بررسی محدودیتها و عوامل تعیین‌کننده‌ی اندازه باتریهای هسته‌ای بتاولتائیک با مقایسه سلول Pm_2O_3/Si صفحه‌ای و کروی

موسوی خوانساری،سیدمحسن [۱]– فتحی،حسن[۲]* –بختیاری،الهام[۳]

دانشگاه آیت ا...بروجردی، دانشکده علوم پایه ، گروه فیزیک

دانشگاه تبریز ، دانشکده فیزیک ، گروه فیزیک هسته‌ای

دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک،گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله براساس یک مدل تایید شده آزمایشگاهی، ارتباط بین کمترین اندازه ممکن سلولهای بتاولتائیک Pm-147 صفحه‌ای و کروی با پارامترهای باتری نظیر توان،انرژی ذرات بتا،چگالی اتمی،اکتیویته ونیمه‌عمر چشمه و چگالی مبدل بررسی شده است.مقایسه-ای بین کمترین حجم موردنیاز باتری جهت تحویل توان اسمی 3.45×10^{-3} بین باتریهای با ساختار صفحه‌ای و کروی که همه پارامترهای آنها به‌جز شکل هندسی‌اشان شبیه هم می‌باشد صورت گرفته و نشان داده‌ایم که باوجود اتلافهای با منبع مشابه در هردو ساختار، به‌علت هدررفت جهتی بسیار بالا(بیشتر از نصف ذرات بتا) در بتاولتائیک‌های صفحه‌ای متداول، سلول کروی در حجم کوچکتری قادر به تحویل این توان می‌باشد.

کلمات کلیدی: *:سلول بتاولتائیک پرومتیوم-۱۴۷-محدودیت در اندازه-مقیاس وسیله-ساختارهای صفحه‌ای و کروی*

مقدمه :

در مباحث مربوط به باتریهای هسته‌ای، اندازه شهودی‌ترین عاملی است که توسط آن می‌توان طرحهای مختلف این وسایل را باهم مقایسه کرد[1].در یک باتری هسته‌ای اندازه چشمه سوختی، تعیین‌کننده حداکثر ذخیره انرژی و توان تحویلی به مقاومت بار می‌باشد. عواملی نظیر محتوای اسمی کوری چشمه،تعداد کل اتمهای رادیواکتیو موجود در حجم چشمه،توان کلی منتشرشده توسط چشمه، بیشینه انرژی پرتوهای یونیزان و چگالی نیمه رسانا در باتریهایی که از نیمه رساناها استفاده می‌کنند با اندازه وسیله ارتباط تنگاتنگی دارند. برای درک بهتر، به مطالعه موردی سلول بتاولتائیک صفحه‌ای که از تیغه اکسید پرومتیوم رادیواکتیو بعنوان چشمه برروی یک دیود $p-n$ سیلیکونی بهره می‌برد، می‌پردازیم[2]. اگرچه امکان ساخت سلولهای با ساختار کروی هنوز نامشخص است، جهت تحلیل اندازه و مقایسه با ساختار صفحه‌ای، یک باتری کروی فرضی را نیز بررسی می‌کنیم که همه پارامترهای آن به‌جز شکل هندسی‌اش شبیه سلول صفحه‌ای می‌باشد.چشمه

این ساختار بصورت کره‌ای در مرکز قرار دارد ونیمه‌رساناهای نوع-n و p به‌شکل لایه‌های کروی با ضخامتهای مختلف آنرا دربرگرفته‌اند.

روش کار :

متغیرهای مربوط به چشمه پرومتیومی و مبدل سیلیکونی باتری در جدول (۱) آورده شده است[2-4] .در این جدول،α و α_0 ضرایب جذب در سیلیسیوم و خودجذبی،w ، متوسط انرژی برای تولید یک زوج الکترن-حفره ، H_0، اکتیویته ویژه در ابتدای کار و E_g، شکاف باندی سیلیسوم است. می‌توان فاصله‌ای،L ، که در آن ذره پرانرژی تمام انرژی اش را در مبدل از دست می‌دهد با یک تابع توانی به‌شکل زیر نشان داد:

$$L \sim a E_{max}{}^{b} \qquad (1)$$

در این رابطه ، a و b ثابتهایی هستند که به نوع و انرژی ذره پرانرژی و ماده جاذب بستگی دارند، E_{max}هم بیشینه انرژی ذره منتشرشده توسط اتم رادیواکتیو است.

