

میکروسکپ الکترونی روینده

نوشته:

پیروز پیروز

گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی

۱) مقدمه

۲) ساختمان میکروسکپ روینده

۳) فعل و افعال بین پرتو الکترونی و نمونه های جامد

۴) روش های مختلف کاربرد میکروسکپ روینده:

۱/۱- روش انتشاری

۱/۲- روش کاتودولومینسانس

۱/۳- روش اشعه ایکس

۱/۴- روش هدایتی

۱/۵- روش جریان جذب شده الکتریکی

۱/۶- روش عبوری

۱/۷- کنتراست تصاویر حاصله از میکروسکپ روینده :

۱/۸- کنتراست ناشی از توبوگرافی سطحی

۱/۹- کنتراست عدد اتنی

۱/۱۰- کنتراست ناشی از تغییرات ولتاژ و حوزه های الکتریکی در سطح نمونه

۱/۱۱- کنتراست مغناطیسی

۱/۱۲- کنتراست در روش هدایتی

۱/۱۳- کنتراست بلوری

۱/۱۴- کنتراست در روش عبوری

۱/۱۵- کنتراست در روش کاتودولومینسانس

۱/۱۶) نتیجه گیری

چکیده

از زمانی که میکروسکپ الکترونی روبنده به بازار عرضه شده، بیش از سیزده سال نمی‌گذرد ولی در همین مدت کوتاه، این نوع میکروسکپ توانسته است بعنوان یک وسیله نیرومند در بررسی نمونه‌های جامد از نظر توبوگرافی، ویژگیهای الکتریکی و مغناطیسی ساختمان بلوری، خواص کاتودولومینسانس وغیره مورد استفاده استفاده قرار گیرد.

امروزه میکروسکپ الکترونی روبنده جای خودرا در اغلب آزمایشگاههای علوم فیزیکی و طبیعی باز کرده است و استفاده از آن هر روز گسترش بیشتری پیدا میکند. در این مقاله، میکروسکپ الکترونی روبنده از یک دیدگلی در نظر گرفته شده و ساختمان، روش‌های مختلف استفاده و کاربردهای آن در علم مواد مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- مقدمه

در بسیاری از سائل علمی و فنی، ویژگیهای ماکروسکوپی یک سیستم بوسیله رفتار و ویژگیهای اجزای میکروسکوپی آن سیستم تعیین میشود. بعنوان مثال، در متالورژی، روش‌های میکروسکوپی ویا تقاضن بلوری، که معمولاً دارای ابعادی در حدود دهها یا صدها انگستروم ($1\text{Å} = 10^{-8}\text{cm}$) میباشند، استحکام ویا سستی یک جسم ماکروسکوپی را تعیین میکنند. بهمین ترتیب شواهد زیادی در دست است که خواص فوق هادیهای نوع II حاصل ویژگیهای دسته‌هایی به قطر تقریبی 500Å هستند که در فواصل تقریبی 1000Å یک دیدگلی گر قرار گرفته و از رشته‌های بسیار نازک تشکیل شده‌اند. مثال دیگر، در علوم طبیعی، یاخته‌های خون قطری در حدود 8 μm (میکرون) $= 10^{-4}\text{cm}$ دارند در حالیکه اندازه انتگلهایی که گاه در این یاخته‌هایافت میشوند تقریباً 1 μm است. همچنین مولکولهای D. N. A. که نقش اساسی را در انتقال ویژگیهای ارثی بازی کرده و رمز ژنتیک (Genetic code) را بردارند دارای قطری در حدود 50 Å میباشند. ویروسها و کروموزومهای جزئیات قابل ملاحظه‌ای باندازه‌های در حدود 100 Å تا 1000 Å دارند که بررسی آنها بسیاری از خواص ویروسها و کروموزومها را روشن میکند. اینگونه مثالها بسیار زیاد میباشد روی این اصل، مطالعه ذرات بسیار کوچک از اهمیت خاصی برخوردار است.

شاید بتوان گفت که در مشاهده و مطالعه اجزای میکروسکوپی، دستگاههای الکترون - اپتیک مهمنترین نقش را بازی میکنند. البته میکروسکپ نوری سهم بزرگی در پیشرفت علوم داشته و خواهد داشت. ولی بعثت اثرات دیفراکسیونی، قدرت تفکیک این نوع میکروسکوپها بیش از 1000 Å نبوده و عمق میدان آنها بسیار محدود است. روی این اصل، میکروسکوپهای الکترونی در آزمایشگاههای مطالعات علوم فیزیکی و طبیعی بصورت سکم میکروسکوپهای نوری جای خود را باز کرده‌اند. با استفاده از یک پرتوالکترونی بجای یک پرتو نوری - اثرات دیفراکسیون فقط در قدرت‌های تفکیک کمتر از 1 Å ظاهر شده و محدودیت‌های ایجاد می‌نمایند.

در عمل، قدرت تفکیک حاصله از یک دستگاه الکترون - اپتیک بستگی به روشی دارد که پرتوالکترونی مورد استفاده قرار میگیرد. در حال حاضر، چندین دستگاه الکترون - اپتیک وجود دارند که از جمله میتوان دستگاههای زیر را نام برد:

- (Transmission electron microscope)
- (X-ray miroanalyser)
- (Field-ion microscope)
- (Field emission microscope)
- (Reflection and Mirror electron microscopes)
- (L. E. E. D. H. E. E. D.)
- (Scanning electron microscope)
- ۱- میکروسکپ الکترونی عبوری
- ۲- میکروآنالیزور اشعدایکس
- ۳- میکروسکپ باسیدان بونی
- ۴- میکروسکپ باسیدان انتشاری
- ۵- میکروسکوپهای الکترونی انعکاسی و آینه‌ای
- ۶- سیستمهای دیفراکسیون الکترونها (نظیر،
- ۷- میکروسکپ الکترونی روبنده

در این مقاله، طرز کار و کاربردهای یکی از این ب دستگاهها یعنی میکروسکپ الکترونی روبنده از یک دیدگلی بررسی میشود ولی قبل از آنکه بشرح این دستگاه پردازیم، تاریخچه مختصری از اختراع و تکمیل این میکروسکپ میل هیم. اولین بار یک دانشمند آلمانی بنام «نول» (M. Knoll) در سال ۱۹۳۵ میشناهاد کرد که با روییدن سطح یک نمونه بوسیله یک پرتو الکترونی و ضبط جریان الکتریکی حاصله در نمونه بصورت تابعی از مختصات مکانی پرتو، میتوان به بررسی سطح اجسام پرداخت، [مأخذ ۱]. سه سال بعد، یکی از هموطنان او بنام «فن آردن» (M. Von Ardenne) با استفاده از ایده نول، اولین میکروسکپ الکترونی روبنده را ساخت، [مأخذ ۲]. در میکروسکپ فن آردن، از دو بوبین مغناطیسی استفاده شده بود (همانطور که صفحه تلویزیونی بوسیله چنین پرتوی روبنده میشود). نمونه ها بصورت تیغه های نازکی بودند و از جریان الکترونی عبور کرده از این تیغه ها در تشکیل تصاویر استفاده میشد. تصویر بروی فیلم عکاسی ثبت میشود که روی یک استوانه چرخان و در زیر نمونه قرار داشت. حرکت این استوانه باحرکت پرتو الکترونی تطبیق داده شده بود و بزرگنمائی میکروسکپ از تقسیم سرعت حرکت استوانه بسرعت حرکت پرتو بدست میاد. در میکروسکپ فن آردن از هیچ عدسی الکترونی استفاده نمیشد و نظر به شدت کم جریان الکترونی عبور کرده، زمان لازم برای گرفتن یک فیلم در حدود بیست دقیقه بود.

فن آردن میشناهاد ریاضی برای تکمیل و بهتر کردن این میکروسکپ ارائه داد. از جمله میشناهاد این محقق، استفاده از الکترونیهای ثانویه ای بود که از سطح نمونه ساطع میشدند. نظر فن آردن براین بود که الکترونیهای ثانویه راجع ترده و پس از تقویت آن را به تنظیم گننده شفافیت یک لامپ اشعه کاتودیک وصل نموده و از این راه امکان بررسی نمونه ها را که نسبت به عبور الکترونها شفاف نیستند بدست آورد.

در سال ۱۹۴۲، این ایده بتوسط «زووریکین» (Zworykin)، «هیلیر» (Hilier) و «اسنایدر» (Snyder) در آمریکا برای ساختن یک میکروسکپ روبنده مورد استفاده قرار گرفت، [مأخذ ۳]. در این میکروسکپ از دو عدسی الکترواستاتیک برای کانونی کردن پرتو الکترونی استفاده شده و قدرت تفکیک در حدود 500A° بوده است. در سالهای پس از جنگ دوم، دو گروه در فرانسه و انگلستان بطور جداگانه شروع به طرح میکروسکوپهای جدید کردند. در ۱۹۴۶، «لکوت» (Lecautte) و همکارانش، قدرت تفکیکی برای چند میکرون گزارش دادند، [مأخذ ۴]. در ۱۹۵۷، «داووان» (Davoine)، قدرت تفکیکی در حدود $1\text{m}\text{A}^{\circ}$ بدست آورد، [مأخذ ۵]. در ۱۹۶۰، میکروسکپ خود را برای بررسی فرآیندهای کاتودولومینسانس بکار گردید، [مأخذ ۶]. گروه پژوهشگران در انگلستان تحت نظر ارت پروفسور «اتلی» (C. W. Oatley) در ۱۹۶۸، در دانشگاه کمبریج شروع بکار کردند و میکروسکوپهای تجاری امروزه تقریباً بطور کامل حاصل تحقیقات و طرحهای این گروها خیر است. البته باید سهم بزرگی را که شاگردان پروفسور اتلی از جمله «مک مولان» (D. Mc Mullan)، «اسمیت» (Smith)، «کی. سی. آ. ولز» (K. C. A. Wells)، «اورهارت» (T. E. Everhart)، «پیز» (R. F. W. Pease)، «تورنلی» (R. F. M. Thornley)، «نیکسون» (W. C. Nixon) و غیره در تکمیل میکروسکپ The Cambridge Instruments Co. ساخته شد و در حال حاضر چندین سازنده از جمله JEOL، هیتاچی، فیلیپس، ARL و غیره میکروسکوپهای روبنده به بازار عرضه میکنند. قدرت تفکیک این میکروسکوپها در روش انتشاری تا حدود 50A° و در شرایط ایدهآل حتی به کمتر از این هم میرسد.

۲- ساختهای میکروسکپ روبنده

میکروسکپ الکترونی روبنده اساساً از سه قسمت اصلی تشکیل میشود:
الف) ستون اپتیک الکترونی.

ب) سیستم ایجاد خلاء که شامل اطاقدک و نگهدارنده نمونه میشود.

ج) دستگاههای ثبت سیگنال و نمایش آن روى یک صفحه تلویزیونی.

این سه قسمت در شکل ۱ که شماي یک میکروسکپ روبنده میباشد نشان داده شده است.

الف) ستون اپتیک الکترونی از یک منبع (یا اصطلاحاً توب) الکترونی و دو سه و گاه چهار عدسی الکترونی تشکیل می‌شود. پرتو الکترونی که از منبع ساطع شده بتوسط عدسیها ای الکترونی بصورت یک پرتو کانوئی شده و نازک به قطر تقریبی 250A° یا کمتر در می‌اید. در مجاورت عدسی آخر، دو بینی وجود دارد که کار حرکت دادن پرتو الکترونی (و یا اصطلاحاً روییدن آن) را بطریقه مغناطیسی بر روی سطح نمونه انجام می‌دهند. این دو بینی را در این مقاله بینی های «روبنده» می‌خوانیم و بوسیله یک «مولد روبنده» که ولتاژ لازم را برای منعطف کردن پرتو ایجا می‌کند، تغذیه می‌شوند. بدین ترتیب بتوسط مولد و بینی های روبنده، پرتو الکترونی همانطوری که در یک صفحه تلویزیونی انجام می‌گرد، قسمتی از سطح نمونه را می‌برید. دو عنصر دیگر نیز در ستون اپتیک الکترونی وجود دارند که عبارتند از:

I) چند روزنه (دیافراگم) که پرتو الکترونی پس از ساطع شدن از منبع و بینی از رسیدن به سطح نمونه از آنها عبور می‌کند. این روزنها بدو ملاحظه شده اند. اولاً می‌توان دی اکترونی هائی را که به سطح نمونه با روزنها می‌کنند. این روزنها از آلدگی سطح عدسیها بتوسط پرتو الکترونی جلوگیری می‌نمایند.

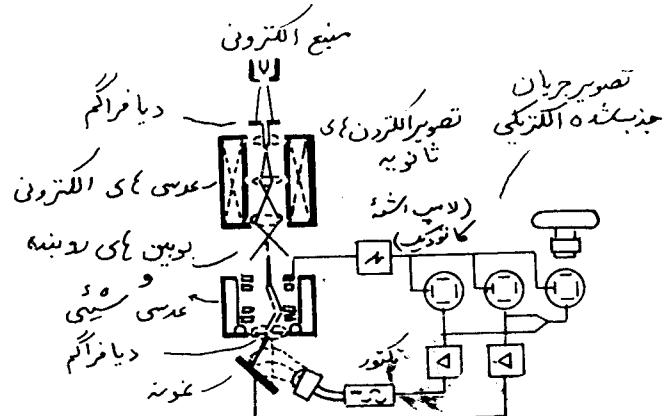
II) بین دیگری در عدسی آخر که «آستیگمات» (Astigmat) خوانده می‌شود و برای حذف آستیگماتیزم کوچکی که ممکن است در سیستم بوجود آید تعییه شده است، این آستیگماتیزم از عدم تقارن کامل استوانه‌ای حول یک خط هندسی که از مرکز عدسیها عبور می‌کند ناشی می‌شود.

ب) سیستم ایجاد خلاء معمولاً از یک پمپ سکانیکی و یک پمپ دیفوژیون تشکیل می‌گردد که توسط آنها خلاء لازم در ستون اپتیک الکترونی و در اطاق کنونه (Specimen chamber) ایجاد می‌شود. توسط محورهایی از خارج اطاق، نمونه را می‌توان در سه جهت متعامد حرکت داد. بعلاوه این محورها چرخش نمونه را نیز حول دو محور عمود با نمونه و موازی با آن ممکن می‌سازد.

ج) برخورد پرتو الکترونی با سطح نمونه، تعداد زیادی الکترونهای ثانویه، الکترونهاهای برگشتی، کاتد و لوپینسانس وغیره ایجاد می‌کند (در این مرور توضیحات بیشتری در بخش ۲ داده شده است). هریک از این پدیده‌ها را می‌توان به یک سیگنال الکتریکی تبدیل کرده و پس از تقویت این سیگنال به تنظیم کننده شفافیت یک لامپ اشعه کاتود بک وصل نمود. مولد الکتریکی واحدی جریان لازم را برای بینی های روبنده پرتو الکترونی تابش و بینی های رومنده پرتو الکترونی در لامپ اشعه کاتودیک تأمین می‌کند. بدین ترتیب یک همزمانی (Synchronization) بین حرکت پرتو الکترونی در ستون اپتیک و حرکت پرتو الکترونی در لامپ اشعه کاتودیک وجود دارد و در نتیجه برای یک نقطه در روی نمونه، نقطه معادلی در روی صفحه تلویزیونی بدست می‌اید. بعنوان مثال، سیگنال حاصله از الکترونهاهای ثانویه که از یک نقطه مشخص نمونه منتشر می‌شود، برای تنظیم شفافیت نقطه معادلی در روی صفحه فلورسانس (صفحه تلویزیونی) بکار می‌برد. همانطور که در قسمتهای بعدی توضیح داده شده، چون تعداد الکترونهاهای ثانویه (ویا هرسیگنال دیگر) که در نقاط مختلف یک نمونه ناهمگن تولید می‌شود متفاوت است، بنابراین شفافیت نقاط، در روی صفحه تلویزیونی هم یکسان نخواهد بود، بدین ترتیب در صفحه تلویزیونی، کنتراستی بین شفافیت نقاط بوجود می‌آید که مشخصه توپوگرافی یا خواص سطح نمونه است.

بزرگنمائی میکروسکوپ با همان مولد رومنده ای تعیین می‌شود که همزمانی (ستکرونیزم) بین روییدن پرتو در لامپ اشعه کاتودیک و پرتو تابش در ستون اپتیک را ایجاد مینماید. بازداشت (Output) این مولد مستقیماً به بینی رومنده پرتو الکترونی در لامپ اشعه کاتودیک وصل شده و اندازه صفحه تلویزیونی همیشه ثابت و معمولاً در حدود $10 \times 10 \text{cm}^2$ است. از طرف دیگر، فقط کسر کوچک و متغیری از باز داده مولد به بینی های رومنده پرتو تابش (در ستون اپتیک) داده می‌شود. هرچه بخش کمتری از انرژی مولد به بینی های رومنده در ستون اپتیک داده شود، انحراف ایجاد شده کمتر و بنابراین اندازه سطح رومنده شده در روی نمونه کوچکتر خواهد بود. بنابراین اگر سطح روئیده شده در روی نمونه مثلاً $1 \times 1 \text{mm}^2$ باشد، آنگاه بزرگنمائی خطی و مؤثر برابر با $100\text{cm}/1\text{mm}$ یعنی 100×100 خواهد بود.

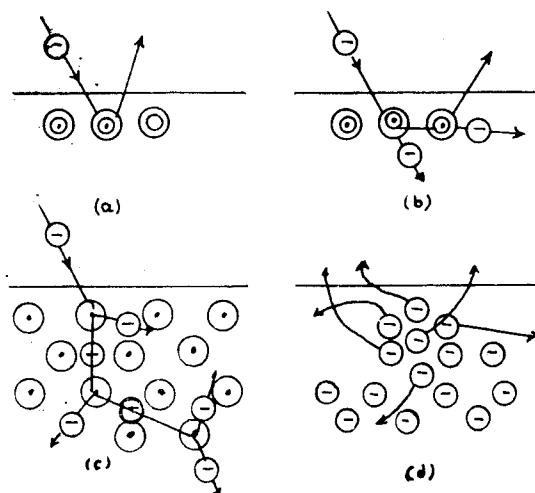
در این قسمت علاوه بر مولد رومنده که ولتاژ لازم را برای بینی های رومنده پرتو الکترونی تولید می‌کند، یک مولد ولتاژ قوی برای شتاب دادن به الکترونهاهی ساطع شده از منبع الکترونی و سایر لوازم الکترونیکی نیز وجود دارد.



شکل ۱- شماتیک یک میکروسکپ الکترونی روبیندی

۳- فعل و افعال بین پرتو الکترونی و نمونه‌های جامد در میکروسکپ روبیندی

در میکروسکپ روبیندی، با یک پرتو الکترونی سروکار داریم که معمولاً تحت ولتاژی بین ۱ تا ۵ کیلوولت (k. v.) آن شتاب داده شده است. وقتی چنین پرتوی از الکترونها بداخل یک نمونه جامد نفوذیکند، بیشتر انرژی خود را در همان اندام بايونیزه کردن اتمهای نمونه از دست میدهد. در شکل ۲، فعل و افعالهای سه‌میانه یک چنین پرتو الکترونی با یک جسم جامد نشان داده شده است.



