بسم الله الرحمن الرحیم

**دانشکده فنی**

**گروه برق**

**گرایش الکترونیک**

# بررسی چگونگی اندازه گیری پارامترهای نیمه هادی ها به روشهای SEM اثر هال و پروب چهار نقطه ای و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی پروب چهار نقطه ای

**از:**

**مصطفی ربیعی**

**استاد راهنما:**

**دکتر میر منصور ضیابری**

**استاد مشاور:**

**دکتر راهبه نیارکی اصلی**

**مرداد ماه ۸۹**

**تقدیم به:**

**پدرم**، مهربانترین پدر دنیا

به **مادر** عزیزم که با حضور گرمش زندگیم معنا می گیرد.

به **همسر و فرزندم**، که پیوسته مشوق من بوده اند و همواره در قلبم جای دارند.

**قدردانی:**

خدای را شاکرم که این فرصت دست داد تا از کسانی که در مدت تحصیل وهمچنین تهیه و تنظیم این پایان نامه مرا یاری نمودند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد راهنمای گرانقدر، جناب آقای دکتر میر منصور ضیابری که درمدت تحصیل، ویرایش مقالات و پایان نامه نهایت لطف را در حق من مبذول داشتند سپاسگزارم.

همچنین از زحمات استاد مشاور گرامیم سرکار خانم دکتر راهبه نیارکی که درمدت تحصیل، ویرایش مقالات و تنظیم این پایان نامه با مشاوره های خود مرا یاری نمودند تشکر می نمایم.

ضمناً از مدیر گروه برق، جناب آقای دکتر باقر سلیمی که دردوران تحصیل یار و یاور اینجانب بوده اند وهمچنین درتهیه و ویرایش مقالات انگلیسی اینجانب نقش بسیار موثری داشته اند از صمیم قلب تشکر وقدر دانی می کنم.

ودر نهایت از کلیه اساتید دانشکده که زحمات فراوانی برای اینجانب در مدت تحصیل کشیده اند بسیار سپاسگزارم وامیدوارم همیشه موفق وپیروز و سربلند باشند.

## فهرست مطالب


چکیده فارسی.....ر
چکیده انگلیسی.....ز
**فصل اول:میکروسکوپ الکتروتابشی**
مقدمه.....۲
۱-۱ میکروسکوپ الکتروتابشی.....۴
۱-۲ اساس کار میکروسکوپ های الکترونی روبشی.....۷
۱-۲-۱ اندرکنش یاتاثیر متقابل پرتو الکترونی و مواد.....۷
۱-۲-۲ تولید وکنترل مشخصه های پرتو الکترونی.....۹
۱-۲-۳ آشکار سازی پرتوهای ناشی از اندر کنش پرتو الکترونی با ماده.....۱۰
۱-۳ قسمت های مختلف دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی.....۹
۱-۳-۱ تفنگهای الکترونی.....۱۱
۱-۳-۱-۱ تفنگ های با فیلمان تنگستنی.....۱۱
۱-۳-۱-۲ تفنگهای انتشار میدانی .....۱۲
۱-۳-۲ لنزهای مغناطیسی.....۱۲
۱-۳-۲-۱ لنزهای مغناطیسی متمرکز کننده.....۱۳
۱-۳-۲-۲ لنز نهایی.....۱۵
۱-۳-۳ سیستم روبشگر.....۱۵
۱-۳-۴ آشکارگرها.....۱۶
۱-۳-۴-۱ آشکارگر اورهارت-تورنلی (E-T).....۱۷
۱-۳-۴-۲ آشکارگر های نیمه هادی.....۱۸
۱-۳-۵ سیستم تصویر سازی.....۱۹
۱-۳-۶ سیستم خلاء.....۲۰
۱-۳-۶-۱ پمپ های مکانیکی چرخشی.....۲۱
۱-۳-۶-۲ پمپهای نفوذی.....۲۲
۱-۳-۶-۳ پمپ های توربو مولکولی.....۲۲
۱-۴ اصول کار با میکروسکوپ الکترونی روبشی.....۲۳
۱-۴-۱ مبانی تصویرگیری.....۲۳
۱-۴-۱-۱ عمق میدان.....۲۳
۱-۴-۱-۲ قدرت تفکیک.....۲۳
۱-۴-۱-۲-۱ خطای تفرق وقدرت تفکیک.....۲۳
۱-۴-۱-۲-۲ قطر پرتو الکترونی وقدرت تفکیک.....۲۴
۱-۴-۱-۲-۳ نفوذ پرتو الکترونی درنمونه وقدرت تفکیک... .....۲۴
۱-۴-۱-۳ بزرگنمایی.....۲۴
۱-۴-۲ مکانیزم تصویر سازی درمیکروسکوپ الکترونی روبشی.....۲۵
۱-۴-۳ اصول کاربری SEM.....۲۶
۱-۴-۳-۱ اصول نمونه سازی.....۲۶
۱-۴-۳-۲ اصول تصویری گیری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی.....۲۹
۱-۵ کاربردهای میکروسکوپ الکترونی روبشی.....۳۳

