

## مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

### شبیه‌سازی و بررسی چاه پتانسیل الکتروستاتیکی در تله‌های پنینگ صفحه‌ای

مسلم سوهانی، علی ملاابراهیمی

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

#### چکیده

در این کار به طراحی و شبیه‌سازی تله‌های پنینگ صفحه‌ای پرداخته شده و شکل چاه پتانسیل این تله‌ها به منظور گیراندازی الکترون و همچنین مقایسه با پتانسیل تحلیلی این نوع از تله‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. کمیت‌های موثر در شکل، عمق و عرض چاه پتانسیل و نیز طراحی تله‌های پوشیده شده و آینه‌ای به منظور دستیابی به پتانسیل چهارقطبی ایده‌آل الکتروستاتیکی شبیه‌سازی و بررسی شده است.

#### تله‌های پنینگ صفحه‌ای

تله‌های چهارقطبی پنینگ به عنوان یکی از رایج‌ترین سیستم‌ها در زمینه گیراندازی الکترون‌ها به منظور تحقیقات بنیادی روی آنها و همچنین اطلاعات کوانتومی و نیز درهم‌تنیدگی کوانتومی به شمار می‌آیند [1]. شکل رایج این سیستم‌ها متشکل از سه الکتروود شامل یک حلقه و دو کلاهک در بالا و پایین با سطوح داخلی هذلولی شکل است که با استفاده از پتانسیل الکتروستاتیکی اعمال شده بین آنها و حضور میدان مغناطیسی خارجی، محصورسازی الکترون را در سه بعد فراهم می‌سازد [2]. نسل جدید تله‌های پنینگ به عنوان تله‌های صفحه‌ای بوده که حلقه‌هایی هم‌مرکز قرار گرفته در یک صفحه جایگزین الکتروودهای هذلولی شکل نسل قبل شده‌اند. این حلقه‌های هم‌مرکز قادر به فراهم‌سازی یک پتانسیل چهارقطبی الکتروستاتیکی هستند که الکترون را در راستای عمود بر صفحه به دام انداخته و حضور میدان مغناطیسی عمود بر حلقه‌ها می‌تواند شرایط محصورسازی الکترون را در تله فراهم نماید (شکل ۱) [3,4].



شکل ۱: تله‌های پنینگ صفحه‌ای که متشکل از چند حلقه هم‌مرکز است. شکل راست: پتانسیل الکتریکی روی حلقه‌ها

پتانسیل الکتروستاتیکی در امتداد محور  $Z$  به صورت معادله ۱ است که چاه پتانسیل در راستای محوری را نشان می‌دهد [4].

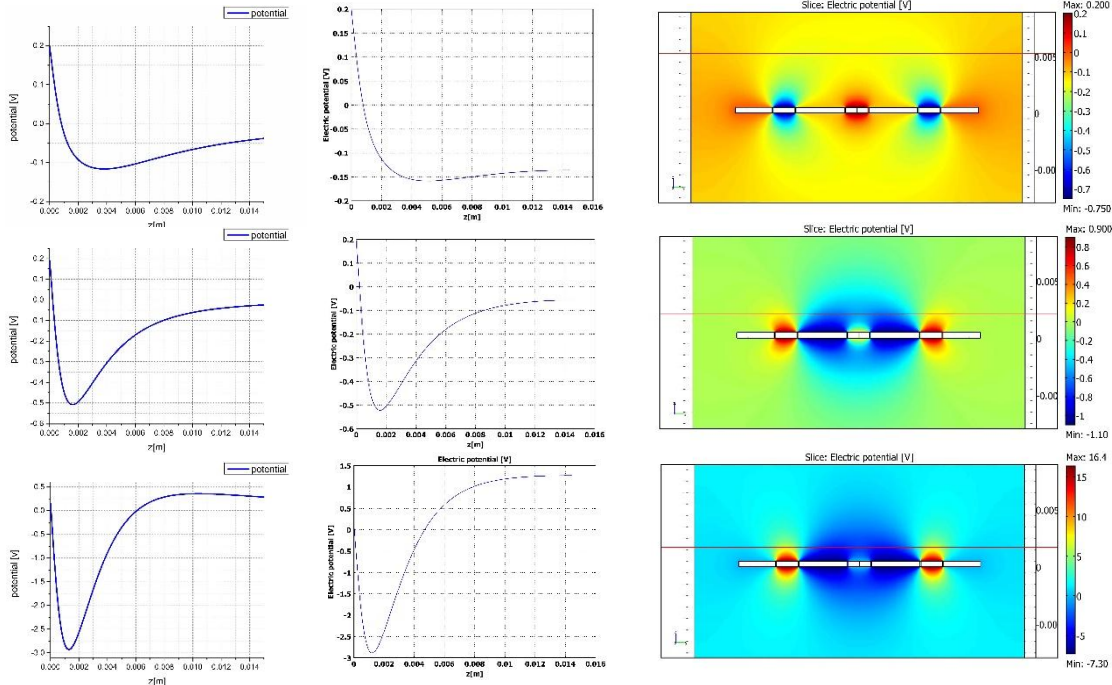
$$V(r=0, z) = \sum_{i=1}^N V_i \left( \frac{z}{\sqrt{r_{i-1}^2 + z^2}} - \frac{z}{\sqrt{r_i^2 + z^2}} \right) \quad (1)$$