شکل ۲) شماتی از فعل و افعالهای بین الکترون و نمونه جامد:

- (a) انعکاس الاستیک
- (b) انعکاس تقریباً الاستیک
- (c) تشکیل الکترونها ثانویه بتوسط یونیزه شدن اتمهای نمونه.
- (d) انتشار الکترونها ثانویه .

آن دسته از الکترونها تا مش که وارد نمونه شده اند نام «الکترونها اولیه» (Primary electrons) خوانده

میشوند.

در شکل ۲a، یک الکترون اولیه بطور الستیک با یکی از اتمهای نمونه در نزدیکی سطح برخورد کرده است. در این مورد هیچ نوع تبادل انرژی بین الکترون اولیه و اتم نمونه وجود ندارد ولی حوزه‌های الکتریکی داخلی اتم موجب تغییری در گشتاور الکترون می‌شود بطوریکه الکترون اولیه تحت زاویه بزرگی پراکنده شده و عملاً از نمونه به بیرون منتکس می‌گردد. در اینصورت الکترون مزبور یک «الکترون برگشتی» (Backscattered electron) خوانده می‌شود.

در شکل ۲b، فرآیند دیگری نشان داده شده که در آن نیز الکترون اولیه از نمونه به بیرون منحرف شده ولی در این مورد، الکترون مقداری از انرژی خود را در برخورد غیرالستیک با یکی از اتمهای نمونه از دست داده است.

در شکل ۲c، الکترون اولیه با یکی از اتمهای نمونه طوری برخورد کرده که به داخل نمونه منحرف شده و سپس در برخورد های متواالی با اتمهای دیگر، انرژی بیشتری از دست میدهد تا یافته پس از مدتی، دیگر انرژی کافی برای یونیزه کردن اتمهای موجود در سیر خود را ندارد. الکترون هائی که در اثر برخورد الکترونها اولیه با اتم نمونه بیرون از داخله می‌شوند، ممکنست خود یک انرژی سینتیک در حدود الکترونها اولیه بدست آورده و در اینصورت بتوانند اتمهای دیگری را یونیزه کرده والکترونها بیشتری تولید کنند. این فرآیند مرتبآ تکرار می‌شود. انرژی یونیزه کردن اتمها معمولاً بین ۳ تا ۸ الکترون ولت است. نتیجه کلی اینستکه در زبان کوتاهی در حدود 10^{-10} ثانیه، تعداد بسیار زیادی از - الکترون هائی که از اتمهای نمونه بیرون اندخته شده‌اند، در مسیر الکترون اولیه بوجود آمده و در لابالی یونهای ثابت در نمونه حرکت می‌کنند. اینگونه الکترون‌ها را «الکترون‌های ثانویه» (Secondary electrons) می‌خوانیم. الکترون‌های ثانویه در نمونه دینورز شده و بتدریج انرژی سینتیک باقیمانده خود را با گرم کردن شبکه (یعنی تولید فوئون‌ها) و یا سایر فرآیندها از دست میدهند. مسلم است که در حین مشاهده نمونه در میکروسکم، تمام رویدادهای بالا- که در شکل های ۲b و ۲c نشان داده شده‌اند هم‌زمان رخ میدهند. پدیده‌های مهمی که از بمباران پرتو الکترونی حاصل می‌شود در زیر خلاصه شده است:

(الف) انعکاس الکترونها اولیه (عبارت دیگر، ایجاد الکترونها برگشتی).

(ب) تولید الکترونها ثانویه.

(ج) کاتد ولومنسانس

(د) برانگیختگی اشعه ایکس

(ه) هدایت الفاشه بتوسط پرتو تابش

و زیانهای ناشی از پرتو افسانی. (Radiation damage)

از تمام فرآیندهای (الف) تا (ه) میتوان برای تشکیل تصویر در میکروسکم الکترونی روینده استفاده کرد.

در قسمتهای زیر، این فرآیندها و روش‌های مختلف تشکیل تصویر به اختصار شرح داده شده است.

۴- روش‌های مختلف کاربرد میکروسکم روینده

۱- روش انتشاری (The emissive mode)

در این روش، الکترون هائی که از سطح نمونه خارج می‌شوند، جمع آوری و پس از آنکه بصورت یک جریان الکتریکی تقویت گردید، برای تشکیل تصویر در میکروسکم الکترونی روینده استفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۳، توزیع انرژی را، برای الکترون‌های خارج شده از سطحی که تحت بمباران الکترونها با انرژی E_0 قرار گرفته، نشان میدهد:

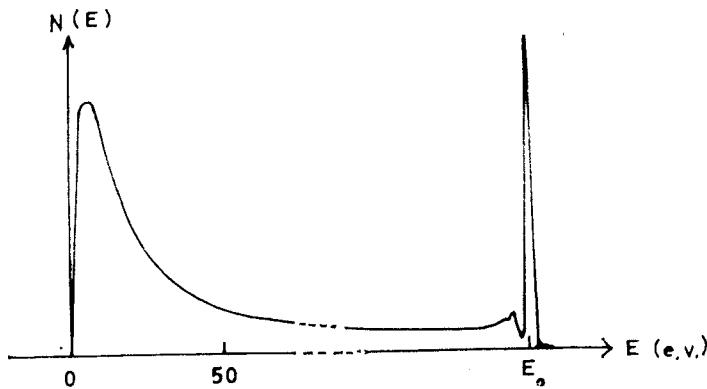
دو ویژگی مهم در این توزیع مشاهده می‌شود. ابتدا ما کزیمی است که در انرژی‌های پائین و در حدود E_0 الکترون ولت (e.v.) رخ میدهد. بطور قراردادی، آن دسته از الکترون‌ها که انرژی آنها در شکل ۳ بین 0 تا 0.5 e.v. می‌باشد، توزیع انرژی را، برای الکترون‌های خارج شده از سطحی که تحت بمباران الکترونها با انرژی E_0 دارد.

الکترون ولت است، بنام «الکترون‌های ثانویه» خوانده می‌شوند (به شکل ۲c نیز رجوع شود).

ویژگی مهم دیگراین توزیع، ماکزیم تیزی است که در حوالی انرژی الکترونها تابش (E) رخ میدهد.

این ماکریم تیز ناشی از پراکندگی (Scattering) الکترونهای اولیه بوسیله اتمهای نمونه تحت روایای زیاد (> 90) یعنی الکترونهای برگشتی میباشد (بهشکل ۲ a رجوع شود).

الکترونهای برگشتی حاوی اطلاعاتی درباره ترکیبات شیمیائی نمونه و همچنین توبوگرافی سطحی آن هستند. الکترونهای ثانویه علاوه بر توبوگرافی سطحی، حاوی اطلاعاتی درباره وجود حوزه‌های الکتریکی و مغناطیسی نزدیک به سطح نمونه میباشند.



شکل ۳) توزیع انرژی الکترونهای ثانویه از یک نمونه جامد تحت بمباران یک پرتو تابش الکترونی با انرژی

حال الکترونهای ثانویه‌ای را که در نزدیکی سطح نمونه تشکیل میشوند، در نظر میگیریم. بعضی از این الکترون‌ها بطرف سطح دیفوژه شده و با یونیزه کردن اتمهای نمونه در مسیر، انرژی خودرا از دست میدهند، وای اگر زمانی که این الکترونها به سطح میرسند، انرژی سینتیک آنها هنوز پیش از انرژی سد پتانسیل سطحی (Surface barrier energy) که معمولاً بین ۲ تا الکtron ولتاست باشد، آنگاه احتمال فرار الکترونها از نمونه زیاد است. اکنون اگر الکترونی با یک پتانسیل مشبт در نزدیکی سطح قرار داده شود، الکترون‌های برگشتی و آن دسته از الکترون‌های ثانویه که از نمونه خارج میشوند، بسوی این الکترون جذب میگردند. چنین الکترونی که برای جمع‌آوری الکترونهای منتشره (مجموعه‌ای از الکترونهای برگشتی و ثانویه) بگار میرود، معمولاً بنام «کلکتور» (Collector) خوانده میشود و جریان حاصله در این الکترون را میتوان پس از تقویت به تنظیم کننده شفافیت یک لامپ اشعه کاتودیک وصل کرده و از آن یک نقطه شفاف بر روی صفحه تلویزیونی بدست آورد. وقتی پرتو الکترونی در حال رویدن سطح است، در هر لحظه با یک نقطه از نمونه برخورد میکند. با توجه به اینکه تعداد الکترونهای منتشره به توبوگرافی، ویژگیهای الکتریکی و نیز ساختمان داخلی نمونه در آن نقطه بستگی دارد، بنابراین بازی هرنقطه از سطح نمونه، جریان حاصله در کلکتور و در نتیجه شفافیت نقطه معادل در روی صفحه تلویزیونی (فلورسانس) متفاوت خواهد بود. بدین ترتیب اگر یک همزمانی (Synchronization) بین رویدن سطح نمونه بوسیله پرتو الکترونی در ستون اپتیک و رویدن صفحه تلویزیونی در لامپ اشعه کاتودیک وجود داشته باشد، آنگاه کنتراسی در صفحه مسأله خواهد شد که مشخص کننده ساختمان سطحی و یا توبوگرافی نمونه خواهد بود. هنگامیکه تصویر از الکترون‌های ثانویه یا الکترونهای برگشتی و یا ترکیبی از ایندو بدست آید، گفته میشود که از میکروسکپ به «روش انتشاری» استفاده شده است.

۴.۲ - روش کاتد ولومنینسنس (The cathodoluminescence mode)

اغلب الکترونهای ثانویه‌ای که در نمونه تولید میشوند، از سطح فارنکرده و به داخل نمونه دیفوژه میشوند. بعضی از این الکترون‌ها در حین دیفوژیون از مناطقی میگذرند که یونهای پلاسمای اولیه در آنجا وجود دارند. در این مناطق الکترونهای ثانویه با یونهای ترکیب میشوند، بعارت دیگر الکترونهای آزاد اضافی به ترازهای اشغال نشده این یونها میافتد. انرژی که از این راه آزاد میشود بصورت کواتنوم‌های انرژی تابشی ساطع میگردد. اگر الکtron به یکی از ترازهای

بیرونی بیافتد، یک فوتون با انرژی مطابق نور معمولی و یا تابشی نزدیک به مادون قرمز ساطع می‌شود. اگر پس از آن، الکترون از ترازهای بیرونی همان اتم به یکی از ترازهای درونی آن بیافتد، یک تابش ویژه اشعه ایکس (Characteristic X-ray radiation) حاصل می‌گردد. زمانیکه کوانتومهای نوری از سطح نمونه خارج شوند، پدیده حاصله «کاتودو-لوبینسانس» یعنی تابش ناشی از بمباران الکترونی (یا اشعه کاتودیک) خوانده می‌شود.

حال اگر جسمی که از خاصیت کاتد ولوبینسانس برخوردار است - یعنی تحت بمباران الکترونی از خود نور ساطع می‌کند - در میکروسکپ روینده برسی شود، میتوان نور حاصله را جمع آوری کرده و با استفاده از یک تقویت‌کننده نوری (Photo-multiplier) آنرا بیک سیگنال الکتریکی تبدیل نمود. این سیگنال الکتریکی همانطور که در قسمت ۲ تشریح شد به تنظیم کننده شفاقتی یک لامپ اشعه کاتودیک فرستاده می‌شود و بدین ترتیب تصویری در صفحه تلویزیونی بدست می‌باشد.

برای جمع آوری نور جهت تشکیل تصویر از دو روش زیر استفاده می‌گردد:

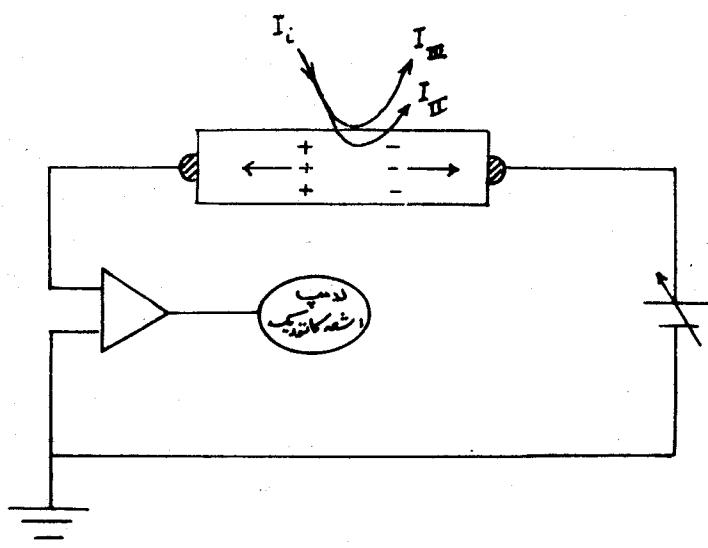
- (الف) تمام نور حاصله، بدون در نظر گرفتن طول موج شاععها در طیف، جمع آوری می‌شود.
- (ب) با استفاده از یک تکفام‌ساز (Monochromator)، طول موج بخصوصی انتخاب می‌گردد.

۴.۳- روش اشعه ایکس (The X-ray mode)

اگر بجای جمع آوری نور حاصله از نمونه‌ای که تحت بمباران الکتریکی قرار گرفته، اشعه ایکس تولید شده را جمع آوری کنیم، میتوان تصویری، مشابه با آنچه در روش کاتد ولوبینسانس بدست می‌باشد، تشکیل داد. تصویر حاصله اطلاعاتی در باره ترکیب شیمیائی نمونه بدست میدهد. این روش در واقع بنای تکنیک «میکرو آنالیز اشعه ایکس با استفاده از پرتو الکترونی» (Electron probe X-ray microanalysis) می‌باشد.

۴.۴- روش هدایتی (The beam-induced conductivity mode)

روشن دیگر استفاده از میکروسکپ روینده، روش «هدایت الکتریکی القاء شده بتوسط پرتو تابش» یا اختصاراً «روشن هدایتی» است. در این روش، بین دو نقطه از سطح نمونه، بتوسط دو سیم، اختلاف پتانسیلی برقرار می‌گردد. سپس از جریان حاصله بین این دو سیم در تشکیل تصویر استفاده می‌شود. برخورد الکترون‌های تابش با نقطه‌ای از نمونه، حاصله‌ای الکتریکی جدیدی در آن نقطه ایجاد می‌کند که، وجب تغییراتی در هدایت الکتریکی آن نقطه می‌شود و در نتیجه تفاوت‌هایی در جریان حاصله بین دو سیم بوجود می‌باشد.



شکل ۴

این روش مخصوصاً در بررسی اجسام نیمه هادی بسیار مناسب است. در شکل ۴، نمونه استوانه‌ای شکل کوتاهی از یک نیمه هادی نسبتاً مقاوم در نظر گرفته شده که در طول آن با برقاری تمايل الکتریکی (Bias) کوچکی، یک حوزه الکتریکی بوجود آمده است. پرتوالکتریکی بامونه، تعداد زیادی الکترون ویون، وبا بعبارت دیگر «جفت‌های الکترون-حفره» (Electron-hole pairs) تولید می‌کند. حوزه الکتریکی که در نمونه برقرار شده این بارهای مخالف را از یکدیگر جدا می‌نماید. الکترون‌ها بطرف آنود جریان پیدا می‌کنند و حفره‌ها بسوی کاتود دیفوزه می‌شوند. هر جفت الکترون حفره که به فاصله بین دو الکترون از یکدیگر جدا گردند معادل بالانتقال یک الکترون از الکترون منفی به الکترون مثبت می‌باشد. در مداری که در شکل ۴ نشان داده شده، این جریان الکتریکی داخلی بتوسطیک جریان الکتریکی خارجی موازن شده که میتواند تقویت گشته و بصورت تابعی از مختصات مکانی پرتو تابش بر سطح نمونه در صفحه تلویزیونی ظاهر شود. در واقع هر الکترون در پرتو تابش میتواند چندین هزار جفت الکترون-حفره تولید نماید. روی این اصل باستفاده از یک جریان پرتو اولیه باشد I_p ، میتواند جریانی معادل با $10^3 \geq I \geq 0$ بوجود آید.

۵- روش جریان جذب شده الکتریکی (The absorbed current mode)

برانگیختگی نمونه توسط پرتو تابش، جریان الکتریکی دیگری نیز در نمونه بوجود می‌آورد. در شکل ۴، سه جریان الکترونی نشان داده شده است. I_I که همان جریان پرتو تابشی است که بر نمونه متابد. I_{II} جریان الکترونهای ثانویه‌ای است که در نمونه تولید و از سطح به خارج منتشر می‌شوند و I_{III} جریان ناشی از انعکاس الکترونهای اولیه (یعنی الکترونهای برگشتی) است که از نمونه خارج می‌شوند در حالت کلی :

$$\Delta I = I_I - (I_{II} + I_{III}) \neq 0$$

بعبارت دیگر، در اثر بمباران الکترونی نمونه، یک بار الکتریکی منفی در آن ایجاد و با ادامه تابش، مقدار آن افزایش می‌یابد. این فرآیند بتوسط یک جریان الکتریکی در مدار خارجی موازن می‌شود. بدین ترتیب، مطابق با قانون کیرشوف برای خشی ماندن نمونه از نقطه نظر الکتریکی، لازم است جریانی معادل ΔI ، در نمونه روان شود. عموماً ΔI ، «جریان جذب شده الکتریکی بتوسط نمونه» (Specimn-absorbed current) خوانده می‌شود.

به محض آنکه، نمونه به حالت خشی الکتریکی برسد، جریان جذب شده الکتریکی هم متوقف می‌گردد. در حالیکه جریان القاء شده بتوسط پرتو تابش (قسمت ۴.۰.۴) حتی پس از آنکه نمونه از نقطه نظر الکتریکی خشی شود، باز هم میتواند ادامه یابد.

عموماً بازای شدت جریان اولیه‌ای معادل با I_I ، یک شدت جریان جذب شده الکتریکی در حدود I_{II} $\frac{1}{2}$ بود. در حالیکه جریان القاء شده همان‌طور که در قسمت ۴.۰.۴ گفته شد - تا حدود $10^3 I_{II}$ دیرسد. بوجود می‌یابد.

۶- روش عبوری (The transmission mode)

برخلاف روش‌های پیشین، در روش عبوری فقط از تیغه‌های (Foils) بسیار نازکی از نمونه استفاده می‌گردد زیرا در این روش تنها آن دسته از الکترونها در ساختن تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرند که بطور کامل در نمونه نفوذ کرده و از سطح دیگر آن خارج شوند. واضح است که در روش عبوری، دتکتور الکترونی در زیر نمونه قرار داده می‌شود.

