

パワーデバイスの信頼性

極めて複雑・問題山積

- ・高電圧
- ・大電流
- ・大寸法
- ・温度上昇による破壊
- ・電子的な破壊
- ・構成材の疲労

複数の劣化過程

- ・材料自体 (Si, SiO₂, 金属接合)
- ・表面構造因子の変化(電荷分布)
- ・構成材の疲労

劣化機構が未分明

- ・確認実験が難しい

使用方法は適正?

- ・最大定格, 定格電流の意味?

16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.1): 高田

1

パワーデバイスの品質保証

・初期品質 :

耐圧, リーク電流(pn接合, SiO₂)

オン電圧, h_{FE}, 熱抵抗

動作限界(SC.SOA, 遮断耐量, リカバリ耐量)

・長期ストレス : 電圧印加, 高温, (宇宙線露出),

断続通電(パワーサイクル),

耐湿性,

・寿命評価? : 熱抵抗, オン電圧,

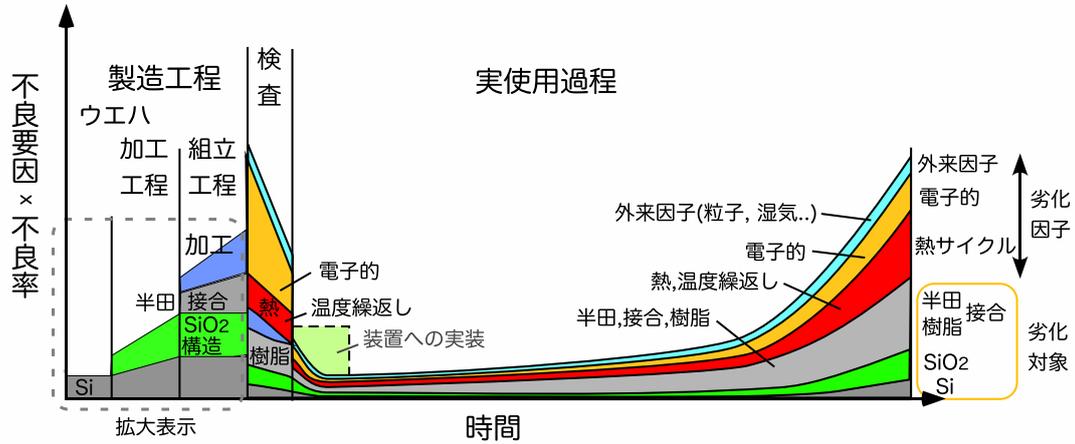
16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.2): 高田

2

故障要因と故障率の時間変化

各過程での不良原因の目安の割合



16年8月1日月曜日

3

(講義資料 2016 #15-p.3): 高田

検査工程では、電気的なストレスが加わり、判定条件に近い欠陥にダメージが入ったまま良品と判定されることもあり得る。

また、電力用素子を装置に実装する方法や駆動条件によって故障が起きることもあり得る。半導体素子を使い始めると、試験から漏れたものが故障する可能性が高い。

パワーデバイスの劣化機構

	起因		過程	結果	
				微視的	巨視的
結晶環境	歪み, (欠陥)	→	応力繰返し	機械的疲労	クラック
	温度: kT			結晶欠陥	τ 小, μ 小, I_R 大, ρ 変化
	電界: qEL_m		電界局所集中-I	反転層伸展	耐圧劣化
	光: $h\nu$		最外殻電子剥離	アバランシェ	宇宙線破壊
	外来粒子: $mv^2/2$			電子, 正孔蓄積	絶縁体のリーク増大
担体	熱運動: $mv_{th}^2/2$, ドリフト運動: $mv_d^2/2$	→	構成原子の移動	金属断線	エレクトロマイグレーション
				結晶欠陥成長	τ 小, μ 小, I_R 大, (ρ 変化)
汚染物	異物 (表面, 内部)	→	電界局所集中-II	構成分子破壊	酸化膜の絶縁劣化
	酸化膜中 可動イオン (Na^+)			蓄積/反転層	V_{th} 変動, 耐圧劣化
	半導体中 金属		再結合中心源	τ 低下	(μ 小), I_R 大

