

レーザ及び、電界を用いたオープン故障回路の出力論理の固定化 By using laser irradiation and electric field impression, output logic stabilization of open fault circuit

眞田 克^(a) 橋田 啓示^(b) 安富 泰輝^(a)

M. Sanada^(a) K. Hashida^(b) T. Yasutomi^(a)

^{a)} 高知工科大学 工学部 電子・光システム工学科

^{b)} ルネサスデザイン システム LSI 第二本部

^{a)} Dept. Electronic and Photonic Systems Engineering,
Kochi University of Technology

^{b)} 2nd System LSI Department, Renesas Design Co.,

要約: 不安定な出力論理を有するフローティングゲート故障に対して、出力論理値を固定化する実験を行った。実験はゲートオープン故障を作り込んだサンプルに対して、外部から刺激を印加する方式である。刺激はレーザ照射と電界印加である。電気的特性をモニタしながらその効果を調べた。その結果、前者はフローティング状態による種々の特性に関わりなく出力電圧値を H に固定化できた。後者はフローティング状態の電気的特性に重畳した特性として確認できた。これらの現象はゲートオープン故障箇所の特定や故障診断へのアシストとして適用できる。セル内故障診断において、論理固定化したモデルを回路に埋め込むことで確度の高い故障候補を特定できる。

Abstract: An experiment for stabilization of output logic brought by floating gate fault with unsuitable electric value has been executed. The method is the way to apply outside impulse to LSI with gate open fault. The impulses are laser irradiation and electric field impression. The experimental result is that the former impulse brings stabilization of output logic value, regardless of a couple of electrical features brought by gate floating state, and the latter brings the change of electric value wrapped over electric property of floating gate. These phenomenon are applied to detect fault portion with gate open, and to assist fault diagnosis. For the fault diagnosis technology based on transistor level, the stabilized logic value is embedded in fault circuit and high accuracy candidate fault portions are detected

キーワード: フローティングゲート故障、論理の固定化、故障診断、レーザ照射、電界

Keywords: Floating gate fault, Stabilized logic value, Fault diagnosis technology, Laser irradiation, Electric field impression

1. まえがき

LSI は大規模化、微細構造化、多層配線構造化が進み、物理解析のみでの故障箇所の特定は技術的に困難になってきている。さらに実施に際して膨大な工数を費やす傾向になってきている。そのため、ソフトを用いて故障候補を絞込みその候補に対して物理解析を行う診断の介在が必要不可欠になってきている。

ところで高精度なシミュレーションを用いた診断技術としてアナログ解析をベースとした SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)があった。しかしながら準備と診断処理に時間がかかるため、短 TAT を必要とする故障診断技術において実用的ではなかった。この要求を満足するため、これまでに高い診断精度と簡易な操作による診断技術を開発してきた(1)(2)。これらはショート故障に対して故障論理をほぼ正確に識別でき故障候補を

特定できたが、オープン故障に関しては故障候補の特定に困難を極めていた。この理由はオープン故障に伴う論理や電流値が不安定なためであった(3)。

このような背景にあって、オープン故障に対する診断精度向上のために隣接する配線論理とのカップリング効果による論理の印加現象を用いた方式(4)(5)や、故障の顕在化のために LSI 表面の上部に電界を印加し、変化する電流と印加位置のマッピングから故障箇所を特定する物理解析の方法(6)が報告されている。前者のカップリング効果を用いた方式は並走する隣接配線との長さ、間隔及び、入力信号に同期して変化する隣接配線群の論理の組合せを把握しながら誘導論理を算出する方式である。しかし、LSI の進展に伴う配線長の短縮化や周辺回路の多様な論理状態はカップリング効果による論理の確定精度を難しくする方向にある。

後者の電界印加とその位置のマッピングによる故障箇所の特定は、各配線上に電界プローバを合わせた局部へ電源電圧に重畳した励起パルス波形を用いることで I_{DD} 値の変化を識別する方式である。しかし、nA オーダという微小な変化のため DSM 化と共に I_{DD} 値の変化を特定しづらくする方向にある。

