

第3学年 電気電子工学実験実習報告書

8

LabVIEWによるトランジスタの4特性の自動測定

実験日 2024 年 11 月 7 日 (木)
2024 年 11 月 21 日 (木)

班	学生番号	氏名
4	3316	関口 丞

共同実験者名

提出日			備考	評価
予定日 11/21				
提出日				

1 目的

本実験では、

- トランジスタの入力/出力/電流伝達/電圧機関の諸特性図の概形が描けるようになる
- トランジスタの特性図が、h パラメータを求める方法を理解する
- 電圧と電流の関係式から、等価回路を求める方法を理解する
- LabVIEW を用いて、2 端子対回路の電圧と電流を自動測定する方法を理解する

ことを目的とする。

2 原理

トランジスタはベース (B)、エミッタ (E)、コレクタ (C) の三端子を持つ半導体素子であり、各端子に流れる電流としてベース電流 i_b 、エミッタ電流 i_e 、コレクタ電流 i_c が定義される。実際の電圧・電流関係は非線形だが、回路設計では、トランジスタの動作を簡易に解析するため、図 1 のような等価回路に基づく h パラメータを用いたモデルが利用される。h パラメータは、次の線型方程式で表される。

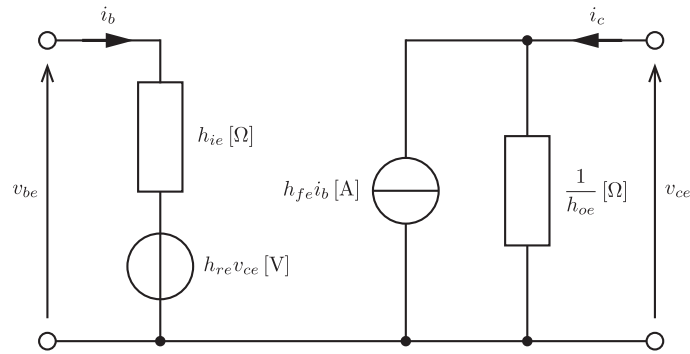


図 1: 簡易等価回路

$$\begin{pmatrix} v_{be} \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $h_{ie} [\Omega]$ は入力インピーダンス、 $h_{re} [-]$ は電圧帰還率、 $h_{fe} [-]$ は電流増幅率、 $h_{oe} [S]$ は出力アドミタンスと呼ばれるトランジスタの特性を示すパラメータである。

例えば、出力電流 i_c は式 (1) より、

$$i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce} \quad (2)$$

で表されることから、素子特性値である h_{fe} 、 h_{oe} と、任意に決定できる i_b 、 v_{ce} によって決定されることが分かる。この式に基づいて目的や仕様に沿うように回路の電圧や電流を決定していく回路設計が行われる。

4 つの h パラメータは、図 2 に示すように式 (1) 右辺の微小変化 ΔI_B 、 ΔV_{CE} に対する式 (1) 左辺の微小変化 ΔI_C 、 ΔV_{BE} との比 (傾き) によって表される。

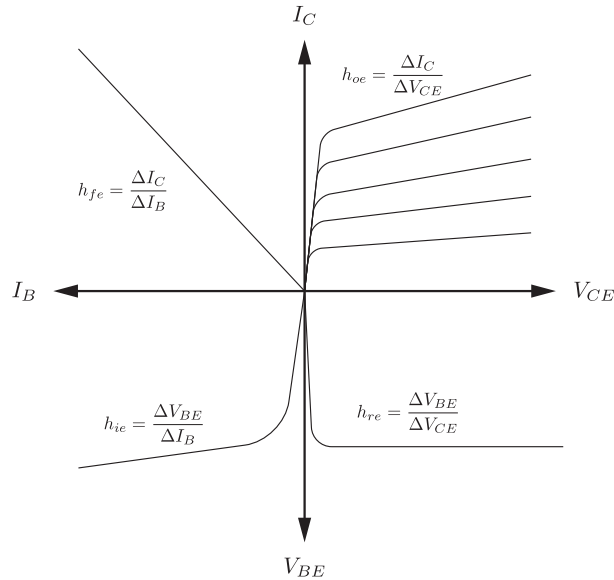


図 2: 静特性曲線

また、H パラメータのような 2 端子回路の電圧と電流の 4 係数を 2 端子対パラメータと呼ぶ。2 端子パラメータには他に Y パラメータと Z パラメータと呼ばれるものもある。2 端子対パラメータの内、電圧を電流で記述するものを Z パラメータと呼ぶ。Z パラメータは式 (3) に示す形で表される。

