

小田俊理 「シリコン量子ドットデバイスの先駆的研究」

ODA Shunri “Pioneering Research on Silicon Quantum Dot Devices”

1. 略歴：

1951 年 8 月 7 日生
1974 年 東京工業大学理学部物理学科卒業
1979 年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士
課程修了・工学博士
1979 年 東京工業大学工学部助手
1982 年 マサチューセッツ工科大学 客員研究員
(～1983 年)
1986 年 東京工業大学工学部電子物理工学科助教授
1995 年 東京工業大学量子効果エレクトロニクス研
究センター教授
2017 年 東京工業大学名誉教授
2017 年 東京工業大学特任教授 (～2018 年)



IEEE フェロー(2012)、IEEE Electron Devices Society Distinguished Lecturer (2004～)、応用物理学会フェロー(2007)・功労会員(2021)。日本工学アカデミー会員(2017)。

2. 要約：

小田俊理は、電子デバイスの製造工程で原料ガスをパルス供給するアイデアにより、ナノスケールの高温超伝導超薄膜デバイス、シリコンナノクリスタル量子ドットデバイスを創製して、ナノエレクトロニクスの基礎を築いた。^{[1]-[4]} シリコン量子ドットデバイスは量子コンピューティングの研究に発展し、原子層制御超薄膜製造プロセスは最先端 CMOS 集積回路のゲート酸化膜製造技術に展開、VHF プラズマプロセスは、多くの半導体デバイスメーカーで薄膜堆積やエッチングなどに利用されている。

3. 研究業績とその学術的・社会的インパクト：

電子デバイス分野において、主にシリコン材料を中心にナノスケールデバイスの製造プロセスならびに量子効果現象に関する基礎・応用研究を広範に行ってきた。主な業績は次の通りである。

(1) アモルファスシリコンおよびナノ結晶シリコンデバイスの基礎と応用に関する研究：

アモルファスシリコン薄膜の生産性向上と高品質化を目指して、従来報告の無かった VHF プラズマ CVD の研究を 1987 年 4 月に開始した。プラズマ電子密度が高いので堆積速度は格段に向上し、プラズマによるダメージが少ない高品質膜を形成できることを実証した^[5]。同時期にスイス・ニューシャテル大学からも VHF プラズマ CVD の発表がなされた。従来は 13.56MHz の RF プラズマがもっぱら使用されていたが、プラズマ発生周波数を固定パラメーターでは無く、可変パラメーターとしてプラズマ装置を設計することを提唱した^[6]。VHF プラズマ装置はその後、太陽電池や大面積液晶ディスプレイ用薄膜トランジスタに応用されるアモルファスシリコン薄膜や集積回路用絶縁膜の製造のほか、エッチング装置に使われるようになった。

VHF プラズマ CVD 法を発展させて、原料ガスをパルス供給することで核形成と結晶成長プロセスを分離制御するというアイデアを着想して、世界最高水準の均一粒径ナノ結晶シリコンの作製法を発明した^[7]。高品質ナノ結晶シリコンを用いて、超高感度センサや低消費電力デバイスに応用される単電子トランジスタや、シリコン発光素子に応用される直接遷移型高効率可視光発光、ディスプレイデバイスに応用される高効率電子放出などを試作して、量子ドットの新しい可能性を提案し、新たな研究分野を開拓した。さらにナノエレクトロメカニカル素子による高密度不揮発性メモリへの応用展開に向けて重要な指針を与えた^[8]。

(2) シリコン結合量子ドットによる量子情報デバイスに関する研究：

シリコン量子ドットは、化合物半導体量子ドットに比べて電子有効質量が大きいため量子効果を発現するためには精度の高い微細加工技術が要求されるが、量子コンピューターの基本要素である量子ビットに要求されるコヒーレンス時間が長いこと、CMOS プロセス技術を利用して高集積化が可能であることに小田は着目した。電子ビームリソグラフィと異方性エッチング技術により物理的に定義された多重結合量子ドットを形成した。2 重結合量子ドットおよび 3 重結合量子ドットを作製し、電子スピンの操作に必要なパウリスピンブロックード、電荷センサを集積した多重結合量子ドットにおける少数電子領域の観察に成功し、量子コンピューティングの実用化に向けて重要な指針を与えた^[9]。

