تاثير شحنة الفراغ على تصميم قاذف الكتروني باستخدام عدسة كهروستاتيكية مغمورة خماسية الاقطاب

بشرى هاشم حسين
قسم علوم الفيزياء / كلية التربية للعلوم الصرفة (ابن الهيثم) / جامعة بغداد

استلم البحث في 28 تشرين الثاني 2011 ، قبل البحث في 21 ايار 2012

الخلاصة

صمّمت عدسة كهروستاتيكية خماسية الاقطاب تعمل في حالة التكبير الصفري لاستخدامها عدسة معجلة في تصميم القاذف الالكتروني بالاستعانه طرائق تصميم العدسات وهي طريقة التحليل التي تعد من الطرائق المهمة والشائعة الاستخدام في تصميم العدسات، فلقد تم اولا اختيار شكل مناسب لاقطاب هذه العدسة، ومن ثم حساب توزيع الجهد المحوري على هذه الاقطاب من خلال حل معادلة بوزان،ومن خلال حساب الجهد المحوري ومعادلة المسار المحوري تمكنا من دراسة الخواص البصرية من بعد بؤري ومعاملات الزيوغ (الكروية واللونية) واخيرا حساب خواص القاذف الذي تم تصميمه اذ بينت الحسابات امكانية تجهيز تيار $4*10^{-4}$ A من خلال استخدام راس كاثود ذي نصف قطر r=100 nm

الكلمات المفتاحية : العدسات الالكتروستاتيكية، شحنة الفراغ، القاذف الالكتروني، معاملات الزيوغ الكروية واللونية، طريقة العناصر المتناهية (Finite Element Method)

المقدمة

تُعد البصريات الإلكترونية فرعاً من فروع علم الفيزياء الإلكترونية الذي يتعامل مع حركة الجسيمات المشحونة(الإلكترونات أو الأيونات) في المجالات الكهربائية والمغناطيسية، من حيث انتشار و إنتاج وانتقال و تبئير الحزم الإيونية و الإلكترونية. ان أي مجال الكتروستاتيكي متماثل محوريا هو عدسة الكتروستاتيكية . وان المجالات الالكتروستاتيكية تنتج من مجموعة من الأقطاب ذي جهود ملائمة (أي ان لكل قطب جهد) وان هذه العدسات تستخدم لتبئير الحزم الالكترونية[1].

تعد القاذفة الإلكترونية المصدر الرئيس للحزمة الإلكترونية والجزء المهم في أي نظام بصري إلكتروني، تتألف القاذفة من مصدر لانبعاث الإلكترونات الحرة (Free electron) الذي يمثل الكاثود وأقطاب لتشكيل الحزمة (Forming electrode) والسيطرة عليها وتركيزها وتعجيلها التي تمثل الأنود.

يستخدم القاذف الالكتروني في عدد كبير من الاجهزة منها قاذف الرادار (Radar gun) شاشة الكمبيوتر والتلفاز (CRTs) وغيرها [2] .

إن انتشار استخدام الكومبيوتر في التصاميم النظرية أدى إلى التوسع الكبير في البحوث والدراسات في مجال تصميم منظومات البصريات الإلكترونية فلقد قام Munro & Smith عام 1986 بوضع برامج حاسوبية جديدة لتطوير التصاميم المتعددة والمتنوعة لأنظمة الحزم الإلكترونية والايونية وباستخدام طرائق رياضية مختلفة مثل طريقة كثافة الشحنة (Charge Density Method) وطريقة العناصر المتناهية (Finite Element Method (FEM)) وذلك لحساب توزيع المجال على العدسات الالكترونية و الخواص البصرية لها [3] .