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

また Z パラメータはインピーダンスの次元 $[\Omega]$ をもつ。2 端子対パラメータの内、電流を電圧で記述するものを Y パラメータと呼ぶ。Y パラメータは式 (4) に示す形で表される。

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Y パラメータはアドミタンスの次元 $[S]$ を持つ。また Y パラメータは Z パラメータの逆行列になっている。

3 実験

3.1 使用器具

表 1 に本実験に用いた使用器具を示す。

表 1: 使用器具

器具名	型番	製造元	シリアルナンバー
LabVIEW	/	NATIONAL INSTRUMENTS	/
myRIO	154294E-01L	NATIONAL INSTRUMENTS	MyRIO No.06 /
myRIO ブレッドボードアクセサリ	/	NATIONAL INSTRUMENTS	MyRIO No.06
ノートパソコン	/	iiyama	MyRIO-06
トランジスタ	2N3904	ON Semiconductor	/
抵抗 (100 k Ω)	/	/	/
抵抗 (470 Ω)	/	/	/

3.2 比較演算と while ループの演習

1. 図 3 に示すプログラムを組んだ。

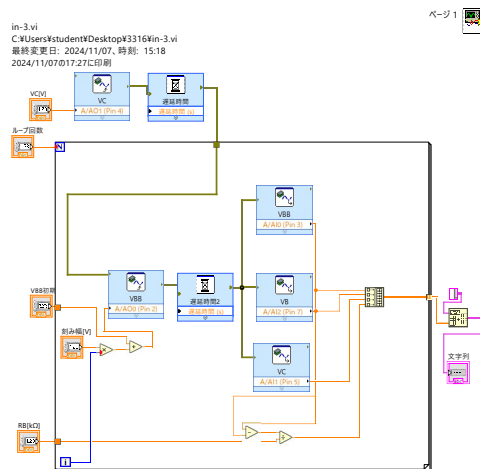


図 3: 比較演算子と while ループの演習プログラム

2. 図 3 の数値制御機に適当な値を入れ、動くか検証した。
3. 図 3 のプログラムを刻み幅 0.1 と 0.2 でそれぞれ 18 回繰り返し測定を行うように設定し、動くか検証した。

3.3 BJT の入力特性図

1. 図 4 の R_B に用いる抵抗の抵抗値をテスターで測定した。
2. 図 4 に示す測定回路をブレッドボード上に組んだ。

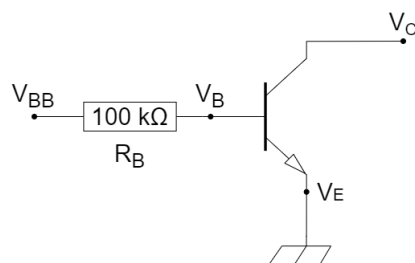


図 4: 入力特性の測定回路

3. 測定回路と myRIO の端子を表 2 に示すように接続した。

表 2: 入力特性の測定回路と myRIO の接続

回路図の記号		接続ポート
V_{BB}	-	AI0,AO0
V_B	-	AI2
V_C	-	AI1,AO1
V_E	-	GND
GND	-	AI の GND
GND	-	AO の GND

4. 図 6 に示すプログラムを組んだ。
5. 変数を次のように設定し、 V_{BB}, V_C が指定通りになっているか、また、 V_B が 0.7 V 程度になっていることを確認した。
 - $V_C = 4 \text{ V}$
 - $V_{BB} = 3.4 \text{ V}$
6. 図 6 のプログラムを別名で保存し、以下の要項で自動測定するように修正し、実行した。
 - V_{BB}, V_B, R_B より I_B を算出。
 - I_B を配列結合に加える。
 - 測定結果 (文字列) を 1 行 4 列で表示。
7. 上述のプログラムを別名で保存し、以下の要項で自動測定するように修正した。
 - V_{BB} を 0 V から 3.4 V まで 0.2 V 刻みで変化させる。
 - 各 V_{BB} に対して、 V_C, V_{BB}, V_B, I_B を測定する。
8. 測定結果を Excel で処理し、入力特性図として描画した。

3.4 BJT 電流伝達特性

1. 図 7 の R_C に用いる抵抗の抵抗値をテスターで測定した。
2. 図 7 に示す測定回路をブレッドボード上に組んだ。
3. 測定回路と myRIO の端子を表 3 に示すように接続した。

