

طراحی مفهومی باتری بتاولتائیک GaN به منظور استفاده در ضربان ساز قلب

معصومه محمدیان^۱، سیدامیرحسین فقهی^{۱*}، حسین آفریده^۱

۱- دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده فیزیک و علوم هسته ای

چکیده

ضربان سازهای مصنوعی قلب سیستم‌های الکترونیکی هستند که در مواقع نارسایی یا ایجاد اختلال در مکانیزم طبیعی قلب می‌توانند جهت تنظیم و یا تقویت ضربان آن مورد استفاده قرار گیرند. در کنار پیشرفتهای انجام شده در طراحی مدارات الکترونیکی بکار رفته در این وسیله، توجه به منبع توان آن نیز همواره حائز اهمیت بوده است. در این وسیله نیاز به داشتن منبع توانی با چگالی انرژی بالا، که برای مدت طولانی ولتاژ و جریان پایدار داشته باشد و در ضمن حجم کمی را نیز اشغال کند، ضروری است. از بین منابع توان موجود باتریهای بتاولتائیک به عنوان منابعی مناسب برای دستیابی به این هدف مورد مطالعه و تحقیق هستند.

در این مقاله به طراحی مفهومی و شبیه سازی اجزاء یک قطعه بتاولتائیک و بررسی نتایج حاصل از آن پرداخته شده است. در طراحی مفهومی این قطعه بتاولتائیک، چشمه به صورت لایه ای از ^{63}Ni در بین دو اتصال $p-n$ از نیمه هادی GaN ساندویچ شده است. مدلسازی این قطعه با استفاده از کد MCNP به منظور تعیین میزان جریان الکترونی حاصل از اندرکنش ذرات بتا در اتصالات pn انجام گرفته است.

محاسبات و شبیه سازی بیانگر آن است که مقادیر جریان، ولتاژ و بازده بدست آمده برای این قطعه به ترتیب برابر $1, 2, 7, 1, 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ولت و ۲۵ درصد می باشد. همچنین نتیجه می شود با چینه‌ساز مناسبی از این قطعات در کنار یکدیگر می توان به باتری با جریان، ولتاژ و توان مورد نظر دست یافت.

کلمات کلیدی: باتری بتاولتائیک، ضربان ساز مصنوعی قلب

۱. مقدمه

باتریهای با ولتاژ و جریان پایدار و طول عمر بالا کاربرد وسیعی در پزشکی، صنعت نفت، معدن و تجهیزات فضایی دارند. از آنجا که در موارد مذکور استفاده از باتری های سبک در قطعات الکترونیکی برای موقعیت های خطرناک، با دسترسی سخت و عدم امکان شارژ مجدد آن بدون صرف هزینه های بالا اهمیت دارد استفاده از انرژی هسته ای و تبدیل آن به انرژی الکتریکی یکی از ایده های رسیدن به این اهداف است.

* نویسنده مسئول: سیدامیرحسین فقهی

آدرس: دانشکده فیزیک و علوم هسته ای دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

A.fegghi@aut.ac.ir

تلفن: +۹۸-۲۱-۶۶۴۹۵۵۱۹

فکس: +۹۸-۲۱-۶۴۵۴۲۵۵۰

توان الکتریکی یک باتری هسته‌ای از انرژی واپاشی ماده رادیو اکتیو بکار رفته در آن و طی یک فرایند تبدیل مناسب انرژی، بدست می‌آید. بطور کلی در حالت تئوری، همه ذرات با تابش بتا، آلفا و گاما/ ایکس کم انرژی می‌توانند برای تولید الکتریسیته استفاده شوند. با این وجود، در کار با نیمه هادی ها، برای استفاده های بلند مدت، تنها تابش بتا مناسب است. زیرا مواد نیمه هادی بخصوص در مقابل تابش های آلفا معمولاً بسیار حساس هستند و در ساختار دچار خرابی می‌شوند. از طرفی ایزوتوپ تابش کننده گامای کم انرژی با نیمه عمر به اندازه کافی بالا، برای این کاربرد ها وجود ندارد. اما عملاً، از هر دو نوع رادیوایزوتوپ گسیلنده بتا و آلفا در ساخت باتریهای هسته‌ای استفاده شده است. فرایند تبدیل انرژی واپاشی به الکتریسیته، باتریها را به دو گروه عمده ترموالکتریک و بتاولتائیک تقسیم می‌کند [۱، ۲].