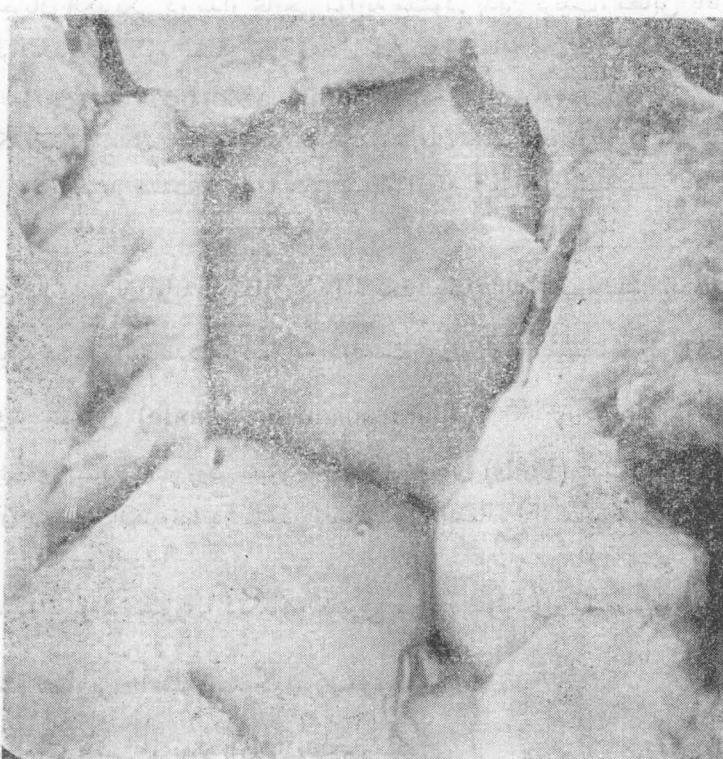
۵- کنتراست تصاویر حاصله از میکروسکپ روینده

۱- کنتراست ناشی از توبوگرافی سطحی

مهمترین عامل تعیین کننده تعداد الکترونها که از هر نقطه از سطح نمونه خارج می‌شوند، زاویه تابش یعنی زاویه موجود بین پرتو تابش و خط عمود بر سطح نمونه در آن نقطه است. تأثیر عامل مذکور در مورد الکترونها



(a)



(b)

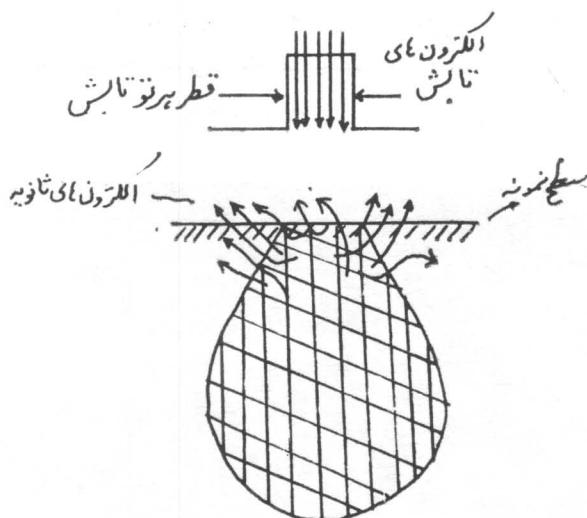
شکل ۵- تصویریک مقطع گسیختگی از فولاد کم کربن (C٪ ۰.۸٪) در آزمایش خستگی که بروش انتشاری بدست آمده است. همانطور که در عکس مشاهده میشود، در قسمت هائی از نمونه، شکست در مرزدانه ها انجام گرفته است. (a) بزرگنمایی $\times 110$ و (b) بزرگنمایی $\times 5700$

برگشتی اولین بار توسط «مک مولان»، [مأخذ۸] و در مورد الکترونها ثانویه بتوسط «اورهارت» [مأخذ۸] بررسی شد. نتایجی که اورهارت بدست آورد، نشان میدهد که تعداد الکترونها ثانویه‌ای که از نمونه خارج میشود نسبت به وضعیت فضائی (Orientation) سطح آن بسیار حساس است. این امر بخصوص برای زوایای تابش بیشتر از ۲۵° اهمیت زیادتری دارد. نظریه‌ای که کنتراست حاصله در تصاویر میکروسکپی روبنده ناشی از تغییر در تعداد الکترونها خارج شده از نقاط مختلف سطح نمونه میباشد، عامل زاویه تابش در ایجاد کنتراست از اهمیت خاصی برخوردار است. در ضمن باید توجه کرد که زاویه تابش در نقاط مختلف سطح نمونه، بواسطه تویوگرانی آن سطح تعیین میگردد. بعنوان مثال، در شکل ۶ که وجود دارد، سطوحی که زوایای بزرگتر با امتداد پرتوالکترونی میسازند شفاف‌تر بنتظیر می‌رسند.

ناگفته نماند که جهت دید نمونه در تصاویر میکروسکپ الکترونی روبنده (یا میکروگراف) جهتی است که ناظر در امتداد پرتو تابش به نمونه نگاه میکند.

کارهای مک مولان و دورهارت نشان داد که در یک نقطه از سطح نمونه، با افزایش زاویه تابش، سیگنانل بدست آمده نیز قویتر میشود. علتی که برای این وابستگی پیشنهاد شده، اختصاراً بقرار زیر است:

پس از اینکه پرتو تابش داخل نمونه شد، الکترونها آن درجهات مختلف پراکنده گردیده و پس از رسیدن از دادن انرژی خود در حجمی گلابی شکل نفوذ پیدا میکنند، (شکل ۶).



شکل ۶- رابطه بین سیگنانل الکترونها ثانویه و قطر پرتو تابش

در تمامی مسیری که الکترونها تابش در نمونه پیمایند، الکترونها ثانویه تولید میشوند که در همه جهات حرکت کرده و در حین حرکت انرژی خود را از دست میدهند. اگر انرژی سینتیک این الکترون‌ها در رسیدن به سطح بیش از سد پتانسیل سطحی باشد، از سطح نمونه خارج شده و بواسطه کلکتور جمع آوری میشوند. در غیر اینصورت، الکترونها ثانویه مذکور در نمونه جذب و به زمین جریان پیدا میکنند. برطبق نظریه بروینینگ (H. Bruining) تعداد الکترونها، N که پس از طی مسافتی برابر با x از نقطه تولید، انرژی کافی برای فرار از سطح دارند برابر است با:

$$N = N_0 \exp(-\alpha x)$$

در این رابطه، α یک ثابت و N_0 تعداد الکترونها در پرتو تابش است، [مأخذ ۹]. نتایج تجربی نشان میدهد که α بیش از 0.01\AA^{-1} و احتمالاً بیش از 0.05\AA^{-1} میباشد. مفهوم این امر اینستکه تقریباً تمام الکترونها که از سطح خارج میشوند در مسافتی کمتر از 100\AA و احتمالاً 20\AA تولید شده‌اند*. اورهارت با استفاده از رابطه بروینینگ، توزیع الکترونها

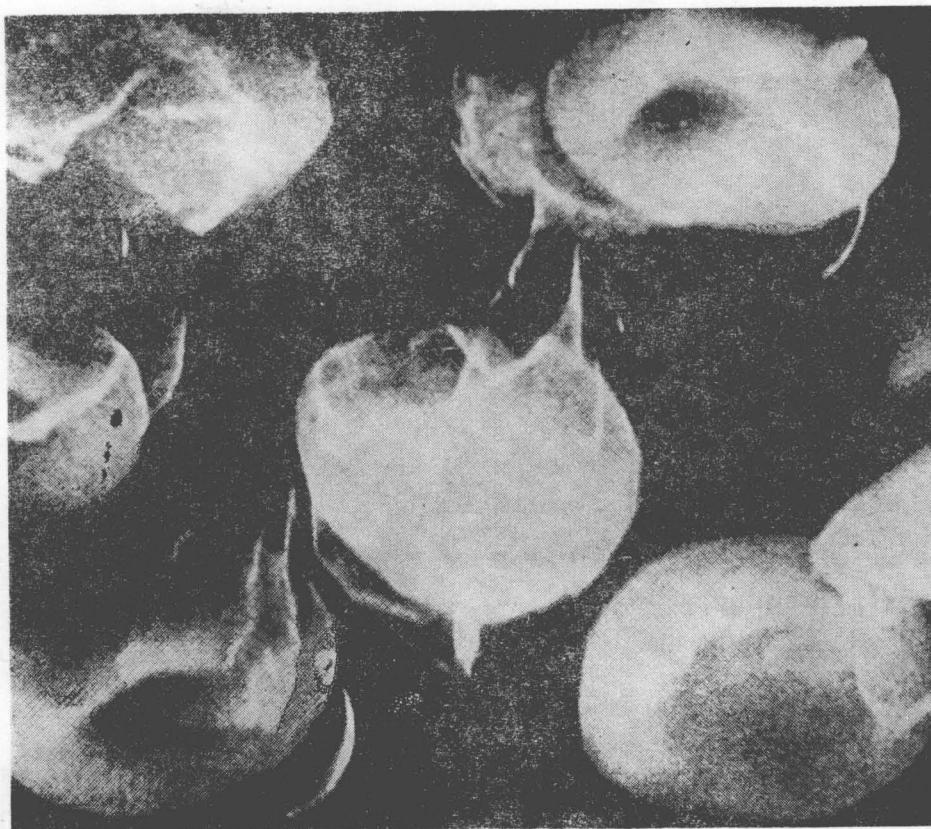
* پارامتر α را میتوان بعنوان ضریب جذب الکترونها ثانویه در نمونه تعریف کرد.

ثانویه خارج شده از سطح نمونه را بر حسب مسافت از نقطه ورود الکترونها تابش در سطح نمونه محاسبه کرده و نشان داده است که بیش از نیمی از الکترونها ثانویه از مسافتی کمتر از $\frac{1}{2}a$ از نقطه ورود پرتو الکترونی خارج می‌شوند،

[مأخذ ۸]

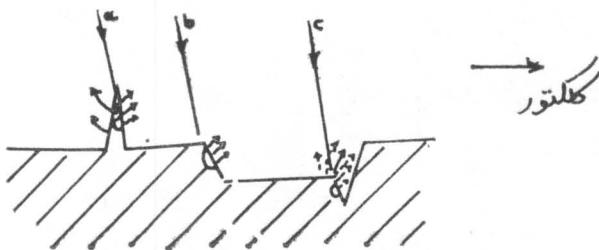
با استفاده از این نتایج، می‌توان دید که چگونه تعداد الکترونها ثانویه‌ای که از نمونه خارج می‌شوند با افزایش زاویه تابش از دیاد می‌باید. هرچقدر که زاویه مزبور زیادتر شود، طول مسیر الکترونها اولیه در فاصله حدود $100A^\circ$ عمود بر سطح نمونه نیز، زیادتر شده و در نتیجه تعداد الکترونها ثانویه‌ای که در این مسیر تولید و قادر به خروج از سطح نمونه هستند افزایش پیدا می‌کنند.

ایجاد کنتراست در تصاویر میکروسکپ‌های الکترونی روینده در روش انتشاری مشابه با تشکیل تصویر در یک سیستم اپتیک است. روی این اصل میکروگراف‌های حاصله از میکروسکپ‌های روینده عموماً شباهت زیادی به تصاویری دارند که از میکروسکپ‌های نوری تحت بزرگنمائی های کم بدست می‌آیند. این شباهه از این لحاظ اهمیت دارد که در مواردی که کنتراست ناشی از تغییرات در توبوگرافی سطحی باشد، میکروگرافی میکروسکپ روینده را براحتی می‌توان تفسیر کرد. یک نتیجه جالب از نفوذ الکترونها در موردی است که قشری ببروی نمونه نشسته و در بعضی از نقاط آن، قشر مذکور باندازه‌ای نازک باشد که بعضی از الکترونها اولیه بتوانند به سطح نمونه رسیده و در آن نفوذ کرده و الکترونها ثانویه دیگری به وجود آورند. در این صورت یک تصویر مضاعف بدست می‌آید. شکل ۷، یاخته‌های قرمز خون را که بتوسط یک لایه تبخیری کربن پوشیده شده‌اند، نشان میدهد. در بعضی از نقاط که این لایه از یاخته‌ها جدا شده، یک تصویر مضاعف ایجاد گردیده است.



شکل ۷- یاخته‌های قرمز خون که بوسیله یک لایه نازک کربن پوشیده شده‌اند. در قسمتی از عکس، لایه کربن از یاخته‌ها جدا شده و تصویر مضاعف (از یاخته زیرین ولایه کربن روئی) بدست آمده است (بزرگنمائی = $\times 2800$).

علت دیگر ایجاد تغییرات در تعداد الکترون‌های خارج شده از نمونه، ناهمواری‌هایی در سطح نمونه هستند که اندازه آنها در حدود اندازه حجم گلابی شکل ناشی از نفوذ الکترون‌های اوایله است. در این حالت، در برآمدگی‌ها و یا فروراقنگی‌های سطح، قسمتی از این حجم گلابی شکل بوسیله سطح نمونه حذف می‌شود و بدین ترتیب نه فقط تعداد بیشتری از الکترون‌های برگشتی بوسیله کلکتور جمع آوری می‌گردد، بلکه الکترون‌های ثانویه بیشتری نیز قادر به خروج از سطح نمونه خواهند بود. این اثر موقعی به حد اکثر می‌رسد که پرتو الکترونی با یک ذره کروی شکل و کوچکتر از حجم نفوذ گلابی شکل بخورد نماید. پدیده مذکور بطری شماتیک در شکل ۸ برای پرتوهای و نشان داده شده است. در این شکل، دیده می‌شود که بخش بزرگی از الکترون‌های ثانویه می‌توانند از سطح نمونه فرار کنند زیرا پیرامون حجم گلابی شکل کاملاً باز است. اثر اخیر در شکل ۹، که سطح یک تیله آهن اسفنجی را نشان میدهد، دیده می‌شود.



شکل ۸- پیکانهای خط چین الکترون‌هایی را نشان میدهد که دوباره وارد نمونه شده و بوسیله کلکتور ثبت نمی‌شوند. خطوط پیوسته نمودار الکtron‌هایی است که بوسیله کلکتور جمع آوری می‌شوند.

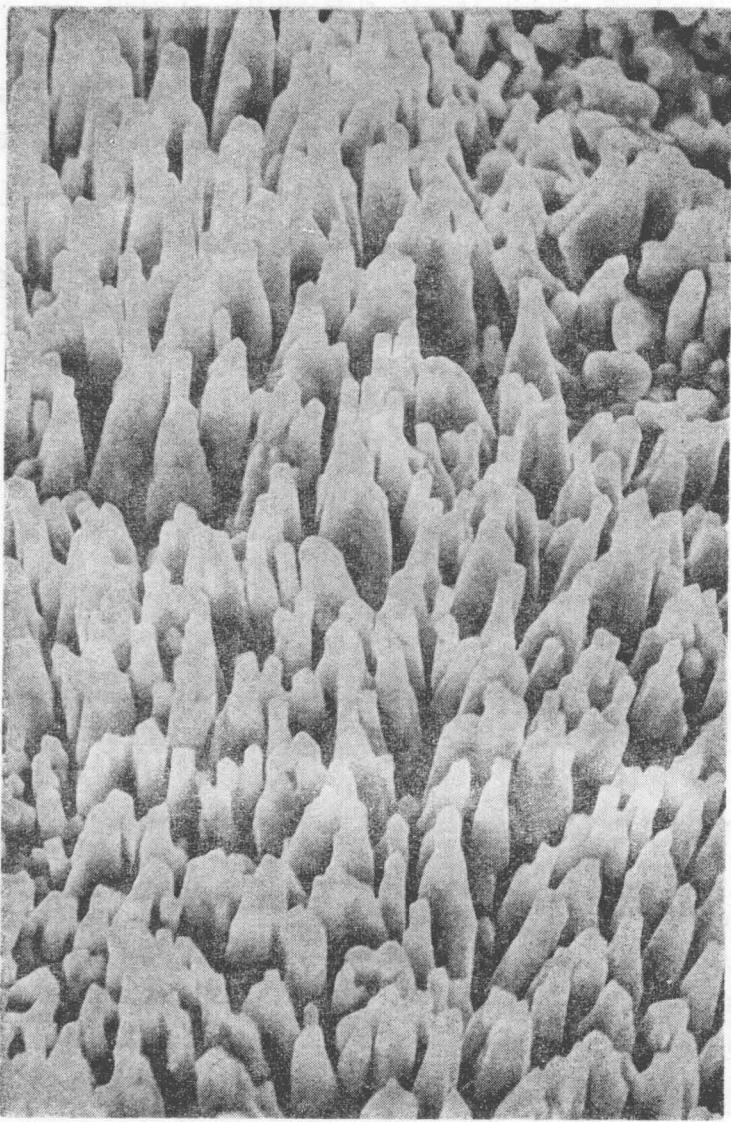
الکترون‌های ثانویه‌ای را که حاوی اطلاعاتی در مورد توپوگرافی سطحی نمونه می‌باشند می‌توان بدو دسته تقسیم کرد:

دسته اول الکترون‌هایی هستند که به موقعیت فضایی سطح کوچکی که تحت تابش پرتو اکترونی قرار گرفته واپسی می‌باشند. دسته دوم الکترون‌هایی هستند که بعلت ناهمواری‌های قابل توجه در سطح نمونه از سطح اطراف پرتو تابش خارج می‌شوند و در صورتیکه ناهمواری‌های سطح نمونه با اندازه کافی نباشد، این الکترونها قادر به خروج از نمونه نخواهند بود. در اغلب موارد، دسته اخیر تنها یک تغییر جزئی در کنتراست تصویر بوجود می‌آورد.

در برگنمانی‌های بسیار زیاد، الکترون‌های ثانویه‌ای که بوسیله الکترون‌های برگشتی تولید می‌شوند، می‌توانند کنتراستی را که در غیاب آنها وجود داشت کاهش دهند. این الکترون‌های ثانویه در مناطق دور از نقطه ورود پرتو تابش تولید می‌شوند و اگر فاصله آنها بیش از نصف اندازه یک عنصر تصویر (یعنی سطح مقطع پرتو تابش) از نقطه ورود نوری باشد، بصورت یک سیگنال پارازیتی عمل کرده و کنتراست تصویر را «مه آسود» و نامشخص مینماید.

