بهینه سازی پارامترهای شش قطبی مغناطیسی در چشمه یونی ECR

محمّدی، سید مصطفی*(۱) – صادقی، مهدی(۲) – حمیدی، سعید(۳)

(۱) سازمان انرژی اتمی ، پژوهشگاه تحقیقات کشاورزی کرج

(۲) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم وفنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

(۳) دانشگاه اراک، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

هدف اصلی این مقاله بهینه‌سازی پارامترهای شش قطبی مغناطیسی در چشمه یونی ECR (Electron Cyclotron Resonance) است. یون‌های با بار بالا معمولاً توسط چشمه یونی ECR تولید می‌شوند. بزرگی و توزیع میدان مغناطیسی نقش مهمی در عملکرد چشمه یونی ECR دارند. میدان مغناطیسی چشمه یونی ECR شامل دو مؤلفه شعاعی و محوری است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی شعاعی نقش مهمّی در تولید یون‌های با بار بالا ایفا می‌کند. در این مقاله ما با استفاده از کد FEMM به بررسی و بهینه کردن میدان مغناطیسی شعاعی در چشمه یونی ECR می‌پردازیم. هدف استفاده و توسعه تکنیک MMPS (Modified MultiPole Structure) می‌باشد. این روش بعنوان روشی نسبتاً ساده و ارزان برای اصلاح و بهینه کردن ساختار چند قطبی مغناطیسی مطرح است.

کلمات کلیدی: (چشمه یونی ، ECRIS ، چند قطبی مغناطیسی ، FEMM ، ساختار هلبچ گونه)

مقدمه:

تاریخچه چشمه یونی ECR به دهه ۱۹۶۰ بر می‌گردد. در حقیقت نخستین چشمه های یونی ECR ابزارهایی جهت تحقیقات همجوشی هسته‌ای بودند که ر.جلر آنها را به چشمه یون تبدیل کرد. در مراجع [۳-۱] تاریخچه‌ای کامل از چشمه های یونی ECR آمده است. پرتوهای یونی با انرژی بالا بمنظور تحقیقات فیزیک هسته‌ای و برهم‌کنش ذرات در بسیاری از آزمایشگاههای شتابدهنده در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این در تحقیقات صنعتی مانند لیتوگرافی پرتوهای یونی، اصلاح خواص نیمه رساناها و کاربردهای پزشکی مانند درمان انواع مختلف سرطانها، ساخت رادیو داروها و درمان با پرتو یون نیز ازچشمه یونی ECR استفاده می‌شود. همانطور که می‌دانیم، در شتابدهنده‌های چرخه‌ای انرژی نهایی ذره با توان دوّم بار (q^2) متناسب است. در نتیجه استفاده از یون‌های با بار زیادتر موجب کوچکتر شدن ابعاد شتابدهنده می‌شود. بزرگی و آرایش میدان مغناطیسی نقش مهمی در محدود سازی بار در چشمه یونی ECR دارد.

مناسبترین راه برای ایجاد میدان‌های مغناطیسی استفاده از آهنرباهای دائمی است. برای این منظور به علّت صرفه جویی در زمان و هزینه، باید قبل از ساخت یک آهنربا ابتدا ابعاد و مشخصات بهینه آن را با استفاده از شبیه‌سازی بدست آوریم. در این مقاله از کد کامپیوتری FEMM جهت شبیه‌سازی میدان مغناطیسی استفاده شد. در ادامه با استفاده از نتایج شبیه‌سازی ساختار مناسب میدان مغناطیسی چشمه یونی ECR را بدست آوردیم.

روش کار:

در سال ۱۹۸۷ جلر و همکارانش قوانین نیمه تجربی موسوم به قوانین مقیاس بندی را توسعه دادند که در آن وابستگی برخی پارامترها به عملکرد چشمه یونی ECR را پیشگویی کردند [٤]. مهم‌ترین این قانون‌ها بخش مربوط به فرکانس میکروموج است، یعنی شدت جریان یون خروجی متناسب با توان دوّم فرکانس اعمال شده به دستگاه می‌باشد: $I_q \propto f^2$. این رابطه مهم‌ترین انگیزه ما در استفاده از فرکانسهای میکروموج تا حد ممکن بالاتر می‌باشد. فرکانس (f) و شعاع چرخشی ذره (r) با استفاده از رابطه نیروی لورنتس بدست می‌آیند:

$$r = \frac{mV_\perp^2}{qB} \qquad (۱)$$

$$f = \frac{qB}{2\pi m} \qquad (۲)$$

در روابط (۱) و (۲) m و q جرم و بار ذره باردار، B قدرت میدان الکتریکی و $V_\perp^2$ مؤلفه عمودی سرعت ذره می‌باشند. در چشمه یونی ECR با یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت (اما مستقل از زمان) مواجه هستیم [٥]. برای محبوس سازی یک ذره باید زاویه حرکت آن نسبت به محور دستگاه کمتر از α_0 باشد:

$$\alpha_0 = \arcsin\left[\frac{B_{min}}{B_{max}}\right]^{1/2} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) B_{min} و B_{max} بترتیب کمینه و بیشینه قدرت میدان مغناطیسی در چشمه یون می‌باشند. در چشمه یونی ECR محبوس سازی در دو راستای محوری و شعاعی می باشد. تمرکز این کار مطالعه و بهینه‌سازی محبوس سازی شعاعی با استفاده از کد FEMM می‌باشد. کد کامپیوتری FEMM ابزاری کارآمد جهت شبیه‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد [٦]. این کد از روش المان محدود جهت تعیین بزرگی و جهت میدان مغناطیسی در هر نقطه از هندسه مورد نظر استفاده می‌کند. کد FEMM علاوه بر شبیه‌سازی میدان الکتریکی و مغناطیسی قادر به محاسبه شارش گرما و جریان نیز می‌باشد. از ویژگی‌های مهم این کد

میتوان به امکان تعریف مواد مختلف جهت ساخت آهنربا و تعیین زاویه مغناطش هر قطعه اشاره کرد. همچنین این کد امکان تعریف مواد جدید را نیز در اختیار ما قرار می‌دهد.

نتایج :

چند قطبی‌ها اثر آیینه‌ای را در جهت شعاعی برای ما ایجاد می‌کنند. شکل شماره (۱) شبیه‌سازی چند قطبی‌های مختلف که بوسیله کد FEMM بدست آمده را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی خواص هر کدام از این چندقطبی‌ها و مقایسه بین آنها می‌پردازیم:

۱- دو قطبی

این نوع از چند قطبی دارای یک میدان مغناطیسی همگن و ثابتی است و به همین دلیل اغلب از آن در خم کردن پرتوها و جدا کردن یون‌هایی که نسبت جرم به بار (M / Q) مختلفی دارند استفاده می‌شود.

۲- چهار قطبی

چهار قطبی‌های مغناطیسی اغلب برای کانونی کردن پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزایش میدان نسبت به شعاع سبب ایجاد خاصیت آیینه‌ای در این مورد می‌شود. بدلیل راندمان پایین در خروج یون‌های با بار بالا، از این ساختار در طراحی‌های مدرن چشمه یونی ECR استفاده نمی‌شود.

۳- شش قطبی

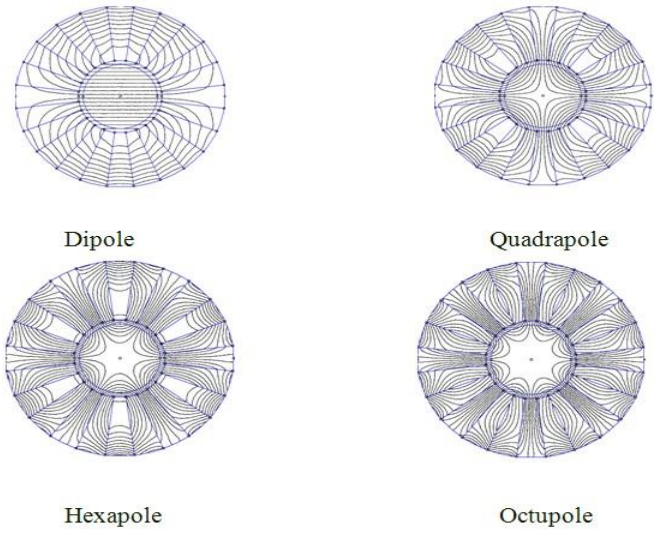
چنین ساختاری معمولاً در سنکترونها وحلقه های انباشت استفاده می‌شود. این ساختار، کیفیت بالای پرتو را حفظ می‌کند. در ساختارهای شش قطبی قدرت میدان مغناطیسی بصورت تابعی از r^2 تغییر می‌کند.

