

LSI 用 pn 接合特性解析技術の開発

- 酸素析出物に起因した接合リーク発生機構の解明

Novel Characterization Technique of pn Junctions for Advanced LSI

- Junction Leakage Mechanism Induced by Single Oxide Precipitate in Silicon Diode

土明 正勝
TSUCHIAKI Masakatsu

藤森 洋行
FUJIMORI Hiroyuki

飯沼 俊彦
IINUMA Toshihiko

複合欠陥であるシリコンウェーハ中の酸素析出物 (Oxide Precipitate) が引き起こす pn 接合リーク電流を直接観察した。新たな LSI 用 pn 接合の特性解析手法を組み合わせ、そのリーク機構を詳細に分析した。電子は、空乏層電界中の酸素析出物 / シリコン界面準位間を飛び移り、酸素析出物周辺に形成されたサーマルドナーに至り、そこから電界加速熱放出されていることが明らかになった。

このように pn 接合という“レンズ”を通じてリーク発生の詳細を観察すると、電氣的にその欠陥の同定評価が可能になる。更に、物理的評価では検知不能な低密度欠陥の定量に有効な手法が得られる。

The impact of a single oxide precipitate, an extended defect in silicon, on junction leakage was directly observed and thoroughly investigated with new characterization techniques. It was found that the electric field in the depletion layer facilitates the hopping of electrons via the silicon/precipitate interface states into the associated thermal donor formed nearby. The leakage current was generated by field enhanced thermal emission from the donor.

Insights on the specific leakage mechanism obtained through pn junctions allow electrical detection of the corresponding defects at a sensitivity far exceeding that of physical analysis.

1 まえがき

高速、高機能化を追求して、LSI 構成素子は微細化し、その集積度は増大している。一方、チップ面積は増加している。この結果、製造歩留りを維持するために、有害な結晶欠陥の密度を更に低減する必要がある。当然、ごく低密度でしか発生しない欠陥を、正確に、迅速に、かつ簡便に評価解析する技術が重要となる。

欠陥が LSI に有害である理由の一つは、欠陥が接合リークを発生させることにある。したがって、pn 接合というもっとも基本的な素子構造を用いて、欠陥を直接、検出・同定することができればつごうがよい。実際、点欠陥モデルの当てはまるリーク源に関しては、pn 接合を用いた解析手法は知られている⁽¹⁾。しかし、残念ながら、現実のシリコン中の欠陥の多くは複合体である。シリコン基板中に見られる酸素析出物は、その代表的なものと言えよう。これらの手法は、このような複雑な構造の欠陥の解析には使えない。

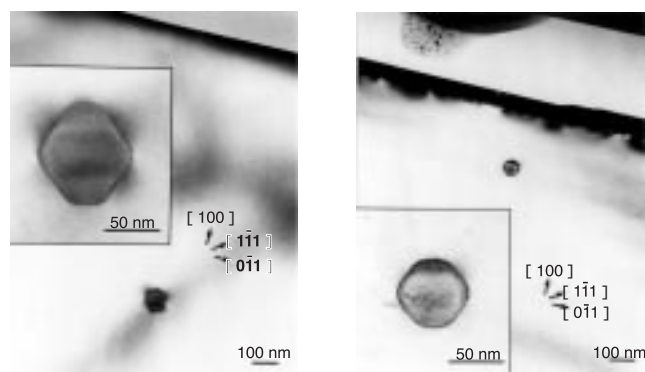
われわれは、pn 接合特性が複合構造欠陥の解析にも有効であることを実証した。ここでは、酸素析出物の pn 接合を通じた詳細な解析と、欠陥同定技術の一端について述べる⁽²⁾。