表 3: 電流伝達特性の測定回路と myRIO の接続

回路図の記号		接続ポート
V_{BB}	-	AI0,AO0
V_B	-	AI2
V_{CC}	-	AI1,AO1
V_C	-	AI3
V_E	-	GND
GND	-	AI の GND
GND	-	AO の GND

4. 図 5 に示すように以下の要項で入力特性測定プログラムを修正した。

- ラベル V_C を V_{CC} に修正する。
- V_{CC}, V_C, R_C より I_C を算出する。
- V_{BB} を 0 V から 1.8 V まで 0.1 V 刻みで変化させる。
- 測定結果 (文字列) を 19 行 6 列で表示。

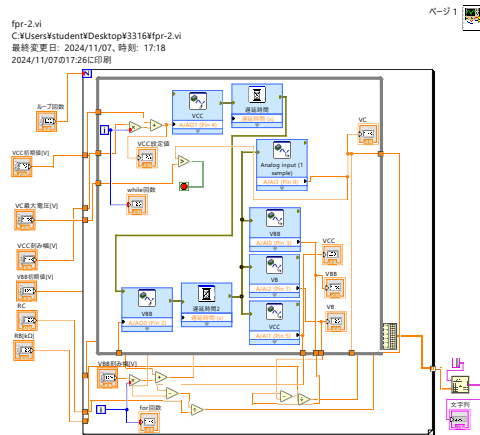


図 5: 電流伝達特性測定プログラム

5. プログラムを実行し、 I_B と I_C がほぼ比例しているものの、 V_C が一定値になっていないことを確認した。

6. 上述のプログラムを別名で保存し、以下の要領で V_C を一定に保つように修正した。

- V_{BB} を変化させている for ループの中に while ループを作成する。
- while ループ中で V_{CC} を 4 V から 0.002 V ずつ変化させ、 V_C を測定。
- V_{CC} の初期値、刻み幅は数値制御器または数値定数 (DBL) で設定する。
- V_C が 4 V を超えたら while ループを抜ける。

7. 実行し、測定結果を Excel で処理し、電流伝達特性図として描画した。

3.5 BJT の電圧帰還特性

1. 測定回路には 3.4 にて用いたものと同様のものを使用した。

2. 図 8 に示すプログラムを組んだ。

3. I_B を $8 \mu A$ に一定に保ちながら V_{CC} を 0 V から 5 V まで、0.2 V 刻みで変化させ測定を行った。

4. 測定結果を Excel で処理し、電圧帰還特性として描画した。

3.6 BJT の出力特性

1. 図 8 に示すコードを用いて、 I_B が $4\ \mu\text{A}$, $12\ \mu\text{A}$ に設定し測定を行った。
2. 3.5 で測定したデータと合わせた 3 組のデータを Excel を用いて出力図として描画した。

4 結果

4.1 自動測定プログラム

4.1.1 入力特性測定プログラム

入力特性の自動測定プログラムとその出力結果を図 6, 表 4 に示す。

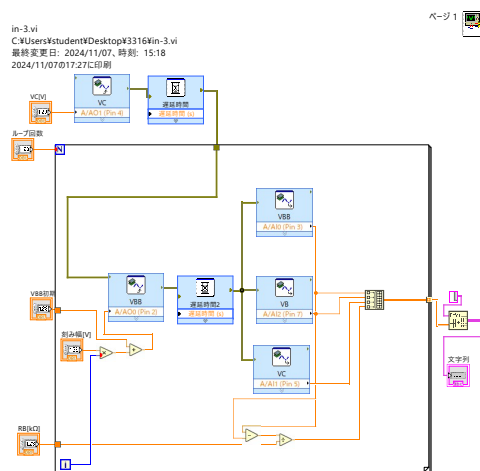


図 6: 入力特性測定プログラム

表 4: 入力特性測定結果

V_{BB} [V]	V_B [V]	V_C [V]	I_B [mA]
0.008545	0.308838	4.000244	-0.003003
0.196533	0.461426	3.997802	-0.002649
0.395508	0.528564	4.001464	-0.001331
0.599365	0.549316	4.000244	0.0005
0.79834	0.559082	3.999023	0.002393
0.998535	0.565185	3.999023	0.004333
1.19751	0.570068	4.001464	0.006274
1.398926	0.574951	3.997802	0.00824
1.5979	0.579834	4.000244	0.010181
1.796875	0.583496	4.001464	0.012134
1.99707	0.585937	4.001464	0.014111
2.197265	0.5896	4.001464	0.016077
2.397461	0.592041	4.001464	0.018054
2.598877	0.594482	4.000244	0.020044
2.797851	0.596924	4.001464	0.022009
2.998047	0.599365	4.000244	0.023987
3.198242	0.601807	4.001464	0.025964
3.399658	0.603027	3.999023	0.027966