以上のような困難さの中であって、オープン故障に対して論理や電圧値を固定化することができればモデル化が容易となり診断精度が大幅に向上でき、さらには故障箇所を顕在化することができる。本論文はこのオープン故障に対して論理を固定化することで故障モデルを実現するために行った実験報告である。本文は 2 章にてオープン故障に伴う論理の固定化のために用いたレーザー照射法と電界印加法について説明する。3 章にてこれらの方法がなぜ論理の固定化につながるかという実験結果の考察を述べ、最後にまとめを行う。

2. 論理の固定化実験(7)

まず、論理の固定化を実験するために使用した回路と測定設備を述べたのち、固定化に用いた刺激であるレーザー照射法と電界印加法による実験結果を説明する。

2.1 実験用回路と測定設備

実験には VDEC(0.18 μm デザインルール、 $V_{DD}=1.8\text{V}$)にて作成したインバータ(以降、Inv と記す)回路を用いた。回路構造は Nch トランジスタ(以降、NTr と記す)に対する Pch トランジスタ(以降、PTr と記す)の W 値(ゲート幅)を 2 倍とすることでしきい値のバランスを図った。そして Inv 回路の各電極にパッドを設け、プローピングにより電圧を供給するようにレイアウトした。

図 1 はゲート電圧を振ったときの $V_{in} - V_{out}$ 及び、 $V_{in} - I_{DD}$ 特性であり、正常回路と、ゲート電極をオープンとした故障回路の特性を同時に示している。オープン状態での出力特性は $V_{out}: 1.6\text{V}$ 、 $I_{DD}: 175\ \mu\text{A}$ を示した。但し、この値は測定の度に变化する。又、サンプルではらついている。この不安定特性を中間論理状態と呼ぶことにする。

実験装置は図 2 に示すように、シールド Box 内に設置したプローピング機能を有する顕微鏡と回路に任意の刺激を加える印加装置及び、シールド Box 外に設置した半導体パラメータアナライザ、オシロスコープ及び、制御用 PC となる。そして Box 内での測定信号は同軸ケーブルを介して Box 外の機器に接続されている。印加する刺激はレーザー照射光と電界である。

