

Keysight PD1500ダイナミック・ パワー・デバイス・アナライザ／ ダブル・パルス・テスター

再生可能エネルギーや電気自動車(EV)などの分野での成功の鍵を握るのは、長年に渡って使用されてきた従来のテクノロジーを上回る性能です。開発者は、競争力を高めるために、性能と効率を大きく引き上げる新しい方法を模索しています。



ワイドバンドギャップ
半導体の
特性測定を
再現性高く実現

はじめに

パワー・コンバータは、交通、再生可能エネルギー、工業市場において電化を可能にする重要なコンポーネントです。パワー・コンバータの性能向上というニーズに対応するために、シリコンカーバイド(SiC)、窒化ガリウム(GaN)などの新しいワイドバンドギャップ(WBG)半導体テクノロジーが商業化されています。WBG半導体は、速度（従来のデザインに比べて10倍から100倍）、高電圧、高熱時の動作などの点において飛躍的な進化を遂げており、効率の向上、サイズの小型化、コストの低下をもたらします。

しかしながら、WBG半導体の特性評価を行う際には多くの新しい問題があることから、高性能パワー・コンバータのデザインは困難であることがわかっています。こうした問題によって、半導体メーカーのイノベーションやエンジニアによる新しいコンバータのデザインが滞ることになります。

WBG半導体の特性評価には、自作テストシステムが主に使用されてきました。これまで、このようなシステムを構築することが必要とされてきたのは、商用のテストシステムが簡単に手に入らなかったことが一因です。残念ながら、自作のテスターでは、信頼性および再現性が高い測定結果を得ることは困難です。測定結果の信頼性が低いと、パワー・コンバータのデザイナーは半導体のデータシートの値と自分の回路の測定結果を相関させる際に新たな問題を抱えることになります。

WBG半導体の特性評価で高い一貫性と信頼性を可能にするために、キーサイトはPD1500Aダイナミック・パワー・デバイス・アナライザ・プラットフォームを開発しました。このプラットフォームは、半導体メーカーや、エネルギー業界、電気自動車(EV)業界のデザイナーとの密接な連携の下に開発されており、ダブル・パルス・テスト(DPT)手法を採用しています。

PD1500Aによる、製品の市場投入時間の短縮

PD1500Aはキーサイト製の測定ソリューションとして、WBG半導体に対し信頼性と再現性の高い測定を可能にします。また、このシステムではユーザーと測定ハードウェアの安全が確保されます。

さらに、キーサイトの測定技術における専門知識に基づいて、再現性のあるDPTの結果が確実に得られるようになっています。イノベーションの例としては、高周波測定（GHzレンジ）、低レベルの漏れ（フェムトアンペアレンジ）、パルスパワー（1,500 Aの電流、10 μ sの分解能）などが挙げられます。キーサイト独自の視点から、パワー半導体のダイナミック特性評価で直面する問題を解消するお手伝いをします。

PD1500Aは、プローブ補正、オフセット調整、スキュー補正、コモン・モード・ノイズ除去などの標準的な測定手法を搭載しています。これらの手法は画期的な測定トポロジーとレイアウトで活用されます。また、このシステムのために特別に開発された半自動の校正ルーチン(AutoCal)により、システムの利得とオフセット誤差が補正できます。それだけでなく、ディエンベディング手法を用いて、電流シャントの誘導性寄生成分も補正できます。

概要：確立された測定方法と新しい測定方法

SiCやGaNなどのWBGデバイスを十分に特性評価するには、静的な測定と動的な測定の両方が必要となります。キーサイトのB1505A/B1506Aパワー・デバイス・アナライザは静的測定に優れています。PD1500Aは十分な柔軟性を備えており、さまざまな動的測定が可能だけでなく、確立が進むJEDEC規格の進化にあわせて対応することができます。

静的測定：パワー・デバイスの静的特性を把握するために、通常は以下のパラメーターが使用されます。

- 出力特性
- オン抵抗
- しきい値電圧
- 相互コンダクタンス
- ジャンクション、入力、出力、逆伝達容量
- ブレークダウン電圧
- ゲート電荷

静的測定：パワー・デバイス・アナライザ

キーサイトは静的測定において業界の事実上のリーダーであり、そのソリューションとしてB1505A/B1506Aパワー・デバイス・アナライザが使われています。

B1505Aは、新しい半導体デバイスを製作する開発者にとって必要な幅広い測定機能を備えています。一方B1506Aは、製品デザイナーがパワーモジュールで使用する半導体デバイスを評価する際に一般的に必要な、主要なテスト関数セットを搭載しています。

www.keysight.com/find/B1505A

www.keysight.com/find/B1506A

動的測定：JEDECが継続してWBGデバイスの動的テストを定義している中で、標準化されたいくつかのテストの提供が始まっています。DPTは以下の主要な性能パラメーターを判断します。