در یک قطعه بتاولتائیک از نیمه هادی به صورت اتصال p-n استفاده می‌شود. حال اگر تابش هسته‌ای وارد ناحیه تهی ایجاد شده در این اتصال شود، در اثر برخورد با اتمهای بلور، زوج الکترون حفره بوجود می‌آید. بدین ترتیب ناحیه تهی کاملاً شبیه یک خازن با صفحات موازی عمل کرده و در آن الکترونها در یک جهت و حفره ها در جهت دیگر حرکت می‌کنند. با اتصال قطعه به یک مدار خارجی، بدون نیاز به منبع تغذیه^۲، الکترونهای گرد آوری شده پالس الکتریکی تولید می‌کنند که دامنه آن با انرژی تابش متناسب است. در طراحی اتصال p-n، مطلوب است پهنای ناحیه تهی به اندازه کافی بزرگ باشد تا بیشتر ذرات بتا، بجای نواحی p و n در درون ناحیه تهی جذب شوند. برای داشتن ناحیه تهی بزرگ باید دست کم یک طرف پیوند ناخالصی سبکی داشته باشد.

۱-۱ چشمه های گسیلنده بتا

حدود دهها رادیوایزوتوپ گسیلنده بتا با نیمه عمر بالای یک سال وجود دارد. انتخاب رادیوایزوتوپ مناسب و عملی از جنبه های مختلف نقش مهمی را در طراحی یک مبدل بتاولتائیک بازی می‌کند و در تعیین آن باید نکاتی را در نظر داشت. اولین فاکتور در انتخاب چشمه، توجه به نوع کاربرد آن است و این خود متأثر از میزان توان خروجی مورد نیاز از باتری می‌باشد. در نتیجه طیف انرژی ذرات گسیل شده که توان مبدل بتاولتائیک، ایمنی و آسیب ناشی از تابش را تعیین می‌کند، از فاکتورهای موثر در طراحی می‌باشد. از دیگر فاکتورهای موثر در انتخاب چشمه، طول عمر مورد انتظار از قطعه مورد نظر با توجه به کاربرد آن است که خود تعیین کننده نیمه عمر چشمه مورد استفاده می‌باشد. اکتیویته مخصوص، انطباق با ملاحظات ایمنی^۳ (بطور مثال در کاربرد ضربان ساز)، میزان آسیب ناشی از تشعشع^۴، ابعاد، میزان سمی بودن ماده رادیواکتیو، اشعه گاما و اشعه ترمزی، هزینه های ساخت، در دسترس بودن رادیوایزوتوپ، خلوص چشمه مورد استفاده و حفاظ سازی لازم برای آن از دیگر مواردی است که باید در انتخاب چشمه در نظر گرفته شوند.

² Self-bias

³ Reliability

⁴ Radiation Damage

۲-۱ نیمه هادی های مناسب

نیمه هادی های رایج در این کاربرد عبارتند از: Ga,Ge,Si و ترکیبات آنها. با استفاده از نیمه هادی های با شکاف باند عریض^۵ مانند ترکیبات سیلیکونی SiC و a-Si:H و یا ترکیبات نیتريدی GaN و AlGaN، می توان به ماکزیمم انرژی باند و مینیمم احتمال جابجایی اتمها و در نتیجه به بازده بالاتر رسید همچنین، نفوذ تابش رادیواکتیو در مواد، به چگالی آن ماده وابسته است. عمق نفوذ تابش در مواد با چگالی کمتر، کوتاهتر می باشد و بنابراین به ضخامت بیشتری از آن ماده برای جذب تابش فرودی نیاز می باشد. برای مثال، از آنجا که چگالی Si تقریباً نصف چگالی GaN است، ضخامت لازم در شرایط یکسان برای آن، دو برابر ضخامت GaN خواهد بود.

۲. مواد و روشها

هدف از این تحقیق، معرفی نوعی باتری بتاولتائیک توان پایین به منظور استفاده در ضربان ساز مصنوعی قلب می باشد که بازده بیشتری نسبت به نمونه های مورد استفاده در گذشته دارد. برای تحلیل میزان شار تابش رادیوایزوتوپ در نواحی مختلف ماده و محاسبه تعداد برهمکنش های مورد نظر از محاسبات مونت کارلو، کد MCNP استفاده شده است.

