

加速器による半導体のシングルイベント耐性の実測評価

京都工繊大電子システム工学専攻 小林和淑

Beam Test by Particle Accelerator for Single Event Effects on Semiconductors

Dept. of Electronics., Kyoto Institute of Tech. K. Kobayashi

半導体集積回路に中性子などの放射線が飛び込むことにより生じるシングルイベントにより、メモリの記憶値が反転するソフトエラーが発生する。その発生率は非常に小さいが、スーパーコンピュータなどの超大規模システム、自動車などの高い信頼性が求められるシステムでは、その対策は必須である。ソフトエラー対策が必要な高信頼かつ高安全な半導体の市場は 2016 年度半導体市場全体の 1 割以上を占めており、今後その市場は膨らんでいくと予想されている。

半導体における放射線によるシングルイベント効果が最初に発見されたのは、DRAM の故障の調査結果からである。これは、LSI を包むパッケージに含まれる微量の放射性同位体が α 崩壊することにより放出される α 線 (He の原子核) によるものである。 α 粒子により DRAM の記憶内容を反転させるいわゆるソフトエラーが発生する。含まれる放射性同位体を減らした低 α 材料を使うことで α 粒子によるソフトエラーを減らすことが可能である。しかしもうひとつの要因である中性子は、遮蔽が極めて難しく回路やシステム側での対策が必須である。[1] では、ソフトエラーに弱い SRAM を DRAM に置き換えた場合の電子機器の故障率が約 1/10 に下がることを実測により示しており、日常の電子機器の不具合の 90% はソフトエラーによると言ってもよい。

プロセス、回路、システムでさまざまなソフトエラー対策が取られている。SOI (Silicon On Insulator) プロセスは、トランジスタ領域と基板を絶縁する。基板で発生した電荷がトランジスタに到達しないため、従来のバルクプロセスと比べてエラー率が減少する。多重化はフリップフロップなどの記憶素子を複数用意することで、その一つが反転してもエラーとならない。自動車用半導体では、回路レベルの多重化に加えて、同じ演算を時間をずらして二重実行し、結果が合わない場合は再度実行する Dual Lock Step と呼ぶ対策も施している。京コンピュータなどのスーパーコンピュータは約 8 万個の CPU が搭載されている。一つの CPU が 100 年間エラーを起こさないとすると、その平均動作可能時間は約 10 時間となり、対策なしには、長時間の稼働は不可能である。

我々は、28nm, 65nm ノードの SOI プロセスを用いてそのソフトエラー耐性

の評価を行った [2, 3] . ビットあたりの SER は , 65nm において SOI はバルクの 1/10 から 1/100 , 28nm SOI は 65nm SOI の約 1/20 となった . [3] では , トランジスタを直列接続することによる SOI プロセス向けの耐ソフトエラー FF を提案している . この対策は主に宇宙用途にも用いられている [4] .

ソフトエラーはめったに発生しない現象であるため , 加速試験を行う必要がある . 線は ^{214}Am の線源を半導体チップ直上に置くことにより加速試験を行うが 線は紙一枚でも遮蔽されるため , チップを直接見ることのできる特殊なパッケージが必要となる . 中性子はサイクロトロンにより加速された陽子をタンゲステンに照射することにより発生させる . この中性子のスペクトラムは地上に降り注ぐものとほぼ同じであり , 地上での 10 年で発生するソフトエラーを 1 秒で観測することが可能である . 日本では , 阪大の RCNP (核物理研究センター) にて自動車用 , スーパーコンピュータ用の SoC[5] , フラッシュメモリ , DRAM , パワーデバイス [6] などの中性子耐性試験が実施されている . 我々のグループも 2009 年度より中性子実験を行い , 集積回路のエラー耐性の実測評価を継続的に行っている . 2016 年 12 月に , 小型の加速器により加速した陽子をベリリウムターゲットに照射して中性子を発生させソフトエラーを再現可能との発表 [7] がなされた . 陽子のエネルギーが 400MeV の RCNP と比べて 18MeV と小さく , 地上に降り注ぐ 100MeV を超える中性子によるソフトエラーを再現することはできない可能性が高い . この試みは市販機器がエラー耐性を持つか持たないかを主眼にしているからだと推察する .

微細化に伴い 1 チップに搭載されるトランジスタの数は既に 10 億個を超えており , その用途は日常触れる電子機器だけではなく , 社会インフラや航空機 , 自動車などに広がっている . 信頼性の低下は社会生活や人命を脅かす . ソフトエラーはその確率は低いものの日常的に発生しており , その対策なしには安全なシステムを実現することは不可能である .

参考文献

- [1] K. Shimbo, et al, SELSE, 2011.
- [2] M. Hifumi, et al, RASEDA, pp. 93–96., 2015
- [3] J. Furuta, et al, IEEE TNS, vol. 63, no. 4, pp. 2080–2086, 2016.
- [4] A. Makihara, et al, IEEE TNS, vol. 51, no. 6, pp. 3621–3625 2004.
- [5] T. Uemura, et al, IRPS, 2010, pp. 218–223.
- [6] H. Asai, et al, IEEE TNS, vol. 59, no. 4, pp. 880–885, 2012.
- [7] “<http://www.ntt-at.co.jp/news/2016/detail/release161219.html>.”