۱-۵-۱ کاربردهای میکروسکوپ الکترونی روبشی درمهندسی مواد..... ۳۳
۱-۵-۱-۱ شکست نگاری..... ۳۳
۱-۵-۱-۲ متالوگرافی..... ۳۴
۱-۵-۱-۲-۱ تعیین اندازه دانه..... ۳۴
۱-۵-۱-۲-۲ تعیین ساختار متالوگرافی..... ۳۵
۱-۵-۱-۲-۳ ارزیابی چگونگی حضور فازهای مختلف در ساختار..... ۳۶
۱-۵-۱-۲-۴ بررسی خوردگی..... ۳۷
۱-۵-۲ کاربرد میکروسکوپ الکترونی روبشی در فناوری نانو..... ۳۸
۱-۵-۲-۱ اندازه گیری محدوده اندازه نانو ذرات وبررسی مورفولوژی آنها..... ۴۰
۱-۵-۲-۲ بررسی ساختار نانو لوله ها ..... ۴۱
۱-۵-۲-۲-۱ نانو لوله کربنی ..... ۴۲
۱-۵-۲-۲-۲ روش تخلیه قوس..... ۴۴
۱-۵-۲-۲-۳ روش تابش لیزر..... ۴۴
۱-۵-۲-۲-۴ رسوب بخار شیمیایی (CVD) ..... ۴۴
۱-۵-۲-۲-۵ نانولوله ترانزیستور اثر میدان..... ۴۵
۱-۵-۲-۲-۶ داشتن خاصیت ابررسانایی..... ۴۶
۱-۵-۲-۳ بررسی ساختار نانو الیاف..... ۴۷
۱-۵-۲-۴ بررسی نانوفیلترها..... ۴۸
۱-۵-۲-۵ بررسی ساختار نانوفلاورها..... ۵۰
۱-۶ استفاده از طیف اشعهX ..... ۵۰
۱-۶-۱اساس آنالیز شیمیایی در میکروسکوپ های الکترونی روبشی..... ۵۱
۱-۶-۲ آشکار سازی وشمارش پرتو X..... ۵۵
۱-۶-۳ روشهای مختلف ارائه اطلاعات..... ۵۶
نتیجه گیری..... ۵۷

**فصل دوم: اثر هال**

مقدمه..... ۵۹
۲-۱ اثر هال..... ۵۹
۲-۲ کاربردهای اثر هال..... ۶۳
۲-۲-۱ کاربرد سنسور هال..... ۶۴
۲-۲-۲ معرفی چند مدار مجتمع بر اساس پدیدهٔ هال..... ۶۵
۲-۲-۳ مغناطیس سنجهای هال..... ۶۸
۲-۲-۴ آمپرسنجهای جریان شدید..... ۶۸
۲-۲-۵ تعیین خارج قسمت یا تقسیم بوسیله مولد هال..... ۶۹
۲-۲-۶ ریشه‌گیری اعداد بوسیله مولد هال..... ۷۱
نتیجه گیری..... ۷۲

