

# モデル4200-SCS半導体評価システムを使ったチャージポンピング測定

## イントロダクション

チャージポンピング測定はMOS構造の半導体-絶縁膜界面評価手法としてよく知られており、絶縁膜界面のトラップ密度や断面の平均捕獲量を含めたデバイスの品質や劣化に関する重要な情報を得ることができる。その測定はゲート電極へパルス電圧を印加し同時に基板のDC電流を測定する手法であるため、パルスジェネレーターと高感度なDC電流計が必要となる。

モデル4200-SCS半導体特性評価システムは測定を自動的に実行しその結果を解析するソフトウェアと共に高感度測定に必要なハードウェアを搭載しているため、このチャージポンピング測定の完全なソリューションを提供することができる。さらにこのシステムにはパルスベース電圧スイープやパルス振幅スイープのような一般的に使用されるチャージポンピング試験のプログラムが標準的に提供される。このアプリケーションノートではモデル4200SCSのオプションであるモデル4225-PMU超高速IVモジュールもしくはモデル4220-PGUパルスジェネレータユニットを使用したチャージポンピング測定の方法を解説する。

## チャージポンピング試験の概要

図1はチャージポンピング測定回路のダイアグラムである。基本的にMOSFETのゲート電極にはトランジスタを蓄積状態から反転状態に繰り返し切り替えるためのパルスジェネレーターが接続されている。そのゲートにパルスが印加されている間パルスの立上り、立下りのタイミングで多数キャリアと少数キャリアの再結合が起こり、その結果通常のドレイン-ソース間の電流と反対方向の電流が発生する。この電流はチャージポンピング電流と呼ばれ、MOSFETのバルクもしくは基板電極に高感度の電流計を接続することにより測定できる。

これまで幾つかのチャージポンピング測定手法が開発されてきたが、トランジスタのソースとドレインを共に接地するかわずかなバイアスを印加し、ゲート電極に固定した振幅や立上り/立下り時間や周波数の電圧パルスを与えながら基板電流を測定するという手法が基本となっている。その電圧パルスは振幅を一定した状態でベース電圧をスイープしたり、ベース電圧を一定に保ち振幅をスイープする。

その”振幅固定/ベース電圧スイープ”は振幅やパルス周期(パルス幅)を固定した状態でベース電圧値を反転から蓄積状態にスイープさせる。その波形とベース電圧に対するチャージポンピング電流値の変化を示したカーブを図2に示す。そのデータから次の式を用いて界面トラップ密度を導出することができる。

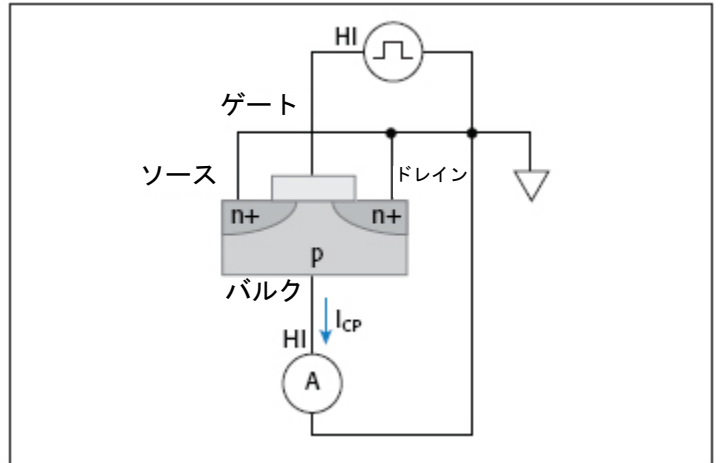


図1. チャージポンピング測定の基本回路

$$N_{it} = \frac{I_{CP}}{qfA}$$

ここで、

- $N_{it}$  = 界面トラップ電荷密度( $\text{cm}^{-2}$ )
- $I_{CP}$  = チャージポンピング電流(A)
- $f$  = 試験周波数(Hz)
- $q$  = 電荷,  $1.6022 \times 10^{-19}$  C
- $A$  = チャンネル面積( $\text{cm}^2$ )