جدول شماره (۱) پارامترهای چشمه اکسید پرومتیوم و سیلیکون.مقادیر پارامترهای چشمه از برگه داده‌های پرومتیوم رادیوایزوتوپ استخراج شده است[2-4].

ρ_{si}	E_g	H_0	w	$t_{\frac{1}{2}}$	ρ_{PM}	α_0	α	E_{max}	E_{av}
$2.33(g/cm^3)$	1.2eV	$678\frac{Ci}{g}$	3.67eV	2.6yr	$6.6\frac{g}{cm^3}$	$1300nm^{-1}$	$380cm^{-1}$	230keV	73keV

برد توقف ذرات بتای $147-Pm$ در ماده نیمه‌رسانا را می‌توان با رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

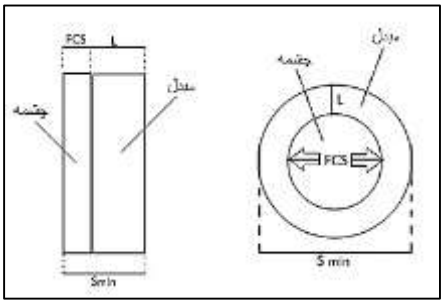
$$L(cm)=\frac{0.412}{\rho}E_{\beta,max}{}^{1.265-0.0954Ln(E_{\beta,max})} \quad 0.01 \le E_{\beta,max} \le 2.5Mev \qquad (2)$$

است. در مورد سلول صفحه‌ای(شکل۱)، حد $\frac{g}{cm^3}$ چگالی ماده برحسب ρ و MeV برحسب $E_{\beta,max}$در این رابطه، L ،و ضخامت توقفی ماده جاذب،FCS پایین اندازه چشمه انرژی رادیوایزوتوپی برابر مجموع اندازه محفظه سوخت، نشان می‌دهیم. برای سلول کروی(شکل ۱)، این پارامتر برابر $S_{min}= FCS + L$است. این مقدار را به‌صورت رابطه‌ی تعیین‌کننده‌ی ذخیره انرژی بیشینه و بیشترین توان تحویلی چشمه است که به تعداد کل FCS می‌باشد. $FCS + 2L$ ، بستگی دارد:N_0اتمهای سوخت موجود در حجم محفظه،

$$FCS_{\text{سلول صفحه‌ای}}=\frac{P\tau}{E_{av}n_{at}A} \qquad (3)$$

$$FCS_{\text{سلول کروی}}=2\left(\frac{3P\tau}{4\pi E_{av}n_{at}}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (4)$$

در این روابط، $P(=3.7\times10^{10}\,CiE_{av})$ توان N اتم رادیواکتیو برحسب W است، τ زمان عمر اصلی یک اتم رادیواکتیو برحسب ثانیه است، E_{av} میانگین انرژی ذرات بتا برحسب J ، $n_{at}(=\frac{N_0}{V})$ چگالی اتمی رادیوایزوتوپ برحسب $/cm^3$اتم و A مساحت سطح سلول برحسب cm^2 است.



شکل (۱).باتریهای هسته‌ای کروی(راست) و صفحه‌ای(چپ).

باتوجه به توضیحات بالا، حدپایین اندازه هرسلول برابر است با:

$$S_{\text{کمینه سلول صفحه‌ای}}=[\frac{P\tau}{E_{av}n_{at}A}+\frac{0.412}{\rho}E_{\beta,max}{}^{1.265-0.0954Ln(E_{\beta,max})}] \quad (5)$$

$$S_{\text{سلول کمینه کروی}}=2[\left(\frac{3P\tau}{4\pi E_{av}n_{at}}\right)^{\frac{1}{3}}+\frac{0.412}{\rho}E_{\beta,max}{}^{1.265-0.0954Ln(E_{\beta,max})}] \quad (6)$$

نتایج:

با استفاده از روابط بالا می‌توان کمترین اندازه ممکن هر سلول با متغیرهای چشمه و مبدل خاص را بدست آورد.مقادیر این پارامترها برای باتری صفحه‌ای و کروی در جدول(۲)و(۳) نشان داده شده است.

