

不思議な「子」と過ごして



随 筆

中 前 幸 治*

Spending with a mysterious "Ko"

Key Words : "-on", Microscopy

「随筆」とは、広辞苑第六版によると「見聞・経験・感想などを気の向くままに記した文章」とのことなので、私が40年近く行ってきた「不思議な子」を用いた研究を記したいと思う。

まず、「子」の漢字であるが、「こ」と読むと、広辞苑第六版の接尾語として用いる場合の一つの意味として、「小さなものの意で添える語」と記されている。「し」と読むと、広辞苑には、一つの意味として「男子の敬称で、一家の学説を立てた人、例えば孔子等を指す」と記されている。以下では、「子」を「し」と読むものが現れますが、意味は前者であると思っています。

さて、私が大学4年次に電子ビーム研究施設動特性部門に配属になり、まずは、“電子”を用いた研究に従事するようになりました。電子は皆さま良くご存じのように負の電荷を持っています。このため、比較的簡単に電子を加速することができます。例えば、1000Vの電位差で電子を加速すると1000eVすなわち1keVのエネルギーを持った電子を得ることができます。電子は、金属などの電極を加熱すると表面から飛び出していきますので、それを加速させれば良いことになります。この加速させた電子（ビーム）を物質に照射すると、物質を構成する原子の内殻電子が電離され外側の電子がその空孔を埋めるときにX線が放出されたり、オージェ電子として別

の軌道電子が放出されたりします。これらに加えて、ある条件のときに非常に小さい確率ながら原子核が励起され、その緩和過程として電子が放出される現象があると、大阪大学理学部の森田先生が理論的に予想されていました。この電子をNEET (Nuclear Excitation by Electron Transition) 電子と呼ぶことにします。この現象を検証する実験に参加することになりました。物質として ^{197}Au を用い、100keVの電子ビームを照射します。物質から弾性散乱による反射電子が多く放出されます。これに対してNEET電子は、非常に少ないのです。例えば、1秒間に108個の反射電子が放出されても、NEET電子は同じ時間に1個しか出てきません。救いは、NEET電子には寿命があることでした。寿命時間1.9ns (1.9×10^{-9} 秒)と短いですが、この寿命を利用して検出を試みたのです。すなわち、電子ビームをパルス化して、周期的に、このパルス電子ビームを試料 ^{197}Au に照射して、パルスビームと検出する電子の時間(位相)をずらせて、試料から出射してくる電子を検出するのです。電子遷移による核励起 (NEET) を観測する手法・実験は、極めて難易度の高い実験で、1984年になって、やっと成果となり、Z. Phys. A - Atoms and Nucleiの学術雑誌にShort Noteとして掲載されました。後の1998年に、大型放射光施設Spring-8にて、同じ ^{197}Au 試料を用いてNEETが観測されています。この時の評価では、Spring-8だから出来た測定であり、他の施設では不可能もしくは難しいと評されています。

引き続き“電子”を用いて、集積回路素子内部の動作状態を観測する研究に従事するようになりました。集積回路素子を駆動する高周波数信号と同期して電子ビームをパルス化して素子に照射すると、素子内部の電圧信号が静止して見えます。いわゆる、ストロボスコープと同じです。広辞苑第六版には、



* Koji NAKAMAE

1954年3月生まれ
大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻
博士後期課程修了(1982年)
現在、大阪大学 大学院情報科学研究科
情報システム工学専攻 特任教授(常勤)
工学博士 集積システム診断学
TEL: 06-6879-4167
E-mail: nakamae@ist.osaka-u.ac.jp

「急速かつ規則的に点滅する光源で照らして、回転運動または振動の周期をはかり、また回転中の運動の有様を観測する装置」と記されています。高周波数信号とパルスビーム発生との位相関係を固定してパルス電子ビームを発生させ、集積回路素子表面を走査して検出した二次電子信号から画像を形成すると、その位相での電位の分布を観ることが出来ます。また、パルス電子ビームを素子表面の1点に固定して照射し位相を変化させながら出射してきた二次電子信号を検出すると、その点での時間変化する電位信号を得ることが出来ます。この装置は有用であると認識されたので、さらに、民間企業との共同研究を推し進め、装置システムの開発を行いました。開発した「ストロボ走査電子顕微鏡システム (EBテストシステム)」は、大阪大学創立80周年記念事業中の「産業界との連携のあゆみ」の実用化事例として選出されています。この時の記念事業で用いたパネルを次に示します。