さらにバンドの曲がりに対する界面トラップ密度の関数が次式で得られる。

$$D_{it} = \frac{I_{CP}}{qfA\Delta E}$$

ここで、

- $N_{it}$  = 界面トラップ電荷密度( $\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ )
- $I_{CP}$  = チャージポンピング電流(A)
- $f$  = 試験周波数(Hz)
- $q$  = 電荷,  $1.6022 \times 10^{-19}$  C
- $A$  = チャンネル面積( $\text{cm}^2$ )
- $\Delta E$  = 反転フェルミレベルと蓄積フェルミレベルの差[1]

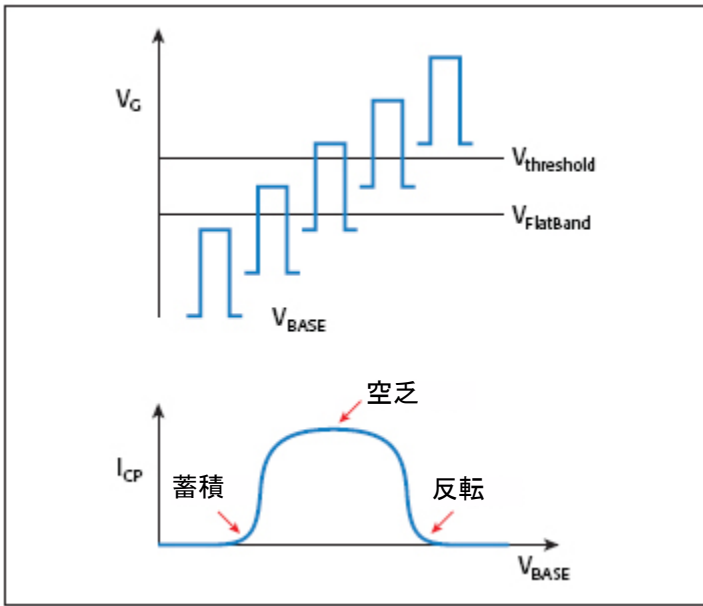


図2. 固定振幅/ベース電圧スイープのパルス波形と対応するチャージポンピング電流カーブ

さらに“ベース電圧固定/振幅スイープ”もチャージポンピング電流を求めるためによく用いられる手法である。その手法ではベース電圧を蓄積状態で固定した状態でパルスの振幅を反転状態へ変化させていく。図3に示したように、パルスの振幅( $V_{AMP}$ )が大きくなるに従いチャージポンピング電流値が飽和して行く。

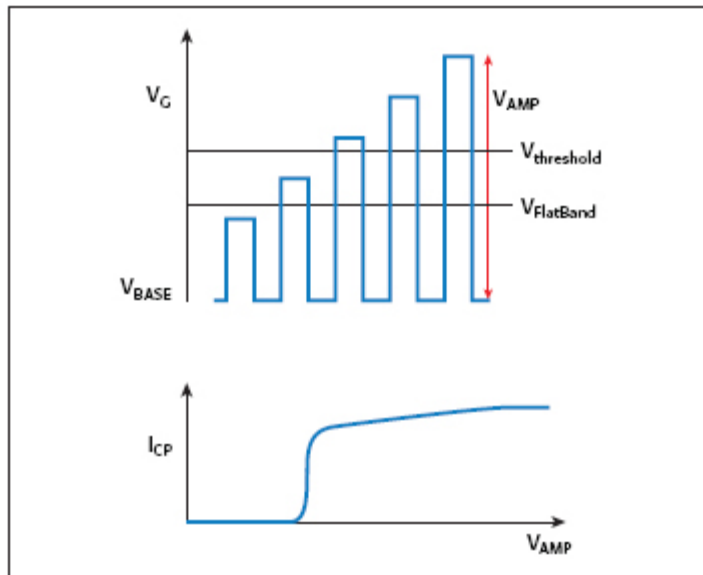


図3. ベース電圧固定/振幅スイープのパルス波形と対応するチャージポンピング電流カーブ

それら”振幅固定/ベース電圧スイープ”や“ベース電圧固定/振幅スイープ”以外にもパルスの立上り/立下り時間を変化させたり、チャージポンピング電流の周波数依存性を測定する手法も用いられることがある。

