



اندازه‌گیری چگالی جریان و تابع کار کاتد اکسیدی پخت شده با پودر نیکل

توکل توحیدی*، شهریار رحمت‌الله‌پور

پژوهشکده لیزر و اپتیک (بناب)، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۵۵۵۱۵-۱۹۶، بناب - ایران

چکیده: کاتدهای اکسیدی گرمايوني به عنوان یکی از مهمترین منبع گسیل الکترون در قطعات الکترونیکی خلاء مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این کار پژوهشی کاتد اکسیدی پخت شده با پودر نیکل با سطح مقطع 0.07 cm^2 ساخته شده و پارامترهای گسیل الکترونی آن از قبیل چگالی جریان شیبی و تابع کار اندازه‌گیری شده است مقدار تابع کار، $\Phi = 1.62 \text{ eV}$ به دست آمد. تغییرات چگالی جریان با دما بررسی شده و منحنی‌های شاتکی (Schottky) و ریچاردسون (Richardson) نیز رسم شده است.

واژه‌های کلیدی: کاتد اکسیدی، چگالی جریان اشباعی، تیوب الکترونی، تابع کار

Measurement of Current Density and Work Function of Oxide Coated Cathode Sintered with Ni - Powder

T. Tohidi*, Sh. Rahmatollahpoor

Laser and Optics Research School (Bonab), Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box: 55515-196, Bonab -Iran

Abstract: Oxide coated cathodes are by far the most important thermionic emitter of electrons which are used in various electron tubes such as thyratrons. In this research, an oxide coated cathode, sintered with Ni-powder with cross section of 0.07 cm^2 has made and its electron emission parameters such as current density and the work function ($\Phi=1.62 \text{ eV}$) have been measured.

Keywords: Oxide Cathode, Current Density, Electron Tube, Work function



۱- مقدمه

یکی از انواع گسیلنده‌های الکترونی، کاتدهای گرمایونی می‌باشد. کاتد گرمایونی کاتدی است که با اعمال گرما الکترون گسیل می‌کند. کاتد پوشش اکسیدی نوعی از کاتدهای گرمایونی است که شامل یک زیر لایه فلزی مانند نیکل (Ni) آغشته به درصد کمی از Zr و Mg و W بوده که لایه‌ای از کربنات سه گانه باریم، کلسیم و استرانسیوم $[(Ba, Ca, Sr)(Co)_3]$ روی سطح زیر لایه پوشش داده می‌شود. از زمان کشف کاتدهای اکسیدی در سال ۱۹۰۴ یعنی در حدود ۱۰۰ سال پیش توسط Wehnelt این نوع کاتدها به طور گسترده‌ای در انواع تیوبهای الکترونی مورد استفاده قرار گرفته است و تحقیق روی آنها برای افزایش جریان گسیلی، کاهش تابع کار و تئوری سازوکار عملکرد آنها، همچنان ادامه دارد [۸ تا ۱].

در سال ۲۰۰۰ در حدود ۷۰۰ میلیون کاتد اکسیدی در ساخت تیوبهای اشعه کاتدی (CRTs) و ۷ میلیارد در لامپهای تخلیه گازی فشار پایین مورد استفاده قرار گرفته است [۹]. این کاتدها مزایا و معایبی دارند که در زیر به آنها اشاره می‌شود [۱۰].

۱-۱ مزایا

- قابلیت جریان گسیل بالا برای هر وات توان دستگاه گرم کننده یکی از مزایای این نوع کاتد می‌باشد.
- قابلیت گسیل جریان با پیک بالا در پالسهای کوتاه را دارد.
- دارای دمای کاری پایین و استحکام زیاد نسبت به دیگر کاتدها می‌باشد.
- هزینه ساخت آن نسبت به دیگر کاتدها کمتر می‌باشد.

۲-۱ معایب

- در مقابل گازهای سمی باقی مانده درون تیوب مانند CO_2 ، SO_2 ، H_2O مقاوم نیست.
- پوشش کاتد اگر در معرض هوا قرار گیرد کنده می‌شود.
- دارای جریان گسیل DC کمتر می‌باشد (کوچکتر یا مساوی $1A/cm^2$).

