



NAISL

Quarterly, 2018

Volume 2, Number 1

Pages 29 – 38

Print ISSN: 2588-6401

Online ISSN: 2588-641X

Introduction to Electron Guns in Scanning Electron Microscopes

Maryam Khosravi *

Abstract

Nowadayse, scanning electron microscopes are used as one of the most powerful tools in many applications and fields of research.

The power and the advantage of an electron microscope, strongly depends on the electron beam diameter, the intensity and distribution of electrons in it, and the uniformity of the electrons, and the first place where the electron beam profile is located, its place of production is the electron gun. The electron guns are divided into two categories in terms of the mechanism of Thermionic Guns and Field Emission Guns.

Thermionic Guns, commonly are used in conventional SEM scanning electron microscopes, Despite its low cost, availability and reliability of this type of electronic gun, due to its low resolution, its function is limited in high magnification.

Thermal emission guns are commonly used in conventional scanning electron microscopes (SEMs). Despite its low cost, availability and reliability of this type of electronic gun, due to its low resolution, its function is limited in high magnification.

The Field Emission Guns that used in scanning Field Emission microscopes (FE-SEM), there is the possibility of high-resolution imaging of various types of materials. This gun designed based on high-resolution image-forming technology with the goal of more perfect identification of a variety of specimens, especially those that cannot studied in ordinary electron microscopes, such as magnetic specimens and biological samples that are highly sensitive. And not be able to sputter the samples. this paper was reviewed the types of electronic guns, the advantages and disadvantages of each.

Key Words

Electron beam,
Filament,
Scanning Electron Microscope,
Electron gun,
Thermionic Gun
Field emission Gun

(*) Iran Polymer & Petrochemical Institute, Central laboratory, In Charge SEM Laboratory.
E-mail: m.khosravi@ippi.ac.ir
Tel: 021-48662135



نشریه رویکردهای نوین در
آزمایشگاه‌های علمی ایران
سال دوم، شماره ۱
صفحات ۲۹ - ۳۸، ۱۳۹۷
شاپای چاپی: ۶۴۰۱-۲۵۸۸
شاپای الکترونیکی: ۶۴۱X-۲۵۸۸

آشنایی با تفنگ‌های الکترونی در میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی

مریم خسروی*

امروزه میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی به عنوان یکی از ابزارهای بسیار قدرتمند در بسیاری از کاربردها و حوزه‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته است. قدرت و کارایی یک میکروسکوپ الکترونی به طرز چشمگیری به قطر پرتو الکترونی، شدت و توزیع الکترون‌ها در آن و یکنواختی الکترون‌ها وابسته است. تفنگ الکترونی نیز به عنوان اولین قسمتی از دستگاه، که در آن مشخصات پرتو الکترونی رقم می‌خورد، بسیار حائز اهمیت می‌باشد و از لحاظ مکانیزم به دو دسته تفنگ‌های انتشار حرارتی و تفنگ‌های گسیل میدانی تقسیم می‌شود.

تفنگ‌های انتشار حرارتی عموماً در میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی معمولی (SEM) استفاده می‌شوند. علیرغم ارزان، در دسترس و قابل اعتماد بودن این نوع از تفنگ‌های الکترونی، به علت قدرت تفکیک پایین، عملکرد آن‌ها را در بزرگنمایی بالا محدود می‌گردد. تفنگ‌های گسیل میدانی که در میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی گسیل میدانی استفاده می‌شوند (FESEM)، امکان تصویربرداری با قدرت تفکیک بالا از انواع مختلف مواد وجود دارد. این تفنگ الکترونی بر پایه تکنولوژی ایجاد تصویر با وضوح بالا و با هدف شناسایی جامع‌تر انواع نمونه‌ها به خصوص نمونه‌هایی که امکان بررسی آن‌ها در میکروسکوپ‌های الکترونی معمولی وجود ندارد، نظیر نمونه‌های مغناطیسی و نمونه‌های بیولوژیکی که از حساسیت بالایی برخوردار بوده و امکان پوشش‌دهی نمونه‌ها نباشد، طراحی شده است. در این مقاله به بررسی انواع تفنگ‌های الکترونی، مزایا و معایب هر کدام پرداخته شده است.

چکیده



مریم خسروی

واژگان کلیدی

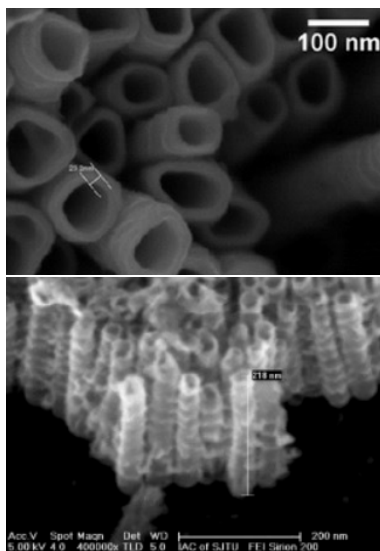
پرتو الکترونی،
فیلمان،
میکروسکوپ الکترونی روبشی،
تفنگ الکترونی انتشار حرارتی،
تفنگ الکترونی گسیل میدانی