2 シリコンウェーハと酸素析出物

LSI 用シリコン基板の主流は、石英るつぽから熔融シリコンを引き上げて製造される (CZ 法)。この過程で、酸素がるつぽから結晶中に混入する。これらの酸素は、LSI 製造工程に加えられる熱処理とともに次第に凝集し、シリコン結晶中に析出する。その形態は、酸素原子が数個集まったサーマルドナーに始まり、外径 100 nm にも達する板状、八面体状、多面体状の構造体へと、環境に応じ変化する⁽³⁾。基板表面付近に形成され、LSI に悪影響を与えるのは多面体状の析出物である。実際に基板表面付近で見つかった六八面体酸素析出物の電子顕微鏡写真を図 1 に示す。

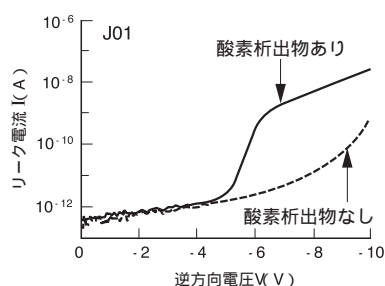
3 リーク発生の“現場写真” - こぶ状 I-V 特性

まず、図 1 に示す酸素析出物を“指名手配”するために、pn 接合という“レンズ”を通して、リーク発生の“現場写真”を撮る。すなわち、意図的に酸素析出物を多く生成させたシリコン基板に pn 接合を多数形成し、このリーク電流 I を、酸素析出物を含まない基板の pn 接合のリーク電流と比較する。酸素析出物を含む接合には、逆方向電圧 V の変化につれて、図 2 に示す“こぶ”のような特性が現れる。

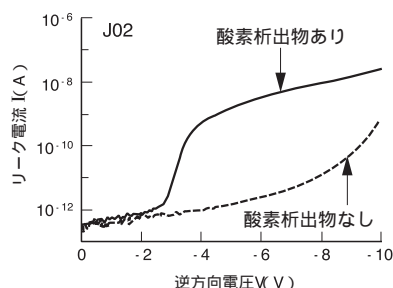


(a) 比較的深い位置の酸素析出物 (b) 比較的浅い位置の酸素析出物

図1．シリコン基板表面の酸素析出物の電子顕微鏡写真 六八面体酸素析出物とその拡大写真を示す。
TEM cross sections of oxide precipitates



(a) 比較的深い位置の酸素析出物によるリーク



(b) 比較的浅い位置の酸素析出物によるリーク

図2．酸素析出物1個が生成する接合リーク 逆方向電圧Vの変化につれて“こぶ”のような特性が現れる。
Junction leakage current induced by single oxide precipitate

この“こぶ”構造リーク特性の詳細な解析を行うことにより、“犯行の手口(リーク機構)”と“共犯者”の有無、“犯人(酸素析出物)”の関与の詳細などを明らかにできる。以下、これを順を追って説明する。

3.1 単一準位Cの存在

始めに、このI-V特性が単一の欠陥に由来していることを示す。逆方向電圧Vをこの電圧下での空乏層の幅Wに変換し、“こぶ”の構造を改めて観察する(図3(a))。この結果、リーク電流のW依存性は、以下の式に示す、 a_1, b_1, a_2, b_2 ,

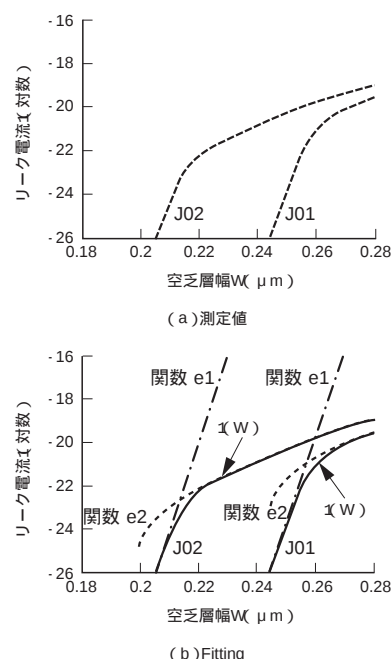


図3．リーク電流の空乏層幅依存性
(a)は図2の観測値 (b)は式(1)~(3)で観測値をfitしたもの。破線、鎖線は関数 e_1, e_2 を示す。
Leakage current dependence on depletion layer width W

