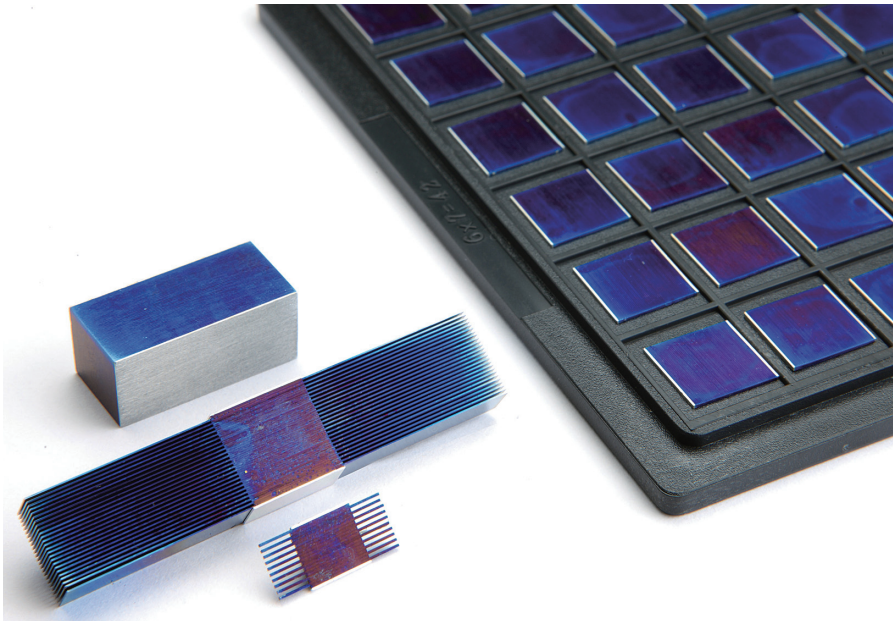
高集光型PVセルが大電力レーザ給電を可能にする

マイコ・ペラルス

高性能、高電圧VMJ光起電力セルが、レーザ光による電力の大電力送電を可能にする。アプリケーションには、小型UAVやリモートセンシングのリモート給電などがある。

レーザ給電では、レーザ光源から自由空間（PB：Power Beaming）もしくは光ファイバケーブル（PoF：Power over Fiber）のいずれかにより光起電力（PV）レシーバまで電力を伝送することが必要になる。PVレシーバには、PVセル、またはPVセルアレイが含まれており、特定のレーザ波長を高効率で電力に変換するように最適化され、一般的には30～50％の範囲となっている。用途には、無人機（UAV）、ロボット、苛酷環境、あるいはリモートセンサの遠隔給電などのアプリケーションがある。

台湾のMH GoPower（MHGP）は、大電力レーザ給電を可能にする高性能シリコンベース垂直多接合（VMJ）光起電力（PV）セルを製造している。VMJ PVセルの3Dデザインは、シリコンのバルク特性を利用した大電力レーザ給電中の熱マネージメントを行う。これは、デバイスにフィンが集積されていることによる。ここでは、自由空間PB及びPoFのアプリケーションと価値提案を探求し、併せてハイパフォーマンスVMJ PVセルの背後にある技術を展望する。



MHGP VMJセルは汎用性を提供する。

なぜ電力放射供給なのか

バッテリー源からの電力と比較したとき、フリースペースPBが持つ利点には、運用時間の増加、再給電の減少または排除、潜在的な軽量化がある。こうした利点をUAVアプリケーションの検討を例に説明する。電力がUAVのPVレシーバに放射供給され、電力に変換されて、それが利用する電力を上回る限りにおいて、UAVの飛行時間は理論的には無期限に延ばせる。

飛行時間を延ばすことにより、運用に影響し技術的な危険な、再充電のための着陸戦略の必要性が減少する。また、滞空延長が必要なら、予備のバッテリを追加してUAVの重量を増やすよりも、軽量なPVレシーバを設置して滞空延長要件を達成することができる。これは、最大積載量をさらに増やせることにもなる。

なぜ光ファイバ給電か

電力を銅線ではなく、光ファイバで伝送するメリットはいくつかある。銅線による電力供給は、RFや磁界干渉を受けやすい。これは電力サージあるいは装置に障害を起こす他の信号異常の原因となり、システムの信頼性を損なう。さらに、銅線は落雷の接地経路となり、高圧あるいは絶縁不良環境ではスパークを起こす。レーザ光による送電にはこうした問題は全く存在しない。

こうした利点の恩恵を受けるアプリケーション例には、センサや他のデバイスがある。これらは苛酷、爆発性、高電圧環境（電流センサ）で動作するも

の、雷などの苛酷な気候に晒される機器（一例として屋外のビデオ監視カメラ）、雑音耐性が要求される機器（医療モニタリング装置や軍用アプリケーション）がある。

市場参入障壁

レーザ給電アプリケーションの主要な制限要因はシステムコストであった。これらのコストの評価基準は、給電ワットあたりのコスト（コスト/W）である。デバイスサイズの縮小と効率向上により、レーザシステムのコスト/Wは飛躍的に下がってきており、さらに下がり続けると見られている。しかし、レーザはレーザ給電ソリューションのコストの一部でしかない。他の重要コンポーネントはファイバ（PoF用）、オプティクス、PVレシーバ（セルアレイ）サブシステムである。