في عام 2001 قامت الباحثة Al-Mudarris بدراسة في مجال البصريات الالكترونية، اذ تركز البحث على محاكاة تصميم منظومة نقل وتبئير بصرية –ايونية مكونة من مختلف انواع العدسات الكهروستاتيكية تعمل باطوار وظروف تكبير مختلفة[4]، في عام 2008 قام Xiaowei Gu et al , بتصميم قاذف الكتروني كاثوده من البلازما وتم استخدامه في المايكروويف العالي الكهربائية[5] ، في عام 2011 Nehra et al تم تصميم ومحاكاة وتبئير قاذف الكتروني باستخدام OPERA 3D [6]

هدف الدراسة الحالية تصميم عدسة مغمورة تعمل قاذفا" الكتروني حيث اذ تصمّمت العدسة باستخدام طريقة التحليل (Analysis) تعد هذه الطريقة الاكثر استخداما في تصميم العدسات الكهروستاتيكية، اذ يبدا" المصمم في هذه الطريقة بعناصر معينة (الاقطاب) ويحاول ان يثبت صحة المنظومة التي يقوم بتصميمها ويتم ذلك من خلال توزيع الجهد المحوري Vzوتحليل الخواص البصرية وتغير الابعاد الهندسية لهذه العدسات للوصول الى افضل النتائج وبعد الحصول على عدسة ذي خواص بؤرية جيدة واقل زيوغ ممكنه نقوم بتصميم القاذف الالكتروني ودراسة خواصه.

النظرية

تم استخدام طريقة التحليل لتصميم عدسة مغمورة خماسية الاقطاب ان اساس عمل هذه الطريقة وكما معروف هو بتقسيم العدسة او الاقطاب او أي منطقة يراد دراستها الى عدد كبير من المناطق او الاجزاء الثانوية الصغيرة التي تدعى بالعناصر المحددة وهذه العناصر غالبا ماتكون على شكل مثلثات اذ يتم توزيع الجهد على كل جزء من اجزاء العدسة وتستخدم هذه الطريقة وذلك لسهولة تعاملنا مع شكل الاقطاب [7].

لقد حسب توزيع الجهد المحوري لهذه العدسة من خلال حل معادلة بوزان Poisson's Equation [8] :

$$\nabla^2 V = \frac{-\rho}{\varepsilon_\circ} \qquad (1)$$

اذ ان V يمثل الجهد الالكتروستاتيكي مقاسا" بوحدة الفولت

من خلال حل معادلة الشعاع المحوري(Paraxial ray equation) باستخدام طريقة رنج -كتا ذي الرتبة الرابعة(Fourth-order Runge-Kutta technique) تمكنا من دراسة مسار الجسيمات المشحونة r(z)

$$2r''V + r'V' + r(\frac{V''}{2}) = \frac{I}{2\pi\varepsilon_\circ (2\eta V)^{1/2} R} \qquad (2)$$

حيث

V' ، V'' تمثل المشتقة الاولى والثانية للجهد الالكتروستاتيكي بالنسبة الى (z)

r' ، r'' تمثل المشتقة الاولى والثانية لمسار الجسيمات المشحونة r(z) بالنسبة الى (z)

R تمثل المسافة على المحور

I يمثل تيار القاذف الألكتروني و يقاس بوحدة الأمبير A

تمثل المعادلة (2) معادلة الشعاع المحوري التي تصف مسار الجسيمات المشحونة في المجال الكهروستاتيكي المتماثل دورانيا وهي معادلة تفاضلية خطية متجانسة من الدرجة الثانية (Second- order linear homogenous differential equation) وتتميز هذه المعادلة بانها معادلة متجانسة بالنسبة الى الجهد V [8] .

ومن المعادلات التالية تم دراسة وحساب معاملات الزيوغ الكروية Cs ومعاملات الزيوغ اللونية Cc [9]:-

$$Cs_i = \frac{1}{16V_o^{1/2} r_o'^4} \int_{z_o}^{z_i} \left\langle \left(\frac{5}{4}\left(\frac{V''}{V}\right)^2 + \frac{5}{24}\left(\frac{V'}{V}\right)^4 \right) r^4 + \frac{14}{3}\left(\frac{V'}{V}\right)^3 r'r^3 - \frac{3}{2}\left(\frac{V'}{V}\right) r'^2 r^2 \right\rangle V^{\frac{1}{2}} dz \qquad (3)$$

اذ ان

Cs_i معامل الزيغ الكروي في جانب الصورة

Z_i هو مستوي الصورة

V_o تمثل الجهد في مستو الجسم

$$Cc_i = \frac{V^{1/2}}{r'^2} \int_{z_o}^{z_i} \left(\frac{V'}{2V} r'r + \frac{V''}{4V} r^2 \right) V^{-1/2} dz \qquad (4)$$

C_{ci} معامل الزيغ اللوني في جانب الصورة

وبعد اختيار العدسة المناسبة ودراسة خواصها البصرية تم حسبت خواص القاذف الالكتروني من كثافة تيار، و تيار القاذف ،والاضاءة او السطوعية، الانتشارية، شحنة الفراغ.