16年8月1日月曜日

4

(講義資料 2016 #15-p.4): 高田

半導体結晶中の欠陥成長は、電流密度が大きいGaAs発光素子で問題になった。

程度の差こそあれ、Siでも起こりえると考えられる。現在、SiCで大きな問題となっている。

SiO₂のリーク電流と降伏特性

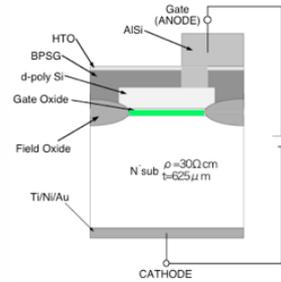


Fig.1 Schematic Crosssection of MOS Capacitor

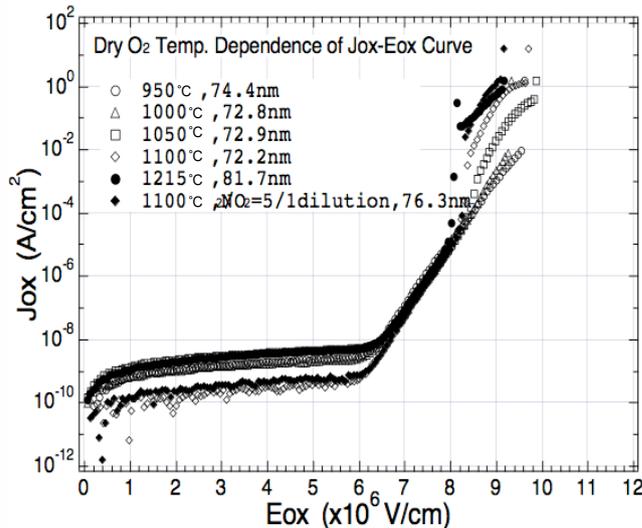


Fig.2 Temperature dependency of J_{OX} - E_{OX}, 75nm, dry SiO₂

電流-電界強度 特性

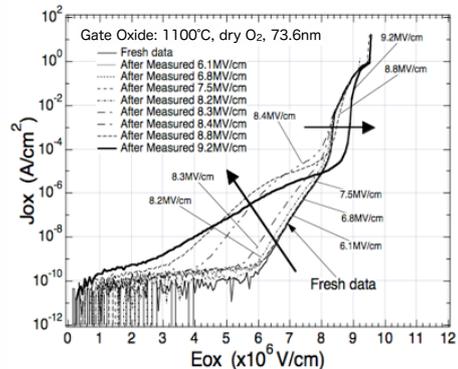


Fig.9 Stress-induced Leakage Current, 1100°C, dry O₂, 74nm

J-E 特性のストレス履歴による変化

ISPSD'95 Nakamura

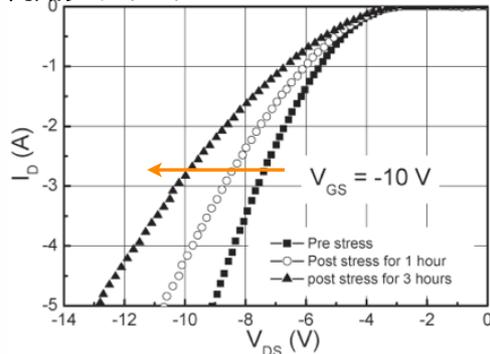
16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.5): 高田

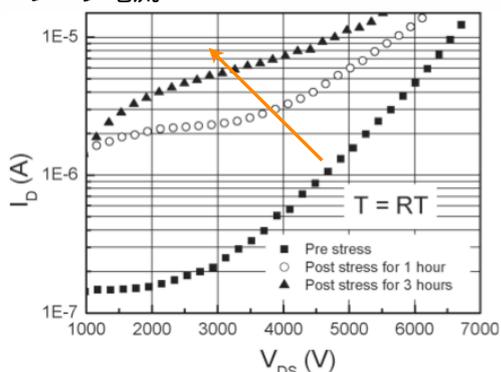
酸化膜リーク電流は、ある値以上流すと履歴が残る(リーク電流が増大する)。このため、製品出荷検査がきちんと出来ない。不良品が混ざっている可能性がある。

