

**Multi-Field Reactor の創造**  
**1nm を超える半導体装置：原子状態工学と確率分布制御に基づく新しい装置パラダイム**  
**Creation of the Multi-Field Reactor**  
**A New Device Paradigm Beyond 1 nm Based on Atomic-State Engineering and**  
**Probability-Distribution Control**

Shigemi Ochiai, Ph.D.  
 Jonquil Consulting Inc.  
 2-17-18. Honmachi Shibuya City, Tokyo 151-0071 Japan

4<sup>th</sup> January, 2026

**序論**

1nm 世代の半導体製造では、材料物性の支配因子が「平均値」から「確率分布」へと転換する [1][8]。従来の製造パラダイムは、式(1)のような物性 $X$ の平均値を揃えることを目的としてきた。

$$\langle X \rangle = \text{Const.} \text{-----} (1)$$

しかし 1nm 領域では、平均値ではなく分布そのものが支配的となるため、本研究では式(2)に示すような、原子の“位置”ではなく“状態”を制御対象とする新しい装置概念 Multi Field Reactor を提案する。

$$p(X) \text{ is the design target.} \text{-----} (2)$$

1nm 以下では、図 1 に示すように、原子の 50–70%が表面に位置し [1]、局所構造、表面結合状態、局所電場、ラジカル密度、温度勾配といった複数のフィールドが相互干渉しながら原子状態を決定する [4][6]。従来の装置が前提としてきた「均一性の制御」は破綻し、ALD 吸着確率 (0.55–0.75) [2][3]、Si–Si 結合長の電場歪み ( $\pm 0.05 \text{ \AA}$ ) [5]、酸化膜密度揺らぎ ( $\pm 3\text{--}5\%$ ) [9] など、確率的揺らぎがデバイス特性を直接支配する [7][10]。

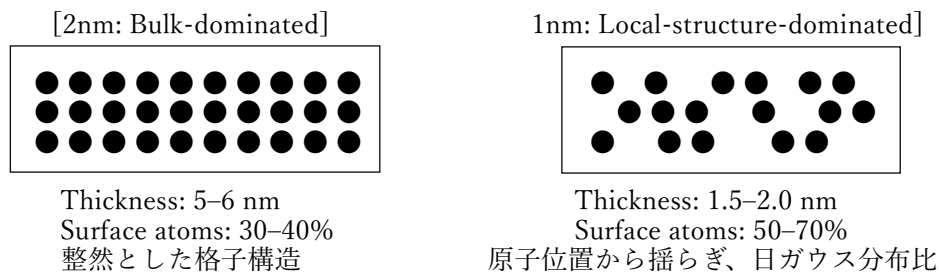


図 1 高精細 ASCII 図 (構造相転移：2nm → 1nm)

Multi-Field Reactor は、電場、表面電荷、ラジカル密度、温度勾配といった複数のフィールドを同時に制御し、原子状態を設計する反応場を生成する。また、In-situ Raman、電荷センシング、フィールドマッピングなどを統合した Atomic-State Feedback System により、原子状態をリアルタイムで推定し、確率分布をフィードバック制御する [13][14]。これにより、吸着確率分布の shaping、密度揺らぎの抑制、極値の制御が可能となり、1nm 以降の製造におけるばらつきを直接制御できる [8][11]。

本研究は、材料科学・リスク工学・装置工学を統合し、1nm 以降の製造パラダイムを「平均値の制御」から「確率分布の制御」へと転換する新しい装置アーキテクチャを提示するもので、Multi-Field Reactor は、次世代半導体製造における信頼性・量産性・スケーラビリティを支える基盤技術となる。

**Keywords,**

*Multi-Field Reactor, Atomic-State Engineering, Probability-Driven Processing, Local-Structure Risk, Field-Defined Materials, Sub-1nm Manufacturing*

