

半導体の精密な製造技術を健康医療分野にも応用したい

品田賢宏

半導体デバイスの超小型化に伴って、製品ごとのばらつきを抑えながら、歩どまりや性能を向上させることが課題になっている。早稲田大学先端科学・健康医療融合研究機構の品田賢宏講師は、半導体のドーパント原子（不純物原子）を規則的に配列することで、この問題を解決する糸口を見つけ、*Nature*2005年10月20日号に発表した。品田講師にこの研究の内容や今後の展開についてうかがった。



品田賢宏（しなだ・たかひろ） / 早稲田大学生命医療工学研究所講師、先端科学・健康医療融合研究機構・ナノ・IT医療ドメインメンバー。工学博士。1973年北海道生まれ。1994年に早稲田大学理工学部電子通信学科を卒業、2000年、同大学大学院理工学研究科博士課程修了。同大学理工学部助手。2001年、ドイツのルール大学固体物理研究所に客員研究員として短期留学。2004年から現職。

早稲田大学理工学部電子通信学科の大泊巖教授のもとで研究。2000年、単一イオン注入法によって半導体のトランジスタ上にドーパント原子を1つずつ照射し、半導体の電流のゆらぎを減らすことに成功¹。その後、ナノサイズの半導体デバイスにもドーパント原子を注入できる技術を開発した²。その技術をもとにナノサイズの半導体にドーパント原子を規則的に配列、閾値電圧の低下を証明した³。

*1 ドーパント原子
半導体などに電気伝導性などの物性を変えるために少量加えられる、基盤結晶とは別の原子。不純物原子ともいわれる。

*2 閾値（しきいち）電圧
2つの電極間を電流が流れ始めるとき、つまりスイッチをオンするための最小の電圧。

*3 量子コンピュータ
超高速のコンピュータで、量子力学的な重ね合わせの状態を用いて超並列計算を実現する。

ドーパント原子の数と位置の両方を制御したのがポイント

Nature Digest — トランジスタ上のドーパント原子^{*1}の個数と位置をコントロールした半導体を世界で初めて作製されましたが、これにはどのような意味があるのでしょうか？

品田 — 半導体は固体結晶のトランジスタに異なる種類のドーパント原子を入れて、電流の流れを制御します。今回発表した半導体技術のポイントは、そのドーパント原子を規則的に並べたこと、そしてそれによる半導体の電気的特性の向上を証明したことです。

具体的には、シリコン結晶にドーパント原子としてリン原子を規則的に並べた半導体を製作し、ドーパント原子がランダムに分布した半導体と閾値（しきいち）電圧^{*2}を比べました。閾値電圧は、電気的なスイッチのオンオフを決める電圧です。予想通り、規則的に並んでいるほうがデバイスごとのばらつきが少なく、しかも平均で-0.2V少ない電圧でスイッチが入るとわかったのです。これは均一なクローン電位ができて電子が流れやすくなったからだと推測しています。

半導体の超小型化には半導体を使う製品のサイズを小さくできるだけでなく、消費電力が低下し、動作が速くなる利点があります。しかし、小型化にあたって、デバイスあたりのドーパント原子がランダムに分布していると、性能がばらつきます。現在使われているイオン注入装置で照射されたドーパント原子は、微細にみると均一ではありません。それを解決するために、1個ずつ決めた場所に打ち込む「単一イオン注入法」を用い、規則配列にしたわけです。

ND — 単一イオン注入法という技術は、特殊なものなのでしょうか？

品田 — 単一イオン注入法は1993年に恩師の早稲田大学の太泊巖教授が発案され、その最初の装置は94年にできました。その後、私も多くの先輩や後輩たちとともに試作を重ね、2000年にほぼ完成といえるところまで来ました。当初の予想より時間がかかり、結果をみずに卒業された先輩たちもたくさんいます。

ND — 早稲田大学理工学部にある、世界唯一のこの装置はどのように半導体上にイオンを打ち込むのですか？

品田 — イオンの塊である集束イオンビームを小さな穴の上で一定方向に往復させると、ある割合で穴からイオンが出てきます。穴の大きさや集束イオンビームの電流量、チョッピングのスピードをうまく調節することで、集束イオンビームを約100回振るとイオンを1個切り出せるようになりました。正確に打っているかは、原子間力顕微鏡で確認します。究極的には、ドー

パント原子が1個しか入っていないナノサイズの半導体を作りたい。さらには、実現がむずかしいとされるシリコン型の固体量子コンピュータ^{*3}につながればと期待しています。

DNA チップやタンパク質チップへの応用を研究中

ND — 実用化にはどのような課題がありますか？

品田 — まずはイオンを注入できるサイズです。市販のトランジスタの寸法は約40nm四方。今回作った半導体は幅が300nm、原子の間隔も100nmですから、まだまだ小型化が必要です。現在、10nm幅に配列できるよう、装置を改造し始めていますが、ばらつきなく打てているかを確認するのに時間がかかりそうです。もう1つは半導体の製造にかかる時間です。10億個のトランジスタに1個ずつ照射する場合を試算すると、装置をフル稼働しても10日間。ですから、量産ではなく、この技術でしかできない半導体の製造を目指すのが1つの方向です。一方、微細加工技術を駆使すれば、一般の半導体でもドーパント原子の位置の制御はできるかもしれません。規則的に並べる以外にも、たとえば片側に偏在させると特性が変わるといような製造指針になる研究も進めたいと思います。また、今回の研究ではシリコンにリン原子を入れていますが、ドーパント原子としてはほかに15種類の原子が使えます。ドーパント原子の個数と位置、さらには元素の多様性を生かしたいですね。