هدف از این مقاله نحوه اندازه‌گیری چگالی جریان اشباع^(۱) و تغییرات آن با دما، همچنین اندازه‌گیری تابع کار کاتدهای ساخته شده می‌باشد.

۲- تئوری

با گرم کردن کاتد، الکترونها انرژی گرفته و با غلبه برسد پتانسیل از سطح کاتد خارج می‌شوند و در حضور ولتاژ اعمالی به آند جریان گسیل شده از کاتد افزایش می‌یابد. وابستگی جریان به ولتاژ اعمالی را اولین بار شاتکی به صورت تئوری برای فلزات بر طبق معادله (۱) بدست آورد [۱۱].

$$J = J_s \exp(0.44 \frac{E^2}{T}) \quad (1)$$

که در آن J_s چگالی جریان اشباع، E میدان الکتریکی اعمالی و T دمای کاتد است. برای آند و کاتدی که به صورت موازی مقابل هم قرار گرفته‌اند رابطه میدان الکتریکی E و ولتاژ V به صورت $E=V/d$ می‌باشد. وابستگی دمایی جریان اشباعی به دما به وسیله معادله ریچاردسون- داشمن داده می‌شود که به صورت معادله (۲) است [۱۱].

$$J_s = AT^2 \exp(-\frac{e\phi}{KT}) \quad (2)$$

که در آن J_s چگالی جریان اشباع، T دمای کاتد، A ثابت گسیل، ϕ تابع کار، K ثابت بولتزمن هستند.

سازوکار گسیل الکترون در کاتدهای اکسیدی پیچیده‌تر از کاتدهای فلزات خالص است ولی به طور تقریبی می‌توان از معادلات (۱) و (۲) استفاده کرد.

کاتد اکسیدی یک نیمه‌رسانای نوع n با ناخالصی اکسیژن می‌باشد که از طریق احیای BaO ایجاد می‌شود. چگالی جریان گسیل الکترون از کاتد اکسیدی اولین بار توسط Wilson بدست آمد، سپس Nottingham آن را به صورت معادله (۳) اصلاح کرد [۱۲].



همه قطعات مورد استفاده در ساخت دیود را به روش متداول با پاک‌کننده‌های مختلف شسته و کاملاً تمیز می‌کنیم. جنس زیرلایه کاتد مورد استفاده از نیکل می‌باشد و شکل هندسی آن به صورت دایره‌ای و قطر آن ۳mm و دارای سطح گسیل $7/069\text{mm}^2$ می‌باشد برای گاززدایی از سطح کاتد آن را در کوره هیدروژنی در دمای 1000°C به مدت ده دقیقه نگه می‌داریم. آند مورد استفاده در ساخت دیود از جنس مولیبدن و به شکل دایره‌ای با قطر ۲۰mm و ضخامت ۰/۴mm می‌باشد؛ برای گاززدایی از سطح آند آن را در کوره هیدروژنی در دمای 1200°C به مدت ۲۰ دقیقه نگه می‌داریم.

بعد از مراحل تمیزکاری لایه‌ای نازک و یکنواخت از پودر نیکل به اندازه دانه‌های 325 mesh/cm^2 ، که شامل درصد کمی (۴٪) از احیاءکننده‌هایی مانند تنگستن (W) منیزیم (Mg) و زیرکونیوم (Zr) است، به همراه یک محلول چسباننده (نیتر و سلولز) روی سطح زیرلایه کاتد پوشش داده شده و برای پخت شدن^(۲) در کوره در دمای 850°C قرار داده می‌شود. سطح زیر لایه نیکلی پخت شده با پودر نیکل به روش اسپری تحت فشار هوا با محلول کربنات سه‌گانه باریوم (۵۸٪)، کلسیم (۳۸٪) و استرانسیوم (۴٪) $[(\text{Ba}, \text{Ca}, \text{Sr})(\text{Co}_2)]$ پوشش داده می‌شود. این مرحله از کار در اتاق تمیز کلاس ۱۰۰۰ انجام گرفته است. شکل ۲ نمونه‌ای از دیود ساخته شده را نشان می‌دهد.