- ターンオン特性
- ターンオフ特性
- 動的なオン抵抗
- 動的な電流と電圧
- スイッチング特性
- 逆回復
- ゲート電荷
- 入出力特性

耐久性テスト：WBGデバイスは高電圧と高温で動作するため、耐久性の評価が必要です。短絡テストやアバランシェテストで判断できる主要な測定には以下のものがあります。

- 短絡導通時間
- 短絡エネルギー
- アバランシェエネルギー

測定ソリューションの詳細

本書の残りのセクションでは、最も重要な製品仕様、関連する測定手法などを含め、キーサイト測定ソリューションの詳細を取り上げます。

ダイナミック・パワー・コンバーターのデザイン上の課題

半導体チームやパワー・エンジニアリング・チームは危うい状況にあります。変化し続けるテクノロジーへの対応や、危険なテスト環境で低信頼性の測定問題に取り組むことが求められる一方で、市場は信頼性の高い製品の迅速な開発と出荷を要求しています。商用の特性評価ソリューションがなかったことから、大半のエンジニアリングチームは独自のソリューション開発を強いられてきました。エンジニアリングチームが抱える主な課題には以下のようなものがあります。

- 効率の向上のため、高周波数スイッチング・コンバータが必要となっています。パワー半導体の特性評価や、パワー・コンバータのデザインにおける半導体のモデル化やシミュレーションで、高周波数エネルギーを考慮に入れることが重要です。このように複雑さが増すことが従来のパワーデザイナーにとって問題となっています。
- 周波数とパワーの増大が測定の信頼性に影響しています。測定された信号がデバイスの特性なのか、それとも測定の設定から派生した寄生特性なのかを見極めるのが困難なことがよくあります。
- 高電圧(> 1000 V)や高電流(> 100 A)での操作は、テスト環境の危険性が高まることにつながります。デザインエンジニアとテストエンジニアは、致命的なパワーレベルで作業する際には特に注意することが必要です。
- WBG半導体を製作する工程は依然として進化の過程にあり、Si半導体のように十分な研究がなされていない状態です。そのため、信頼性が証明されていないことから、多くのデザイナーにとって自分のデザインにWBGデバイスを取り入れることが難しくなっています。とは言うものの、再生可能エネルギーやEVなどのミッションクリティカルなアプリケーションに、新しいデバイスを躊躇することなく使用するデザイナーもいます。
- 特性評価とテスト規格はまだ策定中ですが、まもなくWBGデバイスに共通の方法を使用できるようになります。



JC-70 Wide Bandgap Power Electronic Conversion Semiconductors委員会

JEDECは、パワー半導体業界にWBG規格を提供する必要性を認識しました。

そこで、2017年9月に、GaN JC-70.1とSiC JC-70.2のためのJC-70 Wide Bandgap Power Electronic Conversion Semiconductors委員会が設立されました。

それぞれのセクションには3つのタスクグループがあり、信頼性と品質保証の手順、データシート要素とパラメーター、テストと特性評価方法に焦点を絞って作業を行っています。キーサイトはこのような規格の策定に積極的に参加しています。

前述の問題が要因となって、WBGデバイスのメーカーは自社のデバイスを一貫した方法で特性評価することに苦労しています。データシートは、特定のアプリケーションの範囲よりも狭義の仕様（例えば、温度）を提供することが多々あります。このような仕様は代表値であり、保証されたものではありません。そのため、パワー・コンバータのデザイナーは、各自で半導体の特性を評価して、メーカーが提供する仕様を補うことになります。以上のことから、パワー半導体とコンバータデザインの特性評価、モデル化、シミュレーションのために、新しいアプローチが必要なことは明らかです。

