

エネルギーハーベスティング用低損失ショットキバリアダイオードの試作

鈴木 暁士¹, 袁 巧微², 陳 強¹, 今野 佳祐¹, 寺本 章伸³, 諏訪 智之³

¹ 東北大学大学院工学研究科, ² 仙台高等専門学校, ³ 東北大学未来科学技術共同研究センター

概要: 近年, 無線電力伝送技術の応用例として周辺環境に存在する電磁波をエネルギー源とし, デバイスを駆動する電力として利用するエネルギーハーベスティングが注目されている. エネルギーハーベスティングを実現するためには, 微弱な高周波電力を直流電力に変換する整流回路が不可欠である. 本稿ではエネルギーハーベスティング用整流回路のための低直列抵抗かつ低立ち上がり電圧で駆動するショットキバリアダイオードを設計, 試作しその特性を実験的に明らかにしたので報告する.

キーワード: 無線電力伝送, エネルギーハーベスティング, 整流回路, ショットキバリアダイオード

1. まえがき

近年, 無線電力伝送 (Wireless Power Transfer, WPT) に関する研究が注目を集めている. 無線電力伝送とはケーブルを用いることなく電力を送信側から受信側へ伝送する技術であり, 自動車への路面給電や宇宙太陽光発電システムへの応用が進められている. なかでも, 周辺に存在する電磁波をエネルギー源とし, デバイスを駆動する電力として利用するエネルギーハーベスティングが大きな注目を集めており, ウェアラブルデバイスや医療機器, 小電力で動作する小型センサなどへの給電技術として期待されている.

そのようなエネルギーハーベスティングでは, 電磁波が持つ微弱な高周波電力を受電するためのレクテナの高効率化が必須である. レクテナは, 受電アンテナと整流回路, 整合回路から成るが, 特に整流回路の要素の 1 つであるダイオードの振る舞いは, レクテナの高効率化に大きく寄与する. エネルギーハーベスティングを想定したレクテナの高効率化に関する研究がこれまでに行われてきた. 4.65GHz 帯での入力電力に対する効率を実験的に評価したもの [2], 整流回路のトポロジを固定し動作周波数やダイオードの種類を変え, その効率を解析的及び実験的に評価したもの [3] などが既に報告されている. また, 整流回路の高効率化において, 非線形素子であるダイオードの効率への影響は大きく, 効率が入力電力と関連しているとみられること [4], ダイオード固有の降伏電圧に対し限りなく近いバイアスを印加する状況下において効率が最大となることが知られている [5].

一方, これらの報告において使用されているダイオードは必ずしも対象とする周波数, 入力電力に対し最適化されているとは言えない. すなわち, 現在市販されているショットキバリアダイオードは必ずしもエネルギーハーベスティング用レクテナに適しているとは言えない. 例えば, 整流回路によく用いられる Broadcom 社の HSMS-2850 および HSMS-2860 の直列抵抗は数 Ω ~ 数十 Ω のオーダーであり, 降伏電圧も数 V 程度と高いため, 微弱な電力を高

効率で整流するのは難しい [6][7]. また, 微弱な電力の整流では, 市販のダイオードのパッケージに起因する損失の影響も無視できない. このため, 市販のダイオードとは異なるエネルギーハーベスティング用の低抵抗かつ低駆動電圧のダイオードの実現が期待される. このようなダイオードの実現には, ダイオードの物性や構造を踏まえた設計法の確立が不可欠である [8].

本報告では, 30GHz 帯のエネルギーハーベスティング用ショットキバリアダイオードに注目し, 低順方向電圧と低直列抵抗を実現するためのダイオードの設計法を示す. 設計したダイオードを試作し, その特性を実験的に明らかにする.

2. ショットキバリアダイオードの設計指針

ショットキバリアダイオードは金属と半導体の界面に生成される障壁を利用しダイオードの特性を保有するデバイスである. 図 1 に一般的なショットキバリアダイオードの構造を示す.

金属-半導体界面の特性はショットキ及びオーミック側の電極材質と各半導体層に注入されるイオンの濃度, また基板層の材質によって決定される. 例として n 型イオンを注入した場合にショットキ障壁を満たす条件を (1) 式に示す.

$$\phi_b = \phi_m - \phi_\chi \quad (\phi_m > \phi_\chi) \quad (1)$$

式中 ϕ_m [eV] は電極に用いる金属の材質によって決定される仕事関数, ϕ_χ [eV] は半導体基板材質によって決定される電子親和力, ϕ_b [eV] は界面に生成されるショットキ障壁である. これら 3 つのパラメータは実際の基板において図 2 のような関係となっている.