**فصل سوم: پروب چهار نقطه ای**

۳-۱ پروب چهار نقطه ای..... ۷۴
۳-۲ مگر muger ..... ۷۶

۳-۳ اندازه گیری مقاومت ویژه نیمه رسانا با استفاده از پروب جهار نقطه ای.....۷۸
۳-۴ مدل سازی ضریب مقاومت نیمه هادی در سیستم پروب چهار نقطه ای.....۸۴
۳-۵ اندازه گیری ضریب مقاومت صفحه.....۸۴
۳-۶ مشکلات اندازه گیری.....۸۶
نتیجه گیری.....۸۶
**فصل چهارم :اندازه گیری پارامترهای InP وتحقیق در مورد علت اختلاف بین مقادیر تئوری واندازه گیری شده**
مقدمه.....۸۸
۴-۱ کارهای قبلی انجام شده.....۸۸
۴-۲ ویژگیهایInP .....۸۸
۴-۳ کارهای قبلی انجام شده بر روی InP .....۸۹
۴-۴ چگونگی استفاده از پروب چهار نقطه ای.....۹۱
۴-۵ فرآیندهای تجربی.....۹۳
۴-۶ تراکم ناخالصیها وارتباط آ ن با حاملهای آزاد.....۹۵
۴-۷ نتایج اندازه گیری حامل های آزاد با استفاده از پروپ چهار نقطه ای به روش Lamorte .....۱۰۰
۴-۸ اندازه گیری تعداد اتمهای ناخالصی به روش خازنی C-V.....۱۰۲
۴-۹-بر هم نهی نتایج بدست آمده از اندازه گیری ها به روش پروپ چهار نقطه واندازه گیری C-V.....۱۰۶
۴- ۱۰ مقایسه کار انجام شده به روش c-v وکارهای انجام شده قبلی به روش رادیو تریسر.....۱۰۷
۴-۱۰ نتیجه گیری کلی از آزمایشات و اندازه گیریها.....۱۱۸
۴-۱۱راه کارهایی برای آینده.....۱۱۹
منابع ومراجع.....۱۱۷

## فهرست شکلها


۱-۱ دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی امروزی.....۶

۱-۲ اثر متقابل پرتو الکترونی ورودی وماده.....۸

۱-۳ شماتیک تفنگ الکترونی فیلمان تنگستنی .....۱۲

۱- ۴ حرکت مارپیچ الکترونها حین عبور از شکاف قطبی لنز الکترومغناطیسی.....۱۳

۱-۵ الگوی تفرق پرتو نور پس از عبور از یک روزنه.....۱۴

۱-۶ شماتیک عملکرد سیم پیچ های روبشی ولنز نهایی.....۱۶

۱-۷-آشکارگر اورهارت-تورنلی.....۱۷

۱-۸ -شماتیک اشکار گر نیمه هادی: الف- محل قرار گرفتن ب-جزئیات عملکرد واجزای آشکارگر.....۱۹

۱-۹ شماتیک لوله های پرتو کاتدی مورد استفاده درتلویزیون ها ومانیتورها.....۲۰

۱-۱۰ سطح مقطع یک پمپ نفوذی.....۲۲

۱-۱۱ سطح مقطع یک پمپ توربو مولکولی.....۲۲

۱-۱۲ تصاویر SE تهیه شده بر مبنای کنتراست زبری.....۲۶

۱-۱۳ نمونه ای از دستگاه تمیز کننده آلتراسونیک .....۲۸

۱-۱۴ تعیین اندازه دانه با SEM( الف)-آشکارگر SE و (ب)آشکارگر BSE.....۳۴

۱-۱۵(الف) چدن (ب) چدن خاکستری داکتیل.....۳۵

۱-۱۶ انتشار میکروترک در مرزدانه ها.....۳۶

۱-۱۷ نمونه مورفولوژی بافت هگزاگونال .....۳۶

۱-۱۸ (الف وب) اندازه گیری ضخامت پوش الکتریکی و ارزیابی فصل مشترک در سطح مقطع.....۳۷