パワーデバイスのダイナミック特性評価

JEDECのさまざまな委員会がWBGデバイス特性の標準化に対応するにつれて、DPT手法がパワー半導体の性能パラメーター判断の標準になってきました。

DPTの仕組み

測定プロセスは以下のように進められます。

- S1を閉じ、C1（DCリンクキャパシタ）とC2（ブロックキャパシタ）に高電圧でチャージします。
- S1を開き、T2をオンにします。C1からインダクターLにチャージします。パルス長を調整して、 I_b しきい値に合わせます。
- T2をオフにし、T2のターンオフ特性を評価します。 I_b は、T1のフリーホイール・ボディ・ダイオードを通じて維持されます。
- T2を再度オンにし、T2のターンオン特性を評価します。

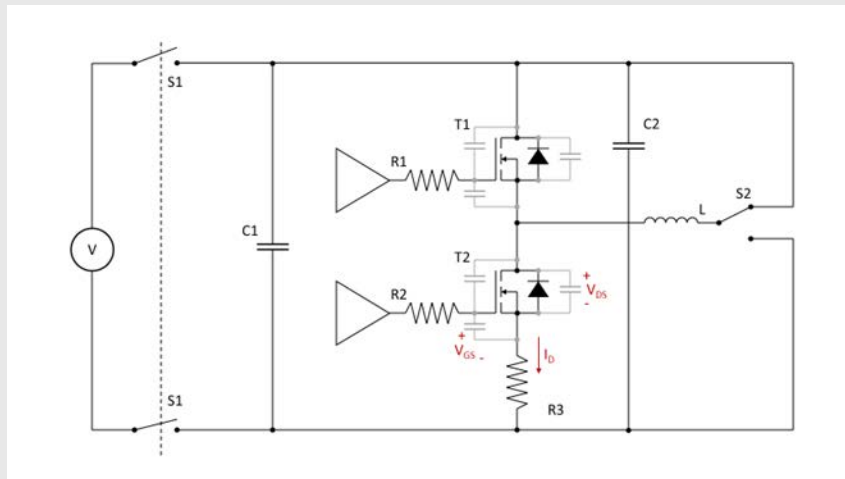


図1 - 基本的なDPT回路

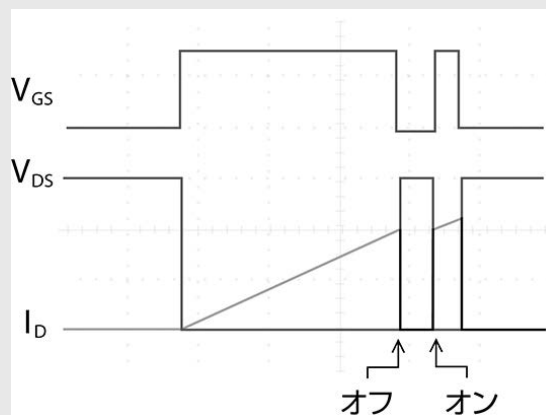


図2 - 基本的なDPT波形

DPT パラメーター

グループ	パラメーター	説明	関連する規格
ターンオン特性	$t_{d(on)}$, t_r , t_{on} , $e_{(on)}$, dv/dt , di/dt	トランジスタがオンになるスピード、最大の di/dt と dv/dt 、その結果としてのエネルギー損失を測定します。スイッチング損失の特性評価に役立ちます。	FET - IEC 60747-9 IGBT - 60747-8
ターンオフ特性	$t_{d(off)}$, t_f , t_{off} , $e_{(off)}$, dv/dt , di/dt	トランジスタがオフになるスピード、最大の di/dt と dv/dt 、その結果としてのエネルギー損失を測定します。スイッチング損失の特性評価に役立ちます。	FET - IEC 60747-9 IGBT - 60747-8
スイッチング特性	I_d vs. t , V_{ds} vs. t , V_{gs} vs. t , I_g vs. t , Clamped V_{ds} vs. t , e vs. t , I_d vs. V_{ds} (スイッチング軌跡)	これらのタイムベースのパラメーターは、オシロスコープから直接取得される波形です。 I_d vs. V_{ds} (スイッチング点) は波形から導出されます。	
逆回復	t_{rr} , Q_{rr} , E_{rr} , I_{rr} , I_d vs. t	縦型FETでのボディダイオードの逆回復の特性評価。トランジスタのオン/オフスピードに関する追加のタイミング情報を提供します。	IEC 60747-8
ゲート電荷	V_g vs. Q_g , ($Q_{gs(th)}$, $Q_{gs(pl)}$, Q_{gd})	ゲートの電圧と電流は、ダブルパルスのターンオン動作中に測定されます。ゲートの電荷は異なるゲート電圧への変化の際に測定されます。このパラメーターは、トランジスタの駆動損失を判断するために使用されます。	IEC 60747-8 IEC 60474-9
入出力特性	I_d vs. V_g , I_d vs. V_d	半導体の基本的な入出力特性を導出します。	

