

〔研究ノート〕

## NanoVNA と EDA を用いた半導体実験講義の検討

伊藤 順治\*, 染矢 龍之介\*<sup>2</sup>

\*日本文理大学工学部機械電気工学科

\*<sup>2</sup>九州工業大学大学院生命体工学研究科生体機能応用工学専攻

### Examination of Semiconductor Experimental Lectures Using NanoVNA and EDA

Junji ITO\*, Ryunosuke SOMEYA\*<sup>2</sup>

\*Department of Mechanical and Electrical Engineering, School of Engineering,  
Nippon Bunri University

\*<sup>2</sup>Department of Biological Functions Engineering  
Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

### 1 はじめに

現在、地政学リスクや半導体不足により日本政府は半導体分野に積極投資している。

Jasm (tsmc 熊本工場) を皮切りに様々な企業が設備投資計画を発表している。また、本学が位置する九州はシリコンアイランド九州とも呼ばれ半導体関連企業が古くから集積しており、今後も半導体関連企業の進出が見込まれる。主な日本政府の半導体支援<sup>(1)</sup>を図1に示す。

関連事業者	 Jasm	 KIOXIA	 Micron	 Micron
認定日	2022年6月17日	2022年7月26日	2022年9月30日	2023年10月3日
最大助成額	4,760億円	約929億円	約465億円	1,670億円
場所	熊本県菊池郡菊陽町	三重県四日市市	広島県東広島市	広島県東広島市
主要製品	32nmクラス半導体 (32nm/28nm/22nm/16nm/12nm)	3次元フラッシュメモリ (第6世代製品)	DRAM (1世代)	DRAM (1世代) ※EUVを導入して生産
生産能力	5.5万枚/月 (12インチ換算)	10.5万枚/月 (12インチ換算)	4万枚/月 (12インチ換算)	4万枚/月 (12インチ換算)
初回出荷	2024年12月	2023年2月	2024年3~5月	2025年12月~2026年2月
製品納入先	日本の顧客が中心	メモリカードやスマートフォン、タブレット端末、パソコン/サーバー向けのSSDの他、データセンター、医療や自動車等分野	自動車、医療機器、インフラ、データセンター、5G、セキュリティ等	自動車、医療機器、インフラ、データセンター、5G、セキュリティ等 ※生成AIにも活用
設備投資額 (半導体工場建設費は別)	86億ドル規模	約2,788億円	約1,394億円	約5,000億円

図1 日本政府の主な支援策 (経済産業省半導体・デジタル産業戦略資料)

[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/joho/conference/semicon\\_digital/0010/3\\_strategy.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/0010/3_strategy.pdf) P36より引用)

上記のような活発な投資状況によって、今後必要となる人材は経済産業省<sup>(2)</sup>によると今後10年間に全国で4万人、九州だけでも9千人新たに必要としている。しかし、半導体関連企業の従業員数は2000年からの20年間で3割減少している。したがって、日本の半導体産業が再び競争力を持つためにも人材の育成が早急の課題である。

### 2 研究目的

半導体教育は物理・数学の基礎学習、デバイス製作・計測の実験学習に分けられる。

半導体の実験学習には従来、設備等に多額の費用が必要となり、資金力のある大学でなければ行うことが出来なかった。しかし、半導体の進化によってノートPCで高度なシミュレーションソフトを扱えるようになり、安価な簡易測定器も市場に出回るようになった。

したがって、本研究の目的はKeysight社製シミュレーションソフトAdvanced Design Systemと計測器VNA (Vector Network Analyzer) の簡易版ともいえるNanoVNAを組み合わせた実験学習の有用性を検証する。

### 3 研究内容

#### 3-1 研究方法

本研究は3年次電気電子工学実験2の講義を活用した。3年生に講義を受講してもらいレポート提出とアンケートによって理解度を測った。

このアンケートは事前に本研究に使用することについて了承をとっている。

講義は3つのテーマに分けて行った。

#### 3-2 講義内容の検討

##### 3-2-1 実験テーマ

実験テーマは会社に入り半導体デバイス開発を行う際に役に立つテーマであることが必要条件であった。以下、3つのテーマを示す。

- ・テーマ1：ADSと青色LEDを用いたPN-diodeのパラメータ抽出
- ・テーマ2：ADSとNanoVNAを用いたLC共振回路のシミュレーションと実測
- ・テーマ3：ADSと実デバイスをを用いた降圧・昇降圧チョップパ回路のシミュレーションと実測