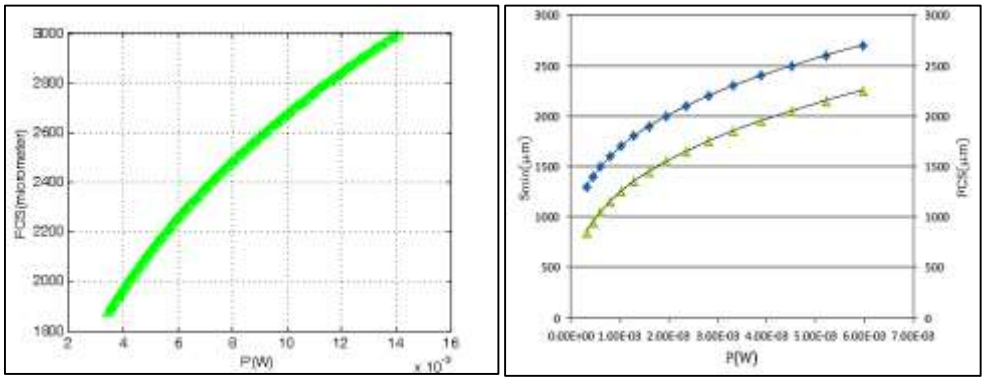
جدول شماره(۲). پارامترهای محاسبه شده مربوط به اندازه سلول صفحه‌ای.

FCS (μm)	L (μm)	$S_{min}(\mu m)$	$V_{\text{چشمه}}(\mu m)^3$	$V_{min,\text{چشمه+مبدل}}(\mu m)^3$
12.09	224	236.09	3.45×10^9	6.73×10^{10}

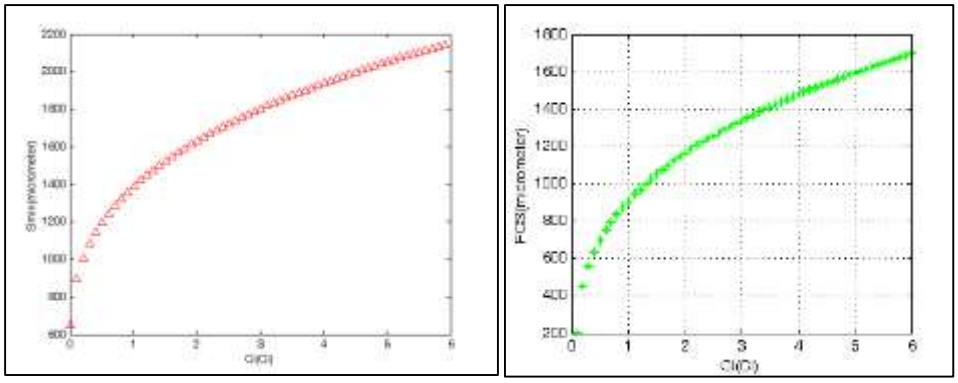
جدول شماره (۳). پارامترهای محاسبه شده مربوط به اندازه سلول کروی

FCS (μm)	L (μm)	$S_{min}(\mu m)$	$A_{\text{چشمه}}$ (μm^2)	$V_{\text{چشمه}}(\mu m)^3$	$A_{min,\text{چشمه+مبدل}}(\mu m)^2$	$V_{min,\text{چشمه+مبدل}}(\mu m)^3$
1874.26	224	2322.26	1.10×10^7	3.45×10^9	1.69×10^7	6.55×10^9