٤- هشت قطبی

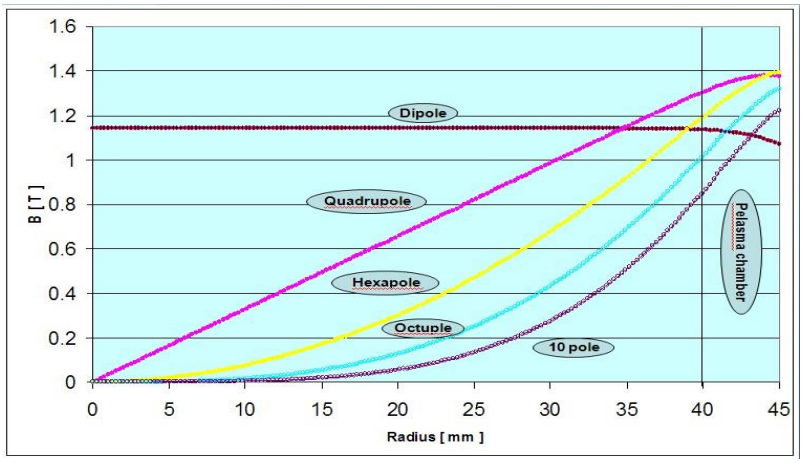
هشت قطبی‌ها معمولاً در شتابدهنده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از موارد استفاده از آنها در اثر لاندائو درحلقه‌های انباشت است [۷]. افزایش قدرت میدان مغناطیسی در هشت قطبی به صورت r^3 می‌باشد.

در چشمه یونی ECR، معمولاً از شش قطبی استفاده می‌شود. با وجود آنکه در مورد هشت قطبی افزایش میدان تابعی از r^3 است اما همانطور که در شکل شماره (۲) نشان می دهد، در مورد شش قطبی ماکزیمم میدان در دیواره پلاسما بیشتر است. این بمعنی بیشتر بودن ضریب آیینه‌ای و محبوس سازی بهتر می‌باشد.

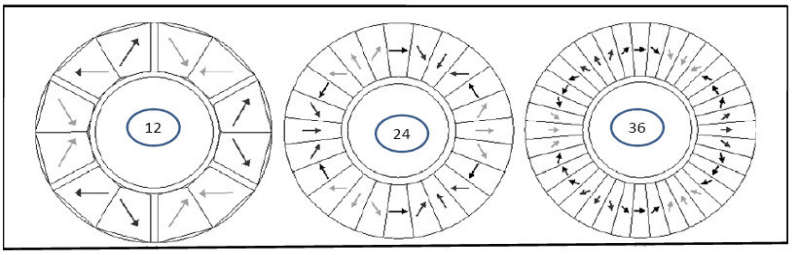
در چشمه‌های یونی ECR جدید معمولاً از ساختارهای شش قطبی استوانه‌ای هلیچ گونه (HB)، مطابق شکل شماره (۳)، استفاده می‌شود. این نوع از شش قطبی‌ها معمولاً در انواع ۱۲، ۲٤ و ۳٦ تکه‌ای ساخته می‌شوند (شکل شماره ۳ را ببینید). ساختارهای ۲٤ و ۳٦ تکه‌ای به دلیل استفاده از مواد مغناطیسی بیشتر ماکزیمم میدان قابل دسترسی بالاتری دارند. همانطور که در شکل شماره (٤) می‌بینید در مورد ۳٦ تکه‌ای میدان کمی بالاتر از مورد ۲٤ تکه‌ای است.



