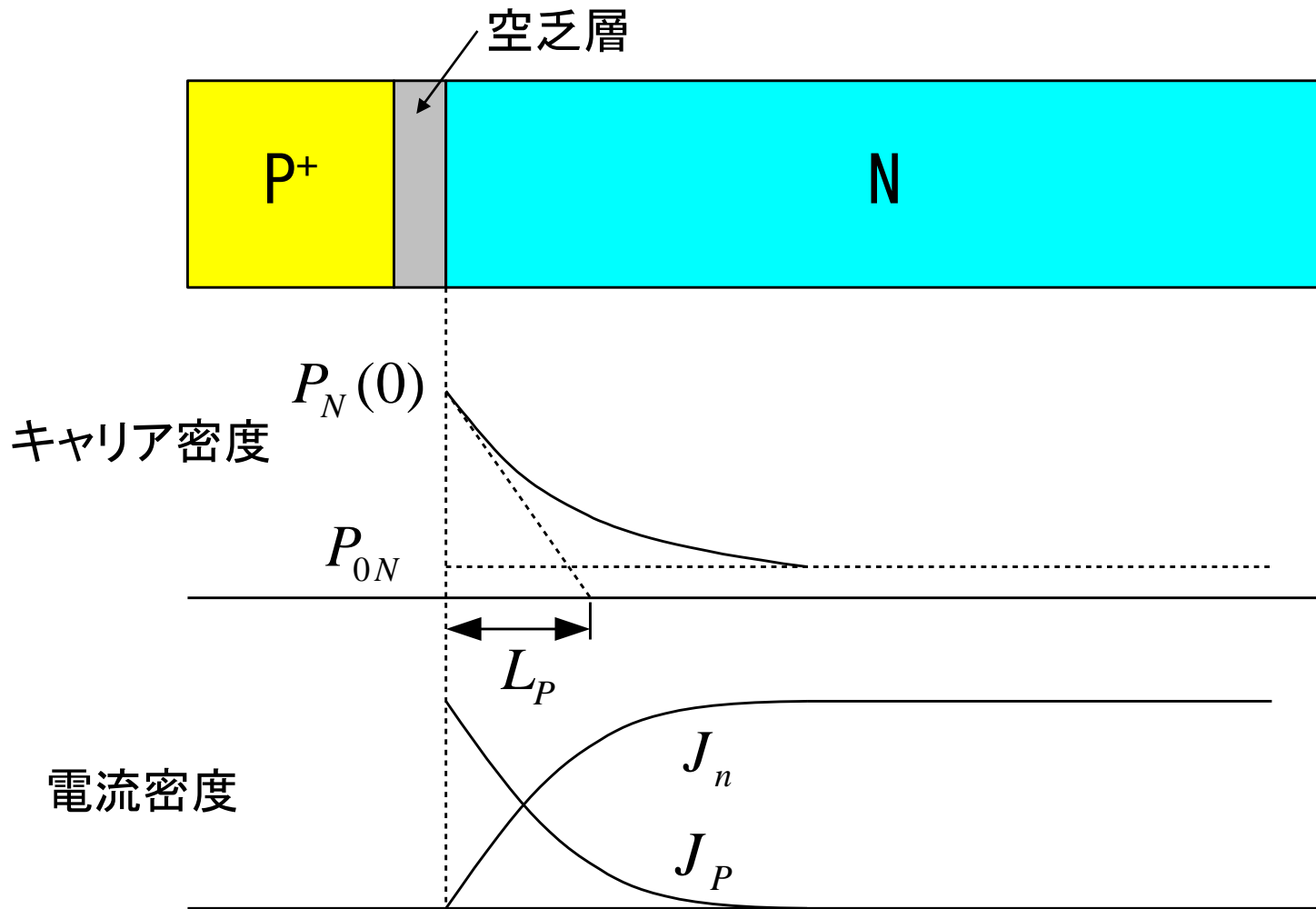
$$J_P = \frac{qD_P P_{0N}}{L_P} \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right)$$

N領域の幅 ≫ L_P (少数キャリア拡散長)

$$J_P = \frac{qD_P P_{0N}}{L_P \tanh(W/L_P)} \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right)$$

N領域の幅 ≃ L_P (少数キャリア拡散長)

低レベル注入のP-N接合



順方向電流（高レベル注入）

－PINダイオード－

- 高レベル注入

- 注入キャリア密度 \gg ドーピング密度 (N型)
- $n(x) = p(x)$: N領域の電荷中性
- N領域の抵抗の大幅な低下 \Rightarrow 伝導度変調
- N領域、アノードとカソード端での再結合電流

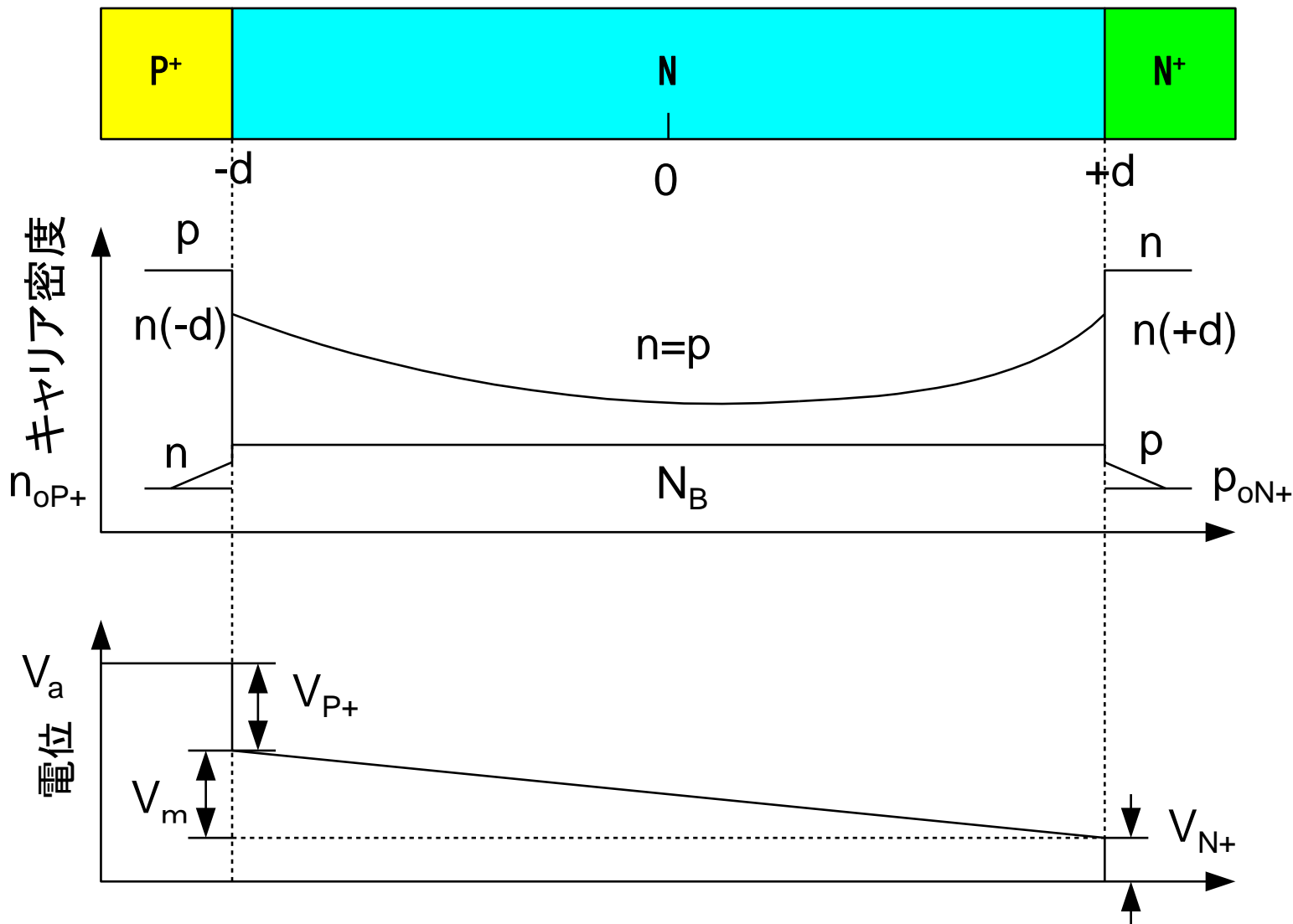
$$J = \int_{-d}^{+d} q \frac{n(x)}{\tau_{HL}} dx = \frac{2qn_a d}{\tau_{HL}}, \quad n_a: \text{平均キャリア密度}$$