各テーマの選定理由を半導体開発プロセスと合わせて次項で述べる。

##### 3-2-2 実験テーマの選定理由

各実験テーマの選定理由を述べる。

テーマ1：「ADSと青色LEDを用いたPN-diodeのパラメータ抽出」

このテーマはファウンドリの重要な仕事の一つ、PDK (Process Design Kit) の作成を模している。PDKとは設計に必要な材料であり、以下のものが含まれている。

- ・トランジスタや受動素子のSPICEモデル
- ・各素子のライブラリ
- ・検証用のデザイン・ルール
- ・各種ドキュメント

テーマ1ではSPICE<sup>(3)</sup>モデルを作る。回路設計者はSPICEモデルを絶対的な指標として設計を行う。PDKの作成は非常に重要な仕事であるためテーマに選定した。

テーマ2：「ADSとNanoVNAを用いたLC共振回路のシミュレーションと実測」

このテーマは回路設計者に焦点を当てたテーマである。回路設計時に必要となるコンデンサ、インダクタの

知識をシミュレーションと実測を併用することでより理解しやすくする狙いがある。また高周波回路設計でよく使うVNA (Vector Network Analyzer) の使い方、S-パラメータも理解できるためテーマに選定した。

テーマ3：「ADSと実デバイスをを用いた降圧・昇降圧チョップパ回路のシミュレーションと実測」

このテーマは近年、xEVやスマートグリッドなどのアプリケーションで注目されているパワーエレクトロニクス回路の理解を目的に選定した。テーマ2同様、シミュレーションと実測を併用することで回路と各部品の動作の理解を目指した。

次節では目的を達成するために重要かつ、実験で使用した測定器とシミュレーションソフトについて述べる。

#### 3-3 使用した測定器とソフトウェア

##### 3-3-1 VNA (Vector Network Analyzer)

VNA (Vector Network Analyzer) はネットワーク・アナライザの一種である。ベクトル・ネットワーク・アナライザのほかにスカラ・ネットワーク・アナライザがある。スカラ、ベクトルに関わらずDUT (Device Under Test) に正弦波信号を加え、その反応を観測することによりDUTの性質を調べる事ができるだけでなく、加える信号の周波数を掃引できるので各種パラメータの周波数特性を測定できる装置である。信号を出す機能と受ける機能が一体となっているため高い周波数でも測定誤差を小さくできるメリットがある。

ベクトル・ネットワーク・アナライザとスカラ・ネットワーク・アナライザの大きな違いは位相までわかるかにある。入力インピーダンスや増幅器のゲインは正確にはベクトル量である。振幅と位相を持つのでスカラ・ネットワーク・アナライザでは振幅に相当する絶対値しか評価できない。しかし、ベクトル・ネットワーク・アナライザではベクトル検波することでそれらの相対値をベクトル量として計測することができる。

ベクトル・ネットワーク・アナライザは信号源、パワースプリッタ、方向性結合器、受信機によって構成される。

パワースプリッタは、信号源から出力された高周波信号を2つの回路に分配するために使用される。信号源の信号を見ることで測定誤差を減らしている。

方向性結合器は、電磁誘導の作用によって伝送線路に流れる入射波と反射波のエネルギーを別々にする部品である。

図2にベクトル・ネットワーク・アナライザの基本構成、図3に外観を示す。

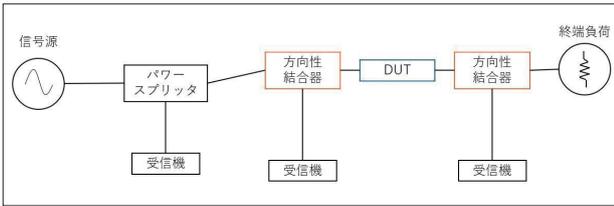


図2 VNAの基本構成

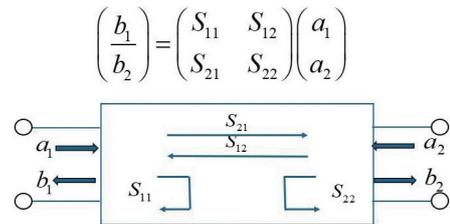


図4 Sパラメータの概要



図3 標準的な VNA の外観 (HP 社製8753A)