که در آن  $N$  تعداد حلقه‌ها با پتانسیل  $V_i$  و شعاع حلقه‌ها است.

#### شبیه‌سازی و بررسی پتانسیل الکتروستاتیکی

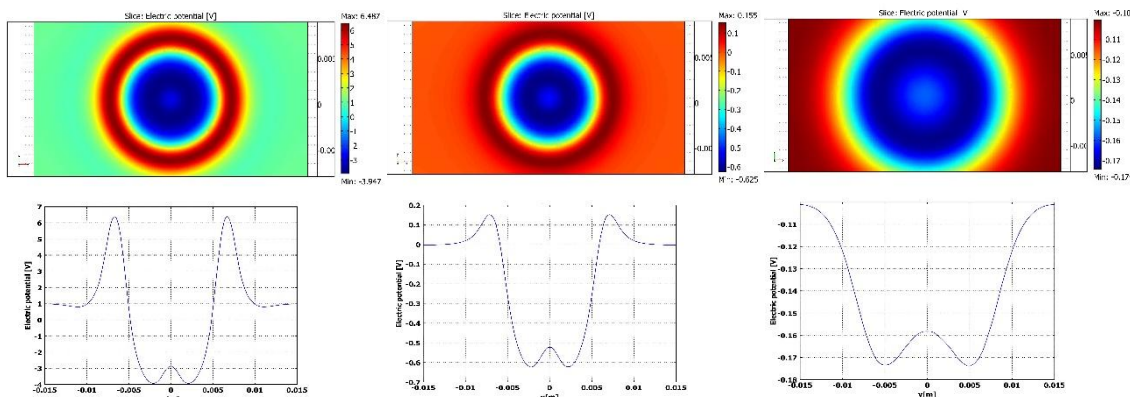
## مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

طراحی و شبیه‌سازی تله‌های پنینگ صفحه‌ای و بررسی چاه پتانسیل در سه حالت مختلف با استفاده از نرم‌افزار COMSOL انجام گرفته است. شکل ۲ (ستون راست) نمای برش داده شده صفحه ZY (چهار حلقه هم‌مرکز) را نشان می‌دهد و همچنین در ستون‌های دیگر چاه پتانسیل در راستای Z محاسبه شده و پتانسیل حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تحلیلی برگرفته از معادله ۱ مقایسه گردیده است. در شکل ۲ چاه پتانسیل به ازای سه پتانسیل متفاوت بررسی گردیده که منجر به تغییر عمق، عرض و شکل چاه پتانسیل شده است.



شکل ۲: سطر اول:  $v_1=0.2$ ,  $v_2=-0.1$ ,  $v_3=-0.75$  ولت است که  $v_i$  پتانسیل متصل به حلقه  $i$ ام ( $v_1$  دیسک داخلی) است و حلقه آخر متصل به زمین است. سطر دوم:  $v_1=0.2$ ,  $v_2=-1.1$ ,  $v_3=0.9$ . سطر سوم:  $v_1=0.2$ ,  $v_2=-7.3$ ,  $v_3=16.4$ . نمای برش داده شده حلقه‌ها و شکل پتانسیل را نشان می‌دهد که خط قرمز نمایش داده شده در بالای حلقه‌ها مکان Z مینیمم (ته چاه در راستای Z) را مشخص می‌نماید. ستون وسط، چاه پتانسیل روی محور Z بدست آمده از شبیه‌سازی و ستون چپ، چاه پتانسیل تحلیلی بدست آمده از معادله ۱ را نشان می‌دهد که در  $(x=y=0)$  رسم گردیده است. چاه‌های پتانسیل به منظور درک بهتر برای ذره با بار مثبت (پوزیترون) بررسی شده‌اند.

شکل ۳ سطر اول پتانسیل الکتریکی را در صفحه XY بالای حلقه‌ها در Z مینیمم (ته چاه پتانسیل در راستای Z) را نشان می‌دهد که حاکی از عدم پایداری ذره باردار (مثبت) در راستای شعاعی است.