(アノードとカソード端での再結合無視)

キャリア密度は、電流密度に比例して増大する。
 \Rightarrow キャリア密度の増大に比例して伝導率も増大する。
 \Rightarrow **N領域の電圧降下は、電流密度に依存しない。**

PNダイオードのキャリアと電位分布

—高レベル注入—



高レベル注入時の電流特性 1

- 連続の式

$$\frac{dn}{dt} = 0 = -\frac{n}{\tau_{HL}} + D_a \frac{d^2 n}{dx^2}, \quad D_a: \text{両極性拡散係数}$$

- 境界条件

- ① N⁺端 (+d) : ホール電流⇒ゼロ、電子電流⇒全電流
- ② P⁺端 (-d) : ホール電流⇒全電流、電子電流⇒ゼロ

$$\text{① } J = 2qD_n \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=+d}, \quad \text{② } J = -2qD_p \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=-d}$$

電流 = 拡散電流 + ドリフト電流

高レベル注入 : $n=p$

高レベル注入時の電流特性 2

- キャリア密度

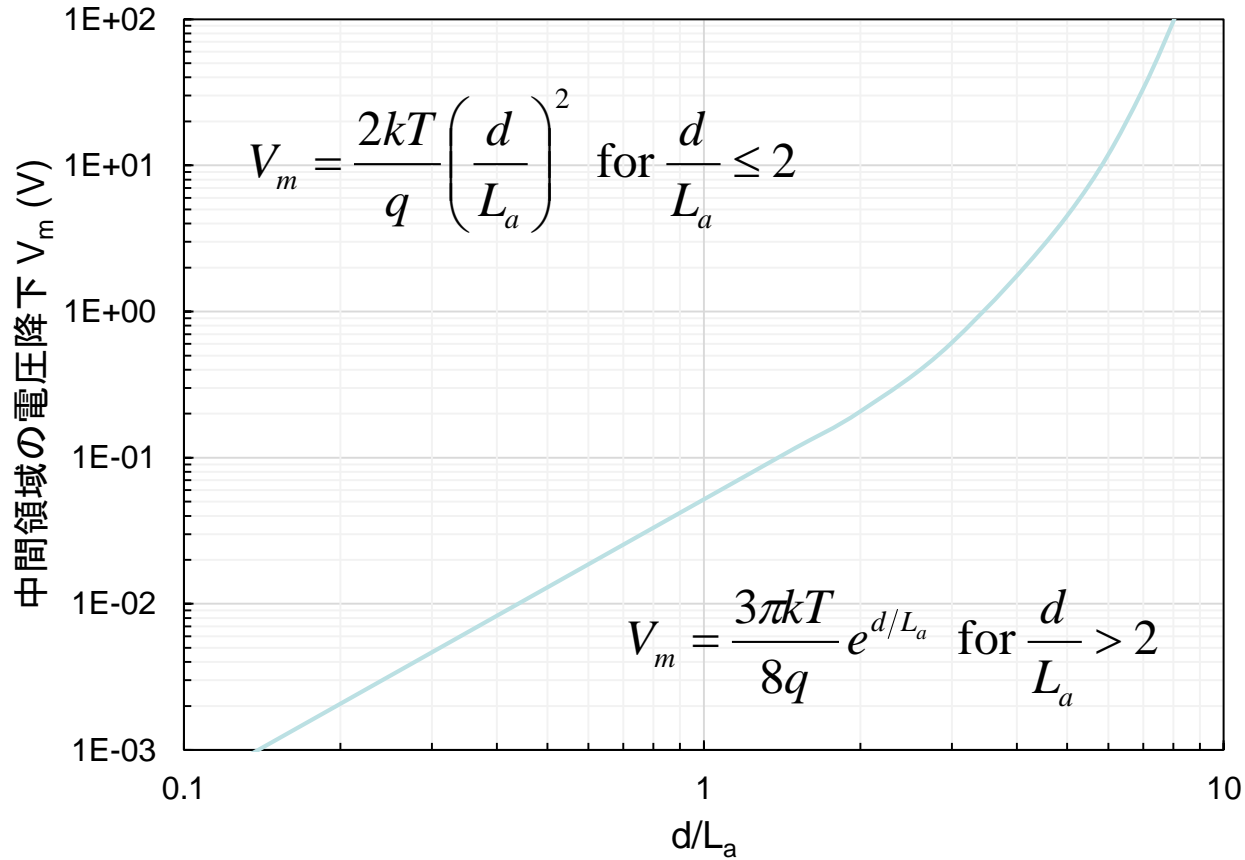
$$n = p = \frac{\tau_{HL} J}{2qL_a} \left[\frac{\cosh(x/L_a)}{\sinh(d/L_a)} - \frac{\sinh(x/L_a)}{2 \cosh(d/L_a)} \right], \quad L_a = \sqrt{D_a \tau_{HL}}$$

- 中間領域 (N領域) の電圧降下 (近似)

$$V_m = \frac{2kT}{q} \left(\frac{d}{L_a} \right)^2 \quad \text{for } \frac{d}{L_a} \leq 2, \quad V_m = \frac{3\pi kT}{8q} e^{d/L_a} \quad \text{for } \frac{d}{L_a} > 2$$

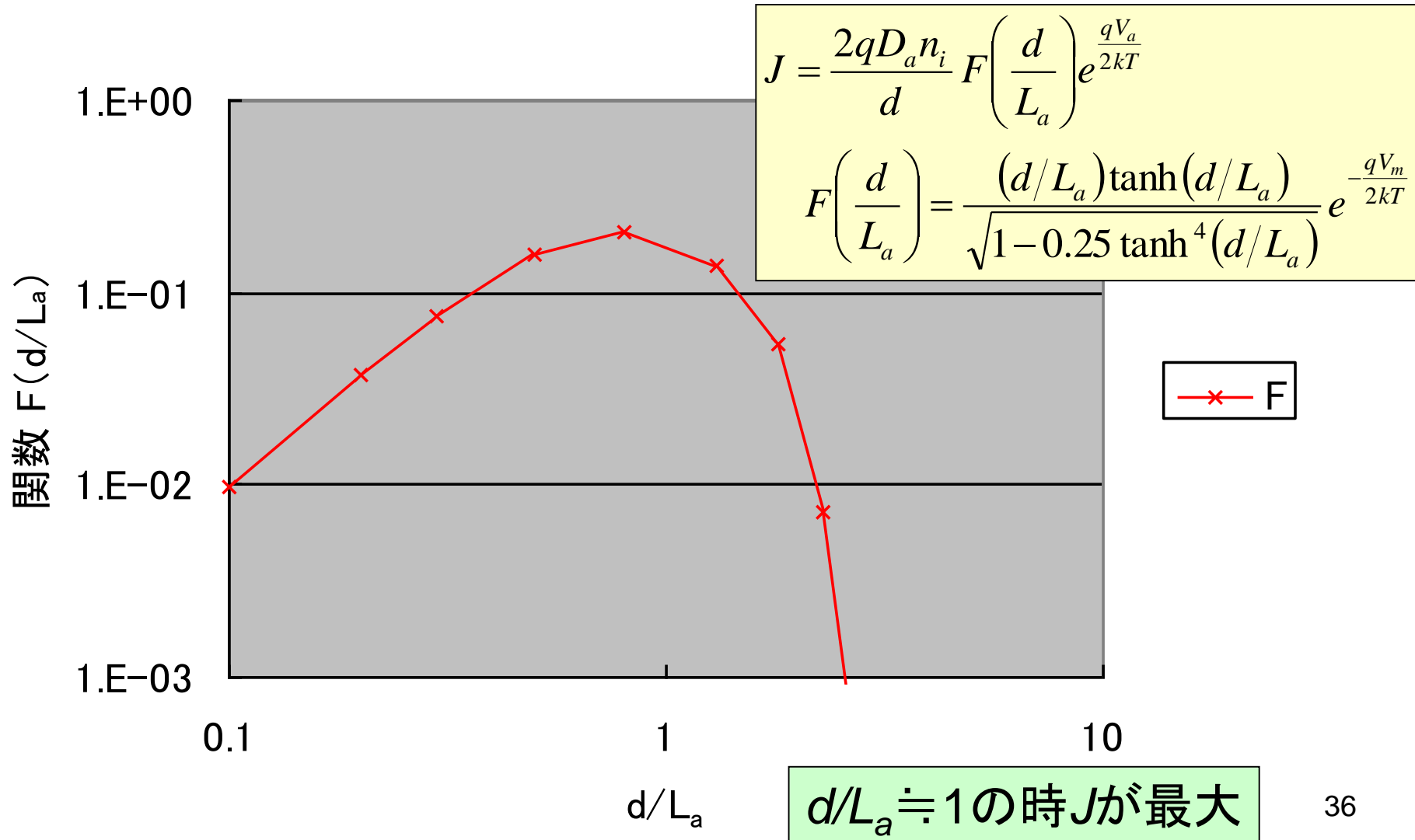
V_m は電流密度に依存しない。
⇒ キャリア密度は、電流密度に比例して増大するため。

