

第 10 章 半導体デバイス評価方法

筆者が半導体デバイスの要点をインターネットで公開して 10 年になるが、ありがたいことにたくさんの読者から反響をいただき、それが励ましとなった。この第 10 章も読者の要望を多数受けていたものである。鋭意執筆中とし公開に時間がかかってしまったのはただお詫びするだけであるが、筆が進まなかったのは、評価というだけで軽く 100 ページは書けてしまうほど内容が多岐にわたり、そのどれも重要ですべてを伝えたい葛藤があったことが理由である。早期にこの宿題を解決したく、本書は要点の把握、そしてコンサイスに徹することをコンセプトとしていることから、あえて内容を絞らせていただいた。今後も加筆の可能性を残しなら、ここでは電流、抵抗、移動度、温度、そしてキャリア寿命の計測法、デバイスの電気特性の計測について説明する。筆者が長い間、研究テーマとしてきた半導体表面の観察については別の機会にゆだねたい。

1. 電流の計測

1) 針式直流電流計

測定器のデジタル化が進み、針式電流計は見るものが少なくなったかもしれないが、学校の現場ではまだまだ現役である。針式の電流計は精度が低く見られがちであるが、半導体評価に使えないことはない。図 1 に針式の電流計の模式図を示す。

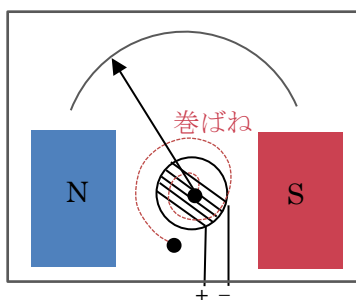


図 1 可動鉄片式電流計の模式図

磁石により一様磁場に置かれた電磁石が電流によるトルクと巻ばねによる制動トルクとの釣り合いから電流の強さに応じた回転角を示すことを原理としている。知っておいて損はない知識として、臨界制動について解説する。電流計の針の触れる速度であるが、電流計にステップ (階段状の) 電流を流

し、針が触れたときに、振動しないように最短で安定するよう調整されており、これを**臨界制動**という。磁石の振れ角を θ とし、 I を回転体の回転モーメント、 N を制動係数、 S は単位当たりの制御トルク、 F は駆動トルクとすると、

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + N \frac{d\theta}{dt} + S\theta = F \quad (1)$$

の関係がある。 I は回転体の重さと形状で決まり、 N は針の振れる速度に応じた抵抗力、例えば空気抵抗、 S は巻ばねによって戻ろうとするトルク、 F は電流で比例して針が触れようとするトルクである。これは二階微分方程式であり、ステップ電流をいれてトルクを回転子に加えたときに、これら係数によって θ は振動波形になったり、ゆっくり増加する波形になったりするが、振動しないようできるだけ速い速度で安定を得るための条件が臨界制動であり、(1) 式を次のような二次方程式に置き換えて、

$$I\omega^2 + N\omega + S = 0 \quad (2)$$

判別式がゼロになる条件となる。

$$N^2 - 4IS = 0 \quad (3)$$

針式電流計はこの条件を満たすように製造

調整されている。

針式の電流計は様々なものがあるが、見たいレンジによって交換する手間があり、電子的な電流計に置き換えがされている。

針式電流計に限らず、電流計には内部抵抗があることを理解しておかなければならない。電気回路学では、電流計は抵抗ゼロオームとみなすが、実際の電流計はそれぞれ内部抵抗を持っている。特に、測定する電流レンジが小さくなるほど、鉄片を動かすトルクを稼ぐため、回転子の電磁石の巻き数を増やす必要があり、内部抵抗は高くなる。 μA 計では、 $100\ \Omega$ 近くなることもあり、微小電流を測る場合には、内部抵抗への注意が必要である。