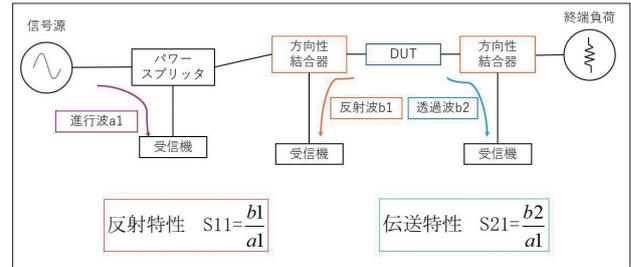


図5 SパラメータとVNAの関係

図6はスミス・チャート<sup>(4)</sup>といわれるもので高周波回路の特性を表すことができるグラフである。 $-\infty$ から $+\infty$ のインピーダンスを表すことができる。

### 3-3-2 S-パラメータ

Sパラメータとは回路パラメータの一種である。回路パラメータはいずれも、ある端子から流入した電流はほかの端子から出力される、という性質を持つ。複数の回路を縦続接続して組み合わせたシステム全体の特性は、回路パラメータ同士の行列計算によって求められる。

Sパラメータは高周波回路の特性を表す際に利用される。ほかの回路パラメータと違うのは電圧、電流ではなく波を扱っていることにある。

2端子対のSパラメータでは一方の端子をポート1、もう一方の端子をポート2と呼び、入射波aと反射波bをもとに $2 \times 2$ の行列式で回路の特性を表す。

Sパラメータの各要素の意味を以下に示す。

- ・  $S_{11}$  : ポート1の反射係数
- ・  $S_{12}$  : ポート1からポート2への伝送係数
- ・  $S_{21}$  : ポート2の反射係数
- ・  $S_{22}$  : ポート2からポート1への伝送係数

図4にSパラメータの概要、図5にSパラメータとベクトル・ネットワーク・アナライザの関係を示す。

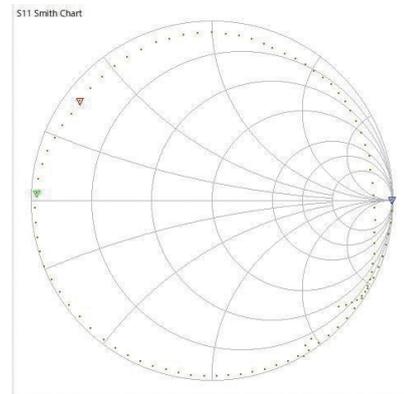


図6 スミス・チャート

### 3-3-3 NanoVNA<sup>(5)</sup>

NanoVNAはVNAを簡易化し安価にした測定器である。基本的な測定原理はVNAと同じである。簡易的なVNAを総称してNanoVNAと呼んでおり、NanoVNAはオープンソース化されている。

以下、低コスト化を実現できたポイントを述べる。

NanoVNAのポイントは方向性結合器をブリッジ抵抗回路で代替していることである。これによって大幅にコストを抑えることができています。

NanoVNAの回路は大きく、電源回路、デジタル回路、RF回路に分けられる。このうち、RF回路が最も従来のネットワーク・アナライザと比較して特徴的である。

図7に NanoVNA の 外 観, 図8に NanoVNA の RF 回 路 構 成 を 示 した の ち, 技 術 的 な ポ イ ン ト を 述 べ る。



図7 今回使用した NanoVNA

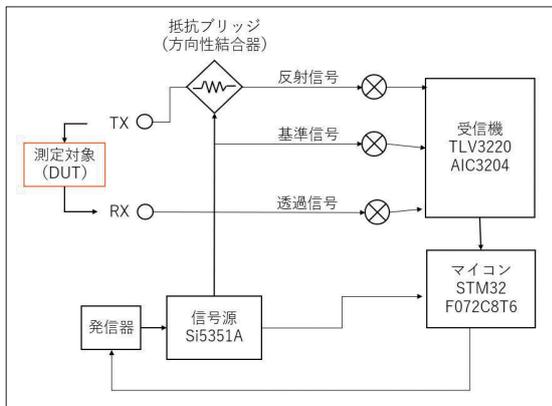


図8 NanoVNA の RF 回路構成

#### ・RF 信号の流れ

RF 信号は抵抗ブリッジを介して TX 端子, DUT, RX 端子へと接続されている。

NanoVNA ではクロック・ジェネレータ IC から出力された電圧を基準信号, 抵抗ブリッジの両端に生じた電圧を反射信号, RX 端子に生じる電圧を透過信号として測定し, この3つの信号を組み合わせることで  $S_{11}$  と  $S_{21}$  を求めている。