高レベル注入時の電圧降下 —PiNダイオード—



高レベル注入時の電流

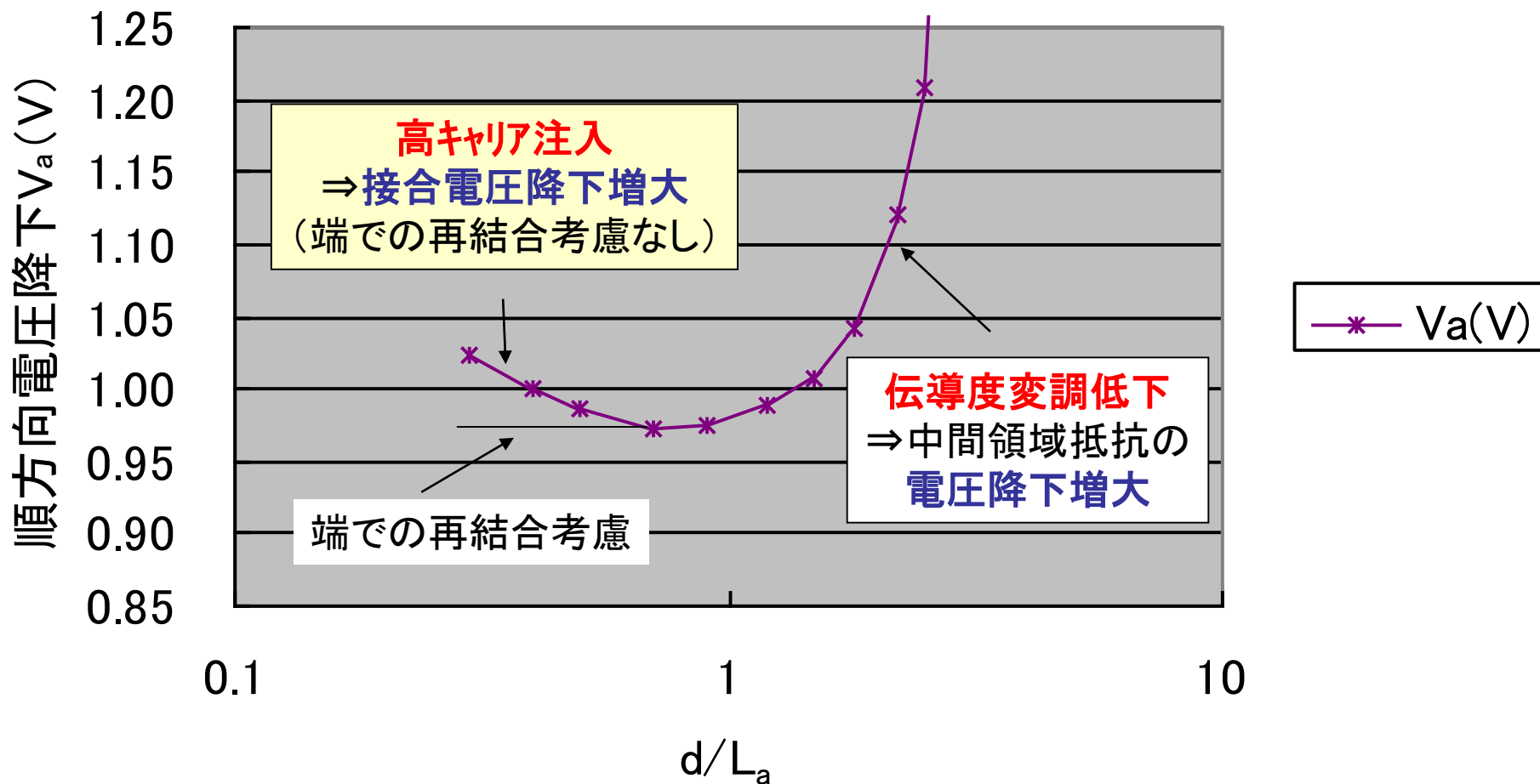
— イント領域での再結合がない場合 (PIN) —



順方向電圧降下 V_a と d/L_a の関係

— PiNダイオード —

$J=280\text{A/cm}^2$



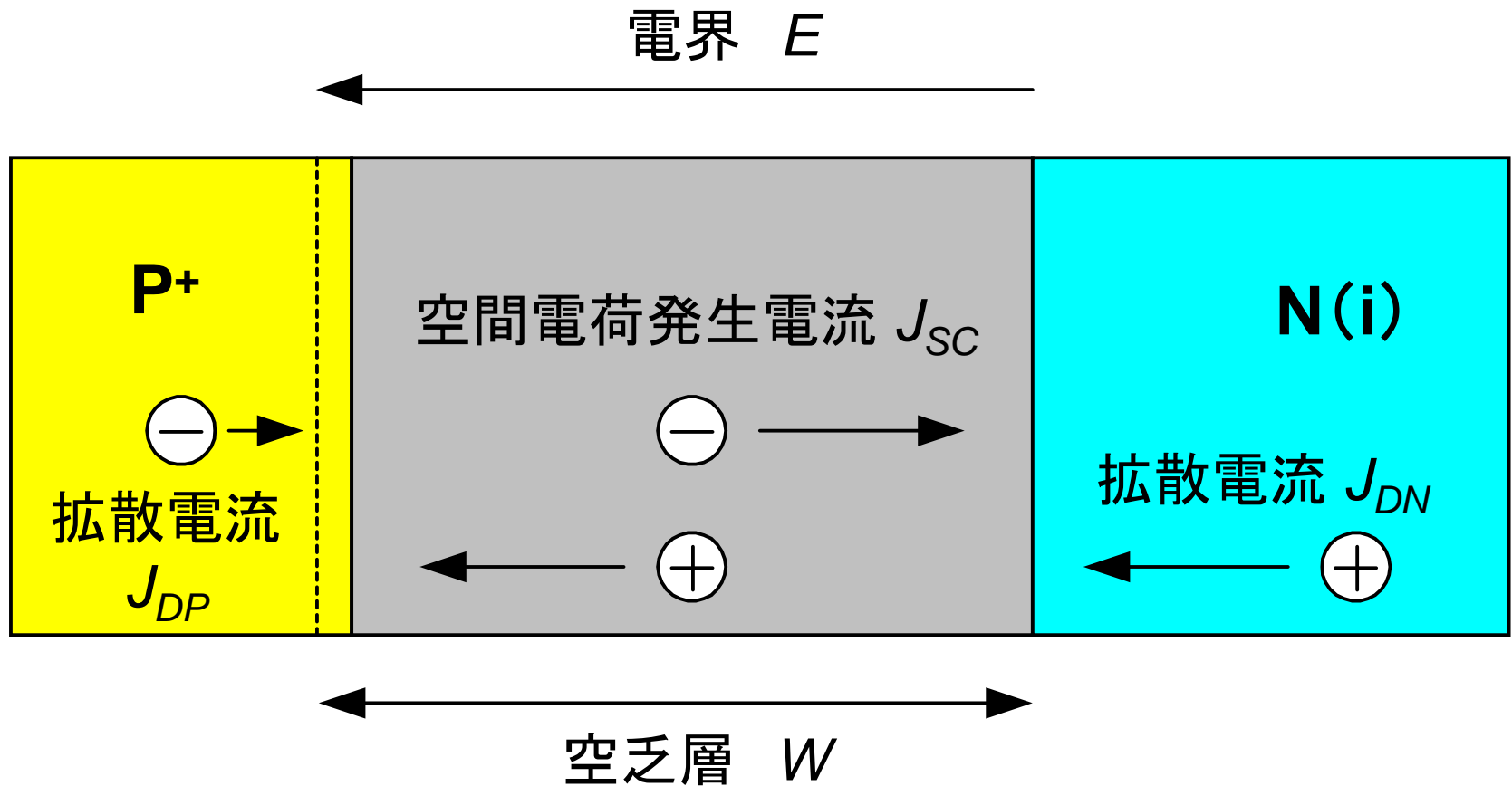
順方向電流まとめ

－PiNダイオード－

- 極端に低い電流密度（極低レベル注入）
 - －空間電荷発生電流 $\Rightarrow J_F \propto \exp(qV_a/2kT)$
- 低い電流密度（低レベル注入）
 - －拡散電流 $\Rightarrow J_F \propto \exp(qV_a/kT)$
- 中程度の電流密度（高レベル注入）
 - －両極性拡散 ($n=p$) $\Rightarrow J_F \propto \exp(qV_a/2kT)$
- 非常に高い電流密度
 - －エント領域での再結合
 - －キャリア-キャリア散乱による拡散長の減少