10kV 10A SiC MOSFETの劣化

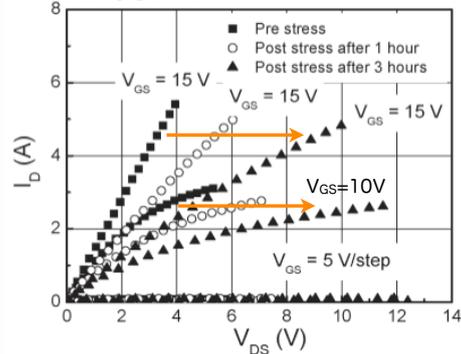
内蔵ダイオード



リーク電流



MOSFET



5A通電: 1hr~3hr

- 正孔-自由電子の再結合エネルギーによる積層欠陥の伸展が原因。
 - ・ リーク電流が増える。
 - ・ ダイオードだけでなく、MOSFET動作にも影響。
- (低耐圧品は影響小さい)

A.K. Agarwal, F. Husna, S. Haney, S.-H. Ryu, "A new degradation mechanism in high-voltage SiC power MOSFETs," IEEE Electron Dev. Lett., vol. 28, no. 7, pp. 587-589, July 2007.

16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.6): 高田 (ウエハ製造方法で改善できるが、劣化機構上 高電圧ほど目立つ)

内蔵ダイオードに5A流すと、1hrで明瞭な劣化。

ダイオード オン特性だけでなく、リーク電流、MOSFETオン特性も劣化した。

まとめ (パワーデバイスの信頼性)

- 各検査で潜在的な不良品が入る可能性。
 - 微少な欠陥-I : SiO_2 は除去し難い. & 確実に劣化は進行.
 - 微少な欠陥-II : 破壊限界は検出し難い.
 - 材料, 接合の疲労は確実に進行する。
 - 金属, 半田, 特に熱膨張率の異なる材料の接合.
 - 半導体内の欠陥が成長し得る(GaAs(レーザー), SiC, Si).
- ✓ 劣化源-I : 歪み(欠陥), 温度, 電界, 光, 外来粒子
- ✓ 劣化源-II: 汚染物, 可動イオン, 結晶中の金属

(今後の本格的な研究が望まれる)