#### ・信号源

NanoVNA では, 信号源に Si5351A (シリコン・ラポラトリーズ) というクロック・ジェネレータ IC を使用している。この IC は安価かつ RF 用途で十分に使える低ジッタ性能をもつ。

NanoVNA においては RF 信号, LO 信号, システム・クロック信号の3つの用途に使用されている。

なお, NanoVNA では水晶発振器に電圧制御温度補償型水晶発振器を使っている。

#### ・RF 信号は矩形波

NanoVNA では通常の VNA の正弦波ではなく矩形波

を用いている。NanoVNA では信号源にクロック・ジェネレータを使用しているためである。矩形波には多数の高調波成分が含まれており, 測定結果に悪影響を与える可能性があるが低コスト化のために割り切っている。また, 矩形波の高調波を利用することで測定周波数を拡張している。

#### ・受信機

NanoVNA では, ミキサ IC SA612AD (NXP) とオーディオコーデック IC TLV320AIC3204IRHBR (Texas Instruments) を組み合わせた IF 方式の受信機が採用されている。

ミキサ IC は基準信号, 反射信号, 透過信号を別々に測定するために3つ実装されている。

この3つのミキサ IC には RF 信号と LO 信号が入力され, その差分の周波数が IF 信号として出力される。

オーディオ・コーデック IC には  $\Delta\Sigma$  型の A-D コンバータが内蔵されており, 基準信号, 反射信号, 透過信号をそれぞれ切り替えながらレベル測定している。

### 3-3-4 EDA (Electronic Design Automation)

EDA とは半導体, 電子機器など電子系の設計作業を自動化し支援するためのソフトウェアである。今回の講義ではその一種である ADS (Advanced Design System) Keysight 社製を用いた。

ADS は回路設計, 周波数領域および時間領域の回路 Simulation, レイアウト, デザインルールチェックなど設計プロセスすべてのステップをサポートしている。ADS は通常, 数百万円するソフトウェアであるが, 学生ライセンスであれば格安で手にいれることができる。

大学の講義で一般的な LTspice との比較を表 1 に示す。

表1 LTspice と ADS の比較

Sim 名	実用的な周波数	主な用途	価格
ADS	テラ・ヘルツまで	PDK DRC, Layout RFIC の設計 など	数百万円 ~
LTspice	数百 MHz	電子回路 sim AC, DC, Tr 解析	無償

### 3-4 講義内容

#### 3-4-1 テーマ1

テーマ1 は ADS と青色 LED を用いた PN-diode のパラメータ抽出, SPICE モデルの作成である。

・実験手順

実際の LED を測定し、I-V 特性を取得後 ADS でシミュレーションを行う。ダイオードパラメータを調節しながらシミュレーション値を実測値に近づけることで SPICE モデルを作る。

実験例を次に示す。図9に ADS の schematic 画面を、図10にパラメータ、図11に実際に測定している様子を示す。

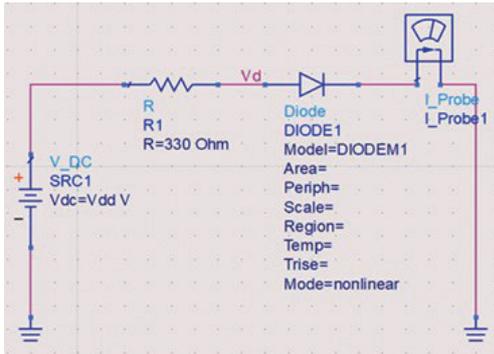


図9 ADS の schematic 画面

Diode_Model		
DIODEM1		
Is=0.00000006 fA	Bv=	Vjsw=
Rs=0.0000002	lbv=	Fcsw=
Gleak=	Nbv=	AllowScaling=no
N=1.6	lbvl=	Tnom=
Tt=	Nbvl=	Trise=
Cd=	Kf=	Xti=
Cjo=	Af=	Eg=2.8
Vj=	Ffe=	AllParams=
M=	Jsw=	
Fc=	Rsw=	
Imax=	Gleaksw =	
Imelt=	Ns=	
Isr=	lkp=	
Nr=	Cjsw=	
lkf=	Msw=	