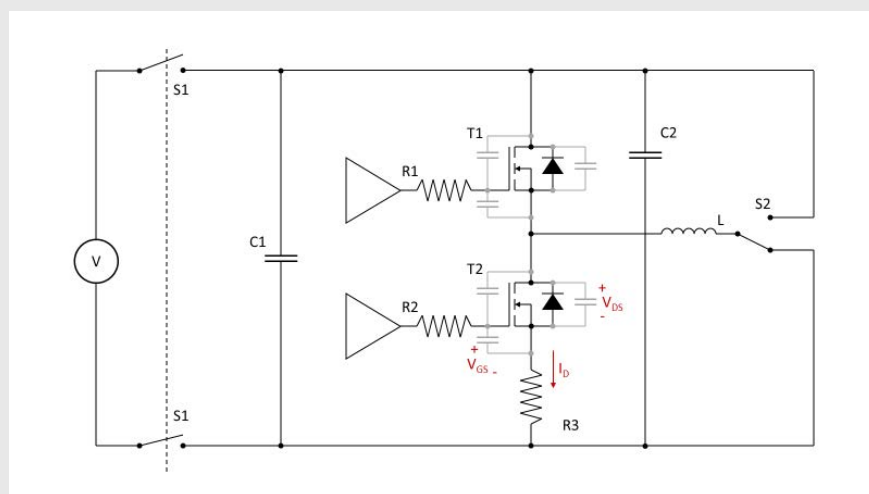


図3 - 基本的な逆回復テスト構成 (T2ボディダイオード - DUT)

逆回復もダブルパルスを用いて測定されますが、負荷インダクターはT2で切り替えられ、インダクターにチャージするためにT1が使用されます。T1がオフになると、T2のボディダイオードに流れます。T1が再度オンになると、T2の逆回復が測定できます。

再現性と信頼性の高い測定

一般的な測定方法

キーサイトのPD1500Aでは多くの一般的な測定方法を使用しています。プローブの減衰誤差の一部は、推奨どおりに、パッシブプローブを補正して、差動プローブのオフセットを調整することで除去されます。フィクスチャでDPT設定を行う際に、寄生キャパシタンスや寄生インダクタンスを最小限に抑えるための注意が払われています。それぞれの測定プローブのタイミングを調整させるために、スキュー補正機能も搭載されています。

自動校正

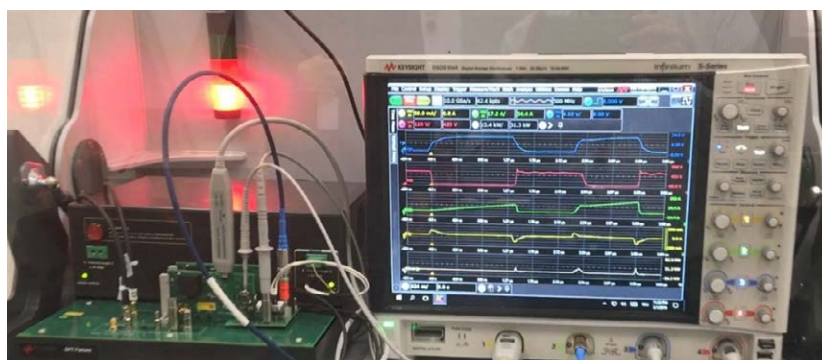
オシロスコープのチャンネルやプローブの利得とオフセットの誤差は、DPTの波形に誤差を生じることがよくあります。これは抽出されるパラメーターに影響を及ぼします。PD1500Aは自動校正機能を搭載しており、既知の良好な内部システム電圧基準を使用して、オシロスコープの各チャンネルの測定や特性評価を行います。利得とオフセットの誤差は補正され、より確度が高く、再現性のあるDPT波形を提供します。