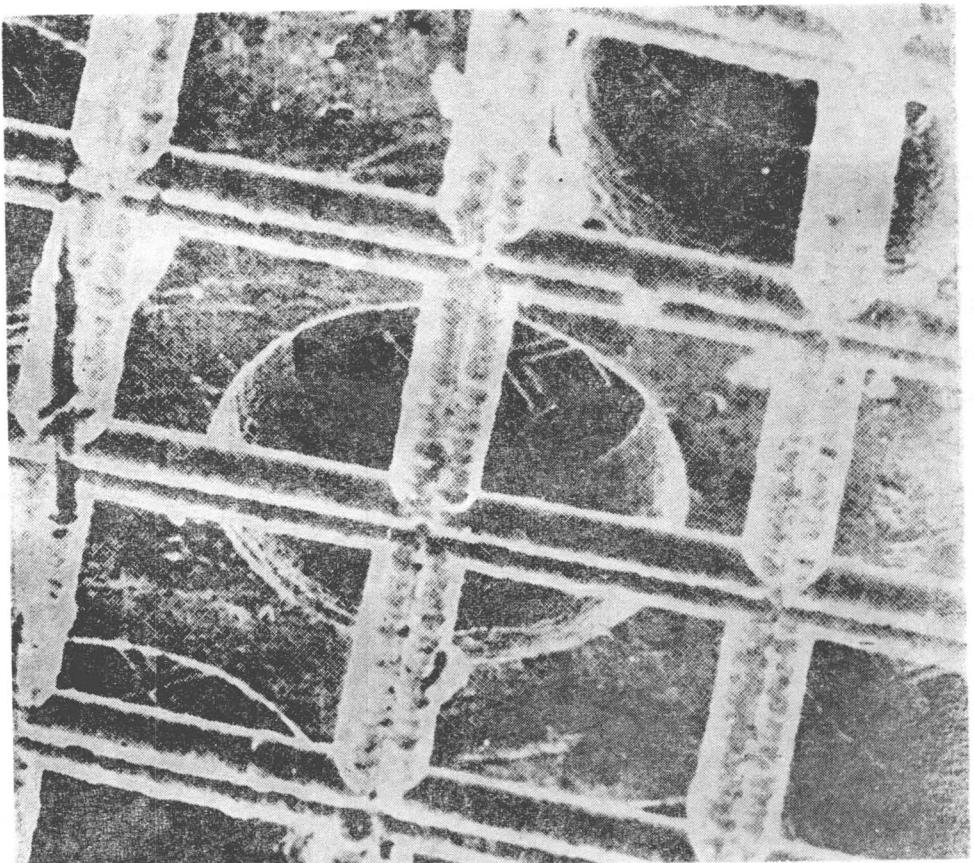
یکی از مزایای عمدۀ میکروسکپ روینده، توانائی آن در نشان دادن تصویر مناطقی از نمونه است، که از دید کلکتور مستتر می‌باشند. این توانائی از آنچه سرچشمه می‌گیرد که مسیر الکترون‌های ثانویه بتوسط حوزه الکترونی که در کلکتور برقرار شده تعیین می‌گردد و پتانسیل مثبت الکترون، الکترون‌های خارج شده از سطح نمونه را که در میدان الکترونی آن می‌باشد، از اطراف مواعن جذب می‌کند. بدین ترتیب قسمت‌هایی از نمونه که در یک سیستم اپتیک معادل قابل رویت نیستند در تصاویر میکروسکپ روینده ظاهر می‌شوند. نکته اخیر در شکل‌های 10a و 10b بخوبی مشهود است.

در شکل 10a، سه شبکه (Grid) مخصوص میکروسکپ‌های الکترونی عبوری روی همدیگر قرار داده شده‌اند و تصویر آنها با استفاده از الکترون‌های ثانویه در میکروسکپ روینده بدست آمده است. شکل 10b نیز همین منطقه را نشان میدهد ولی در این مورد پتانسیل کلکتور صفر می‌باشد و بنابراین تصویر فقط از الکترون‌های برگشتی حاصل شده والکترون‌های ثانویه دو تشكیل آن دخالت نکرده‌اند. همان طوری که مشاهده می‌شود، در شکل اخیر، مناطقی از نمونه که از دید کلکتور پنهان بوده‌اند، تغییر شبکه سوم- در تصویر دیده نمی‌شود.

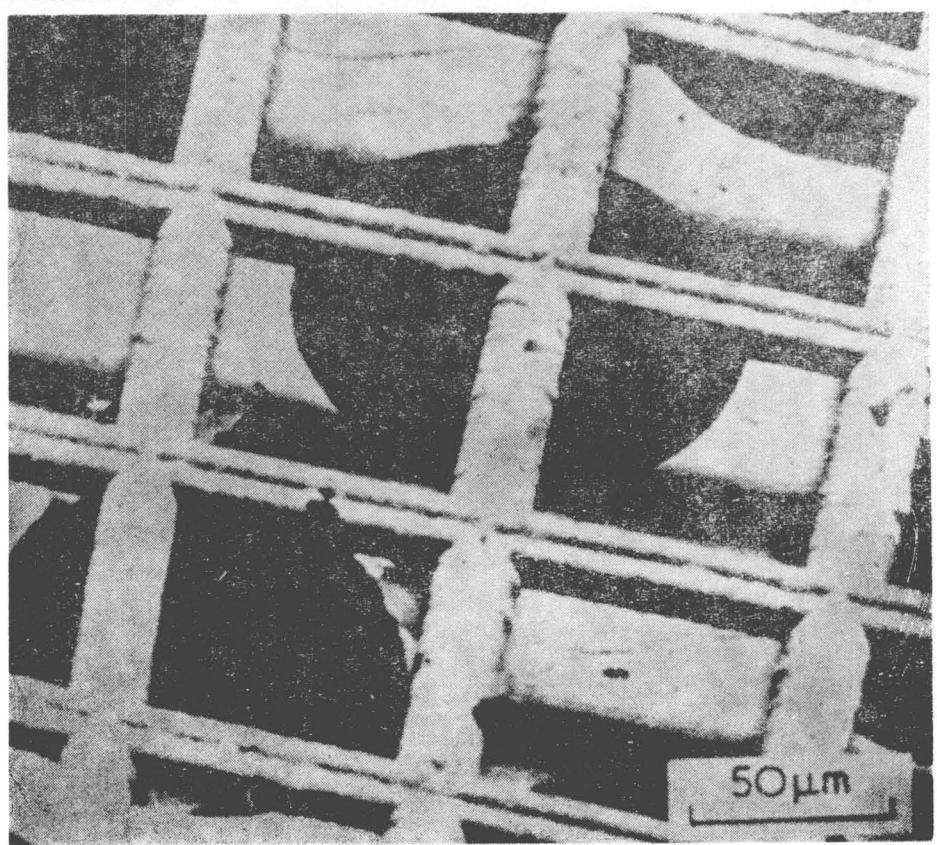


شکل ۹- سطح تیله آهن اسفنجی (بزرگنمایی $\times 270$)

باید اضافه کرد که تمام الکترونهای ثانویه‌ای که از نمونه خارج می‌گردند بتوسط حوزه الکتریکی در گلکتور جمع‌آوری نمی‌شوند. بعضی از موانع بقدرتی بزرگ هستند که تعدادی از الکترون‌های ثانویه که از نمونه خارج شده‌اند با آنها برخورد کرده و دوباره به داخل نمونه بر می‌گردند این پدیده در شکل ۸ در حالت نشان داده شده است.



(a)



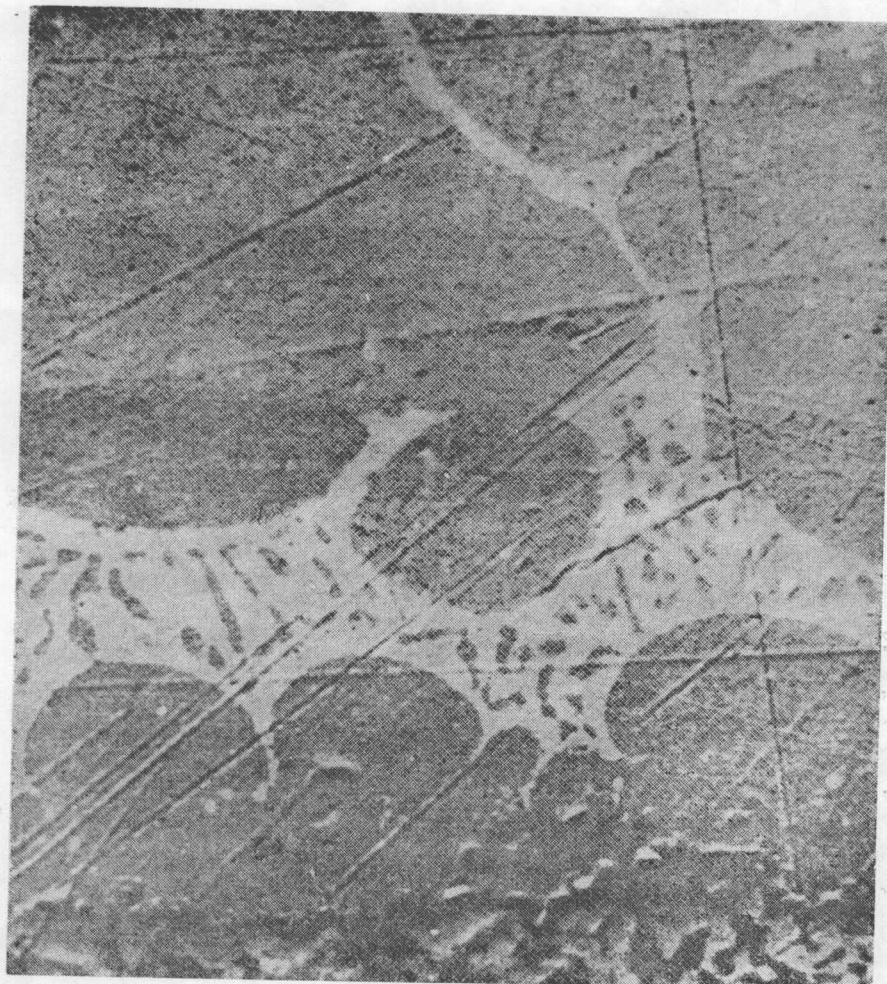
(b)

شکل ۱۰- تصویر سه شبکه مخصوص میکروسکوپی‌های الکترونی عبوری (grid) که روی همدیگر قرار گرفته‌اند.
 (a) به روش انتشاری (الکترون‌های ثانویه + الکtron‌های برگشتی)
 (b) به روش برگشتی (الکترون‌های برگشتی)

۵- کنتراست عدد اتمی

اگر دریک نمونه کاملاً صاف و صیقلی شده، مناطقی با اعداد اتمی متفاوت (عناصر مختلف) وجود داشته باشد، دراینصورت میتوان با روش انتشاری، کنتراستی بین این مناطق مشاهده کرد. کنتراستی که فقط از الکترونهای برگشتی در تصویر حاصل میشود از کنتراستی که توسط مجموعه الکترونهای برگشتی والکترونهای ثانویه در تشکیل تصویر بدست میاید، پیشتر است. این اثر در میکروسکپ الکترونی روییدنی روبنده بار بوسیله «ولز» (O.C. Wells) بررسی شد، [مأخذ ۱]. ولز با فشار، یک میله برنجی را وارد یک لوله دور آلومین (Duralumin) کرد و سطح مقطع این نمونه را سوهان زده و صیقلی نمود. بطریانکه هر دو قسمت سطح نمونه مذکور (یعنی قسمت برنجی و قسمت دورآلومین) بصورت مشابهی صیقل کاری شده بودند، کنتراست حاصله در میکروسکپ روبنده فقط ناشی از جنس دو قسمت بود و توبوگرافی دخالتی در کنتراست تصویر نداشت.

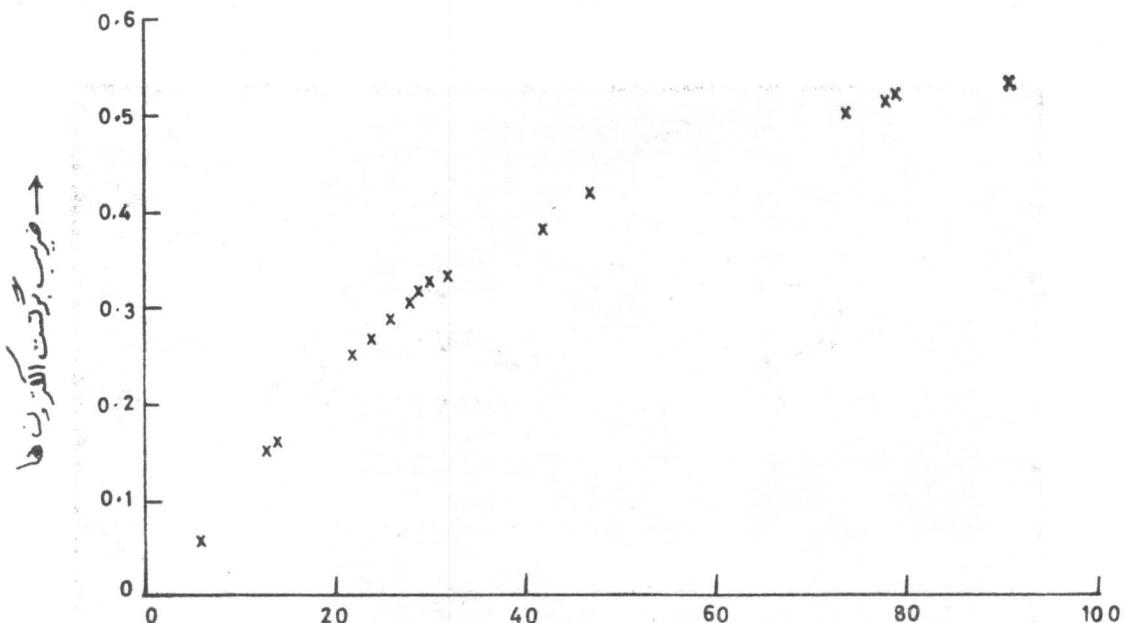
مثالی از کنتراست عدد اتمی در شکل ۱۱ مشاهده میشود.



شکل ۱۱- سر لحیم شده دریک فلز. اتصال لحیم شده در شکل خیلی شفافتر از زمینه ظاهر شده است.

در واقع سالها پیش از رایج شدن میکروسکپ روبنده «پالوئل» (P.C.R. Palluel) [مأخذ ۱۱] و «استرن گлас» (E.J. Stern glass) [مأخذ ۱۲] پیشنهاد کرده بودند که تعداد الکترونهای اولیه‌ای که از سطح یک نمونه منعکس میشود به عدد اتمی آن نمونه بستگی دارد. بخشی از الکترونهای تابش که بصورت الکترونهای برگشتی پراکنده میگردد، بالفزایش عدد اتمی جسم Z، زیادتر میشود. شکل ۱۲ که از نتایج تجربی «بیشاب» (H.E. Bishop) بدست

آمده، تغییرات ضریب برگشتی عناصر مختلف را برحسب عدد اتمی آنها برای الکترونهای تابشی با انرژی $30k.v$ نشان میدهد، [مأخذ ۱]. همان طور که مشاهده میشود، حساسیت کنتراست ناشی از الکترونهای برگشتی نسبت به عدد اتمی زیاد نیست. برای مثال با افزایش Z از ۲۶ به ۲۸ (یعنی از آهن به نیکل) تغییری تقریباً معادل ۷٪ در تعداد الکترونهای برگشتی پدست میاید.



شکل ۱۲- تغییرات ضریب برگشتی عناصر برحسب عدد اتمی آنها برای الکترونهای تابشی با انرژی $30k.v$. [مأخذ ۱]

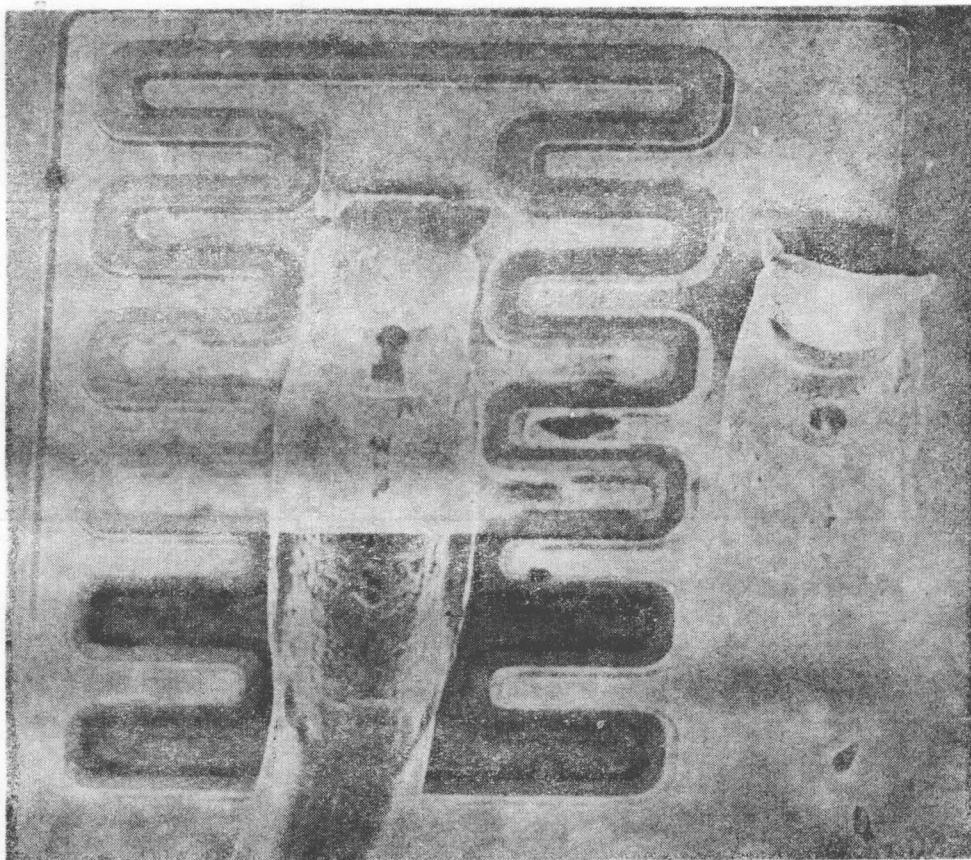
رابطه‌ای مشابه، ولی پاحساسیت بسیار کمتر، بین تعداد الکترونهای ثانویه منتشره از عناصر و عدد اتمی آنها وجود دارد. این امر علت تفاوتی را که بین کنتراست حاصله از یک نمونه مسطح با روش انتشاری و با روش برگشتی (یا انعکاسی) وجود دارد، توجیه مینماید. زمانیکه نمونه مسطح نباشد، کنتراست تصویر از مجموعه کنتراست‌های ناشی از توپوگرافی سطحی و عدد اتمی حاصل میشود. چون در اغلب مواد، الکترونهای ثانویه خیلی بیشتر از الکترونهای برگشتی هستند (بعضی از نمونه‌ها سطح نمونه ناهموار است)، از این‌رو کنتراست عدد اتمی غالباً بوسیله کنتراست ناشی از تغییرات در توپوگرافی سطحی پوشیده میشود.