ショットキ障壁は (2) 式に示すダイオードの順方向電流, (3) 式に示す順方向電流, そして (4) 式に示す逆方向漏れ電流に大きく影響を及ぼす.

$$V_f = \phi_b + \frac{kT}{q} \ln \frac{J_f}{AT^2} + R_s J_f \quad (2)$$

$$I_f = I_s (e^{\frac{qV_f}{kT}} - 1) \quad (3)$$

$$I_s = SAT^2 e^{-\frac{q\phi_b}{kT}} \quad (4)$$

式中 T [K] は温度, J_f [A/cm²] は電流密度, R_s [Ω] はダイオードと等価とみなせる直列抵抗, N はエミッション係数, S [cm²] は電流の流れる面積, A [A/cm²K²] はリチャードソン定数, q [C] は電荷素量, k [J/K] はボルツマン定数を表す. 本研究の目的である低順方向電圧を達成するためには低いショットキ障壁が要求される. 一方, 同時に漏れ電流が

増加し、その値は数 eV の変化に対し数千倍と無視できない。従って、ダイオードとしての特性を保持し、かつ低順方向電圧で駆動するダイオードの試作のためには低直列抵抗をはじめに満たす必要がある。ダイオードの直列抵抗は (5) 式によって求められる。

$$R_s = \rho_1 d_1 + \rho_2 d_2 \quad (5)$$

式中 $\rho[\Omega\text{cm}]$ はそれぞれ図 1 に示したドリフト層、基板層の抵抗率を示している。層の抵抗率は電荷素量 q 、注入イオン濃度 $n[\text{ions}/\text{cm}^3]$ 、移動度 $\mu[\text{cm}^2/\text{Vs}]$ を用いて (6) 式のように表すことが出来る。

$$\rho = \frac{1}{qn\mu} \quad (6)$$

上式より注入するイオン濃度 n を増加させることで層全体の抵抗率を小さくすることが出来る。しかし、注入イオン濃度 n が増加するとキャリアの不純物散乱効果が増加し、格子欠陥による電気抵抗が増加することから注入イオン濃度 n が高い場合において移動度 μ が低下する。そのため注入イオン濃度 n が高い場合抵抗率 ρ は n に対し単純な逆比例の関係とはならない。また、イオンを高濃度に注入した場合界面の障壁の厚みが薄くなり、トンネル効果によって通過する電子が増加し逆方向への漏れも増加してしまう。このため使用が想定される電力、寸法及び周波数に従った適切な注入濃度の選択が必要である。

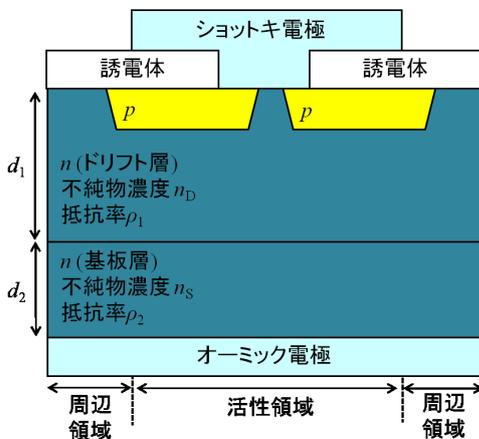


図 1 ショットキバリアダイオードの構造図

3. ショットキバリアダイオードの試作

試作したショットキバリアダイオードの構造を図 3 及び図 4 に示す。電極材質には $\phi_m = 4.7\text{eV}$ の TiN を用いる。基板材質 Si の電子親和力が $\phi_\chi = 4.05 \sim 4.15\text{eV}$ であるため、ショットキ障壁の高さは $0.55 \sim 0.65\text{eV}$ 程度と見込む。

合わせ余裕は各層ごとのマスクをもとに露光処理を行う際目視による誤差を許容するために設ける。オーミック電極側高濃度イオン注入層は高濃度化におけるトンネル効果を利用しオーミックコンタクトを実現する目的を有する。ダイオードの周辺には GSG プローブでの測定を想定しグラウンドパターンを形成する。図 3 に示す d_x を試作時の構造に対する可変パラメータとして与え、試作物の

