

طراحی داینودها با استفاده از کدهای کامپیوتری

طوبی تجویدی*، حسین تارقلی زاده عبدالجوادنویں روز، محمد مهدی فیروزآبادی

پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده مواد هسته ای کرج

چکیده

یکی از بررسی های اولیه در طراحی لامپ تکثیرکننده فوتونی، شکل و موقعیت داینودهاست به گونه ای که از تمام مراحل داینود به طور مناسب استفاده شود. میدان ها باید طوری طراحی شوند که الکترونها تمایل رسیدن به یک موقعیت مرکزی را روی داینود بعدی داشته باشند. در این مقاله با استفاده از کد casino ضخامت بهینه برای لایه نشانی داینود برابر $54.086703 \times 10^{-9} m$ و همچنین پراکندگی انرژی الکترونهای ثانویه خروجی، با استفاده از این کد و رابطه تئوری δ در حدود $3.2 \times 10^{-19} j$ تعیین گردید. همچنین با استفاده از شبیه سازی سطوح هم پتانسیل با بکارگیری کد سوپرفیش و شبیه سازی ترابرد الکترونها در فضای بین داینودها توسط کد سیمپسون شکل بهینه داینودها طراحی شد.

کلید واژه: توزیع انرژی، گسیل ثانوی، انرژی الکترون، داینود، سطوح هم پتانسیل

مقدمه:

پدیده گسیل ثانوی در سال ۱۹۰۲ توسط Austin و Stark کشف شد [1]. استفاده از گسیل ثانوی به عنوان وسیله ای برای تقویت سیگنال در اوایل سال ۱۹۱۹ پیشنهاد گردید. تکثیرکننده فوتونی (PM) یک نوع دستگاه الکترونی است که نور را به یک جریان قابل اندازه گیری تبدیل می کند. نمای کلی PM در شکل (۱) نشان داده شده است. هنگامی که نور به فوتوکاتد برخورد می کند، فوتوالکترونهای گسیل شده به وسیله میدان الکتریکی به طرف تکثیرکننده های الکترونی هدایت می شوند. تکثیر الکترونها در این سیستم توسط داینودها انجام می شود. داینودها به گونه ای قرار گرفته اند که میدان الکتریکی بین آنها باعث حرکت الکترونهای گسیلی از هر داینود به سمت داینود بعدی می شود. الکترونها با انرژی چند صد الکترون-ولت، هنگام برخورد با داینود دارای انرژی جنبشی کافی برای گسیل الکترونهای ثانویه از سطح داینود می باشند. الکترونهای تکثیر شده توسط آند جمع می شود. نسبت الکترونهای ثانویه تولید شده به الکترونهای اولیه را ضریب گسیل ثانوی گویند. $\delta = n_s / n_e$ که در آن n_s تعداد الکترونهای ثانویه و n_e تعداد الکترونهای اولیه فرودی بر سطح داینود می باشد. مقدار δ به عوامل مختلفی چون ماده داینود، شکل داینودها و موقعیت آنها نسبت به یکدیگر، و همچنین شدت میدان الکتریکی اعمال شده به داینودها بستگی دارد.

در این مقاله، به تعیین δ (ضریب گسیل ثانوی) با استفاده از روابط تئوری، تعیین ضخامت بهینه برای لایه نشانی داینودها با استفاده از کد casino، تعیین توزیع انرژی الکترونها بعد از خروج از داینودها با استفاده از کد

casino و رابطه تئوری δ و طراحی شکل و موقعیت بهینه داینودها با استفاده از شبیه سازی سطوح هم پتانسیل و ترابرد الکترون ها در فضای بین داینودها به ترتیب توسط کد سوپرفیش و کد سیمیون پرداخته شده است.