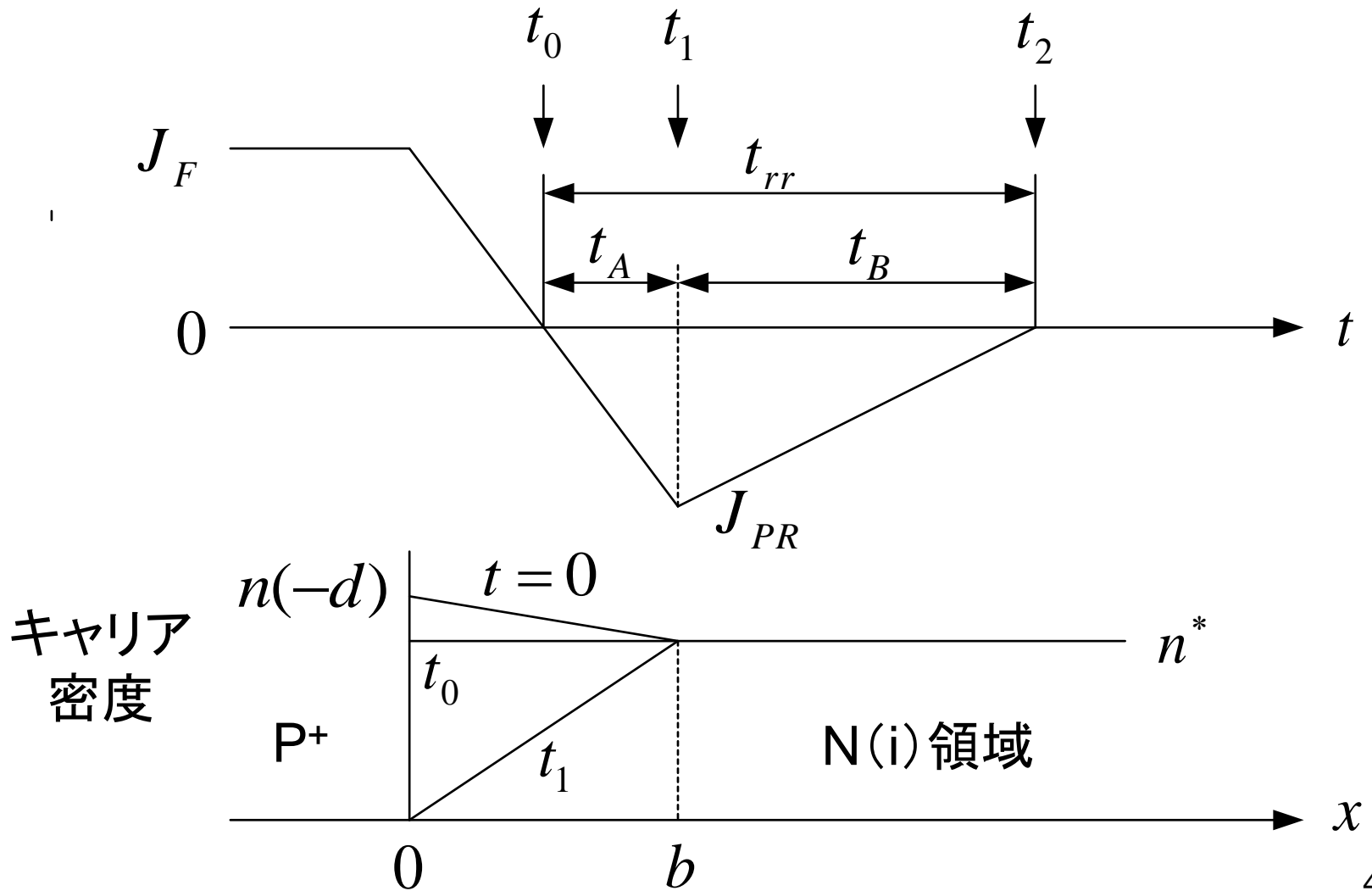
\Rightarrow 指数関数からのずれ

PNダイオード逆方向リーク電流



$$J_L = J_{DP} + J_{SC} + J_{DN} = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{qW n_i}{\tau_{sc}} + \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D}$$

PNダイオード・リバーブ・リカバリー特性



リバース・リカバリー特性解析: J_{PR}

- J_{PR} の導出

$$J_F = 2qD_n \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=-d}, \quad \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=-d} = \frac{n(-d) - n^*}{b}$$

$$\Rightarrow b = \frac{2qD_n [n(-d) - n^*]}{J_F}$$

$$J_{PR} = 2qD_n \frac{n^*}{b}, \quad n^* = \frac{J_F \tau_{HL}}{2qd}$$

$$\Rightarrow J_{PR} = \frac{\tau_{HL} D_n}{bd} J_F$$

$$\left[\begin{array}{l} J = \int_{-d}^{+d} qR dx, \quad R = \frac{n(x)}{\tau_{HL}} \\ \Rightarrow J = \frac{2qn_a d}{\tau_{HL}} \end{array} \right]$$

- J_{PR} の低減

– 中間領域での τ_{HL} を低下させると、 J_{PR} は低減する。

リバース・リカバリー特性解析: t_{rr}

- t_{rr} の導出

$$\frac{1}{2} J_{PR} t_{rr} = Q_S = qn^* 2d = J_F \tau_{HL}, \quad \because J_{PR} = \frac{\tau_{HL} D_n}{bd} J_F$$

$$\Rightarrow t_{rr} = 2\tau_{HL} \frac{J_F}{J_{PR}} = \frac{2bd}{D_n}$$

t_{rr} の低減

\Rightarrow ① τ_{HL} を低減、② J_F に対し J_{PR} を増大

リバース・リカバリ特性解析: t_B/t_A

- t_A の導出

$$\frac{1}{2} J_{PR} t_A = Q_R(t_A) = \frac{1}{2} q b n^* = \frac{b \tau_{HL} J_F}{4d}, \quad \therefore n^* = \frac{J_F \tau_{HL}}{2qd}$$

$$\Rightarrow t_A = \frac{b \tau_{HL}}{2d} \frac{J_F}{J_{PR}}$$

- t_B と t_B/t_A の導出

$$t_B = t_{rr} - t_A = \left(2 - \frac{b}{2d}\right) \tau_{HL} \frac{J_F}{J_{PR}}, \quad \frac{t_B}{t_A} = \left(\frac{4d}{b} - 1\right)$$

ソフト・リカバリ $\Rightarrow t_B$ 領域の di/dt : 小 $\Rightarrow t_B/t_A$: 大 \Rightarrow **d :大、 b :小**

ライフタイム制御

- ファースト・リカバリー

$$t_{rr} = 2\tau_{HL} J_F / J_{PR} : \text{小} \Rightarrow \tau_{HL} : \text{小}、J_{PR} : \text{大}、J_F : \text{既定}$$

- ライフタイム低減の手法（再結合中心の形成）

- 不純物導入: Au拡散、Pt拡散
- 注入: 高エネルギー電子注入、プロトン注入、He注入

- 順方向電圧降下とリバース・リカバリー時間のトレードオフ改善

- 再結合中心の不均一分布導入
 - Nベースの中央領域 かつ P-N接合から離れた領域に再結合中心を形成
- プロトンやHeにより、再結合中心分布の狭帯化
 - Au、Pt拡散係数大(Si中)、電子注入⇒再結合中心の狭い分布は難しい。