●

16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.7): 高田

7

<解説: PwDev#15: パワーデバイスの信頼性と課題(新材料デバイス) >

- 1.半導体素子の信頼性問題は、(A.)初期品質の保証と(B.)長期信頼性に分け得る。特にパワーデバイスでは”高電圧”, “大電流”, “大寸法”となるために(B.)が難しい。半田や接合箇所(特に熱サイクルによる)寿命は確実に存在するのだが、的確な評価方法がないことを前提に使うべきである。半導体自体(ex. SiCの V_F 増大問題)とか絶縁膜の長期劣化(TDD寿命)も起きる。
- A.初期品質の問題: (p.3) ...<デバイスの不良か不適切な使用条件に依るものかの判断は難しい>
 - i) 材料が増えたり製造, 検査工程が増える度に欠陥が導入される可能性がある。検査に依るその完全な除去は難しい。
 - ii)破壊耐量試験では、測定時にダメージを加えている可能性がある。
 - iii) MOS構造のゲート絶縁膜(酸化膜)の判定では、測定電流を特定値以下に抑えないと、確実に劣化する(p.5).
 - iv)破壊は一般に不均一動作点で起こるが、その箇所の検出は極めて困難である。
- B.長期信頼性の問題: (p.4)
 - i) 異種材料の接合部では、熱サイクルにおいて熱膨張率の差に為に、半田やワイヤボンド等の金属疲労が必ず発生する。しかも、その進行の程度を把握することが難しい。
 - ii)高電界が加わるMOSゲート絶縁膜(酸化膜)には高電界下でリーク電流が必ず存在して、それが積算するとゲート破壊を引き起こす。(高電圧ケーブルのツリー現象と似た劣化)
 - iii)半導体結晶も劣化し得る。ウエハ工程での母材-酸化膜間の熱ストレスの残留が引き起こす場合が多いが、電子的なストレスで劣化することもある。(ex. LED, LDの光量劣化, SiCの V_F 増大問題(p.6)).
 - iv)宇宙線誘起破壊は、印加電圧を高くすると確実に起こる。(実験的に確認した)適正な使用電圧以下で使わねばならない。
- 2.パワーデバイスにおける新機能, 新構造の変遷: 1957年(Thyristor), 1960年頃(pinダイオード), 1982年(汎用高耐圧BJT), 1993年頃(光速pinダイオード), 1995年頃(DSRD, Dynistor: Russian devices), 1997年(GCT), 2001年(SiC SBD) etc.
- 3.シリコン パワーデバイスの課題: (a.) IGBTの立ち上がり電圧の解消. (b.) SBDよりも小さい立ち上がり電圧のダイオード. (c.) Russianデバイスの確実な製造法. (d.) 1MWクライストロン相応デバイス(数十万V, 500MHz動作).
- 4.新材料デバイス: SiCはSBDが有カデバイスとなり、3kV MOSFETが実用化した。BJTやIGBT開発も試みられているが進歩は停滞気味である。GaN数百Vの横形デバイスはようやく”電流collapse”問題の糸口が見えつつある。縦形デバイス用の結晶も出来始めた。ダイヤモンドは水素終端表面に出来る伝導層を活用したMESFETが試作されているが、高耐圧素子は難しい。
- 5.新材料デバイスの問題点:
 - SiC: 安定生産と価格, (特に半導体基板自体の)信頼性に問題を残す。
 - GaN: 高電圧印加後に、通電特性や高電圧保持特性が劣化する問題の完全な解決。縦形素子用の結晶成長技術の確立。
 - ダイヤモンド: 高電荷担体密度層の形成技術, 移動度等の基本特性データの積み上げ。まず高周波素子, センサーでの実用化。
- 6.今後の問題点: 基礎研究の深化(伝導機構, 再結合/対発生機構, オーミック,Schottky接触, Si, SiC, GaN等での劣化機構, etc.)

16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.8): 高田

パワーデバイスの特に長期信頼性は未だ立ち後れている分野である。

8

新材料デバイス-I

- 半導体の要件
 - 正孔と自由電子の共存
 - 共有結合の連続体
- IV属, III-V属, II-VI属 元素(化合物)
 - SiC, Si, Ge, GaAs, InP,
 - ダイヤモンド:3D, グラフェン(ナノチューブ, フラーレン):2D, ポリアセチレン:1D
 - 有機半導体 (共役二重結合) : $E_g \approx 1\text{eV}$?
 - CIS(CIGS)多元半導体 (太陽電池用)
- ワイド・バンドギャップ半導体
 - SiC(3C: 2.2eV , 6H: 3.0eV , 4H: 3.3eV)
 - GaN((3C): 3.4eV), ダイヤモンド: 5.5eV