の伝搬の様子を観測することができました。ナノ秒イメージングの世界を切り開いたと思います。なお、ナノ秒とは 1×10^{-9} 秒のことです。

さて、ここまでの研究で有用に利用してきた“電子”自身について考えてみましょう。Wikipediaで「電子」と調べてみますと、電子は素粒子の一つであり、電子は、 $-1.602 \times 10^{-19}C$ の電荷と 9.109×10^{-31} 秒kgの質量を持つと記されていますが、大きさについては、「電子が大きさを持つかどうか・内部構造を持つかどうかは判明していない」と記されています。持っていたとしてもかなり小さいものと思われる。大きさがわからないほど小さな電子を用いて、上記のように有用な事に利用できることを不思議に思いませんか。

半導体素子の内部動作の解析等に“電子”が有用に用いることができると述べましたが、Mooreの法則(半導体チップの集積密度は1~2年間でほぼ倍増する)に従って半導体素子の微細化と素子の3次元構造化により“電子”を利用した装置のみでは、内部動作の解析が困難になってきました。これは、観測に用いていた2次電子は素子表面近傍からしか出射しないためです。なお、微細形状の計測には、現在でも“電子”は有用に用いられています。このような経緯から、次の子、“光子”の利用に取り組みました。

“光子”の利用を可能にしたのは、1960年頃のレーザーの発明があったからです。レーザー技術は、アルバート・アインシュタインが1917年に予測した「誘導放出」現象を基礎にしています。この発明により、発生する光の波長を一定に保つことができるようになりました。これにより、波長で決まる、ある一定のエネルギーを持つ光子を半導体素子内の特定の個所に入射することができます。半導体素子の裏面からSiを透過するフェムト秒レーザー光パルスをPN接合部に照射すると、電子正孔対が発生し(いわゆる内部光電効果です)、分離した電子がPN接合につながる配線中を行き来します。これがアンテナ効果となり、テラヘルツ波が発生します。このテラヘルツ波から集積回路内部の動作診断を行うというものです。次の図がその様子を示しています。

この装置をレーザーテラヘルツエミッション顕微鏡(LTEM: laser terahertz-emission microscope)と

ストロボ走査電子顕微鏡システム (EBテストシステム)

大阪大学 産業界とのあゆみ

高集積化するLSIの故障診断や動作テストを容易に!

LSI内部の信号を直接観測・測定する装置
集積回路デバイスが微細化・高集積化につれて、集積回路デバイスのテストを外部端子からだけ行うことが飛躍的に困難になり、集積回路デバイス内部の信号を直接観測・測定できる装置が必要となった。この要求に応えるべく、1986年に、ストロボ走査電子顕微鏡システムが実用化され、電子ビームテスター、あるいは、電子ビームテストシステムとして、日本電子㈱から製品化された。半導体製造企業では、不可欠な装置として利用されている。

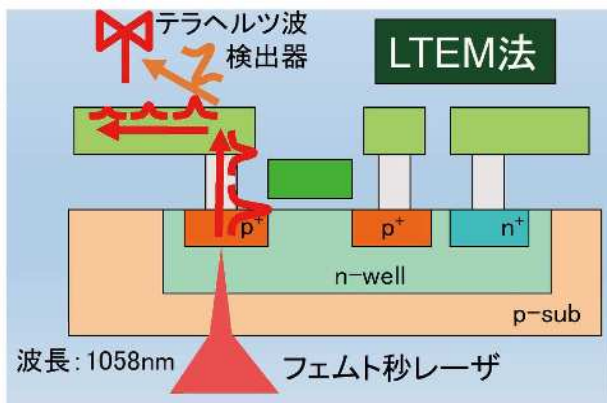
LSI内部信号の観測例:
画像処理プロセス中のインバータ回路動作。
動作時の観測画像(縦軸カラー表示)

コンピュタ制御の例:
電子ビームの加速電圧を変化させても、観測位置が変化しない。

ストロボ走査電子顕微鏡システム

開発元(西側): 日立製作所(旧日立製作所) 日立工機(旧日立工機) 日立工機(旧日立工機) 日立工機(旧日立工機)
開発元(東側): 日本電子株式会社

これを契機として、電子ビームテスターと呼ばれる商用装置が民間で開発されるようになりました。この装置では、ナノ秒の時間分解能で内部配線信号



呼んでいます。この手法の利点は、半導体素子に外部から電源を印加する必要がないことです。なお、この研究は、2005年から2012年に、科学技術振興機構（JST）先端計測分析技術・機器開発プログラムの採択課題である「超LSI故障箇所解析装置」の「装置開発」と「ソフトウェア開発」において行ったものです。PN接合につながる配線の長さでテラヘルツ波の波長が決まります。配線が断線している場合、テラヘルツ波の波長が短くなり、波の周波数が上がります。よって、検出信号の周波数から断線故障の有無を判定することができます。