(* کارشناس آزمایشگاه میکروسکوپی، آزمایشگاه مرکزی، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران.
ایمیل: m.khosravi@ippi.ac.ir
تلفن: ۰۲۱-۴۸۶۶۲۱۳۵

۱. تفنگ‌های الکترونی انتشار حرارتی^۴

- تفنگ تنگستن^۵
 - تفنگ لانتانیم هگزا بورآید^۶
۲. تفنگ‌های الکترونی گسیل میدان^۷
- تفنگ گسیل میدان سرد^۸
 - تفنگ گسیل میدان گرم (حرارتی)^۹
 - تفنگ گسیل میدان شاتکی^{۱۰}

قابل ذکر است میزان قدرت تفکیک و رزولوشن تصویر در تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی در حدود ۱ تا ۵ نانومتر می‌باشد که بسیار بالاتر از تفنگ‌های انتشار حرارتی می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲: تصاویر تهیه شده از نانولوله‌های اکسیدتیتانیوم، تصویر بالا: تهیه شده توسط تفنگ الکترونی گسیل میدانی، تصویر پایین: تهیه شده توسط تفنگ انتشار حرارتی [۶]

در این مقاله، ابتدا به معرفی برخی از پارامترهای مؤثر بر روی تفنگ‌های الکترونی، سپس به بررسی خصوصیات، ویژگی‌ها، مزایا و معایب هر کدام از این تفنگ‌ها پرداخته خواهد شد [۳، ۴].

^۱ Electron Beam

^۲ filament

^۳ Wehnelt

^۴ Thermionic Gun

^۵ Tungsten

^۶ Lanthanum Hexa Boride, LaB_6

^۷ Field Emission Guns

^۸ CFE, Cold Field Emitters

^۹ TFE, Thermal Field Emitters

^{۱۰} SFE, Schottky Field Emitters

با توجه به اینکه اساس کار میکروسکوپ الکترونی روبشی، مبتنی بر روبش سطح نمونه توسط یک پرتو الکترونی^۱ می‌باشد و مشخصات اصلی و بنیادین یک پرتو الکترونی در تفنگ الکترونی تعیین می‌گردد، لذا تفنگ‌های الکترونی به عنوان منابع تولید الکترون نقش بسزایی در کارایی میکروسکوپ ایفا می‌کنند. در یک نگاه کلی یک تفنگ الکترونی شامل سه بخش اصلی زیر می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱: شماتیکی از بخش‌های مختلف کاتد، وهلنت و آند تفنگ الکترونی [۵]

۱. کاتد یا فیلمان^۲ الکترون‌ها در این بخش تولید و منتشر می‌شوند.

۲. کلاهک نگهدارنده فیلامان (وهلنت^۳).

الکترون‌های منتشر شده در این قسمت کنترل و بر روی نقطه همگرا متمرکز می‌گردد.

۳. آند، این بخش دارای بار مثبت بوده و باعث شتاب‌دهی الکترون‌های به سمت ستون دستگاه و نمونه می‌گردد.

بر اساس مکانیزم تولید الکترون که در ادامه شرح داده خواهد شد، دو نوع تفنگ الکترونی وجود دارد:

۲ بررسی برخی از پارامترهای مؤثر بر تفنگ الکترونی

با توجه به اهمیت شکل‌گیری یک پرتو الکترونی مناسب، که بایستی از میزان روشنایی کافی، قدرت تفکیک^۱ بالا و تمرکز لازم برخوردار باشد، بررسی برخی از مشخصات بنیادین پرتو الکترونی از جمله روشنایی، جریان اشباع فیلمان، قطر پرتو و ... بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین مشخصه‌های پرتو الکترونی، روشنایی^۲ می‌باشد. درحقیقت روشنایی تعیین‌کننده تعداد الکترون‌هایی است که در فیلمان تولید می‌گردد. مقدار روشنایی، بر اساس رابطه لانگمویر^۳ از رابطه (۱) به دست می‌آید:

(۱)

$$\beta = \frac{4i_b}{(\pi \cdot d \cdot \alpha)^2} = J_c e E_0 / \pi k T \quad (A/Cm^2 \text{ster})$$

i_b : جریان انتشار الکترون در فیلمان

d : قطر نقطه همگرایی پرتو

α : زاویه واگرایی الکترون‌ها در نقطه همگرایی

J_c : دانسیته جریان سطح کاتد

E_0 : ولتاژ شتاب دهنده

e : بار الکترونیکی

k : ثابت بولتزمن

T : دمای گرم شدن کاتد

برای ایجاد پرتو الکترونی، تنظیم ولتاژ و مقاومت بایاس مناسب برای داشتن حداقل نقطه همگرایی و زاویه واگرایی با بیشینه دانسیته جریان بسیار حائز اهمیت است (شکل ۳). لذا تنظیم مقدار مناسب ولتاژ بایاس تأثیری مستقیم بر روی جریان انتشار دارد. (شکل ۵).