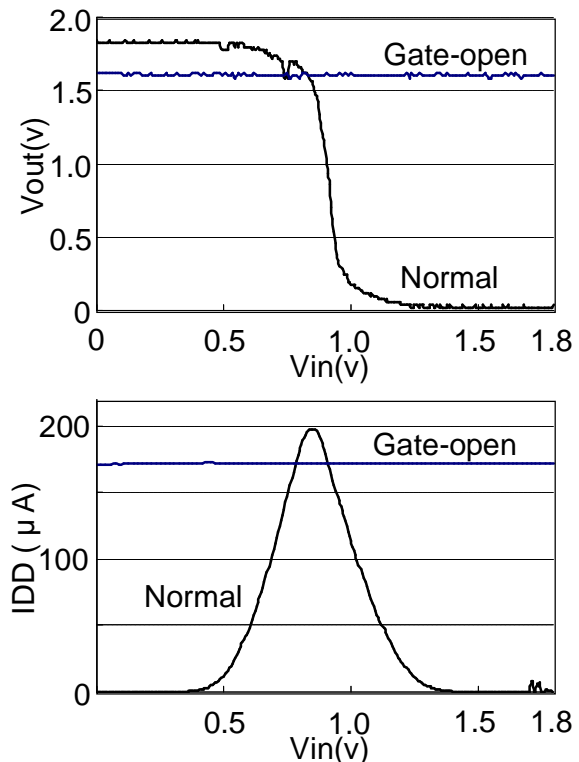


図 1 正常回路とゲートオープン回路の $V_{in}-V_{out}$ 及び、 $V_{in}-I_{DD}$ 特性

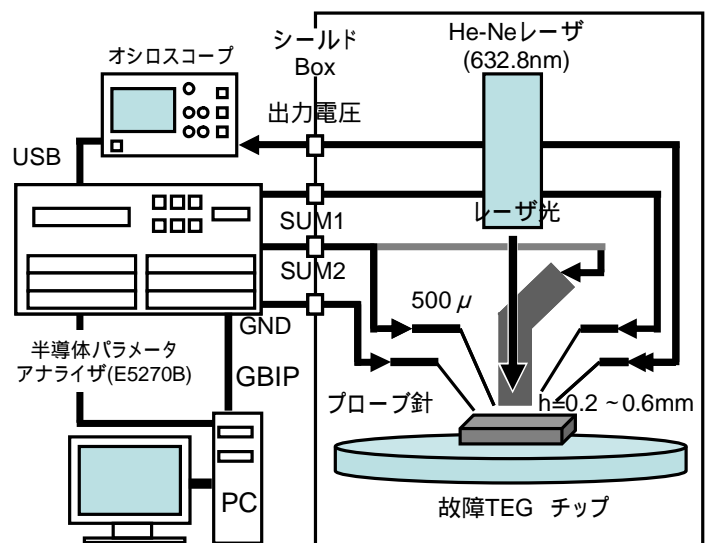


図 2 実験装置の概要

レーザは He - Ne (波長: 632.8nm, 4mW)である。レーザは顕微鏡の鏡筒上部に設置し、Box 外からの切り替え信号で照射が制御される。電界はマニプレータに取り付けたブローバ金属針(材料:w、直径:約 500 μm)に電圧を印加することで設定した。LSI 表面との距離はマニプレータの Z 軸方向の回転数(1 回転 10 μm)で制御できる。

2.2 レーザ照射実験

Inv 回路全面にレーザを照射した。レーザ照射による測定状況を図 3 に示す。

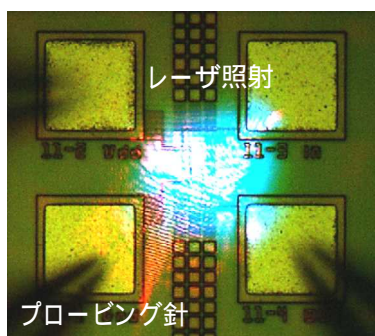


図 3 レーザ照射実験

2.2.1 レーザ照射による特性の変化

レーザ照射による特性の変化を図 4 に示す。ゲートオープン状態での初期値は $V_{out}: 1.4\text{v}$ 、 $I_{DD}: 200 \mu\text{A}$ であった。レーザを照射すると $V_{out}: 1.8\text{v}$ 、 $I_{DD}: 0 \mu\text{A}$ と H 論理状態に変化した。そして、レーザ照射を止めると V_{out} は一端 0.5v 近辺まで低下するが時間とともに初期の 1.4v 近辺へ上昇していった(約 15 分)。 I_{DD} 値は照射停止と同時に $200 \mu\text{A}$ 近辺に上昇した。以上の現象はレーザ照射により出力論理が H に固定され、照射を止めると元に戻ることを示している。

しかし、ゲート電圧を印加した正常状態では論理特性にほとんど影響を与えないが I_{DD} 値は約 $50 \mu\text{A}$ 増加する。この現象は通常みられる OBIC 現象による真性の光電流 (I_{ph}) である(7)。

2.2.2 複数回の繰り返しによる V_{out} 値の変化

ゲートオープン状態で V_{out} 値が 1.4v を示す Inv 回路に複数回のレーザ照射を行い、 V_{out} 値の変化を観察した。その結果、照射時の出

力電圧は 1.8v と上限に固定されるが止めたときの変動地点は複数回の繰り返しと共に低電圧の方へシフトしていく傾向が見られた。図 5 にその様子を示す。

ゲートオープン状態で V_{out} 値が 0.2v を示す Inv 回路に複数回のレーザ照射を行い、 V_{out} 値の変化を観察した。その結果、照射時の出力電圧は 1.8v と上限に固定されるが止めたときの変動地点は多少の変動はあるもののほぼ 0.3v 近辺に落ち着く傾向が見られた。図 6 にその様子を示す。

