

Beyond 5G における IoT とエネルギーハーベスティング

東京都立大学 システムデザイン学部 航空宇宙システム工学科

嶋村 耕平



Beyond 5 G IoT Energy harvesting

Tokyo Metropolitan University, Department of Aerospace and Astronautics

Kohei Shimamura

1. エネルギーハーベスティングとしてのマイクロ波ワイヤレス給電

近年,新たな電力供給方式としてレクテナによる無線給電が注目を集めている.とりわけ,アプリケーションの小型化に伴い,限られた面積に十分な電力を無線給電する技術開発の需要が高まっている.レクテナ(Rectenna)とは,整流回路(Rectifier)とアンテナ(Antenna)が一体となった素子であり,外部から入射された電磁波をそのまま DC 電力として取り出すことが可能である.無線給電に使用する周波数を高くすることで,レクテナの小型化が可能になり,レクテナ面積当たりの DC 電力を大きくすることが可能になる.さらに,送電ビームの指向性が強くなるため,散逸による電力のロスを少なくすることができ,長距離無線給電に適している[1].

マイクロ波ワイヤレス給電方式の大きな特徴として,送電に用いるマイクロ波の周波数を高くすることで,レクテナを小型化し,レクテナが占める面積あたりの DC 出力電力(以降,レクテナ電力密度)を増やすことができる.さらに,送信するマイクロ波の指向性が強まり,ビームの拡散が抑制される.これにより遠距離でもビームが外部に放散される電力損失を減らすことができるため,ビーム効率[5]を向上させることができ長距離のワイヤレス給電に適している.しかし,高周波化による問題点も多く存在する.レクテナの性能指標として RF-DC 変換効率(RF 入力電力に対する DC 出力電力),DC 出力電力,レクテナ電力密度(レクテナの面積当たりの DC 出力電力)が存在する.

先行研究において,2.45GHz~10GHz などの比較的低周波帯では 80~90%の RF-DC 変換効率を示しているのに対し,28GHz~94GHz 帯では周波数が高くなるにつれて 50%~2%程度まで RF-DC 変換効率が減少していることが見て取れる.また同様に低周波帯(2.45GHz~10GHz)では 500~1000mW 程度の DC 出力が可能であるのに対し,高周波帯(28GHz~94GHz)では 10~200mW 程度しか DC が出力できていない.

しかし,DC 出力が低下してもレクテナのサイズが高周波化により小型化しているため,レクテナ電力密度は周波数に対して値が増加する傾向がある.RF-DC 変換効率と DC 出力の低下の主な原因は高周波になるにつれてマイクロ波伝送線路の線路損失が増加すること,製作誤差によるインピーダン

スのミスマッチによる反射損失の影響が大きくなること,整流ダイオードの ON,OFF の時定数によるスイッチング損失が大きくなるといった要因が挙げられる.とりわけ,整流ダイオードの性能が RF-DC 変換効率と DC 出力の限界を決定付けており,表 1 からレクテナには電子移動度が高く高周波回路で広く使用されている GaAs ショットキーバリアダイオードが使用されているが,高周波数帯において高効率かつ大電力出力の可能な整流ダイオードの開発が高周波ワイヤレス給電の実用化において急務であると言える.

さらに,先行研究において 94GHz 帯以上の周波数でのワイヤレス給電実験が行われていない要因として,周波数が高ると共に送信側の発振源の出力が大きく低下することが挙げられる[6].マイクロ波ワイヤレス給電実験を実施するためには,遠方界と呼ばれる電波を平面波として取り扱うことができる距離において,レクテナの整流用ダイオードの ON 電圧以上の RF 電力を供給する必要がある.そのため,数 W~数 MW 級の大電力発振源が必要になり,低周波帯では半導体(GaAs FET, GaN HEMT)や真空管(マグネトロン,クライストロン,TWT)の発振源及びアンプが比較的安価かつ簡単に作成・入手できるのに対し,高周波帯とりわけ 100GHz 以上の高周波数帯ではジャイロトロンしか kW 単位での発振源は存在しない.ジャイロトロンは主にプラズマ核融合の分野で用いられており,その発振出力と出力周波数は年々向上しており[7],ワイヤレス給電の大電力発振源として期待されている.