۳-۲ آماده‌سازی دیود برای تست

بعد از مونتاژ نهایی دیود باید آن را برای تست و اندازه‌گیری پارامترهای گسیل الکترونی کاتد آماده کنیم. این مرحله شامل خلاءسازی درون دیود، گرم کردن در دمای بالا، گاززدایی با دستگاه HF، تجزیه کربنات سه‌گانه به اکسیدها، فعال‌سازی کاتد و aging می‌باشد.



شکل ۲- دیود خلاء برای تست کاتد.

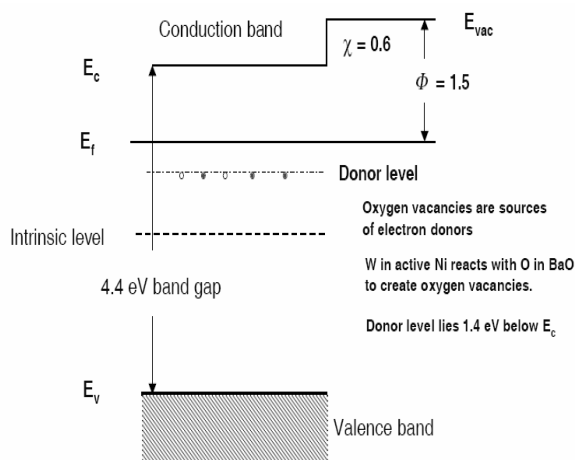
$$J = n_D^{\frac{1}{2}} \frac{e\sqrt{2}(2\pi m)^{\frac{1}{4}} K^{\frac{5}{4}} T^{\frac{5}{4}} \exp\left(\frac{-\Phi}{KT}\right)}{h^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

که در آن n_D تراکم دهنده‌ها می‌باشد. تفاوت اساسی این معادله با معادله ریچاردسون در این است که این معادله شامل تراکم دهنده‌ها، n_D می‌باشد. در این معادله تابع کار به صورت $\Phi = X + \frac{E_D}{2}$ داده می‌شود که در آن انرژی تراز دهنده بوده و از ته نوار رسانش حساب می‌شود؛ X الکترونگاتیویته الکترون است و به عنوان پارامتری معرفی می‌شود که در آن انرژی پیوندی ترکیب‌های دوگانه به هم ارتباط پیدا می‌کنند. مدل نیمه‌رسانا برای کاتد اکسیدی در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۰]. برای مطالعات بیشتر می‌توان به مراجع [۱۱، ۱۳ و ۱۴] مراجعه کرد.

۳-۲ روش کار

۱-۳ ساخت دیود

دیود خلاء متشکل است از یک کاتد به عنوان منبع گسیل الکترون، یک آند به عنوان صفحه جمع‌کننده الکترون و اتصالات مربوط که درون یک محفظه شیشه‌ای قرار داده می‌شوند. برای بدست آوردن نتایج بهتر در اندازه‌گیری چگالی جریان کاتد و پارامترهای دیگر، باید فشار درون دیود تا حد ممکن پایین آورده شود و این کار بوسیله پمپ‌های تخلیه انجام می‌گیرد. مراحل ساخت دیود در زیر بطور خلاصه توضیح داده می‌شود.



شکل ۱- مدل کاتد اکسیدی.



از اتمام این مرحله، دیود را از دستگاه آگزوست جدا می‌کنیم، سپس دیود را مطابق شکل ۳ در مدار قرار داده و ولتاژ فیلامان کاتد را به آرامی افزایش می‌دهیم به طوری که دمای کاتد به 950°C برسد، ولتاژ ۱۲۰ ولت را به آند اعمال می‌کنیم در این حالت جریان گسلی کاتد به تدریج افزایش یافته در نهایت به 65mA می‌رسد که به مدت ۳۰ ساعت امکان می‌دهیم تا در این حالت باقی بماند (aging). این مرحله برای پایدارسازی پارامترهای گسیل الکترون است.