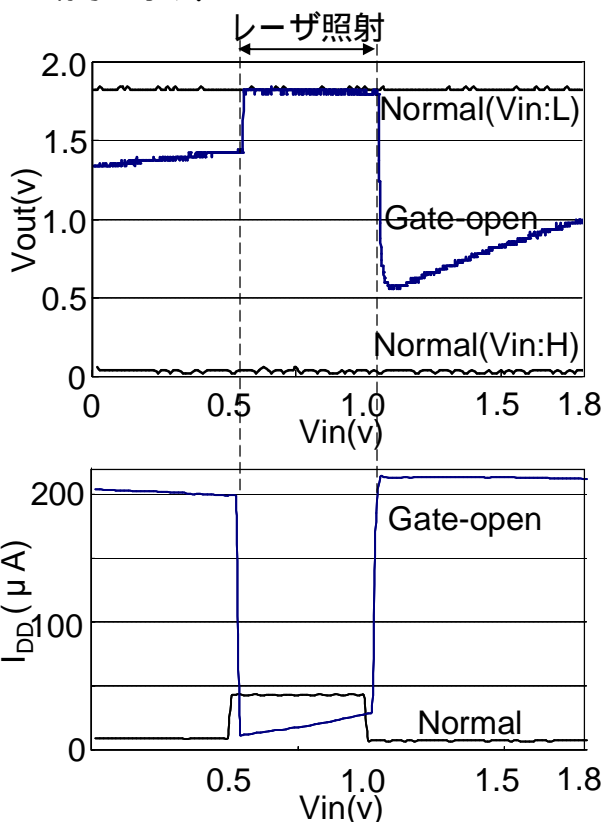


図 4 レーザ照射によるゲートオープン回路の特性変動

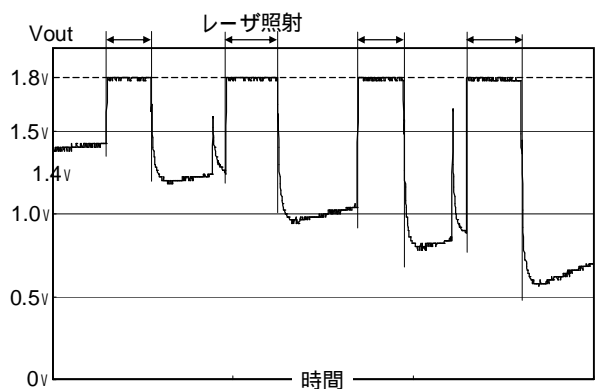


図 5 ゲートオープン状態で V_{out} 1.4v を示す Inv 回路への複数回のレーザ照射

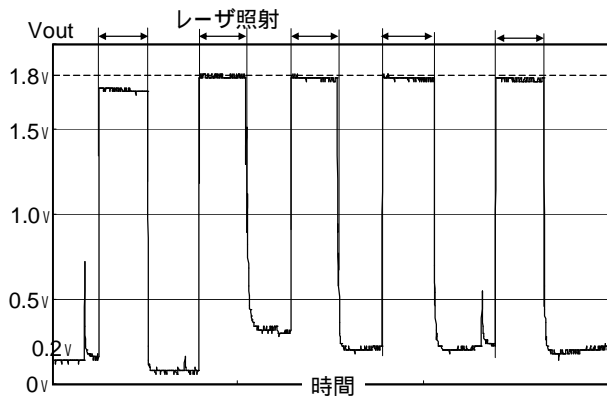


図6 ゲートオープン状態で Vout 0.2v を示す Inv 回路への複数回のレーザー照射

以上、ゲートオープン状態の Inv 回路はレーザー照射により Vout 値は 1.8v (V_{DD}) と H に固定されることが判った。

2.3 電界印加実験

Inv 回路全面に電界を印加した。電界印加による測定状況を図 7 に示す。実験は LSI 表面から約 200 μm、400 μm、600 μm と離れた状態でプローバ針に ±40v、±20v、0v を印加する 15 通りの組合せで実施した。電界による特性への影響は図 8 に示すように、プローバ針と LSI 間距離が最短側 (200 μm) 及び、印加電圧が高電圧側 (±40v) に一番強いことが判明した。