**1. はじめに**

半導体製造は長らく「微細化＝性能向上」というスケーリング則に従って発展してきた[1]。しかし、1nm 世代に近づくにつれ、この前提は根本的に崩れつつある[7]。ナノシート厚が 1.5–2.0 nm となると、原子の 50–70%が表面または界面に位置し、材料はもはやバルクとして振る舞わない[1]。局所構造、表面結合状態、局所電場、ラジカル密度、温度勾配といった複数の因子が相互干渉し、デバイス特性を決定する[4][6]。

この領域では、材料物性の支配因子は「平均値」ではなく「確率分布」であり[8]、従来の装置が前提としてきた均一性制御は本質的に限界を迎える。本研究は、この相転移を踏まえ、原子状態を制御対象とする新しい装置概念 Multi-Field Reactor を提案する。

**2. 1nm 領域における従来装置の限界**

1nm 領域では、以下のような確率的揺らぎが顕在化する。

- ALD 吸着確率：0.55–0.75[2][3]
- Si-Si 結合長の電場歪み：±0.05 Å[5]
- 酸化膜密度揺らぎ：±3–5%[9]
- トンネル電流の変動：10 倍以上[10]
- 局所構造の非ガウス分布化 (Heavy-tailed) [8][11]

これらを表現すると図 2、図 3、図 4 のようになる。従来の「平均値を揃える」装置設計では制御不可能である。

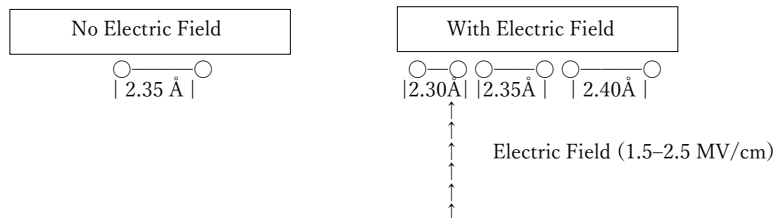


図 2 電場による Si-Si 結合長の歪み

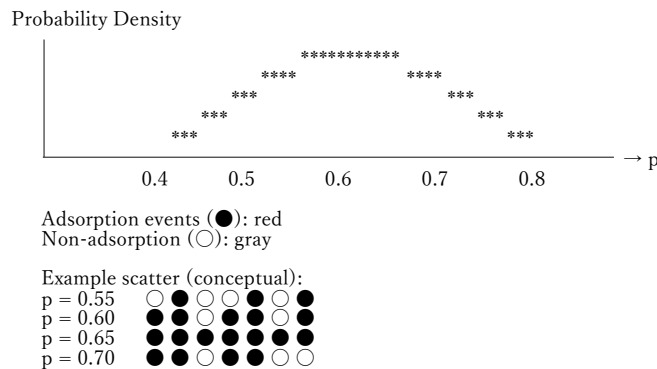


図 3 ADL 吸着確率分布

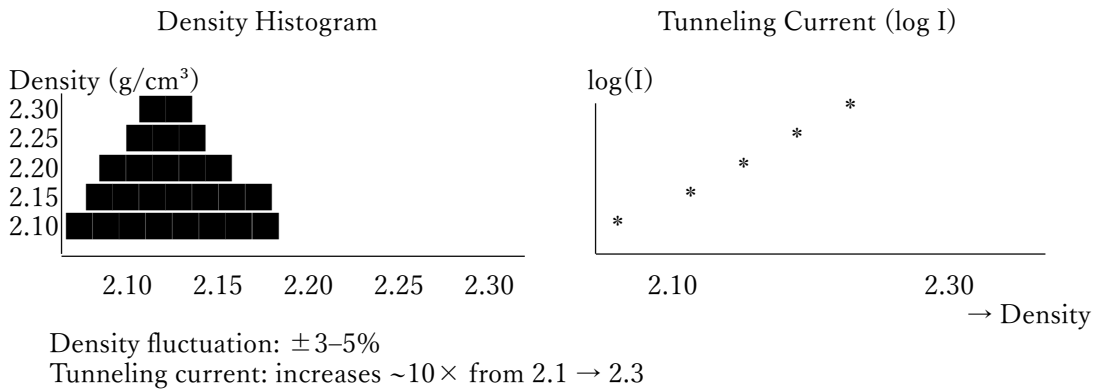


図4 酸化膜密度揺らぎとトンネル電流

### 3. 原子状態工学 (Atomic-State Engineering) の提案

本研究では、原子の“位置”ではなく“状態”を制御する工学を Atomic-State Engineering と定義する。制御対象は、電子雲の偏り[6]、局所電場[5]、表面結合状態[4]、反応確率のフィールド[2][3]、局所温度勾配[6]で、原子状態をベクトルとして式(3)で表される。