ディエンベディング

電流のシャントの帯域幅が十分でなかったり、シャント間の性能に一貫性がないことはよくあります。キーサイトがネットワーク・アナライザを使って一般的な同軸シャントの特性評価を実施したところ、帯域幅には約25 MHz~300 MHzに至る大きな差があることがわかりました。この差は高速のWBGパワー・デバイスの動的テストに著しい影響を及ぼします。電流のディエンベディング手法を使用すると、 I_b 測定に使用された各電流シャントごとに伝達関数が測定されます。このデータはオシロスコープに入力され、オシロスコープは測定された出力信号にシャントの逆伝達関数を適用します。これにより、対象となる帯域幅全体で応答がフラットになります。この方法により I_b 測定の確度が向上し、DPTパラメーターのより正確な抽出が可能になります。

安全なテスト環境

パワー半導体をテストする際に、ユーザーの安全は非常に重要です。キーサイトは複数の安全機能をPD1500Aに搭載し、ユーザーの安全性を高めます。テスト環境は透明なフードでカバーされており、ユーザーが高電圧に接触することを防ぎます。42 Vを超える電圧が印加されると、フードがロックされ、赤いランプが点灯します。



さらに保護を強化するために、PD1500Aには緊急停止スイッチ(EMO)ボタンが設置されており、このボタンを押すと高電圧が遮断されます。

拡張可能なパワー・デバイス・プラットフォーム

PD1500の最初のリリースでは、まずSi/SiCディスクリートデバイス（最大1.2 kVと200 A）の性能テストをサポートします。PD1500Aはモジュール方式を念頭において開発されており、今後必要に応じて、また規格の発展に応じて、機能を拡張することが可能です。

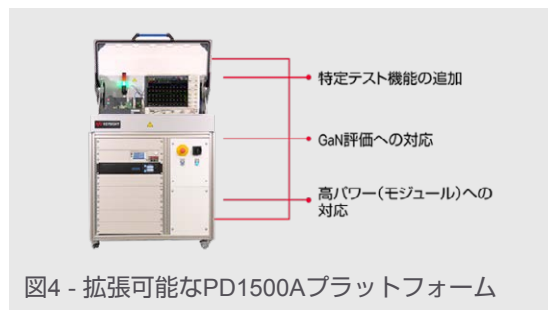


図4 - 拡張可能なPD1500Aプラットフォーム

特性テスト機能の追加

耐久性テスト（短絡とアバランシェ）が今後プラットフォームに追加される予定です。JEDEC JC-70規格の進化に並び、特性評価のテストスイートを引き続き強化していきます。