PoF用のオプティクスは、システムコスト全体で小さな部分である。しかし、フリースペースPB（power beaming）では、集光用光学部品のコストは、アプリケーションの距離の増加にともなって増加する。これは、レンズサイズが大きくなるためである。その結果、オプティクスのコストは直ぐに、フリースペースPBシステムのコストを支配するようになる、したがって実用域では制限要因となる。とは言え、数kmの範囲では、経済的、技術的に利用可能である。

最後に、レーザ給電ソリューションの実行可能性では、PVレシーバパワー密度が重要要素になり得る。最終的にシステムコストを抑制するには、レシーバパワー密度をより高くすることが必要になる。また、これは2つの方法で実現可能だ。①PVレシーバの光強度増強のためのパワー向上、あるいは②PVレシーバの効率向上である。

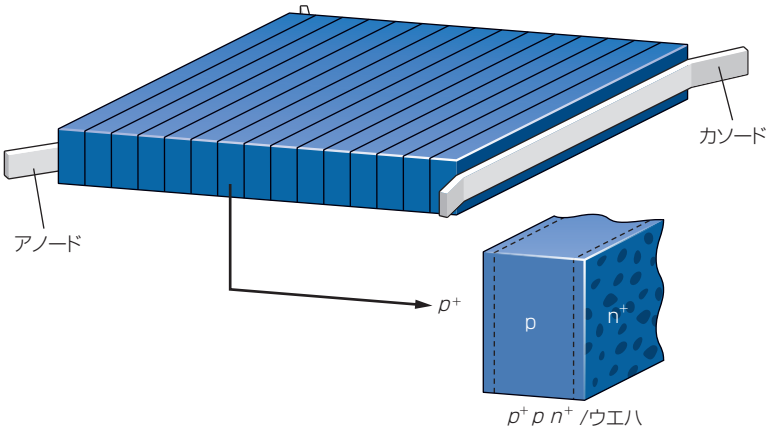


図1　MHGP VMJセルは、より大きな光強度と高いPVレシーバ効率の両方を適用したことにより、パワー密度を高くすることができる。

最初のシナリオでは、レーザパワー増が、ある程度までコスト/Wの漸次的低下になる。例えば、フリースペースUAVアプリケーションでは、追跡ハードウエアとソフトウエア、レーザ搭載ハードウエア、オプティクス、UAV、それにレシーバサイズが全て固定であり、したがってレーザパワーの増加は、これらのシステムのコスト増に寄与しない。実際、より小型のバッテリでよいということになり、これによってこの追加パワーのコスト漸増をさらに抑制することになる。結果として、PVレシーバが強化されたレーザ光で十分な性能がでれば、また熱の管理ができれば、レーザ光源のパワー増にはメリットがある（この分析は、PoFアプリケーションでも同様に当てはまる）。

第2のシナリオでは、所定のPVレシーバフットプリントに対してPVレシーバ効率改善が結果的にパワー出力増となり、システムコストのバランスがとれる。代わりに、より低いパワー及び低コストのレーザシステムの利用が可能になる。より効率のよいPVレシーバは、浪費する無駄なエネルギーが少ないことでもあり、結果的にセルがより低温で動作する（正のパフォーマンスフィードバックループ）、あるいはより低コストで軽量なヒートシンクが使えるということでもある。より効率のよいPVレシーバのもう1つの利点は、システム全体の効率が向上することであり、この点はアプリケーションによっては、コストとシステム運用の両面で重要である。

VMJ PVセルの高出力密度達成法

MHGPのシリコンベースVMJ PVセル（VMJセル）は、コスト競争力のある集光型PVセルであり、900～1000nmの波長のレーザシステムで最も効果的に動作する。VMJセルの材料組成とデバイス構造が、レーザ給電アプリケーション用セルの競争力の基盤になる。

VMJセルは、小型シリコン垂直接合セルユニットを一体結合したアレイである。VMJセルは、拡散しメタライズしたシリコンウエハのスタックを結合し、そのスタックを薄いスライスに切断して製造する。結果として、高電圧、低電流セルとなり、それぞれが1cmあたり約50ユニットセル（ジャンクション）を含み、約30V/cmとなる。電気リード線は、終端接点に取り付けられ、セル終端から電流が流れるようになっている（**図1**）。

通常のPVセルの強度増により、あ

る程度は出力増となる。レーザ光変換用に設計されたガリウムヒ素（GaAs）集光型PVセルは、集光度を高めるために、セルの前後面に稠密グリッドラインを必要とする。これは、強度向上にともないセルの性能低下の効果をもたらす。MHGP VMJセルは、強度が100W/cm^{2}になるまで、効率パフォーマンス不変を維持できることを示している。