1- كثافة التيار المحدد بشحنة الفراغ (Space charge limited current density)

عند تصميم القاذف هذا فانه يتم الحصول على التيار بوضع فرق جهد بين اقطاب القاذف لتعجيل الالكترونات الحرة ويطلق على هذا التيار بالتيار المحدد بشحنة الفراغ limited current Space charge ولقد وضع العالم Child قانونا لكثافة التيار بين اقطاب مستوية متوازية بينهما فرق جهد مقداره V مسافة d بوحدة cm عرف باسمه Child's Law ويسمى بقانون(Three – halves power law) [10] :

$$J_c = \frac{4\varepsilon_o}{9}\sqrt{\frac{2e}{m}}\frac{Va^{\frac{3}{2}}}{d^2} = 0.0233\frac{Va^{\frac{3}{2}}}{d^2} \qquad (5)$$

اذ ان

Jc كثافة التيار المحدد بشحنة الفراغ وحدتها A/cm^2

Va الجهد على الانود وحداته V

2 - تيار القاذف الالكتروني Electron gun current

الذي يمثل كمية الالكترونات والشحنات الماره خلال وحدة المساحة[1] .

$$I = \pi r^2 J \qquad (6)$$

اذ ان:

I تيار القاذف الالكتروني ويقاس بوحدة الامبير A.

r يمثل نصف قطر فتحة الكاثود .

3- الاضاءة او السطوعية Brightness

التي تمثل كثافة التيار لكل زاوية صلدة current density/ solid angle [1] .

$$B = \frac{I}{(\pi r \gamma)^2} \qquad (7)$$

اذ ان

B الإضاءة او السطوعية وتقاس بوحدة A/m^2 sterad

γ الزاوية النصف قطرية radial angle .

4- انتشارية القاذف الالكتروني Perveance of electron gun

تستخدم الانتشارية لوصف حركة الحزم الالكترونية (اشعة الجسيمات المشحونه) التي تؤثر فيها شحنة الفراغ وتعرف انتشارية رياضيا على انها النسبة بين تيار الحزمة الى فولتية تعجيل الانود مرفوعة للاس 3/2 [11]

$$P = \frac{I}{V^{3/2}} \qquad (8)$$

اذ ان P تقاس بوحدة $A/V^{3/2}$

النتائج والمناقشة

صمّمت عدسة مغمورة خماسية الاقطاب بطول 20mm ذي زيوغ قليلة تعمل عدسة مكبرة لقاذف الكتروني في حالة التكبير الصفري.

1- حساب المجال الالكتروستاتيكي لعدسة مغمورة خماسية الاقطاب

يوضح الشكل (1) توزيع الجهد المحوري على طول المحور البصري Z للعدسة التي تم حسابها من معادلة (1) حيث ان الشكل يبين ان الجهد الكهربائي يبدا عند الكاثود ويكون اقل مايمكن (صفر) وبعدها يبدا بالزيادة عند الانود الاول والثاني الى الخامس ،اذ تكون اعلى جهد له وهذا يبين بان العدسة معجلة ويكون توزيع الجهد وكما واضح في الشكل ياخذ شكل حرف S لان العدسات المغمورة وكما هو معروف لها جهدين ثابتين ومختلفين بعضهما عن بعض وهذا مايميزها بهذا الشكل.

2-حالة التكبير الصفري Zero magnification condition

- حساب مسار الحزمه الالكترونية

يبين الشكل (2) مسار الحزمة الالكترونية للعدسة المغمورة التي حسبت من المعادلة(2)

- حساب الخواص البصرية للعدسة المغمورة خماسية الاقطاب لحالة التكبير الصفري

لقد تمت دراسة الخواص البصرية لهذه العدسة تحت تاثير حالة التكبير الصفري عند تغيير نسب الجهود (0-25)

يوضح الشكلان (3)،(4) العلاقة بين معاملات الزيوغ الكروية واللونيةعلى التوالي نسبة الى البعد البؤري في جانب الصورة Cs_i/F ، Cc_i/F دالة لنسب الجهد V_i/V_o ؛ اذ ان F يمثل البعد البؤري للصورة V_i,V_o يمثلان فولتية القطب في جانبي الجسم والصورة كما يوضح الشكلان ان كلا من الزيوغ الكروية واللونية نسبة الى البعد البؤري تقل بزيادة نسب الجهود المعجلة (زيادة طاقة الجسيمات المشحونه).