۱-۱۹ تصویرSEM .....۳۸

۱-۲۰ یک درام یک مگا بیتی .....۳۹

۱-۲۱ نمونه پودر عنصری فلزی واکسیدی.....۴۰

۱-۲۲ تصویر SE الف-نانوپودر و ب-نگاتیو تصویر الف.....۴۱

۱-۲۳ (الف وب)عدم موفقیت درمحصول نانو لوله ای ج-تولید محصول نانو لوله ای مناسب وهمگن.....۴۲

۱-۲۴ نانو لوله کربنی.....۴۳

۱-۲۵ نانو لوله های کربنی، استوانه ای شبیه به آرایش شش ضلعی .....۴۳

۱-۲۶ نمونه ای از ترانزیستورهای FETنانو لوله با استفاده از نانو لوله های تک دیواره ..... ۴۵
۱-۲۷ مشخصه ISD نسبت به ولتاژGATE..... ۴۶
۱-۲۸ اندازه گیری قطر نانو الیاف ..... ۴۷
۱-۲۹ یک نمونه نانو فیلتر ..... ۴۸
۱-۳۰ یک نانوفلاور ..... ۵۰
۱-۳۱ انتقالهای متداولتر بین مدارهای الکترونی که منجر به ساطع شدن پرتوX می شود..... ۵۲
۱-۳۲ تغییرات عمق تولید پرتو X..... ۵۳
۱-۳۳ مثالی ازیک انالیز خطی نشانگر تغییرات مقدار چهار عنصر درامتدادخط تریم شده ..... ۵۶
۲-۱- نیروهای وارد بر حاملهای بار درون یک رسانا ..... ۵۹
۲-۲ حاملهای بار مثبت قطبیت اختلاف پتانسیل ..... ۶۰
۲-۳ مختصات شکل (۲-۱)..... ۶۰
۲-۴ ایجاد صفحه هال در آی سی (الف) دید از مقطع (ب) دید از بالا..... ۶۳
۲-۵ ساختمان داخلی آی سی که بر اساس پدیده هال کار می کند..... ۶۴
۲-۶ برخی از کاربردهای سنسور هال (الف وب) اندازه گیری دور موتور (ج) آشکارسازی عبور یک جسم فلزی..... ۶۵
۲-۷ آی سی هال مدل $UGN-3501T$ از کارخانهٔ Sprague ..... ۶۶
۲-۸ آی سی هال مدل $UGN-3501$ از کارخانهٔ Sprague با قابلیت تنظیم افست..... ۶۷
۲-۹ آی سی هال مدل $UGN-3019T$ از کارخانهٔ Sprague ..... ۶۷
۲-۱۰ یک آمپرسنج جریان بالا بوسیله اثر هال..... ۶۹
۲ – ۱۱ مدار اصلی برای تعیین خارج قسمت بوسیله مولد هال..... ۷۰
۲-۱۲ مداراصلی جهت ریشه گیری..... ۷۱
۳-۱ پروب چهار نقطه ای ونر..... ۷۴
۳-۲ دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی خاک موسوم به ۴ میله ونر می باشد..... ۷۵
۳-۳ تغییر مقاومت خاک در طول مسیر یک خط لوله..... ۷۶
۳-۴ اندازه گیری مقاومت ویژه زمین به وسیله مگر چهار ترمینالی..... ۷۶
۳-۵ روش اندازه گیری مقاومت یک سیم اتصال زمین..... ۷۷
۳-۶ روند رسانش در نیمه رسانای نوع -n الف )در تعادل گرمایی ب)در رسانش بایاس شده..... ۷۹

