

## Analog Dialogue

# StudentZone—2019年10月 電圧に依存するPN 接合容量

著者: Doug Mercer、Antoniu Miclaus

#### 目的

今回の実習では、逆バイアスを印加した状態でPN接合の容量値 を測定します。バイアス電圧を変化させて、その依存性を確認し ます。

### 背景

#### PN接合の容量

PN接合に逆バイアス電圧V」をかけると、境界部から離れる方向 に電荷が再分布して空乏層が形成されます。空乏層は、コンデン サの2枚の電極板に挟まれる絶縁体のように機能します。図1で は、この空乏層の幅をWで表しています。Wの値は、印加する 電界と不純物のドーピング濃度に依存します。PN接合の容量は、 拡散容量と障壁容量という2つの成分に分けられます。逆バイ アスを印加した際には、自由キャリアの注入は生じません。した がって、拡散容量の値はゼロです。逆バイアス電圧、またはダイ オードのターンオン電圧(シリコン・ダイオードの場合は0.6V) よりも低い正のバイアス電圧を印加した場合には、障壁容量が主 な容量成分となります。障壁容量は、接合部の面積と不純物の ドーピング濃度に応じて、1pF未満から数百pFといった値をと ります。接合容量と印加するバイアス電圧の関係を、接合のC-V (容量-電圧)特性と呼びます。この実習では、様々なPN接合(ダ イオード)のC-V特性を測定してグラフを作成します。



#### 準備するもの

- ▶ アクティブ・ラーニング・モジュール [ADALM2000]
- ▶ ソルダーレス・ブレッドボード
- 抵抗:10kΩ(1個)
- ▶ コンデンサ:39pF (1 個)
- ▶ ダイオード:「1N4001」(1個)、「1N3064」(1個)、「1N914」 (1個)
- ▶ LED:赤色、黄色、緑色
- ▶ NPN トランジスタ:「2N3904」(1 個)
- ▶ PNP トランジスタ: [2N3906] (1 個)

#### ステップ1の手順

まず、図2に示すようなテスト用の回路を構成します。ソルダー レス・ブレッドボードを使って、この回路を図3のように実装し ます。ステップ1では、任意波形ジェネレータ(AWG)の出力 とオシロスコープの入力の間に、値が既知のコンデンサC1を接 続することにより、未知の容量Cmの値を測定します。オシロス コープの2つの負入力(1-と2-)は、いずれもグラウンドに接続 します。オシロスコープのチャンネル1の入力1+は、ブレッド ボードの1列を使用してAWG1の出力W1に接続します。オシ ロスコープのチャンネル2の入力2+は、W1が接続されている 列から8~10列離れた列に接続します。オシロスコープの入力 2+の隣の列からAWG1の列まではグラウンドに接続します。こ れは、AWG1とオシロスコープのチャンネル2の間の望ましくな い浮遊結合を最小限に抑えるためです。空中配線はシールドされ ていないので、W1と1+のワイヤは、2+のワイヤからできるだ け離すようにしてください。



図 3. ステップ1用の実装。 ステップ1では C<sub>m</sub>の値を測定します。

#### ハードウェアの設定

ソフトウェア・パッケージ「Scopy」のネットワーク・アナライ ザ機能を使用し、5kHz~10MHzにおけるゲイン(減衰量)と 周波数の関係をグラフとして取得します。オシロスコープのチャ ンネル1はフィルタの入力で、オシロスコープのチャンネル2は フィルタの出力です。AWGについては、オフセットを1V、振幅 を200mVに設定します。オフセットの値は、コンデンサCmの 測定を行う段階では重要ではありません。但し、ステップ2でダ イオードの測定を行う際には、このオフセットを逆バイアス電圧 として使用します。

垂直方向のスケールを1dBから-50dBの範囲に設定します(図 4)。掃引を1回実行し、得られたデータをCSVファイルとしてエ クスポートします。測定結果を見ると、非常に低い周波数領域で 大きく減衰するハイパス特性を示すことに気づくはずです。その 領域では、コンデンサのインピーダンスはR1のインピーダンス と比べて大きくなります。一方、周波数が高い領域には、ゲイン が比較的平坦な部分が存在します。そこでは、C1、Cmで構成さ れる分圧器のインピーダンスは、R1のインピーダンスよりもはる かに小さくなります。



図4. Scopyで表示した測定結果

#### ステップ1の残りの手順

C1としては、C<sub>stray</sub>よりも十分に大きい値のものを選択しました。 それにより、計算を行う際、C<sub>stray</sub>の値を無視しても、C<sub>m</sub>の値と して、実際の値に非常に近い結果が得られるようになります。