كما تم ايجاد العلاقة مابين معامل الزيغ الكروي في جانب الصورة نسبة الى طول العدسة L بوصفها دالة لنسبة الجهود المعجلة V_i/V_o.

كذلك يوضح الشكلان (5)و (6) ان قيم الزيوغ تقل بزيادة طاقة الجسيمات المشحونة أي بزيادة نسب الجهود المعجلة وكما يظهر من الاشكال ان قيمة معامل الزيوغ اللونية نسبة الى طول العدسة اقل من قيمة معامل الزيوغ الكروية نسبة الى طول العدسة عند نسبة الجهد 20، اذ تصل قيمة معامل الزيوغ اللونية الى 0.018 اما معامل قيمة معامل الزيوغ الكروية فتصل الى 0.023

كما تمت دراسة تأثير تغير مساحة المقطع S على معاملات الزيغ الكروي والزيغ اللوني عند اخذ قيمة ثابتة للتيار مقدارها $I=10^{-4}A$، اذ نلاحظ من الشكل (7) ان معاملات الزيوغ Cs و Cc تقل بصورة واضحة مع زيادة مساحة المقطع ابتداء من مساحة المقطع $S=0.5mm^2$ تقريبا"حتى تصل الى اقل قيمة لها عندما $S=3mm^2$. من ذلك الشكل نلاحظ ان قيم الزيوغ تتراوح ، ما بين 5.643 الى1.671 بالنسبة الى الزيغ الكروي عند تغير مساحة المقطع مابين $(0.5-3)mm^2$وان قيم الزيغ اللوني تراوحت مابين 1.203 الى 0.702 عند تغير مساحة المقطع $(0.5-3)mm^2$ وهذه القيم يمكن عدها قيما" جيدة لهذه الزيوغ عند وضع التصاميم لهذه العدسات .

واخير أخذت قيم مختلفة للتيار أبتداء بالقيم القليلة $I=10^{-7}A$ ومن ثم الأرتفاع بهذه القيم ودراسة تأثير تغير التيار في قيم الزيوغ و لما كان تأثير شحنة الفراغ واضحا" في القيم العالية للتيار فقد تم التوصل الى قيم مقبولة للزيوغ عند $I=10^{-4}A$ ، ودرس بعد ذلك تأثير العوامل الأخرى في قيم الزيوغ .

يبين الشكل (8) تغير معاملات الزيوغ الكروية النسبية مع تغير قيم التيار عند اخذ قيمة ثابتة لمساحة المقطع $S=1mm^2$ ، ان معامل الزيوغ Cs يزداد بصورة واضحة مع زيادة التيار وذلك بسبب تاثير شحنة الفراغ حيث انها

تـزداد بزيـادة التيـار ،فعنـد قيمـة $I = 1\times10^{-4}\ A$ فـأن قيمـة Cs/F تكـون 1.502 وعنـد تغيـر قيمـة التيـار $I = 5\times10^{-4}\ A$ فأن قيمة Cs/F تكون 3.681 .

كما يبين الشكل (8) تغير معاملات الزيوغ اللونية مع تغير التيار فعند قيمة التيار تكون $I = 1\times10^{-4}$ A فأن قيمة Cc/F تكون 0.608 وتتغير عند قيمة $I = 5\times10^{-4}\ A$ لتصبح 0.881 .

