

IBM Research Report

Research Life Abroad

Hiroyuki Miyazoe

IBM Research Division

Thomas J. Watson Research Center

P.O. Box 218

Yorktown Heights, NY 10598

USA



YORKTOWN HEIGHTS 滞在記

IBM TJ Watson Research Center, Research Staff Member, 宮副裕之

<http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view.php?person=us-miyazoe>

はじめに

筆者は 2010 年 9 月から米国 New York 州 Yorktown Heights にある International Business Machines Corporation (IBM Co.) の Thomas J Watson Research Center にてプラズマエッチングの研究開発に従事しています。本稿では渡米後これまでの生活と研究内容を簡単に紹介させていただきます。

研究概要

当研究所は世界 6 大陸に 12 箇所ある IBM の基礎研究所の本部であり、1945 年に Manhattan にあるコロンビア大学内に Watson Scientific Computing Laboratory として設立され、1957 年には New York 市から 60km ほどに北に位置する Yorktown Heights に移転されました。研究内容は物理学や半導体技術など Computer Hardware に関するもの、Business Model や Consulting、Management など Service 業に関する研究、Programming 言語や Security、Data 管理などといった Software に関連するもの、OS や Server、Cloud Computing といった System 関連の研究と、多岐にわたっています [1]。2011 年に人気クイズ番組 “Jeopardy!” で 2 人の歴代クイズ王 (連続優勝記録保持者と最多賞金獲得者) に勝利し、人工知能として多くの耳目を集める質疑応答システム “WATSON” も当研究所を中心として開発されました [2]。現在、Hardware 関連分野では 4-5 名の日本人が、常勤研究者として当研究所に勤務しています。

当研究所内には従来の半導体材料に加え、さまざまな材料に対応可能な Prototype Device の作製を可能とする Microelectronic Laboratory (MRL) [3] と呼ばれる実験室 (含 Clean Room) があり、他の IBM の研究所や Albany Nanotech [4]、Business Partner と綿密に連携して次世代 Device の研究・開発を行っています。

近年 CMOS の微細化によりトランジスタのオフ電流を抑制することがますます困難になってきています。HfO₂ といった従来の SiO₂ 絶縁膜より高い誘電率を持つ絶縁膜を導入したり、ゲート電極に金属を用いたり、あるいはトランジスタを立体的に作製することによりこのオフ電流を抑制することに成功してきました [5,6]。新規材料や Geometry、従来とはまったく異なる発想の Device の導入に伴い、Etching Process は常に改良・改善が求められます。私が籍を置く Advanced Plasma Physics and Process Group では、Eric Joseph 博士を Manager として 6 名の研究者が以下のような研究に携わっています。

- (A) 低損傷・高精度の Patterning を具現化する Atomic Layer Etching (ALE) Process [7,8]
- (B) Directed Self-Assembly (DSA) や Multiple Patterning などの 7 nm、5 nm 世代に向けた最先端高密度 Patterning 用 Etching Process [9]
- (C) Phase Change Memory (PCM) や Magnetic Random Access Memory (MRAM) といった不揮発性メモリ用 Etching Process
- (D) Post Si 世代や Cognitive Computing を見据えた Prototype Device 用 Etching Process

本稿では、私がこれまで携わってきた、(1) DSAを用いた最先端 Plasma Etching Process の開発、および、Post Si 時代を見据えた、(2) Carbon Nanotube を使った Gate All Around の MOSFET の作製や(3) PIEZO Materials を用いたトランジスタ (Piezoelectronic Transistor: PET) 開発に関して簡単に紹介します。

(1) Sub 30 nm pitch line-space patterning for CMOS applications

Sublithographic patterning techniques, such as DSA based patterning or SIT based patterning have been realized as critical feature definition method in logic and memory circuits. We have demonstrated line space patterning for all most all the front end of line CMOS compatible materials such as Si, SiO₂, SiN and high-k metal gate at sub-30nm pitch (Fig. 1 and Fig. 2, [10,11]). More recently, we demonstrated the capability of customization of the patterns using advanced pattern customization method [12]. These results further establish the viability of DSA pattern generation as a potential method for Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) integrated circuit patterning beyond the 10-nm node.