- 再結合中心によるリーク電流の発生

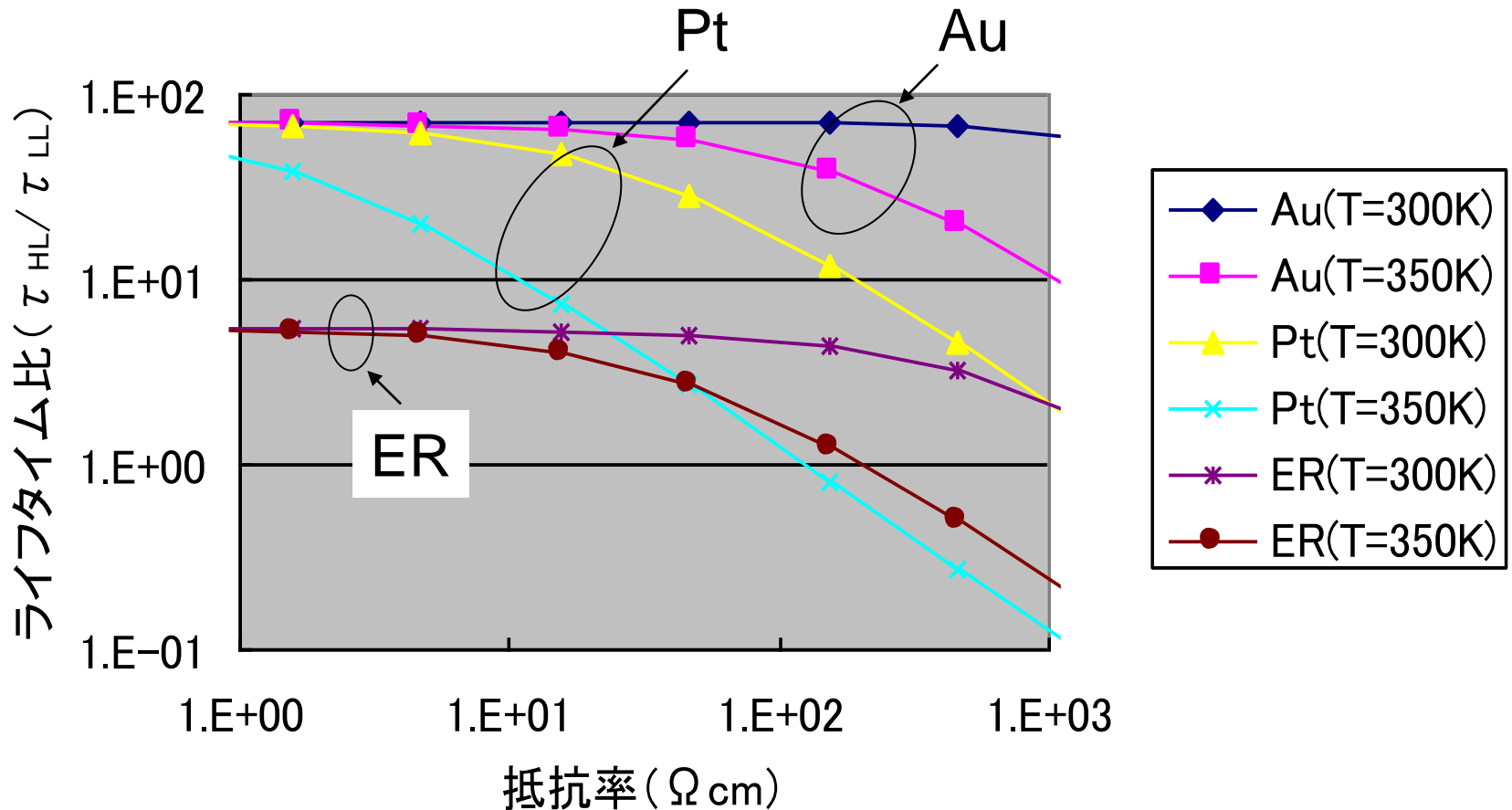
- 再結合レベル位置がエネルギーギャップの中央近傍: リーク電流大
- リーク電流: Pt拡散 < 電子注入 < Au拡散

- フォワード・リカバリー特性

- 再結合中心密度増加⇒フォワード・リカバリー特性の悪化(トレードオフの関係)