۳-۷ هدایت جریان در یک میله نیمرسانا با ناخالصی یکنواخت ..... ۸۰
۳-۸ منحنی تغییرات ضریب اصلاح برای ویفرهای دایرهای ومستطیلی..... ۸۱
۳-۹ پروب چهار نقطه ای جهت اندازه گیری مقاومت یک لایه هادی نازک مستطیلی..... ۸۲
۳- ۱۰ سیستم اندازه گیری نیمه هادی دایره ای شکل به کمک پروب چهار نقطه ای..... ۸۳
۳-۱۱ مدل سازی ضریب مقاومت نیمه هادی در سیستم پروب چهار نقطه ای..... ۸۴
۳-۱۲ اندازه گیری ضریب مقاومت صفحه..... ۸۵
۴- ۱ پروب چهار نقطه ای ساخته شده. ..... ۹۲
۴-۲ شبکه بلوری سیلسیم داپ نشده..... ۹۵
۴-۳ شبکه بلوری si داپ شده از نوع N..... ۹۶
۴-۴ شبکه بلوری GaASداپ نشده..... ۹۷
۴-۵ شبکه بلوری GaASداپ شده با گوگرد از نوع N ..... ۹۸
۴-۶ شبکه بلوری GaASداپ شده با Zn از نوع P..... ۹۹
۴-۷ شبکه بلوری InP داپ شده با Zn از نوع P..... ۱۰۰
۴-۸ نمودار پروب چهار نقطه ای..... ۱۰۱
۴-۹ منحنی تغییرات ضریب اصلاح برای ویفرهای دایره ای ومستطیلی..... ۱۰۲
۴-۱۰ نمایش مجموعه ابزارهای آزمایشگاهی برای اندازه گیری چگالی ناخالصیها..... ۱۰۳
۴-۱۱ منحنی تغییرات $\frac{۱}{C^۲}$ بر حسب ولتاژ معکوس دیود..... ۱۰۴
۴-۱۲- نمودار چگالی ناخالصی درون نیمه هادی (در اینجا Znدرون InP)..... ۱۰۵
۴-۱۳ نمایش همزمان چگالی حاملهای آزاد وناخالصی ها در یک نمودار ..... ۱۰۷
۴-۱۴ نمایش همزمان چگالی حاملهای آزاد وناخالصی ها در یک نمودار . به روش radio tracer..... ۱۰۹
۴-۱۵ قسمتی ازکره در فضای اندازه ی حرکت بلوری..... ۱۱۱
۴-۱۶ تابع توزیع فرمی F(E)بر حسب $(E-E_F)$ به ازای دماهای مختلف..... ۱۱۲
۴-۱۷ باند دیاگرام سلیسیم..... ۱۱۵
۴-۱۸ باند دیاگرام ناخالصی ۵ظرفیتی در نیمه هادی..... ۱۱۵
۴-۱۹ باند دیاگرام ناخالصی ۳ ظرفیتی در نیمه هادی..... ۱۱۵

## فهرست جداول

۱-۱ انرژی وطول موج مربوط به قوی ترین پرتوهای اشعه X.....۵۳

۱-۳ ضریب تصحیح جهت اندازه گیری مقاومت صفحه با یک پروب چهار نقطه ای واقع بر یک نمونه.....۸۳

۱-۴ نتایج اندازه گیری پروب چهار نقطه ای.....۱۰۱

۲-۴ مقادیر اندازه گیری توسط اثر خازنی.....۱۰۵

۳-۴ بر هم نهی نتایج مربوط به چگالی حاملهای آزادو ناخالصی ها درون نیمه هادی.....۱۰۶