برای تفنگ‌های انتشار حرارتی، دانسیته جریان بر اساس رابطه حین - انیشتین^۴ و از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$AT^2 \exp(-E_w/kT) \quad (A/m^2) \quad (2)$$

A : ثابت ریچاردسون^۵

W : تابع کاری فیلمان

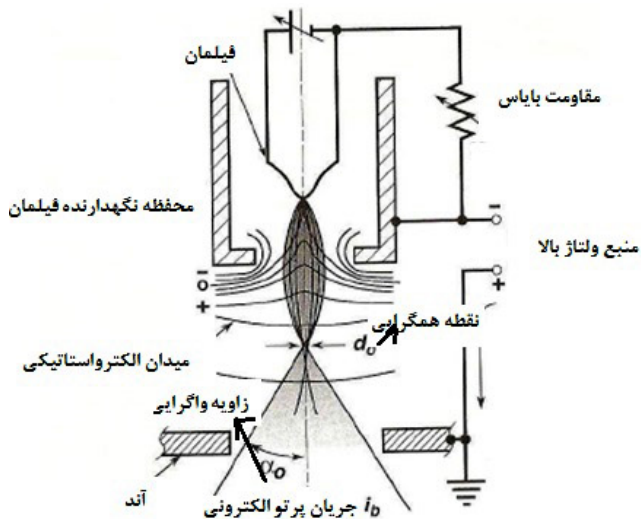
برای تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی، دانسیته جریان بر اساس رابطه فاولر-نوردهیم^۶ و از رابطه (۳) به دست می‌آید:

(۳)

$$J_c = \frac{6.8 \times 10^{-6} \left((E_f/E_w)^{1/2} F^2 \right)}{(E_f/E_w) \exp(-6.8 \times 10^9 E_w^9 / F)} \quad (A/m^2)$$

F : میدان الکترونیکی

قابل ذکر است میزان روشنایی حاصل در تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی صدها برابر بیشتر از میزان روشنایی حاصل از تفنگ‌های انتشار حرارتی می‌باشد [۳، ۶].



شکل ۳: شماتیکی از تفنگ الکترونی [۷]

برای داشتن فیلمانی در شرایط کاری بهینه لازم است که شرایط اشباع فیلمان^۷ تهیه گردد، در این شرایط جریان فیلمان دقیقاً به اندازه‌ای تنظیم می‌گردد که جریان انتشار بیشینه حاصل گردد. با رسیدن جریان انتشار الکترون به یک مقدار بیشینه، مقدار آن ثابت شده و با افزایش جریان فیلمان تغییری در جریان انتشار مشاهده نمی‌گردد، در این شرایط گفته می‌شود فیلمان اشباع شده است (شکل ۴) [۳، ۷].

^۱Resolution

^۲Brightness

^۳Langmuir

^۴Hain-Einstein

^۵Richardsons constant

^۶Fowler-Nordheim

^۷Saturated filament



مقالات علمی

نقطه‌ای روی نمونه ایجاد دیسکی با قطر d_s می‌کند

$$d_s = 0.5 C_s \alpha^3 \quad (5)$$

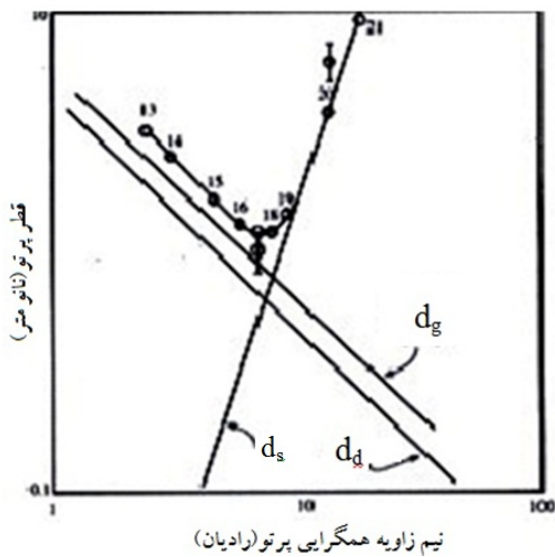
از طرف دیگر تفرق حاصل در دریچه‌ها هم نقصی دیگر ایجاد می‌کند و موجب تشکیل دیسکی با قطر d_d می‌گردد.

$$d_d = 1.22 \lambda / \alpha \quad (6)$$

بنابراین با در نظر گرفتن اثرات لنزها و دریچه‌ها، قطر واقعی پرتو معادل رابطه (۷) خواهد بود.

$$d_f = (d_g^2 + d_s^2 + d_d^2)^{1/2} \quad (7)$$

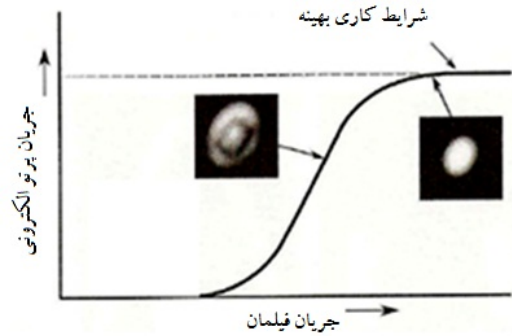
با حداقل رساندن مقادیر نقایص، سعی می‌گردد پرتویی با حداقل قطر پرتو ایجاد گردد. با در نظر گرفتن مشارکت هر سه پارامتر d_d ، d_s و d_g و به حداقل رساندن نقایص در زاویه واگرایی (α) کمتر از 10° رادیان، قطر پرتو حدود ۱ نانومتر دیده می‌شود (شکل ۶) [۷، ۱].