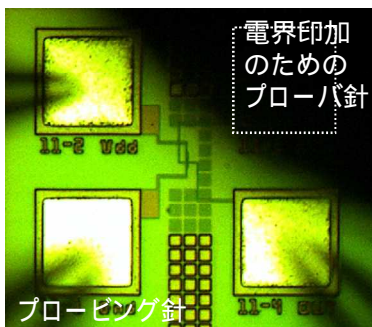


図7 電界印加実験

以下に、LSI 表面から約 200 μm 離れた状態でプローバ針に ±40v、±20v、0v を印加した 5 通りの実験結果を図 9 及び、表 1 に示す。ゲートオープン状態での初期値は平均 Vout:1.5v、I_{DD}:163 μA であった。その内、距離 200 μm と印加電圧 +40v / -40v での各々の変動は以下のようなになった。出力端子での中間電圧

(1.5v) は - 方向に 0.42v 変化し 1.08v / + 方向に 0.14v 変化し 1.64v となった。同時に発生した貫通電流は 165 μA に対して + 方向に 16 μA 変化し 179 μA / - 方向に 27 μA 変化し 130 μA と、I_{DD} - Vin 特性カーブに沿った変化をした(3章 図 12 を参照)。

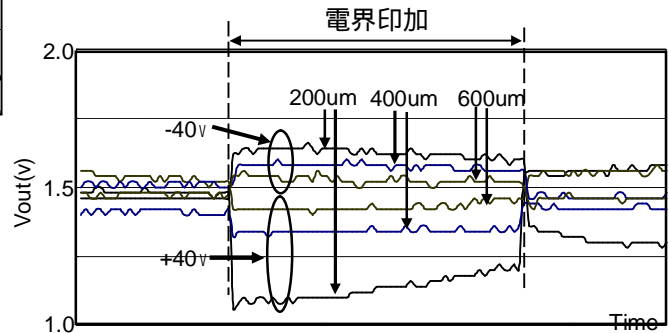


図8 電界印加における距離の影響

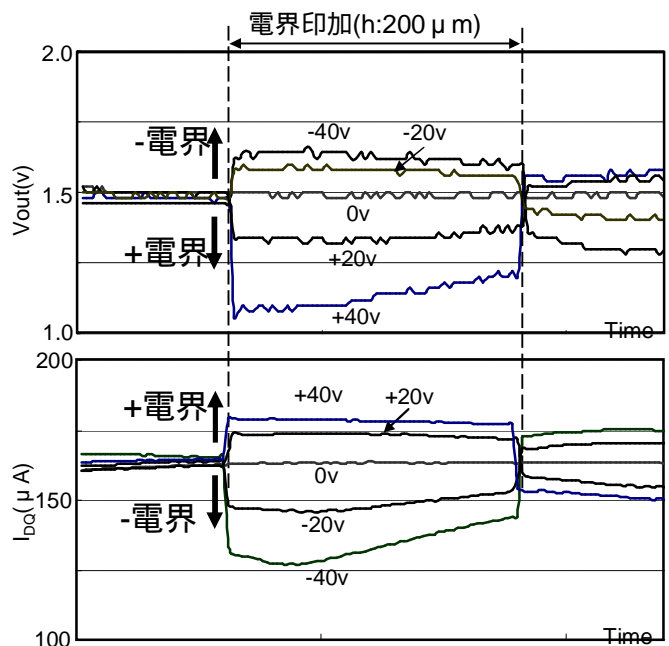


図9 距離: 200 μm での ±40v、±20v、0v 印加した Vout と I_{DD} の変動

表1 図9記載のデータの数値表示

印加電圧	+40v	+20v	0v	-20v	-40v
Vout(v)	1.08	1.34	1.50	1.58	1.64
(変動量)	(-0.42)	(-0.16)	(0)	(+0.08)	(+0.14)
I _{DD} (μA)	179	174	163	145	130
(変動量)	(+16)	(+11)	(0)	(-18)	(-27)

以上、電界印加に対して出力論理値は固定化されないが、ゲートオープン状態にてゲート電極に設定されている電圧値に対して電界によりその電圧値を上下させることで V_{out} 値を変動させることができた。