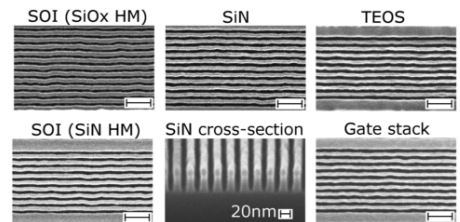


Fig. 1 SEM images of various etched materials using DSA. Cross-sectional SEM image of the 40-nm-thick SiN pattern is also shown. (Taken from ref [10].)

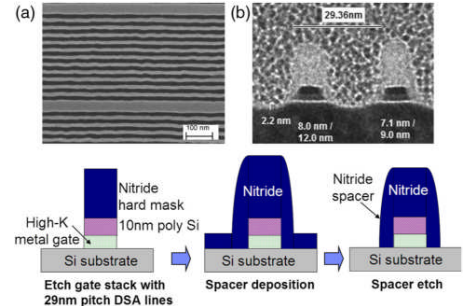


Fig. 2 (a) Top down SEM image of DSA lines etch transferred through a metal gate/high-k gate stack. (b) TEM cross-section image of the gates after SiN spacer etch. (c) Schematic of a planar gate formation processing using DSA etched gate lines. (Taken from ref [11].)

(2) Gate All Around (GAA) CNT Transistor

The optimal MOSFET geometry with the reduced dimension surrounds a cylindrical channel with the gate electrode [13]. This geometry, called “Gate All- Around” (GAA) potentially overcomes a lot of challenges for the short channel effects such as a leakage current at the off state. Among the challenges hindering the integration of CNT transistors in digital technology are the lack of a scalable self-aligned gate and complementary n- and p-type devices. CNT transistors with self-aligned gates scaled down to 20 nm in the ideal gate-all-around geometry was demonstrated. Uniformity of the gate wrapping the nanotube channels is confirmed, and the process is shown not to damage the CNTs. Further, both n- and p-type transistors were realized by using the appropriate gate dielectric— Hafnium dioxide (HfO₂) yielded n-type and Aluminum oxide (Al₂O₃) yielded p-type-with quantum simulations used to explore the impact of important device parameters on performance.

These discoveries not only provide a promising platform for further research into GAA CNT devices but also demonstrate that scalable digital switches with realistic technological potential can be achieved with carbon nanotubes [14].

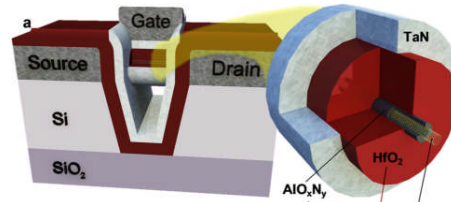


Fig. 3 Cross-sectional schematic of the device illustrating how the GAA/CNT channel is suspended across the Si trench and contacted on either side by Pd source/drain (the Pd gate contact on top would also be present on either side of the GAA in the trench but is not shown here for greater clarity). Inset cutaway diagram illustrates the GAA materials in greater detail, including ~1 nm AlO_xN_y , 8 nm HfO_2 , and 5 nm TaN. Taken from ref [14].

(3) PIEZO Electric Transistor (PET)

One of the post Si-CMOS devices candidates is a Piezo Electronic Transistor (PET). We have proven the concept of PET, in which mechanical stress induced by the electrical field in Piezo electrical (PE) pillar triggers an insulator-metal transition on piezo resistive (PR) materials (Fig. 4 [15,16]). We used 1 μm thick $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT) layer on Pt electrode on the 8 inch wafer as PE layer and ~50nm thick SmSe as PR for the first proof of concept. The results demonstrate the realization of a stress-based transduction principle, representing the early steps on a developmental pathway to PET technology with potential to contribute to the IT industry.

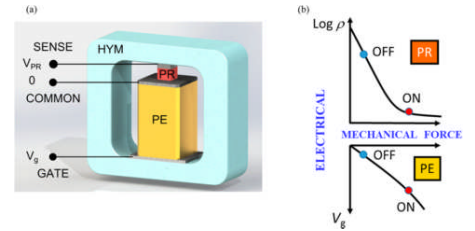


Fig. 4 PET concept. (a) The fully integrated transductive stack consists of a piezoresistive (PR) element on top of a piezoelectric (PE) element confined by a high Young's modulus (HYM) yoke. The three metal contacts (gray) are termed gate, common, and sense. The large PE/PR cross-sectional area ratio of ~25:1 serves to amplify the stress in the PR relative to that in the PE. (b) Transduction switching principle. Taken from [15].