2) 電流入力アンプを用いた電流計測

電流計のもつ内部抵抗をゼロにしたい場合は電流入力アンプを使う。これは OP アンプ（演算増幅器）で簡単に実現できる。

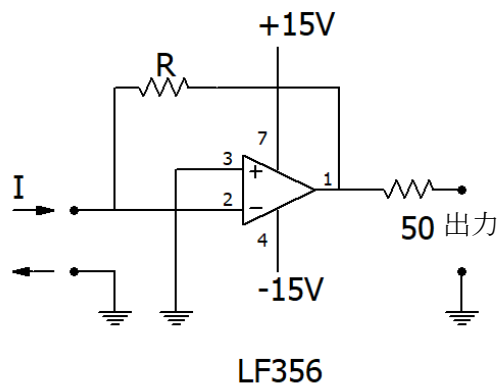


図 2 電流入力アンプの回路例

図 2 にその回路を示す。この回路は OP アンプの反転増幅器を原理としたもので、計測電流 I の受け側の内部インピーダンスはゼロとなる。ただそれが成り立つのは、計測電流 I が OP アンプの電流の出力限界以下

のときであり、LF356 などの OP アンプを使う場合、 10mA 以下となる。出力電圧は抵抗 R と計測電流 I の積にマイナスした値となる。筆者の経験ではこの回路で 100pA 程度までの計測ができる。使用できる OP アンプは JFET 入力 of 計測用のものを用いるとよく、筆者がよく使うのは LF356、LF411、AD8610 などがある。

2. 抵抗・抵抗率の計測

1) 二端子計測と四端子計測

抵抗の測定は、簡単には二端子に電流を流して、その二端子間の電圧を測り、オームの法則で抵抗を計算すればよい。テスターでの抵抗がまさにこれである。

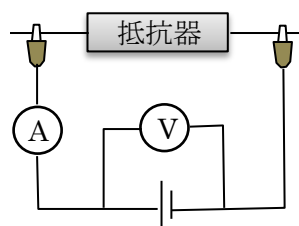


図 3 二端子計測による抵抗測定

この様子を図 3 に示すが、抵抗器のクリップの接触抵抗が無視できる前提の計測である。テスターで抵抗を測る程度ではさしたる問題にはならないが、半導体そのものを測る場合、金属電極をつけてもコンタクト抵抗の影響が出てしまい、誤差となる。この接触抵抗の影響をなくすために、図 4 に示す四端子計測が使われる。被検素子の両端から電流を流し、電流の流れる経路に電圧を測定する接点を設ける。市販の四端子計測器では、電流を出力する端子を Force といい、電圧を計測する端子を Sense (Output)

と表記している。

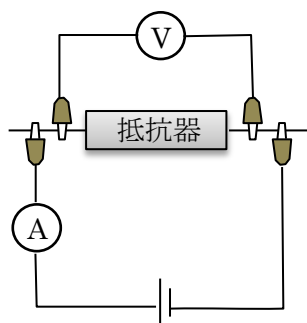


図4 四端子計測による抵抗測定

電圧計は内部インピーダンスが通常 $1\text{ M}\Omega$ 以上と大きく、接触抵抗の影響を受けにくい。この接続で、電流を流す端子での接触抵抗による電圧測定への影響をなくすることができる。



図5 市販の電圧電流測定ユニットの例
SENSE とあるのが電圧計測端子、OUTPUT とあるのが電流出力端子になる。

2) 大電流を流しての抵抗評価 (パルス法)

パワー半導体の評価では、例えば数十 A から数百 A といった大電流を流して、抵抗や素子に発生する電圧を評価したい場合がある。こういった大電流を出せる電源は車一台買ってしまうほど高額である。数百 A を通電すると素子の爆発や火傷の危険性があり、避けたいことである。このようなときには、図 6 に示すように、一旦電解コンデンサに電荷をためて、トランジスタスイッチで数十 μ 秒だけ ON にして、素子に発生

する電圧をデジタルオシロスコープで評価する。例えば電界コンデンサで $1000\ \mu\text{F}$ を用意して、 10V で充電すると、 0.01C の電荷がたまる。それを $30\ \mu$ 秒で放電させた場合、 333A の電流を取りだせる。また、これがジュール熱になったとしても、高々 50mJ である。大電流電源での通電試験をするよりずっと安全である。