表 4 より V_{BB} が上昇するにつれ V_B, I_B も上昇していることがわかる。

4.1.2 電流伝達特性測定プログラム

電流伝達特性の自動測定プログラムとその出力結果を図 5, 表 5 に示す。

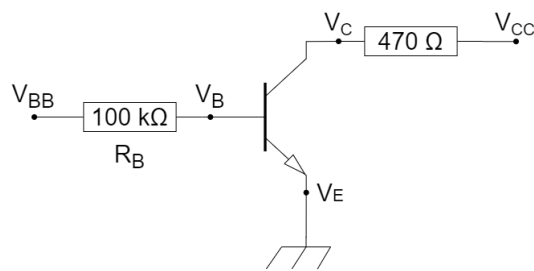


図 7: 電流伝達特性測定回路

表 5: 電流伝達特性測定結果

V_B [V]	V_{BB} [V]	V_{CC} [V]	I_B [mA]	V_C [V]	I_C [A]
0.008545	0.305176	4.001464	-0.002966	3.996582	0.000010
0.100098	0.385742	4.001464	-0.002856	3.999023	0.000005
0.196533	0.466309	4.002685	-0.002698	4.000244	0.000005
0.296631	0.544434	4.000244	-0.002478	3.997802	0.000005
0.397949	0.601807	4.001464	-0.002039	3.990478	0.000023
0.499268	0.632324	4.002685	-0.001331	3.944091	0.000125
0.596924	0.648193	4.000244	-0.000513	3.862304	0.000293
0.697021	0.657959	4.001464	0.000391	3.770752	0.000491
0.79834	0.664062	3.999023	0.001343	3.677978	0.000683
0.897217	0.667725	3.999023	0.002295	3.583984	0.000883
0.997314	0.670166	3.999023	0.003271	3.485107	0.001093
1.097412	0.673828	3.997802	0.004236	3.391113	0.001291
1.19751	0.676269	3.999023	0.005212	3.292236	0.001504
1.297607	0.678711	3.997802	0.006189	3.188476	0.001722
1.397705	0.681152	3.996582	0.007166	3.087158	0.001935
1.497803	0.683594	4.019775	0.008142	3.000488	0.002169
1.5979	0.684814	4.149169	0.009131	3.001709	0.002441
1.697998	0.687256	4.293212	0.010107	3.000488	0.002750
1.798096	0.688476	4.466552	0.011096	3.001709	0.003117

表 5 より V_B が上昇するにつれ、 V_{BB} 、 I_B 、 I_C が上昇していることがわかる。

4.1.3 電圧帰還特性測定プログラム

電圧帰還特性の自動測定プログラムとその出力結果を図 8, 表 6 に示す。

表 6: 電圧帰還特性測定結果

V_B [V]	V_{BB} [V]	V_{CC} [V]	I_B [mA]	V_C [V]	I_C [A]
1.357422	0.554199	0.006104	0.0000080	0.006104	0.0000000
1.422119	0.621338	0.198975	0.0000080	0.073242	0.0002680
1.448974	0.64331	0.397949	0.0000081	0.101318	0.0006310
1.459961	0.655518	0.596924	0.0000080	0.128174	0.0009970
1.468506	0.662842	0.795898	0.0000081	0.195312	0.0012780
1.469726	0.666504	0.996094	0.0000080	0.349121	0.0013770
1.473389	0.667725	1.195068	0.0000081	0.426025	0.0016360
1.472168	0.668945	1.395264	0.0000080	0.612793	0.0016650
1.473389	0.670166	1.59668	0.0000080	0.915527	0.0014490
1.473389	0.672607	1.796875	0.0000080	1.107178	0.0014670
1.479492	0.672607	1.995849	0.0000081	1.296387	0.0014880
1.478271	0.673828	2.196045	0.0000080	1.489258	0.0015040
1.478271	0.675049	2.39624	0.0000080	1.683349	0.0015170
1.477051	0.676269	2.597656	0.0000080	1.875	0.0015380
1.478271	0.67749	2.796631	0.0000080	2.065429	0.0015560
1.483154	0.67749	2.996826	0.0000081	2.25708	0.0015740
1.479492	0.678711	3.1958	0.0000080	2.445068	0.0015970
1.484375	0.679932	3.395996	0.0000080	2.626953	0.0016360
1.485596	0.681152	3.597412	0.0000080	2.8125	0.0016700
1.484375	0.682373	3.796386	0.0000080	2.999267	0.0016960
1.484375	0.683594	3.996582	0.0000080	3.044433	0.0020260
1.486816	0.683594	4.197998	0.0000080	3.221435	0.0020780
1.489258	0.683594	4.395752	0.0000081	3.391113	0.0021380
1.488037	0.684814	4.595947	0.0000080	3.728027	0.0018470
1.490478	0.684814	4.796142	0.0000081	3.902587	0.0019010
1.489258	0.686035	4.995117	0.0000080	3.997802	0.0021220