図10 Diode パラメータ

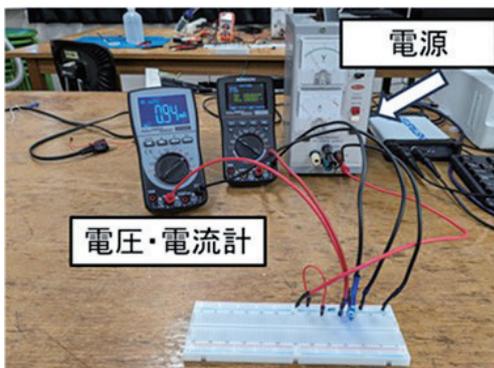


図11 測定構成

図12にシミュレーション値を実測値に合わせこんだグラフを示す。青が実測、赤がシミュレーション値である。

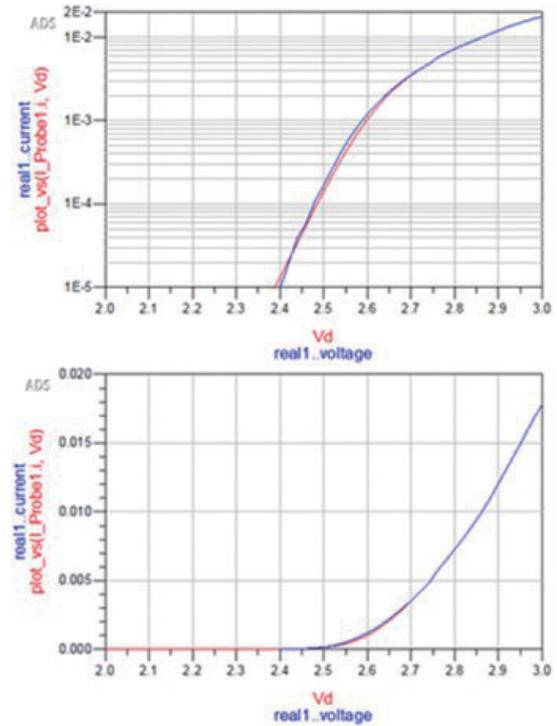


図12 実測値とシミュレーション値

図10に示したパラメータの中で Is (飽和電流), Rs (寄生抵抗), Eg (バンドギャップ) を調整するだけで図12の通り、ほぼ実測と変わらないグラフとなる。これで今回計測した青色 LED のデバイスモデルがほぼ完成した。

3つのパラメータの物理的意味を以下に述べる。

- ・ Is (飽和電流) : 飽和電流は半導体ダイオードに逆バイアス電圧を印加したときに流れる逆電流である。中性領域から空乏層への少数キャリアの拡散によって引き起される。この飽和電流が式(1)に示すように順方向電流・電圧に影響する。

$$I_F = I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_F}{K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

- ・ Rs (寄生抵抗) : これは内部の抵抗値である。電圧を上げていくと電流が増えるがオームの法則で電圧降下が発生する。

- ・ Eg (バンドギャップ) : 電流の流れやすさ

3-4-2 テーマ2

テーマ2は ADS と NanoVNA を用いた LC 共振回路のシミュレーションと実測である。

まず、簡単に共振の考え方を述べる。

共振とはRLC回路のインピーダンスを考えたとき、虚数部のLとCが打ち消しあうことで直列共振であればインピーダンスが最小に、並列共振であればインピーダンスが最大になることである。共振回路はフィルタなどに利用される。

共振周波数は式(2)で求められる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

#### ・実験手順

今回、チップコンデンサは様々な容量を用意できたが、チップインダクタは2.2nH, 10nH, 33nH, 68nH, 100 nHの5種類しか用意できなかった。また、NanoVNAの測定周波数が50kHz~900MHzであることを考慮して共振周波数とコンデンサの値を決める。式(3)にコンデンサ値を求める式を示す。

$$C = \left( \frac{1}{2\pi f_0} \right)^2 \times \frac{1}{L} \quad (3)$$

コンデンサ値、インダクタ値が決定したらADSでシミュレーションを行う。シミュレーション結果が設計通りの共振周波数になっていれば図13に示すように Test Board 上に実装し NanoVNA で測定する。