تعداد جفت الکترون حفره های تولید شده در نیمه هادی در واحد حجم و زمان، را می توان با رابطه

زیر محاسبه کرد [۳،۴]:

$$G = k \lambda n E_{avg} / \epsilon \quad (1)$$

که در آن ϵ انرژی لازم برای یونیزاسیون در نیمه هادی و E_{avg} میانگین انرژی ذرات بتای تابش شده است. k کسری از ذرات بتا می باشد که در تشکیل جفت الکترون حفره شرکت دارند و می توان آن را با استفاده از محاسبات مونت کارلو تعیین کرد. λ ثابت واپاشی و n تراکم ماده رادیواکتیو است که البته می تواند با میزان اکتیویته ماده رادیواکتیو جایگزین شوند. جریان ذرات بتا (I_{β}) نیز با رابطه زیر محاسبه می شود؛

$$I_{\beta} = qGtS \quad (2)$$

که q بار الکترونی، t ضخامت و S مساحت مقطع قطعه است. فرض می شود که تمام الکترون حفره های تولید شده در ناحیه تهی جمع آوری شده اند و برای نواحی خارج از ناحیه تهی نیز احتمال جمع آوری^۶ در نظر گرفته می شود.

این تبدیل انرژی را می توان به بهترین نحو، با یک دیود (p-n junction) ایده ال، همراه با منبع جریان ثابت ناشی از تحریک حامل های اکثریت توسط تشعشع بتا و ایجاد الکترون، بصورت موازی با آن مدل کرد.

⁵ Wide Band Gap

⁶ Collection Probability

توان بدست آمده از مبدل بتاولتائیک به حجم رادیوایزوتوپ مورد استفاده، مقدار انرژی تابش بتا در این حجم و ضخامت ماده نیمه هادی جاذب پرتو نیز بستگی دارد و برای تعیین آن از محاسبات کد MCNP می توان بهره گرفت. بازده نیز با رابطه زیر قابل محاسبه است [۳،۴]:

$$\eta = P_{out}/P_{tot} \times 100\% \quad (3)$$

که در آن P_{out} ماکزیمم توان قابل دستیابی از قطعه است و از حاصلضرب جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و Fill Factor (FF) بدست می آید. P_{tot} از حاصلضرب توان مخصوص قابل دسترس از چشمه (Watt/Ci) و مقدار ماده پرتوزا بر حسب کوری بر واحد سطح، بدست می آید.

۲-۱ اجزاء یک مبدل بتاولتائیک

یک قطعه بتاولتائیک، از یک نیمه هادی (p-n junction) و یک ایزوتوپ تابش کننده بتا تشکیل می شود. در انتخاب چشمه، آنچه که تا کنون در عمل مورد استفاده قرار گرفته است محدود به $^{70}\text{Sr/Y}$ ، ^{147}Pm ، ^3H (Tritium) می شود. در جدول شماره ۱ [۲،۳،۴،۵،۶] ویژگیهای این چشمه ها ارائه شده است. Sr یکی از اولین مواد رادیواکتیوی است که در وسایل بتاولتائیک استفاده می شد و معمولاً برای کاربردهای با انرژی بالا انتخاب خوبی است. گاز تریتیوم، در کاربردهای پزشکی بطور وسیعی استفاده می شود، اما نیمه عمر نسبتاً کوتاه آن کاربردهایش را تا حدی محدود می کند. اگرچه انرژی ذرات بتای ^{147}Pm از ^{63}Ni و تریتم بالاتر است اما نیمه عمر آن پایین بوده و تابش کننده اشعه گاما نیز می باشد. ^{63}Ni دیگر ایزوتوپ رادیواکتیو گسیلنده بتای خالص است که انرژی واپاشی پایین و نیمه عمر بالا، اکتیویته و چگالی توان پایین دارد و به راحتی میتواند در سطح یک نیمه هادی لایه نشانی شود [۲].