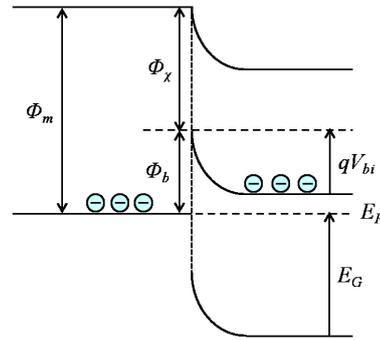


図 2 n型イオン注入時におけるショットキ障壁

特性を比較する。1枚のウェハ上には試作プロセス中の欠陥を避けるため校正用短絡、開放パターンを含む 16 種類のマスクパターンを 9 つ配置する。更に注入イオン種とイオン濃度による特性比較のため表 1 に示すような条件で n 型イオンであるリンを注入するウェハ 3 枚、p 型イオンであるボロンを注入する 3 枚のウェハの計 6 枚のウェハに対し注入を行う。試作時のイオン注入プロセスでは日新イオン機器社製 EXCEED2300AH を用いて量や深さを制御し、各条件に基づいたドーパント注入方式を用いる。注入後は熱処理活性化を行うことで注入するイオンの制御を可能とする。

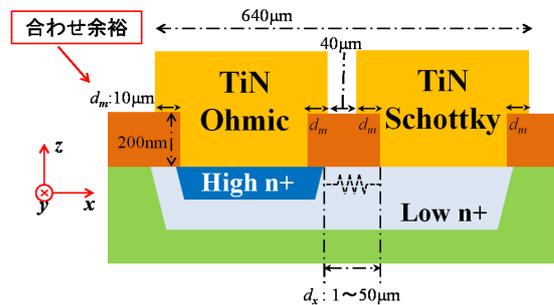


図 3 試作したダイオードの構造と寸法 (xz 面)

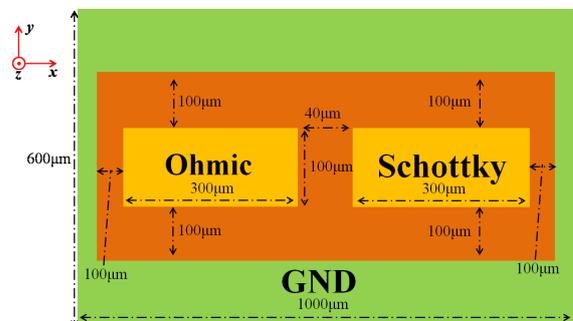


図 4 試作したダイオードの構造と寸法 (xy 面)

表 1 ウェハごとのイオン注入条件

ウェハ	Well イオン条件		Well コンタクト条件	
	注入イオン種	ドーズ [ions/cm ²]	注入イオン種	ドーズ [ions/cm ²]
1	P ⁺	4 × 10 ¹¹	P ⁺	2 × 10 ¹⁵
2		2 × 10 ¹²		
3		7 × 10 ¹²		
4	B ⁺	7 × 10 ¹¹	BF ₂ ⁺	2 × 10 ¹⁵
5		3 × 10 ¹²		
6		1.2 × 10 ¹³		

4. ショットキバリアダイオードの DC 測定

試作を完了したダイオードを図 5 に示す。試作において 6 種類全てのウェハ上にダイオードが形成された。

試作物に対し半導体アナライザを用いて DC 測定を行い直列抵抗や逆方向電流特性を評価する。図 6 に示すようにウェハ上に複数形成したダイオードの中から数点を選択し、両電極にプローブを接触させ測定機側からバイアスをかけ $I_f - V_f$ 特性を測定する。