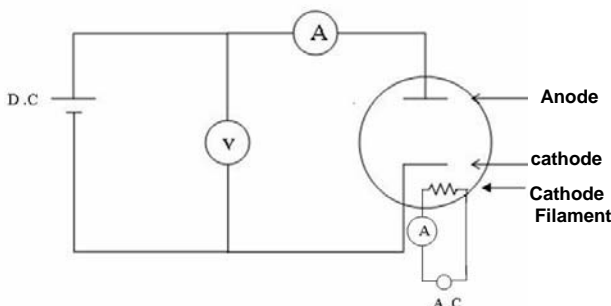
۴- نتایج آزمایشگاهی

دیود خلاء ساخته شده را در مداری مطابق شکل ۳ قرار داده و پارامترهای جریان گسلی و تابع کار را تحت شرایط D.C. اندازه‌گیری می‌کنیم. در این مدار منبع تغذیه D.C. جهت اعمال ولتاژ به آند و منبع جریان A.C. جهت اعمال جریان به فیلامان کاتد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴-۱ اندازه‌گیری دمای کاتد

برای اندازه‌گیری دمای کاتد از روش ترموکوپلی یا روش پیرومتری استفاده می‌شود در هر دو روش خطا در اندازه‌گیری مقدار دقیق دمای کاتد وجود دارد. برای کاهش خطای داده‌های بدست آمده را برحسب جریان فیلامان کاتد رسم می‌کنیم، سپس داده‌ها را بر خط راست برازش می‌کنیم؛ که در این حالت متوسط مجذور خطا (rmse) برابر $7/24$ درصد می‌باشد. از روی نمودار می‌توان با دقت بیشتری دمای کاتد را برحسب جریان فیلامان کاتد بدست آورد (شکل ۴).

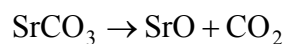
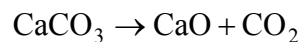
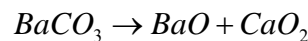
این نمودار برای یک کاتد رسم می‌شود و برای کاتدهای دیگر می‌توان از مقدار جریان فیلامان کاتد دمای آن را حساب کرد.



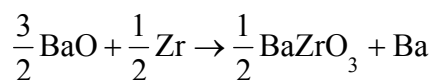
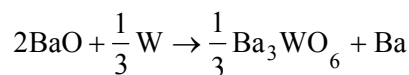
شکل ۳- مدار تجربی مربوط به اندازه‌گیری پارامترهای گسیل الکترونی کاتد.

برای اندازه‌گیری پارامترهای گسیل الکترونی کاتد باید درون دیود را خلاء کنیم که این کار به وسیله دستگاه آگزوست کاتد انجام می‌شود. با این دستگاه فشار درون دیود تا حدود 10^{-6} torr پایین آورده شده سپس در دمای 500°C به مدت یک ساعت گرم می‌شود. گاززدایی آند با دستگاه HF در حالی که دیود به پمپ‌های تخلیه وصل است انجام می‌گیرد تا بدینوسیله گازهای ناخالص از روی آند تبخیر شده و سطح آند کاملاً تمیز گردد. همچنین با این کار ماده جذب‌کننده گاز که درون دیود قرار داده شده فعال می‌شود و گازهای درون دیود را بعد از جدا کردن آن از سیستم خلاء جذب کرده و فشار را حتی تا 10^{-9} torr پایین می‌آورد.

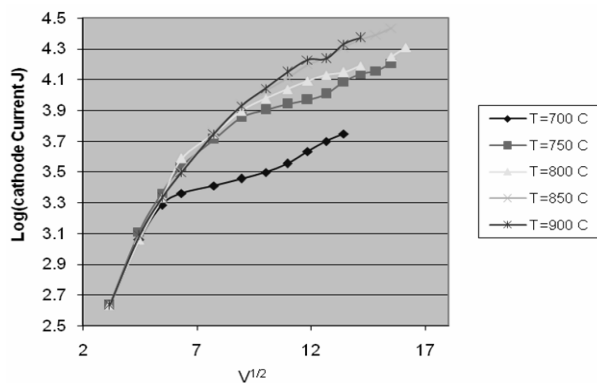
با اعمال دما به کاتد از طریق افزایش ولتاژ فیلامان کاتد دمای کاتد را به آرامی از 500 درجه به 900 درجه سانتی‌گراد می‌رسانیم. در این حالت کربنات سه‌گانه به اکسیدهای مربوط تجزیه می‌شود:



در مرحله فعال‌سازی کاتد با اعمال دمای بالاتر از 900°C به کاتد یعنی در حدود 1000 الی 1100 درجه سانتی‌گراد، اکسیدهای مربوط به فلزات آزاد تبدیل می‌شوند. وجود احیاء کننده‌هایی از قبیل W و Zr در پایه نیکلی به آزاد شدن فلزات از اکسیدها کمک می‌کنند. در این حالت واکنشهای مربوط به صورت زیر است:



این فلزات آزاد هستند که گسیل الکترون را برعهده دارند و هر چه سطح کاتد با تعداد بیشتری از فلزات آزاد باریوم پوشش یابد گسیل بهتری برای کاتد خواهیم داشت. مرحله فعال‌سازی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد و باید به دقت انجام گیرد. بعد

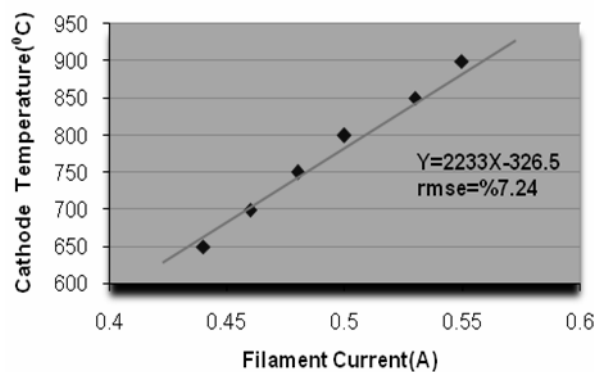


شکل ۵- نمودار تغییرات چگالی جریان گسیلی کاتد با ولتاژ اعمالی به آند در دماهای مختلف.

بستگی جریان گسیلی به ولتاژ اعمالی به صورت تئوری با معادله (۱) داده می‌شود مقایسه تئوری و تجربی نشان می‌دهد که شیب نمودارهای تجربی بیشتر از نمودارهای تئوری می‌باشد دلیل را می‌توان به اینصورت توجیه کرد که در بدست آوردن فرمولهای تئوری فرض شده که نیروی لازم برای راندن الکترونها از سطح کاتد به شکل نیروی تصویری می‌باشد. این فرض برای فلزات خالص صحیح می‌باشد ولی برای کاتدهای اکسیدی نمی‌توان به کار برد. همچنین میدان مؤثر E روی سطح کاتد کاملاً یکنواخت فرض شده در صورتی که در کاتدهای اکسیدی این میدان یکنواخت نیست. غیریکنواخت بودن تابع کار روی سطح کاتدهای اکسیدی را می‌توان از دیگر دلایل این اختلاف دانست [۱۳ و ۱۵].

۴-۳ اندازه‌گیری تابع کار

وابستگی جریان اشباعی به دما به وسیله معادله (۲) داده می‌شود. با بدست آوردن مقادیر چگالی جریان اشباعی در میدان صفر در دماهای مختلف از نمودار شکل ۵ و قرار دادن آن در معادله (۲) نمودار $(\text{Log } J_s/T^2)$ را برحسب $1/T$ رسم می‌کنیم. این نمودار بنام نمودار ریچاردسون معروف است و در شکل ۶ نشان داده شده است. نمودار تقریباً به صورت خطی می‌باشد و از روی شیب نمودار می‌توان تابع کار را بدست آورد. داده‌ها را بر خط راست برازش می‌کنیم که در این حالت متوسط مجذور خطا (rmse) برابر 0.2328 درصد می‌باشد.



شکل ۴- دمای کاتد برحسب جریان فیلامان کاتد.