マイクロ波ワイヤレス給電における整流ダイオードとして一般的に用いられている GaAs ショットキーバリアダイオードはキャリアの移動度が高いためマイクロ波回路に広く用いられている.より高周波帯かつ大電力化に特化した整流ダイオードとして GaN やダイヤモンドを用いたダイオードの開発が行われている.これらは従来の Si や GaAs と比較してバンドギャップが広く絶縁破壊電界が大きいいため,マイクロ波帯での大電力整流用途として期待されている.先行研究においては,徳島大学がレクテナ用整流ダイオードとして GaN ダイオードの開発を行っており[21],我々もサブテラヘルツ帯に対応した GaN SBD の開発を行っている[22].さらに,佐賀大学がダイヤモンド用いたダイオードの研究を行っており[23],ダイヤモンドは GaN よりもさらに大電力用途の整流が可能であると考えられ,注目

されている。

しかし、半導体起因のダイオードでは整流可能な周波数帯に限界があることが知られている [24]。ダイオードが整流可能な周波数の限界(カットオフ周波数)はダイオードの直列抵抗 R と接合容量 C の RC 時定数, 絶縁破壊電界, ブレークダウン電圧, 電子移動度などにより決定される。絶縁破壊電界と電子移動度は半導体特有の物性値であるため, RC 時定数とブレークダウン電圧によりカットオフ周波数の設定が可能であるが, この2つはトレードオフの関係にあるため, デバイスの厚さやサイズにより最大限 RC 時定数を小さくして, 高周波帯での RF-DC 変換効率を高くできても, DC 出力電力は低下してしまう。さらに, SBD での整流可能な周波数は最大でも遠赤外領域までであると知られている [25]。

そこで, テラヘルツ帯および可視光領域まで整流が可能な新しいダイオードとして MIM(金属-絶縁体-金属)ダイオードが提案されている [26]。これは量子トンネル効果を用いたトンネルダイオードであり, 電子移動度は電子のトンネル時間であるため数フェムト秒程度の超高速スイッチングが可能であり, 可視光帯の整流を可能にする。さらに, ON 電圧の調整が可能のため, μW , nW 級の超低電力入力においても整流が可能であり, 実際にジョージア工科大学が MIM ダイオードを搭載した光レクテナにより数 mV の起電力の取得に成功している [27]。現在は MIM ダイオードの整流特性の向上のために, 異なる仕事関数の金属電極を用いる [28], 絶縁層を多層にする [29][30], 電極の幾何形状を変化させる [31] などの取り組みが行われており, MIM ダイオードの性能向上は 5G, Beyond5G を用いたエネルギーハーベスティング技術の実用化に大きく前進する。さらに, 高周波化によるレクテナの小型化かつ高いレクテナ電力密度を活かすことにより, センサやウェアラブル機器などの小型電子デバイスへのワイヤレス給電による IoT への応用が期待されている。

本研究では, 多層 MIM ダイオードの DC 特性および RF 特性を評価することによるワイヤレス給電への適用可能性の検討する。産業技術総合研究所が保有する原子層堆積装置(ALD)と筑波大学微細加工プラットフォームの微細加工装置を用いることにより, 多層 MIM ダイオードの開発に成功した。ダイオードの電流-電圧曲線をプローバーにより測定することにより, 微分抵抗, 非線形性, 曲率, 感度, 非対称性などの DC 特性を算出し, 整流特性を評価した。また, 東京都立産業技術研究センターが保有するプローブステーションとネットワークアナライザを用いて GSG プロブによる S パラメータを測定することにより, ワイヤレス給電への適用可能性に関して検討を行った。

2. ダイオードの設計

先行研究をもとに高い整流特性が得られる多層 MIM ダイオードとなるように使用する金属電極と絶縁層の種類, 積層順番を決定した。金属電極の仕事関数の差が大きくなるように, 下部金属電極に Au を, 上部金属電極に Al を用いた。また, 絶縁層は産総研の ALD 装置の使用できるターゲットかつ, 誘電率が小

さくキャパシタ成分を小さくしやすいこと, Au-ZnO 境界面のエネルギー障壁差が小さく立ち上がりやすいこと, 中央の障壁を高くすることで非対称性が大きくなることなどを考慮して, 下層から ZnO-SiO₂-Al₂O₃ の順番に決定した。設計した多層 MIM ダイオードの構成とエネルギーバンドを図 1 に示す。