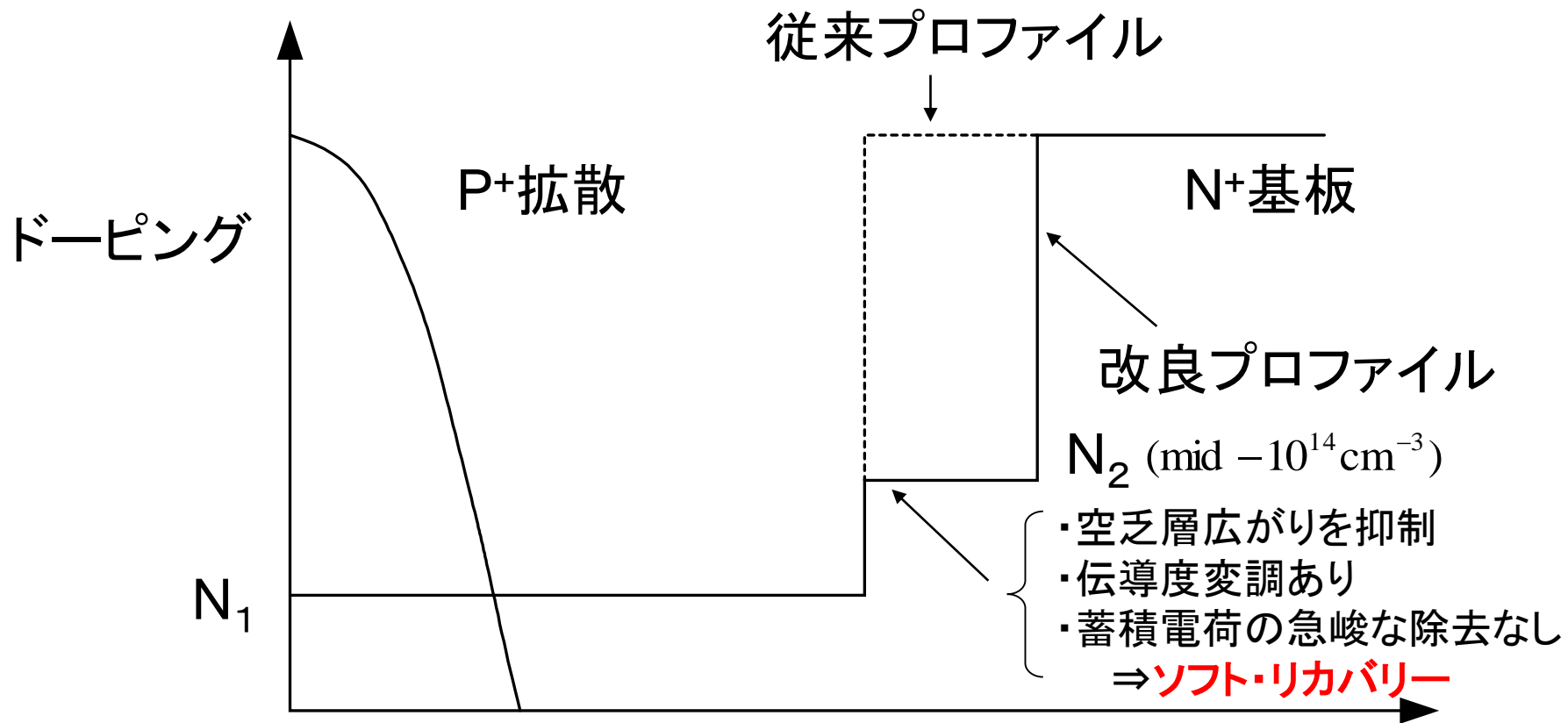
ライフタイム比の抵抗率依存性比較

— Au、Pt、電子照射(ER) —



Au(ERと比較): T_{HL} / T_{LL} 大 $\Rightarrow V_F$: 低、スイッチング・スピード: アップ

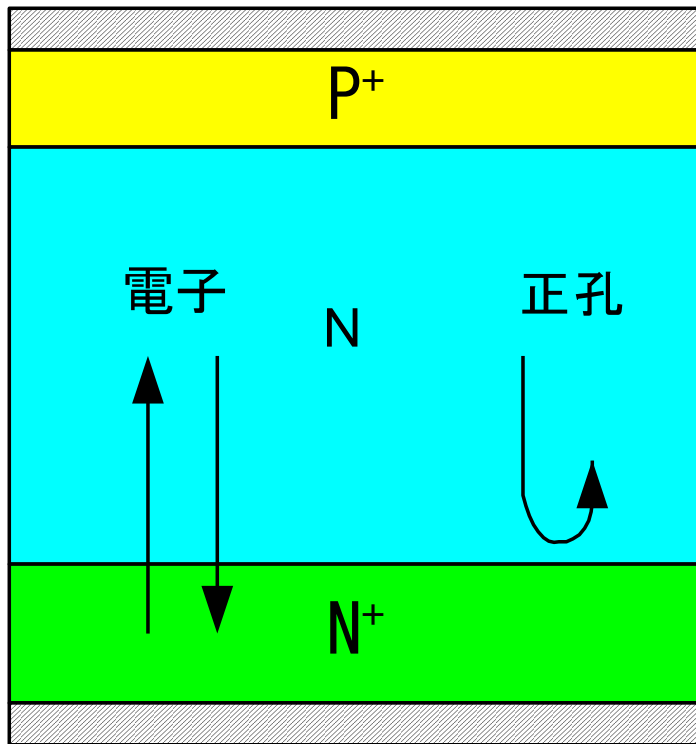
ドーピングプロファイル



階段接合 ⇒ リバース・リカバリーのスピードアップ

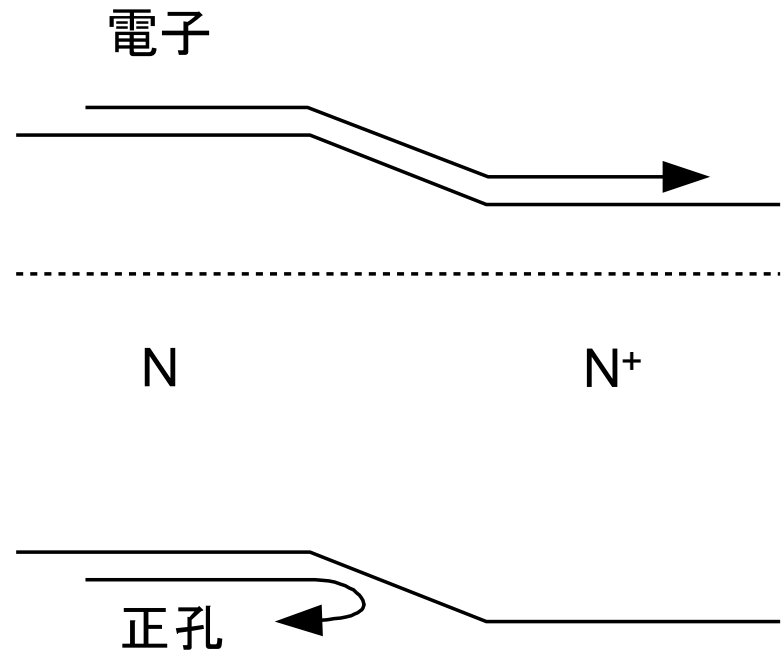
従来型オーミック・コンタクト

アノード



カソード

構造

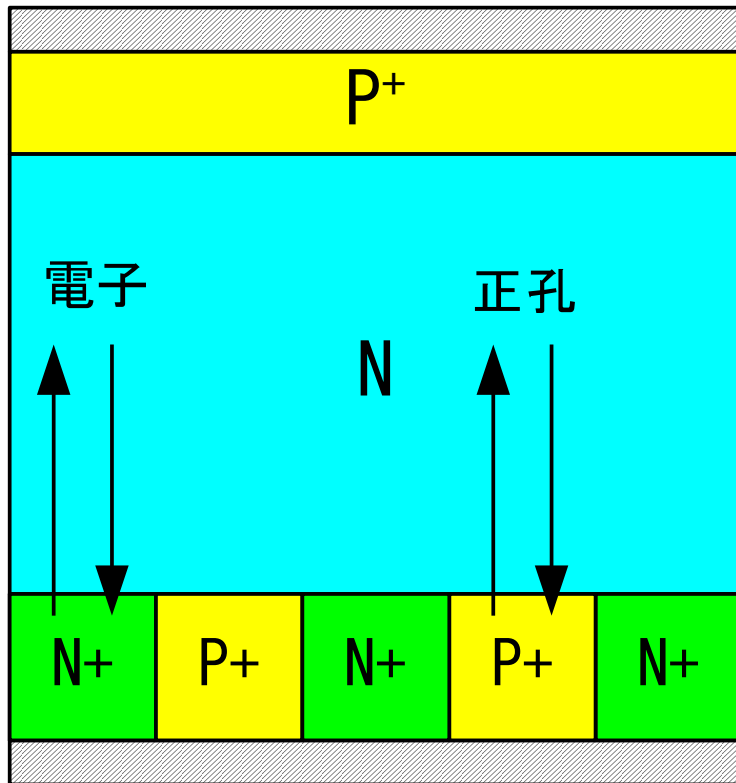


バンド図

改良オーミック・コンタクト

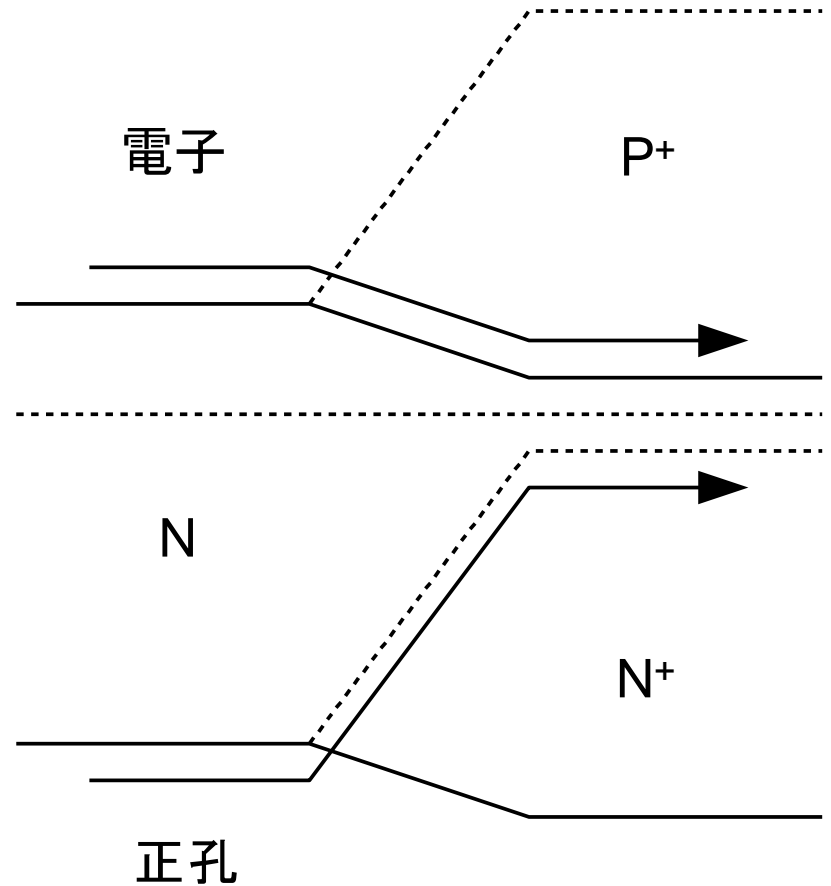
— P⁺とN⁺のモザイク構造 —

アノード



カソード

構造