روش کار:

-تعیین δ با استفاده از روش تئوری:

گسیل ثانوی می تواند نتیجه سه مرحله باشد: ۱. برانگیختگی الکترونها به حالتی با انرژی بالاتر در جامد توسط الکترونها ی اولیه ۲. عبور الکترونها ی ثانویه به سمت فصل مشترک جامد-خلاء ۳. گسیل از سد سطحی به سمت خلاء. فرض براین است که δ تابعی از انرژی ذرات فرودی است. $\delta = \int n(z, E_0) f(z) dz$ [2] که در آن $n(z, E_0)$ تعداد الکترونها ی اولیه با انرژی E_0 می باشد و $f(z)$ احتمال اینکه الکترونها ی تولید شده در فاصله x از سطح، به سطح گسیلنده برسند و به سمت خلاء گسیل شوند. $n(z, E_0) = -(1/\epsilon) dE/dz$ که $-dE/dz$ انرژی از دست رفته در واحد طول عمود بر سطح گسیلنده می باشد [2]. ϵ انرژی لازم برای تولید الکترون ثانویه می باشد. $f(z) = B_1 B_2 e^{-z/L}$ که B_1 کسری از الکترونها ی برانگیخته است که به سمت سطح پخش می شوند و B_2 احتمال اینکه الکترونی که به سطح میرسد به سمت خلاء گسیل شود. L ، پویش آزاد متوسط برای جذب الکترونها ی ثانویه در طول پخش آنها به سمت سطح می باشد. برای بدست آوردن $-dE/dz$ ، فرض می کنیم این پارامتر در طول برد الکترون (R) با انرژی اولیه E_0 در داخل ماده ثابت است. بنابراین $-dE/dz = E_0/R$ و δ از رابطه زیر بدست می آید:

$$\delta = \int_0^R n(z, E_0) f(z) dz = \int_0^R -1/\epsilon (dE/dz) B_1 B_2 e^{-z/L} dz = (B_1 B_2 E_0 L / R \epsilon) (1 - e^{-R/L}) \dots \dots \dots (1)$$

شکل (۲) سازگاری مقادیر تئوری و تجربی را برای نمودار δ برحسب انرژی اولیه فرودی برای سه ماده

MgO, Ge, Pt نشان می دهد. در جدول (۱) مقادیر δ_{max} (بیشترین بازده)، E_{0max} (انرژی مربوط به بیشترین بازده)، L (عمق فرار) و همچنین $\epsilon/B_1 B_2$ مربوط به MgO آورده شده است.

-تعیین ضخامت بهینه برای لایه نشانی داینودها با استفاده از کد casino و همچنین تعیین توزیع انرژی الکترون ها بعد از خروج از داینودها با استفاده از کد casino و رابطه تئوری δ :

برای شروع شبیه سازی ترابرد الکترونها در MgO به عنوان ماده داینود، نسبت اتمی Mg برابر 595. و نسبت اتمی اکسیژن را برابر 405، قرار می دهیم [3]. مقدار چگالی برای این نسبت اتمی برابر $1.63022 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$ بدست می آید. مقدار انرژی اولیه برای شروع شبیه سازی را برابر (1.2KeV) $1.92 \cdot 10^{-16} \text{ j}$ قرار می دهیم چون در این انرژی δ_{max} برای MgO بدست می آید [2]. بعد از اتمام شبیه سازی توسط کد casino، برد الکترونها با میانگین گیری اطلاعات بدست آمده از نمودار ZMax تعیین می گردد ($28.695682 \cdot 10^{-9} \text{ m}$)، که با توجه به اطلاعات بدست آمده از نمودار ZMax، ۵۰ درصد ذرات تا این عمق یعنی $28.695682 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ متوقف می شوند. همچنین می توان ضخامت بهینه برای لایه نشانی MgO را با توجه به نمودار ZMax، حداقل برابر $54.086703 \cdot 10^{-9} \text{ m}$

تخمین زد. با توجه به اینکه انرژی ورودی الکترونها را $1.92 \times 10^{-16} \text{ J}$ تعیین کردیم، توان توقف که با تقسیم انرژی فرودی بر برد ذره بدست می آید، برابر $669.09 \times 10^{-11} \text{ J/m}$ می شود. روش مورد استفاده برای تعیین توزیع انرژی الکترونها از داینود:

با توجه به اینکه انرژی بستگی MgO برابر 7.8 eV [4] می باشد و همچنین با در نظر گرفتن این حقیقت که انرژی لازم برای تولید الکترون ثانویه در MgO برابر 10 eV می باشد [2]، انرژی جنبشی الکترونها ثانویه تولید شده در داخل ماده (E_{ks}) برابر $(10 - 7.8 = 2.2 \text{ eV})$ تعیین می شود. با توجه به برد الکترون که بیشتر بدست آمد، ضخامت 0 تا 30 nm از ماده به 6 قسمت مساوی تقسیم شده است. تعداد الکترونها تولید شده در هر بازه از رابطه $n(z, E_0) = -(1/\epsilon) dE/dz \Delta z$ تعیین می شود. که در آن ϵ ، انرژی لازم برای تولید الکترونها ثانویه، $-dE/dz$ ، توان توقف (E_0/R) و Δz طول ضخامت مربوط به بازه ها (5 nm) می باشد. از حاصلضرب n در انرژی جنبشی الکترون ثانویه (2.2 eV)، انرژی جنبشی الکترونها ثانویه تولید شده در آن بازه (E_{kst}) تعیین می گردد. انرژی جنبشی الکترونها گسیل شده به خلاء مربوط به هر بازه (\dot{E}_{kst})، از حاصلضرب E_{kst} در تابع احتمال، که در بخش قبل بیان شد ($f(Z) = B_1 B_2 e^{-Z/L}$) تعیین می گردد. که Z در رابطه $f(Z)$ عمق میانی مربوط به هر بازه می باشد. با تقسیم \dot{E}_{kst} بر تعداد الکترونها گسیل شده از هر بازه، $\delta' = (1/\epsilon)(E_0/R)e^{-Z/L}(1 - e^{-\Delta Z/L})$ ، انرژی الکترون ثانویه گسیل شده از هر بازه (\dot{E}_{ks}) تعیین می گردد. نتایج محاسبات در جدول (۲) آورده شده است. از نتایج حاصله مشاهده می شود که انرژی الکترونها ثانویه خروجی از سطح تک انرژی و در حدود $(2 \text{ eV}) 3.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ می باشد، که با نتایج بدست آمده از مقالات همخوانی دارد. [3]

- یافتن شکل و موقعیت بهینه داینودها با استفاده از طراحی سطوح هم پتانسیل در فضای بین داینودها با استفاده از کد سوپرفیش و تراپرد الکترونها در فضای بین داینودها با استفاده از کد سیمیون:

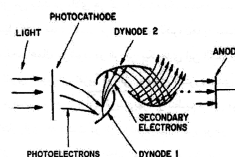
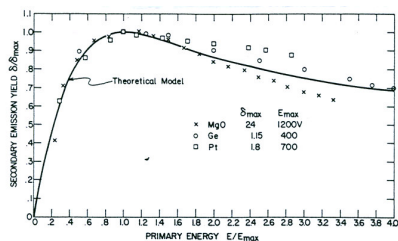
در این مرحله ابتدا شکل نیم دایره ای را برای داینود در نظر گرفته شده است اندازه و موقعیت قرار گرفتن داینودها نسبت به هم و همچنین سطوح هم پتانسیل و مسیر حرکت الکترونها در فضای بین داینودها در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می شود الکترونهایی که از داینود اول تحت تاثیر میدان الکتریکی بین داینودها به سمت داینود دوم حرکت می کنند تنها به سطح کوچکی روی داینود دوم می رسند طوری که سطوح هم پتانسیل نزدیک به آن سطح دارای پتانسیل کمتری نسبت به داینود دوم می باشد. بنابراین الکترونها نمی توانند از داینود دوم به سمت داینود سوم پرواز کنند. و روی داینود دوم متوقف می شوند. بنابراین این پیکربندی، نمی تواند مناسب باشد. این بار حالت ربع دایره را در نظر گرفته شده است شکل (۴). در این پیکربندی مشاهده می شود که سطح بیشتری از داینودها نسبت به حالت قبل روبروی هم قرار دارند. حال اگر به سطوح هم پتانسیل نزدیک داینود دوم، سوم والی آخر توجه کنیم، متوجه می شویم که سطوح هم پتانسیل