3-دراسة خواص القاذف الالكتروني

بعد الحصول على عدسة الكتروستاتيكية مغمورة خماسية الاقطاب ذي خواص بصرية جيدة (ذي زيوغ كروية ولونية قليلة وكما تم ذكرها سابقا") باستخدام طريقة التحليل قمنا بدراسة خواص هذه العدسة قاذفا" الكتروني من كثافة تيار، وتيار القاذف،و اضاءة، وانتشارية، و شحنة فراغ التي تم حسابها من المعادلات(9-5) على التوالي وباستخدام r=100nm

كانت النتائج التي تم الحصول عليها جيدة مقارنة مع النتائج التي حصل عليها باحثان آخران وكما موضح في الجدول رقم (1):

كثافة التيار A/m^2 J= $1.3*10^9$ ، تيار القاذف A I= $4*10^{-4}$ ، الاضاءة او السطوعية A/m^2 B= $1.622*10^{14}$

الانتشارية $A/V^{3/2}$ P= $1.7*10^{-11}$

الاستنتاجات

- امكانية تصميم قاذف الكتروني باستخدام عدسة كهروستاتيكية مغمورة خماسية الاقطاب تعمل تحت ظرف التكبير الصفري باقل زيغ ممكن (كروي او لوني)
- ان نسب جهود الاقطاب هي العامل المهم في الحصول على اقل قيم لمعاملات الزيوغ الكروية واللونية نسبة الى البعد البؤري .
- تعمل العدسة المغمورة عمل عدسة معجلة للالكترونات ومكبرة.
- ان زيادة عدد الاقطاب تؤدي الى زيادة كفاءة خصائص القاذف الالكتروني .
- كما هو معروف ان وجود شحنه الفراغ تزيد من قيم الزيوغ حيث ان زيادة قيم التيار تؤدي الى زيادة قيم معاملات الزيوغ وقد حصلنا على اقل قيم لمعاملات الزيوغ الكروية واللونية.

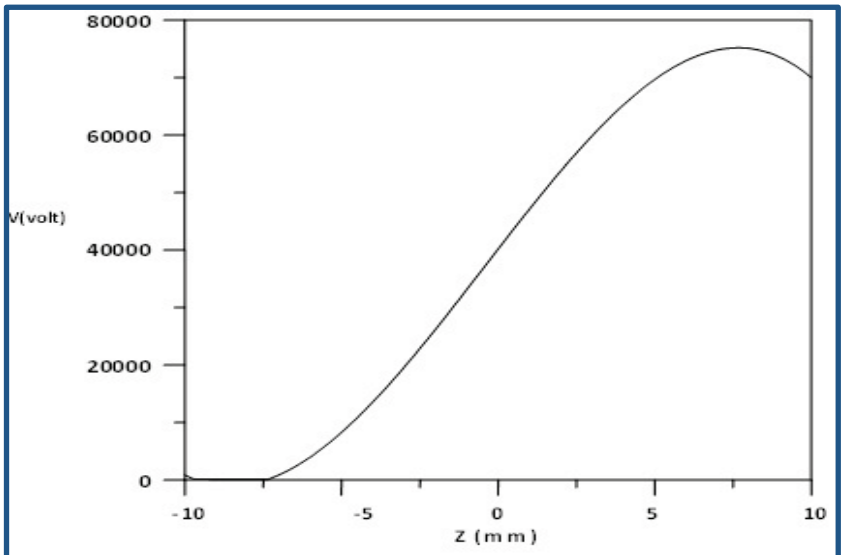
المصادر

1- Sziligyi, M. (1988), Electron and ion optics, Plenum Press, NewYork
2- Klempere, O. and Barnett, M. E. (1971), Electron optics, University of Cambridge, UK.
3- Smith, M. R. and Munro, E. (1987), Computer programs for designing multipole electron and ion optical systems, J.Vac. Sci. Technol, B5 , 161-164
4- Fatin A.J.Al-Mudarris (2001) " computer-Aided-Design of an ion-optical transport and focusing system", Ph.D.Thesis ,Al-Nharin University.
5-Xiaowei Gu, Lin Meng, Yiqin Sun, Xinhua Yu(2008), The Experimental Study of Novel Pseudospark Hollow Cathode Plasma Electron Gun, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Volume 29, Issue 11, pp 1032-1037
6-Ashok Nehra, Joshi, L.M.; Gupta, R.K., Shivani Sharma; Choyal, Y. and Sharma R.K. (2011), Design and sumlation of pole piece for focusing of multi- beam electron gun, Journal of infrared, Millimeter, and Terahertz waves, 32, Issue (6): 793-800.
7-Munro,E.(1975), a set of computer programs for calculating the properties of electron lenses, Department of engineering report CUED/B-Elect TR45, University of Cambridge,UK.
8- Zhigarev, A. (1975),Electron Optics and Electron-Beam Devices, Mir Publishers Moscow.
9- Sziligyi, M. (1987), A systematic Analysis of Two-Electrode Electrostatic Lenses, IEEE. Trans., Electron Device, ED-34 ,1848-1858
10- Bakish, R. (1962),Introduction to electron beam technology, Inc. New York, London
11- Grivet, P. (1972),Electron optics, Pergamon Press,Oxford and New York
12-Hozumi,Y; Ohsawa,S; Sugimura,T; and Ikeda,M. (2005), Development of electron gun of carbon nanotube cathode. IEEE Xplor20,Issue 16-20, 1392-1394.