量子ビットを構成する

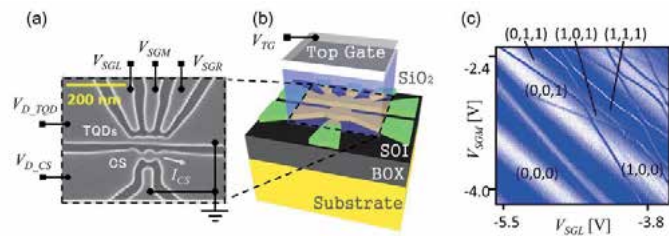


Fig. 1 電子ビームリソグラフィと異方性エッチング技術を用いて物理的に定義された3重量子ドットと電荷センサSETの (a) SEM像と (b) 模式図。 (c) 電荷センサのTransconductance, dI_{CS}/dV_{SGL} , と 左右のサイドゲート電圧 V_{SGM} , V_{SGL} の関係。 (n, m, l) の n, m, l は左, 中央, 右の量子ドット中の電子数を表す。少数電子領域が明瞭に観察できる。 $V_{TG} = 2.0$ V, $V_{D_TQD} = 0.8$ mV, $V_{D_CS} = 3$ mV and $V_{SGR} = -1.3$ V. 文献^[9]

材料としては超伝導デバイスやイオントラップによる研究開発が先行しているが、シリコン量子ドットは実用的な量子コンピューティングに必要な大規模集積化に適しており、2016 年ころから急速に研究が盛んになってきた。

ナノスケールデバイス研究に関しては、ケンブリッジ大学との国際共同研究を 1991 年から 25 年以上にわたって継続した。科研費国際学術研究、JST-CREST/SORST、JSPS 重点研究国際協力事業、グローバル COE などの資金援助を受けた。小田研究室ではケンブリッジ大学の PhD 課程を修了した研究者をポスドクとして 3 人受け入れ、アメリカ、インド、中国など他国のポスドク合わせて 16 人がそれぞれ成果を揚げ、国際的に一流の研究期間にポジションを見つけるなど、若手研究者の国際的キャリアステップの一翼を担っていた^[10-12]。

(3) 酸化物高温超伝導薄膜および高誘電率酸化物薄膜の作製に関する研究：

1986 年に発表された酸化物超伝導の研究は、その年の 12 月以降世界中にフィーバーを巻き起こした。小田は、世界に先駆けて原子層制御 CVD 法により酸化膜高温超伝導薄膜の作製に取り組んだ。分光エリプソメトリを用いて原子レベルでの薄膜結晶成長のモニターを行うことにより、非常に平滑な超伝導薄膜の作製に成功し、厚さ数分子層という超薄膜で超伝導を観測した^[13]。この原子層 CVD 技術を高誘電率絶縁体薄膜にも応用し、インテルなど半導体メーカーにおける最先端 CMOS 集積回路の進展に重要な指針を与えた。^[14]

4. 特記事項：

2013 年度から 2021 年度まで 9 年間の文部科学省センター・オブ・イノベーション(COI)プログラムに小田俊理を研究リーダーとする東工大からの提案が採択された。プロジェクトリーダーに KDDI 研究所元所長の秋葉重幸氏を迎え、16 の機関（大学・民間企業・自治体）が参画した。東工大からは 40 の研究室が参加した。

研究課題は『以心電心』ハピネス共創社会の構築という、本プロジェクトの目標は、すべての人が幸せになり、周りを幸せにできるハピネス共創社会を実現することである。誰もがいつでもどこでも繋がることのできる知性通信技術（Intelligence Communication Technology）は行間に込めた意味まで伝えることを目標とした。充電が不要で装着の負担のないゼロパワーウェアラブル端末はハピネス検知機能を備えており、人々の不安や不満が解消されるまで、必要な情報を提供する。これにより、世代・国・地域を越えた円滑なコミュニケーションが実現され、言葉の行き違いや空気の読み違いによるトラブルを未然に防止できる社会を実現する。そのために、脳科学、サービス科学、ビッグデータ解析、情報通信技術を融合して革新的な社会実装に向けて取り組んだ^[15]。

小田俊理は定年退職後も 1 年間研究リーダーを務めたが、その後、若林整教授が研究リーダーを引継ぎ、研究テーマも「サイレントボイスへの共感」地球インクルーシブセンシ