## 機器の構成

図4にモデル4200SCSを使ったチャージポンピング測定の基本的な回路ダイアグラムを示す。このアプリケーションに対し、モデル4200SCSにはモデル4220-PGU(パルスジェネレーターユニット)もしくはモデル4225-PMU(超高速IVモジュール)のいずれか一つないし二つのモデル4200-SMU(ソースメジャーユニット)とモデル4200-PA(プリアンプ)が必要となる。

対象のデバイスを反転、蓄積と変化させるために必要なパルス電圧を与えるため、4225-PMUもしくは4220-PGUのパルスジェネレータをMOSFETのゲート電極に接続する。そしてチャージポンピング法に基づきPMUもしくはPGUで振幅スイープ、ベース電圧スイープ、立上り/立下り時間の変化や周波数スイープを行う。そしてテスト周波数は通常キロHz～メガHzレンジが使用される。

SMU1は基板電極に接続され基板電流を測定する。このチャージポンピング電流( $I_{CP}$ )は場合によってはナノもしくはピコアンペアレンジになるため、モデル4200-PAのプリアンプが必要になる。

MOSFETのソース及びドレイン電極はSMU2に共通接続されわずかな反転電圧( $V_r$ )を与える。もし $V_r=0V$ の場合、ソース/ドレイン端子はSMU2の代わりにGNDUに接続することも可能である。測定の際発振やノイズの影響を回避するため、全てのSMUと4225-PMUもしくは4220-PMUのLo端子をできる限りデバイスに近いところで相互接続することが重要となる。SMUのLo端子は3軸コネクタの外部シールド、PMUもしくはPGUのLo端子はSMAケーブルの外部シールドになる。

微小電流測定における静電気干渉によるノイズを最小化するため、デバイスをSMUのLo端子と接続されシールドされている金属箱の中に設置する。モデル4200SCSでの微小電流測定を行うための更なる情報に関しては#2959アプリケーションノート“Optimizing Low Current Measurement with the Model 4200-SCS Semiconductor Characterization System”を参照。

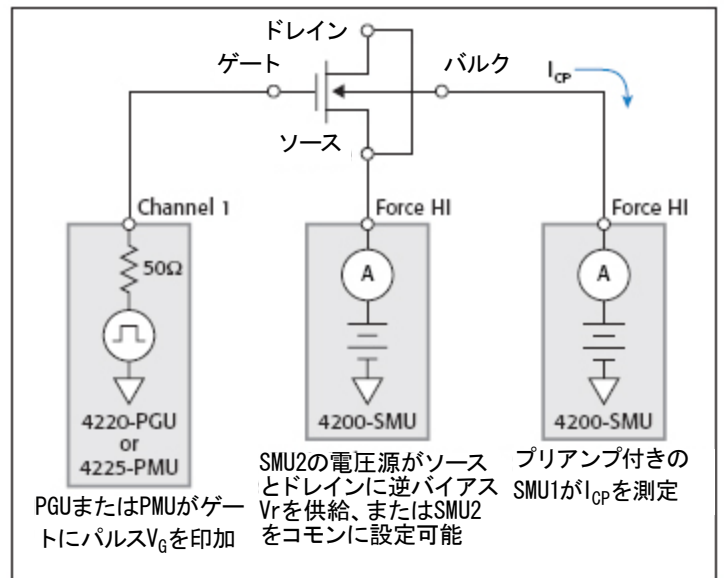


図4. チャージポンピング測定のための4200-SCS型の構成

## KITE ソフトウェアを使用したチャージポンピング測定自動化

モデル4200SCSには一般的によく使用されるチャージポンピング測定手法のテストライブラリーを含んだプロジェクトがC:\S4200\kiuser\Projects\\_Pulseのフォルダに存在する。そのプロジェクトを開くと図5に示したプロジェクトナビゲーターにそれぞれのテストが表示される。表1にそれぞれのテストとその簡単な解説を示す。