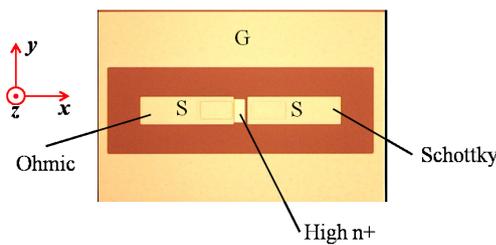


図 5 試作したダイオード

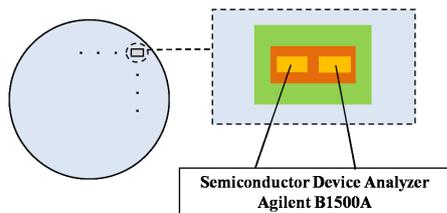


図 6 常温下におけるダイオードの $I_f - V_f$ 測定

4.1 直流 $I_f - V_f$ 特性

6 種類のウェハに対して行った $I_f - V_f$ 特性の測定結果を図 7 及び表 2 に示す。n 型イオンを注入した 3 種のウェハにおいて形成したモデルにおいてダイオードとしての特性を確認した。一方 p 型イオンを注入したウェハでは一部モデルにおいて注入したイオンの特性より逆バイアス印加時に順方向特性が出る、という結果を確認できたものの表面欠陥の問題よりダイオードとして機能するものがほとんど確認されなかった。洗浄プロセスにおいて工程時間を条件によらず統一したことで p 型イオンを注入

したウェハに対し洗浄が十分でなかったことが考えられる。n 型イオンを注入した 3 種に対してはショットキ障壁が材質より導出された値に対しわずかではあるが小さな値となった。このことから試作モデルにおいて界面状態が完全ではなく欠陥が存在すると考えられる。漏れ電流は最大でも数 nA 程度と既製品と比べても遜色ない値となったが直列抵抗は最小でも 66Ω と非常に大きな値となった。同スケールのモデルにおいて解析上数 Ω 程度まで直列抵抗を下げるのが可能であることが示されたため次回プロセスにおいてイオン濃度、電極付近のパターンの見直し及び電極材質の選定によって更なる低減を目指す。

また前述の通り測定結果より電極-半導体境界の界面に欠陥の存在が予測されたため、ウェハ 1~3 に対しシンター処理を行い界面の合金化を行った。シンター処理前後におけるウェハ 1~3 の $I_f - V_f$ 特性の測定結果を比較したグラフを図 8 に示す。結果より直列抵抗が数倍程度となっているものの漏れ電流に対してはそれを上回る抑制効果となった。これより試作モデルに対し逆方向漏れ電流を抑制する目的としてシンター処理の効果は期待できるものの直列抵抗は増加してしまうことから必ずしも有効ではないと考えられる。

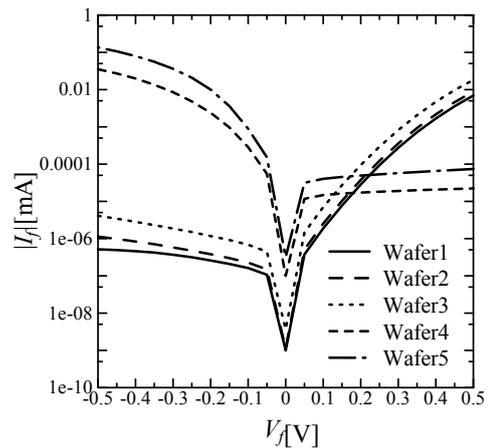


図 7 ウェハごとの $I_f - V_f$ 測定結果

表 2 ウェハごとのショットキ障壁, 直列抵抗導出結果

ウェハ番号	ショットキ障壁 [eV]		直列抵抗 [Ω]	
	最小	最大	最小	最大
1	0.42	0.55	66	555
2	0.44	0.59	115	8300
3	0.43	0.59	67	12800
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	-	-	-	-

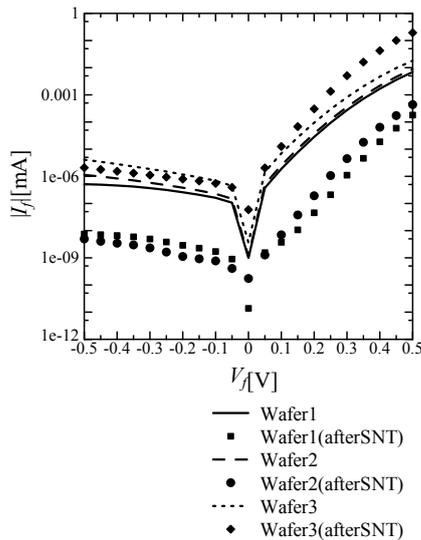


図 8 シンター処理前後の DC 特性比較

4.2 逆方向降伏特性

シンター処理後のウェハ 1~3 に対しイオン濃度と降伏電圧の関係を測定し、対象とした小電力入力に対し適切な降伏電圧を有しているかを確認する。各イオン濃度に対する降伏電圧及び層幅 d_x に対する降伏電圧の変化の一部をそれぞれ図 9 及び図 10 に示す。結果よりイオン濃度に対して降伏電圧は大きく変化したものの層幅に対しては明らかな変化を確認できなかった。このことから層幅に対して空乏層幅が飽和状態となっており、影響を与えなかったものと考えられる。一方、降伏電圧の値については最も小さい値となったウェハ 3 においても約 5V と小電力入力に対し依然として大きな値であったことが確認された。このことから、逆方向特性を維持しつつ更に高濃度のイオン注入によって小電力に注目した低直列抵抗なショットキバリアダイオードをプロセスによって作製可能であると考えられる。