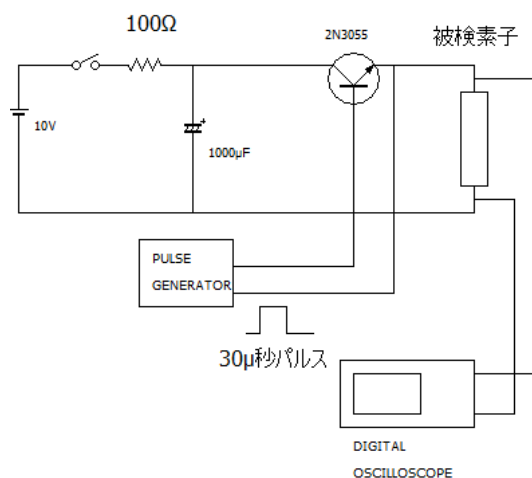


図6 パルス法による大電流通電試験

図 6 に示す回路において、左側の電源がコンデンサに充電する電源であり、電圧を調整することで、最大電流を調整できる。充電はスイッチで開始でき、 $100\ \Omega$ は充電時の突入電流を抑える役割をする。この回路ではパワートランジスタの $2\text{N}3055$ を使っているが、通電電流より大きい余裕のある最大コレクタ電流をもつトランジスタを使う。ちなみに $2\text{N}3055$ の最大コレクタ電流は 15A である。被検素子の電圧降下はデジタルオシロスコープで記録する。

この方法はパワー素子の評価に活用されるが、安全上の注意として電解コンデンサには極性があり、逆に充電、例えば負極に正電位を印加すると、素子が爆発することも

あるので、気を付けていただきたい。デジタルオシロスコープは便利な記録計であるが、これは 12bit の AD コンバーターを用いており、最大レンジの 1/1024 の量子化誤差があることも注意していただきたい。

3) 薄膜の抵抗率の評価

半導体の薄膜の抵抗率の測定には 4 本の針を探針とした 4 端子測定を行う。図 7 にその概略を示す。4 本の針を距離 s で等間隔に並べ、内側の 2 端子が電圧計測、外側が電流を流す端子になっている。仮に、薄膜の厚さ δ が s に対して十分小さい場合 ($\delta \ll s$)、導電率 σ (抵抗率の逆数) は

$$\sigma = \frac{I \log 2}{V \pi \delta} \quad (4)$$

$\delta \gg s$ の条件であれば

$$\sigma = \frac{I}{2\pi s V} \quad (5)$$

と近似できる。

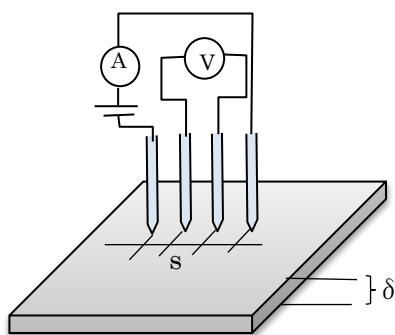


図 7 半導体薄膜の四端子抵抗率測定

筆者の経験であるが、いくら四端子測定は電極の接触抵抗の影響は受けにくいとは言っても、良好な計測を得るには、金属探針と半導体との接触抵抗を十分減らす努力は必要である。

上記の方法のほかに、Van Der Paw 法が活用される。矩形 (特に矩形だけに限らないが) のサンプルを用意して、4 隅に電極を形成して、そして AB 間に電流を流して、DC 間の電圧を測定する。また BC 間に電流を流して、AD 間の電圧を測定する。

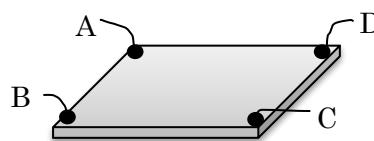


図 8 Van Der Paw 法

そして次の式から

$$R_{AB} = \frac{V_D - V_C}{I_{AB}} \quad R_{BC} = \frac{V_A - V_D}{I_{BC}}$$

R_{AB} 、 R_{BC} が計測でき、

$$\exp(-\pi \delta R_{AB} \sigma) + \exp(-\pi \delta R_{BC} \sigma) = 1 \quad (6)$$

を満たすような σ を数値計算で推定する。例えば二分法やニュートン法などの解の推定アルゴリズムを使うとよい。Van Der Paw 法では、形状による誤差を抑えた導電率 (抵抗率の逆数) の推定が可能になる。