W_0 をパラメータとする二つの関数形 e_1, e_2 の特殊な結合できれいに表されることを見いだした。

$$e_1(W) = \exp\{a_1 + b_1 \times W\} \quad (1)$$

$$e_2(W) = \exp\{a_2 + b_2 \times (W - W_0)^{1/2}\} \quad (2)$$

$$I(W) = e_1(W) \times e_2(W) / \{e_1(W) + e_2(W)\} \quad (3)$$

図3(b)に、実際にこのような関数形で測定データを合わせ込み(fitting)した結果を、 e_1, e_2 とともに示す。結果は完全に実測を再現している。“こぶ”の構造が簡単な解析関数と、五つのパラメータで表現できたことは、リークの起源の同一性を意味する。実際(3)式は、単一の準位Cに電子が e_1 というレートで供給され、 e_2 というレートで放出されるときに現れるリーク現象に特有な関数形である。よって、リークは単一の欠陥を経由している。また、 e_1 と e_2 のW依存性の違いから、異なる物理過程 p_1, p_2 で、電子が準位Cに供給、放出されていることもうかがえる。

3.2 ホッピングと熱放出

物理過程 p_1, p_2 の起源は、関数 e_1, e_2 のW依存性、パラメータ a_1, b_1, a_2, b_2, W_0 の温度依存性から判断できる。詳しい解析の結果⁽²⁾、関数 e_1 で表される物理過程 p_1 は、局在化した電子準位間を電子が飛び石を伝うように伝導する過程(hopping)であった。一方、関数 e_2 で表される物理過程 p_2 は、Cからの電界加速熱放出の一種(Poole-Frenkel emission)であることがわかった。更に、準位Cのエネルギー

ーレベルは極めて浅く、2から3の素電荷を帯びていることも示された。

3.3 リーク機構

これまでの知見を総合して得られるリーク機構を図4にエネルギー図として示す。電子は価電子帯から、空乏層内の電界に助けられ、いくつかの電子準位を伝わりながら帯電準位Cに達する。電子はCに強く束縛されるが、熱励起によりこれを振り切り伝導帯に放出される。結局、電子が価電子帯から伝導帯へ移ったのであるから、リーク電流が発生したことになる。このように、pn接合という“レンズ”を通じた、“こぶ”の構造解析により、そのリーク機構と、“実行犯”である共犯者(準位C)の存在が浮かびあがる。

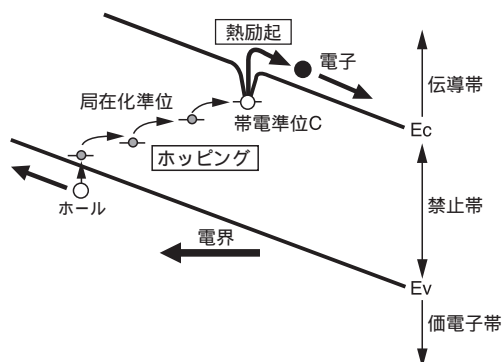


図4．エネルギーバンド図で示されたリーク機構 電子は価電子帯から局在化準位を飛び移り帯電準位Cを経て、伝導帯に放出される。

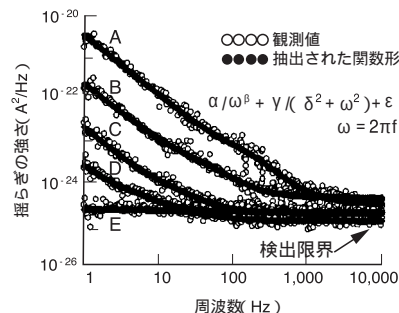
Leakage mechanism shown in energy band diagram