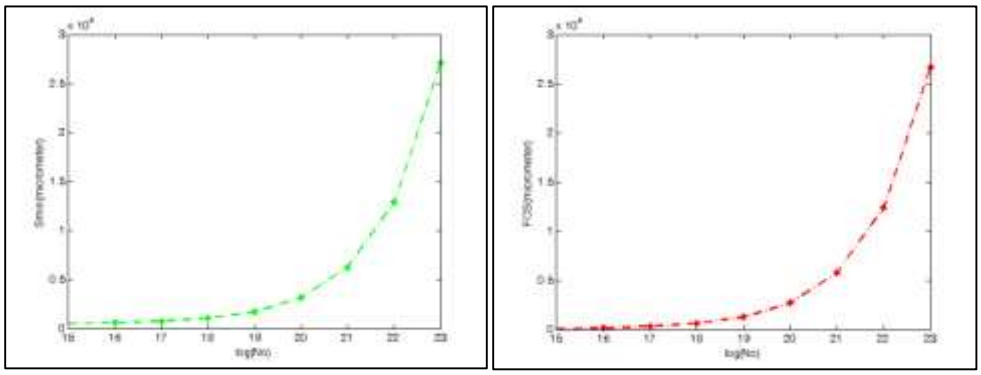
در بتاولتائیکها،چشمه ذرات یونیزان هم می‌تواند برروی مبدل قرارگیرد(چشمه صفحه‌ای) و هم می‌تواند درون حجم وسیله جاسازی شود(چشمه حجمی).جدولهای بالا نشان می‌دهند که کمترین حجم جهت تولید یک توان 3.45×10^{-3} واتی باتری صفحه‌ای برای سلول صفحه‌ای برابر $6.73 \times 10^{10}(\mu m)^3$ و برای سلول کروی برابر $6.55 \times 10^9(\mu m)^3$ می‌باشد.



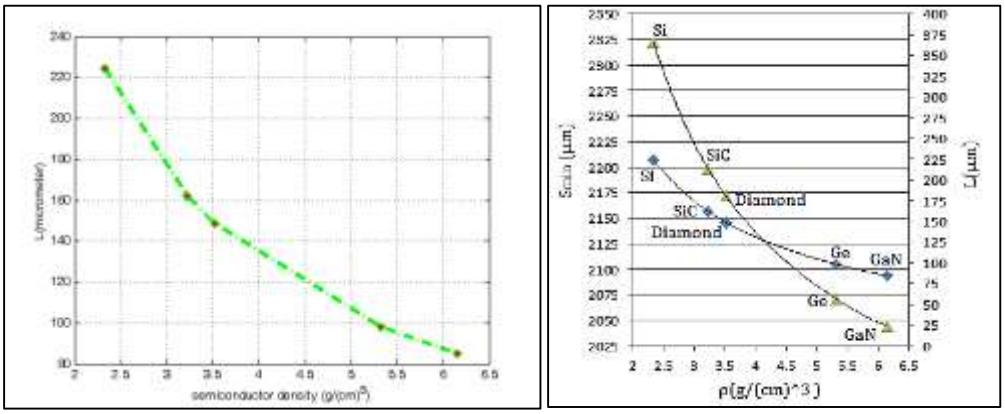
شکل (۲). S_{min} و FCS به‌عنوان تابعی از توان برای باتری کروی.



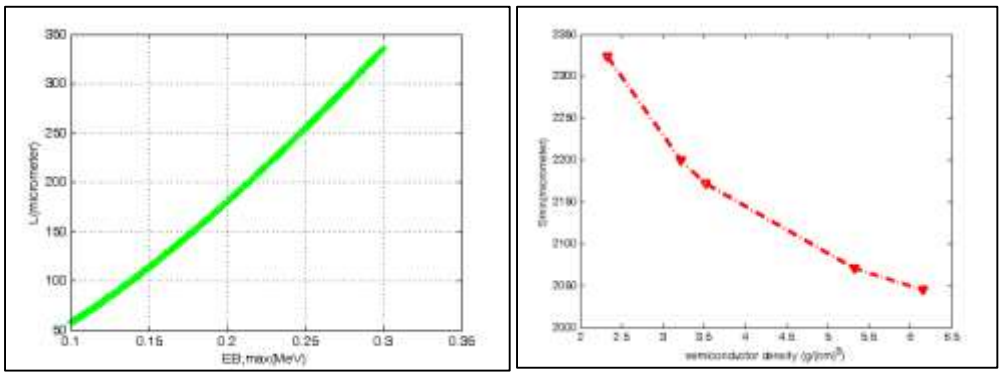
شکل(۳).تأثیر فعالیت چشمه بر S_{min} و FCS برای باتری کروی.