グ研究拠点に変更されている。

5. 文献

1. 「超微粒子がシリコンの常識を変える」 Japan Nano Net Bulletin Vol. 1 第2号（文部科学省ナノテクノロジー総合支援センター発行、2003年6月）
2. 「量子コンピューターから曲げられる IC チップまで」 科学新聞、2004年7月30日
3. 「VHF プラズマを利用したナノ結晶シリコンの低温プロセスを提案」 週間ナノテク第1216号、2005年7月11・18日合併発行
4. 「常識覆す『ネオシリコン』」、日刊工業新聞、2009年9月28日
5. S. Oda, J. Noda and M. Matsumura, Preparation of a-Si:H Films by VHF Plasma CVD, MRS Spring Meeting Proceedings, 118, 117-122.
6. S. Oda, Frequency Effects in Processing Plasmas of the VHF Band, Plasma Source Science & Technology, 2, 26-29, 1993.
7. T. Ifuku, M. Otake, A. Itoh and S. Oda, Fabrication of Nanocrystalline Silicon with Small Spread of Particle Size by Pulsed Gas Plasma, Japanese Journal of Applied Physics, 36, 4031-4034, 1997. 日本特許3806751、USP. 6,661,021 B2 Dec 9, 2003
8. B. Pruvost, K. Uchida, H. Mizuta, S. Oda, Design of New Logic Architectures utilizing Optimized Suspended-Gate Single-Electron Transistors, IEEE Transactions on Nanotechnology, 9 (4), 504-512, 2010
9. S. Oda, (invited) Coupled Quantum Dots on SOI as Highly Integrated Si Qubits, IEEE IEDM 13.3 2016.
10. S. Oda, D. F. Moore and W. I. Milne, The nanostructuring of materials for device and sensor applications, IEE Engineering Science and Education Journal, 8 (6), 281-285, 1999
11. M.A. Rafiq, Z.A.K. Durrani, H. Mizuta, A. Colli, P. Servati, A.C. Ferrari, W.I. Milne, and S. Oda, Field-dependent hopping conduction in silicon nanocrystal films, Journal of Applied Physics, 104, 123710 (3 pages), 2008
12. J. O. Tenorio-Pearl, E. D. Herbschleb, S. Fleming, C. Creatore, S. Oda, W. I. Milne & A. W. Chin, Observation and coherent control of interface-induced electronic resonances in a field-effect transistor, Nature Materials, 16, 208-213, 2017
13. S. Oda, S. Yamamoto and H. Zama, Superconductivity and Surface Morphology of YBCO Thin Films Prepared by Metalorganic Chemical Vapor Deposition, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 5, 1801-1804, 1995
14. Y. Tsuchiya, M. Endoh and S. Oda, Pulsed-source MOCVD HfO₂ ultrathin film growth optimized by *in situ* ellipsometry monitoring, Extended Abstract SSDM, 820-821, 2003

15. 東工大ニュース「第 2 回東京工業大学 COI シンポジウムを開催」(2017.01.11 公開)
<https://www.titech.ac.jp/news/2017/037061.html>

6. 著書

1. Shunri Oda and David K. Ferry, Nanoscale Silicon Devices, CRC Press, 288 pages, 2016, ISBN 978-1482228670
2. S. Oda and S-Y Huang, Silicon Nanocrystal Flash Memory, "Silicon Nanocrystals: Fundamentals, Synthesis and Applications, Edited by L. Pavesi and R Turan, Wiley VCH, Weinheim", 395-444, 2010, ISBN 978-3527321605
3. M. Winterer, W. Gladfelter, D. Gamelin, S. Oda, Photovoltaics and Optoelectronics from Nanoparticles, "Materials Research Society Symposium Proceedings", 159 pages, 2010, ISBN 978-1-60511-237-4
4. S-Y. Huang, H. Mizuta, S. Oda", Nanocrystalline Silicon Memory Devices, "Handbook of Semiconductor Nanostructures and Nanodevices, Edited by A. A. Balandin and K. L. Wang, American Scientific Publishers", 5, 131-194, 2006, ISBN: 978-1588830739
5. S. Oda, D.F. Moore, Future Integrated Systems, MTP, Cambridge, 65 pages, 2005, ISBN 978-0953514212
6. S. Oda, D. Ferry, Silicon Nanoelectronics, CRC Press, 328 pages, 2005, ISBN 9780367392536
7. T. Kobayashi, S. Oda, O. Michikami and T. Terashima, Material Technology for Vortex Electronics, "Vortex Electronics and SQUIDs, (Springer-Verlag)", 249-291, 2003, ISBN 978-3-540-40231-2

(2022-7-28 談)