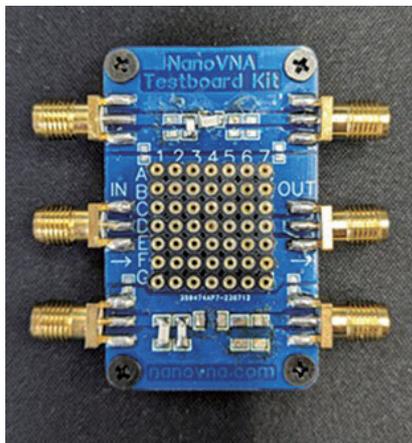


図13 Test Board

次に実験例を示す。直列・並列とも同じ内容のため並列のみ示す。

共振周波数を107MHzとし、インダクタは10nH, 式(3)よりコンデンサ値は220pFとなった。

図14にADSのschematic画面, 図15にシミュレーション結果, 図16に実測画面を示す。

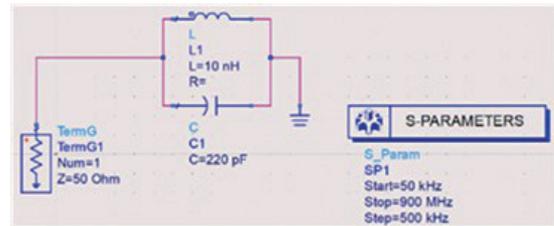


図14 ADSのschematic画面

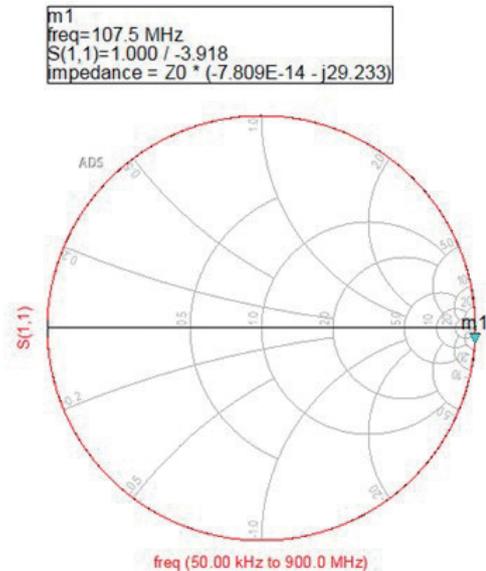


図15 シミュレーション結果

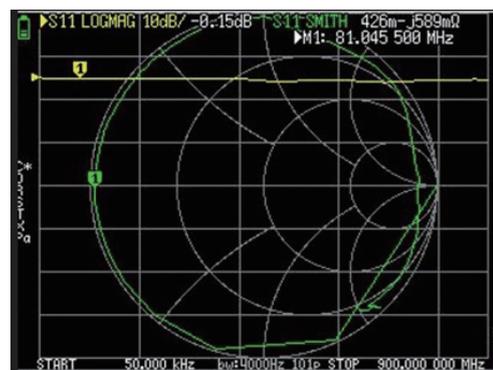


図16 NanoVNA実測画面

図16に示したように実測では81MHzとなった。シミュレーションとの誤差率は24.3%であった。

### 3-4-3 テーマ3

テーマ3はADSと実デバイスを用いた降圧・昇降圧チョッパ回路のシミュレーションと実測である。

降圧チョッパ回路はトランジスタをON/OFFさせることで出力電圧を入力電圧より下げる回路である。

トランジスタが ON のとき電源から電流が負荷側に流れ、平滑コンデンサとインダクタにエネルギーが貯められる。トランジスタが OFF のときは電源からの電流は流れず平滑コンデンサとインダクタに貯まった電子が流れる。この ON と OFF の比率を変化させて出力電圧をコントロールする。