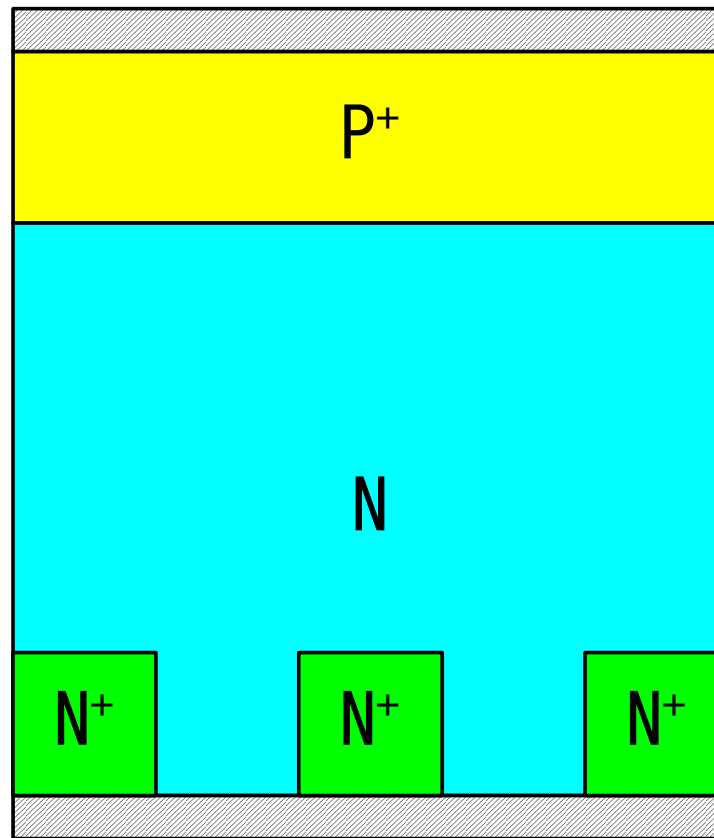
正孔

バンド図

改良オーミック・コンタクト

—ショットキー界面を持つ構造—

アノード



カソード

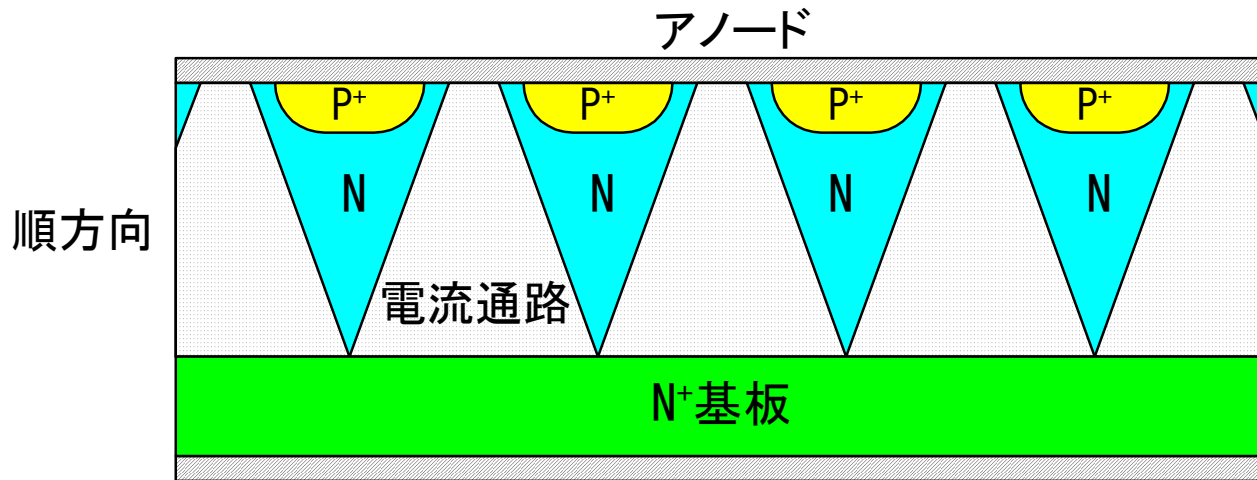
最大動作温度

- PiNダイオードでの消費電力

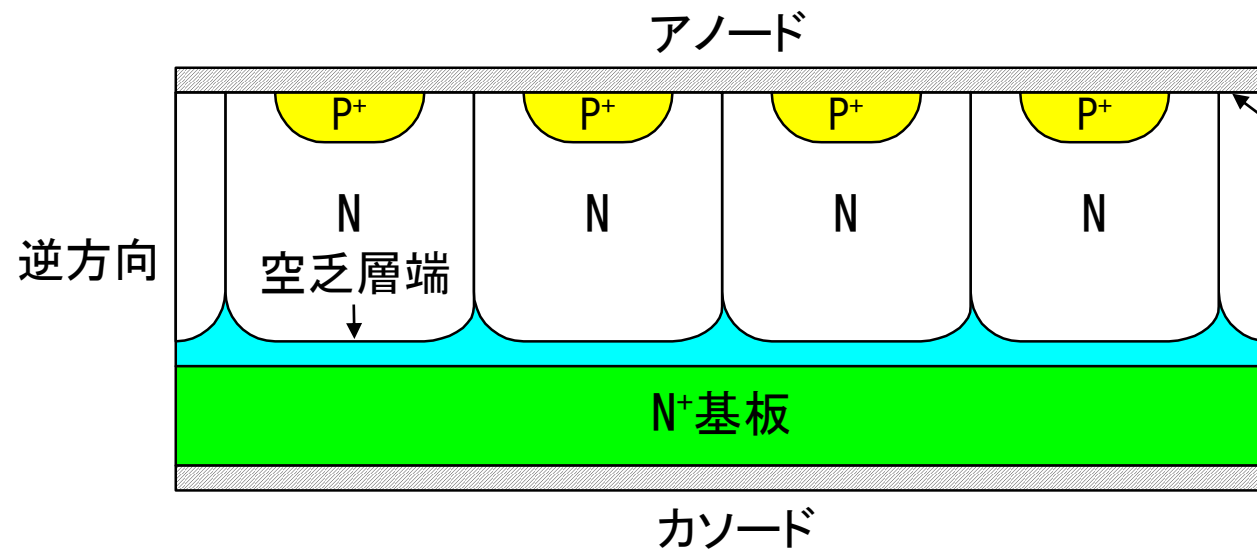
$$P_D = I_F V_F \frac{t_{on}}{T} + I_L V_R \frac{(T - t_{on})}{T}$$

- 温度が低い場合
 - 上式 第一項 > 第二項 (I_L 小による)
 - 温度上昇と共に V_F 低下 $\Rightarrow P_D$ 低下
- 温度が高い場合
 - 上式 第一項 < 第二項 (I_L 大による)
 - 温度上昇と共に I_L 増加 $\Rightarrow P_D$ 増加 (熱暴走)
- 動作最大温度
 - PiNダイオードでの消費電力 vs. 温度の関係 \Rightarrow 最小値