ND — 2004年7月からこの技術を健康医療分野に生かすべく、研究を進めていらっしゃいますね。

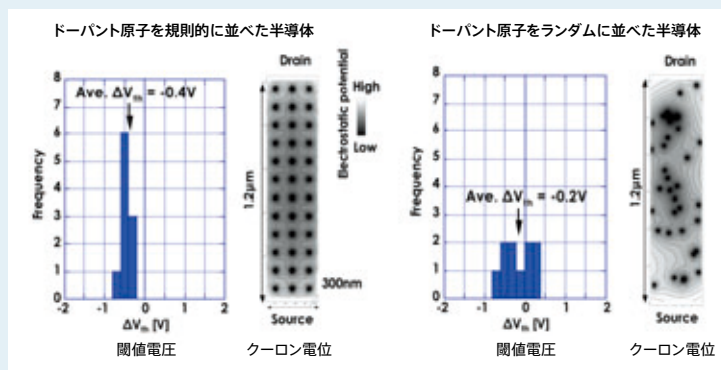
品田 — DNAやタンパク質、細胞を規則的に配列する空間を作るべく、まさに勉強を始めたところです。たとえばチップの表面の物性を変えて、ある性質をもつタンパク分子やDNAをくっつきやすくするのは。この機構では医師や生化学者など、さまざまなバックグラウンドをもった若手研究者が集まり、接点を探っています。ただ、最先端科学との融合を目標にするとはいえ、私自身は研究のトレンドに関係なく、半導体に軸足を置いて研究していきます。

与えられたテーマと環境の中でベストを尽くす

ND — 早稲田大学理工学部電気通信学科に入学された理由は？

品田 — 北海道生まれで、小学生から14年間アイスホッケーをしていました。小6のときに試合中に腹部を強打し、審判をしていたスポーツドクターに治療してもらったのを契機に、スポーツドクターを目指しました。ところが、高校から大学推薦の話があって。物理や化学は好きだったし、そのドクターにもチャンスだといわれ、入学しました。初心とは変わりましたが、現在のポジションを通じて、健康医療分野とかかわりたい。大泊教授の教室は講義が魅力だったのと同時に、厳しそうだから入室しました。単一イオン注入法の装置を発明された年に入ったのはめぐり合わせですね。

ND — 学部から機構へポジションが変わっても研究生生活を楽しんでいらっしゃいますが、その秘訣は何でしょう？



ドーパント原子を規則的に並べた場合(左)とランダムに並べた従来の場合(右)の、それぞれの閾値電圧とクーロン電位を示す。左では、閾値電圧 (V_{th}) が -1 ~ 0V の間にそろい、ばらつきが少ない。さらに右に比べて 0.2V 少ない。クーロン電位の等電位線図では、暗いところが電位の低い部分で、ドーパント原子が規則的に配列しているほうが全体的に黒っぽく、より低い電圧で電流が流れることがわかる。

品田 — 性格かもしれませんが、与えられたテーマと環境で楽しんで研究し、ベストを尽くして発見を形にしてきました。たとえば今回の研究でも、当初の目標であったドーパント原子の数のばらつきを抑えても半導体の性能にはばらつきがあり、そこからドーパント原子の位置も関係すると考えついたのです。そこで今度は自らの判断で、100nm 間隔で照射できるよう装置を改良しました。

ND — 今後はどのような方向に進みたいと考えていらっしゃいますか？

品田 — 研究を地道に続けるのも素晴らしいのですが、私自身はいろいろな角度から物をみてみたい。ここでは若手研究者に経営の素養を身につけさせる方針があり、現在早稲田大学のビジネススクールで MBA (経営学修士) の取得を目指して勉強中です。経済や会計管理もおもしろいですね。将来は研究一筋にはこだわっていません。ただ、どういうキャリアパスを経るにせよ、自分の経験を後進に伝えたいとは考えています。

ND — 学生や若い研究者へのアドバイスをお願いします。

品田 — 研究生生活の最初は教授から仕事を与えられるケースが多いのですが、いわれたからしかたなくやるのではなく、チャンスととらえてほしい。研究は泥臭い仕事の連続で、楽しくやらないと続きません。そして最後までやること。原理的あるいは技術的にむずかしいとわかったら、少し目標を下げ、自分がいいと考えた方向自体は変えないほうがいい。私も2年間ほとんど成果が出ずに苦しんだ経験がありますが、粘り強さで乗り越えられたと思っています。

ND — ありがとうございます。 ■

聞き手は小島あゆみ (サイエンスライター)。

1. Shinada, T. et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L265-L268 (2000)
 2. Shinada, T. et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **2**, 41 (4A), L287-290 (2002)
 3. Shinada, T. et al. *Nature* **437**, 1128-1131 (2005)