16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.9): 高田

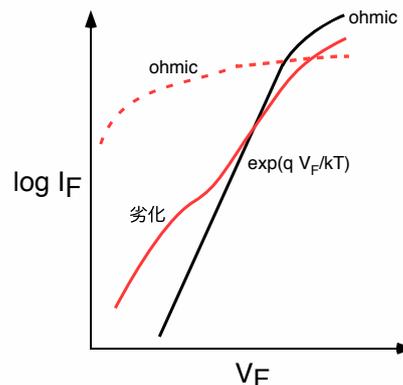
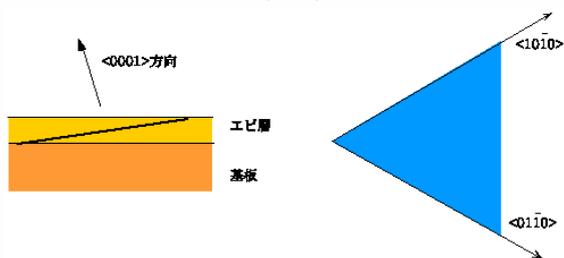
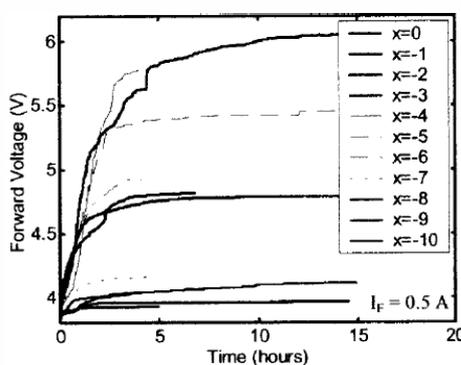
ハイ パワーデバイスに使えるかもしれないが、太陽電池用の多元半導体, 有機半導体にも注目!

9

SiC結晶の劣化-I

pn Diodeの通電試験によるオン電圧増大

電子-正孔結合エネルギーによる
積層欠陥の成長



16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.10): 高田

積層欠陥がバイポーラ動作(正孔と自由電子の共存)のわずかなオン電流で成長し、その欠陥面を通る自由電子の移動度が一桁程度小さくなる。正孔と自由電子が再結合する際のエネルギー($\approx 3\text{eV}$)が、その成長を引き起こしている。MOSFET動作, SBD動作では起きない。

10

各デバイス開発の鍵

- トランジスタ(BJT) → 寄生動作の抑制
- サイリスタ(GCT) → 電荷担体の排出機能の極限化
- 高速pinダイオード → オン時 最適な電荷担体(低)分布
浅く, 低不純物のp, n領域
- IGBT → n領域の短小化
オン時 最適な電荷担体(低)分布
浅く, 低不純物のp-コレクタ領域
p-エミッタ領域の存在を小さくする

高耐圧パワーデバイス

電界etc.緩やかな変化 (構造上の不均一の回避は大事)
各デバイスは欠陥がない限り, 構造固有の破壊耐量を示す

16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.11): 高田

オン過程/オフ過程の不均一動作を出来るだけ避けねばならない。

11

パワーデバイスの課題

- 長期信頼性
 - モジュール構造の疲労
 - 均一動作
 - 微少不良検出能力/ 市場でのストレス評価
- 基礎理論の確立
 - 有効な伝導機構/ 動作限界(破壊, 特性)
 - BJT動作でさえ説明出来てなかった!
- 新材料/ 新デバイスの可能性.
 - ハイパワーデバイス(Russian Devices..)
 - SiC, GaN, C(有機半導体, 2D, 1D)

16年8月1日月曜日

(講義資料 2016 #15-p.13): 高田

パワーデバイスの動作(動作原理, 破壊機構)は徐々に解明されてきた。
(動作限界が予想できるようになったが、測定により確認されてない)
移動度の理論とか、欠陥成長機構等の基礎理論は全く遅れている。

12

問題点の変遷

- 高耐压化 (初期, 長期信頼生後) → <低歪ウエハ工程, 酸化膜電位>
- BJT破壊 (短絡動作, オフ動作) → <寄生構造部の除去>
- IGBT破壊 (短絡動作, オフ動作) → (電流集中部でサイリスタ動作)
- GCT破壊 (オフ動作) → <≈ pnp TRの短絡動作>
- ダイオード破壊 (リカバリー時) → <未解決>
- ダイオード破壊 (宇宙線停止時) → <破壊機構の提起>
- pinダイオード動作, BJT動作 → <“固体中の化学反応”>