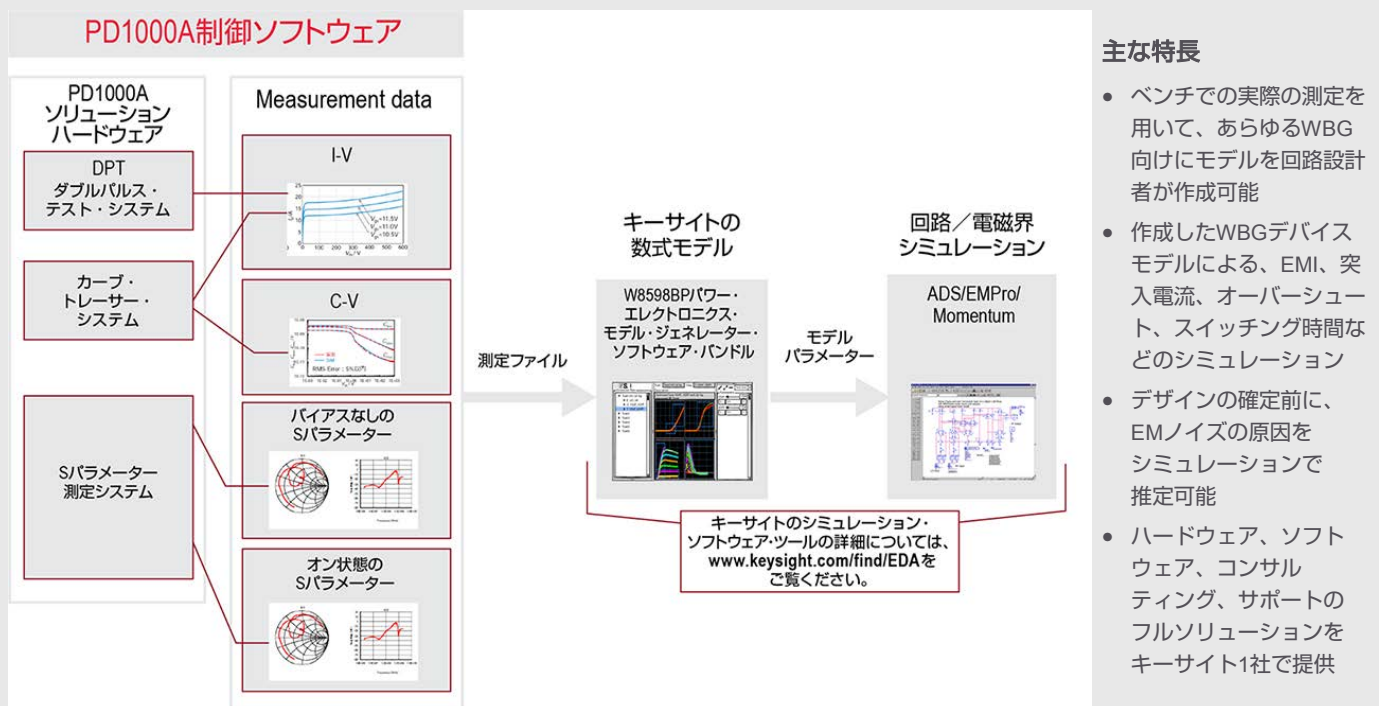
GaN評価への対応

スイッチング速度がより高速であるGaNでは、テストは特に難しいものになります。今後、GaNディスクリートデバイスのために、新しいフィクスチャを追加することでGaNの特性評価に対応していきます。

高パワー（モジュール）への対応

多くの開発者はパワー・コンバータのデザイン用にディスクリートデバイスではなく、モジュール（2x、4x、6xなど）を購入します。そこでEV市場などのパワー・コンバータ・アプリケーション向けに、高パワーのモジュールテスト機能を追加していく予定です。

PD1000Aアドバンスドモデリング用パワーデバイス測定システム



詳細については、『PD1000Aアドバンスドモデリング用パワーデバイス測定システム』
(5992-2700JAJP)ソリューション製品カタログを参照してください。

PD1500Aの概要と基本操作

PD1500Aはモジュール構成になっています。そのため、さまざまな種類のデバイス（SiC、IGBT、Si MOSFETが可能、GaNが今後追加される予定）に対応しており、異なる特性評価テストを異なるパワーレベルで行うことができるだけでなく、モジュールテストも可能です。最初のリリースでは、最大パワー1.2 kVと200 Aでの動作に対応し、Si/SiCパワー半導体のDPT特性評価とパラメーター抽出が行えます。