شکل ۶: بهینه کردن قطر پرتو با مشارکت هر سه پارامتر d_s ، d_g و d_d با زاویه‌ای مختلف α [۷]

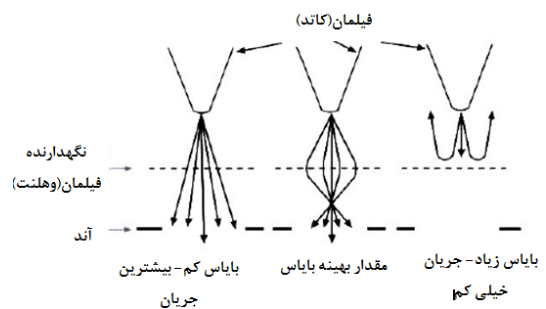
۳ تفنگ‌های الکترونی انتشار حرارتی

در این نوع از تفنگ‌ها از پدیده ترمیونی برای تولید الکترون استفاده می‌شود، با عبور جریان از فیلمان و رخداد پدیده ترمیونی، الکترون‌ها شروع به انتشار در داخل کلاهک نگهدارنده فیلمان می‌کنند، این کلاهک دارای یک روزنه در مقابل نوک فیلمان است که با اعمال ولتاژ



شکل ۴: رابطه جریان فیلمان با جریان پرتو الکترون در شرایط تنظیم اشباع فیلمان [۷]

دلیل پدیده فوق به این خاطر است که با افزایش ولتاژ بایاس، شدت میدان الکتریکی در جهت عکس حرکت الکترون‌ها در اطراف فیلمان افزایش یافته و باعث بازگشت الکترون‌ها به سمت فیلمان، محدود کردن انتشار الکترون‌ها و کاهش شدید جریان گسیل خواهد شد، از طرف دیگر اگر ولتاژ بایاس خیلی کم باشد، عملیات همگرایی پرتو تأثیر چندانی نخواهد داشت و منجر به افزایش قطر نقطه همگرایی و کاهش شدید روشنایی خواهد شد (شکل ۵) [۷، ۳].



شکل ۵: شماتیکی از اثر ولتاژ بایاس بر روی جریان انتشار [۷] قطر پرتو^۱ الکترونی نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مهم، اثری مستقیم بر روی قدرت تفکیک میکروسکوپ دارد، اگر میکروسکوپ را در حالت ایده‌آل در نظر بگیریم، قطر پرتو معادل رابطه (۴) خواهد بود.

$$d_g = 2/\pi (ib/\beta)^2 1/\alpha \quad (4)$$

قطر پرتو الکترونی را می‌توان تا حد زیادی با افزایش قدرت لنزها و کاهش فاصله کاری بهبود دهیم، ولی با کاهش فاصله کاری، زاویه واگرایی α افزایش یافته و پرتوهایی که خارج از محور اپتیک قرار می‌گیرند، تحت نقص کروی لنزها قرار می‌گیرند و به جای فوکوس

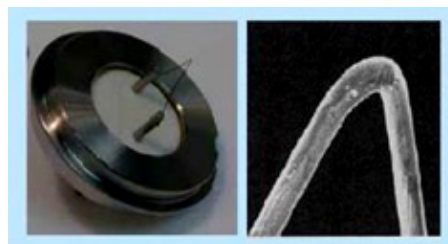
^۱Beam Diameter

مقالات علمی

منفی به آن و ایجاد یک اختلاف ولتاژ بسیار بالا بین آن و آند منجر به دفع الکترون‌ها از نگهدارنده فیلمان و همگرا شدن پرتو الکترونی ضمن خروج از آن و ورود به آند می‌گردد. شرایط الکتریکی فیلمان، نگهدارنده و آند به گونه‌ای است که باعث ایجاد یک میدان الکترواستاتیکی و در نتیجه همگرا شدن پرتو الکترونی و ایجاد نقطه همگرایی پرتو می‌گردد. همانگونه که قبلاً گفته شد، تفنگ الکترونی انتشار حرارتی دارای دو نوع تنگستی و لانتانیوم هگزا بوراید می‌باشد [۳، ۸].