اگرچه شناخت عناصر با استفاده از کنتراست عدد اتمی که در تصاویر ظاهر میشود، مانند روش میکروآنالیز اشعه ایکس عملی نیست، ولی در این حالت قدرت تفکیک در حدود پنج تا ده برابر بهتر از قدرت تفکیک در موردی است که از پرتو الکترونی در میکروسکوپ روبنده برای میکرو آنالیز اشعه ایکس استفاده میگردد. یادآوری میکنیم که در روش میکرو آنالیز، قدرت تفکیک معمولاً به $1 \mu\text{m}$ محدود میشود.

۳.۵- کنتراست ناشی از تغییرات ولتاژ و هویزه الکتریکی در مقطع نمونه

اگر نمونه از مناطقی با پتانسیل‌های الکتریکی متفاوت تشکیل شده باشد، کنتراست موجود در میکروگرافی حاصله از میکروسکوپ روبنده، میتواند توزیع پتانسیل در مقطع نمونه را آشکار سازد. استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبنده برای بررسی تغییرات پتانسیلی اولین بار بوسیله «اوتلی» و «اورهارت» گزارش شد، [مأخذ ۱۴]. این نوع کنتراست با روش انتشاری و در موردی که تنها الکترونهای ثانویه جمع آوری گردند ظاهر میشود و در

حالات کلی هر قدر که پتانسیل در منطقه‌ای کمتر باشد ، تعداد الکترون‌های جمع آوری شده بیشتر خواهد بود. نوع کنتراستی که از مناطق با پتانسیل‌های متفاوت بوجود آمده ، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بطور کلی در حالتی که یک نمونه مشکل از منطقی با پتانسیلهای متفاوت در میکروسکپ روبنده بررسی شود ، نمیتوان دقیقاً تعیین کرد که چه مقدار از کنتراست ناشی از پتانسیل و چه مقدار ناشی از اختلال‌هائی است که در مسیر الکترون‌های ثانویه بوسیله حوزه‌های موضعی در نمونه بوجود آمده‌اند. این حوزه‌های موضعی خود در اثر پتانسیل الکتریکی اعمال شده به نمونه ایجاد می‌گردند.



شکل ۱۳ - تصویر بدست آمده از الکترون‌های ثانویه با استفاده از کنتراست ولتاژ ازیک ترانزیستور (بزرگنمائی = ۸۸× با نمایی الکتریکی معکوس Reverse bias)

حضوریک حوزه الکتریکی عرضی در سطح نمونه، به الکترون‌های ثانویه شتابی در جهت موازی با سطح نمونه میدهد که این امر میتواند موجب شود تا الکترون‌های مذبور به کلکتور نرسند. چون انرژی داده شده به الکترون‌های ثانویه توسط پتانسیل مشت کلکتور، تحت تأثیر پتانسیلهای مناطق مختلف نمونه تغییر میکند، لذا، تعداد الکترون‌های ثانویه که قابل جمع آوری بتوسط کلکتور میباشند متغیر است، [مأخذ ۸].

تغییراتی که بوسیله حوزه‌های مختلف الکتریکی در سطح نمونه بر روی انرژی الکترون‌های برگشتی ایجاد میشود، بعلت انرژی زیاد الکtron‌های مذکور بسیار ناچیز است. بنابراین حضور مناطقی با پتانسیل‌های متفاوت در سطح نمونه، اثری بر تعداد الکترون‌های برگشتی که بتوسط کلکتور جمع آوری میشود، ندارد.

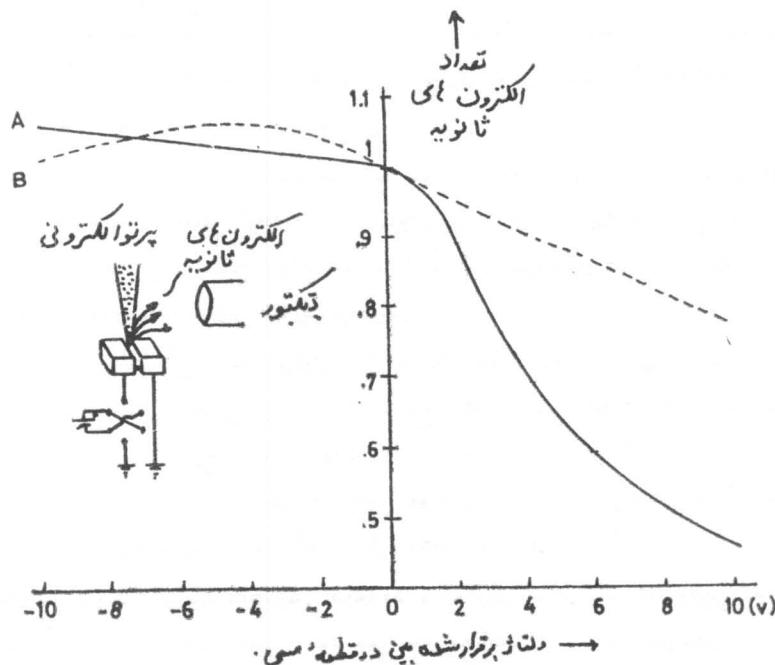
واضح است که با افزایش پتانسیل کلکتور، سیگنال جمع آوری شده بیز زیادتر میشود. وابستگی ایندومعامل بیکدیگر برای یک نمونه معین و یک پتانسیل کلکتوری ثابت، تابعی از تمایل الکتریکی نمونه (Biasing) و همچنین موقعیت کلکتور میباشد. این وابستگی همچنین تابعی از موقعیت نمونه نسبت به اتصالات زینی است که معمولاً

به نگهدارنده نمونه متصل میباشد. در واقع اختلاف پتانسیل موجود بین کلکتور و آن نقطه‌ای از نمونه که تحت بمباران الکترونی قرار دارد. بصورت یک تجزیه کننده الکترواستاتیکی سرعت (Electrostatic velocity analyser) عمل میکند. اورهارت باستفاده از مدل ظرف الکتروولیتی، اثر مناطق هم‌جوار با پتانسیلهای متفاوت را بروی حوزه پتانسیل بین نمونه و کلکتور بررسی کرد، [مأخذ ۸]. گرچه نتایجی که اورهارت بدست آورده، خاص میکروسکوپی است که از آن استفاده میکرد. زیرا حوزه‌های تولید شده در میکروسکوپ‌های میخانه متفاوت هستند. ولی باینحال نتایج بررسیهای این محقق، اهمیت اثر توزیع پتانسیل در سطح نمونه را بر تعادل الکترونهای ثانویه‌ای که بوسیله کلکتور جمع آوری میشوند، نشان می‌میله.

گرچه کنتراسی که از حوزه‌های الکتریکی بسیار شدید ایجاد میشود بتوسط پژوهندگان روسی مورد بررسی قرار گرفته است، ولی هنوز در مورد اثر حوزه‌های موجود در سطح نمونه بر روی جریان جذب شده الکتریکی که در اثر پرتوتا بش در داخل نمونه حاصل میشود، اطلاعات زیادی در دست نیست، [مأخذ ۱۶].

اگر تفسیر موجود از کنتراسی و لتأثر صحیح باشد، آنگاه عامل اصلی ایجاد کنتراسی، تفاوت در پتانسیل بین دو عنصر سطحی هم‌جوار نسبت به یکدیگر است. این تفاوت بر روی لتأثر مؤثر کلکتور اثر گذاشته و اختلافی در سینگنال ثبت شده بوجود می‌آورد.

علاوه بر آزمایشهای اورهارت، سلسه آزمایشهای دیگری در مورد کنتراسی و لتأثر بوسیله «کیموتو» و «هاشیموتو» (S.Kimoto and H.Hashimoto) انجام گرفته‌اند، [مأخذ ۱۷]. ایندو پژوهندۀ دو قطعه سطح مسی را با فاصله کمی از یکدیگر بعنوان نمونه بکار بردن و اثر تمایل الکتریکی (Biasing) و شکل هندسی مجموعه را بر روی تعداد الکترونهای ثانویه‌ای که بوسیله کلکتور جمع آوری میگردد بررسی کردند. با فرایش و لتأثر بین دو قطعه مسی، تعداد الکترونهای جمع آوری شده توسط کلکتور از قطعه‌ای که تمایل الکتریکی مشت بشارت بسرعت و بطور خطی کمتر می‌شود. اما زمانی‌که و لتأثر قطعه منفی تر می‌شود، تعداد الکترونهای جمع آوری شده با سرعت کمتری افزایش می‌یابد. بهمین ترتیب در بررسی قطعه‌ای که به زین وصل شده بود، تعداد الکترونهای جمع آوری شده توسط کلکتور نیز تغییر میکرد و لی این اندازه تغییرات در مورد قطعه تمایل یافته نبود. نتایج کیموتو و هاشیموتو در شکل ۴ نشان داده شده است. کیموتو و هاشیموتو



شکل ۴- تغییرات در تعداد الکترونهای ثانویه جمع آوری شده توسط کلکتور بر حسب و لتأثر برقرار شده بین دو قطعه مسی، [مأخذ ۱۷]

سپس موقعیت دوقطه را نسبت به کلکتور تغییر داده و نشان دادند که در مورد قطعه‌ای که تمایل الکتریکی مشتمل دارد، رابطه بین تعداد الکترونهای جمع‌آوری شده و پتانسیل سطحی تغییر کرده و به‌وضعت نمونه نسبت به کلکتور بستگی ندارد. اگر یکی از دوقطه به زمین متصل شده و به‌قطعه دیگر یک تمایل الکتریکی منفی داده شود، آنگاه رابطه بین پتانسیل سطحی و تعداد الکترونهای جمع‌آوری شده بطور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند.

روش جدیدی که «مک دونالد» (N.C. Mac Donald) ابداع کرده ممکنست بتواند بر می‌شکل جدا کردن کنتر است ولتاژ از کنتر است ناشی از حوزه‌های الکتریکی موضعی در سطح فائق شود، [مأخذ ۱۸]. این پژوهنده نشان داده است که می‌توان پتانسیل یک سطح را بدون آنکه سیگنال ثبت شده تحت تأثیر حوزه‌های الکتریکی موضعی در سطح قرار گیرد، اندازه گرفت. مک دونالد بجای جمع‌آوری تمام الکترونهای ثانویه ساطع شده از سطح، یک گزیننده انرژی (Energy selector) در جلوی دتکتور الکترونی قرار داد والکترونهای اوژه (Auger electrons) را که از سطح ساطع می‌شوند، جمع‌آوری نمود. وقتی پتانسیلی در سطح نمونه برقرار شود، در سطح انرژی الکترونهای اوژه که از سطح نمونه خارج می‌گردند، انتقال ایجاد می‌شود. مقدار این انتقال سطح انرژی با افزایش ولتاژ برقرار شده بطور خطی افزایش می‌یابد. در ضمن، انتقال مذکور به حوزه‌های الکتریکی موضعی در سطح نمونه حساس نیست. انتظار می‌برود که در آینه نزدیک بتوان از این تکنیک برای اندازه‌گیری ولتاژ و یافتن معایب در وسائل الکترونیکی استفاده نمود.

۴-۵۰- کنتر است مغناطیسی

وقتی که میکروسکپ روبنده بر این روش انتشار بکار برد شود، می‌توان حضور حوزه‌های مغناطیسی در سطح نمونه را نیز آشکار ساخت.

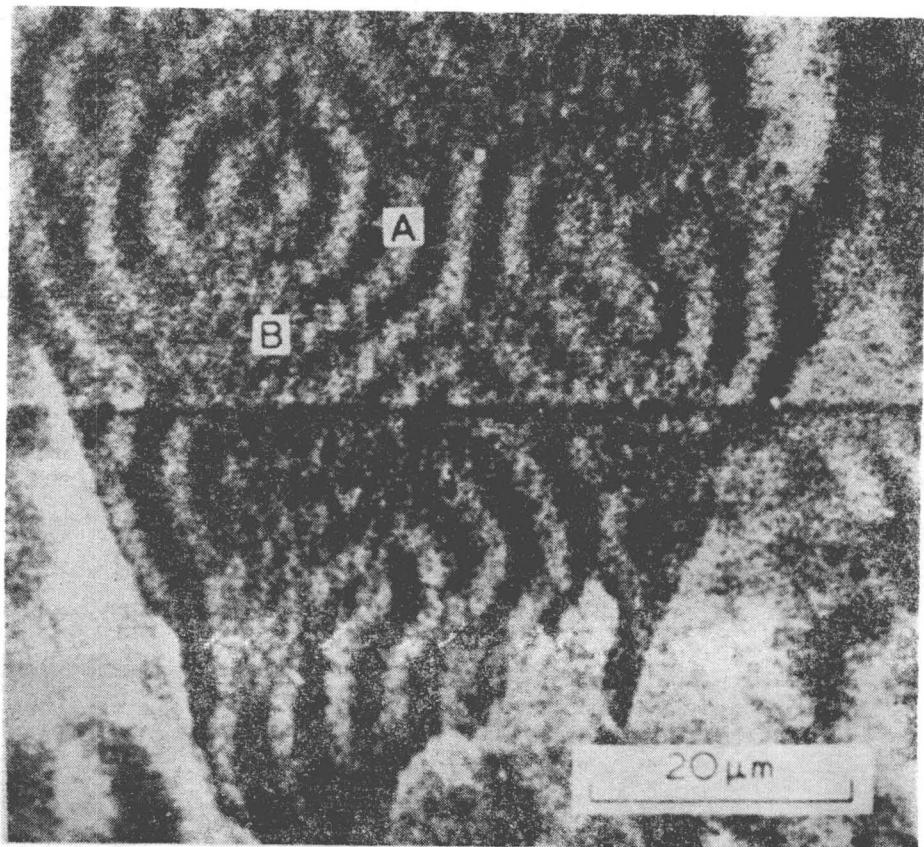
حساسیت کنتر است مغناطیسی نسبت به ولتاژی نسبت که در کلکتور برقرار می‌گردد نسبتاً شدید است. اگر ولتاژ مزبور خیلی کم باشد، کنتر استی مشاهده نخواهد شد. همچنین اگر ولتاژی در کلکتور برقرار نگردد (یعنی برای تشکیل تصویر، فقط از الکترونهای برگشتی استفاده شود)، باز هم کنتر استی بدست نمایاد. بعلاوه اگر بجای روش انتشاری از روش جریان جذب شده الکتریکی در نمونه استفاده شود نیز کنتر است مغناطیسی ایجاد نخواهد شد. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که وجود حوزه‌های مختلف مغناطیسی در نمونه بر تعداد کل الکترونهای ثانویه‌ای که در نقاط مختلف آن نمونه تولید می‌شود اثری ندارد. بنابراین کنتر است مغناطیسی که در روش انتشاری ظاهر می‌گردد، از تغییرات در تعداد الکترونهایی که از قسمتهای مختلف نمونه به کلکتور می‌رسند، حاصل می‌شود.

هنگامی که الکترونهای ثانویه از نقاط مختلف سطح نمونه خارج می‌شوند، تحت تأثیر حوزه‌های متقاوت مغناطیسی که در مناطق مختلف نمونه وجود دارند، قرار گرفته و بوسیله نیروی لورنتز (Lorentz force) در این حوزه‌ها از مسیر خود منحرف می‌شوند. چون حوزه مغناطیسی در سطح نمونه تغییر می‌کند، لذا الکترونهای ثانویه‌ای که از قسمتهای مختلف سطح خارج شده‌اند به مقداری مختلف و درجهات متقاوتی منحرف می‌شوند.

اگر پتانسیل دتکتور الکترونی با اندازه‌ای قوی بود که می‌توانست تمام الکترونهای ثانویه را با وجود انحرافی که در عبور از حوزه‌های مختلف مغناطیسی سطحی پیدا می‌کردن، جمع‌آوری نماید، آنگاه هیچ‌گونه کنتر است مغناطیسی حاصل نمی‌شد. تنها در صورتی کنتر است می‌تواند رخ دهد که بعضی از الکترونها بتوسط لورنتز به آن اندازه منحرف شده باشند که نتوانند وارد کلکتور شوند. روی این اصل، کنتر است مغناطیسی نمونه هارا می‌توان با قرار دادن دیافراگم‌های (Apertures) در جلوی کلکتور افزایش داد (گرچه در این مورد سیگنال کل کاهش می‌یابد).

قدرت تفکیک در مورد کنتر است مغناطیسی در حدود ۱ میکرون است. یکی از موانعی که در بهتر کردن قدرت تفکیک وجود دارد، آستینگماتیزم پرتو اولیه بعلت وجود حوزه‌های مغناطیسی در نمونه می‌باشد.

مثالی از کنتر است مغناطیسی از یک تیغه کبالت در میکروسکپ روبنده در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ - کنتراست مغناطیسی ناشی از :

(A) نواحی مغناطیسی درونی (Internal magnetic domains)
و : (B) نواحی مغناطیسی سطحی (Surface magnetic domains)
دریک تیغه نازک از بلور کبالت ، [از مأخذ ۱۹].

۵.۵- کنتراست در روش «هدایت الکتریکی القا شده بتوسط پرتو تابش»

همانطور که در قسمت ۴. ۴ گفته شد، اساس کار میکروسکوپ روینده با روش «هدایت الکتریکی القا شده بتوسط پرتو تابش» بدین صورت است که ولتاژی در سطح نمونه برقرار میگردد و در اثر روینده شدن سطح بوسیله پرتوالکترونی، جریان الکتریکی حاصله در داخل نمونه برای تشکیل تصویر بکار میرود. کنتراست تصویر از تغییرات در جریان الکتریکی حاصله در داخل نمونه بسته میباشد.