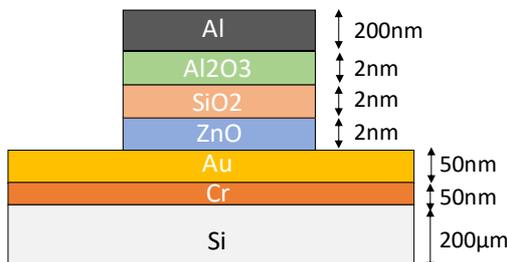


図 1 今回設計した多層 MIM ダイオード構造

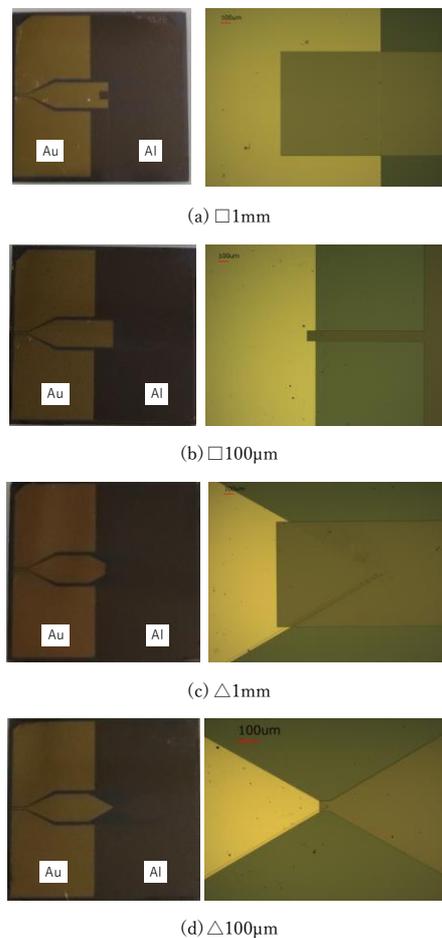


図 2 製作した MIM ダイオード

多層 MIM ダイオードの製作は 20mm 角の Si 基板上に微細加工プロセスを用いて高精度に作製を行う。多層 MIM ダイオードは Cr/Au/ZnO-SiO₂-Al₂O₃/Al の構造とし, GSG プロブによる RF 特性を測定するため, 50 Ω の CPW 形状でパターンを作製した。電極の接触面積と幾何形状の変化による整流特性の変化を調べるため, 下部 Au 電極の形状を \square 四角と \triangle 三角の2種類と接触面積を 1mm と 100 μm の2種類の計 4 パターンの多層 MIM ダイオードを作製した。作製した MIM ダイオードを図 2 に示す。

3. ダイオードの評価

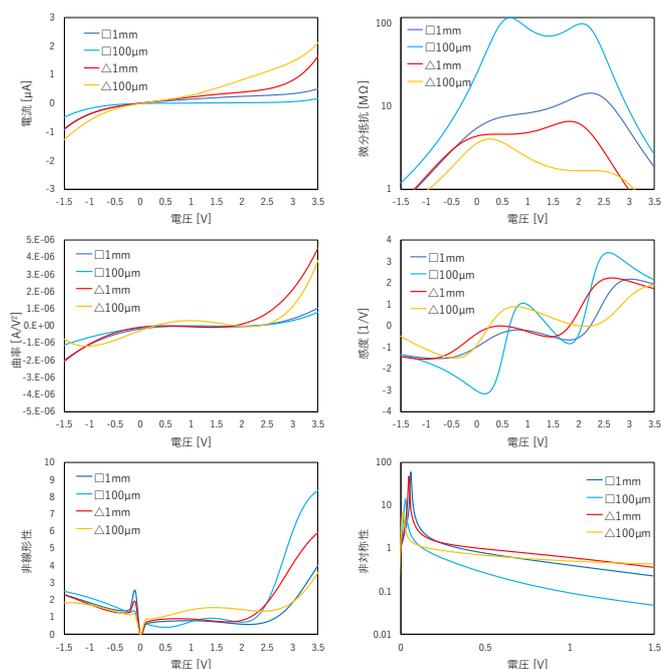


図3 各パターンにおける I-V 曲線, 微分抵抗, 曲率, 感度, 非線形性, 非対称性の比較

作製した多層 MIM ダイオードにプローブを用いて I-V 曲線を測定し, DC 特性を評価した. MIM のサンプルは電極形状と接触面積がそれぞれ $\square 1\text{mm}$, $\square 100\mu\text{m}$, $\triangle 1\text{mm}$, $\triangle 100\mu\text{m}$ の 4 パターンを 3 つずつ作製し計 12 個のサンプルを測定した. 使用したプローバーと半導体特性評価システム Agilent (B1500A) によりプローブ測定で測定された I-V 曲線を図に示す. また, I-V 曲線をもとに MIM ダイオードの性能指標である微分抵抗, 曲率, 感度, 非線形性, 非対称性の計算結果を図にそれぞれ示す.