4 酸素析出物関与の“証拠写真” - 1/f 揺らぎ

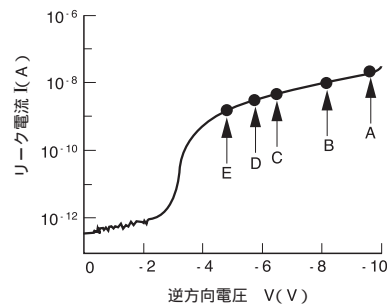
さて、リークの機構は明らかになったが、“黒幕”である酸素析出物の関与の詳細はまだ明らかではない。今度は、pn接合という“レンズ”を通して、酸素析出物の関与を証明する“証拠写真”を撮る。すなわち、ここでは、Vを一定にしたときの、Iの極めて微小な揺らぎを測定する。

Iが時間とともに小さく揺らぐのは、図4で示したリーク機構の進行している周囲の環境の変化を反映するからである。したがって、リーク電流の揺らぎを精密に測れば、帯電準位Cの周囲の状況を推測できるのである。しかし、この揺らぎは極めて小さく、その測定には非常に高性能の増幅器が必要になる。われわれは、注意深く雑音源を取り除くことで、このような増幅器を開発した。

これを用いた測定の結果、酸素析出物を含む接合には、特異な揺らぎが観測された。図5(a)に、図5(b)に示した“こぶ”状I-V特性の各点A～Eで測定したリーク電流の揺らぎの周波数特性を示す。周波数が小さくなるほど、揺らぎ



(a)測定結果



(b)揺らぎ測定点

図5．リーク電流揺らぎの周波数依存性 (a)は(b)に示す各点A～Eで測定したリーク電流揺らぎを示す。1/fタイプの揺らぎ成分が抽出された。

Low-frequency noise spectra of leakage current

の強さは増大する。このような特性は一般に1/f noise,あるいは、flicker noiseと呼ばれる。これに対し、“こぶ”状構造を持たない通常の接合リークの揺らぎは、検出限界以下であった。“こぶ”状I-V特性に過大な低周波揺らぎが存在することは、Cの周囲に酸素析出物のような大きな構造体が存在することを物語る。確率過程論に基づく理論的解析によれば、Cが単体としてリークを生ずる場合、その揺らぎの周波数特性はshot noiseと呼ばれ、まったく周波数依存性のないものになる。

一方、酸化膜/シリコン界面は、電荷のやり取りを通じて1/f noiseを生成することが知られている⁽⁴⁾。同様の界面は、酸素析出物とシリコンの間に存在している。界面の荷電状態の変化はCの周囲の電界を変動させる。これがPoole-Frenkel過程の放出率を変調し、リーク電流の揺らぎを引き起こしたと考えられる。また、電子は局在化した準位をhoppingしてCに到達していた。酸素析出物とシリコンの間の界面準位に沿ってhoppingするならば、このような伝導機構の存在は容易に理解できる。

以上の特長をまとめると、電子は酸素析出物とシリコンの界面を伝わって酸素析出物の界面近傍のCに到達していることがわかる。このように、pn接合という“レンズ”を通じて、リーク電流の揺らぎを測定すれば、酸素析出物関与の証拠と“共犯者C”との役割分担が明らかになる。

5 Cの“モンタージュ写真”- サーマルドナー

最後に、帯電準位Cの物理的起源が明らかになれば、pn接合による共犯者Cの“モンタージュ写真”が完成し、リーク現象の全体像が判明する。Cの物理的起源は3.3節で述べた荷電状態、エネルギーレベルから推測する。実際、Cに類似する不純物準位として、酸素原子数個が凝集してできる2価の浅いドナー準位(サーマルドナー)が知られている。酸素といえば、まさに酸素析出物の構成要素である。酸素析出物の近傍には、高濃度の酸素原子を含む領域が存在していると考えられる。ここで、酸素原子が凝集してサーマルドナーを形成する可能性は高い。Cの見かけの帯電状態は2から3であった。しかし、これは誘電率の違いから酸素析出物の周囲で空乏層電界が変調されることで説明できる。逆に、この結果は、Cが酸素析出物の近傍に生成されていることを裏づける。あたかも酸素析出物に伴う惑星のようなサーマルドナー、それが帯電準位Cの正体である。