さて、ここでも研究で有用に利用した“光子”自身について考えてみましょう。Wikipediaで「光子」と調べてみますと、「光子は素粒子の一つであり、光線中に含まれるものでエネルギーと運動量を持つ粒子相当のものである」と記されています。光子の電荷は0と記されていますが、質量については「現在では厳密に質量0と理解されているが、実験的には疑問が残っている」と記されています。大きさについての記述はありません。光子についても、不思議を感じませんか。

さて、ここまで“電子”、“光子”を研究に用いてきましたが、まだ、「こ」（小さなものの意で添える語）の性質をすべて利用したとは言えないと思います。特に“電子”については、どちらも素粒子ですから、波の性質（波動性）を持ちます。日立製作所の外村 彰 博士が、1989年に「電子ビームによる2重スリット実験」を行い、電子が波の性質を持つことを実験的に示しました。電子は、常に一つ一つの粒子として検出されたのですが、それを多数回繰り返して積算して観測すると干渉縞が現れたのです。一個一個の電子を電子銃から発射させたにも関わら

ずです。詳細は、次のURLに記されています（あるいは、「二重スリット実験」で検索してみてください）。

<https://www.hitachi.co.jp/rd/portal/highlight/quantum/doubleslit/index.html>

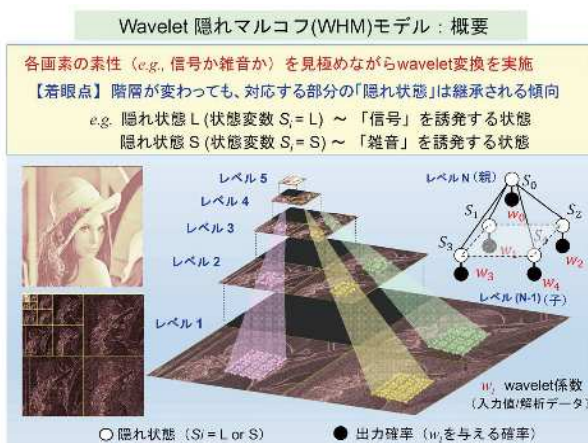
この実験は、『世界で最も美しい10の実験』のひとつに選出されています。これを可能にした電子顕微鏡装置は、電子線ホログラフィー装置と呼ばれています。この装置では、電子銃から放出された電子線の経路を分割して片方のみ試料を透過させます。試料の存在によって電子の位相が変化します。検出器上で試料のない真空領域を透過した電子と試料を透過した電子により干渉縞を形成させます。この干渉像から試料の構造を知ることができます。

このような“電子”の波の性質を用いた電子線ホログラフィー装置の信号処理に従事するようになりました。これはJSTのチーム型研究（CREST）に採択された研究で、2016年10月に開始した4年半のプロジェクトです（現在も継続中です）。本プロジェクトは、九州大学村上恭和 教授をリーダーとして、九州大学、日立製作所と大阪大学の私のグループの共同研究として、研究領域「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」、研究課題名「AIと大規模画像処理による電子顕微鏡法の技術革新」として採択されたものです。目的は、物質内外の電磁場を計測・イメージングできる電子線ホログラフィーと情報科学の融合により、電子1個の存在有無を評価できる超高感度の電磁場計測技術を確立することです。研究対象の装置は、2000年日立外村 彰による世界初の超高圧1MVホログラフィー電子顕微鏡の開発、2014年日立1.2MVの電子顕微鏡画像取得、世界最高分解能44 pm（参考：水素原子の大きさ53 pm）達成という先人たちの功績の上に築かれた装置です。その外観を次に示します。高さは約10mです。なお、1.2MVで加速された電子の波長は、約0.74 pmです。なお、pmとは 1×10^{-12} mのことです。

応募時点では、電子線ホログラフィーを用いて電子10個相当の存在有無を評価できる段階に到達していましたが、触媒微粒子の表面・界面電位や分極の測定、或いは原子スケールでの磁化測定を実現するためには、その電磁場計測感度をさらに一桁向上させる必要があります。本研究では、電子線ホログ