4) 半導体と電極とのコンタクト抵抗評価

半導体上の金属電極において。金属膜から半導体に垂直に電流が流れるときに、金属と半導体界面での抵抗、コンタクト抵抗が問題になることがある。

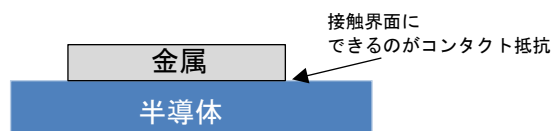


図 9 金属・半導体界面でのコンタクト抵抗

このコンタクト抵抗を測定する方法として、TLM 法 (Transfer Line Method) が用い

られる。これは、図 10 に示すように、半導体薄膜で、電極間距離を変えた電極対を複数用意する。図 11 のように電極対の抵抗の測定値を縦軸に、電極間距離を横軸に散布図を書き、電極距離がゼロのところを外挿し、これがコンタクト抵抗の 2 倍になると考えて、一電極当たりのコンタクト抵抗を計算する。

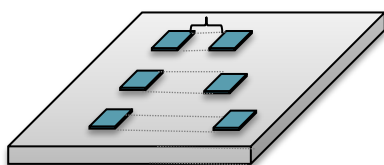


図 10 TLM 法で使うサンプル
距離を変えた電極対を複数用意して、電極対の抵抗を測定する。基板は薄膜で、その厚みは電極間距離に対して薄いほうがよい。

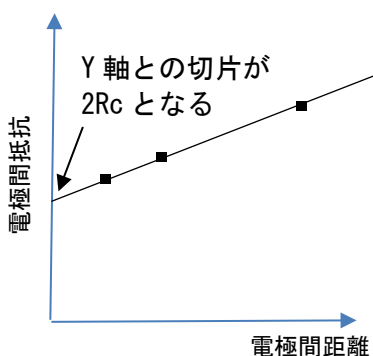


図 11 TLM 法での解析事例

二電極間の抵抗 R_m は、薄膜の距離を L 、薄膜の抵抗を R_{film} 、コンタクト抵抗 R_c とすると、

$$R_m = R_{film}(L) + 2R_c \quad (7)$$

で表される。薄膜抵抗は電極間距離 L がゼロになると 0 になると考えられ、距離 L がゼロでの外挿値が 2 倍のコンタクト抵抗になると仮定している。なおコンタクト抵抗率にするには、コンタクト抵抗を電極面積で割ればよい。

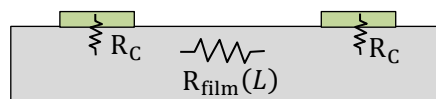


図 12 TLM 法での抵抗モデル

3. Hall 効果測定

半導体のキャリアの移動度は高速半導体材料の開発過程で重要な評価項目である。キャリア移動度は一般に Hall 効果で評価される。正確に表現すると、Hall 効果で半導体中のキャリア密度 n を求め、Van der Paw 法により導電率 σ を評価し、 $\sigma = ne\mu$ の関係から、移動度 μ を計算する。図 13 に Hall 効果測定の説明図を示す。素子の寸法は、長さ L 、幅 W 、厚みは t とする。両端に電圧 V_B がかけられていて、電流 I が流れている。電流のキャリアは電子とし、マイナスの電荷 ($-e$) がドリフト速度 v_d で左から右に走行しているとする。

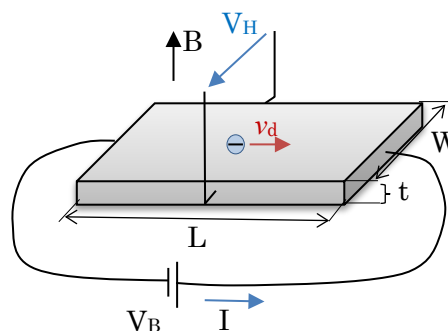


図 13 Hall 効果の説明図

試料に対して、下から上へ磁束密度 B がかけられていたとする。電子はローレンツ力 (ev_dB) によって、手前から奥に押しやられる。そうすると、試料の前後で電荷に偏りができ、奥がマイナス、手前が+に帯電し、矢印の方向にホール電圧 V_H が発生する。こ

の静電気によるクーロン力とローレンツ力が釣り合うため、次の式が成り立つ。

$$e \frac{V_H}{W} = ev_d B \quad (8)$$

この式で e は電子電荷（素電荷）である。一方、電流 I と v_d の関係は、

$$I = Wt \cdot nev_d \quad (9)$$

で与えられる。この式において、 Wt は試料の断面積、 nev_d は電流密度に相当する。さらに、次の関係が求められる。

$$V_H = \frac{1}{ne} \frac{B}{t} I = R_H \frac{B}{t} I \quad (10)$$

$\frac{1}{ne}$ はホール係数 R_H と呼ばれる。この係数が分かれば、キャリア密度 n が求められる。一方、Pan Der Paw 法などにより、精密に導電率 σ が得られているなら、移動度 μ は