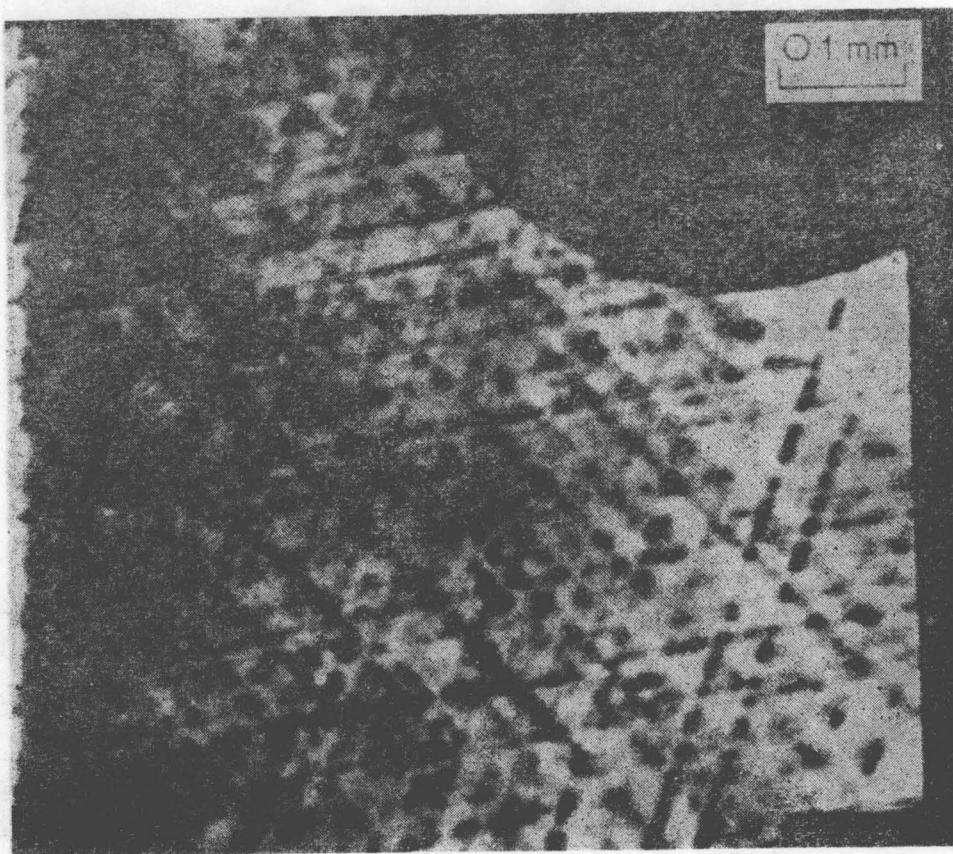
در مقیاس اتمی، عملکرد پرتوالکترونی، برانگیختن اتمها در نمونه است بطوریکه الکترونهای موجود در بالای نوار ظرفیتی، انرژی کافی برای جهش به پائین نوار هدایتی کسب میکنند. تحت تأثیر حرارت الکتریکی برقرار شده در سطح نمونه، هر چفت حامل جریان (Current carrier) که تولید میشود- یعنی الکترونی که به نوار هدایتی رفته و خفرهای که در نوار ظرفیتی ایجاد شده شروع به حرکت مینماید. حرکت این دو حامل جریان الکتریکی که بوجود میاورد که بوسیله پرتو الکترونی القا شده است. این جریان بتوسط یک سدار مناسب ضبط وسیس برای تشکیل تصویر تقویت میشود.

دریک جامد دونوع نقص الکتریکی فعال وجود دارد:

نوع اول، مراکز ترکیب (Recombination centres) میباشند که معمولاً از نوع خلاء ناخالصی و یا سایر نقایص بنیادین نقطه ای هستند. هر یک که از این مراکز مسجل ترکیب یک الکترون با یک حفره و در نتیجه ازین رفقن یک جفت

حامی جریان است، حتی در الحالص ترین نیمه هادی ها، تعداد زیادی مراکز ترکیب وجود دارد که بعده اندازه کوچک آنها نمیتوانند بطور جداگانه تفکیک شوند. هر حامل آزاد فقط میتواند برای زمان محدودی وجود داشته باشد و سرانجام با حامل دیگری (بابار الکتریکی مخالف) ترکیب شده و هردو ازین میروند، بعبارت دیگر الکترونی از نوار هدایتی، یکی از حفره ها در نوار ظرفیتی را اشغال کرده و بدین ترتیب یک فتون و یا فنون بوجود میاید. ازاینرو، هر حامل، «عمر» معینی دارد ولی بعده طبیعت آماری این سیستم، طیفی از طول عمرهای مختلف وجود خواهد داشت. روی این اصل، در میکروسکپ روینده، یک «عمر متوسط» برای حاملها تعریف میشود. اگر توزیع مراکز ترکیب در نمونه یکنواخت نباشد، آنگاه تغییرات در دانسیته این نقایص در مناطق مختلف نمونه بر جایان القائی تأثیر میگذارد.

نوع دوم از نقایص الکتریکی فعال، نابجاییها هستند که در نیمه هادیها میل به ترکیب جفت‌های الکترون-حفره را افزایش میدهند. تاکنون عده‌ای از پژوهشگران موفق شده‌اند که بكمک میکروسکپ روینده، نابجاییهای لبه‌ای را در سیلیکون و ژرمانیوم دپ شده (Doped) مشاهده کنند، [مأخذ ۲۰]. علت ایجاد کنتراست از این نوع نابجایی هنوز کاملاً روش نشده است ولی مسلماً تاحدوی ناشی از عدم یکنواختی بار الکتریکی در اطراف نابجایی نسبت به محیط خود میباشد. «شاو» نشان داده است که تجمع اتمهای ناخالصی در اطراف یک نابجایی میتواند کنتراستی در تصاویر حاصله بروش هدایتی بوجود آورد، [مأخذ ۲۱]. در شکل ۱۶، تصویر نقایص بلوری در یک نمونه سیلیکون که به روش هدایتی در میکروسکپ روینده بدست آمده نشان داده شده است.



شکل ۱۶

نمونه سیلیسیم نیمه هادی نوع- n (ضریب مقاومت مخصوص $= 1\Omega\text{cm}$) بروش هدایتی. نقایص بلوری در عکس مشهود هستند. غلظت سطحی ناخالصی $= 5 \times 10^{19}$ [مأخذ ۲۱]

برای مطالعه قسمتهای جالب اغلب وسائل نیمه هادی، از قبیل مناطق اتصالی (Junction regions) و مناطق

کمبود (Depletion regions)، از روش هدایتی استفاده میگردد. عمل کاربرد آین روش برای اینگونه مطالعات، قوی تر بودن حوزه های الکتریکی در مناطق مذکور است که کنتراست بهتری ایجاد مینماید. تنها در مواردی میتوان اثرات ناشی از تفاوت های قابل ملاحظه بین عمر الکترونها را مشاهده کرد که جفتهای الکترون. حفره در حوزه های بسیار شدید الکتریکی تولید شوند.

۵.۶- کنتراست بلوری

تاکنون در بیان مکانیزم کنتراست های مختلف، اثر طبیعت شبکه بلوری نمونه را بر تصاویر بدست آمده دریک میکروسکپ الکترونی روشنده در نظر نگرفته ایم.

اولین بار در سال ۱۹۶۲، «دانکامب» (P. Duncumb) درین بررسی اشعه ایکس منتشره از تیغه های نازک کی که با یک پرتو الکترونی بمباران شده بودند، متوجه گردید که وضعیت فضائی (Orientation) یک نمونه بلوری نسبت به پرتو الکترونی برشدت اشعه ایکس منتشره تأثیر میگذارد، [مأخذ ۲۲]. در سال ۱۹۶۵، «شاو» با استفاده از یک میکروسکپ روشنده، چندین تیغه نازک از نمونه های تک بلوری طلا با خصامت های بین $1\text{--}10 \mu\text{m}$ را با روش انتشاری بررسی کرد، [مأخذ ۲۱]. تمام تیغه های نازک مورد استفاده در آزمایش «شاو»، معوج بوده و در تصاویر بدست آمده از آنها، «شاو» متوجه گردید که بر افزایش خصامت نمونه، کنتراست حاصله کمتر میشود. همچنین کنتراست مشهود تابعی از درجه تمایل نمونه نسبت به پرتو تابش بوده و این امر نشان میداد که کنتراست، ناشی از تغییرات در تپوگرافی سطحی نیست. «شاو» بلا فاصله متوجه شد که بین کنتراست تصویر درحالی که تیغه های نازک معوج توسعه میکرسکپ عبوری بررسی میشوند، تشابه چشمگیری وجود دارد.



شکل ۱۷- تیغه نازک طلای اپیتاکسی (Epitaxial) که با روش انتشاری مشاهده شده است [از مأخذ ۲۱]

در سال ۱۹۶۷، «کوتز» (D.G. Coates) برای اولین بار گزارش داد که کنتراست ناشی از وضعیت فضائی یک بلور را میتوان از نمونه های نسبتاً بزرگ و پختخیم نیز بتوسط میکروسکپ روینده در بزرگنمایی های کم و با هردو روش انتشاری یا جریان جذب شده الکترونیکی بدست آورد، [مأخذ ۲۳]. نظر به تشابه ظاهري بین تصاویر کوتز و طرح های «کیکوچی» (Kikuchi patterns) که در میکروسکپ الکترونی عبوری بدست میاید، این محقق تصاویری را که بدست آورده بود، «طرح های انعکاسی شبکه کیکوچی» (Kikuchi-like reflection patterns) خواند. در حال حاضر، اسامی دیگری نیز برای این نوع تصاویر معمول است از جمله: «طرح کیکوچی کاذب» (Pseudo - Kikuchi pattern) و «طرح الکترونی های کاناله» (Electron channelling pattern) شده (یا مختصرآ «طرح کانالی») وغیره.

تفسیر اینگونه طرحها اولین بار بوسیله «هیرش» (P.B. Hirsch) و همکارانش صورت گرفت، [مأخذ ۴] برطبق نظریه این پژوهندگان، کنتراست طرح های کانالی را میتوان با پیدا شدن عبور غیرعادی (Anomalous transmission) پرتو الکترونی در زوایای تابش نزدیک به زاویه برآگ تفسیر کرد. این تفسیر مبنی بر مدلی است که «هیرش» و همکاران او برای پیش بینی تولید غیرعادی اشعه ایکس از تیغه های نازک بلوری قبل از ادائه بودند که چندی بعد بوسیله «دانکامپ» نیز تأیید شده [مأخذ ۵]. مدل «هیرش» را میتوان بصورت زیر خلاصه کرد.

زمانیکه یک پرتو الکترونی طوری برآمد که زاویه بین پرتو تابش با یک سلسله صفحات بلوری نزدیک به زاویه برآگ باشد. که در نتیجه پرتو دیفرانسیل نیز جهت مشخصی دارد. آنگاه الکترونی های وارد در بلور را میتوان بصورت حاصل جمع دوتایی موجی از نوع بلوخ (Bloch wave functions) در نظر گرفت. در یکی از این توابع موجی (که معمولاً موج نوع II خوانده میشود)، گره های (Nodes) موج مطابق با موضع اتمها در شبکه بلوری است ولی در تابع موجی دیگر (بنام موج نوع II)، شکم های (Anti-nodes) موج با موضع اتمها مطابق میباشد. با توجه باینکه تابع موجی، احتمال وجود الکترونها را در یک موضع بخصوص نشان میدهد، لذا موج بلوخ نوع II دارای احتمال بیشتری برای فعل و افعال با یونهای مثبت در داخل شبکه بلوری میباشد و در نتیجه احتمال از دست دادن آن بیشتر است. بالعکس موج بلوخ نوع I از مجراهای یا کانالهای بین ردیف های اتمی عبور کرده پدیده ای که کاناله شدن الکترونها (Electron channelling) خوانده میشود و احتمال فعل و افعال آن با یونهای مثبت کمتر است. بدین ترتیب مشاهده میشود که موج نوع II سریعتر و بیشتر از موج نوع I جذب یا پراکنده میشود و بایهارت دیگر موج نوع I سریعتر و بهتر از بلور عبور میکند. پیدا شده مشابهی در مورد عبور اشعه ایکس از بلورها رخ میدهد که بنام «اثر بورمان» (Borrmann effect) و یا «جذب غیرعادی اشعه ایکس» (Anomalous absorption of X-rays) معروف است. نسبت شدت دو موج بلوخ که در بلور برانگیخته میشوند بستگی به انحراف پرتو تابش از جهت دقیق برآگ (یعنی زاویه ای که پرتو تابش باصفحات انعکاسی برگ میسازد) دارد. این انحراف از جهت دقیق برآگ معمولاً بتوسط پارامتر s نشان داده میشود

زمانیکه $s < 0$ است، موجی که مینیمم های آن در موضع اتمی قرار گرفته است (موج نوع I) بطور ترجیحی برانگیخته میشود ولی در حالتی که $s > 0$ است، موجی که ماکزیمم های آن در موضع اتمی قرار دارد، (موج II)، بطور ترجیحی برانگیخته میگردد. بدین ترتیب برای عبور الکترونها از تیغه های نازک بلوری، بازای $s < 0$ عبور تشدید شده و بازای $s > 0$ عبور تضعیف شده بدست میاید.

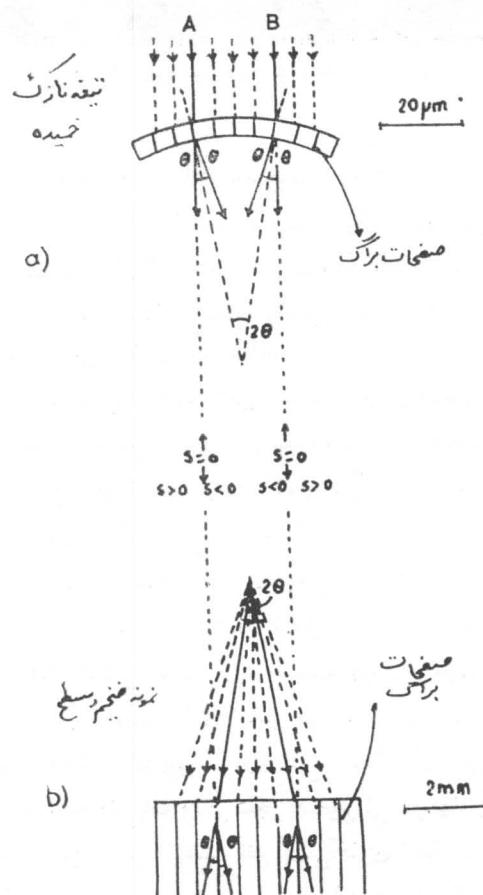
با همین مکانیزم، میتوان کنتراستی را که در تصویر بدست آمده توسط میکروسکپ الکترونی عبوری از تیغه های نازک موج - بنام «خطوط تراز ناشی از خمیدگی بلور» (Bend contours) دیده میشود، توجیه کرد. در مورد اخیر، بعلت اعوجاج، زاویه تابش در مناطق مختلف سطح تیغه متفاوت است. در نتیجه تصویر بدست آمده بصورت یک سلسله نوارهای تاریک (در مناطقی که $s < 0$ است یعنی جذب غیرعادی الکترون رخ میدهد) و روشن (در مناطقی که $s > 0$ است یعنی عبور غیرعادی الکترونها رخ میدهد) میباشد.

با میکروسکپ الکترونی روینده نیز از تیغه های نازک موج طلا، نظیر همین کنتراست مشاهده شده است، [مأخذ ۱۲]. در مناطقی که $s < 0$ است، موج بلوخ نوع II باشد بیشتری برانگیخته میشود. در نتیجه احتمال رویداد های برگشتی در اینحالت بیشتر میباشد و بنا بر این تعداد بیشتری از الکترونها برگشتی با نرژی زیاد تولید میگردد. همچنین،

احتمال تولید الکترونهای ثانویه و خروج آنها از نمونه نیز بیشتر است. بالعکس در مناطقی که $s < 0$ است، موج بلورخ نوع I شدت بیشتری داشته و نظریابینکه موج مذکور از مسیرهای بین ردیفهای اتمی کاناله می‌شود، لذا احتمال کمتری از برخورد بايونهای مشتبه در شبکه دارد. در نتیجه تعداد کمتری از الکترونهای برگشتی والکترونهای ثانویه تولید می‌گردد. بدین ترتیب تصویر حاصله از یک سلسله مناطق تاریک ناشی از عبور غیرعادی الکترونها (در مناطقی که $s > 0$) است) و مناطق روشن ناشی از جذب غیرعادی الکترونها (در مناطقی که $s < 0$) است) تشکیل می‌شود. تصویر حاصله مزدوج تصویر بدست آمده بامیکروسکپ الکترونی عبوری است.

بانمونه‌های نسبتاً ضخیم که سطح صافی دارند، تغییرات در زاویه بین پرتو تابش باصفحات انعکاسی بلوری (یعنی زاویه برآگ) - که برای ایجاد «طرحهای کanalی» لازم است. در ولتاژهایی که معمولاً بکار برده می‌شود، به مقداری قابل ملاحظه‌ای (در حدود ۰ تا ۲ درجه) می‌رسد. در میکروسکوپیهای تجاری، تغییرات مذکور را فقط می‌توان در بزرگنمایی‌های بسیار کم در حالیکه در تیغه‌های نازک، بعلت اعوجاج تیغه، نواهای تاریک و روشن در تصویر حاصله معمولاً نامنظم هستند، در نمونه‌های ضخیم، نواهای مشهود کاملاً منظم می‌باشند زیرا زاویه پرتو تابش بطور منظم و پیوسته در سطح نمونه تغییر می‌کند و فواصل بین صفحاتی (Interplanar spacings) در نمونه نیز بسیار منظم است. در شکل ۱۸، دیاگرام هندسی برخورد پرتو الکترونیکی با یک تیغه نازک بلوری و همچنین با یک نمونه نسبتاً ضخیم بطور جداگانه نشان داده شده است.

کنتراستی که در «طرحهای کanalی» بدست می‌آید به وضعيت فضائي نمونه بستگی دارد. همچنین در سوردي

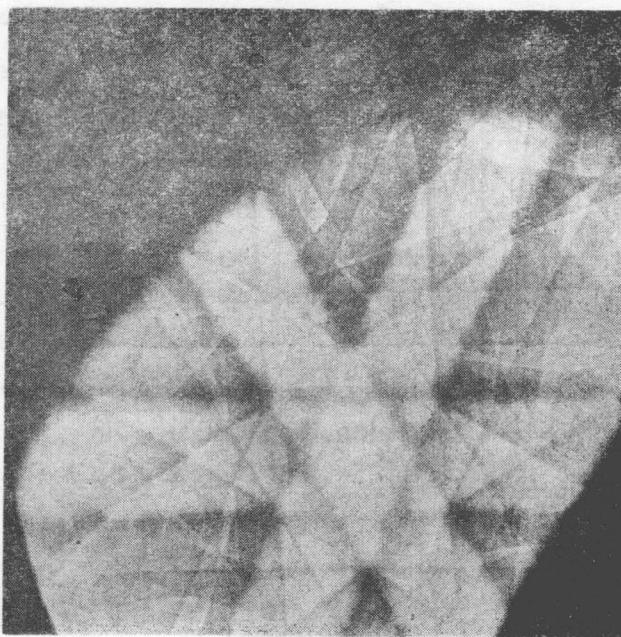


شکل ۱۸ - شمای هندسی برخورد پرتو الکترونی با سطح نمونه برای ایجاد «طرحهای کanalی»

(a) در تیغه نازک خمیده

(b) در نمونه ضخیم و سطح

که برای تشکیل تصویر از الکترون‌های منتشره (الکترون‌های، ثانویه + الکترون‌های پرگشتی) استفاده شود، تغییرات این کنتراست در حدود ۲ تا ۸ درصد است، مثالی از کنتراست مشهود در طرحهای کانالی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- یک طرح کانالی از تک بلور سیلیسیم حول محور [۱۱۱]. به تقارن درجه شش تصویر توجه شود.