JBS (Junction Barrier Controlled Schottky) ダイオード

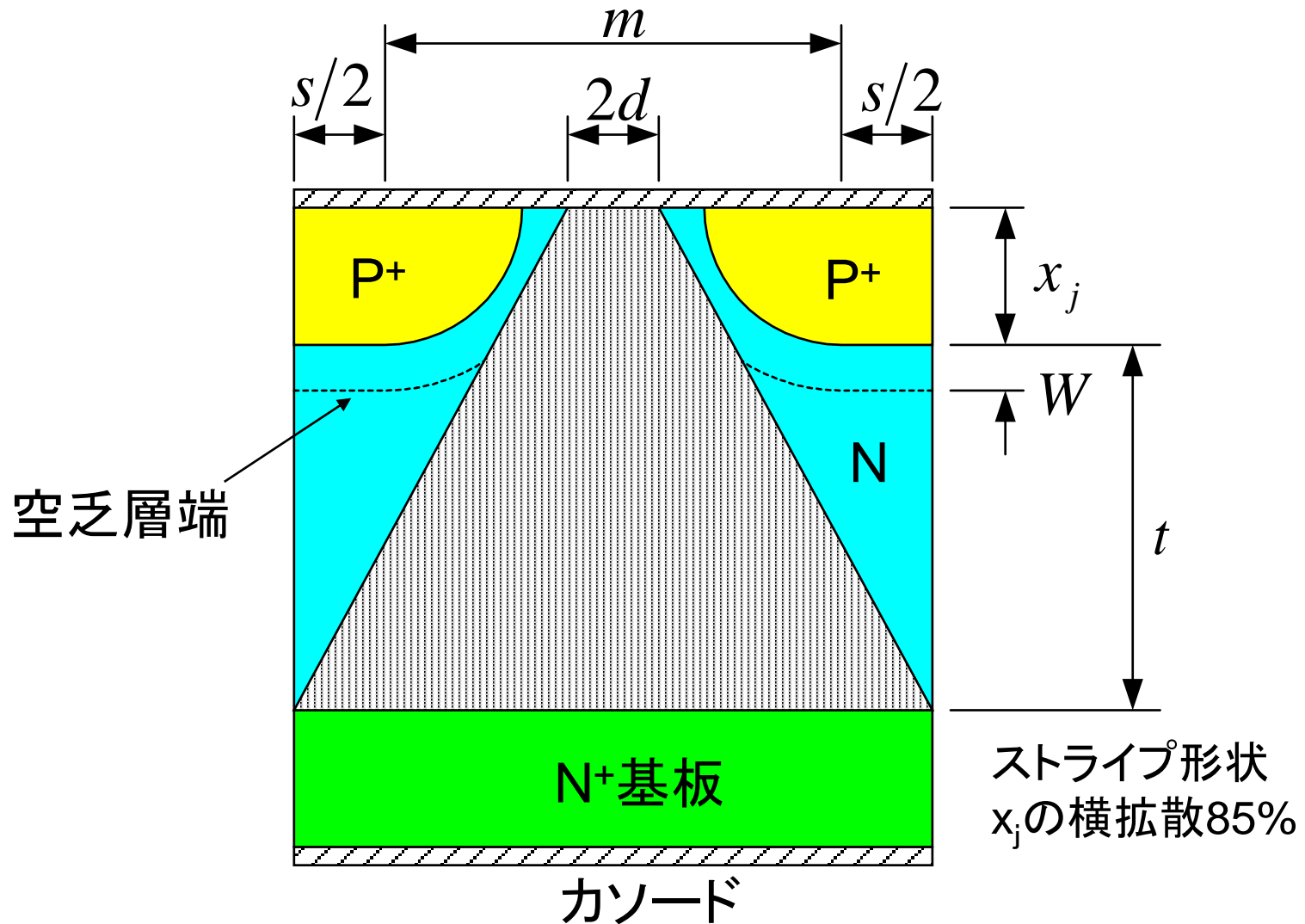


オン状態
↓
P⁺N接合
順方向バイアス無



空乏層広がり
(ポテンシャルバリア)
↓
**ショットキー・バリア
をシールド**
↓
**リーク電流低減
耐圧:アバランシェ破壊
(熱暴走なし)**
↓
 Φ_{bn} / V_F 低減

JBSダイオードの電流路(断面)



JBSの順方向特性

- ショットキー・バリアの電圧降下

$$V_{FS} = \phi_B + \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{J_{FS}}{AT^2} \right] = \phi_B + \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(m+s)}{2d} \frac{J_{FC}}{AT^2} \right]$$

$$\therefore J_{FS} = \frac{(m+s)}{2d} J_{FC}, \quad J_{FC}: \text{全JBS電流/セル面積}$$

- ドリフト領域の電圧降下

$$V_{FD} = \rho \frac{(x_j + t)(m+s)}{(m+s-2d)} \ln \left(\frac{m+s}{2d} \right) J_{FC}$$

- JBSの順方向電圧降下

$$V_F = V_{FS} + V_{FD}$$

狭い接合ウィンドウ幅(s)

⇒ 接合下のデッド・スペース活用 ⇒ 低 V_F

JBS逆方向特性

- ショットキー・バリアによるリーク電流

$$J_L = \left(\frac{2d}{m+s} \right) AT^2 \exp \left[- \left(\frac{q\phi_B}{kT} \right) \right] \exp \left(\frac{q}{kT} \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}} \right)$$

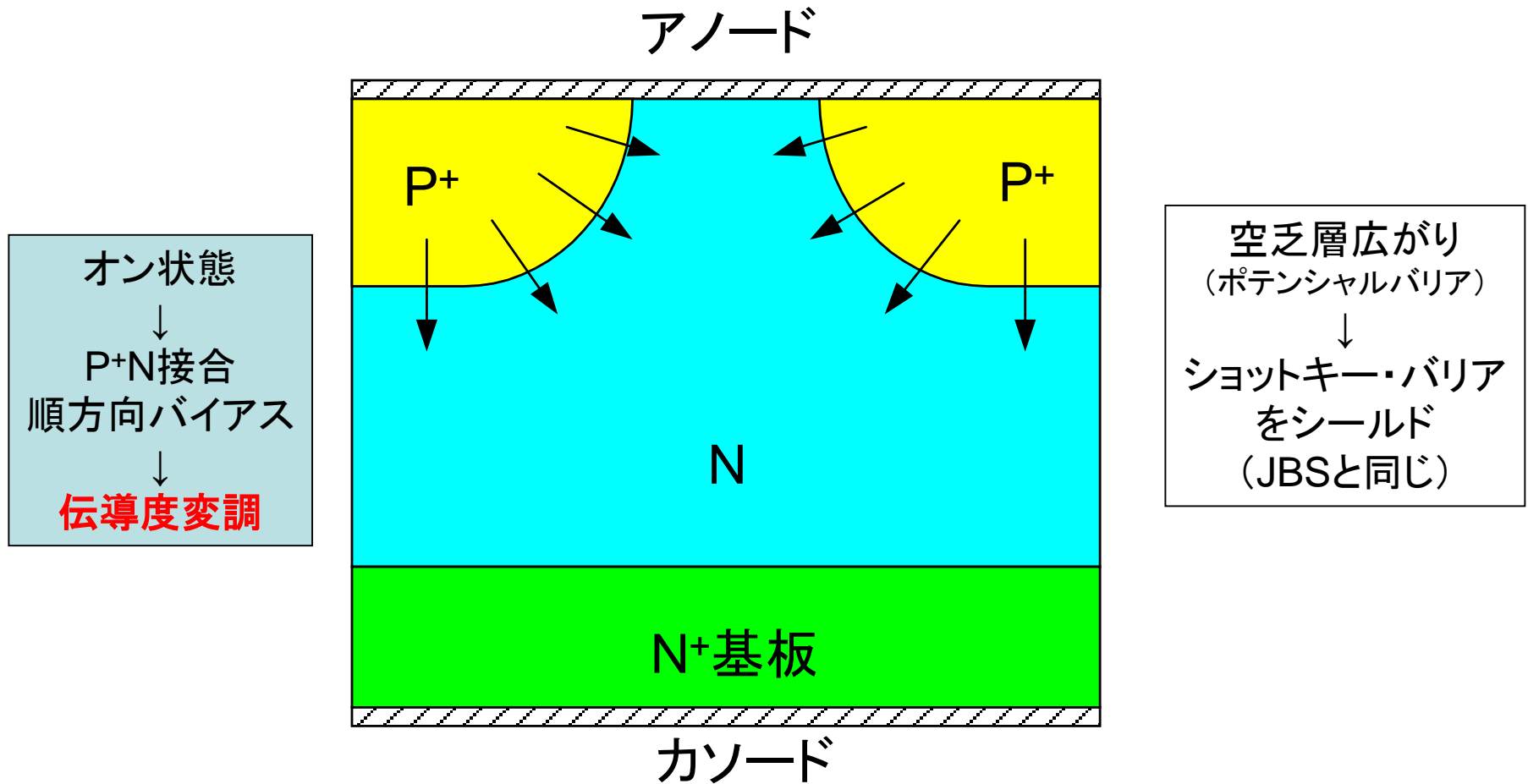
$$E = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s} (V_P + V_{bi})}, \quad V_P = \frac{qN_D}{8\epsilon_s} (m - 1.7x_j)^2 - V_{bi}$$

- 空間電荷発生と拡散によるリーク電流

$$J_{LD} = q \sqrt{\frac{D}{\tau} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qn_i W}{\tau}}, \quad W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_R + V_{bi})}$$

ショットキー・バリアに加わる逆電圧は、ピンチオフ電圧(V_P)で抑えられる。

MPS (Merged PiN/Schottky) ダイオード



蓄積電荷: MPS < PiNダイオード

MPSダイオード特性の特長

ーリバーース特性ー

- リバーース・リカバリー特性
 - $J_{PR} \Rightarrow MPS < PiN$
 - 理由:蓄積電荷: $MPS < PiN$
 - 効果:パワーロス低減、回路内トランジスタへのストレス低減
 - $di/dt \Rightarrow MPS < PiN$
 - 理由:① J_{PR} 小
 - ② ブロッキング・ジャンクションでの低キャリア密度(MPS)
早い逆電圧の立上り \Rightarrow 多くの残留電荷(MPS)
 - 効果:電圧スパイク対策に有効(ソフトリカバリー)
- リバーース・ブロッキング特性
 - 逆耐圧 $\Rightarrow MPS \doteq PiN$ (ポテンシャル・バリアによる)
 - 高温リーク電流 $\Rightarrow MPS > PiN$ (ショットキー領域のため)
 - 対策:高いショットキー・バリア高さ(0.8V)の採用

パワーダイオードのトレンド

- VLSI用電源電圧の低下に対応
 - ⇒ JBS(低い順方向電圧)
- パワートランジスタの高電圧、高周波化に対応
(高スピード、高電圧(100~600V)ダイオードの要求)
 - ⇒ PiNダイオード
 - ⇒ MPSダイオード(Si技術)
 - ⇒ SiCのショットキーダイオード