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} \quad (11)$$

から求めることができる。

上記の説明はキャリアが電子の場合であるが、p 型半導体のように正孔であれば、ホール電圧はマイナスになる。またこの計算の前提として電子がすべて同じドリフト速度で動いているとしているが、実際には結晶格子などの散乱を受けるため、速度に分布がある。そのため、キャリア密度を求めるにあたって、ホール散乱因子 r_H をかけて補正することも行われる。

$$R_H = \frac{r_H}{ne} \quad (12)$$

4. 温度の測定

(1) 熱電対

もっとも広く用いられている測定子は熱電対である。熱電対は二種類の金属を接合

したときに、接合部と電線端との間の温度差に応じた熱起電力が二線間に生じ、それを計測して温度に換算する。最も広く使われているものがクロメル・アルメルで、K タイプと称される。 $-200 \sim 1000$ °C の範囲で利用可能である。高温環境では、高額であるが、白金ロジウム (R 型) が利用される。銅コンスタンタンは 0°C 付近での精度が高い。N タイプのニクロシルニシルは K タイプに比べて、対酸化性、長期安定性に優れる。



図 14 熱電対の説明図

表 1 主な熱電対の起電力係数

熱電対の種類 (タイプ)	起電力係数 ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) 但し 0°C のとき
クロメルアルメル (K)	39.7
銅コンスタンタン (T)	39.1
白金・白金ロジウム (R)	5.4
ニクロシルニシル (N)	26.1

(2) 赤外線を使う方法

デバイスの表面温度を測るには、赤外線の放射強度を測ることを原理とする、放射温度計やサーモグラフィが活用される。サーモグラフィは以前大変高額であったが、低価格品としてアンドロイド端末に USB 接続で温度画像を出力する製品も発売されている。放射温度計は様々な資料が公開されているが、簡単にはフォトダイオードと短波長フィルター、多少の集光レンズがあれば自作することは容易である。(詳しく知りたい方は著書にお問合せ下さい。)

(3) 半導体デバイスの発熱箇所を特定する方法

温度はわからなくてもよいが、デバイスにリーク電流があつて、発熱部位からその箇所を見つけたいという場面に威力を発揮する方法がある。それはロウソクのロウを使う。ロウソクの端をデバイスにこすりつけてロウをデバイスに塗布する。ロウは白濁しており、顕微鏡で見るとデバイス面が白濁して見える。デバイスに少しの時間だけ通電して軽く発熱させると、発熱スポットのところのロウがとけて透明になる。太陽電池や MOSFET において、リーク箇所を容易に特定できる。これは筆者が学生の頃見つけた方法ではあるが、すでに誰かやっているかもしれないし、当たり前の技術なのかもしれない。赤外線顕微鏡の代わりとして非常に重宝した覚えがある。

(4) IC チップ内のデバイス温度の推定法

バイポーラトランジスタのベースとエミッタに順バイアスがかかっている場合、 V_{BE} と I_B が分かれば、そのトランジスタ自体の温度を推定できる。 V_{BE} と I_B の関係は pn ダイオードの整流特性の式で表され、温度に依存する。あらかじめ温度を変えて V_{BE} と I_B の関係を取得しておけば、温度推定はたやすい。

5. 半導体の少数キャリア寿命を測定する方法

太陽電池の発電層の評価として、少数キャリア寿命の測定がある。少数キャリア寿命自体は、キャリア密度によって変化するため、測定方法、条件をきちんと明示して計測結果を表示すべきである。得られた数値

が物質固有の定数になることはないからである

太陽電池ではマイクロ波反射法が一般的に使われている。しかし、簡単な実験であるが、図 15 のような 2 端子電極を形成し、電圧をかけながら、LED でパルス光を当てて、光吸収でできるキャリアの減衰曲線をドリフト電流の変化でみることで、おおよそのキャリア寿命の評価は可能である。ここでは、LED を消灯後、ドリフト電流信号が $1/e$ になる時間をキャリア寿命としている。この方法は、ドリフト電流の増減が光キャリアの発生消滅のみで決まり、電極からのキャリアの掃き出しの影響がない前提に基づいている。