電流-電圧曲線の測定結果から, トンネル電流は $\text{nA} \sim \mu\text{A}$ のオーダーであることが観測された. これは同じ 6nm の厚さかつ 3 層の MIM ダイオードを作製している先行研究[29]のオーダーと一致しており, 多層 MIM ダイオードの作製に成功したと言える. また, 個体差はあるものの概ね逆バイアスで $-2\text{V} \sim -2.5\text{V}$ の範囲でトンネル電流が $-10\mu\text{A}$ を上回ると絶縁破壊が生じ, 順バイアスで $+4\text{V} \sim +5\text{V}$ の範囲でトンネル電流が $+10\mu\text{A}$ を上回り絶縁破壊が生じることが観測された. そのため, それぞれのサンプルは $-1.5\text{V} \sim +3.5\text{V}$ の範囲において $500\mu\text{V}$ 刻みで I-V 特性の測定を行い, ノイズの除去のため測定データを 0.01V で丸めた後, 6 次の多項式近似により各パラメータの算出を行った. 図から, 同一形状のサンプルにおいても DC 特性に個体差が大きいことが観測された. この大きな要因として, MIM 接合面に段差があり, 顕微鏡で拡大をすると段差において Al 層の膜の破れが点在していることが確認された. また, リソグラフィ装置のアライメントの誤差により接触面がズレによる影響や, ALD 成膜時の表面汚れや粗さが大きく影響していると考えられる. 段差での膜の破れはスパッタによる Al の成膜を 200nm よりも厚くすることで解決が可能だと考えられる.

測定結果の中から, それぞれの同一パターンのサ

ンプルの中で性能が I-V 曲線の形状や整流特性に優れるもの(曲率, 非線形性, 感度が大きいもの)を 1 つずつ選定し, それぞれ電極形状の異なる 4 パターンで各パラメータの比較を行った

\square よりも \triangle の方が逆バイアスおよび順バイアスにおいて電流の立ち上がり大きいことが判明した. これは \triangle の方が電界集中が起こりやすいためトンネル確率が高くなったためだと考えられる. ゆえに図において, 微分抵抗は \triangle の方が全体的に小さくなり, 図における曲率に関しては \triangle の方が大きくなること判明した. この傾向は先行研究[31]で記述されている幾何形状を用いた電界集中により, 微分抵抗の低下と曲率が向上するという結論と一致した.

先行研究においては同一金属電極かつ単層での実証であったが, 本研究により異なる金属電極かつ多層の場合でも同一の傾向が得られることが判明した. その一方で, 感度に関しては微分抵抗と曲率の積で表させるため, $\square 100\mu\text{m}$ が一番大きな値となり, 傾向と大きさ共に各パターンで大きな差異は見られなかった. また, 非線形性に関しては $\square 100\mu\text{m}$ が逆バイアスおよび順バイアス共に最大の電圧で他の形状と比較して一番大きな値が得られた. これは, $\square 100\mu\text{m}$ は微分抵抗が大きくトンネル電流量が小さいため, 一定のバイアスを超えた際に急激に電流が立ち上がることで非線形性が急増しているためである. これに対して $\triangle 100\mu\text{m}$ と $\triangle 1\text{mm}$ は $+2\text{V}$ 程度までの順バイアスにおいては $\square 100\mu\text{m}$ と $\square 1\text{mm}$ よりも非対称性が大きいことが観測され, 順バイアスの立ち上がり速いことを表している. ゆえに, 非対称性は \triangle にすることで順バイアスの立ち上がり速くなることにより, \square よりも低下してしまうことが判明した.

先行研究[31]においては, 逆バイアスでの電界集中により, 非対称性が向上していたため, 本研究の構造でも同様の結果を期待していたが, 逆バイアスの立ち上がりの向上と同時に順バイアスの立ち上がりも向上したため, 結果として \square よりも非対称性が低下することが判明した.

非線形性と非対称性が -0.05V 付近で著しく値が大きくなっている原因は, 作製した MIM ダイオードは原点 (0V) で数 nA 程度の電流値を持っており, -0.05V 付近で電流値が 0 に限りなく近い値をとるためである. この現象は, 一概に誤差と断定することはできないが, プローバーのノイズは数 fA 程度であり, 主要な要因として逆バイアスから順バイアスへと連続して電圧を掃引したことによる変位電流の発生が影響していると考えられる.