شکل (٤).تأثیر تعداد اتم‌های سوخت موجود در چشمه بر S_{min} و FCS برای باتری کروی.



شکل(۵). L به‌عنوان تابعی از چگالی نیمه‌رسانا برای باتری کروی(راست) و برای نیمه‌رساناهای مختلف(چپ).



شکل(6). L به‌عنوان تابعی از بیشینه انرژی ذرات بتا برای باتری کروی(راست) S_{min} برحسب چگالی نیمه‌رسانا(چپ).

بحث ونتیجه گیری :

یکی از اساسی‌ترین موضوعات در طراحی یک باتری اندازه کلی سلول و ارتباط آن با بقیه پارامترها است.این موضوع وقتی بیشتر حائز اهمیت می‌شود که بدانیم اصولا در مکانهای خاصی نیاز به وجود سلولی با اندازه‌های بسیار کوچک هست و لذا بایستی نوع چشمه و مبدل و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آنها بر این اساس انتخاب شود. درشکل‌های۲تا٦ ارتباط بین محتوای اسمی کوری چشمه،تعداد کل اتمهای سوخت در حجم محفظه،توان کلی ایجاد شده توسط چشمه رادیواکتیو،بیشینه انرژی ذرات بتا و چگالی نیمه‌رسانا با اندازه سلول کروی نشان داده‌شده‌است.همانطور که انتظار می‌رود، رابطه مستقیمی بین اکتیویته‌ی چشمه و تعدا کل اتمهای سوخت با اندازه سلول وجود دارد.برای تولید توانهای بیشتر، به باتریهای با اندازه‌های بزرگتر نیازاست و استفاده از چشمه‌هایی که ذرات پرانرژی‌تری منتشر می‌کنند،اندازه باتری را افزایش می‌دهد.از طرف دیگر،کاربرد نیمه‌رساناهای با چگالی بیشتر موجب می‌شود اندازه موردنیاز برای مبدل و در نتیجه اندازه کل سلول کاهش یابد. در باتریهای صفحه‌ای مقدار قابل‌توجهی انرژی هدر می‌رود.ساختار هندسی سلولهای کروی به‌گونه‌ای می‌باشد که تمام ذرات یونیزان چشمه وارد مبدل می‌شوند و به این دلیل این سلولها نسبت به سلولهای صفحه‌ای، توانایی تولید توانهای خاص در حجم کوچکتری را دارند.البته بایستی توجه نمود که هدررفت ناشی از خودجذبی یا ناشی از سایر عوامل در هردونوع ساختار وجود دارد.

سپاسگزاری:

این مقاله در قالب طرح پژوهشی مصوب در دانشگاه آیت ا... بروجردی با کد رهگیری۱٦۸۱٤٦-۱٥٦٦٤ نوشته شده است لذا نویسندگان مراتب امتنان خود را از کادر دانشگاه اعلام می‌دارند.

مراجع :

[1] B. Liu, K. P. Chen, N. P. Kherani, and S. Zukotynski, “Power-scaling performance of a three-dimensional tritium betavoltaic diode,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no. 23, pp. 233112-1–233112-3, 2009.
[2] L. Wei, “Parametric studies and optimization of the beta-voltaic cell—I. Short-circuit current,” *Solid-State Electron.*, vol. 17, no. 10, pp. 1091–1098, Oct. 1974.
[3] H. Flicker, J. J. Loferski and T. S. Elleman, *IEEE Trans*. ED-11, 2 (1964).
[4] J. H. Jarrett and H. H. Van Tuyl, “Promethium Isotopic Power Data Sheets”, *Battelle Memorial Institute,* (May 1970).