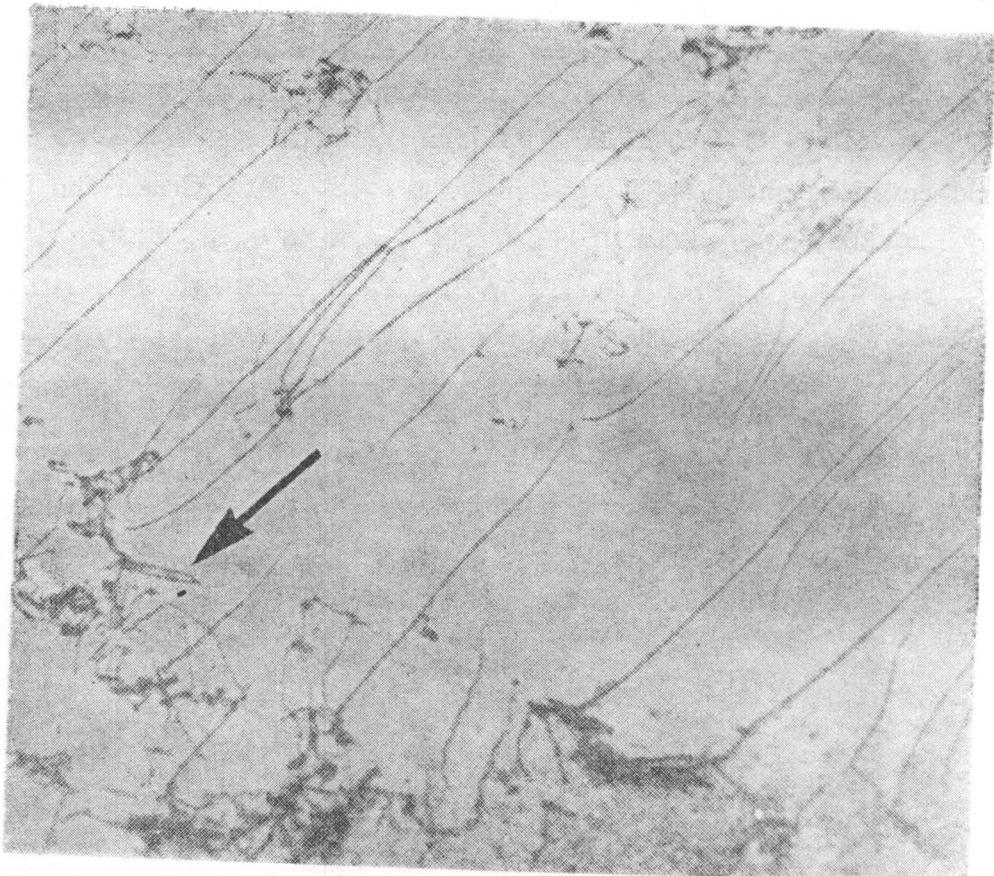
کنتراست بدست آمده در طرحهای کانالی با استفاده از روش جربان جذب شده‌الکتریکی مکمل کنتراست حاصله از روش انتشاری است. مناسب‌ترین شرایط تنظیم میکروسکپ برای ایجاد طرحهای کانالی توسط «شولسن» و «ون-اسن» (E. M. Schulson and C. G. Essen) تعیین شده است، [مأخذ ۶]. لازمه‌اصلی برای مشاهده طرح هائی با بهترین قدرت تفکیک زاویه‌ای باتلاقی از دو حالت متقاضی یعنی از طرفی ایجاد کمترین همگرائی ممکن در پرتو تابش و از طرف دیگر بالاترین الکترونی ممکن دراین پرتو بدست می‌اید.

ناچند سال پیش، محدودیت اصلی تکنیک مزبور در دست آوردن طرحهای کانالی آن بود که در میکروسکپهای تجاری می‌بایست از بزرگنمایی‌های بسیار کم (در حدود ۰.۲ \times) استفاده شود زیرا فقط در یک چنین حالتی است که زاویه پرتو تابش در حالت نهائی خود باعومد بر سطح میتواند از زاویه برآگ پیشتر گردد. در ضمن، اسکان نزدیک کردن نمونه به عدسی شیئی وجود نداشت زیرا در روش انتشاری، سیگنال جمع شده توسط کلکتور به مقدار بسیار زیادی محدود می‌شد. این دو مشکل در میکروسکپهای جدیدتر کم بریج با منتقال نقطه متقاطع روییدن. یعنی نقطه‌ای که پرتو تابش در حین روییدن حول آن پیگردید به سطح نمونه و با استفاده از روش جربان جذب شده الکتریکی، حل شده‌اند. با کاربرد این تکنیک جدید، میتوان از متقاطع کوچکی در حدود ۰.۵ μm ، طرحهای کانالی بدست آورد. بدست آوردن طرحهای کانالی، بررسی‌های بلورشناسی بتوسط میکروسکپ روینده را ممکن ساخت و بدین ترتیب برتری اساسی میکروسکپهای الکترونی عبوری بر میکروسکپهای لکترونی روینده را ازین برد. تعیین وضعیت فضائی یک بلور از روی طرح کانالی آن بدروش انجام می‌گیرد. روشی که بوسیله شولسن ابداع شد براین امر مبتنی است که تغییرات ولتاژ منجر به تغییراتی در پهنهای نوارهای متقاطع در طرح (به شکل ۹) رجوع شود) میگردد، [مأخذ ۶]. این روش از نقطه نظر عملی کاری نسبتاً مشکل است و با اینحال در بسیاری موارد دقت لازم را نیز ندارد. روش دیگری که بوسیله «پیروز» و «باسواروا» (I.M. Boswarva) ابداع شد، استفاده از کامپیوتر است. دراین روش با استفاده از مقاییم شبکه معکوس، معادلات هندسی هرنوار در طرح بدست آمده و طرحهای کانالی بوسیله کامپیوتر برای سیستم‌های مختلف بلوری رسم شده‌اند. از مقایسه طرح کانالی تحریبی با نگاره کامپیوتری، وضعیت فضائی بلور را به‌آسانی میتوان تعیین کرد، [مأخذ ۷ و ۸].

تفسیر فیزیکی طرحهای کانالی الکترونها نیاز به کاربرد مکانیک کوانتوسی دارد زیرا فعل و افعال الکترونها با شبکه بلوی دیفراکته شدن الکترونها از صفحات بلوی یک پدیده کوانتوسی می‌باشد. تئوری اولیه هیرش آوهمکارانش (C.J.Humphreys and J.P.Spencner) [مأخذ ۲] که مبنی بر نظریات کوانتوسی است بواسیله «هامفری» و «اسپنسر» [مأخذ ۳]، و «بیردز» [مأخذ ۴] تعمیم داده و تکمیل شده است.

۰.۷ - کنتراست در روش عبوری

همانطوریکه قبل گفته شد، روش دیگر استفاده از میکروسکپ روینده آنست که تمام الکترونها را که از یک تیغه نازک عبور کرده‌اند توسط دیکتیوری جمع آوری کرده و در تشکیل تصویر از سیگنال آن استفاده نمود. در شکل ۲۰، مثالی از تصویر بدست آمده بروش روییدنی عبوری (S.T.E.M.) داده شده است.



شکل . ۲- تصویر نابجایی‌ها (Dislocations) در یک تیغه نازک مس که به روش روینده عبوری بدست آمده است.

در تصاویری که بروش روییدنی عبوری بدست می‌ایند، دو عامل در ایجاد کنتراست دخالت دارند که عبارتنداز ضخامت نمونه و عدد اتمی. در یک نمونه همگن و بازای یک ولتاژ ثابت، تغییرات ضخامت نمونه موجب تغییر در تعداد الکترونهای عبور کرده از نمونه می‌گردد. هرچقدر ضخامت نمونه بیشتر باشد، الکترونهای کمتری از آن عبور می‌کنند. بعلاوه برای دو جسم مختلف، هر قدر که عدد اتمی بالاتر باشد، الکترونهای بیشتری جذب شده و در نتیجه الکترونهای کمتری از آن نمونه عبور می‌نمایند.

به منظور بررسی نظری کنتراست در روش عبوری، باید بتوان تعداد الکترونها را که با یک انرژی بخصوص از جسم عبور می‌کنند، محاسبه کرد. در اغلب تئوریهای موجود راجع به دامنه نفوذ الکترونها در یک جسم، الکترونها ای

در نظرگرفته شده‌اند که بالانزی نسبتاً زیادی (بالاتر از $100k.v$) وارد نمونه می‌شوند. روی این اصل، در استفاده از این تئوریها برای الکترونهاei که تحت ولتاژهای نسبتاً پائین (حدود $30k.v$) که معمولاً در میکروسکپ روبنده بکار برده می‌شود) قرار گرفته‌اند، نتایج تئوریهای مزبور را برای اینگونه ولتاژها برونویابی کرد. «کاسلت» و «توماس» (V.E.Cosslett and R.N.Thomas) نظریه نسبتاً جدیدی درمورد نفوذ الکترونها در جامدات عرضه کرده‌اند که بیش از سایر تئوری‌ها قابل کاربرد برای روش عبوری بتوسط میکروسکپ روبنده محدود نیکنند عبارتنداز:

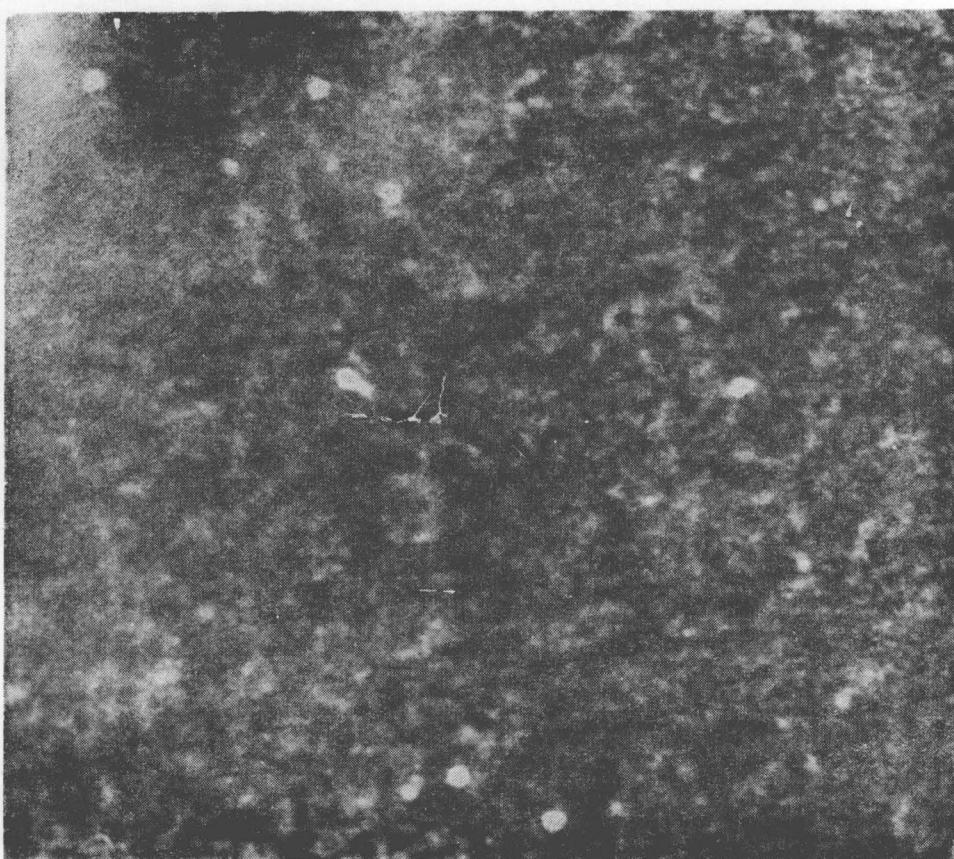
عوامل اساسی که قدرت تفکیک را در میکروسکپ الکترونی روبنده محدود نیکنند عبارتنداز:

الف- سطح مقطع پرتوالکترونی.

ب- پخش شدن پرتوالکترونی پس از ورود به داخل نمونه (شکل ۶).

ج- نسبت شدت سیگنال مؤثر به پارازیت.

در روش‌های مختلف استفاده از میکروسکپ روبنده، سهم سه عامل بالا متفاوت است و بنابراین قدرت تفکیک در روش‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. زمانیکه تیغه‌های نازک بروش عبوری مشاهده می‌شوند، پخش شدن پرتو در داخل نمونه معمولاً بسیار ناچیز است. در ضمن میتوان با استفاده از یک منبع الکترونی قوی‌تر، نسبت شدت سیگنال مؤثر به پارازیت را نیز افزایش داد. درنتیجه قدرت تفکیک اساساً بتوسط عامل (الف) یعنی سطح مقطع عددود پرتوالکترونی تعیین می‌گردد. «کرو» و «وال» (A.V.Crewe and J.Wall) در سال ۱۹۷۱ با استفاده از یک منبع انتشار بیدان (Field emission source) بجای فیلامان تنگستن توانستند پرتوی به قطر $1\text{ }\text{\AA}$ ، با جریانی معادل 10^{-10} آمپر تحت ولتاژ $30k.v$ بدست آورند، [مأخذ ۳۲]. تحت این شرایط، قدرت تفکیک حاصله در حدود $5\text{ }\text{\AA}$ بود، «کرو» و «وال» توانستند اتمهای سنگین را جداگانه در یک فیلم کربن مشاهده نمایند، [مأخذ ۳۳]. شکل ۱، تصویر اتمهای جداگانه جیوه را روی یک فیلم نازک



شکل ۱-۲- تصویر اتمهای جیوه روی یک فیلم نازک کربن، [از مأخذ ۳۳]. طول تصویر در حدود می‌باشد هر کله سفید، یک اتم جیوه را نشان میدهد.

درین نشان میدهد که بتوسط «کرو» بدست آمده است. دراین شکل، قدرت تفکیک و توانائی فوق العاده میکروسکپ الکترونی روبنده بروش عبوری، (S.T.E.M) بخوبی مشاهده میشود.

نکته مهم دیگر اینستکه در تصاویر بدست آمده بامیکروسکپ روبنده بروش عبوری سواله خطای رنگی (Chromatic aberration) که موجب پائین آمدن کیفیت تصویر میگردد وجود ندارد، درحالیکه همین پدیده در میکروسکپ های الکترونی عبوری مسئله بسیار سهمی است. روی این اصل، برای نمونه های ضخیم تر، استفاده از میکروسکپ روبنده عبوری برمیکروسکپ الکترونی عبوری ارجحیت دارد.

علاوه بر عوامل ذکر شده در ایجاد کنتراست، نوع دیگری کنتراست نیز در روش روبنده عبوری وجود دارد که همان کنتراست دیفراکسیونی میباشد. بنابراین اثراتی نظیر «خطوط فنل» (Fresnel fringes)، کنتراست فاز، «خطوط ترازانشی از خمیدگی بلور» (Bend contours) وغیره که در تصاویر میکروسکپ الکترونی عبوری ظاهر میشوند، دراین مورد نیز قابل مشاهده هستند، «کاولی» (J.M.Cowley) کنتراست دیفراکسیونی تصاویر حاصله در میکروسکپ روبنده عبوری را با استفاده از اصل رجعت معکوس نور (Reciprocity principle) به کنتراست دیفراکسیونی در تصاویر بدست آمده از میکروسکپ های الکترونی عبوری مربوط نموده است، [۳۵]. نظریاً نکته کنتراست دیفراکسیونی در تصاویر میکروسکپ الکترونی عبوری کاملاً توجیه شده اند، استفاده از اصل رجعت معکوس، تفسیر تصاویر حاصله بروش میکروسکپ روبنده عبوری را ممکن میسازد.

روش دیگری نیز توسط پژوهشگران ژاپنی ابداع شده است که جالب توجه میباشد. «هاشیموتو» و «کیمتو» بجای اینکه تمام الکترونها عبوری را در تشکیل تصویر بکار برند، ازین نکته استفاده کردند که الکترونها عبوری را میتوان به بدو دسته تقسیم نمود:

الف. الکترونها که در نمونه نفوذ کردند بدون اینکه پراکنده شوند.

ب. بقیه الکترونها که تحت یک یا چند رویداد مختلف پراکنده شوند.

«هاشیموتو» و «کیمتو» با استفاده از یک دیافراگم گرد که بین نمونه و دتکتور قرار میگیرد، ایندوگروه الکترون های عبوری را از یکدیگر جدا میکنند. طبیعتاً الکترونها پراکنده نشده مستقیماً از دیافراگم عبور مینمایند. بهمین ترتیب میتوان با استفاده از یک دیافراگم حلقوی، الکترونها پراکنده شده را جمع آوری نمود. تصاویری که با استفاده از هر کدام از ایندوگروه الکترونها تشکیل میشود - عیناً مانند میکروسکوپهای الکترونی عبوری - بنامهای « تصویر بازبینه روشن » و « تصویر بازبینه تاریک » (Dark field image) (Bright field image) میباشد، [۳۶].

۵- کنتراست در روش کاولد ولو مینانس

مکلینیزم کاولد ولو مینانس را میتوان به چهار مرحله تقسیم کرد :

مرحله اول. در اثر تابش، مقداری انرژی در نمونه ذخیره میگردد. بعبارت دیگر پرتو الکترونی تابش، شبکه را بر میانگیزد، یعنی در برخورد پرتوالکترونی باشبکه، تعداد زیادی جفت‌های الکترون. حفره در اثر یونیزه شدن اتمهای شبکه ویا انتهای ناخالصی تولید میشود.

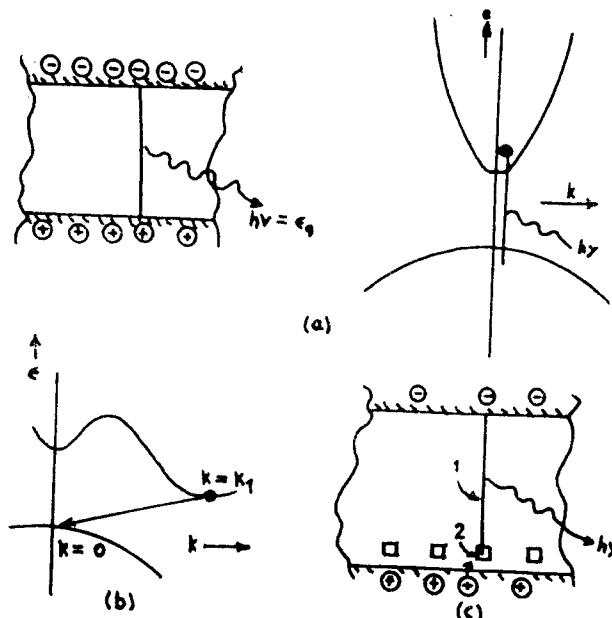
مراحل دوم و سوم- حرکت و ترکیب حاملهای جریانی که تولید شده اند. در حالت کلی، جفت‌های الکترون حفره الزاماً در همان نقطه ای که تولید میشوند، با یکدیگر ترکیب نخواهند شد. این جفتها میتوانند یا در اثر دیفورزیون و یا تحت اثر نیروی ناشی از یک حوزه الکتریکی از نقطه تولید به نقطه دیگری در شبکه حرکت کرده و دراین نقطه جدید با یکدیگر ترکیب شوند.