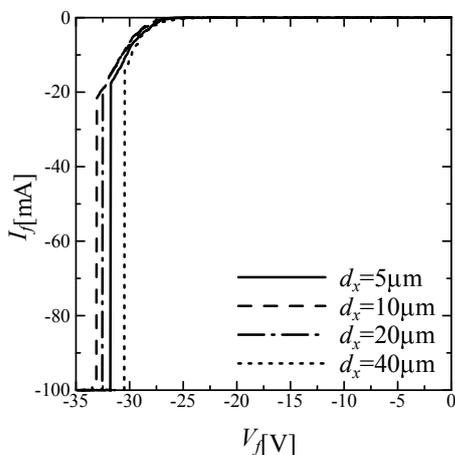


図 9 層幅 d_x ごとの逆バイアス特性 (ウェハ 1)

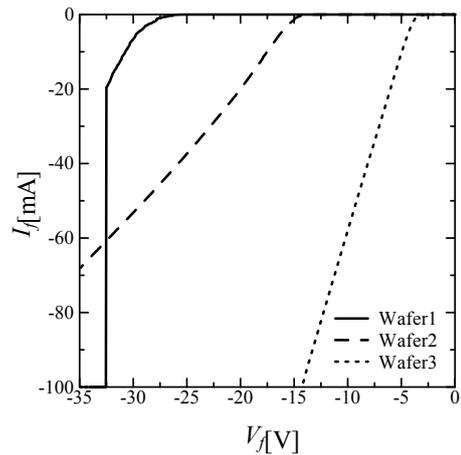


図 10 イオン濃度と逆バイアス特性 ($d_x = 20\mu\text{m}$)

5. まとめ

30GHz 帯エネルギーハーベスティングで用いるレクテナを想定し、小電力入力においても高効率を維持可能な低直列抵抗かつ低順方向電圧で駆動するショットキバリアダイオードの試作を行った。逆方向漏れ電流については既製品と遜色ない数値を記録したものの直列抵抗は既製品に対し約 10 倍程度と大きな値となってしまった。次回試作においてモデルのパターン、注入イオンの濃度及び電極材質の組み合わせを見直すことで直列抵抗を更に低減したショットキバリアダイオードを実現する。

参考文献

- [1] X. Chen, L. Huang, J. Xing, Z. Shi and Z. Xie, "Energy harvesting system and circuits for ambient WiFi energy harvesting," 2017 12th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE), pp. 769-772, Oct. 2017.
- [2] B. Naresh, V. K. Singh and V. Bhargavi, "4.65 GHz wearable rectenna for low power wireless applications," 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), pp. 1-5, Feb. 2017.
- [3] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, P. Carter, S. Yuan, Q. Xu, and Z. Fei, "Matching Network Elimination in Broadband Rectennas for High-Efficiency Wireless Power Transfer and Energy Harvesting," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 5, pp. 3950-3961, May 2017.
- [4] S. Hemour, Y. Zhao, C. H. P. Lorentz, D. Houssameddine, Y. Gui, C.-M. Hu, and K. Wu, "Towards Low-Power High-Efficiency RF and Microwave Energy Harvesting," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 62, no. 4, pp. 965-976, April 2014.

- [5] 篠原 真毅, ”電波エネルギーによる環境発電 (レクテナ), ” 表面技術, vol. 67, no. 7, pp. 353-356, 2016.
- [6] Broadcom 社 HSMS-2850 データシート,
<https://docs.broadcom.com/docs/AV02-1377EN>
- [7] Broadcom 社 HSMS-2860 データシート,
<https://docs.broadcom.com/docs/AV02-1388EN>
- [8] C. R. Valenta, ”Fundamental limitations for Schottky diode RF energy harvesting,” 2015 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), pp. 188-193, Sept. 2015.