電子ビームによる LSI 内部配線の 電圧測定精度評価法

正 員 伊 藤 昭 夫 (富士通研)
 非会員 大 窪 和 生 (富士通研)
 非会員 後 藤 善 朗 (富士通研)
 非会員 古 川 泰 男 (富士通研)
 正 員 稲 垣 雄 史 (富士通研)

1. はじめに

電子ビームを LSI の配線に照射すると、配線電圧により変調されたエネルギーをもつ 2 次電子が放出される。その 2 次電子のエネルギーの変化をエネルギー分析器により検出し、配線の電圧を測定する技術が電子ビーム (EB) プロービングの基本である。このような EB プロービングは、LSI の高密度化・高速化に伴って、従来の機械的触針に代わり LSI の内部診断に不可欠な技術となっている。

EB プロービングにおける電圧測定では、通常減速電界型エネルギー分析器が使用される⁽¹⁾⁽²⁾。このタイプのエネルギー分析器は、格子状電極の減速グリッドに減速電圧を印加することにより、低エネルギーの 2 次電子を減速・阻止し、一定エネルギー以上の 2 次電子のみを検出器側に通過させるものである。ここで減速電界を掃引すると、エネルギー軸に対して積分された 2 次電子エネルギー分布曲線が得られる。電圧の測定は上記の分布曲線のエネルギーシフトを検出することにより可能になる。これを行うエネルギー分析器の性能には電圧分解能と電圧測定精度がある。電圧分解能は、どの程度小さなエネルギーシフトを検出できるかに相当し、電圧測定精度は分布曲線のエネルギー軸

上の絶対位置の再現性に対応する。

前者は 2 次電子検出信号の S/N 比が関与し、分析器のグリッドメッシュの開口比や 2 次電子の捕獲電界の最適化、更には信号の加算平均処理などにより対処できる。これに対して、後者は配線表面の凹凸などによる 2 次電子放出効率の変動や LSI チップ表面の局所的な電界などに影響されるものであり、この性能向上がエネルギー分析器の大きな課題となっている。

EB による電圧測定の手法は、分析電圧 V_R (ある一定の 2 次電子信号出力を与えるエネルギー分析器の減速電圧) から配線電圧 V_S を算定するものである。従って V_R と V_S の関係をあらかじめ求めておく必要がある (V_R-V_S 特性の校正)。

従来電圧分解能に関しては、EB のビーム電流、2 次電子検出系の帯域と関連づけた理論的な検討⁽³⁾がなされてきた。更に V_S の変化分に対する V_R の変化分の比 $\Delta V_R/\Delta V_S$ を用いて評価した例⁽⁴⁾も報告されている。それに対して V_R の絶対値の再現性が問題になる電圧測定精度の評価については十分な議論がなされているとはいいがたく、上記の校正ルーチンについてあいまいにされてきた。

本論文では、 V_R-V_S 特性の校正をふまえた電圧測定誤差の評価方法を提案する。更にその方法により著者らが開発した半球状エネルギー分析器⁽¹⁾⁽²⁾を評価した結果について述べる。

2. V_R-V_S 特性の校正

一定の 2 次電子信号出力を与えるエネルギー分析器の減速電圧 (以下これを分析電圧 V_R と呼ぶ。) と配線電圧 V_S の関係は一般には図 1 に示すような直線で

A Method to Evaluate the Accuracy of Voltage Measurement of LSI Internal Electrode with an Electron Beam. By Akio Ito, Member, Kazuo Ookubo, Non-member, Yoshiro Goto, Non-member, Yasuo Furukawa, Non-member & Takefumi Inagaki, Member (Fujitsu Laboratories LTD, Atsugi).

伊藤昭夫: 正 員, (株)富士通研究所厚木研究所
 大窪和生: 非会員, (株)富士通研究所厚木研究所
 後藤善朗: 非会員, (株)富士通研究所厚木研究所
 古川泰男: 非会員, (株)富士通研究所厚木研究所
 稲垣雄史: 正 員, (株)富士通研究所厚木研究所

(a) 2次電子のエネルギー分布曲線と \$V_R\$ の定義

(b) \$V_R - V_S\$ 特性

図 1 \$V_R\$ と \$V_S\$ の関係

Fig. 1. Relationship between \$V_R\$ and \$V_S\$.