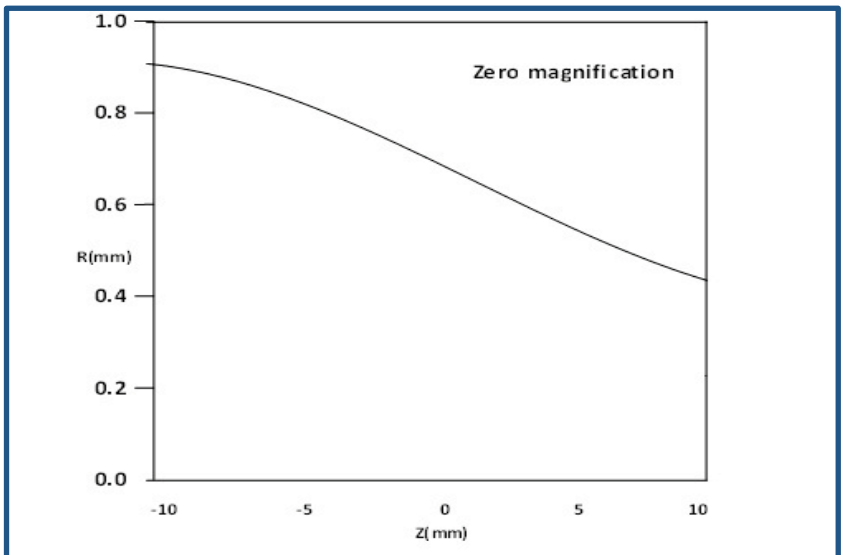
13-Joseph A, Eichmerier Manfred Thumn, (2008),Vacumm electronics spring Publishers,New York, 535, 165
14- Rollett A.D.and Rollett D.N. Rollett (2008), Microscopy: overview of different methods,Advanced characterization and micro structural Analysis, Spring Publishers, New York.

جدول (1): مقارنة لخصائص القاذف الالكتروني بين العمل الحالي وعمل باحثين اخرين

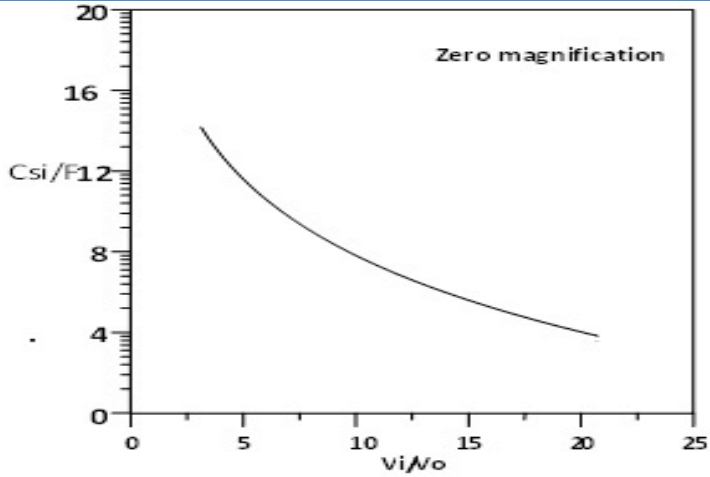
B (A/m2)	J (A/m2)	I A	Number of electrode	References
$1.622*10^{14}$	$1.3*10^{9}$	$4*10^{-4}$	5	Present Work
	$9.1*10^{-4}$	0.48	2	[12]
$2*10^{7}$	10		3	[13]
10^{7}		$5*10^{-9}$	2	[14]