本研究により, 仕事関数の差が大きい異種金属電極を用いる[28], 絶縁層を多層にすることで内部エネルギー障壁の変遷により直接トンネリングに加えて共鳴トンネリングと欠陥増強直接トンネリングが生じる[29][30], 幾何構造により電界集中を生じさせる[31]を組み合わせることでそれぞれの作用による整流特性の相乗効果があることを実験的に観測し, 高い非対称性を維持しながら, 微分抵抗が低く, 電流の立ち上がり速い, 理想的な整流特性を持つ多層 MIM ダイオードを作成できた.

4. 結言

筑波大学微細加工プラットフォームの微細加工装置と産業技術総合研究所のALD装置を用いてCr/Au/ZnO-SiO₂-Al₂O₃/Alの多層MIMダイオードを作製し、半導体特性評価装置(プローバー)および東京都立産業技術研究センターのプローブステーションとネットワークアナライザを用いてDC測定とRF測定を行った。その結果、複数の先行研究(仕事関数の差が大きい異種金属電極を用いる、絶縁層を多層にすることで共鳴トンネリングと欠陥増強直接トンネリングを生じさせる、幾何構造により電界集中を生じさせる)を組み合わせることで、高い非対称性を維持しながら、微分抵抗が低く、電流の立ち上がりが速い、理想的な整流特性を持つ多層MIMダイオードの開発に成功し、それぞれの相乗効果を実証した。また、多層MIMダイオードの入力インピーダンスは実数部が $0\Omega\sim 15\Omega$ 、虚数部が $0\Omega\sim 10\Omega$ の値を広帯域で持つことが判明した。ゆえに、共役となるインピーダンスを持つアンテナおよび整合回路を挿入すれば整合が取れ、多層MIMダイオードをアンテナと統合してレクテナを製作するための指針を得ることができた。

謝辞

本研究は公益財団法人高柳健次郎財団の助成を受けて実施された。また筑波大学微細加工プラットフォームの産業技術総合研究所の協力を得たことをここに感謝申し上げる。

参考文献

[1] Kenichi ANMA, Shuji NAKAMURA, Kenji SASAKI, Masao SATO "Ground Experiment on Wireless Power Transmission Technology-Spin-off Applications of Space Solar Power System Key Technology -", 宇宙太陽発電 Vol.1 (2016), pp. 27-30.

[2] ドローンハイウェイ構想の実現に向けて <http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/pdf/170329j0101.pdf>

[3] Kamalinejad, P.; Mahapatra, C.; Sheng, Z.; Mirabbasi, S.; Leung, V.C.; Guan, Y.L. Wireless energy harvesting for the Internet of Things. *IEEE Commun. Mag.* 2015, 53, 102–108.

[4] 日本経済新聞 “「ポスト5G」軸に110兆円産業へ 総務省が電波戦略” 2018年7月5日

[5] <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO32628350U8A700C1EA2000/>

[6] N. Shinohara, “Beam Efficiency of Wireless Power Transmission via Radio Waves from short range to long range,” *Journal of the Korean institute of electromagnetic engineering and science*, vol. 10, no. 4, pp. 4–10, 2010.

[7] R. J. Trew, “SiC and GaN transistors—Is there one winner for microwave power applications?” *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1032–1047, Jun. 2002.

[8] M. Thumm, *State-of-the-Art of Highpower Gyro-Devices and Free Electron Masers*. Karlsruhe, Germany: KIT Scientific Publishing, 2016.

[9] W. C. Brown, “Electronic and mechanical improvement of the receiving terminal of a free-space microwave power transmission system,” *NASA STI/Recon, Tech. Rep.* 40, Aug. 1977.

[10] Y.-H Suh and K. Chang, “A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 50, no. 7, pp. 1784–1789, Jul. 2002.

[11] Yang, X.; Xu, J.; Xu, D.; Xu, C. X-band circularly polarized rectennas for microwave power transmission applications. *J. Electron. (China)* 2008, 25, 389.

[12] K. Hatano, “Development of 24GHz-Band MMIC Rectenna,” *Radio and Wireless Symposium (RWS)*. IEEE 2013, vol. 50, pp. 199–201, 2013

[13] M. Suzuki et al., “Consideration of long distance WPT using 28 GHz gyrotron,” (in Japanese), *Space Solar Power Syst.*, vol. 3, pp. 45–48, 2018.

[14] T.-W. Yoo and K. Chang, “Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 40, no. 6, pp. 1259–1266, Jun. 1992.