表 6 より V_B が上昇するにつれ、 V_{BB} 、 V_{CC} 、 V_C 、 I_C が上昇していることがわかる。

4.1.4 出力特性測定プログラム

出力特性の自動測定プログラムとその結果を図 8, 表 7, 表 8 表 9 に示す。

表 7: 出力特性測定結果 ($I_B=4 \mu\text{A}$)

V_B [V]	V_{BB} [V]	V_{CC} [V]	I_B [mA]	V_C [V]	I_C [A]
0.997314	0.535889	0.007324	0.0000046	0.006104	2.60E-06
1.019287	0.615234	0.198975	0.0000040	0.091553	0.000229
1.04126	0.638428	0.397949	0.0000040	0.150146	0.000527
1.048584	0.64331	0.599365	0.0000041	0.244141	0.000756
1.052246	0.646973	0.797119	0.0000041	0.428467	0.000784
1.048584	0.648193	0.998535	0.0000040	0.661621	0.000717
1.053467	0.651855	1.19751	0.0000040	0.848389	0.000743
1.057129	0.654297	1.398926	0.0000040	1.040039	0.000764
1.063232	0.656738	1.5979	0.0000041	1.229248	0.000784
1.064453	0.65918	1.798096	0.0000041	1.367187	0.000917
1.062012	0.6604	1.998291	0.0000040	1.613769	0.000818
1.063232	0.661621	2.198486	0.0000040	1.80542	0.000836
1.066894	0.664062	2.398681	0.0000040	1.999512	0.000849
1.069336	0.665283	2.597656	0.0000040	2.193603	0.00086
1.069336	0.667725	2.799072	0.0000040	2.387695	0.000875
1.071777	0.668945	2.998047	0.0000040	2.520752	0.001016
1.070557	0.670166	3.197021	0.0000040	2.773437	0.000901
1.072998	0.672607	3.397216	0.0000040	2.961425	0.000927
1.074219	0.673828	3.599853	0.0000040	3.148193	0.000961
1.079101	0.675049	3.798828	0.0000040	3.339843	0.000977
1.079101	0.676269	3.997802	0.0000040	3.533935	0.000987
1.077881	0.67749	4.199218	0.0000040	3.725586	0.001008
1.077881	0.67749	4.398193	0.0000040	3.914795	0.001029
1.082764	0.678711	4.597167	0.0000040	4.104003	0.001049
1.082764	0.679932	4.796142	0.0000040	4.293212	0.00107
1.081543	0.681152	4.997558	0.0000040	4.475097	0.001112

表 8: 出力特性測定結果 ($I_B=8 \mu\text{A}$)