2.4 レーザ照射と電界印加の実験

中間論理状態の Inv 回路にまず電界を印加した後、レーザを照射しその特性変動を測定した。

ゲートオープン状態での初期値は $V_{out}:1.5v$, $I_{DD}:165 \mu A$ であった。まず、プローバ針と LSI 間を距離 $200 \mu m$ とした状態でプローバ針に $+40v$, $+20v$, $0v$, $-20v$, $-40v$ の 5 種類の電圧を印加して特性を変化させた後、レーザを照射した。この結果を図 10 に示す。

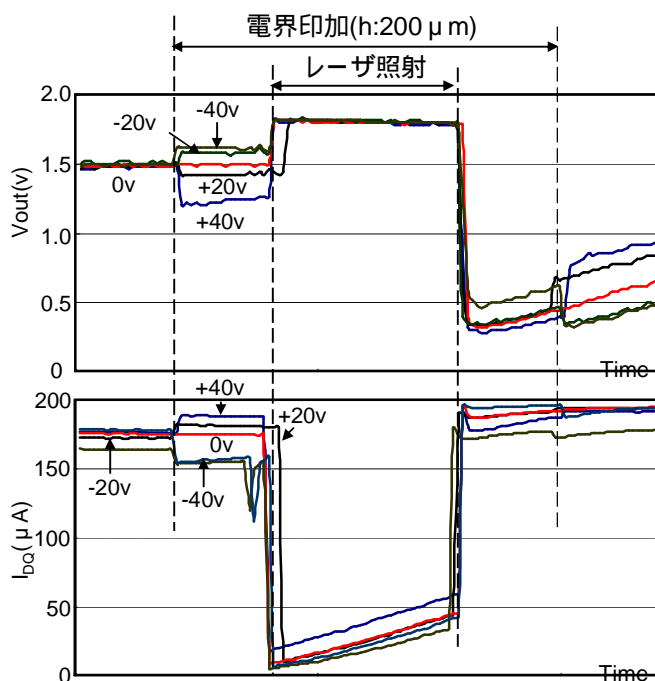


図 10 電界印加 ($h:200 \mu m$) の状態でレーザ照射したときの電気的特性の変化

この実験による電気的特性の変化は、電界印加による変動 (2.3 節参照) を発生させた中間電位状態に対してレーザを照射して変動をみた。レーザ照射により電界印加によ利変動したすべての特性は V_{out} が $1.8v$, I_{DD} が $0 \mu A$ となった。レーザ照射を止めると電界印加による変

化を保持した状態で $0.4v$ 近辺まで低下し時間とともに上昇した。その状態で電界印加を止めると電界による変動分は解消され、初期状態に移行することが観測された。

以上の実験は、レーザ照射による電気的特性への影響が大変強いことを示しており又、示唆している。刺激が LSI 上に残留しないことを示している。

3. 実験結果の考察

外部からの刺激による特性変動がなぜ発生するか考察した。

3.1 レーザ照射による特性変動

レーザを照射すると主としてドレイン接合に形成された空乏層中で電子(e) - 正孔(h)対が生成され、これらのキャリアは再結合や電極から外部へ流れる(8)。まず、 I_{DD} に関してはこれらのキャリアは図 11 に示すように V_{DD} 電極部、出力端子部、GND 電極部で再結合するため I_{DD} はほとんど検出されないと思われる。一方、論理に関してはほとんどのフローティングゲート状態がレーザ照射により論理が H に固定するがその理由はまだ解明できていない。

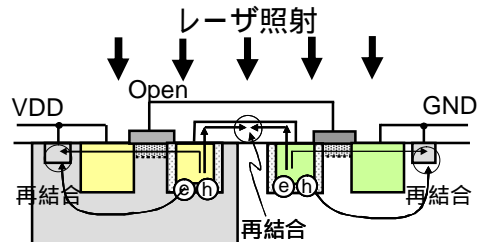


図 11 フローティングゲート回路へのレーザ照射による OBIC 電流

3.2 電界印加による特性変動

電界印加によりフローティングゲート配線上へ電圧が重畳される現象は LSI 基板(GND)とプローバ針間に設定された電界 (電位勾配) によるものである。図 12 は 2.3 節に示した距離 $200 \mu m$ と印加電圧 $+40v$ での変動を $V_{in}-V_{out} / I_{DD}$ 特性で示した説明図である。