$$s = \begin{bmatrix} \text{局所電場} \\ \text{表面結合状態} \\ \text{電子雲の偏り} \\ \text{局所温度} \end{bmatrix} \text{-----} (3)$$

ここで、複数のベクトルを式(4)にすると、原子状態は式(5)で与えられる。

$$F = \begin{bmatrix} E \\ \sigma_{\text{surf}} \\ \rho_{\text{rad}} \\ \nabla T \end{bmatrix} \text{-----} (4)$$

$$s = s(F, x) \text{-----} (5)$$

すなわち、Multi-Field Reactor は、位置 $x$ におけるフィールド $F$ を制御することで、原子状態 $s$ の空間分布を設計する装置である。式(3)、(4)、(5)を図で表現すると図5のようになる。

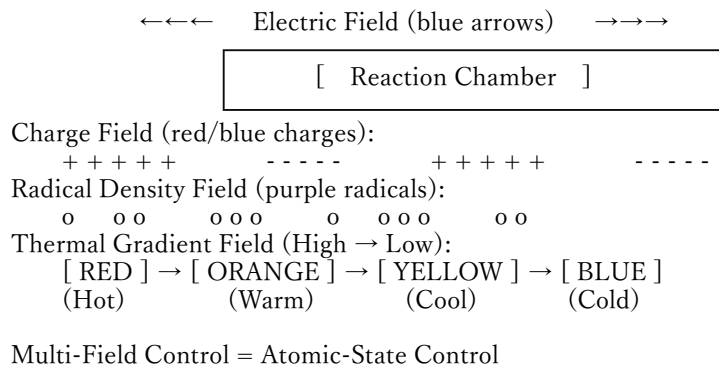


図5 Multi-Field Reactor 概念図

#### 4. Multi-Field Reactor の装置アーキテクチャ

##### 4.1 多場統合リアクタ (Multi-Field Reactor)

Multi-Field Reactor は、以下のフィールドを同時に制御する：

- Electric Field[5]
- Charge Field[4]
- Radical Density Field[2]
- Thermal Gradient Field[6]

これにより、図5に示したように、原子状態を直接設計する反応場を生成する。

##### 4.2 Atomic-State Feedback System

In-situ 計測を統合し、原子状態をリアルタイムで推定する：

- In-situ Raman[13]
- In-situ charge sensing[13]
- Field mapping[14]
- Density fluctuation monitoring[14]

これにより、確率分布のフィードバック制御が可能となる。

##### 4.3 Probability-Shaping Processing

Multi-Field Reactor は、吸着確率分布[2][3]、結合エネルギー分布[5]、密度揺らぎ分布[9]、トンネル確率分布[10]などの確率分布を shaping できる。