研究所での生活

所内ではさまざまな国の人が働いています。ちゃんとした統計をみたわけではありませんが、生まれたときから米国籍の人は半分以下なのではないかと思います。ここでは初対面でも出身国や家族構成、年齢などが話題に上がることは少ない分、これまでのキャリアや学歴、出身研究室などはとても良く聞かれます。一方で、ほとんどが米国の大学院の出身者で、私のように外国（日本）の大学院を出た人間は少数派です。自由の国とはいいますが、ところどころでは日本より学歴や職階のヒエラルキーがはっきりしているように思います。

新しいアイデアが出たときの動き出しは非常に早く、その日のうちに検証実験用のウェハが実験室のラインに流れ出したり、当社特許部門への proposal の提出が完了することも珍しくありません。今まで経験したことのないものでしたので最初はこのスピードについていくのに苦労しました。今でも laptop を持ち歩くのを忘れて半日実験室にこもっていたりするとその間にメールでのやり取りが交わされ、プロジェクトの方向性が変わっていることもあります。

勤務形態は完全 Flex 制をとっており、ミーティングや急ぎの実験さえなければ在宅勤務も可能です。我々のような hardware 関連の研究者は実験室に行ったり、他の Unit Process チームや Integrator とのミーティングがほぼ毎日あるので、実質在宅勤務は不可能ですが、software 関連の研究者は在宅勤務をする人もいます。裁量労働制なので残業代はありませんが、私の印象としては皆さんよく働きます。

仕事以外の excursion としては、年に 1 回程度は MRL で働く全 group で日帰り旅行に出かけ、Hudson 川の cruising や、写真のように hiking に出かけたりします。また、私は趣味でサッカーを続けているのですが、毎年夏になり日が長くなると Watson Summer Soccer League が開かれ、平日の夕方 6 時半ごろから週 1 回程度汗を流します。このリーグの参加者は全員 IBM 関係者（社員とその家族）で、なかには 25 年以上も参加している人もいて、よくよく話を聞いてみるとかなり上のレベルの Manager だったりします。また、当研究所がある Westchester 郡は当社(Armonk, NY) や PepciCo (Purchase, NY) などの企業の本社があることもあり、各社の選抜チームによる Corporate League も活発に行われています。



Fig. 5 MRL の日帰り旅行で Plasma Etching Group と (筆者は前列中央, 2012 年, NY)



Fig. 6 Watson Summer Soccer League でのチーム写真 (筆者は GK) 会社が国際的なのか、サッカーがマイナーなのか、アメリカ人はあまりいません。

就職～ピザ取得～渡米～永住権取得まで

私は 2010 年 9 月に当研究所にてポスドクとして採用され、2011 年 10 月から正規雇用で採用されました。ここでは当社への就職活動から今までの経緯について少し書きます。私が博士課程を卒業したのは 2009 年の 3 月でした。当初から企業への就職にも興味がありましたが、博士課程 3 年の夏まで留学していたため、日本のいわゆる“就活”の波にうまく乗ることはありませんでした。当社のポスドクの募集をホームページ上 [17] で知り、応募したのは 2009 年の年末ごろだったと思います。既卒でしたので当時はリクナビネクストに登録したり、大学、企業を問わず世界中の研究機関のホームページをみて求人 Apply していました。なかなか返事が来なかったので当社で働く知り合いに相談した結果、2010 年の 4 月ごろに当時の Etching Group の Manager から 1 時間ほどの電話面接を受け、6 月上旬に研究所での面接に招待されました。採用ポストによって多少差はあるようですが、私の場合、面接は一日で終わりました。面接では午前中に私のこれまでの研究に関するプレゼンテーションを 1 時間 30 分ほど行い、午後からは自分の上司になる人、同じ