今回は入力を 6V 出力は 3V とした。

実験手順は ADS で回路の作成、シミュレーションを行ったのち、ブレッドボード上に実際に回路を組み出しオシロスコープで測定する。

図17に ADS の schematic 画面、図18に実際の測定構成、図19にシミュレーション結果、図20に実測結果をそれぞれ示す。

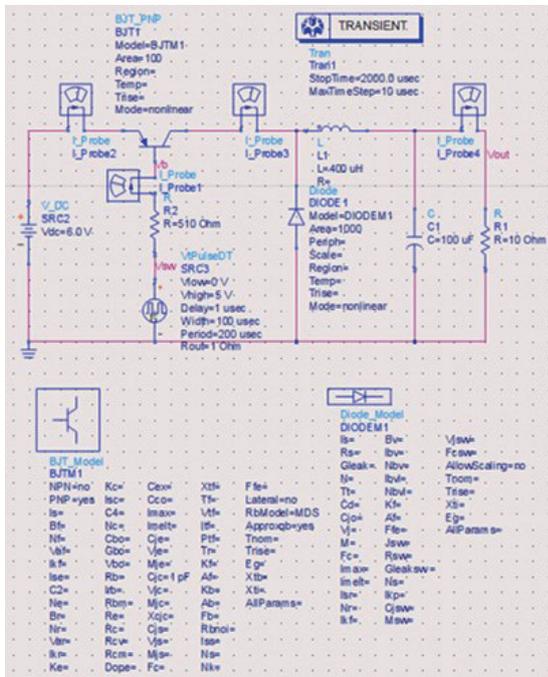


図17 ADS の schematic 画面

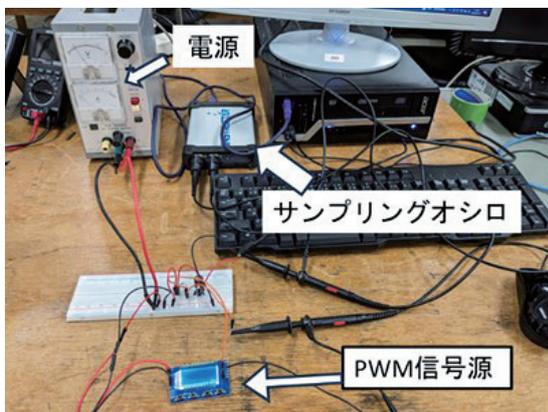


図18 実際の測定構成

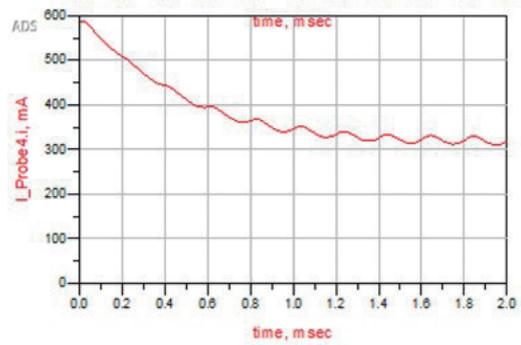
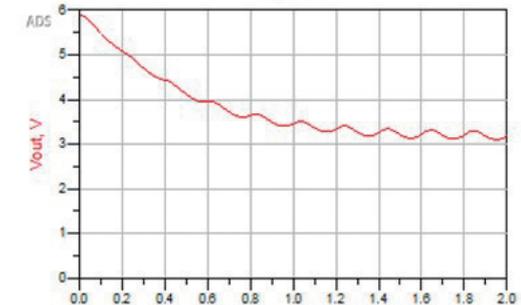
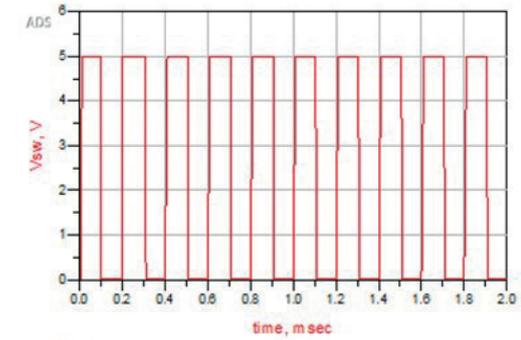