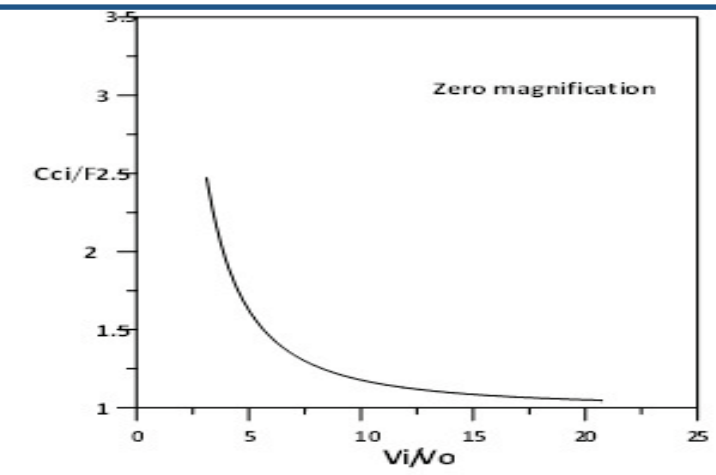
شكل(1): توزيع الجهد المحوري لعدسة مغمورة خماسية الاقطاب



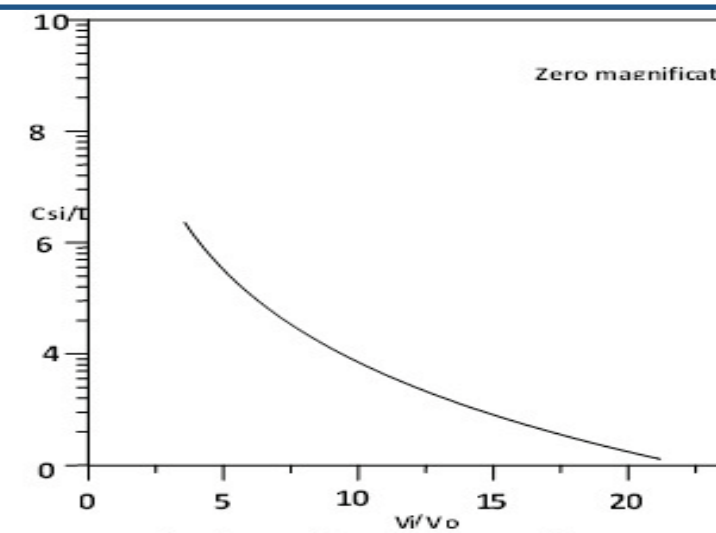
شكل (2): مسار الحزمة الالكترونية للعدسة المغمورة خماسية الاقطاب في حالة التكبير



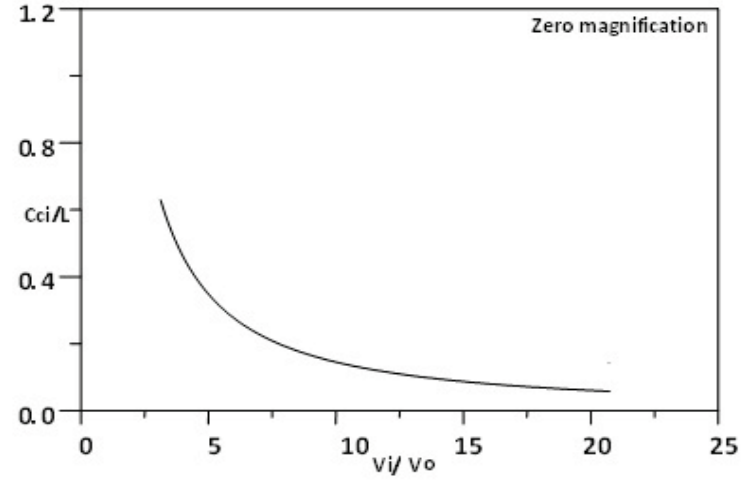
شكل (3) معامل الزيوغ الكروية نسبة الى البعد البؤري في جانب الصورة كدالة لنسب الجهود