۴-۲ اندازه‌گیری چگالی جریان گسیلی کاتد

نه تنها بررسی کاتدهای اکسیدی از لحاظ تئوری بحث‌انگیز است بلکه اندازه‌گیری چگالی جریان این کاتدها از لحاظ تجربی نیز مسأله بحث‌انگیزی بوده و بوسیله روشهای خاصی در آزمایشگاههای مختلف اندازه‌گیری شده است. این روشها را می‌توان به پنج دسته کلی تقسیم کرد [۱۲].

- نمودار شاتکی (روش dc یا پالسی) و ارزیابی نمودار ریچاردسون
- انحراف از توان $3/2$ خط بار فضایی^(۳)
- تحلیل داده‌های پتانسیل کندکننده و استفاده از معادله فولر
- روشهای غیرمستقیم شامل تحلیل هارمونیک و تغییر در رسانندگی
- مشخصه‌های جریان ولتاژ با ارزیابی جزئیات با استفاده از تئوری بار فضایی

روش مورد استفاده ما برای اندازه‌گیری چگالی جریان روش نمودار شاتکی تحت شرایط dc و استفاده از معادله ریچاردسون-داشن می‌باشد.

در هر دمای خاص کاتد، ولتاژ اعمالی بین آند و کاتد را تغییر داده و جریان گسیلی از سطح کاتد را اندازه گرفته سپس نمودار $\text{Log}(J)$ را برحسب \sqrt{V} رسم می‌کنیم (J چگالی جریان گسیلی می‌باشد)؛ شکل ۵ این نمودار را نشان می‌دهد.

با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که در هر دمای خاص با افزایش ولتاژ اعمالی به آند جریان گسیلی افزایش یافته و بعد از یک ولتاژ معین تقریباً به یک حالت اشباع می‌رسد و جریان مستقل از ولتاژ اعمالی می‌شود. البته نباید ولتاژ اعمالی را زیاد بالا ببریم چون در اینصورت کاتد و آند صدمه خواهند دید.



کردیم قابل مقایسه است [۱۷]. تابع کار اندازه گیری شده برای اکسیدها توسط Fomenko گزارش شده است [۱۸]. همچنین تابع کار کاتد پوشش اکسیدی با پایه تنگستنی $\phi_R = 1.74(eV)$ گزارش شده است [۱۹].

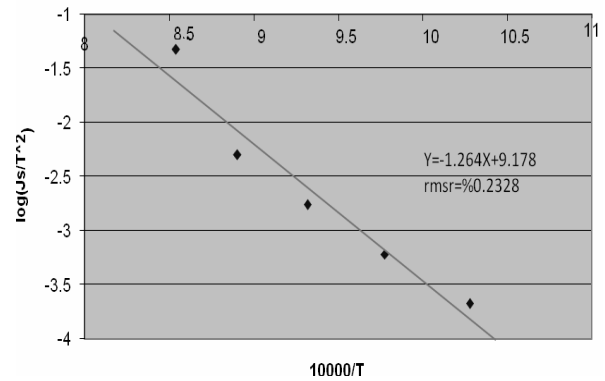
۵- نتیجه گیری

در این کار کاتد پوشش اکسیدی با پایه نیکلی در اشل آزمایشگاهی ساخته شده و تئوری مربوط به سازوکار گسیل در کاتدهای اکسیدی توضیح داده شده است. با افزایش دمای کاتد و ولتاژ اعمالی به آند چگالی جریان گسیلی افزایش یافته و در نهایت در یک دمای ثابت به مقداری می رسد که مستقل از ولتاژ اعمالی می شود. تابع کار بدست آمده، در مقایسه با مقادیر پذیرفته شده قابل قبول است.

پی نوشت ها:

- ۱- Saturation Current Density
- ۲- Sinter
- ۳- Space Charge

Work Function



شکل ۶- نمودار ریچاردسون (برای تعیین تابع کار کاتد اکسیدی).

از معادله ۲ داریم:

$$\log(I_s/T^2) = \log(A) - \frac{e\phi}{KT} \Rightarrow m_{slope} = -\frac{e\phi}{K} \quad (۴)$$

با استفاده از نمودار شکل ۶ مقدار شیب نمودار $m_{slope} = -1.264 \times 10^4$ بدست می آید. بنابراین مقدار تابع کار به صورت زیر است:

$$\phi = -\frac{K}{e} m_{slope} = 1.0817 eV$$

گزارشهای مختلفی برای چگالی جریان و تابع کار کاتدهای اکسیدی در مقالات مختلف ارائه شده است ولی به دلیل پیچیده بودن مکانیسم گسیل الکترون در کاتدهای اکسیدی این نتایج با هم تفاوت دارند.