V_B [V]	V_{BB} [V]	V_{CC} [V]	I_B [mA]	V_C [V]	I_C [A]
1.357422	0.554199	0.006104	0.0000080	0.006104	0.0000000
1.422119	0.621338	0.198975	0.0000080	0.073242	0.0002680
1.448974	0.64331	0.397949	0.0000081	0.101318	0.0006310
1.459961	0.655518	0.596924	0.0000080	0.128174	0.0009970
1.468506	0.662842	0.795898	0.0000081	0.195312	0.0012780
1.469726	0.666504	0.996094	0.0000080	0.349121	0.0013770
1.473389	0.667725	1.195068	0.0000081	0.426025	0.0016360
1.472168	0.668945	1.395264	0.0000080	0.612793	0.0016650
1.473389	0.670166	1.59668	0.0000080	0.915527	0.0014490
1.473389	0.672607	1.796875	0.0000080	1.107178	0.0014670
1.479492	0.672607	1.995849	0.0000081	1.296387	0.0014880
1.478271	0.673828	2.196045	0.0000080	1.489258	0.0015040
1.478271	0.675049	2.39624	0.0000080	1.683349	0.0015170
1.477051	0.676269	2.597656	0.0000080	1.875	0.0015380
1.478271	0.67749	2.796631	0.0000080	2.065429	0.0015560
1.483154	0.67749	2.996826	0.0000081	2.25708	0.0015740
1.479492	0.678711	3.1958	0.0000080	2.445068	0.0015970
1.484375	0.679932	3.395996	0.0000080	2.626953	0.0016360
1.485596	0.681152	3.597412	0.0000080	2.8125	0.0016700
1.484375	0.682373	3.796386	0.0000080	2.999267	0.0016960
1.484375	0.683594	3.996582	0.0000080	3.044433	0.0020260
1.486816	0.683594	4.197998	0.0000080	3.221435	0.0020780
1.489258	0.683594	4.395752	0.0000081	3.391113	0.0021380
1.488037	0.684814	4.595947	0.0000080	3.728027	0.0018470
1.490478	0.684814	4.796142	0.0000081	3.902587	0.0019010
1.489258	0.686035	4.995117	0.0000080	3.997802	0.0021220

表 9: 出力特性測定結果 ($I_B=12 \mu\text{A}$)

V_B [V]	V_{BB} [V]	V_{CC} [V]	I_B [mA]	V_C [V]	I_C [A]
1.773681	0.571289	0.007324	0.0000120	0.006104	2.60E-06
1.831055	0.629883	0.197754	0.0000120	0.073242	0.000265
1.850586	0.649414	0.395508	0.0000120	0.085449	0.00066
1.864013	0.661621	0.598144	0.0000120	0.13916	0.000977
1.871338	0.670166	0.795898	0.0000120	0.123291	0.001431
1.876221	0.675049	0.996094	0.0000120	0.357666	0.001358
1.882324	0.679932	1.195068	0.0000120	0.177002	0.002166
1.883545	0.682373	1.395264	0.0000120	0.253906	0.002428
1.885986	0.684814	1.595459	0.0000120	0.927734	0.001421
1.889648	0.684814	1.795654	0.0000120	1.119385	0.001439
1.887207	0.686035	1.993408	0.0000120	0.805664	0.002527
1.888428	0.686035	2.194824	0.0000120	1.500244	0.001478
1.887207	0.686035	2.395019	0.0000120	1.690674	0.001499
1.888428	0.687256	2.595215	0.0000120	1.879883	0.001522
1.889648	0.687256	2.794189	0.0000120	2.072754	0.001535
1.889648	0.688476	2.995605	0.0000120	2.263183	0.001558
1.89209	0.689697	3.193359	0.0000120	1.911621	0.002727
1.89331	0.689697	3.394775	0.0000120	2.078857	0.0028
1.894531	0.690918	3.59497	0.0000120	2.247314	0.002867
1.89209	0.690918	3.795166	0.0000120	3.010254	0.00167
1.89209	0.690918	3.995361	0.0000120	3.193359	0.001706
1.89331	0.692139	4.195556	0.0000120	3.378906	0.001738
1.89331	0.690918	4.39331	0.0000120	3.558349	0.001777
1.89331	0.692139	4.592285	0.0000120	3.739013	0.001815
1.894531	0.690918	4.79248	0.0000120	3.908691	0.00188
1.89331	0.690918	4.991455	0.0000120	4.077148	0.001945