مراحله چهارم- ترکیب یک جفت الکترون. حفره در شبکه، معادل پاتولید یک قتون با تواتری نزدیک به تواتر نوری ویا تواتر یک تشعشع مادون قریز در آن نقطه است. برای اینکه اتر این قتون بتواند ظاهر شود، بایستی از نمونه خارج شده و وارد دتکتور گردد. دو عامل میتواند از خروج قتون از نمونه جلوگیری نماید:

(الف) انعکاس کلی در درون نمونه، و (ب) جذب فتون بوسیله شبکه بلوری در فاصله بین نقطه تولید تاسطح نمونه.

در برآرۀ مراحل اول و دوم قبل مختصری صحبت کرده‌ایم. در اینجا فقط مراحل سوم و چهارم را در نظر می‌گیریم. فرآیندهای متعددی باعث ازین رفتن و یاتر کیب حاملهای جریان می‌شوند. فرآیندهای ترکیبی از دو گروه تشکیل می‌گردند: فرآیندهای تابشی و فرآیندهای غیرتابشی. در فرآیندهای تابشی لاقل بخشی از انرژی آزاد شده در اثر ترکیب حاملهای بصورت یک فتون ماوراء بنفس، نور مرئی و یامادون قوه‌ز ظاهر می‌گردد. در فرآیندهای غیرتابشی هیچ فتونی تولید نگرددیده و انرژی رهاشده بصورت حرارت (تولید فتونها در شبکه) تظاهر می‌کند.

دربرسی یک نمونه بروش کاتودولومینسانس بامیکروسکپ روینده، تنها فرآیندهای تابشی در ایجاد کنتراست دخالت دارند. فرآیندهای غیر تابشی نمودار هدر رفتن انرژی مفیدی است که میتوانست تولید فتونهای بیشتری نماید. در شکل ۲۲ ترکیب حاملهای جریانی که منجر به فرآیندهای تابشی می‌گردند نشان داده شده است.



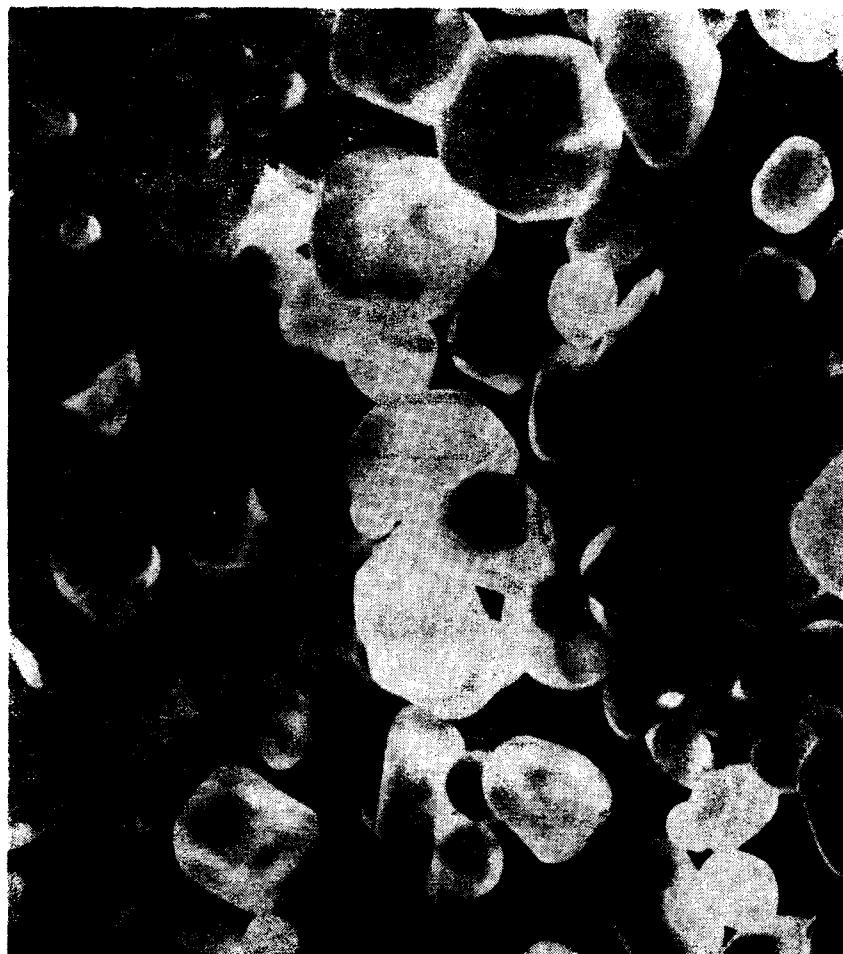
شکل ۲۲- فرآیندهای ترکیبی در نیمه هادی ها: a- ترکیب مستقیم الکترون با حفره بدون شارک فتون . b- ترکیب غیرمستقیم الکترون با حفره همراه با تولید یک فتون . c- ترکیب تابشی از طریق یک تراز ناخالصی .

شکل ۲۲a، ترکیب مستقیم یک الکترون با یک حفره وایجاد یک فتون را نشان میدهد. این فرآیند کم‌طبی آن یک الکترون از پائین نوار هدایتی به یک تراز خالی در بای نوار ظرفیتی می‌افتد. تنها در صورتی رخ میدهد که قوانین بقای انرژی و گشتاور (درواقع- معادلهای این قوانین در مکانیک کوانتومی) برقرار باشند. نظر باشکه گشتاور یک فتون در مقایسه یک الکترون بسیار ناچیز است. لذا در این حالت، معنای قانون بقای گشتاور اینستکه الکترون تنها بین ترازهای با گشتاور بلوری یکسان میتواند انتقال یابد. اگر چنین ترکیب مستقیمی ممکن نباشد. آنگاه بقای گشتاور تنها در صورتی امکان پذیر است که فرآیند مذکور با جذب یا تولید یک فتون همراه باشد. این فرآیند «غیر مستقیم» که در شکل ۲۲b نشان داده شده در واقع یک «برخورد سه گانه» (Three-body collision) بوده و کارآئی آن در مقایسه با «برخورد دو گانه» (Two - body collision) که در فرآیند مستقیم رخ میدهد، بسیار کمتر است. در نتیجه از قطعه نظر کاتودولومینسانس، نیمه هادیهای نظریه InAs، GaAs وغیره، که ساختمان نواری‌نها در شکل ۲۲a نشان

داده شده در مقایسه با نیمه هادی هائی نظیر Si و Ge کارآئی بیشتری دارند. ساختمان نواری دو عنصر اخیر بسیار پیچیده تر است و بنابراین تمایل بیشتری به فرآیندهای غیرستقیم وجود دارد.

در سوارد نسبتاً خالص، ساختمان نواری جسم اثر مهمنی بر روی کارآئی تابشی دارد. در سوارد ناخالص، فرآیند دیگری هم اهمیت پیدا میکند که در شکل ۲۲۵ نشان داده شده است. در این مورد، ترکیب الکترون، حفره یک فرآیند دو مرحله‌ای است که از طریق مراکز ناخالصی (Impurity centres) انجام می‌گیرد. در مثال شکل ۲۲۵ الکترون بواسطه یک اتم ناخالصی (تراز ناخالصی) گرفتار شده و یک قانون تولید می‌شود. در مرحله بعد، اتم مذکور یک حفره را گرفتار نموده و یک فنون بوجود می‌اید. بدین ترتیب اتم سوره نظر باری گر آمده است تا این فرآیند را تکرار کند. از بحث بالا میتوان نتیجه گرفت که هرگاه در قسمتهای مختلف یک نمونه، کارآئی تابشی یکسان نباشد، کنتراستی در تصاویر کاتودولومینسانس آن نمونه بوجود می‌اید. برای مثال، حضور یک فیلم سطحی نازک روی نمونه میتواند بدرو طریق بر کنتراست تصویر تأثیر گذارد:

(الف) ایجاد تغییر در ضریب انعکاس الکترونهای تابشی از سطح نمونه و (ب) ایجاد تغییر در انعکاس کلی نور تولید شده در درون نمونه. مثال دیگر وجود ناخالصی ها در نمونه است که نسبت فرآیندهای تابشی به فرآیندهای غیر تابشی در ترکیب حاملها را بطور موضعی تغییر میدهد. همچنین خلاء ها و یارسوب های کوچک (در حدود $2\text{ }\mu\text{m}$) بصورت مراکز جدید ترکیب حاملها عمل میکنند. بعلاوه این تقایص بلوری، دانسته جفتنهای الکترون. حفره را که بواسطه پرتو تابش بوجود آمده اند، تغییر داده و برپا کنده گری نور تولید شده نیز اثر میگذارند. بهمین ترتیب تابعیتی های انفرادی ویا



شکل ۲۳ - تصویر یک قطعه فسفر ۷-P بروش کاتودولومینسانس [از مأخذ ۱۵]

رشته‌ای میتوانند برویزگهای ترکیب حاملها اثر بگذارند و یا آنکه نورا بطور متفاوتی نسبت به شبکه پراکنده کرده و ایجاد کنتراست نمایند. شکل ۲۲، یک میکروگراف کاتودولومینسانس از یک قطعه فسفر 7-P را نشان میدهد. نکته دیگری که باید ذکر نمود اینستکه چون انرژی لازم الکترونها برای برانگیختن اوبینسانس از انرژی لازم برای ایجاد و انتشار الکترونها ی ثانویه کمتر میباشد، بنابراین حجم مؤثر در روش کاتودولومینسانس (یعنی حجمی که در آن جفتهای الکترون حفره بتوسط پرتو تابش تولید میشوند) از حجم مؤثر در روش انتشاری (یعنی حجم گلابی شکل در شکل ۶) بزرگتر است. روی این اصل، قدرت تفکیک در روش کاتودولومینسانس از قدرت تفکیک در روش انتشاری کمتر میباشد.

۶- نتیجه‌گیری

از زمانیکه میکروسکپ الکترونی روینده به بازار عرضه شده است بیش از سیزده سال نمیگذرد و در نتیجه این نوع میکروسکپ هنوز وسیله نسبتاً جدیدی است که در انتظار تحولات بزرگ میباشد. ولی در همین مدت کوتاه، پیشرفت‌های عظیمی در افزایش قدرت تفکیک میکروسکپ روینده حاصل شده واستفاده از این وسیله در تمام رشته‌های علوم تجربی متداول گردیده است. کاربردهای میکروسکپ الکترونی روینده در متالورژی، الکترونیک، علوم طبیعی، مکانیک شکست، نساجی وغیره هر روز بیشتر توسعه میباشد.

سه تفاوت اصلی، میکروسکپ الکترونی روینده را از میکروسکپ الکترونی عبوری (ویا مستقیم) مشخص میکند:

الف) در سیستم مستقیم، الکترونها پس از فعل و افعال بانمونه به کانون آورده میشوند، در حالیکه در سیستم رویندنی، الکترونها تابشی در روی سطح نمونه و پیش از فعل و افعال با آن-کانونی میگردند. واضح است که الکترونها پس از فعل و افعال بانمونه دارای طیف گسترده‌ای از انرژی بوده و کانونی کردن آنها خالی از اشکال نیست، در حالیکه الکترونها تابش بسیار همگن تر و انرژی آنها یکنواخت تر میباشد و در نتیجه کانونی کردن آنها نیز ساده‌تر است.

ب) در سیستم رویندنی، در هر لحظه کافیست که الکترونها فقط روی یک نقطه از نمونه کانونی شوند، ولی در میکروسکپ‌های مستقیم، الکترونها را باید روی تمام نقاط منطقه مورد بررسی کانونی کرده و در تمام مدت عمل آنرا کانونی نگاهداشت. روی این اصل، طرح عدسی‌های الکترونی در سیستم رویندنی نسبت به سیستم مستقیم خیلی ساده‌تر و کم کردن خطاهای اپتیک بسیار آسان تر میباشد.

ج) در میکروسکپ روینده، اطلاعاتی که در تصویر نهفته است بتوسط یک سیگنال الکتریکی حمل میشود و این سیگنال را میتوان بطرق گوناگون پرورش داد (آنچه که Signal processing نامیده میشود). برای مثال، سیگنال حاصله از نمونه را میتوان مستقیماً به یک کامپیوتر داد تا روی آن، آنالیز عددی انجام گیرد. در واقع کاربرد «نظریه اطلاعات» (Information theory) در تصاویر حاصله از میکروسکپ روینده هر روز گسترش بیشتری میباشد، [۳۷]. بهمین ترتیب، با تکنیکهای بخصوص، اسکان جدا کردن کنتراست حاصله از یک مکانیزم مشخص از کنتراست سایر مکانیزم وجود آمده است.

* مزیت بسیار مهم دیگر میکروسکپ‌های روینده، ساده بودن تهیه نمونه برای بررسی‌های میکروسکوپی است. برخلاف میکروسکپ عبوری که در آنها باید از نمونه‌های بسیار نازک استفاده شود. و تهیه اینگونه نمونه‌ها اغلب کار ساده‌ای نیست در میکروسکپ‌های روینده جز در مواردی خاص (مثلاً در مورد مواد آلی که قابلیت هدایت الکتریکی خوبی ندارند)، میتوان نمونه را مستقیماً و بدون عملیات آمادگی قبلی مورد بررسی قرار داد.

میکروسکپ الکترونی روینده در واقع خود یک آزمایشگاه کوچک را تشکیل می‌دهد. برای مثال بررسی سطحی و شکل ظاهری یک نمونه را میتوان بطرق گوناگون بارشها انتشاری و یا عبوری تحت زوایای مختلف تابش و یا با ولتاژهای متفاوت از ۵۰k.v. تا ۵۰k.v. انجام داد. همچنین، خواص الکتریکی نمونه را میتوان بروش هدایتی بررسی کرد.

شناخت عناصر سازنده نمونه نیز بکمک روش اشعه ایکس و یا انتشار الکترونهای اوژه ممکن است. بعلاوه، خواص مغناطیسی ولومینسانس نمونه نیز قابل بررسی با میکروسکپ روینده میباشد. همچنین، بکمک طرحهای کانالی حاصله از نمونه، بنور-شناصی آن انجام میگیرد. بدین ترتیب مشاهده میشود که بکمک میکروسکپ روینده، یک نمونه را میتوان از جنبه های مختلف مورد بررسی قرار داده و اطلاعات سودمندی در مورد توبوگرافی، خواص الکتریکی و مغناطیسی، بلورشناسی، تجزیه شیمیائی وغیره از نمونه مورد بررسی بدست آورد.

بنظر میرسد که با بهبود منع های الکترونی وبالا بردن کارآئی وسائل جمع آوری الکترونها و استفاده از روشهای پیشرفته تر در پرورش سیگنانل، آتیه هرچه درخشنانتری برای میکروسکپ الکترونی روینده بعنوان یک وسیله با ارزش آزمایشگاهی در پیش باشد و در پاسخ به کنگاوهای بی پایان بشر، نقش مهمتری را ایفا نماید.

از ریاست محترم و پرسنل مرکز بین المللی تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک وابسته به دانشگاه تهران بخاطر اجازه استفاده از میکروسکپ الکترونی روینده و سایر تجهیزات آن مؤسسه سپاسگزاری مینماید.

مأخذ

- 1) M. Knoll, Z. Tech. Phys., **16**, 467, (1935).
- 2) M. Von Ardenne, Z. Phys., **109**, 553, (1938).
- 3) V. K. Zworykin, J. Hillier & R. L. Snyder, A. S. T. M. Bull., **117**, 15, (1942).
- 4) C. Brachet, Bull. Assoc. Tech. Maritime Aeron., **45**, 369, (1946).
- 5) F. Davoine, Thèse, Université de Lyons, (1957).
- 6) F. Davoine, P. Pinard & M. Martineau, J. Phys. Radium, **21**, 121, (1960).
- 7) D. McMullan, Proc. Inst. Elec. Engrs. (London), **B100**, 245, (1953).
- 8) T. E. Everhart, Ph. D. Dissertation, University of Cambridge (1958).
- 9) H. Bruining, "Physics and Applications of Secondary Electron Emission", Pergamon Press, Oxford (1954).
- 10) O. C. Wells, J. Electron. Control, **7**, 373, (1859).
- 11) P. C. R. Palluel, C. R. Acad. 2ci., **224**, 1492, (1947).
- 12) E. J. Sternglass, Phys. Rev., **95**, 345, (1954).
- 13) H. E. Bishop, J. Phys. (D), **1**, 673, (1968).
- 14) T. E. Everhart & C. W. Oatley, J. Electronics, **2**, 568, (1956).
- 15) "Autoscan", A Siemens publication, (1974).
- 16) G. V. Spivak, G. V. Saparin, B. Massari & M. V. Bikov, Proc. Third Regional Conference on Electron Microscopy, Prague (1964).
- 17) S. Kimoto & H. Hashimoto, Twenty sixth Meeting of Electron Microscope Society of America, (1963).
- 18) N. C. Mac Donald, Appl. Phys. Letts., **16**, 76, (1970).
- 19) D. R. Clark, J. Mat. Science, **5**, 689, (1970).

- 20) H. F. Matar & C. W. Laakso, J. Appl. Phys., **40**, 476, (1969).
- 21) A. M. B. Shaw, Ph. D. Dissertation, University of Cambridge (1967).
- 22) P. Duncumb, Phill. Mag., **2101**, (1962).
- 23) D. G. Coates, Pjil. Mag., **16**, 1179, (1967).
- 24) G. R. Bookr, A. M. B. Shaw, M. J. Whelan & P. B. Hirsch, Phil. Mag., **16**, 1185, (1967).
- 25) P. B. Hirsch, A. Howie & M. J. Whelan, Phil. Mag., **7**, 2095, (1962).
- 26) E. M. Schulson & C. G. Van Essen J. Sci. Instr., **2**, 247, (1969).
- 27) I. M. Boswarva & P. Pirouz, J. Phys. (C), **5**, 2177, (1972).
- 28) P. Pirou & I. M. Boswarva, Phys. Stat. Sol., **26a**, 407, (1974).
- 29) J. P. Spencer, C. J. Humphreys & P. B. Hirsch, Phil. Mag., **26**, 193, (1972).
- 30) P. Pirouz, Z. Naturforsh., **29a**, 1188, (1974).
- 31) V. E. Cosslett & R. N. Thomas, Brit. J. Appl. Phys., **15**, 883, (1964).
- 32) A. V. Crewe & J. Wall, J. Mol. Biol., **48**, 375, (1970).
- 33) A. V. Crewe, Science, **168**, 1338, (1970).
- 34) A. V. Crewe, in "Physical Aspects of Electron Microscopy and Microbeam Analysis", Rdited by B. M. Siegel & D. R. Beaman, John Wiley & Sons, (1975).
- 35) J. M. Cowley, Appl. Phys. Letts., **15**, 58, (1969).
- 36) S. Kimoto & H. Hashimoto, Proe, First Annual SEM Symposium, Illinois Institute of Teehnology, (1968).
- 37) E. Vicario & M. Pitaval, in "Scanning Electron Microscopy; Systems and Applications", Institute of Physics, Lonodon (1973), P. 142.