۱.۳ تفنگ الکترونی با فیلمان تنگستی

در این نوع از تفنگ‌ها، کاتد تولید کننده الکترون یک سیم تنگستی به شکل سنجاق سر خم شده و V شکل می‌باشد (شکل ۷) که شعاع نوک آن حدود ۱۰۰ میکرومتر است. دمای کاری تنگستن در حین انتشار الکترون ۲۷۰۰ درجه کلون می‌باشد و عمر کاری آن وابسته به نرخ تبخیر سیم تنگستی است. در این نوع از تفنگ‌ها، الکترون‌ها با انرژی معادل 25eV می‌باشند. با اعمال اختلاف پتانسیلی معادل ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ ولت به نگهدارنده فیلمان، الکترون‌ها به سمت آند شتاب داده می‌شوند. با وجودی که فیلمان‌های تنگستی نسبت به سایر فلزات، استحکام مکانیکی، فشاربخار پایین و نقطه ذوب بالایی دارند، ولی دمای کاری بسیار بالا منجر به کاهش عمر فیلمان می‌گردد و نهایتاً طول عمری تا ۲۰۰ ساعت کاری را دارا هستند [۹، ۱۰].



شکل ۷: تصویری از فیلمان تنگستی [۱۰]

۲.۳ تفنگ الکترونی با فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید (LaB6)

کاتد مورد استفاده در این نوع از تفنگ‌ها، تک کریستال از جنس لانتانیوم هگزا بوراید می‌باشد. تک کریستال به شکل مفتول به قطر

یک میلی‌متر مربع و طول $1/6$ سانتی‌متر و با شعاع نوک حدود $10\ \mu\text{m}$ میکرون می‌باشد (شکل ۸).



شکل ۸: تصویری از فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید

در اطراف کاتد LaB6 دو محافظ وجود دارد: محافظ حرارتی و محافظ تبخیر، این دو محافظ به دلیل واکنش‌پذیری بالای ترکیب لانتانیوم هگزا بوراید، در اطراف مفتول فیلمان، تعبیه شده‌اند. با گرم شدن نوک مفتول و ایجاد پدیده ترمیونی، الکترون‌ها با دانسیته جریان بسیار بیش‌تر و نقطه همگرایی بسیار کوچک‌تر نسبت به فیلمان تنگستی سنجاق سری، انتشار می‌یابند.

فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید دارای ۳ نوع می‌باشد:

- فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید بروئر^۱
- فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید وگل^۲
- فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید فریس^۳

در فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید بروئر، قسمت بالایی مفتول لانتانیوم هگزا بوراید، در داخل محفظه‌ای قرار دارد که در حین کار فیلمان توسط گردش روغن خنک می‌شود و سر دیگر مفتول به وسیله یک سیم پیچ تنگستی احاطه شده است. این سیم پیچ با عبور جریان گرم و گرمای تولید شده در سیم پیچ باعث بمباران الکترونی نوک تیز فیلمان می‌گردد. در فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید وگل، به جای سیم پیچ، مفتول به صورت مستقیم در لایه گرافیتی قرار داده می‌شود و به صورت مستقیم به پایه‌های الکتریکی وصل می‌گردد و در فیلمان لانتانیوم هگزا بوراید فریس، مفتول توسط نواری از جنس لایه گرافیت یا لانتام به پایه‌های الکتریکی وصل می‌گردد (شکل ۹) [۲، ۱۱].

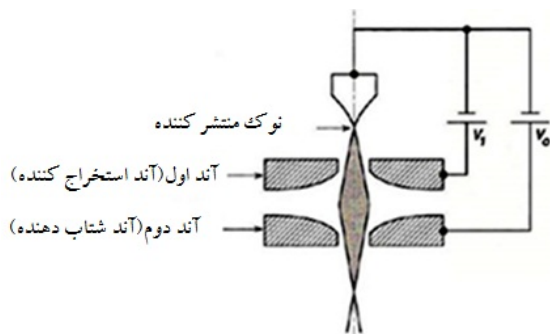
^۱Boroers

^۲Vogel

^۳Ferris

۴ تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی

در این نوع از تفنگ‌ها از پدیده تونلی جهت تولید الکترون استفاده می‌گردد. در این روش الکترون‌ها با استفاده از اثر تونل‌زنی و با پشت سر گذاشتن سد انرژی، یک میدان الکتریکی قوی منتشر می‌کنند. در ساختمان این نوع تفنگ‌ها دو آند تعبیه شده است. اولین آند به عنوان آند استخراج کننده دارای ولتاژ V_1 بوده که جریان انتشار را کنترل می‌کند و دومین آند به عنوان آند شتاب دهنده دارای ولتاژ V_2 بوده که تعیین کننده انرژی نهایی پرتو الکتریکی می‌باشد (شکل ۱۰). نوک منتشر کننده الکترون در این فیلمان از یک سیم تنگستن به قطری حدود 0.125 میکرون با شعاع نوک حدود 100 نانومتر بر روی یک سیم تنگستنی U شکل جوش داده شده است، از آنجایی که نوک فیلمان بسیار نازک می‌باشد، به منظور نگهداری آن حتماً باید محیط یونیزه باشد، لذا این نوع تفنگ‌ها در شرایط خلأ خیلی بالا کار می‌کنند و نگهداری آن‌ها در شرایط خلأ ضروری می‌باشد [۱۳، ۱۴].