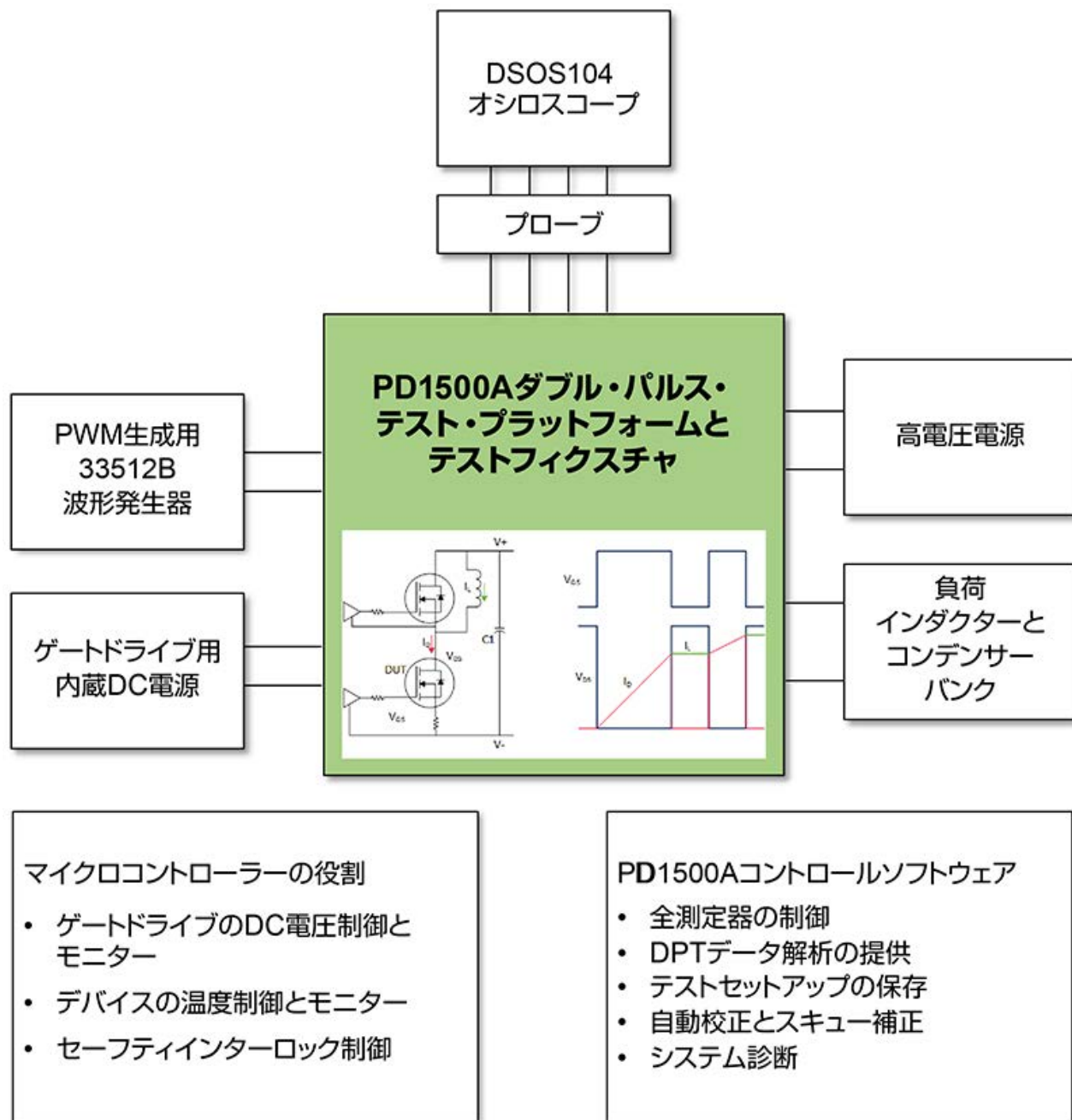


図6 - PD1500Aのブロック図

PD1500Aフィクスチャは、TO-247またはSMDパッケージのシステムへの接続を可能にします。スキュー補正と自動校正への接続も簡単です。高電流とモジュールのテストが含まれる場合、システムはDCリンクキャパシタと負荷インダクターに合わせて適切なサイズに拡張できます。高性能のGaNテストが含まれる場合、ゲートドライバー、クランプ回路、DCリンクキャパシタ、負荷インダクターは1枚のPCAに統合されます。



図7 - PD1500Aのフィクスチャ

温度テスト

PD1500Aでは室温から、最大150 °Cまでの温度範囲で特性評価テストが可能です。DUTに小型のヒーターを直接取り付けられることができるため、熱伝導を最大限に高められます。温度はK型熱電対によりモニターされ、内蔵マイクロコントローラーにより制御されます。モニター用に、テストフィクスチャにK型熱電対とジャックがもう1組提供されています。

PCによる設定、制御、解析

PD1500Aはシンプルで柔軟性のあるグラフィカル・ユーザー・インターフェースを使ってコントロールできます。このインターフェースでは、テスト設定、実行、DPT結果表示、データロギングなどを行えます。測定された生の波形と抽出されたパラメーターはローカルのデータベースに蓄積され、参照することができます。簡単な半自動シーケンスを以下に示します。

1. テストモジュールにDUTを取り付けます。
2. ヒーターと熱電対（使用する場合）を取り付けます。
3. テストモジュール（DUT、クランプ、ゲート・ドライバー・モジュール）をテストフィクスチャに接続します。
4. プローブをテストモジュールに接続します。
5. 制御ソフトウェアでテストパラメーターを設定します。
6. 「Start」を押します。
7. 逆回復ダイオードテストやその他のテストには、手順4と5を繰り返します。