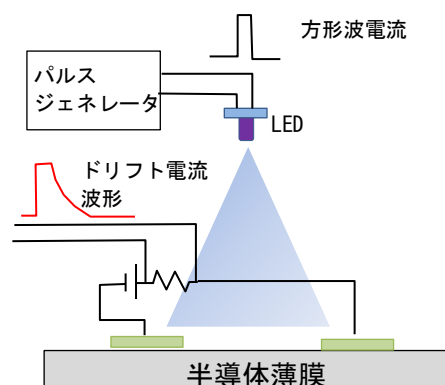


図 15 LED 光照射による導電率変化を用いた少数キャリア寿命の評価

6. C-V 特性評価・容量評価

MOS デバイスにおいて、容量と電圧の関係、つまり C-V 特性から酸化膜容量、閾値電圧の推定、半導体中のキャリア密度など様々な情報が取得できる。詳しくは第 6 章の MOSFET を読んでいただきたいが、ここでは測定回路について説明する。専用装置も市販されているが、比較的到低額な

測定器の組み合わせで実現できる。

図 10 にその測定系統を示す。PC は DC 電源にインターフェースを通じて出力電圧を設定する信号送り、一方 LCR メーターで取得した容量値を取り込む。最近では、測定器や DC 電源はインターフェースに USB や RS-232C を標準搭載しており、多少の勉強は必要だが、慣れればプログラムは容易である。筆者の研究室では、Embarcadero 社の C++Builder を活用している。LCR メーターの出力に 1:1 の高周波トランスを付けているが、これは被検サンプルに DC 電源からの直流電圧を重畳させるためである。1MHz での測定であれば、市販のフェライトトランスで代用が効く。LCR メーターによっては、DC 電圧を外部から重畳させる外部入力端子を持っているものもあり、その場合、DC 電圧はその端子につなぎ、被検サンプルはそのまま LCR メーターの測定端子につなげばよい。DC 電源の出力に並列につけられている容量は、DC 電源自体の交流インピーダンスを十分に下げるためであり、1 μ F 程度で十分である。LCR メーターの設定であるが、直列容量—直列抵抗の等価回路から、並列容量—並列抵抗の等価回路が選べるが、キャパシタンスの漏れ電流が十分低いのであれどちらでもよい。被検サンプルの絶縁性が悪い場合は並列容量—並列抵抗を使う。

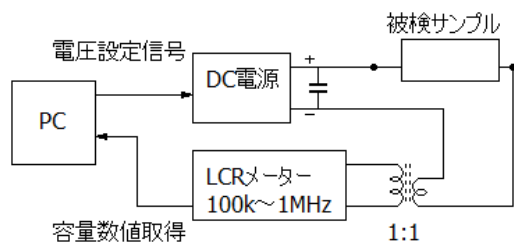


図 16 C-V 特性評価系統

7. SMUを使ったデバイスの電気特性計測

SMU とは Source Measurement Unit の略である。コンピューターからの指示で、指定の電圧あるいは電流を出力し、同時に出力電圧を計測し、PC に返すものである。SMU の中身は、プログラマブルな DC 電源と、電流入力アンプ、そしてインターフェースが内蔵されている。現在 SMU は低コストなものが市販されており、大学でも比較的入手しやすくなった。バイポーラトランジスタでは、B-E 間と B-C 間を独立してバイアスさせるため SMU を 2 台用意する。例えば太陽電池や pn ダイオードの場合、SMU は 1 台でよい。筆者も研究室の予算がなかったころは、PIC マイコンで自作したこともあったが、あまりお勧めはしていない。短絡保護回路や AD 変換器の精度の点で市販品と同等を実現するのは困難であるからである

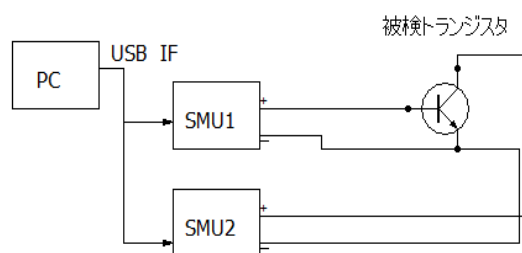


図 17 SMU を使ったトランジスタの出力特性の計測

SMU を使った計測において、大概の装置では、通電を連続直流で行う方法とパルス波を用いる方法を選ぶことができる。特段理由がなければパルス通電を使う。パルス通電にすることで、デバイスでの発熱を抑え、温度変化での測定への影響を抑えるこ