疑問点の変遷

- リークの増大 → $v_{\text{eff}} \propto E \cdot F \rightarrow v_s$ <電界中の実効速度>
- 移動度, 有効質量 < $m^* v r = h/2\pi$?>
- 自由電子, 正孔モデル <最外殻軌道の過不足>
- 直接再結合 → 電界による平衡 <反応断面積のエネルギー依存性>
- 固体中の化学反応: 質量作用の法則, ボルツマン分布, 発生/消滅

16年8月1日月曜日

13

(講義資料 2016 #15-p.12): 高田

二次破壊: 動作モードが電流増大に対して正帰還となる場合と、全く瞬時に結晶が破壊する場合。

アバランシェ発生部では同時に温度も上がる。高速オフ時には考慮が必須(講義では言っていない)。

テキスト

”パワーデバイスの基礎 第1部(第2版)の修正箇所.

16年8月1日月曜日

14

テキスト(第1部第2版)の修正-I

p.17 右下 ~ p.18 左上

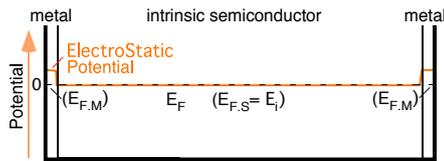


図 3.21: 電極付き真性半導体内部電位分布 (熱平衡時).

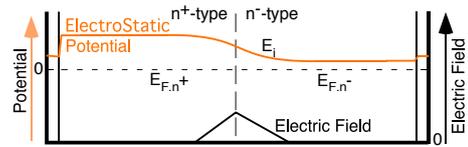


図 3.22: n+ -n- 境界の電界強度と電位分布 (熱平衡時).

さて、物質はそれぞれの状態に応じて固有のエネルギーを有しており⁷、その値を半導体分野では“フェルミ準位” E_F で表す⁸。異なる物体が互いに接して熱平衡状態にあれば、両者の“フェルミ準位” E_F は揃う⁹。例えば、不純物が入ってない真性半導体の両側に金属電極が付いた状況の“フェルミ準位” E_F は、図 3.21 の破線で表される¹⁰。一方、各領域の電位は仕事関数 ϕ だけ異なるので、金属と半導体の境界で段差が生じる¹¹。

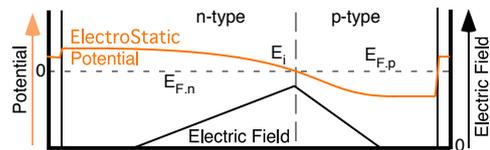


図 3.23: np 境界の電界強度と電位分布 (熱平衡時).

18年9月15日土曜日

(講義資料 2016 #15): “パワーデバイスの基礎” 第1部(第2版)の再修正箇所(at 2018-09-15).

テキスト(第1部第2版)の修正-II

p.121 左下

正しいベース開放時のコレクタ-エミッタ間降伏電圧 BV_{CEO} は、増倍率 M_e が(式 A.55)を満たす V_{CEO} 値である。この(式 A.55)は、(式 A.52)に $J_{B.net} = 0$ と $J_B = 0$ を代入して(式 A.56)、 h_{FE} を J'_C / J_{B0} と見なすことで得られる。増倍率 M_e は、電界存在領域で(式 A.57)を計算すればよい。この式は、正孔の衝突電離作用を無視して²⁵⁷自由電子の衝突電離作用だけを考慮した式である。

$$M_e - 1 = \frac{1}{h_{FE}} \quad (\text{A.55})$$

$$0 \equiv -J_{B0} + (M_e - 1)J'_C \quad (\text{A.56})$$

$$M_e \approx \exp\left[\int_0^{t_n} \alpha_e(x) dx\right] \quad (\text{A.57})$$

p.124 左上

小さな J_C 値ならば必ず $\Delta M_e / \Delta J_e < 0$ となる。この点の電流は安定に増大する。

d 領域 $J_{B.net} > 0$ の動作点を得たならば、同じ V_{CE} で $J_{B.net} < 0$ となる \odot 点まで J_C を少しずつ増やして行く。

この動作点の電流は安定に減少する。

サスティン動作点 \odot 点と \odot 点の間に存在するは