図19 シミュレーション結果



図20 実測結果

#### 4 研究結果

すべてのテーマ終了後、受講者に対し講義理解度を測るためのアンケートを取った。

アンケートはそれぞれの設問に対して4段階で答えてもらった。

アンケートの設問は以下の通りである。

- ・質問1：ダイオードやバイポーラトランジスタの動作について理解できた。
- ・質問2：回路シミュレーターを利用することで電子回路への理解が深まった。
- ・質問3：電子回路における受動部品の重要性を理解できた。
- ・質問4：VNAを使うことでより理解が深まった。
- ・質問5：LCRとトランジスタを使ったパワーエレクトロニクス回路のシミュレーションと実測を両方行うことでより理解が深まった。

今回、返答してくれたのは全受講者13人中9人あった。

④、③に関連してVNAを使うことでコンデンサやコイルの動作を理解することができたとおもう  
9件の回答

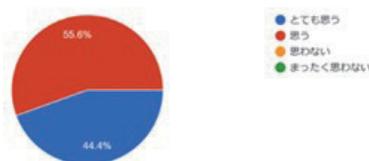


図24 質問4

⑤LCRとトランジスタを使ったパワーエレクトロニクス回路のシミュレーションと実測の両方を行うことでより理解できた  
9件の回答

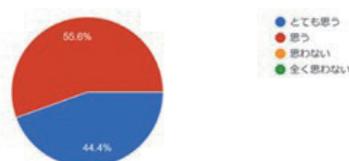


図25 質問5

①ダイオードやバイポーラトランジスタの動作について理解できた  
9件の回答



図21 質問1

②回路シミュレーターを利用することで電子回路への理解が深まった  
9件の回答



図22 質問2

③電子回路における受動部品（コンデンサ、コイル）の重要性を理解できた  
9件の回答

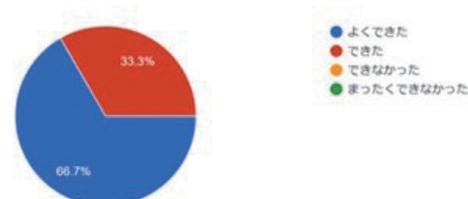


図23 質問3

また、受講者からは「解析と実験の両方がありよかった」、「しっかりレポートが書けた」、「とてもよかった」といったコメントを頂くことができた。

受講者にテーマごとに提出してもらったレポートに関しては筆者の主観ではあるが、テーマ選定の理由で述べた受講者に理解してほしいポイントはおおむね理解できていた。

特に、テーマ2に関して、はんだ付けのはんだの量やインダクタ、コンデンサの配置によって寄生抵抗などが生じ、測定結果が変化することが理解できていた。

## 5 まとめ

アンケート結果を見る限り、受講者の半導体、電子回路への理解度は高まったとみてよいと考える。しかし、いくつか改善点もみられた。

特にNanoVNAを使用したテーマ2ではNanoVNAの性能限界により共振周波数によってきれいに測定できた人とできなかった人が生まれた。したがって、次回からはNanoVNAで十分測定できる範囲のインダクタ、コンデンサを用意する、または共振周波数を指定するなどして学生に仕様要件を満たすための部品選定といった考える余地を残しながらシミュレーションと実測をつなぎ、電子回路への理解を深めることのできる講義にする必要がある。

また、今回の講義のなかで半導体業界に興味をもち半導体デバイスメーカーへ就職を希望する学生も生まれた。

以上より、安価な簡易測定器とシミュレーションを組み合わせて半導体工学への理解度を高めること、半導体産業への関心を持たせるという研究の目的は達成できたと考える。

## 6 参考資料

- (1) 経済産業省. “半導体・デジタル産業戦略の現状と今後”. 経済産業省. 2023年11月29日. P36.  
[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/joho/conference/semicon\\_digital/0010/3\\_strategy.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/0010/3_strategy.pdf)
- (2) 経済産業省. “半導体・デジタル産業戦略の現状と今後”. 経済産業省. 2023年5月. P99.

[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/joho/conference/semicon\\_digital/0009/4hontai.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/0009/4hontai.pdf)

- (3) ローム. SPICEとは?. [https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/spice/spice\\_what2](https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/spice/spice_what2)
- (4) EMC 村の民. スミスチャートとは. 2021.  
<https://engineer-climb.com/smith-chart/>
- (5) トランジスタ技術 2022年7月号. GQ 出版社. P111~P112

## 7 謝辞

本研究に協力していただいた令和5年度電気電子工学実験2の受講者に厚く御礼申し上げます。

---

(2024年6月25日受理)