グループになる人合わせて10-15人ほどと個別に30分ずつ面接でした。この個人面接では、半導体研究とプロセス開発の現状に関するレクチャーをうけるとともに、IBMが直面する技術的な課題にどう対処していくかをおもに Discussion しました。夕方、すべての面接が終わるとグループの皆さんとディナーに行き、NYでの生活やプライベートの話もたくさんしました。時差ぼけもあったので、飲み過ぎないように注意したことを覚えています。休憩もほとんどなく、これまでに経験したことがないほど密度の濃い一日でへとへとになりましたが、一日が終わるころにはこの研究所でこの人たちと働きたいと強く思うようになっていました。応用物理の本年2月号に村上正紀先生(現(学)立命館副総長,京大名誉教授)が当研究所で私と似たような採用面接を受けたと書かれている[18]ので、採用プロセスは伝統的に大きく変わっていないようです。ちなみに村上先生が当社を退職されたときに京都に装置を立ち上げに行ったテクニシャンは今でも当研究所で働いています。その後、Offer Letter(内定通知)をもらったのは7月のはじめごろでした。

最初は2年契約のポスドクだったので、J-1ビザと呼ばれる、Exchange Visitor ビザで就職し、2011年に正規で雇用された際にH1-Bと呼ばれる専門職ビザに変更しました。正規雇用になったことでいわゆる”契約期間”がなくなったので会社から永住権(Green Card)の申請をするようにといわれました。永住権の申請にはさまざまなカテゴリがあり、優先順位が違うのですが、私は比較的優先順位の高い‘研究者’のカテゴリで申請しました。このカテゴリでは研究者としてのこれまでの経歴・成果や10通近くの推薦書等を準備する必要があり、書類の準備におよそ2年間、最終的に私が準備した書類は片面印刷で厚さ10cmほどになりました。アメリカのビザシステ

ムに関しては、Sekiguchi Law OfficeのHP[19]に日本語で説明してあるのでこれから渡米を考えている方は参考にさせていただければと思います。

NY近郊での生活

私はOfficeのあるYorktown Heightsから20kmほど南にあるWhite Plains市に住み、毎日車で20-30分ほどかけて通勤しています。White Plainsは近所に日立や富士フィルムの米州本社があったり、またManhattanまで急行で一駅(35分程度)ということもあり、日本人家族も多くいて、望めば日本と変わらない生活ができます。最初契約のために電気会社に電話し、少し話した後“お前の母国語は何語だ?”と聞かれ、はからずも日本語の通訳サービスにつながれたのは苦い思い出です。

また、東京同様にNY Cityは世界中から様々な文化が集って来るところですので、毎日多くの文化的なイベントも行われています。日本の文化的イベントも例外ではなく、たとえば、ManhattanにあるJapan Societyでは様々な著名人の講演会や日本映画の鑑賞会が開かれています。2012年に開かれた根岸英一教授(2010年ノーベル化学賞)の講演会[20]には私も参加し、楽しそうに錯体化学の話がされる先生の姿に大変励まされました。

また、毎年5月にセントラルパークで開かれるJapan Dayでは毎年日本の有名芸能人が参加し、今年はAKB48が参加したそうです。いろいろな国の料理が食べられるのもNYの特徴のひとつです。特にラーメンは非常に人気で、人気店では1時間以上待つ場合もあるようです。多くのDiversityがある一方で物価は非常に高く、最近の為替(\$1.00~¥120)で考えると、日本と同レベルの生活をしようとする和生活費は日本の1.5~2倍くらいではないかと思えます。



Fig. 7 Japan Society での講演 [20] 後の懇親会にて、根岸英一教授と (写真中央, 左は当社, 安藤博士).



Fig. 8 NYC で豚骨ラーメン: 2012年サッカー女子 W 杯決勝後 (Japan vs USA, 左は R. Martin 博士, 現 Lam Research)

さいごに

ここまでだらだらと書いてきましたが、私自身ここには書けないような失敗や苦勞も経験し、その都度多くの方々にも助けられてきました。また、どこの会社にも大学にもあてはまると思うのですが、知り合いを通じて入社したり、共同研究が始まることは非常に多く、いわゆる“コネ”も案外大事なんだなと感じています。私も Customer との会議や、学会などで気になっている教授、人を見つけたらお酒の力を借りてでも人脈を広げ、仕事の幅を広げていけたらと思っています。