ラフィーの位相計測精度が画像解析や統計数理処理と密接な関係を持つこと、即ち収集された電子線ホログラムの一画素あたりの電子数や干渉縞コントラスト、S/N等のパラメータに依存することに注目し、情報科学の先進技術の導入により目標達成を図ります。私のグループの主たる役割は、電子線ホログラムからの位相情報抽出を高度化するための統計数理処理手法を確立することです。これが実現されると、触媒微粒子の表面・界面電位の実測、化合物磁性体が示す磁化の原子スケール計測など挑戦的な研究の門戸を開き、学術分野への貢献とともに、エネルギー創出や環境などの社会的問題に関わる研究に寄与することが期待されています。現在、「隠れマルコフモデル Wavelet 解析」を駆使した雑音除去を推し進めています。次の図に、その概要を示します。



これにより、位相解析精度は雑音を含む画像において $\sim 2\pi/28$ であったものが、 $\sim 2\pi/136$ に改善され、単一画像を用いたものに対して過去最高水準を達成いたしました。さらに、Wavelet 解析における画像内の解析方向性を良くするために通常の Wavelet を Dual-tree 複素数 Wavelet にアップグレードしました。この結果、さらに位相算出誤差は約5分の1に低減され、位相解析精度は改善されました。現在も、改良を進めています。

このように、「不思議な子」を用いて研究を進めていますが、最近、この“子”たちをうまく組み合わせ、アト秒の世界を開こうとする研究が報告されました。簡単に紹介します。詳細は、次の文献をご覧ください。

Y. Morimoto and P. Baum, “Diffraction and microscopy with attosecond electron pulse trains,” Nat. Phys., vol. 14, pp. 252-256, 2018.

アト秒を可能にする装置では、「光子」の集団である 1 ps のパルスレーザービームを二つに分け、一方を電子銃の陰極の金属に照射し、光電効果によりパルス電子ビームを発生させます。この際、レーザー光を2倍の高調波に変換し(光子のエネルギーを倍にし)光電効果による電子放出を可能にしています。これにより 1 ps の時間幅を持つパルス電子が得られています。レーザービームの他方は、パルス電子の時間幅の圧縮に用います。レーザーを構成する“光子”は、波ととらえると電磁波ですので、光子の振動電場を利用してパルス圧縮を行います。1 ps 幅のパルス電子の中の前側(パルスの中の速い電子)に減速電場が、後側(パルスの中の遅い電子)に加速電場がかかるようにレーザー光子の振動電場の位相を調整します。この結果、アト秒領域の時間幅をもつパルス電子が得られる。このような「アト秒電子イメージング」を可能にする装置が現れてきています。アト秒とは 1×10^{-18} 秒のことです。kV の電圧で加速された電子線が有する高空間分解能(100 kV で加速された電子の持つ波長は約 3.7 pm です)とアト秒領域の高い時間分解能を組み合わせることで、電子や光子と物質の相互作用という基礎的な物理、化学的過程の解明につながる非常に興味深い研究がなされることが期待されます。

さらに、“量子”という名の「子」の応用分野の研究も行いました。文部科学省の Web サイトに、「量

子ってなあに？」というコーナーがあります。ここには、「量子とは、粒子と波の性質をあわせ持った、とても小さな物質やエネルギーの単位のことです。物質を形作っている原子そのものや、原子を形作っているさらに小さな電子・中性子・陽子といったものが代表選手です。光を粒子としてみたときの光子やニュートリノやクォーク、ミュオンなどといった素粒子も量子に含まれます。」と記されています。このような量子を用いた量子コンピュータ（量子力学的な重ね合わせを用いて並列性を実現するとされるコンピュータ）が実現された際に役立つだろう「量子画像処理アルゴリズム」に関する研究をも行

いました。現在も続けています。

このように、不思議な「子」と何十年も過ごしていますが、理解できない不思議さが常に付きまっています。子からなるものに対してもです。今後も、「美しいもの（雑音の少ない、簡潔な表現）を求めることは必ず展 美しきを求めて努力しよう 美者必展 美しきを求め努力を」をモットーに、研鑽に励みたいと思っています。今後ともご鞭撻のほど宜しくお願い申し上げます。

最後に、先人たちの数々の偉大なご業績に深く敬意を表します。