高い光集光下でのPVセルの主要な課題は、未利用熱エネルギーの扱いである。強度が増すにつれて、セル温度は上昇し、パフォーマンスの低下となる。これに比例して未利用エネルギーも一層大きくなる。言い換えると、高強度はセルの性能に、複合的に悪影響をもたらすということである。

PVアレイから効率的に熱を除去するための障害は、熱界面層（TIM）である。TIMは、PVセルを熱伝導ヒートシンクに接合している。一般に、このTIMは、熱伝導ではあるが電気的絶縁材料を利用しなければならない。これは、導電による電気的にアクティブなセル表面、リードが短絡するのを防ぐためである。そのようなものとして、このTIM材料は一般に、理想的な熱伝導体ではない。その結果、熱伝導には限界があり、PVセルの熱伝導率を制限することになる。

放熱向上のために、われわれは数多くのイノベーションをVMJセルとレシーバ設計に組み込んだ。ⓐ厚いセル構造（最大1cm）、ⓑ終端接点放熱、ⓒPVデバイスへのヒートシンキング構造内蔵。これらの特徴を組み合わせることで新しい放熱ソリューションが可能になる。

一例として、「フィン」（WiFins: **図2**）を集積した厚いVMJセルは、放熱を改善する。放熱や対流冷却のためのセルの表面積を広げ、放熱ができるので、

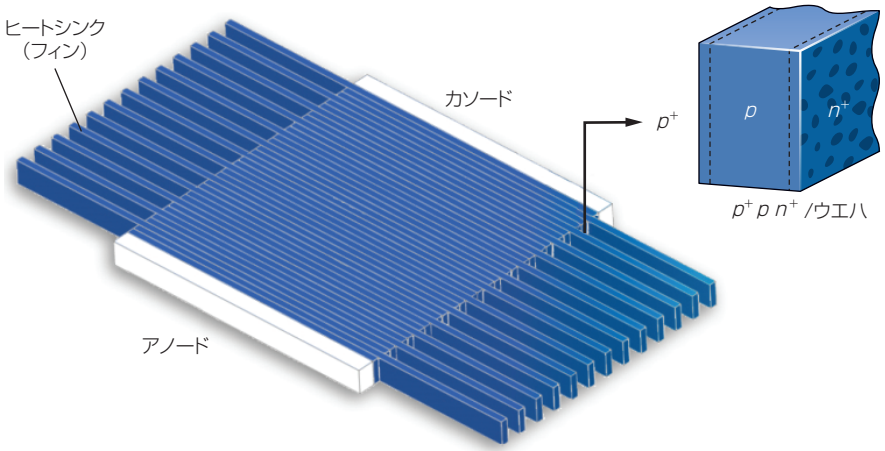


図2 WiFinsは、フィンを集積したものであり、PVセルからの熱をヒートパスを介して放出するので、レシーバの熱界面層（TIM: これはPVセルを熱伝導ヒートシンクに接合している層）を通過する必要がない。

TIMのボトルネックを通過する必要がなくなる。メタライズした終端接点を持つ厚いVMJセルは、高い熱伝導性を持つ金属の接合材料を使用する。これは大面積の終端接点を導電性のヒートシンクに結合するためである。これは、デバイスのアノードとカソードの二役を担う。こうしたイノベーションにより、VMJセルはより効果的に放熱できるようになり、出力動作向上につながった。

PVレシーバの効率

最後に、MHGP VMJセルはPVレシーバの効率も改善している。これは、VMJセルのカスタマイズできるサイズ（最大幅/長さ7×7cm）と高圧特性によるものである。サイズのカスタマイズができるので、セルは予想されるアプリケーションの空間的に一様ではないサイズに合わせることができる。言い換えると、空間的に極めて不均一なビームパタンであれば、より小さなセルでよく、そのようなセルは平行に並べて損失の連続を避けることができる。ビームパタンの変動が空間的にゆっくりとしているならば、より大きなセルを平行に並べることができる。

この完全な並列構造は、VMJセルの高圧特性により実行可能である。これは、カスタマイズ可能なセルサイズとともに、PVアレイが最終アプリケーションの電圧要件に容易に近づくことに寄与する。したがって、コンバータ構成のコスト、非効率、追加重量要件の軽減に役立つ。

ファイバあるいは自由空間による給電の利点により、新しいアプリケーションの成長に拍車がかかっている。こうしたアプリケーションの普及を一段と加速するためには、さらなるシステムコスト削減が達成されなければならない。レーザ価格が下がると予想されているので、コスト低下は継続して起こるであろうが、MHGP VMJセルをPVレシーバデザインに組み込むことで、この傾向は一段と促進され、PVレシーバパワー密度の向上となって、さらにレーザ給電システムコストが下がると考えられる。

著者紹介
マイコ・ペラルスは、MH GoPower Co. Ltd.,の事業開発マネージャー。
email: mico.perales@mhgopower.com URL: www.mhgopower.com

LFWJ