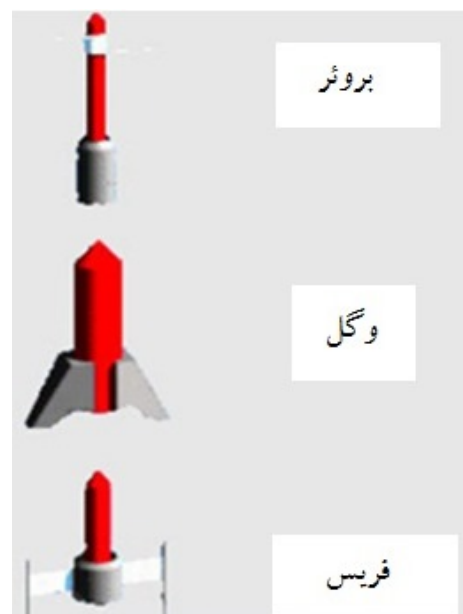
شکل ۱۰: شماتیکی از تفنگ الکترونی گسیل میدانی [۱۳]

قابل ذکر است میزان روشنایی تولید شده در این نوع تفنگ‌ها 10^6 برابر بیشتر از تفنگ‌های انتشار حرارتی می‌باشد. همانگونه که قبلاً گفته شد، این دسته از تفنگ‌های الکترونی، دارای ۳ نوع، تفنگ گسیل میدان سرد، تفنگ گسیل میدان گرم و تفنگ گسیل میدان شاتکی هستند [۱۳، ۱۴].

۱.۴ تفنگ گسیل میدانی سرد (CFE)

همان گونه که مطرح شد، اختلاف ولتاژ بین نوک منتشر کننده و آند شتاب دهنده تعیین کننده انرژی الکترون‌های پرتو الکترونی می‌باشد، در این نوع از تفنگ‌ها با مقدار بایاس V_1 حدود ۳ تا ۵ کیلو ولت و ولتاژ بایاس دوم V_2 از ۱۰۰ تا ۳۰ کیلوولت، جریان انتشاری در حدود ۱ تا

این نوع از فیلمان در مقایسه با تنگستن، دانسیته جریان انتشار الکترون به نرخ تبخیر بسیار بالاتری دارد، از طرف دیگر میزان خلاء مورد نیاز آن ۱۰ برابر خلاء مورد نیاز برای فیلمان تنگستن می‌باشد، هم‌چنین امکان گرم کردن مستقیم این نوع فیلمان وجود ندارد. دمای کاری این نوع فیلمان 1700 تا 2100 درجه کلوین می‌باشد و ولتاژ بایاس در این نوع از تفنگ‌ها حدود 2500 ولت است، عمر کاری این نوع فیلمان تا حدود 1000 ساعت می‌باشد [۲، ۱۰].



شکل ۹: انواع فیلمان‌های لانتانیم هگزابوراید [۱۲]

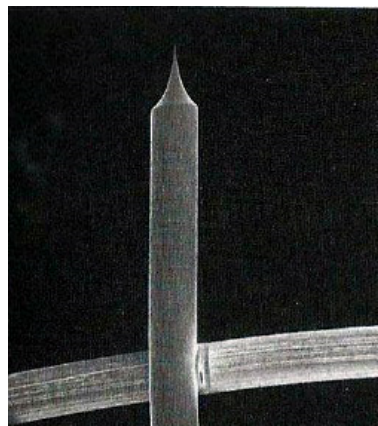
قابل ذکر است نوع دیگری از فیلمان‌های ترمیونی، شامل فیلمان‌های سلنیوم هگزابوراید می‌باشند. این نوع از فیلمان‌ها در مقایسه با لانتانیم هگزابوراید از میزان واکنش‌پذیری کمتری برخوردار می‌باشند، دارای تابع کاری کوچک‌تری در حدود 2.65 الکترون ولت، با دمای کاری حدود 1450 کلوین می‌باشند. نرخ تبخیر فیلمان نیز از مقدار $2.2 \times 10^{-9} g/cm^2/s$ به مقدار $1.6 \times 10^{-9} g/cm^2/s$ افزایش می‌یابد و دانسیته جریان انتشار بالایی را دارا می‌باشد و عمر کاری آن $1/5$ برابر بیشتر از لانتانیم هگزابوراید می‌باشد. از لحاظ خلأ کاری مورد نیاز (10^{-7}) و میزان روشنایی (10^7) کاملاً شبیه لانتانیم هگزابوراید می‌باشند. با این وجود استفاده از این نوع فیلمان هنوز گسترش چندانی نیافته است [۱۲].



گسیل میدان گرم و انتشار حرارتی ناخواسته از مناطق خارج از نوک فیلمان و به منظور رفع ایراد فوق در تفنگ‌های گسیل میدان شاتکی، پوششی با لایه بسیار نازک اکسید زیرکونیوم بر روی فیلمان داده می‌شود. تحت تأثیر پوشش فوق میزان دمای کاری به 1800° درجه کلون کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی قوی‌تر و سد انرژی عبور الکترون کمتر می‌گردد و الکترون‌ها آسان‌تر از نوک منتشر می‌گردند. (شکل ۱۲) [۱۵، ۱۴، ۲].



