1分子を用いた電子波の超高速分岐器 -1分子への超高速スイッチ集積化実現へ期待-

現·静岡大学電子工学研究所(元·JST 及び物性研究所) 栁澤 啓史

我々の日常には欠かせないコンピュータ、そのコンピュー タは多くの高速に動くスイッチから成り立っている。この スイッチをより早く動かすこと、より多く集積することが より速いコンピュータを作製することに重要となってくる。 コンピュータのスイッチは電気的に駆動されているが、光 パルスによりスイッチを駆動すると千倍から百万倍速いス イッチの作製が可能である[1,2]。このような超高速スイ ッチの速度は光パルスの時間幅や強度等といった特性の向 上が鍵となっており、現在光パルスの技術発展と共に盛ん に研究がおこなわれている。

我々の取り扱うスイッチもまさにこの超高速スイッチであ るが、構造は図 1(a)に示すような非常に単純なものであ る。我々のスイッチは先端がとがった針と対向電極からな り、ここに光パルスを照射すると、針先端から電子が放出 され電気信号となる[1]。これと同値の電気回路はその右 に示すように光によりゲートを開けるトランジスタである。 我々はこれまでこのような超高速スイッチを集積化する技 術に注力してきた。集積化には電子が放出される位置を制 御することが重要になってくる。例えば、図 1(b)に示す ように、10nm(1nm=10⁻⁹m)程度離れた A, B という電子 放出があったとする。プラズモニクスの効果を用いると、 A から電子を出したり、B から電子を出したりできること を我々は過去の研究で見出した[3,4]。この状況は下図に 示すように、超高速スイッチが並列に配置された回路と同 じで、光によりそれぞれのスイッチを独立に制御すること ができる。すなわち、電子放出位置を光で制御することは 超高速スイッチの集積化へとつながる。

さらに小さな領域へとスイッチを集積化するには電子の取 り出し精度を上げる必要がある。しかし、上記のプラズモ ニクス効果を用いた方法ではさらなる精度の向上は技術的 に難しかった。このような中、我々はフラーレン1分子の 量子的な効果を用いることで、電子の固体からの取り出し を sub-0.5nm の精度で光制御できると考え、その実証に 成功した[5]。この実験を実現するために最近我々が同定 した1分子電子源を用いた[6]。1分子電子源は針上に分子 を蒸着した系により実現できる。このような針に強電界を 印加すると、針上に1分子の突起が現れ、そこから電子が 放出される。これが一分子電子源である。1分子電子源で は基板金属から出た電子が1分子のみを通過して真空中に 放出される。

この1分子を通過する際の電子の透過確率は1分子の分子 軌道に依存するため、結果として放出パターンが分子軌道 の形となる。簡単な表現をすると、分子軌道はアパーチャ ーのような役割をし、電子の波がそのアパーチャーを通過 すると、アパーチャーと同じ形の電子波となる。例えばリ ング状のアパーチャーであった場合、電子がそのアパーチ ャーを通過するとリング状の波となる。重要なのはこのア パーチャーの形が1分子に入射する電子のエネルギーに依 存していることである。つまり、例えば光により電子を励



図 1:(a)先鋭化された金属針から光誘起により放出される電子の模式図とその現象と同値な回路。 (b)光を用いた電子放出サイト選択技術の模式図とその現象と同値な回路図。

起し、エネルギーを変えてあげれば、結果としてアパー チャーの形が変わることになる。アパーチャーはフラー レン1分子(1nm)と同じような大きさであり、アパーチャ ーの形を変えることは、sub-0.5nm程度の精度で電子の放 出位置を変化させることに対応する。

以上のことを概念的に示すと図 2(a)のようになる。図では 1分子に左から電子波が入射している(緑の波)。この例で、 光を用いない場合は、1分子の中央から電子が放出される (右へ抜ける緑の波)。この場合のアパーチャーは円状にな っている。一方で、光を入射することで、アパーチャーの 形がリング状になり、結果として電子波はリング状になり 1分子から出ていく。我々はまさにこの現象を観測するこ とに成功した。図 2(b)に、実際に観測した1分子からの放出 パターンを示す。上図が光を用いない場合で、下図が光照 射を行った場合である。光照射により大きくパターンが変 化していることがわかる。



図 2:緑の半球は電子の波の進行を示しており、左側からフラー レンに入り、光照射がない場合は、そのまま右側へと通過す る。光の粒が照射される場合、右へ抜け出る電子は、例えば、 赤色のリング状の波へと変化する。

以上の現象は図 3(a)に示すような電車分岐器と概念的には 同じである[7]。我々の場合は図 3(b)に示すように、電車 ではなく電子の波である。電子の進む線路は光を照射した 際に下図のように変更される。理論的には光のパラメータ を変えると、さらに線路の分岐方向を変えられるはずで、 このような技術ができれば、1 分子にいくつもの超高速ス (a) (b)



図3:電車(a)と電子(b)の分岐器の概念図。

イッチを集積化することにつながる。通常スイッチを集積 化すれば、物全体の大きさは大きくなるが、我々の技術で はいくらスイッチを集積化しても1分子からサイズは変わ らない。集積化限界を突破する技術として期待される。今 後はこの光の制御性をもっと上げられるように研究を進め ていく予定である

謝辞:

本研究は、Ludwig-Maximilians-University Munichの Markus Bohn 氏、Florian Goschin 氏、Matthias, F. Kling 氏、近畿大学の鬼頭宏任氏との共同研究で行われた。 また、本研究は、「JST さきがけ「量子技術を適用した生 命科学基盤の創出」領域、研究課題名:原子分解能・低速 電子ホログラフィーの開発(課題番号: JPMJPR19GA)」、

「DFG プロジェクト資金(課題番号:389759512)」、「光 科学技術研究振興財団助成金」、「住友財団助成金」、「村 田学術振興財団助成金」、「PETACom」、「精密測定財団助 成金」の支援により実施された。

参考文献:

- P. Hommelhoff, Y. Sortais, A. Aghajani-Talesh, and M. A. Kasevich: Phys. Rev. Lett. 96, 077401 (2006).
- M. Ludwig, G. Aguirregabiria, F. Ritzkowsky, T. Rybka, D. C. Marinica, J. Aizpurua, A. G. Borisov, A. Leitenstorfer, and D. Brida: Nat. Phys. 16, 341–345 (2020)
- H. Yanagisawa, C. Hafner, P. Doná, M. Klöckner, D. Leuenberger, T. Greber, M. Hengsberger, and J. Osterwalder: Phys. Rev. Lett. 103, 257603 (2009).
- H. Yanagisawa, M. Ciappina, C. Hafner, J. Schoetz, J. Osterwalder, and M. F. Kling, Scientific Reports 7, 12661 (2017).
- H. Yanagisawa, M. Bohn, H. Kitoh-Nishioka, F. Goschin, and M. F. Kling: Phys. Rev. Lett. 130, 106204 (2023).
- H. Yanagisawa, M. Bohn, F. Goschin, A. P. Seitsonen, and M. F. Kling: Sci. Rep. **12**, 2174 (2022).
- 7) H. Yanagisawa, 真空と表面, in press.