図8 - PD1500Aユーザーインターフェースの例

仕様

測定パラメータ

テスト	パラメーター／特性	シンボル	
ダブル・パルス・テスト／クランプ	ターンオン遅延時間	td(on)	
	ターンオン立ち上がり時間	tr	
	ターンオン時間	ton	
	ターンオンエネルギー	e(on)	
	ターンオフ遅延時間	td(off)	
	ターンオフ立ち上がり時間	tf	
	ターンオフ時間	toff	
	ターンオフエネルギー	e(off)	
	di/dt	di/dt	
	dv/dt	dv/dt	
	オン抵抗	Rds(on)	
	スイッチング特性	スイッチング特性	Id vs. t
			Vds vs. t
			Vgs vs. t
			Ig vs. t
Clamped Vds vs. t			
スイッチング軌跡	スイッチング軌跡	e vs. t	
		Id vs Vds	
逆回復	逆回復時間	trr	
	逆回復電荷	Qrr	
	逆回復エネルギー	Err	
	最大逆回復電流	Irr	
	逆回復電流の特性	Id vs. t	
ゲート電荷	総ゲート電荷	Qg	
	しきい値ゲート電荷	Qgs(th)	
	プラトーゲート電荷	Qgs(pl)	
	ゲートドレイン電荷	Qgd	
	ゲート電荷曲線	Vgs vs. t	
複数テスト	入出力特性	Id vs. Vd	

備考：IEC 60474とJESD24規格に基づく

一般仕様

カテゴリー	種類	項目	仕様			
電気仕様	一般仕様	サンプリングレート	10 Gsa/s			
		サンプリング確度	12 ppb + 75 ppb/年			
		スキュー補正確度	200 ps (推定)			
	ドレイン/ コレクター チャンネル	DC	ソース	最大 電圧/電流	1200 V / 200 A	
				最小電圧/電流	50 V ¹ 、10 A ¹	
				電圧プログラミング分解能	23 mV	
			測定	電圧確度	2 %の範囲 (推定)	
				電流確度	4 %の範囲 (推定)	
				AC	測定	電圧/電流帯域
		最小V, I移行時間	2 ns、2.5 ns			
		電圧エッジ時間	< 10 ns (DUTの応答とRglによって異なる)			
		ゲート	DC	ソース	ハイレベルの最大/最小電圧	29 V / 12 V
					ローレベルの最大/最小電圧	0 V / -10 V
					電圧分解能	0.1 V
					最大電流	10 A (シンクとソース)
	測定			電圧確度	2 %の範囲 (推定)	
				電流確度	4 %の範囲 (推定)	
	AC		ソース	タイミング分解能/確度	100 ps / 200 ps	
				最大パルス幅 (1回目のパルス)	100 μs	
				最大パルス幅 (2回目のパルス)	10 μs	
1回目と2回目間の最大のオフ時間				25 μs		
最小パルス幅 (1回目のパルス)				1 μs ²		
最小パルス幅 (2回目のパルス)				200 ns		
測定	1回目と2回目間の最小のオフ時間	200 ns				
	電圧/電流帯域	500 MHz / 800 MHz				
	最小電圧移行時間	2 ns				
	最小電流移行時間	1.25 ns				
	モジュラーコンポーネント	負荷インダクター	120 μH			
			16.7 μH			
DCリンクキャパシタ		800 μF				

¹ 電圧は50 Vを下回ることがありますが、電流はキャパシタのエネルギーによって制限されます(800uF) (Energy=(1/2)*CV²)。

² この値を下回る値も可能ですが、テストされておらず推奨されません。

一般仕様（続き）

カテゴリー	種類	項目	仕様	
DUT		MOSFET、IGBT		
		Si、SiC		
		TO-247（3ピン）、D2PAK7		
		温度制御	室温 ³ ～150 °C	
システム	メカニカル仕様	安全機能付き筐体	寸法	90 cm (幅) x 65 cm (長さ) x 160 cm (高さ)
		DPTフィクスチャ	重量	150 kg
環境条件			寸法	32cm (幅) x 25cm (長さ) x 16cm (高さ)
			動作温度	20 °C～30 °C
電力			動作湿度	50～80 % RH
			AC入力電力	200～240 V、± 10% 50/60 Hz
システム保護と安全装置			緊急停止スイッチ(EMO)	
			オシロスコープ保護 (クランプ出力)	約±15 V
		安全保護フード	システムの最大エネルギー	6J
			フードロック	> 42 V の場合
	フード開状態の検出 (高電圧の切断とDCリンク キャパシタの放電)			
		過剰温度によるシャットダウン	(> 約50 °C)	

³ 20 °C～30 °C

詳細については、<http://www.keysight.com/find/PD1500A>をご覧ください。

詳細情報：www.keysight.co.jp

キーサイト・テクノロジー株式会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口

受付時間 9:00-12:00 / 13:00-18:00（土・日・祭日を除く）

TEL：0120-421-345 (042-656-7832) | Email：contact_japan@keysight.com