شکل شماره (۱) طرح کلی از چند قطبی‌ها

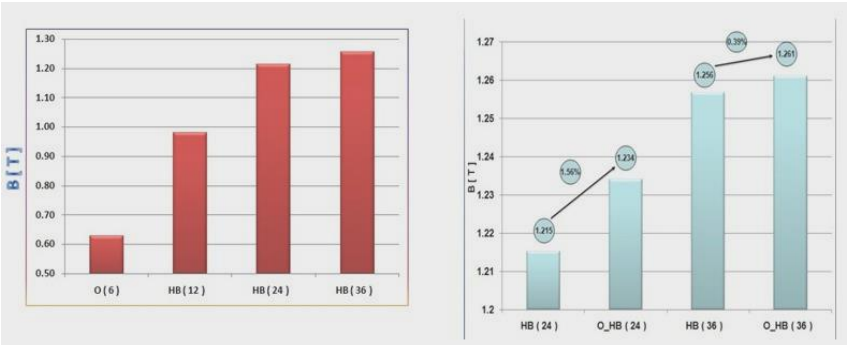


شکل شماره (۲) شکل میدان مغناطیسی برای چندقطبی های مختلف



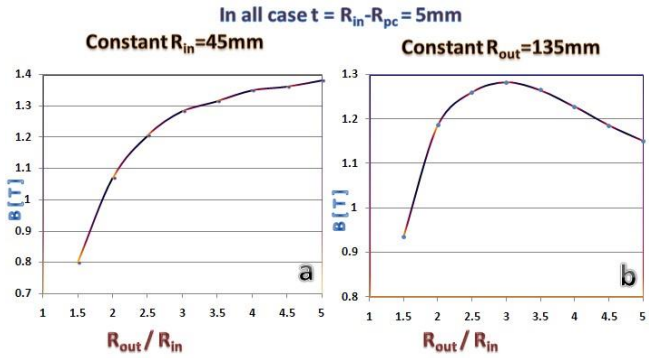
شکل شماره (۳) ساختارهای هلبچ گونه

اصلاح زاویه مغناطش آهنرباها (ساختار O-HB) ماکزیمم میدان مغناطیسی را افزایش می‌دهد. پارامتر مهم در ایجاد این ساختار زاویه افست، زاویه بین بردار شعاعی (در دستگاه استوانه‌ای) و بردار مغناطش، می‌باشد. شکل شماره (۵) میزان افزایش قدرت میدان مغناطیسی را در ساختار O-HB نشان می‌دهد.



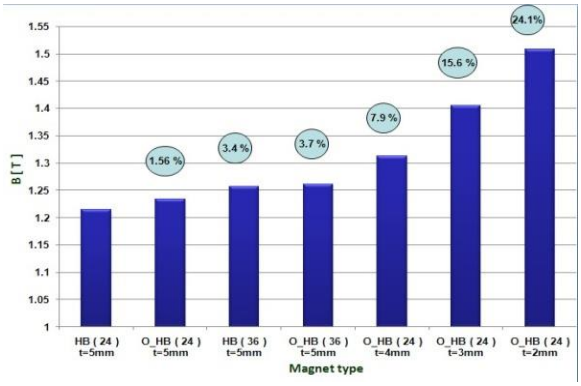
شکل شماره (۵) بهبودی میدان مغناطیسی بعلت اصلاح زوایای مغناطش شکل شماره (٤) مقایسه بین انواع مختلف شش قطبی

در طراحی چشمه یونی ECR، ابعاد چشمه از نظر هزینه و دشواری ساخت اهمیت بالایی دارد. در شکل شماره ٦ (a) شعاع داخلی آهنربای دائمی (R_{in} = 45 mm) ثابت در نظر گرفته شده و شعاع خارجی (R_{out}) آن تغییر می‌کند. در شکل شماره ٦ (b) این کار را بعکس کردیم، بطوری که این‌بار شعاع خارجی ثابت بوده و شعاع داخلی تغییر می‌کند. در هر دو مورد ضخامت دیواره اتاقک پلاسما را ثابت نگه داشتم (t = 5 mm). همانطور که در شکل (a) می‌بینید، با ثابت ماندن (R_{in}) ماکزیمم میدان در دیواره اتاقک پلاسما رشد کندی را ادامه می‌دهد. در شکل (b) می‌بینیم که مقدار ماکزیمم میدان مغناطیسی بعد از رشد اولیه دوباره کاهش می‌یابد. در منابع ECR بعلت محدودیت اندازه و اینکه شش قطبی باید در داخل آهنربا های سیم لوله‌ای محوری قرار گیرد شعاع خارجی را معمولاً نمی‌توان خیلی بزرگ در نظر گرفت.