10^{-11} میکروآمپر با روشنایی در حدود $10^9 A/Cm^2 sr$ در خلأ کاری در حدود 10^{-11} تولید می‌گردد. با توجه به نوک فوق العاده نازک و نوع خاص کریستالی تنگستن (شکل ۱۱) و به منظور حفاظت آن میزان خلأ در این نوع از تفنگ‌ها بسیار بالا و دائمی می‌باشد [۱۴، ۱۵].



شکل ۱۱: تصویری از فیلمان تفنگ گسیل میدان سرد [۱۵]

۲.۴ تفنگ گسیل میدانی گرم (TEF)

این نوع از تفنگ‌ها از نظر ساختار کاملاً شبیه تفنگ‌های گسیل میدانی سرد هستند، ولی با توجه به مشکل تأمین خلأ کاری بسیار بالا در تفنگ‌های گسیل میدان سرد، در این نوع از تفنگ‌ها از مجموع پدیده تونل‌زنی با پدیده ترمیونی برای تولید الکترون استفاده می‌گردد. همان گونه که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد، در پدیده ترمیونی، تولید الکترون با گرم کردن مستقیم فیلمان صورت می‌گیرد و میزان پهنای انرژی بیشتر از حالت تونلی بوده و لذا در این نوع از تفنگ‌ها پهنای باند انرژی در مقایسه با تفنگ‌های گسیل میدانی سرد از 0.3 به 1 الکترون ولت افزایش می‌یابد و تحت تأثیر آن میزان روشنایی نیز به مقدار قابل توجهی کاسته می‌گردد. قابل ذکر است خلأ کاری مورد نیاز برای این نوع از تفنگ‌ها در حدود 10^{-9} تور می‌باشد.

با این نوع تفنگ‌ها می‌توان در شرایط کاری تفنگ‌های گسیل میدانی سرد هم کار کرد ولی عمر کاری فیلمان کاهش پیدا می‌کند. [۱۵، ۱۴، ۲].

۳.۴ تفنگ گسیل میدانی شاتکی (SEF)

این نوع از تفنگ‌ها از لحاظ مکانیزم کاملاً شبیه تفنگ‌های گسیل میدان گرم می‌باشند، ولی به خاطر وجود دمای کاری بالای فیلمان

شکل ۱۲: تصویری از فیلمان تفنگ گسیل میدان شاتکی [۱۵] هم‌چنین قطر منبع الکترونی در مقایسه با تفنگ گسیل میدانی سرد از 5 نانومتر به 15 الی 30 نانومتر افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه میزان زاویه واگرایی افزایش و قدرت تفکیک کاهش پیدا می‌کند، با توجه به افزایش قطر پرتو الکترونی و افزایش گستره انرژی، میزان روشنایی به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۳).

۵ مقایسه انواع تفنگ‌های الکترونی

در این قسمت برخی از مهم‌ترین ویژگی‌ها و تفاوت‌های میان انواع تفنگ‌های الکترونی به صورت خلاصه در جدول شماره ۱ آورده شده است [۷].

۶ نتیجه‌گیری

با توجه به استفاده از تک کریستال تنگستن با نوک بسیار تیز در تفنگ‌های گسیل میدانی و ساطع شدن اکثر الکترون‌ها تحت یک میدان الکتریکی قوی از نوک فیلمان، پرتو الکترونی با بیش‌ترین شدت

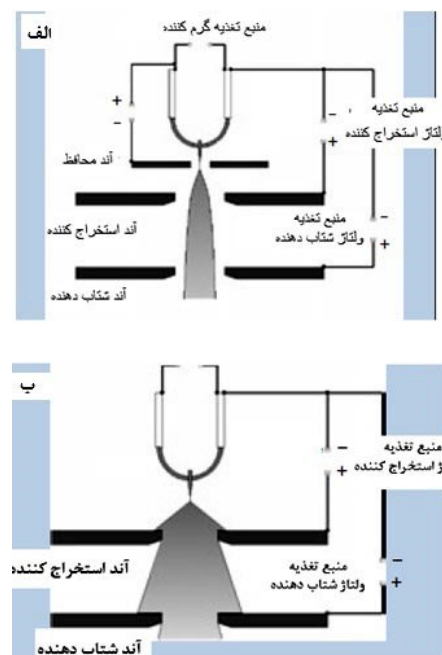
جدول ۱: مقایسه ویژگی‌های تفنگ‌های مختلف

تفنگ الکترونی	تفنگ تنگستن	تفنگ لانتانیم هگزافلوراید	تفنگ گسیل میدانی سرد	تفنگ گسیل میدانی گرم	تفنگ گسیل میدانی شاتکی
جنس کاتد	تنگستن	لانتانیم هگزافلوراید	تک کریستال تنگستن	تک کریستال تنگستن	تک کریستال تنگستن پوشش داده شده با اکسید زیرکونیوم
خلأ (تور)	10^{-6}	10^{-7}	10^{-11}	10^{-9}	10^{-9}
روشنایی $A/cm^2 sr$	10^5	10^6	10^9	10^8	10^7
طول عمر	۱۰۰ - ۴۰	۲۰۰ - ۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	بیش از ۲۰۰۰
قطر منبع الکترون	۱۰۰ - ۳۰ میکرون	۵ - ۵۰ میکرون	کمتر از ۵ نانومتر	کمتر از ۵ نانومتر	۳۰ - ۱۵ نانومتر