表 7、表 8、表 9 より V_B が上昇するにつれ、 V_{BB} 、 V_{CC} 、 V_C 、 I_C が上昇していることがわかる。

4.2 特性図

4.2.1 入力特性

入力特性の特性図を図 9 に示す。

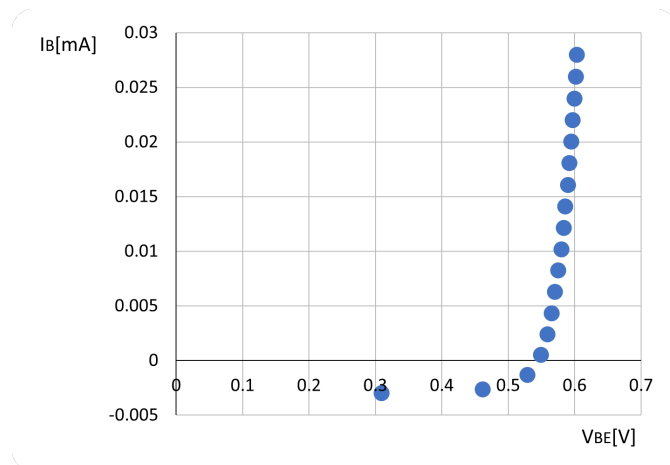


図 9: 入力特性図

図 9 よりこのトランジスタは $v_{BE} = 0.6V$ 付近で電流を流すようになることが分かる。

4.2.2 電流伝達特性

電流伝達特性の特性図を図 10 に示す。

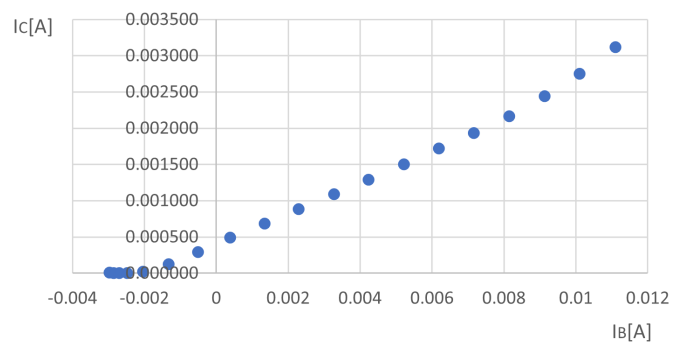


図 10: 電流伝達特性図

図 10 より $i_B = -0.002A$ 付近から電流 I_C が上昇し始めることがわかる。

4.2.3 電圧帰還特性

電圧帰還特性の特性図を図 11 に示す。

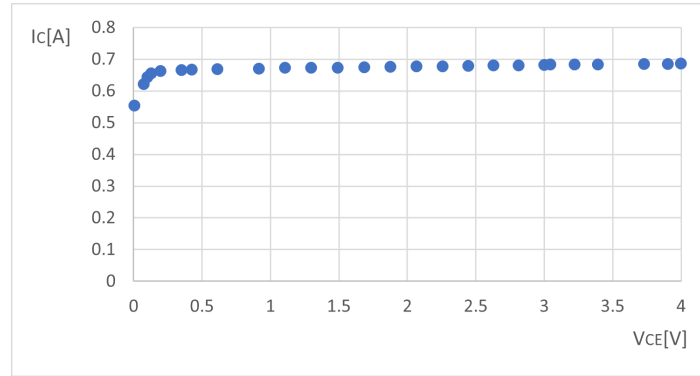


図 11: 電圧帰還特性図

図 11 より $i_C = 0.7 \text{ A}$ 付近で漸近していることが分かる。

4.2.4 出力特性

出力特性の特性図を図 12 に示す。

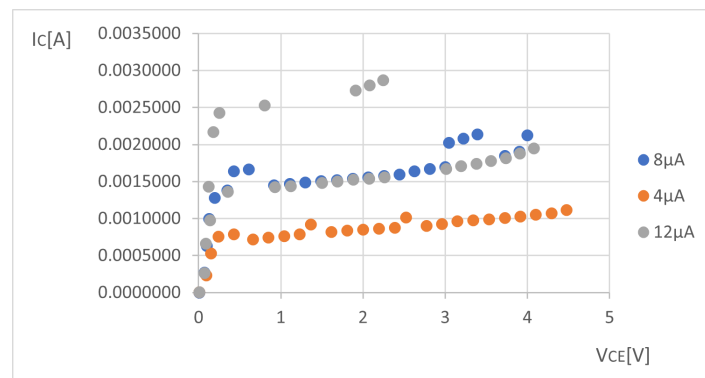


図 12: 出力特性図

図 12 より $i_B = 12\mu\text{A}$ 及び $i_B = 8\mu\text{A}$ の値の一部において i_C 異常な値が検知されていることが分かる。

5 考察

5.1 H パラメータの導出

5.1.1 最小二乗法

H パラメータは各グラフの傾きより求められる。しかし計測値には誤差が含まれ綺麗な綺麗なグラフにならず、傾きが求められない。そこで今回は最小二乗法により $y=ax+b$ に近似して H パラメータを求