۴-۴ بر هم نهی نتایج مربوط به چگالی حاملهای آزاد و ناخالصی ها درون نیمه هادی به روش radio tracer.....۱۰۸

## فهرست اختصارات

Auger  Electrons AE :

BSE: Back Scattered Electrons

CNT: Carbon Nano Tube

factor CF: correction

CRT: Cathode Ray Tube

EMF: Electro Motive Force

ERFC : Error Funcntin Cofactor

INP: Indium Phosphide

Soc: System on chip

SEM: Scanning Electronic Microscopy

TEM: Transmission Electronic Microscopy

## چکیده


بررسی چگونگی اندازه گیری پارامترهای نیمه هادی ها به روشهای SEM اثر هال و پروب چهار نقطه ای و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی پروب چهار نقطه ای

مصطفی ربیعی

در این پایان نامه نخست روشهای اندازه گیری برخی پارامترهای کلیدی مشتمل بر $N_D$, $N_A$, p, n, $\mu_n$, $\mu_p$ و راستای نیمه هادی وضخامت آنها در نیمه هادیها مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. اولین روش استفاده از SEM است که امکانات آن بصورت مبسوطی مورد مطالعه قرار گرفت و بعنوان راهی برای بقیهٔ دانشجویان جهت پیشرفت در این مسیر عرضه شده است .

در مرحله بعد روشهای هال ، پروب چهار نقطه ای و روش C-V بطور همه جانبه مورد مطالعه قرار گرفته و نمونه هایی فراهم شد و با استفاده ازسیستمهای اندازه گیری با روشهای فوق آزمایشاتی روی آنها انجام شد. مهمترین نتیجه گیری از نتایج آزمایشات فوق این بود که تعداد حاملهای حفره یک نمونه از InP در عمقهای مختلف باتعداد ناخالصی های آن که از جنس Zn بودند برابر نبود. با ترسیم منحنی نمایش اطلاعات فوق نتایج جالبی به صورت زیر بدست آمد.

با مشاهده تفاوت کمیتهای فوق تحقیق گسترده ای در مقالات منتشره بعمل آمد و معلوم شد این تحقیق بوسیلهٔ محققین تراز اول خارجی نیز انجام گرفته است وآنها نیز به همان نتایج ما رسیده اند.

ما سعی کردیم وجود اختلاف را توجیه کنیم و این توجیه ما را به این نتیجه رسانید که در اینجا توزیع آماری فرمی – دیراک قابل استفاده نیست و مناسبترین مدل برای مورد فوق الذکرمدل Tuck است.

همچنین ما دریافتیم که داپ کردنInP با Zn به میزانی بیش از رقم $۳\times۱۰^{۱۸}$ ناخالصی در $cm^3$ منجر به نوعی از اشباع می شود به نحوی که نابرابری کمیتهای فوق شروع می گردد.



**کلید واژه:** ایندیم فسفاید ، پروب چهار نقطه ای، اثر هال ، تکنیک اندازه گیری روش C-V ، پروفیل ناخالصی ، دیفوزیون روی

# Abstract

Investigation of semiconductor parameters measuring devices consisting of SEM , HALL and Four point probe systems, and assembling a laboratory setup for the last one.

In this thesis, first of all the methods of measuring semiconductor key parameters consisted of $\mu_{\mathrm{p}}$ , $\mu_{n}$ ,n ,p ,$N_A$ ,$N_{\mathrm{D}}$ thickness and direction of semiconductor have been investigated.
The first method is SEM whose functions have been thoroughly studied so that the other students could be able to take step in this way and do different measurements.
In the next stage many other measuring methods e.g.Hall method, Four point probe method and C-V method have been thoroughly studied .In this stage some samples have been prepared and with the setups of these measuring methods some measurements have been carried out.
The most important conclusion from results is "the number of hole carriers which has been measured in different depths of semiconductor was not the same as the number of impurity atoms".
By plotting the graphs of these data and comparing these graphs interesting conclusion have been gained as follows:
After observation of these inequality a thorough literature search has been done and we observed that many foreign researchers have found the same results.
We tried to give a reason for this inequality and found that the Fermi-Dirac statistic is not usable in this case and the most suitable model is the Tuck model.
Also we found that doping InP with Zn more than $3 \times 10^{18}$ atom/cm$^3$ will result in some kind of saturation so that inequality will initiates.