表される。ここで、電圧既知の配線に対する測定により係数 \$\alpha, \beta\$ を求めて \$V_R\$ と \$V_S\$ の関係を定めることを \$V_R - V_S\$ 特性の較正と呼ぶ。係数 \$\alpha\$ は原理的には 1.0 となるべきものであるが、例えそうでなくても不変量であれば電圧測定にとって大きな障害とはならない。実際のエネルギー分析器では 0.90~1.02 の範囲にある^{(4)~(6)}。

\$V_R - V_S\$ 特性の較正については、次のような考え方がある。(1) 較正のために特に用意された金属スタブあるいは IC チップ内の電圧既知の配線を測定して較正する。(2) 係数 \$\alpha\$ のみ上記(1)の方法で較正する。この場合係数 \$\beta\$ は不定で任意の値をとることになる。(3) 係数 \$\alpha\$ は原理的に決まる値 1.0 と定めて何も較正を行わない。当然、係数 \$\beta\$ は(2)と同様に任意の値をとる。

(2), (3)は測定配線の電圧がある特定条件の下で既知である場合には、係数 \$\beta\$ を定めることが可能で、用途によって十分有効な方法である。しかし、実際には測定配線の電圧は全く未知と考えなければならない場合も多い。そのようなときには(1)の方法をとらざるを得ない。この意味で電子ビームによる電圧測定誤差は上記(1)の考え方による較正を前提とした評価が最も重要である。

3. 誤差要因

測定配線以外の電圧既知の配線を用いて較正された

\$V_R - V_S\$ 特性を用いた電圧測定において、主な誤差要因となるのは(a)局所電界効果、(b)コンタミネーション(以下コンタミと略す)、(c)ノイズなどが考えられる⁽⁷⁾。(a)は測定配線近傍に較正用配線近傍とは異なる電界分布が局在することにより起こるものである。(b)は電子ビーム照射により配線表面に生成するコンタミによるものである。(a), (b)は十分な S/N が得られる場合にも誤差を生じるものであるが、(c)は加算平均などの信号処理により S/N を上げれば小さくするものである。本報告では主に(a), (b)に対する誤差の評価方法について検討し、平面メッシュ引出電極付半球状エネルギー分析器⁽¹⁾⁽²⁾を用いた評価の具体例を示す。

4. 誤差の評価方法

〈4.1〉 \$V_R - V_S\$ 特性の較正 最初に電圧既知の配線を用いて \$V_R - V_S\$ 特性の較正を行う。すなわち配線電圧 \$V_S\$ を \$V_{Si}\$ (\$i=1 \sim n\$) に設定してそれぞれに対する分析電圧 \$V_{Ri}\$ を求め、これらのデータから最小自乗近似直線

$$V_R = \alpha V_S + \beta \dots\dots\dots (1)$$

を求める(図1)。こうして求められた \$V_R - V_S\$ 特性直線は、以後に行われる電圧測定の際に、分析電圧 \$V_R\$ から配線電圧 \$V_S\$ を求める変換式として用いられるもので基準直線と呼ぶ。

〈4.2〉 誤差の評価 電圧測定誤差の評価には実際の IC チップ内の測定対象となる配線を模擬した評価用配線を用いる。誤差の評価のためには、まず、評価用配線に対する \$V_R - V_S\$ 特性を前節の較正時と同様な方法で次のように求める。

$$V_{Rm} = \alpha_m V_{Sm} + \beta_m \dots\dots\dots (2)$$

これを評価直線と呼ぶ(図2)。従って、電圧測定誤差は、\$\alpha_m, \beta_m\$ が基準直線の係数 \$\alpha, \beta\$ からずれることにより生じるものと考えることができる。更に評価

図 2 基準直線と評価直線

Fig. 2. Calibrated and measured relationship.

用配線に対する測定データから、次式で与えられる標準偏差 σ_m を求めて、 α_m 、 β_m と併せて誤差評価の基本量とする。

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \dots\dots\dots (3a)$$

$$\varepsilon_i = (V_{Rmi} - \beta_m) / \alpha_m - V_{Si} \dots\dots\dots (3b)$$

ここで V_{Si} 、 V_{Rmi} はそれぞれ評価用配線に印加される電圧と得られる分析電圧である。図2において黒丸は測定値 V_{Rmi} ($i=1\sim6$) を示す。ここで統計的な考え方より、任意の測定に対して得られる V_{Rmi} は評価直線の両側に $\pm 3\sigma_m$ ずつ幅を持たせた範囲にほとんどすべて収まるものと予想できる。従って、基準直線を用いて電圧 V_s が印加された配線の電圧を算定した場合の誤差の上限と下限は V_s の関数として、次のように求められる。

$$V_{er}(V_s) = \frac{V_s(\alpha_m - \alpha) + (\beta_m - \beta) \pm 3\sigma_m \alpha_m}{\alpha} \dots\dots\dots (4)$$

更に配線電圧の範囲が $0 \sim V_{smax}$ (V) に限定されたときの誤差範囲 $V_{er1} \sim V_{er2}$ を次のように求めることができる。