برای کاتدهای اکسیدی معادله ریچاردسون با تابع کار به صورت $\phi_R = \phi + \alpha T$ صادق می باشد و مقدار پذیرفته شده در مراجع برای ترکیب سه گانه با پایه نیکلی بصورت زیر می باشد [۱۶]:

$$\phi_R (eV) = (1.1 \pm 0.05) + (5 \pm 1) \times 10^{-4} T \quad (۵)$$

بنابراین با در نظر گرفتن وابستگی دمایی تابع کار در دمای کاری کاتد ($T=1073 K$) مقدار آن $\phi_R = 1.62(eV)$ به دست می آید که در مقایسه با مقدار پذیرفته شده، مطابق معادله ۵، قابل قبول است. این مقدار با مقادیری که قبلاً گزارش



References:

1. J.F. Richardson, "Evaporation and diffusion rate measurements on cathodes of sintered nickel containing alkaline-earth oxides," British Journal of Applied Physics, Vol. 11, February (1960).
2. L.R. Koller, "Electron emission from oxide coated filaments," phys.Rev. 25, 671 (1925).
3. A.S. Eisenstein, "Advances in electronics. I. oxide coated cathodes," Academy Press, Inc., New York (1948).
4. P. Zalm, "Thermionic cathodes," Adv. Electron. Electron Phys. 25, 211 (1968).
5. T. Hira, H. Teramoto, M. Saito, T. Shinjo, T. "An analysis of the surface of the Ni-W layer of a tungsten film coating cathode," Applied Surface Science, 146 (1), p.47-50, May (1999).
6. F. Poret, J.M. Roquais, "The base metal of the oxide-coated cathode," Applied Surface Science, 251, 31-41 (2005).
7. Xianheng Liao, Xiaoxia Wang Qinglan Zhao, Mingfen Meng, "Development of new types of oxide cathodes," Applied Surface Science 251 64-68 (2005).
8. Xiaoxia wang, Xianheng Liao, Jirun Luo, Qinglan Zhao, "An improved reservoir Oxide cathode," Applied surface scienc 251 69-72 (2005).
9. D.S. Barratt, S.N. Jenkins, "The evolution of oxide cathodes for cathode ray tube applications," J. Mater. Sci. Mater Electron 17, 735 (2006).
10. A. Shih, "High emission density thermionic cathode," workshop on cathodes for relativistic electron beams, Naval Research Laboratory Washington D.C. May 10-11 (2001).
11. R.L. Ramey, "Physical electronics," Wadsworth Publishing Company (1962).
12. W.B. Nottingham, "Thermionic Emission," Technical Rerport No. 321 December 10, MIT (1356).
13. G.W. Mahlman, "Work function and conductivity of oxide-coated cathodes," Technical Report No. 67 MIT May 31, (1948).
14. G. Gaertner, Daniel den Engelsen, "Hundred years anniversary of the oxide cathode. A historical review," Applied Surface Science 25, 24-30 (2005).
15. H. Friedenstein, S.L. Martin, G.L. Munday, "The mechanism of the thermionic emission from oxide coated cathodes," Rep. Prog. Phys, 11, 298-341 (1946).
16. S. Yamamoto, "Fundamental physics of vacuum electron sources," Rep. Prog. Phys. 69 181-232 (2006).
17. ت. توحیدی، ش. رحمت‌اله‌پور، "اندازه‌گیری چگالی جریان و تابع کار کاتدهای اکسیدی،" کنفرانس فیزیک ایران، (شهریور ۱۳۸۴).
18. V.S. Fomenko, "Hand Book of Thermionic Properties," NewYork, Plenum (1966).
19. C.P. Hadley, "Thermionic emission from oxide-coated tungsten filaments," Technical Report No. 218, MIT (1951).