[15] M. Nariman, F. Shirinfar, S. Pamarti, A. Rofougaran, and F. De Flaviis, “High-efficiency millimeter-wave energy-harvesting systems with milliwatt-level output power,” *IEEE Trans. Circuits Syst., II, Exp. Briefs*, vol. 64, no. 6, pp. 605–609, Jun. 2017.

[16] K. M. K. Matsui et al., “Microstrip antenna and rectifier for wireless power transfer at 94 GHz,” in *Proc. IEEE Wireless Power Transf. Conf. (WPTC)*, May 2017, pp. 1–3.

[17] H.-K. Chiou and I.-S. Chen, “High-efficiency dual-band on-chip rectenna for 35- and 94-GHz wireless power transmission in 0.13- μ m CMOS technology,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 58, no. 12, pp. 3598–3606, Dec. 2010.

[18] S. Hemour, C. H. P. Lorenz, and K. Wu, “Small-footprint wideband 94GHz rectifier for swarm micro-robotics,” *2015 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. IMS 2015*, no. I, pp. 5–8, 2015.

[19] A. Etinger et al., “Characterization of a Schottky diode rectenna for millimeter wave power beaming using high power radiation sources,” *Acta Phys. Polonica A*, vol. 131, no. 5, pp. 1280–1284, May 2017.

[20] Ye, J.; Yang, C.; Zhang, Y. Design and experiment of a rectenna array base on GaAs transistor for microwave power transmission. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Beijing, China, 5–8 June 2016.

[21] Nakamura, M.; Yamaguchi, Y.; Tsuru, M.; Aihara, Y.; Yamamoto, A.; Homma, Y.; Taniguchi, E. Prototype of 5.8 GHz-band high efficiency rectifier with a high breakdown voltage GaAs SBD. In *Proceeding of the Institute of Electronics, Information and Communication engineers*, Minato-ku, Tokyo, Japan, 16–17 April 2015; Volume 115, pp. 21–25.

[22] 高橋健介, “Ga_N ショットキーダイオードを用いたマイクロ波電力整流回路の研究”, 徳島大学修士論文, 2010.

[23] S. Mizojiri, K. Takagi, K. Shimamura, S. Yokota, M. Fukunari, Y. Tatematsu T. Saito, “Ga_N schottky barrier diode for Sub-terahertz rectenna,” *Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, London, Jun.2019.

[24] T. Oishi, N. Kawano, S. Masuya, and M. Kasu, “Diamond Schottky Barrier Diodes With NO₂ Exposed Surface and RF-DC Conversion Toward High Power Rectenna,” *IEEE Electron Device Lett.* 38 pp.87-90 (2017).

[25] S. Oliver, “Optimize a Power Scheme for these Transient Times”, *Electronic Design*, Sep 30, 2014.

[26] K.S. Champlin and G. Eisenstein, “Cutoff Frequency of Submillimeter Schottky-Barrier Diodes.” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 26, 1, 1978.

[27] Garret Moddel and Sachit Grover. *Rectenna Solar Cells*; Springer Science: New York, 2013.

[28] Asha Sharma, Virendra Singh, Thomas L. Bougher and Baratunde A. Cola, “A carbon nanotube optical rectenna”, *NATURE NANOTECHNOLOGY*, VOL 10, DECEMBER 2015.

- [29] M. Alhazmi, F. Aydinoglu, B. Cui, O. M. Ramahi, M. Irannejad, A. Brzezinski and M. Yavuz, "NSTOA-13-RA-108 Comparison of the Effects of Varying of Metal Electrode in Metal-Insulator-Metal Diodes with multi-dielectric layers", *Austin J Nanomed Nanotechnol - Volume 2 Issue 2* – 2014.
- [30] P. Maraghechi, A. Foroughi-Abari, K. Cadien, and A. Y. Elezzabi, "Observation of resonant tunneling phenomenon in metal-insulator-insulator-insulator-metal electron tunnel devices", *APPLIED PHYSICS LETTERS* 100, 113503 (2012).
- [31] Nasir Alimardania and John F. Conley, Jr, "Enhancing metal-insulator-insulator-metal tunnel diodes via defect enhanced direct tunneling", *APPLIED PHYSICS LETTERS* 105, 082902 (2014).
- [32] Kwangsik Choi, Filiz Yesilkoy, Geunmin Ryu, Si Hyung Cho, Neil Goldsman, Mario Dagenais, and Martin Peckerar, "A Focused Asymmetric Metal-Insulator-Metal Tunneling Diode: Fabrication, DC Characteristics and RF Rectification Analysis", *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, VOL. 58, NO. 10, OCTOBER 2011.