نزدیک این الکترودها به دو قسمت تقسیم می شوند، یک دسته دارای پتانسیل کمتر از داینود مورد نظر هستند و دسته دیگر دارای پتانسیلی بیشتر از آن می باشند. با توجه به این مشاهدات می توانیم نتیجه بگیریم که هرچه سطوح هم پتانسیل که دارای پتانسیل بیشتری نسبت به داینود هستند نزدیک سطح داینود گسترش بیشتری نسبت به گروه دیگر داشته باشند، احتمال گسیل الکترونها به سمت داینود بعدی بیشتر است. بنابراین درصد بیشتری از الکترونها می که به داینود مورد نظر رسیده اند می توانند به سمت داینود بعدی گسیل شوند و این امر، ضریب گسیل ثانوی را افزایش می دهد. پیکربندی بعدی، حالتی بین نیم دایره کامل و ربع دایره می باشد (شکل ۵). در این شکل سطوح هم پتانسیل با پتانسیل بیشتر از داینود مورد نظر، گسترش بیشتری نسبت به سطوح هم پتانسیل با پتانسیل کمتر نسبت به داینود در نزدیکی سطح داینود داشته باشند. و این امر باعث می شود که الکترونها از سطح بزرگتری از داینود مورد نظر به سمت داینود بعدی حرکت کنند. برای حالت بعدی یک دنباله به پیکربندی قبلی اضافه شده است شکل (۶). تفاوت این پیکربندی با حالت قبل در این است که در این حالت سطح الکترودها بزرگتر است و الکترونها از سطح وسیعتری از داینود به سمت داینود بعدی حرکت می کنند.

با مقایسه شکل‌های مربوط به پیکربندی های مختلف، در هر مرحله به شکل بهینه نزدیک تر شده ایم.

جدول (۳) سطوح موثر داینود را برای سه پیکربندی اخیر نشان می دهد. سطح موثر داینود سطحی است که الکترونها ثانویه گسیل شده از آن می توانند به سمت داینود بعدی حرکت کنند.

نتایج:



شکل ۲- نمودار تئوری ضریب گسیل ثانوی

شکل ۱- شکل کلی یک لامپ تکثیرکننده فوتونی

مقادیر تجربی برای MgO, Ge, Pt [2]

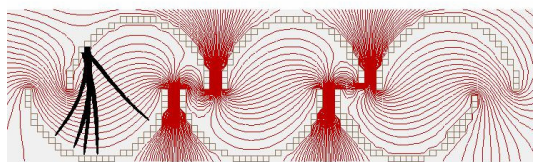
واجزای آن [1]

جدول ۱- مقادیر δ_{max} ، E_{max} و L و ϵ/B_1B_2 برای MgO ، نشان می دهد [2]

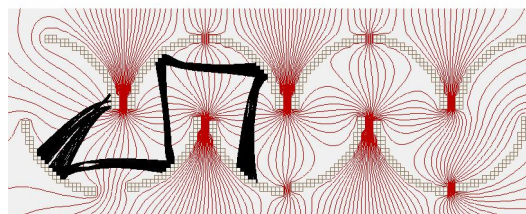
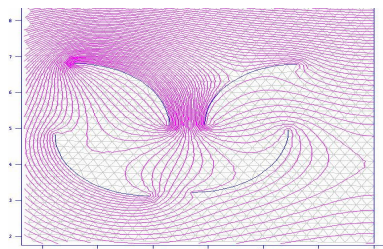
	δ_{max}	$E_{0max}(j)$	$L(m)$	$\epsilon/B_1B_2(j)$
MgO	24	$1.92 \cdot 10^{-16} (1.2 KeV)$	$18 \cdot 10^{-9} (180 \text{ \AA})$	$31.52 \cdot 10^{-19} (19.7 eV)$