謝辞

筆者は大学院時代にスイス連邦 Thun にあるスイス連邦材料研究所 (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology: EMPA) に留学させていただき、米国は 2 カ国目の海外になります。苦勞の多い大学院時代に海外経験をさせてもらったことが今の生活に大きく生かされているのは間違いありません。そのような第一歩を踏み出させてくれた東京大学の寺嶋和夫教授には感謝の言葉もありません。また、永住権の申請に当たり、申請書類作成のサポートをしていただいた多くの皆様に再度お礼申し上げます。最後に日本での仕事をやめて今の生活を支えてくれる、妻に感謝の念が絶えません。

[1] <http://www.research.ibm.com/?lnk=fai-ires-usen>

[2] S. Baker (著), 土屋政雄 (訳); “IBM 奇跡の“ワトソン”プロジェクト”, (早川書房, 2011 年)

[3] IBM's Microelectronics Research Laboratory, <https://www.youtube.com/watch?v=VsjzZaEWTgM>

[4] 平山誠, 応用物理, **81**, (2012), 420.

[5] 内田建, 応用物理, **83**, (2015), 262.

[6] 川崎博久, 応用物理, **79**, (2010), 1103.

[7] D. Metzler, R.L. Bruce, S. Engelmann, E.A. Joseph, G.S. Oehrlein, J. Vac. Sci. Technol. A **32**,

(2014) 020603.

[8] S.U. Engelmann, R.L. Bruce, M. Nakamura, D. Metzler, S.G. Walton, E. A. Joseph, ECS J. Solid State Sci. Technol., **4** (2015) N5054.

[9] E.A. Joseph, S.U. Engelmann, H. Miyazoe, R.L. Bruce, M. Nakamura, T. Suzuki, M. Hoinkis, Proc. SPIE, Advanced Etch Technology for Nanopatterning II, **8685**, (2012) 86850A.

[10] H. Tsai, H. Miyazoe, S.U. Engelmann, B. To, E. Sikorski, J. Bucchignano, D. Kraus, C. Liu, J. Cheng, D. Sanders, N.C.M. Fuller and M.A. Guillorn, J. Vac. Sci. Technol. **30** (2012) 06F205.

-
- [11] H. Tsai, H. Miyazoe, S.U. Engelmann, C. Liu, L. Gignac, J. Bucchignano, D. Klaus, C. Breslin, E.A. Joseph, J. Cheng, D. Sanders, M.A. Guillorn, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS **12** (2013) 041305.
- [12] H. Tsai, J. Pitera H. Miyazoe, Sarunya Bangsaruntip, S.U. Engelmann, C.-C. Liu, J.Y. Cheng, J.J. Bucchignano, D.P. Klaus, E.A. Joseph, D.P. Sanders, M.E. Colburn, and M.A. Guillorn, ACS Nano **8** (2014) 5227.
- [13] C.D. Cress and S. Datta, Science, 2013 vol. 341 pp. 140-141.
- [14] A.D. Franklin, S.O. Koswatta, D.B. Farmer, J.T. Smith, L. Gignac, C.M. Breslin, S.-J. Han, G.S. Tulevski, H. Miyazoe, W. Haensch, and J. Tersoff, Nanoletter **13** (2013) 2490.
- [15] P. M. Solomon, B. A. Bryce, M. A. Kuroda, R. Keech, S. Shetty, T. M. Shaw, M. Copel, L.-W. Hung, A. G. Schrott, C. Armstrong, M. S. Gordon, K. B. Reuter, T. N. Theis, W. Haensch, S. M. Rossnagel, H. Miyazoe, B. G. Elmegreen, X.-H. Liu, S. Trolrier-McKinstry, G. J. Martyna, and D. M. Newns, Nano Lett, **15** (2015) 2391.
- [16] J. Chang, H. Miyazoe, M. Copel, P.M. Solomon, X.H. Liu, T.M. Shaw, A.G. Schrott, L.M. Gignac, G.J. Martyna, D.M. Newns, submitted to Nanotechnology (2015).
- [17] https://jobs3.netmedia1.com/cp/faces/job_search
- [18] 須田淳, 村上正紀, 応用物理, **84**, (2015), 102.
- [19] 米国弁護士による米国ビザ相談室, <http://www.bengoshiusa.com/index.html>
- [20] E. Negishi, "The Pursuit of Dreams over 50 Years" Japan Society, New York, 2012. <http://www.japansociety.org/webcast/the-pursuit-of-dreams-over-50-years-dr-ei-ichi-negishi>