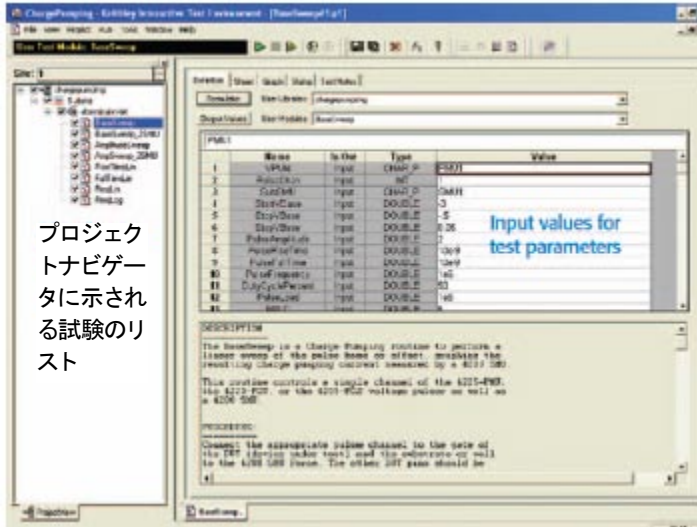


図5. チャージポンピングのプロジェクト

表1. チャージポンピングのユーザテストモジュール (UTM)

ユーザテストモジュール	内容
BaseSweep	パルス振幅を一定に保って、波形のベース電圧がスイープされる。チャージポンピング電流が測定されベース電圧の関数としてグラフ化される。ソース/ドレイン端子は一緒にグラウンドされる。
BaseSweep_2SMU	BaseSweep試験と同じだが、2つ目のSMUが追加されソース/ドレイン端子にDC電圧バイアスを印加する点が違う。
AmplitudeSweep	バイアス電圧を一定に保ってパルス振幅がスイープされる。チャージポンピング電流が測定されパルス振幅電圧の関数としてグラフ化される。ソース/ドレイン端子は一緒にグラウンドされる。
AmplitudeSweep_2SMU	AmplitudeSweep試験と同じだが、2つ目のSMUが追加されソース/ドレイン端子にDC電圧バイアスを印加する点が違う。
RiseTimeLin	パルスの立ち上がり遷移時間のリアススイープを実行する。ICPが測定され立ち上がり時間の関数としてグラフ化される。ソース/ドレイン端子は一緒にグラウンドされる。
FallTimeLin	パルスの立下り遷移時間のリアススイープを実行する。ICPが測定され立下り時間の関数としてグラフ化される。ソース/ドレイン端子は一緒にグラウンドされる。
FreqLin	振幅、オフセット電圧、立ち上がり/立下り時間を一定にして、ICPが測定され試験周波数のリアススイープの関数としてグラフ化される。ソース/ドレイン端子は一緒にグラウンドされる。
FreqLog	振幅、オフセット電圧、立ち上がり/立下り時間を一定にして、ICPが測定され試験周波数のログスイープの関数としてグラフ化される。ソース/ドレイン端子は一緒にグラウンドされる。

ユーザーは実行したいテストを選択し、定義タブにおいて各テストパラメータに対する適切な値を入力する。そのパラメータはそれぞれのテストにより異なるが、主にパルス電圧値、スイープ値、立上り/立下り時間、テスト周波数、デューティ比等の値を入力する。それらのテストパラメータを含む各テストの詳細についてはモデル4200SCSコンプリート・リファレンスマニュアルの第16章に記載されている。