この変動値を検証してみる。距離 $200 \mu m$ にてフローティングゲート配線の位置は LSI 基板

から $2\mu\text{m}$ とすると、印加電圧の約 $1/100$ が重畳される計算である。従って、 $+40\text{V}$ 印加にて約 0.4V の電圧が重畳されると計算され、実験結果と一致することがわかる。

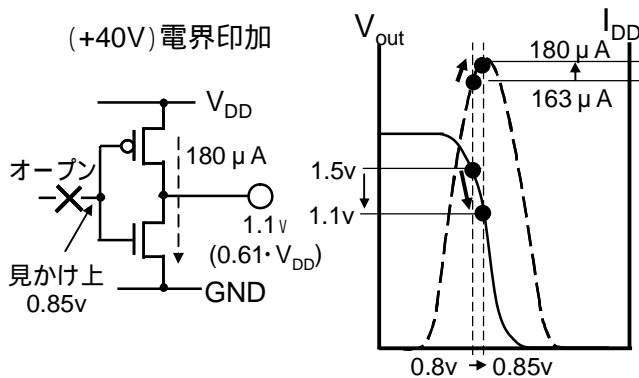


図 12 電界印加による特性変動

4. まとめ

不安定な出力論理を有するフローティングゲート故障に対して、外部から刺激（レーザー照射、電界印加）を印加することで出力論理値を固定化する実験を行った。使用した回路は $0.18\mu\text{m}$ ルールによるインバータ回路である。

その結果、

外部からの刺激は刺激しているときのみ効果を発揮し、止めると初期状態へ戻ることが判明した。そのことはこれらの刺激が LSI 上に残留しないことを示しており、オープン故障有無の識別の上で有益である。

レーザー照射はフローティングゲート状態の不安定な出力論理を $H(V_{DD})$ 値に固定化した。同時に I_{DD} 値はほぼ流れなくなった。

但し、論理の固定メカニズムは調査中である。電界印加は論理の固定化には至らないが、電位勾配に依存した電位の変動を行うことができた。その効果はプローバ針と LSI 間距離が近いほど及び、印加電圧が強いことが変動値が大きいことが判明した。

レーザー照射と電界印加を同時に実施した場合、レーザー照射による刺激が強いことが判明した。

今後の実験予定に関して

オープンゲートを有する多様なゲート回路に対して、同様の刺激を印加したときの電気的特性の変化を測定する。

多層配線構造に対応するために、LSI の裏面からのレーザー照射による論理固定化の実証を行う。

電界印加法はプローバ針の印加位置のさらなる近接化と高電圧帯電化による特性の変動を測定する。

論理固定のモデル化を確立し、素子レベルにおける電圧値ベースの診断方式（セル内診断）(1)(2)に適用する。

参考文献

- [1] 眞田、吉澤、則松、“スイッチング・レベル・シミュレーションを用いたセル内故障診断技術 - リーク故障が論理動作に与える影響 - ”、LSI テスティングシンポジウム/2005 会議録, p.225-230
- [2] M.Sanada and Y.Yoshizawa, "Fault diagnosis technology based on transistor behavior analysis for physical analysis", Microelectronics Reliability, Vol.46 Issues 9- 11 pp.1575-1580, 2006
- [3] 8.橋田、眞田、“オープン故障がもたらす電気的特性の評価・解析”、LSI テスティングシンポジウム/2008 会議録, p.195-199
- [4] 佐藤、山崎、山中、“LSI 故障診断の分解能向上手法”、LSI テスティングシンポジウム/2002, pp.101-106
- [5] 高橋、樋上、相京、高松、山崎、堤、橋爪、四柳、“オープン故障に対する一故障モデルの提案とその故障診断”、LSI テスティングシンポジウム/2006, p.181-186
- [6] 小宮、菊池、嶋瀬、向川、“LSI 断線箇所診断手法”、LSI テスティングシンポジウム/2004, pp.279-283
- [7] 特願 2009 - 178418 号
- [8] 眞田、“レーザープロービングパッドの作り込みによる LSI 内部動作解析”、電子情報通信学会、信学技報、ICD2002-191, p.39-46, (2003-01)