مراجع

- [۱] اصول و کاربرد میکروسکوپ‌های الکترونی و روش‌های نوین آنالیز: ابزارشناسی دنیای نانو، دکتر پیروز مرعشی، دکتر سعید کاویانی، دکتر حسین سرپولکی، دکتر علیرضا ذوالفقاری، چاپ دوم، دانشگاه علم و صنعت ایران ۱۳۸۹ (صفحات ۱۴۹-۱۴۸).
- [۲] م. کرباسی، "میکروسکوپ الکترونی روبشی و کاربردهای آن در علوم مختلف و فناوری نانو"، چاپ اول، اصفهان: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۸۸ (صفحات ۳۷-۳۲-۳۱-۳۰).
- [3] Yougui Liao, Practical Electron Microscopy and Database, chapter E, 2007.
- [4] Michael Dunlap & Dr. J. E. Adaskaveg.. Introduction to the Scanning Electron Microscope Theory, Practice, & Procedures. Presented by the facility for advanced instrumentation, U. C. Davis, 1997.
- [5] Allen R. Sampson, Scanning Electron Microscopy, 1996.
- [6] https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-the-top-surface-and-cross-section-of-TiO2-nanotube-arrays-on-Ti-substrate_fig1_251528768
- [7] Ved Prakash Verma, Jun Huang, Srinivasa Rao Bakshi, presentation electron source, 2011.
- [8] Carl Zeiss, Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, 3rd edition 2003, Joseph I. Goldstein.
- [9] C W Oatley, The tungsten filament gun in the scanning electron microscope Journal of Physics E Scientific Instruments, Volume 8, Number 12 Practical Electron Microscopy and Database, 2009.
- [10] J. I. Thornton and G. T. Mitosinka School of Criminology, University of California, Berkeley, U.S.A. 94720 and T. L. Hayes Donner Laboratory, University of California, Berkeley, U.S.A. 94720.. Comparison of Tungsten Filaments by Means of the Scanning Electron Microscope, 2001.
- [11] Duggan Agaogullari, Synthesis development and characterization of some rare earth metal hexaboride. Page 7-39, 2014.
- [12] "Comparing Lanthanum Hexaboride (LaB) and Cerium Hexaboride (CeB) Cathodes". Retrieved 2009-05-05.
- [13] Davide C. Bell. Scanning electron microscopy, center for imaging and mesoscale structures, April 26, 2004.

تولید می‌گردد، که 10^4 برابر بزرگ‌تر از تفنگ انتشار حرارتی تنگستنی و 10^{10} برابر بزرگ‌تر از تفنگ انتشار حرارتی لانتانیم هگزافلوراید است که نتیجه آن بهبود قدرت تفکیک می‌باشد. با این نوع تفنگ‌ها امکان تهیه تصاویری در بزرگنمایی 10^6 تا 5000000 برابر، با عمق میدان بصری بالایی فراهم می‌گردد. که در مقایسه با تفنگ‌های انتشار حرارتی، تصاویری واضح‌تر با رزولوشن 1 تا 0.5 نانومتر فراهم می‌کند. از طرف دیگر با توجه به خلأ کاری بالا، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و گران بودن این نوع از فیلمان‌ها، پیشنهاد می‌گردد از تفنگ‌های فوق در کاربردهای خاصی که نیاز به داشتن بزرگنمایی در مقیاس نانومتر با قدرت تفکیک‌پذیری بالا می‌باشد، استفاده گردد. لذا در بررسی نمونه‌های با ابعاد بزرگ و عموماً در حد میکرومتر و جهت انجام آنالیز بر روی نمونه‌ها، استفاده از تفنگ‌های انتشار حرارتی، به خصوص نوع تنگستنی پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۱۳: (الف) شماتیک تفنگ نشر میدان شاتکی، (ب) شماتیک تفنگ نشر میدان سرد [۱۷]



- [14] Cik Rohaida Che Hak¹, Choo Thye Foo¹, Nor Azillah Fatimah Othman², Nor Azwin Shukri², Mohd Saari Ripin¹, Meor Yusof Meor Sulaiman¹ and Yusof Abdullah¹. Field emission scanning electron microscope(fe-sem) facility in bit kemudahan facility in bit kemudahan.
- [15] F.Houdellier a,n, L.deKnoop a, C.Gatel a, A.Masseboeuf a, S.Mamishin b, Y.Taniguchi b, M. Delmas a, M.Monthieux a, M.J.Hýtch a, E.Snoeck. Development of TEM and SEM high brightness electron guns using cold-field emission from a carbon nano tip, 2014.
- [16] manual JEOL. Instruments for Structural, Optical, Electrical Characterizations SEM. Page 16-18.
- [17] manual FE-Zeiss. Instruments for Structural, Optical, Electrical Characterizations SEM. Page 65-68.