(i) $\alpha_m \leq \alpha$ の場合

$$V_{er1} = \frac{V_{smax}(\alpha_m - \alpha) + (\beta_m - \beta) - 3\sigma_m \alpha_m}{\alpha} \dots\dots\dots (5a)$$

$$V_{er2} = \frac{(\beta_m - \beta) + 3\sigma_m \alpha_m}{\alpha} \dots\dots\dots (5b)$$

(ii) $\alpha_m > \alpha$ の場合

$$V_{er1} = \frac{(\beta_m - \beta) - 3\sigma_m \alpha_m}{\alpha} \dots\dots\dots (5c)$$

$$V_{er2} = \frac{V_{smax}(\alpha_m - \alpha) + (\beta_m - \beta) + 3\sigma_m \alpha_m}{\alpha} \dots\dots\dots (5d)$$

本評価方法の利点は、第1に電圧測定精度を配線電圧の関数として簡単に算定できる点、第2に係数 α 、 β により種々のエネルギー分析器の特性比較が行える点である。

5. 誤差の評価例

〈5・1〉 局所電界効果 局所電界効果の一例として、電圧既知の校正用配線を $50\mu\text{m}$ 幅の Al 電極に選り、より微細な配線の電圧測定を行った場合について評価する。使用したエネルギー分析器と評価用配線を含む試料を図3、図4に示す。

ここで2次電子は平面メッシュと半球グリッドが組合わされた引出電極系(数 100 V)により強い電界で

図3 平面メッシュ引出電極付半球状エネルギー分析器

Fig. 3. Hemispherical energy analyzer combined with planar extraction grid.

図4 評価試料

表1 基準直線と評価直線の係数

Table 1. Coefficient of the V_R - V_s relationship.

配線幅	V_{sub}	α_m	β_m	σ_m
50 μm	5 V	1.01	-2.30 V	0.036 V
	0	1.01	-2.35	0.031
20	5	1.01	-2.33	0.031
	0	0.98	-2.35	0.084
10	5	0.96	-2.10	0.072
	0	0.97	-2.23	0.074
5	5	0.98	-2.00	0.039
	0	0.97	-2.05	0.075

$\alpha=1.00$, $\beta=-2.34\text{V}$ ($W=50\mu\text{m}$, $V_{sub}=0\text{V}$)

加速され、バッファグリッド(数 10 V)を通過して減速グリッドに入射される。バッファグリッドは2次電子の検出効率を高めるためのものである。

表1に基準直線の係数 α 、 β および 50, 20, 10, 5 μm 幅の配線で求められた係数 α_m 、 β_m と標準偏差 σ_m を示す。なお、ここでは SiO_2 のチャージアップを避けるために電子ビームの加速電圧は 15 kV (ビーム電流 1 nA) として、評価用試料の基板電圧 V_{sub} が 0, 5 V の場合について測定している。(4)式を用いて表1の値から求めた誤差範囲を図5に示す。図中には個々の誤差データも示されている。この図から配線電圧 0 V では $-0.25 \sim 0.5\text{V}$ の誤差、5 V では -0.35

図 5 電圧測定誤差

Fig. 5. Voltage measurement error.

図 6 電圧測定誤差と $3\sigma_m$

Fig. 6. Voltage measurement error and $3\sigma_m$.

~0.35 V の誤差が予想される。また、配線電圧範囲を 0~5 V としたとき、(5)式により求めた誤差範囲を配線幅に対して図 6 に示す。この図に示された誤差の範囲は、線形化誤差を表す $5(\alpha_m - 1.0)$ の値よりかなり大きな誤差が起こりうることを示している。

ところで、この評価方法では、誤差範囲の中に標準偏差 σ_m が含まれているが、電圧波形の測定を考える場合には σ_m は波形に重畳される雑音と考えるのが妥当である。従って、電圧波形の測定においてはむしろ(5)式において、 $\sigma_m = 0$ として求めた誤差範囲(図 7)がより現実にあった評価量と考えられる。すなわちこの場合、-0.1~0.35 V の誤差を中心に標準偏差 $\sigma_m = 0.07$ V の分布をもつ雑音の重畳された電圧波形が予測できる。

〈5・2〉コンタミの影響 電子ビームを測定配線に照射すると、照射点には炭化水素重合物からなるコ

図 7 電圧波形測定における誤差の予測値

Fig. 7. Estimated error on voltage waveform measurement.

図 8 V_R - V_S 特性係数に及ぼすコンタミの影響

Fig. 8. Influence of contamination on the V_R - V_S relationship.

図 9 照射時間に対するコンタミの影響

Fig. 9. Coefficient β as a function of EB exposure time.