جدول ۱. منابع رادیوایزوتوپ مبدل بتاولتائیک

چشمه رادیواکتیو	نیمه عمر (سال)	اکتیویته مخصوص (GBq/g)	ماکزیمم انرژی واپاشی	میانگین انرژی واپاشی	توان مخصوص $\mu\text{Watt/Ci}$
Tritium, ^3H	12.3	357000	18.6 keV	5.7 keV	33.7
^{63}Ni	100	2190	67 keV	17 keV	100
^{147}Pm	2.6	36260	230 keV	73 keV	367
$^{90}\text{Sr/Y}$	28.6 41.52	5050	546 keV 2.283 MeV	196 keV 935 keV	

با مرور ویژگیهایی که برای انتخاب چشمه های رادیوایزوتوپ عنوان شد، ایزوتوپ ^{63}Ni ، از نظر میزان توان مورد نیاز در این کاربرد (حدود چند میکرووات)، نیمه عمر، ماکزیمم انرژی کمتر در مقایسه با

^{90}Sr یک گسیلنده خالص بتا است که به ^{90}Y واپاشی می کند که آن هم یک گسیلنده خالص بتا با نیمه عمر ۶۲ ساعت است؛ بنابراین از فرم $^{90}\text{Sr/Y}$ برای بیان آن استفاده می شود.

انرژی آستانه Radiation Damage اکثر نیمه هادیها، نداشتن تابش گاما (گسیلنده خالص بتا) و در نظر گرفتن ملاحظات حفاظ سازی مناسب می باشد.

در انتخاب نیمه هادی، با در نظر داشتن ویژگی های بیان شده از جمله، مواد با شکاف باند عریض، چگالی بالا به منظور نفوذ بهتر تابش و ... گزینه های مختلفی مانند SiC و GaN در پیش روست. GaN از جمله کریستالهای با شکاف باند عریض است که ماده ای بسیار سخت و از نظر مکانیکی پایدار می باشد و ظرفیت گرمایی^۸ بالایی نیز دارد. همچنین بدلیل مقاومت بالای این ماده در برابر آسیب های تابشی، دیرتر دچار افت ولتاژ شده و در نتیجه ولتاژ پایدارتری خواهد داشت. به همین منظور در ادامه از GaN به عنوان نیمه هادی در طراحی مفهومی و محاسبات استفاده شده است. علاوه بر آن ابعاد و ضخامت لایه ها نیز در تعیین نحوه عملکرد، ولتاژ، جریان، توان و بازده خروجی قطعه مؤثر خواهند بود.

۳. شبیه سازی یک نمونه قطعه بتاولتائیک

محاسبه میزان تولید الکترون-حفره با استفاده از روش مونت کارلو در این شبیه سازی لازم است شار و توزیع مکانی ذرات β واپاشی شده در داخل نیمه هادی تعیین گردد تا بتوان میزان تولید الکترون-حفره را محاسبه نمود. به این منظور از کد MCNP جهت شبیه سازی و ترابرد ذرات β در نیمه هادی و محاسبه میزان انرژی و بار بر جای گذاشته، استفاده شده است. برای شبیه سازی لازم است اطلاعات مربوط به ماده نیمه هادی، ساختار هندسی، چشمه مورد استفاده و همچنین خروجی مورد نظر مشخص شود.

در هندسه در نظر گرفته شده، چشمه بصورت لایه ای از ^{63}Ni در بین دو اتصال p-n از نیمه هادی GaN اصطلاحاً ساندویچ شده است. نحوه کنار هم قرار گرفتن لایه های نیمه هادی و چشمه رادیواکتیو از جهت مجاورت هر یک از نواحی p یا n با چشمه، می تواند دو ساختار مشابه با تفاوت کوچکی در جریان و توان خروجی ایجاد کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد، با توجه به این که قرار گرفتن چشمه رادیواکتیو در جوار ناحیه p که حاوی اتمهای سبکتری نسبت به ناحیه n است، باعث کاهش تضعیف پرتوهای بتا در مسیر رسیدن به ناحیه تهی و در نتیجه بالاتر بودن کارایی قطعه نسبت به حالت دیگر می شود، این ساختار مناسب تر است.

چشمه به صورت لایه ای به ضخامت ۱/۵ میکرون از جنس ^{63}Ni و سطح مقطع کل قطعه نیز ۱ سانتیمتر مربع در نظر گرفته شده است. حد پایین ضخامت رادیوایزوتوپ را توان مورد نیاز متناسب با کاربرد و تکنولوژی تولید آن و حد بالا را خود جذبی چشمه^۹ تعیین می کند (معمولاً بین ۰/۱ تا ۵ میکرومتر) [۷، ۸].

^۸ Large Heat Capacity

^۹ Self-absorption

میزان ناخالصی نواحی n و p نیمه هادی در تعیین پهنای ناحیه تهی و ولتاژ مدار باز اهمیت دارد. در انتخاب میزان ناخالصی باید مصالحه ای بین این مقدار و طول پخش انجام داد [۹،۱۰].