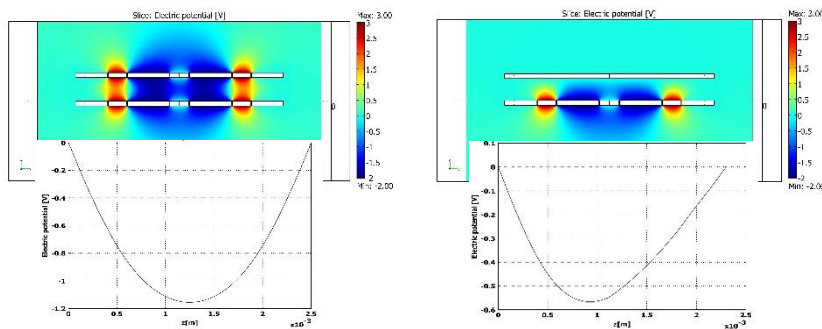
## مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

شکل ۳: سطر اول: پتانسیل الکتریکی در صفحه XY بالای حلقه‌ها در Z مینیمم یعنی ته چاه پتانسیل در راستای Z به ازای سه حالت بررسی شده در شکل قبل (به ترتیب از راست به چپ). سطر دوم: پتانسیل الکتریکی در راستای Y در Z مینیمم (یعنی ته چاه پتانسیل در راستای Z). به منظور درک بهتر پتانسیل برای ذره‌ای با بار مثبت (پوزیترون) نشان داده شده است.

پتانسیل الکتروستاتیکی تنها قادر به محصورسازی یک بعدی ذرات باردار است که در این تله‌ها در راستای Z بکار گرفته می‌شود. میدان مغناطیسی اعمالی در راستای عمود بر حلقه‌ها منجر به محصورسازی ذره باردار در راستای شعاعی گردیده که برهم‌نهی آنها ذره باردار را در سه بعد به دام می‌اندازد. شکل ۳ سطر دوم نیز شکل پتانسیل را در راستای Y نشان می‌دهد که به ازای Z مینیمم (ته چاه پتانسیل در راستای Z) و  $x=0$  رسم گردیده است.

### پتانسیل هارمونیک

آشکارسازی یک تک الکترون به دام افتاده در تله‌های پنینگ صفحه‌ای، نیازمند پتانسیل چهارقطبی هارمونیک است [4] که این شکل پتانسیل با استفاده از تله‌های پوشیده شده با یک صفحه متصل به زمین (ستون راست در شکل ۴) و یا در حالتی ایده‌آل‌تر، حالت پوشیده شده با حلقه‌های مشابه زیرین (ستون چپ در شکل ۴) و ساخت یک تله همانند یک تراشه الکتریکی است.



شکل ۴: ستون راست: تله پوشیده شده با صفحه متصل به زمین به شکل یک تراشه الکتریکی برای دسترسی به پتانسیل متقارن‌تر نسبت به حالات قبل. ستون چپ: تله پوشیده شده با حلقه‌های مشابه زیرین به منظور دسترسی به پتانسیل هارمونیک.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه طراحی و شبیه‌سازی تله‌های پنینگ صفحه‌ای به عنوان نسل جدید تله‌های الکترونی صورت گرفته و با پتانسیل تحلیلی ارائه شده برای این سیستم‌ها مقایسه گردیده است. شکل، عمق و عرض چاه پتانسیل الکتروستاتیکی این تله‌ها در سه حالت مختلف، تحت کنترل و تغییر قرار گرفت. همچنین تراشه‌های الکتریکی گیراندازی تک الکترون به منظور دستیابی به یک چاه پتانسیل چهارقطبی ایده‌آل هارمونیک طراحی شد و پتانسیل آنها با استفاده از نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی شد که در حالت تله پوشیده شده با حلقه‌های پتانسیلی، تله مورد نظر به طور مشخص به یک چاه کاملاً هارمونیک تبدیل گردید.

## مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

مرجع‌ها

- [1] Van Dyck, Jr., R. S., Schwinberg, P. B. & Dehmelt, H. G; “New high precision comparison of electron and positron g factors”. *Phys. Rev. Lett.* **59**, 26–29 (1987).
- [2] Raymond E. March , John F.J.Todd, “Quadrupole Ion Trap Mass Spectrometry”, *WILEY & SONS, INC*, New Jersey 50-58, 2005.
- [3] Hanneke, D., Hoogerheide, S. F. & Gabrielse, G. “Cavity control of a single electron quantum cyclotron: Measuring the electron magnetic moment”. *Phys. Rev. A.* **83**, 052122 (2011).
- [4] P. Bushev, S. Stahl, R. Natali, G. Marx, E. Stachowska, G. Werth, M. Hellwig, and F. Schmidt-Kaler; “Electrons in a cryogenic planar Penning trap and experimental challenges for quantum processing”; *Eur. Phys. J. D*, **50**, 97-102 (2008).