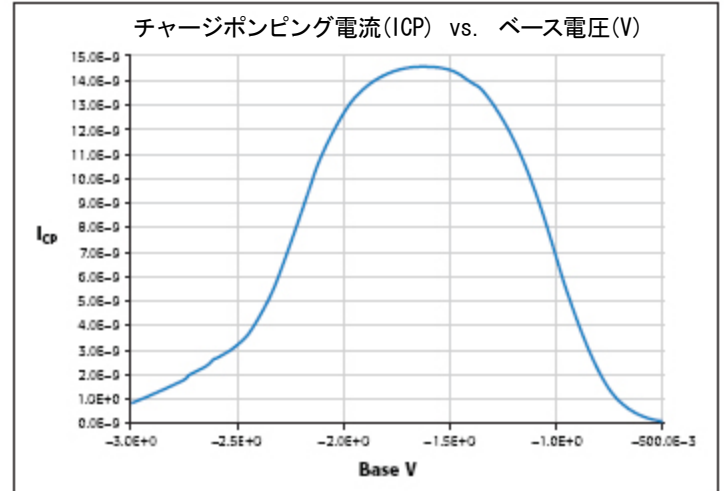


図6. BaseSweepユーザテストモジュールの試験結果

ハードウェアとソフトウェアを設定した後、スクリーン上のランボタンをクリックすることにより測定が実行される。そして測定結果がグラフタブ中にグラフ表示され、データはデータシートに表示される。そのシートタブでは記録されたデータの操作が行え、.xls、.txt、もしくは.csvファイル形式で保存することができる。

ベーススイープのテストモジュールにて取得したグラフを図6に示す。これはベース電圧値に対するチャージポンピング電流の関係を表す。

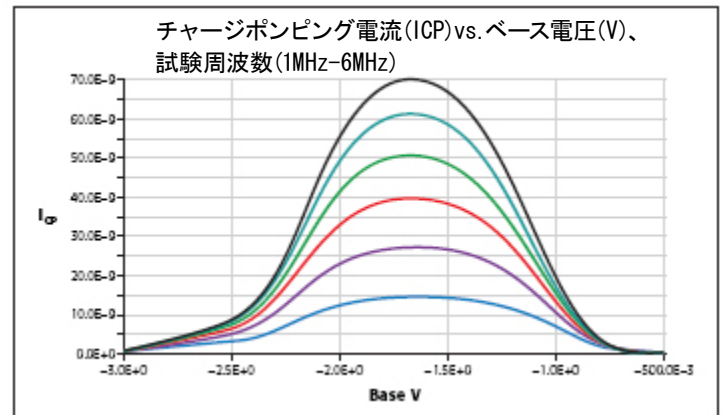


図7. 複数の試験周波数でのチャージポンピング電流の測定結果

このユーザーテストモジュールに新しいパラメータを入力し測定を繰り返すことができる。それを行う一つの方法としてスクリーン上のAppend Runボタンがある。それにより一つのグラフに複数のテスト結果を表示させることができる。図7にテスト周波数を1MHzから6MHzまで増やした結果を示す。各データがグラフにアペンドされ新たなワークシートがAppend Run毎にシートタブに追加される。

チャージポンピング測定の一般的なもう一つの試験に振幅スイープがある。これはベース電圧を一定に保った状態でパルスの振幅をスイープしながらチャージポンピング電流を測定する。その結果を図8に示す。