める。今回用いる式を式 (5) に示す。

$$\begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2 = 0 \\ y = ax_i + b \end{cases}$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 = 0$$

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (5)$$

5.1.2 入力インピーダンス (h_{ie})

入力インピーダンス (h_{ie}) は式 (5) より以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} h_{ie} &= \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \\ &= \frac{1}{a} \\ &= \frac{n \sum_{i=1}^n V_B^2 - (\sum_{i=1}^n V_B)^2}{n \sum_{i=1}^n V_B I_B - \sum_{i=1}^n I_B \sum_{i=1}^n V_B} \Omega \end{aligned} \quad (6)$$

よって、表 4 より 30.9 [kΩ] と求まる。

5.1.3 電流増幅率 (h_{fe})

電流増幅率 h_{fe} は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} h_{fe} &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \\ &= \frac{n \sum_{i=1}^n I_C I_B - \sum_{i=1}^n I_C \sum_{i=1}^n I_B}{n \sum_{i=1}^n I_B^2 - (\sum_{i=1}^n I_B)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

よって、表 5 より 2.14×10^2 と求まる。

5.1.4 電圧帰還率 (h_{re})

電圧帰還率 (h_{re}) は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} h_{re} &= \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \\ &= \frac{n \sum_{i=1}^n V_B V_C - \sum_{i=1}^n V_B \sum_{i=1}^n V_C}{n \sum_{i=1}^n V_C^2 - (\sum_{i=1}^n V_C)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

よって、表 6 より 31.0 と求まる。

5.1.5 出力アドミタンス (h_{oe})

出力アドミタンス (h_{oe}) は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} h_{oe} &= \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \\ &= \frac{n \sum_{i=1}^n I_C V_C - \sum_{i=1}^n I_C \sum_{i=1}^n V_C}{n \sum_{i=1}^n V_C^2 - (\sum_{i=1}^n V_C)^2} S \end{aligned} \quad (9)$$

よって、表 7 より $1.97 * 10^{-4} S$ と求まる。

5.2 H パラメータの測定結果について

5.2.1 入力インピーダンス (h_{ie})

5.1 より今回の測定では h_{ie} は $1.48 k\Omega$ と求められている。今回実験に用いたトランジスタ 2N3904 の h_{ie} は $0 \approx 2.2 k\Omega$ のため、この値は少し小さいが妥当であると考えられる。

5.2.2 電流増幅率 (h_{fe})

5.1 より今回の測定では h_{fe} は 233 と求められている。今回実験に用いたトランジスタの h_{fe} は最大で 300 程度になるため、この値は妥当であると考えられる。

5.2.3 電圧帰還率 (h_{re})

5.1 より今回の測定では h_{re} は 0.0000515 と求められている。今回実験に用いたトランジスタの h_{re} は $5 * 10^{-5}$ 程度になるため、この値は妥当であると考えられる。

5.2.4 出力アドミタンス (h_{oe})

5.1 より今回の測定では h_{oe} は $88 \mu S$ と求められている。今回実験に用いたトランジスタの h_{oe} は $9 \mu S$ であるため、この値は大きすぎると考えられる。

5.3 測定値が飛び飛びの値しかない理由

今回の実験では myRIO を用いて測定を行った。myRIO はその特性上アナログ計器と異なり分解能の上限が存在する。そのため、連続した値ではなく、測定値が飛び飛びの値しかない。

5.4 H パラメータから Y パラメータへの変換

H パラメータから Y パラメータは式 (10) に示す式で行える。

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{H_{11}} & -\frac{H_{12}}{H_{11}} \\ \frac{H_{21}}{H_{11}} & \frac{H_{11}H_{22}-H_{12}H_{21}}{H_{11}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式 (10) に今回の測定値を代入すると

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.75 * 10^{-4} & -3.47 * 10^{-8} \\ 0.1574 & 3.764 * 10^{-5} \end{pmatrix} \quad (11)$$

5.5 独自の考察

図 12 において異常な値が検知された原因として i_C が既定の値まで上昇しきっていないというのが考えられる。

6 結論

- トランジスタの入力/出力/電流伝達/電圧機関の諸特性図の概形が描けるようになった
- トランジスタの特性図が、h パラメータを求める方法を理解した
- 電圧と電流の関係式から、等価回路を求める方法を理解した
- LabVIEW を用いて、2 端子対回路の電圧と電流を自動測定する方法を理解した

参考文献

[1]