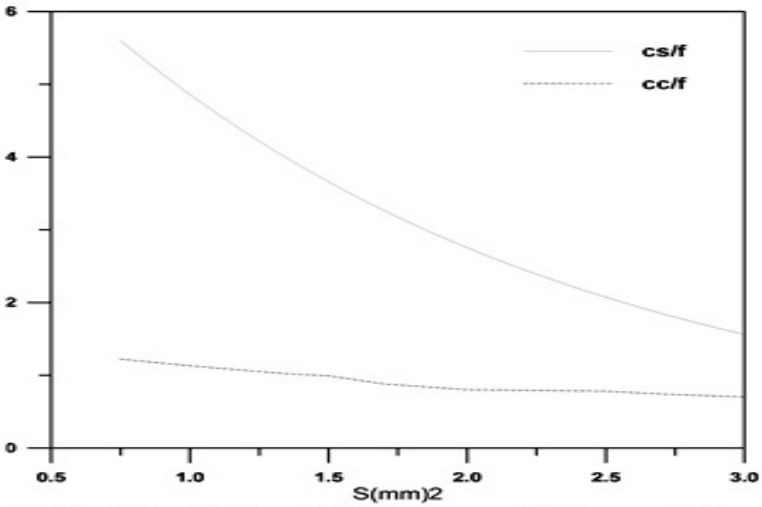
الشكل (4) معامل الزيوغ اللونية نسبة الى البعد البؤري في جانب الصورة كدالة لنسب الجهود



الشكل (5) العلاقة بين معاملات الزيوغ الكروية نسبة الى طول العدسة كدالة لنسب الجهود المعجلة

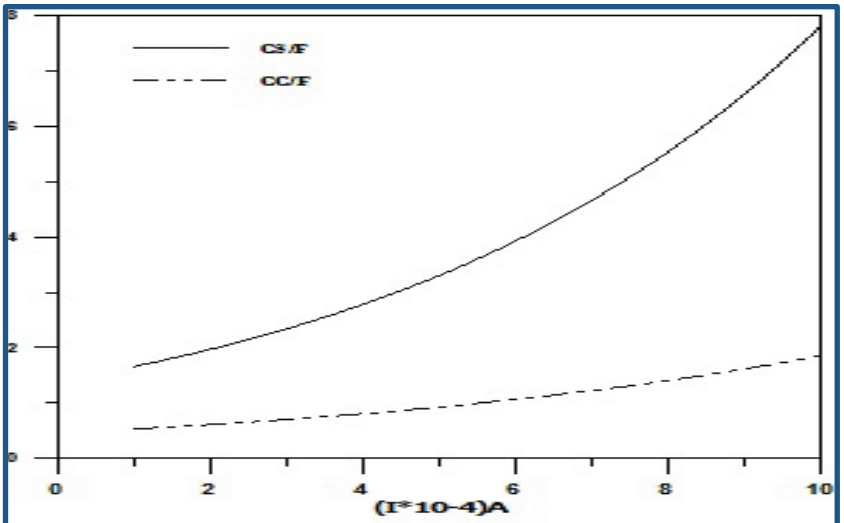


الشكل (6) العلاقة بين معاملات الزيوغ اللونية نسبة الى طول العدسة كدالة لنسب الجهود المعجلة



شكل (7) : العلاقة بين مساحة المقطع S كدالة لمعاملات الزيغ الكروي والزيغ اللوني عند اخذ قيمة ثابتة للتيار مقدارها

$I = 10^{-4} A$



شكل (8) : العلاقة بين التيار كدالة لمعاملات الزيوغ الكروية واللونية كدالة للبعد البؤري

Space Charge Effect for Design Electron Gun Using Five Electrode Immersion Electrostatic Lenses

Bushra H. Hussein
Dept. of Physics/College of Education For Pure Science(Ibn Al-Haitham) / University of Baghdad

Received in :28 November 2011 , Accepted in : 21 May 2012

Abstract

Computer theoretical study has been carried out on the design of five electrode immersion electrostatic lens used in electron gun application. The finite element method (FEM) is used in the solution of the Poisson's equation fro determine axial potential distribution, the electron trajectory under Zero magnification condition .

The optical properties : focal length ,spherical and chromatic aberrations are calculated,From studying the properties of the designed electron gun. we have good futures for these electron gun where are abeam current $4*10^{-4}$A can be supplied by using cathode tip of radius 100 nm.

Keywords : electrostatic lenses, Space charge**,** electron gun, spherical and chromatic aberrations**,** The finite element method (FEM)**.**