とが可能になる。連続通電を選ぶのは、素子がインダクタンス性のもの、また非常に微小な電流 ($1\mu\text{A}$ 以下) を計測するときである。

8. 電気計測の安全について

これまで述べてきたものは電気計測が中心であるが、くれぐれも感電には気を付けていただきたい。特に高電圧の測定において、十分な点検をお願いしたい。電気計測の安全マニュアルは、大学、職場、学校、どこでも完備してあるものなので、必ず目を通しておいていただきたい。

意識していただきたいことに、ビニール被覆電線は被覆越しでも感電することがあるということである。ビニール被覆電線の耐電圧は 400V のものが多いが、耐電圧は電線の型番を元にインターネットで調べることができる。テスターで高い電圧を測るときも注意していただきたい。テスターの被覆測定線も 1000V 程度であることが多い。数百 V を超える高電圧のラインは被覆線越しで決して触ってはいけないと覚えておく

RG58 や 3C2V などの同軸ケーブルは高電圧で利用できると思われているが、これもメーカーによってまちまちである。 3000V を超える電圧をかける場合は BNC や MHV プラグも含めて、利用できる耐電圧を調べておく。

未然に事故を防ぐために、筆者の研究室で励行していることに、最初にサンプルに電圧をかけるときは、1秒か2秒程度短い時間だけ通電してから、何もないことを確かめてから本格的に通電をする。短時間通電だけでも、不具合を検出することは容易である。

感電とともに重要なことは、半導体素子に 10A を超える電流を通電するときには、フェースガードをして、サンプルの爆発飛散に備えるべきである。半導体素子は数ミリ程度の微小片であるが、これに一瞬で数 J を超えるエネルギーが入ると、エネルギー密度が過大になり、破片が飛ぶ可能性がある。

参考

[職場のあんぜんサイト：感電\[安全衛生キーワード\] \(mhlw.go.jp\)](http://mhlw.go.jp)

閑話休題

筆者の趣味というか楽しみなことに、大学の数学の入試問題を解くことがある。受験生でもないのに「大学への数学」誌を愛読している。ボケ防止の体操のようなもので、特に数 I の整数問題、因数分解、漸化式が好きである。こうなっているのも、数学系 YouTuber であるヨビノリさんや鈴木貫太郎氏の影響が多にある。

複雑な式にどう規則性をみつけ、解き方を発想できるかに尽きるが、問題に取り組みながらいかに知識の引き出しをもっているかが重要と感じている。整式を因数分解するのに、公式を当てはめるか、次数の小さい変数に注意して式を整理するか、平方完成して考えるか、それともパッと思い付くか、考えるのは楽しいが、常々自分の引き出しの少なさを痛感している。

筆者は 50 半ばまでどっぷりと半導体デバイスの研究をしてきたが、テーマは CVD、パワートランジスタ、光触媒、薄膜トランジスタ、ダイオードの蓄積電荷理論、ショットキー、色素増感電池、そして原子層堆積、表

面反応といささかたくさんのテーマをやりすぎた。本道は何ぞと言われそうだが、それはそれで楽しかった。これが自分の研究の引き出しになっていると勝手に思っている。大学の先生には、学生の頃にいただいたテーマを大事に続けられている方が少なくはないが、自分には無理かなと思う。

電気系の学生を見ていると、電力系の就職志望者は、電子物性が嫌い、材料系や半導体志望だとプログラミングや電磁気が嫌い、自分が使わないと思った分野を捨てにかかると見られる。しかしそれはもったいないことだ。電力や自動車分野でも、半導体や材料工学は多いに役立つ。半導体でも電磁気や制御工学の知識を使うことが多い。捨てることは引き出し貧乏の始まりである。そもそも理系文系にわかれる高校時代の入試戦略が貧困の原因になっていると思う。話は発散しているが、ぜひ皆さんも知識をより豊かなものにして、たくさんの引き出しをもつことで、先の見えない未来を俯瞰していただきたいと感じている。
(2021/3/11)