原子状態  $s$  の確率分布  $p(s|F)$  を、目標状態  $s^*$  の周囲に集中させる最適化問題として、式(6)のように定式化できる。

$$J(F) = \int \|s - s^*\|^2 p(s|F) ds \text{ ----- (6)}$$

Multi-Field Reactor の設計問題は、

$$F_{opt} = \underset{F}{\operatorname{argmin}} J(F) \text{ ----- (7)}$$

式(7)として与えられる。

これは 図6に示した分布幅の縮小・tailの抑制・極値の制御を数学的に表現したものである[11]。

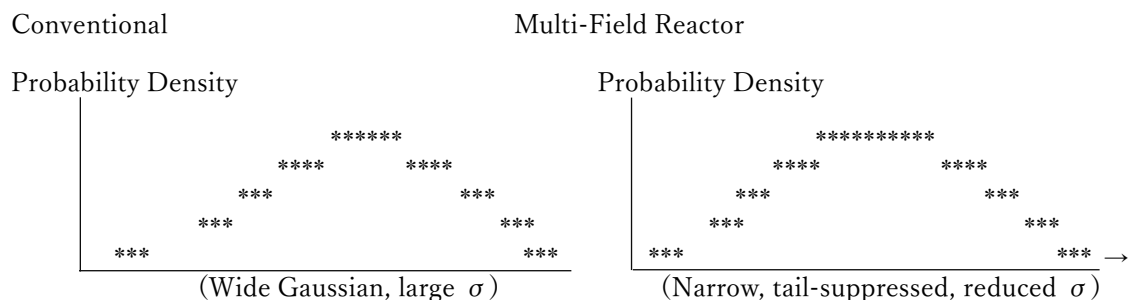


図6 確率分布の shaping

#### 5. インパクト：1nm 以降の製造パラダイムの転換

Multi-Field Reactor は、以下の点で 1nm 以降の製造を根本的に変革する：

- 均一性制御の限界を超える[1][8]
- デバイスばらつきの根源を直接制御[7][13]

- 量産性と信頼性の両立[1]
- 新しい装置 KPI（分布幅・分布形状・極値制御）の確立[11]
- 材料科学 × リスク工学 × 装置工学の統合[8][12]

## 6. 結論

1nm 以降の世界では、装置は「フィールド」と「確率」と「状態」を創る存在となる。Multi-Field Reactor は、従来の装置概念を超えた新しいパラダイムであり、次世代半導体製造の基盤技術となる。

## References

1. International Roadmap for Devices and Systems (IRDS), “More Moore: Logic Devices,” IEEE, 2023.
2. S. M. George, “Atomic Layer Deposition: An Overview,” *Chemical Reviews*, vol. 110, pp. 111–131, 2010.
3. H. Kim et al., “Surface Chemistry and Reaction Probability in ALD Processes,” *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 31, 2013.
4. J. Robertson, “High-k Materials and Interface Engineering,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 69, pp. 327–396, 2006.
5. K. Cho et al., “Electric-Field Induced Bond Distortion in Ultra-Thin Silicon Channels,” *Applied Physics Letters*, vol. 102, 2013.
6. T. Ando, “Electronic Properties of Two-Dimensional Systems,” *Reviews of Modern Physics*, vol. 54, pp. 437–672, 1982.
7. M. L. Reed, “Sub-Nanometer Device Physics and Quantum Confinement,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 59, pp. 192–200, 2012.
8. A. Zunger, “Statistical Fluctuations and Disorder in Semiconductor Materials,” *Nature Reviews Materials*, vol. 3, 2018.
9. B. E. Deal and A. S. Grove, “General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon,” *Journal of Applied Physics*, vol. 36, 1965.
10. J. P. Simmons, “Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect,” *Journal of Applied Physics*, vol. 34, 1963.
11. E. J. Gumbel, *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, 1958.
12. D. Kahneman and A. Tversky, “Prospect Theory: An Analysis of Decision Under Risk,” *Econometrica*, vol. 47, 1979.
13. S. Ogawa et al., “Local Variability and Reliability in Advanced CMOS,” *IEDM Technical Digest*, 2019.
14. H. Ota et al., “Impact of Local Structure Fluctuations on Sub-2nm Devices,” *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 22, 2023.
15. Y. Nishi and R. Doering (eds.), *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, CRC Press, 2017.
16. S. Ochiai, “Local-Structure Risk and Atomic-Scale Variability in Semiconductor Materials,” *Jonquil Consulting Technical Note*, 2025.