ンタミが生成される。その結果、2次電子の放出効率やエネルギー分布が変化し、電圧測定誤差を生じる。コンタミの影響を係数 α , β の変化として測定した結果を図 8 に示す。測定試料は外径 8 mm の Al スタブ

で、加速電圧 2 kV、ビーム電流 0.1 nA、試料室真空度 1×10^{-5} Torr である。ここで白丸は第 1 回目の測定値を示す。電子ビーム照射を続けていくと、係数 α , β は矢印の方向に変化して、約 10 秒の照射で定常状態 (黒丸) に達する。すなわち、コンタミにより係数 α は 0.04 減少し、 β は 0.4 V 増加する。(4) 式により測定誤差を算定すると、

$$V_{er}(V_s) = -0.01V_s + 0.39$$

となり、電圧範囲 $V_s = 0 \sim 5$ V では測定誤差 0.35 ~ 0.40 V が得られる。

図 9 は係数 β の変化を照射時間に対して求めたものである。この結果からコンタミの影響には 2 つの過程のあることがわかる。すなわち図 8 でも示されているような、係数 β がいったん 0.3 V 程度増加して定常状態になる第 1 の過程と、更に照射を続けた場合に再び減少していく第 2 の過程である。第 1 の過程で達する定常状態は電子ビーム照射を中断した後も変化しないのに対して、第 2 の過程は 10 分程度の照射中断後には第 1 の過程で達した定常状態まで回復するという特徴がある。従って、第 1 の過程は照射点にコンタミが形成されていく過程であり、第 2 の過程は生成されたコンタミの帯電によるものであると考えられる。通常の測定では正味の電子ビーム照射時間は数秒のオーダーであるため第 1 の過程のみが関係する。

6. ま と め

エネルギー分析器を用いて電子ビームによる電圧測定を行う際に生じる測定誤差の評価方法について検討した。配線電圧が全く未知の場合には、分析電圧 V_R と配線電圧 V_s の関係を表す V_R - V_s 特性を含めて考えなければならないことを述べ、この考えに基づいた評価方法を提案した。新しい評価方法の要点は、

- (1) V_R - V_s 特性の較正により係数 α , β を求める。
- (2) 評価用配線において同様に V_R - V_s 特性の係数 α_m , β_m および標準偏差 σ_m を求め、これらを基本評価量とする。
- (3) 上記基本量から配線電圧のとりうる範囲に対

する測定誤差の範囲を求め、これを評価量とする。ここで標準偏差 σ_m の扱いによって①誤差の限界値の評価と②平均的な誤差の評価とを簡単に行うことができる。

本評価方法の利点は、電圧測定精度を測定電圧の関数として簡単に算定できること、係数 α , β により種類のエネルギー分析器の特性比較が行えることである。

著者らの開発したエネルギー分析器を用いた評価例として、①局所電界効果および、②コンタミに起因する誤差の評価を行った。その結果①については、5 μ m 以上の幅の配線に対して電圧測定誤差の限界値は電圧範囲 0 ~ 5 V では ± 0.5 V を越えないことがわかった。また、電圧波形測定では $-0.1 \sim 0.35$ V の誤差を中心に 0.07 V の標準偏差を持つ雑音の重畳された波形が予測できる。

②については係数 α の減少 (約 0.04), β の増加 (約 0.4 V) が生じ、電圧測定誤差は電圧範囲 0 ~ 5 V では 0.35 ~ 0.40 V であった。更に、コンタミの影響はコンタミの生成していく第 1 の過程と生成したコンタミが帯電していく第 2 の過程のあることがわかった。(昭和 61 年 12 月 22 日受付)

文 献

- (1) A. Ito, K. Ookubo, Y. Goto, Y. Furukawa & T. Inagaki: "Improved energy analyzer for voltage measurement in electron beam probing for LSI diagnosis" *J. Vac. Sci. Technol. B*, 3(1), p. 383 (1985-1)
- (2) 伊藤・大窪・後藤・古川・稲垣: 「電子ビームによる電圧測定誤差」学振第 132 委員会第 89 回研究会資料, p. 49 (1984-11)
- (3) E. Menzel & R. Buchanan: "Electron beam probing of integrated circuits" *Solid State Technology*, p. 63 (1985)
- (4) 中前・藤岡・裏: 「半球状減速電界型分光器による局所電界効果の補正」学振第 132 委員会第 85 回研究会資料, p. 54 (1983-11)
- (5) R. A. Burghard, C. J. Brabenc & C. M. Ward: "Applying the JEOL 1 nsec beam blaster with an energy analyzer to DRAMs" *SEM, IV*, p. 1611 (1983)
- (6) 中村・佐藤: 「電子プローブによる IC 微小パターンの電位測定誤差の検討」学振第 132 委員会第 82 回研究会資料, p. 8 (1982-10)
- (7) 戸所・清藤: 「規格化二次電子分布による電位測定」学振第 132 委員会第 97 回研究会資料, p. 112 (1986-11)