شکل شماره (٦) ماکزیمم میدان مغناطیسی در دیواره اتاقک پلاسما به صورت تابعی از نسبت R_{out}/R_{in}

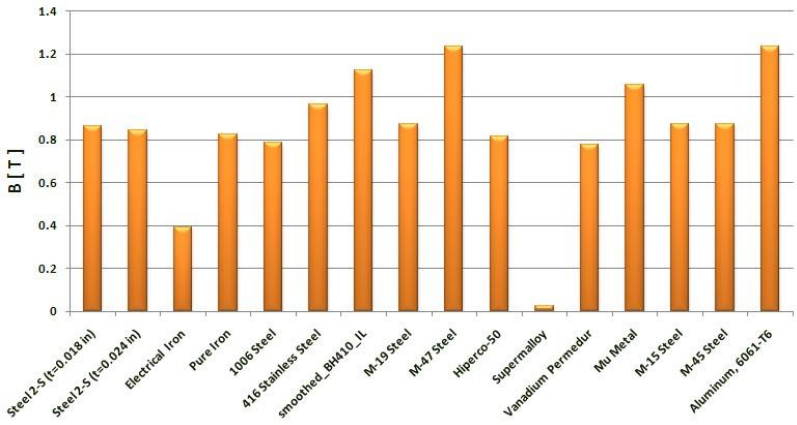
ضخامت جداره اتاقک پلاسما پارامتری تعیین کننده در میزان ماکزیمم میدان مغناطیسی دیواره اتاقک پلاسما دارد.در شکل شماره (۷) اثر ضخامت بر روی قدرت میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد کاهش ضخامت سبب افزایش قدرت میدان مغناطیسی می‌شود.



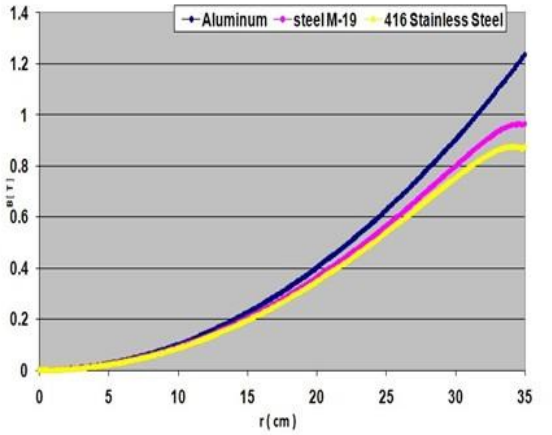
شکل شماره (۷) قدرت میدان مغناطیسی در دیواره اتاقک پلاسما به صورت تابعی از ضخامت دیواره و نوع شش قطبی

یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی چشمه یونی ECR، جنس دیواره اتاقک پلاسما است. در ادامه به سه دلیل برای انتخاب آلومینیوم در ساخت دیواره اتاقک پلاسما اشاره می‌کنیم: (i) نتایج شبیه‌سازی شکل شماره (۸) نشان می‌دهد که استفاده از آلومینیوم در ساخت دیواره اتاقک پلاسما سبب می‌شود که قدرت میدان مغناطیسی در دیواره اتاقک پلاسما بیشینه شود. (ii) یکی از دلایل دیگر استفاده از آلومینیوم در ساخت جداره اتاقک پلاسما رشد هموار آن و بودن ماکزیمم در محل جداره اتاقک پلاسما است. همانطور که شکل شماره (۹) نشان می‌دهد در مورد استیل قبل از رسیدن به دیواره اتاقک پلاسما، منحنی تغییرات B ثابت شده و اثر آیینه‌ای از بین می‌رود. (iii) عامل دیگری که در عملکرد منابع یون ECR نقش مهمی دارد چگالی الکترونی است. آلومینیوم (بهمراه لایه اکسید آن (Al_2O_3)) بعلّت داشتن ضریب نشر الکترون‌های ثانویه (δ) بالاتر باعث افزایش چگالی الکترون می‌شود (جدول ۱ را ببینید).