جدول ۲- انرژی پراکندگی الکترون های ثانویه بعد از خروج از ماده

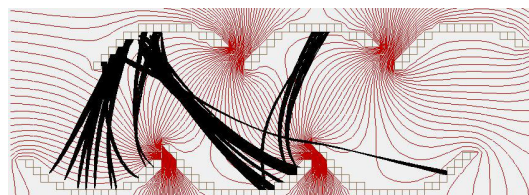
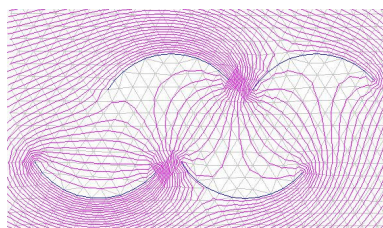
$(Z_1-Z_2) \cdot 10^{-9}(\text{m})$	$E_{kst} \cdot 1.6 \cdot 10^{-16}(\text{j})$	$F(Z)$	$\dot{E}_{kst} \cdot 1.6 \cdot 10^{-16}(\text{j})$	δ'	$\dot{E}_{ks} \cdot 1.6 \cdot 10^{-16}(\text{j})$
0-5	0.0462	0.43	0.020	9.3	0.0021
6-10	0.0462	0.33	0.015	7.1	0.0021
11-15	0.0462	0.25	0.011	5.4	0.0020
16-20	0.0462	0.19	0.0087	4.1	0.0021
21-25	0.0462	0.14	0.0066	3.1	0.0021
26-30	0.0462	0.11	0.0050	2.3	0.0022



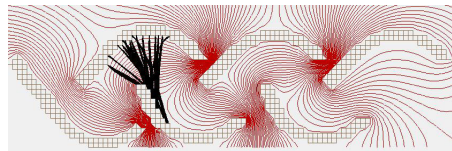
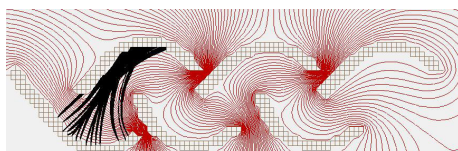
شکل ۳- شبیه سازی مسیر حرکت الکترونها در دایره نیم با کد سیمیون

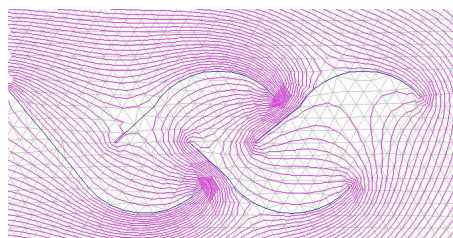
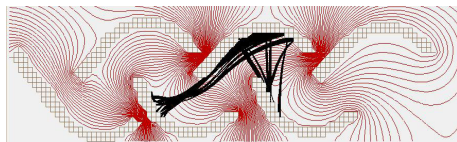


شکل ۴- شبیه سازی دایره ربع دایره (سمت راست توسط سیمیون و سمت چپ توسط سوپرفیش)



شکل ۵- شبیه سازی دایره نیم دایره ای ناکامل (سمت راست با کد سیمیون و سمت چپ با کد سوپرفیش)





شکل ۶- شبیه سازی داینود نیمدایره ای ناکامل دنباله دار توسط کدهای سوپرفیش و سیمیون

جدول ۳- مقایسه سطوح مؤثر داینودها برای پیکربندی های مختلف داینود:

	سطح مؤثر داینود اول (m^2)	سطح مؤثر داینود دوم (m^2)	سطح مؤثر داینود سوم (m^2)
حالت ربع دایره	3.71×10^{-6}	10.69×10^{-6}	6.25×10^{-6}
نیم دایره ناکامل	46.61×10^{-6}	17.63×10^{-6}	21.9×10^{-6}
نیم دایره ناکامل دنباله دار	51.31×10^{-6}	35.36×10^{-6}	13.42×10^{-6}

بحث و نتیجه گیری: در این مقاله ابتدا با استفاده از روابط تئوری ضریب گسیل ثانوی برای مواد مختلف تعیین شده است. سپس با توجه به تابع احتمال بدست آمده در این بخش و کد casino پراکندگی انرژی الکترونیهای ثانویه خروجی تعیین شده است. سپس با استفاده از کدهای سوپرفیش و سیمیون، با توجه به شکل سطوح هم پتانسیل بین داینودها به شکل و موقعیت بهینه برای داینودها نزدیک شده ایم.

مراجع:

- [1]. R.W. Engstrom, "photomultiplier handbook" Burle, 1980, pp.3
- [2]. R.E. Simon and B.F. Williams "secondary electron emission", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. Ns-15, pp. 166-170, 1967
- [3]. Y. Ushio, T. Banno, N. Matuda, Y. Saito, S. Baba and A. Kinbara, "secondary electron studies on MgO", Thin Solid Films, vol. 167, pp. 299-308, 1988
- [4]. J. Dresner, "Delayed secondary-electron emission in thin MgO layers" journal of applied physics, Vol. 48, No. 11, November 1977