保存したデータのファイルをスプレッドシート・ソフトで開いて ください。データの末尾近くまでスクロールし、減衰レベルが基 本的に平坦になる部分の周波数を確認します(1MHz以上)。そ の周波数における振幅値をG<sub>HF1</sub>(単位はdB)として書き留めて おいてください。G<sub>HF1</sub>とC1が既知なので、以下の式によってC<sub>m</sub> を計算することができます。

$$G_{HFI} = 20\log \times \frac{Cl}{(C_m + Cl)} \tag{1}$$

計算によって得られたC<sub>m</sub>の値も書き留めておいてください。この値は、ステップ2で様々なダイオードのPN接合容量を算出する際に必要になります。

#### ステップ2の手順

次に、アナログ・パーツ・キット「ADALP2000」に含まれてい る様々なダイオードについて、逆バイアスをかけた際の容量値を 測定します。そのために、図5に示すテスト用の回路を構成して ください。ステップ1のC1をD1 (1N4001) に置き換えるだけ です。ソルダーレス・ブレッドボードでは、図6のように実装し ます。AWG1の正のオフセット電圧によってダイオードに逆バ イアスがかかるよう、ダイオードは正しい向きに接続してくださ い。



図6. ステップ2用の実装。 ステップ2ではダイオードの容量値を測定します。

#### ハードウェアの設定

引き続き、Scopyのネットワーク・アナライザ機能を使用して測定を行います。表1に示した各DCオフセット電圧(AWG1で設定)を印加した状態で、5kHz~10MHzにおけるゲイン(減衰量)と周波数のグラフを取得します(図7)。掃引によって得られたデータは、それぞれ別のCSVファイルとしてエクスポートしてください。

#### 表1. 容量値の測定結果





図7.オフセットが0Vの場合の測定結果

#### ステップ2の残りの手順

表1に、各オフセット電圧に対するG<sub>HF</sub>の値を記入し、ステップ 1で示した式と算出したCmの値を使ってC<sub>diode</sub>の値を計算します。

続いて、ダイオードを1N4001から1N3064に変更し、一連の測定を繰り返します。別の表に、測定によって得られた値と C<sub>diode</sub>の計算値を記入してください。1N3064と1N4001とでは、値に違いはあるでしょうか。測定するダイオードごとに、ダイオードの容量と逆バイアス電圧の関係を表すグラフを必ず添えてください。

次に、1N3064を1N914に置き換えます。ここまでと同様に一連の測定を行い、別の表に、測定によって得られた値とC<sub>diode</sub>の計算値を記入します。1N914の値は、1N4001や1N3064の値と比べてどうなりますか。1N914の容量値は、他の2種類のダイオードよりもかなり小さかったはずです。C<sub>stray</sub>と同じくらい小さくなることもあります。

#### 追加の演習

当然のことながら、LED(発光ダイオード)にもPN接合が存在 します。シリコン以外の素材で作られているため、ターンオン電 圧が通常のダイオードとはかなり異なります。しかし、空乏層も 容量値も存在します。追加の演習として、ADALP2000に含まれ ている赤色、黄色、緑色の各LEDについて、ダイオードと同様の 方法で容量値の測定を行ってください。テスト用の回路では、逆 バイアスがかかるように正しい向きでLEDを接続する必要があり ます。逆向きに接続すると、実験作業の最中にLEDが点灯するか もしれません。

#### 問題

ステップ1で示した式、C1の値、図4のグラフを使用して、オシロスコープの入力容量Cmの値を計算しなさい。

答えはStudentZoneで確認できます。



#### 著者について

Doug Mercer (doug.mercer@analog.com) は、1977年にレンセラー工科大学で電気電子工学の学士号 を取得しました。同年にアナログ・デバイセズに入社して以来、直接または間接的に30種以上のデータ・ コンバータ製品の開発に携わりました。また、13件の特許を保有しています。1995年にはアナログ・デバ イセズのフェローに任命されました。2009年にフルタイム勤務からは退きましたが、名誉フェローとして 仕事を続けており、Active Learning Programにもかかわっています。2016年に、レンセラー工科大学 電 気/コンピュータ/システム・エンジニアリング学部のEngineer in Residence に指名されました。



#### 著者について

Antoniu Miclaus (antoniu.miclaus@analog.com) は、アナログ・デバイセズのシステム・アプリケーション・エンジニアです。アカデミック・プログラムや、Circuits from the Lab<sup>®</sup>向けの組み込みソフトウェア、 QAプロセス・マネジメントなどに携わっています。2017年2月から、ルーマニアのクルジュナポカで勤務 しています。現在、バベシュボヨイ大学においてソフトウェア・エンジニアリングに関する修士課程にも取り組んでいます。また、クルジュナポカ技術大学で電子工学と通信工学の学士号を取得しています。



アナログ・デバイセズ株式会社

©2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。 Ahead of What's Possibleはアナログ・デバイセズの商標です。 お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、analog. com/jp/contact をご覧ください。

オンラインサポートコミュニティEngineerZoneでは、アナ ログ・デバイセズのエキスパートへの質問、FAQの閲覧がで きます。