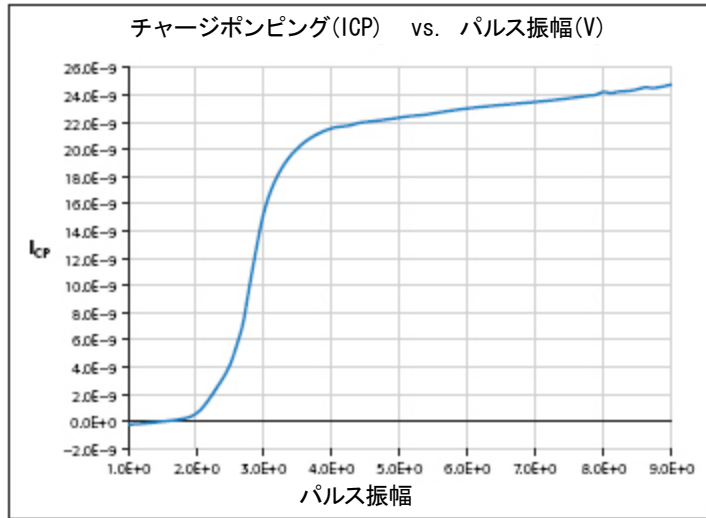


図8. パルス振幅の関数として示したチャージポンピング電流

ソフトウェアにあらかじめ搭載されている関数式を用いることにより界面単位密度を導き出すような解析を行うことができる。その関数を使用するためにはテスト設定画面の定義タブ上のフォーミュレーターボタンをクリックし、図9に示したように $D_{it}$ の式を入力することにより $D_{it}$ の値をグラフに表示することができる。

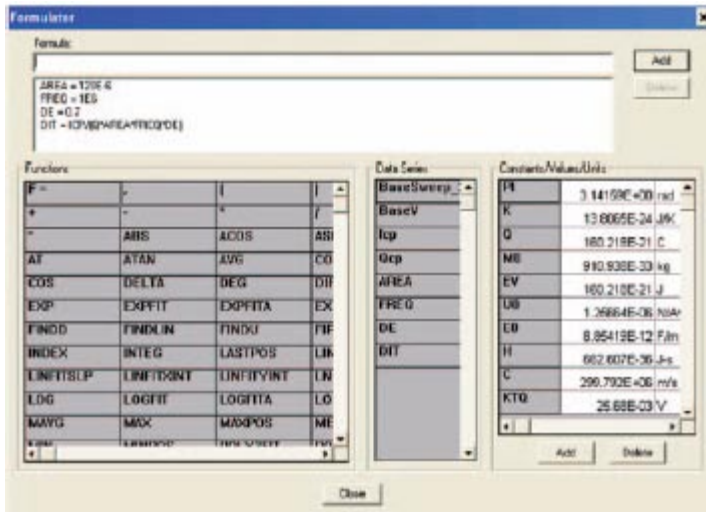


図9. フォーミュレーター機能を使って式を入力

Specifications are subject to change without notice.

All Keithley trademarks and trade names are the property of Keithley Instruments, Inc.

All other trademarks and trade names are the property of their respective companies.



ケースレーインストルメンツ株式会社 本社：〒105-0022 東京都港区海岸1-11-1 ニューピア竹芝ノースタワー13F TEL:03-5733-7555 FAX:03-5733-7556  
 大阪オフィス：〒564-0052 大阪市吹田市広芝町9番 第11マイダビル TEL:06-6190-0014 FAX:06-6190-0017  
 Web site : www.keithley.jp • Email : info.jp@keithley.com

## 結論

モデル4200SCSはゲート絶縁膜の界面の特性評価を行うための理想的なツールである。内蔵されたモデル4225-PMUもしくはモデル4220-PGUのようなパルスジェネレータとKTEIソフトウェアにより、ユーザーはプログラミング作業を行うことなく測定と解析を簡素化することができる。さらにモデル4225-PMUを搭載することにより、モデル4200-SCSはここで示したチャージポンピング測定を含めデバイスの一般的なDC及び超高速IV特性評価に必要な多様な測定を行うための強力なツールになる。この4225-PMUは単なるパルスジェネレータにとどまらず、電圧と電流の測定機能を持っているため、過渡応答電流電圧(波形キャプチャー)測定のアプリケーションに対しても活用できる。

## 参考文献

1.G.Groeseneken, H.E.Meas, N.Beltran, and R.T.DeKeersmaecker, "A Reliable Approach to Charge-Pumping Measurements in MOS Transistors," IEEE Trans. Electron. Dev., Vol.ED-31, pp.42-53, 1984.