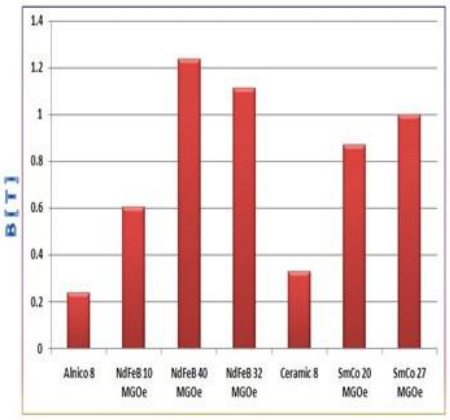
در انتها جنس ماده سازنده آهنربا را بررسی کردیم. شکل شماره (۱۰) نتایج شبیه‌سازی برای مواد مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که می‌بینید استفاده از آلیارژ NdFeB 40 بیشترین میزان قدرت میدان مغناطیسی را ایجاد می‌کند.



شکل شماره (۸) ماکزیمم میدان مغناطیسی در دیواره اتاقک پلاسما به صورت تابعی از جنس دیواره اتاقک



شکل شماره (۹) تغیرات میدان مغناطیسی اتاقک پلاسما



شکل شماره (۱۰) تغییر ماده تشکیل دهنده آهنربا

جدول شماره (۱) ضریب گسیل الکترونهای ثانویه (δ) بهمراه بهینه انرژی برخوردی

Material	Al	C (soot)	Cu	SiO_2	Al_2O_3	MgO
δ	1.0-1.2	0.45	1.3	2.1-4	2-9	3-15
E_{max} [eV]	300	500	600	400	-	400-1500

بحث و نتیجه‌گیری:

بر اساس قوانین نیمه تجربی که توسط جلر معرفی شد ($I \propto f^2$) مستقیم‌ترین راه برای بهبود عملکرد چشمه یونی ECR استفاده از فرکانس کاری بالاتر می‌باشد. با استفاده از فرکانس کاری بالاتر نیاز به تولید میدان‌های مغناطیسی قوی‌تر برای محدود کردن پلاسما احساس شد. این محدود سازی مغناطیسی با چالش تکنولوژیکی در ساخت آهنرباهای دائمی با قدرت بالاتر مواجه است. در این کار بهینه‌سازی پارامترهای آهنرباهای شش قطبی با استفاده از کد FEMM مورد توجه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که استفاده از ساختار هلبچ گونه (HB) در ساخت آهنربای شش قطبی به میزان زیادی بیشینه قدرت میدان مغناطیسی را افزایش می‌دهد. همچنین با ایجاد اصلاحاتی در زوایای مغناطش (ساختارهای O-HB) می‌توان میزان بهبودی را باز هم افزایش داد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که مقدار بهینه نسبت R_{out} / R_{in} در حدود ۳ می‌باشد. بهترین ماده برای استفاده در ساختمان آهنربای شش قطبی آلیاژ NdFeB 40 است. استفاده از پوششی از جنس آهن در خارج آهنربا علاوه بر کاهش میدان‌های مغناطیسی سرگردان بیرونی، بیشینه قدرت میدان مغناطیسی داخل دیواره اتاقک پلاسما را به میزان 0.13 % (برای ضخامت 1 mm) افزایش می‌دهد. آلومینیوم علاوه بر اینکه بیشینه میدان مغناطیسی بالاتری ایجاد می‌کند، ضریب گسیل الکترون ثانویه بالاتری نیز دارد.

مراجع:

[1] R. Geller, Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas, Institute of Physics Publishing, London, (1996), ISBN 0740301074.

[2] R. Geller, Proceedings of the 15th International workshop on ECR ion sources, Jyväskylä, (2002), p. 1.

[3] J. Arianer and R. Geller, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. Vol. 31, (1981), p. 19.

[4] R. Geller, F. Bourg, P. Briand, J. Debernardi, M. Delaunay, B. Jacquot, P. Ludwig, R. Pauthenet, M. Pontonnier, P. Sortais, International Conference on ECR Ion Sources and their Applications, East Lansing, USA, (1987).

[5] Y. K. Kwon and C. S. Lee, Design of the Magnetic System for an Electron Cyclotron Resonance Ion Source Based on a Novel “Volume-Type" Concept, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 39, (2001), pp. 604-608.

[6] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics," Version 3.2, Build 3Dec02, http://femm.foster-miller.net/index.html .

[7] Proceedings of CERN Accelerator School – Fifth general accelerator course, CERN 94-01, ISBN 92-9083-057-3.