جریان خالص ایجاد شده در قطعه با در نظر گرفتن اثر بازترکیب و احتمال جمع آوری بار در نواحی مختلف بدست می آید. از آنجا که بخش عمده ای از جفت الکترون حفره های تولید شده در مناطق خارج از ناحیه تهی بازترکیب می شوند، توجه به این موضوع اهمیت دارد و باید اثر آن در محاسبات لحاظ شود. همچنین، احتمال جمع آوری الکترون حفره ها برای حاملهای ایجاد شده در ناحیه تهی ۱۰۰ در صد در نظر گرفته می شود و برای نواحی n و p با توجه به فاصله هر نقطه تا ناحیه تی تعیین می گردد.

۴. ارائه نتایج

پارامترهای قطعه بتاولتائیک شبیه سازی شده برای چشمه ^{63}Ni در جدول ۲ ارائه شده است. کارایی بدست آمده برای قطعه مدل سازی شده بیانگر آن است که این قطعه در مقایسه با سایر باتریهای مشابه و بخصوص باتریهای ترموالکتریک (با بیشینه بازده ۱۵٪) دارای بازده نسبتا بالاتری است.

همچنین، به منظور مقایسه مشخصات بدست آمده برای قطعه بتاولتائیک ارائه شده، مقادیر محاسبه شده برای جریان، ولتاژ و بازده با دو نوع از باتری های لیتیومی در جدول ۲ مقایسه می شود [۱۱].

جدول ۲. نتایج شبیه سازی قطعه بتاولتائیک GaN با چشمه ^{63}Ni

	ضخامتهای بهینه μm	Jsc $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Voc Volt	Energy Content mW-hr/mg	Efficiency H	Life Time yr
GaN P-type region N-type region ^{63}Ni	1 3 1.5 (~ 1.3 mg)	1.1	2.7	204.55 (4 years)	25%	>30
Lithium/Iodine	1 mgr	6.1	2.5	0.5		5-10
Lithium-Ion	1 mgr	3.79	2.5	0.3		5-10

۵. بحث و نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهد که استفاده از چنین ساختاری در تجهیزات توان پایین از جمله ضربان ساز قلب، به علل گفته شده و بخصوص بازده بالاتر و امنیت بیشتر به لحاظ برد کم ایزوتوپ بکار رفته می تواند بسیار کارآمد باشد و نیز جایگزین مناسبی برای وسایل ترموالکتریک که بازده پایین تری دارند خواهد بود.

مراجع

- [1] W.E. Matheson, "The Betavoltaic Pacemaker Power Source", Advances in Pacemaker Technology, Springer-Verlag, 401, 1975.
- [2] C. Honsberg, A. Doolittle, M. Allen, C. Wang, "GaN Betavoltaic Energy Converters", IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Florida, 2005
- [3] P. Rappaport, J.J. Loferski, E.G. Linder, RCA Review 17, 100, 1956



- [4] T. Kostas, N.P. Kherani, F. Gaspari, S. Zukotynski, W.T. Shmayda, J. Vac, Sci. Technol. A 16, 893, 1998
- [5] K.E Bower, Y.A. Barbanel, Y.G. Shreter, "Polymers, Phosphors & Voltaics for Radioisotopes Microbatteries", CRC Press, 2002
- [6] E.V. Steinfelds, T.K. Ghosh, M.A. Prelas, R.V. Tompson, S.K. Loyalka, "Development of Radioisotope Energy Conversion Systems– Efficient Radioisotopes Power", Proceedings of ICAPP, Spain, Paper 3196, 2003
- [7] R.G. Little, "Long life radioisotope-powered, voltaic-junction battery using radiation resistant materials", US Patents No. 5440187, 1995
- [8] R.G. Little, "High energy density nuclide-emitter, voltaic-junction battery", US Patent No. 5260621, 1993
- [9] Guo Hang, Amit Lal, "Nanopower Betavoltaic Microbatteries", IEEE Conference on solid state sensors, Actuators and Microsystems, Boston, 2003
- [10] J.S. yuan, J.J. Liou, "Semiconductor device physics and simulation, Plenum Press", 1998
- [11] E. S. Takeuchi, R. A. Leising, "Lithium Batteries for Biomedical Applications", MRS Bulletin, 624-627, 2002