pn接合という“レンズ”を通して多角的に収集した状況証拠を総合して得た、酸素析出物による接合リーク現象の全容を図6に示す。

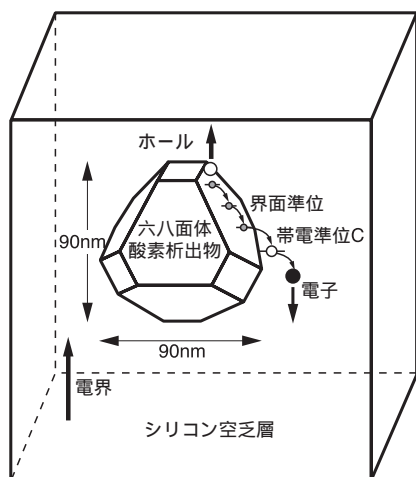


図6. 実空間上で示す酸素析出物による非局所的リーク発生機構
電子は酸素析出物の外縁部を伝わり、近くに形成されたサーマルドナーを経由して放出される。

Schematic illustration showing mechanism of leakage induced by single oxide precipitate

6 酸素析出物ハンティング

以上で、酸素析出物によるリーク発生機構が判明し、I-V特性の“こぶ”状構造が真に酸素析出物に固有の指紋であることが確認された。これを手がかりに、前述した酸素析出物を形成した試料に0.9 mm × 0.9 mmの大きな接合を形成

し、酸素析出物の検出を試みる。I-V特性の“こぶ”の発生頻度から、表面付近の酸素析出物密度を計算すると、 $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ となった。これを検証するために、非常に多数の透過電子顕微鏡(TEM)撮影を実施した。これから酸素析出物密度を見積もると、 $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ という結果となった。これらは、TEMの観測誤差の範囲で一致すると言ってよい。

このように、酸素析出物のpn接合を用いたハンティングの有用性は実証される。もちろん、pn接合による欠陥検出、同定はTEMのような物理解析に比べれば極めて簡便に、正確に、かつ、大量に行える。おおよそ、TEMでは検出できないまれな欠陥のハンティングにも有用であることは明らかである。

7 あとがき

pn接合の特性を注意深く解析することで、接合リークを発生させている結晶欠陥の正体とリーク機構を同定することが可能である。これを、酸素析出物による接合リークを例題として実証した。接合リーク解析は、点欠陥モデルの通用しない複合構造体の解析にも適応できることが明らかになった。このようなpn接合を用いたdefect-spectroscopyは、今後、更に集積度をますLSIの製造歩留りを確保するための重要な解析手法として大いに期待される。

文 献

- (1) Schroder, D.K. Semiconductor material and device characterization. New York, Wiley, 1998, 760p.
- (2) Tsuchiaki, M., et al. An interface state mediated junction leakage mechanism induced by a single polyhedral oxide precipitate in silicon diode. J. Appl. Phys. 85, 1999, p.8255 - 8266.
- (3) Fujimori, H. Dependence on morphology of oxygen precipitates upon oxygen supersaturation in Czochralski silicon crystals. J. Electrochem. Soc. 144, 1997, p.3180 - 3184.
- (4) McWhorter, A. L. 1/f noise and germanium surface properties. Semiconductor Surface Physics. Philadelphia, Pennsylvania Univ. Press. 1957, p.207 - 228.



土明 正勝 TSUCHIAKI Masakatsu

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー研究主務。
微細CMOS技術、結晶欠陥評価の研究・開発に従事。応用物理学会会員。

Advanced LSI Technology Lab.



藤森 洋行 FUJIMORI Hiroyuki

東芝セラミックス(株) 開発研究所 評価分析部主務。材料分析評価の研究・開発に従事。Electrochemical Society, 応用物理学会, 日本電子顕微鏡学会会員。

Toshiba Ceramics Co., Ltd.



飯沼 俊彦 IINUMA Toshihiko

セミコンダクター社 プロセス技術推進センター 半導体プロセス開発第四部主務。シリコン半導体素子製造プロセスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。

Process & Manufacturing Engineering Center.