Keywords: Indium posphide, four point probe, Hall effect, c-v measuring technique. Carrier profile, Zn impurity profile, Zn vapor diffusion.

فصل اول

# میکروسکوپ الکترونی تابشی

**مقدمه**

ادوات نیمه های به درجـه ای از پیچیدگی واهمیت اقتصـادی رسیده اند که به فکر مخترعـانشـان هـم نمی رسیده است ترانزیستورهای دو قطبی واثر میدانی دستیابی به صنعت کامپیوتر را امکان پذیر ساختند، که این به نوبه خود بازار مصرف کاملاً جدیدی را ایجاد کرده است. با تداوم در ارائه ی ادوات کاراکتر با قیمت ارزانتر برای هر واحد صنعت الکترونیک به بازارهایی راه یافته است که قبلا نامی از آنها نبوده است. البته می دانیم همه ی ادوات نیمه هادی از نوعی نیمه هادی ساخته می شوند و هر گونه تحقیقی در این زمینه نیاز به آن دارد که پارامترهای مختلفی از آن را اندازه گیری کردکه همیشه به عنوان یک ستون اصلی تحقیق در این زمینه اهمیت خود را حفظ خواهد کرد از سوی دیگر با رشد و اشاعه فناوری نانو و به دنبال آن سوق و تعالی علوم مختلف در راستای این فناوری، نیاز به کسب اشاعه و ارتقاء دانش فنی بکار گیری و نگهداری از دستگاه هایی که امکان کاربرد آنها در زمینه فناوری نانو وجود دارد به امری بسیار مهم تبدیل شده است .در این راستا کاربرد میکروسکوپهای الکترونی روبشی مورد توجه ویژه ی قرار می گیرند.

البتـه وسایـل اندازه گیـری فقـط بـه میکـروسکوپهای الکتـرونی محدود نـمی شود و همیشـه وسـایل کلاسیـک مثـل پـروب چهار نقطه ای ودستگاه سنجش اثر هال و وسایل اندازه گیری اثر خازنی در جای خود اهمیت زیادی دارد.

در فصل اول این پایان نامه تاریخچه واساس کار میکروسکوپهای الکترونی روبشی، آشنایی با قسمتهای مختلف دستگاه ، اصول نمونه سازی، کاربردهای دستگاه در زمینه های علوم مختلف وفناوری نانو به عنوان اصلی ترین زمینه تحقیقاتی علوم امروز پرداخته می شود در فصل دوم اثر هال که یکی از پدیده های جالب توجه مبحث مغناطیس است که علاوه بر اهمیت صرفاً فیزیکی، از نظر علمی نیز بسیار جذاب است مورد بحث قرار می گیرد. این امر از کاربردهای اثر هال در تعیین خواص الکتریکی جامدات مختلف، از جمله نیم رساناها، ناشی می شود. از این اثر می توان برای تعیین علامت حامل های باراکثریت، تراکم وتحرک آنها، یعنی پارامترهایی که خواص بنیادی الکتروفیزیکی نیم رسانا راتعیین می کند، استفاده کرد. تحلیل وسایل نیم رسانای خاص و آرایش آنها بدون داشتن اطلاعات در مورد این پارامتر ها ناممکن است. به این دلیل ایده ای از اثر هال ارائه خواهیم کرد. در فصل سوم پروب چهار نقطه ای مورد بررسی همه جانبه قرار گرفته است وروش کار با آن و چگونگی کسب نتایج دقیق از آن بطور مشروح مورد بحث قرار گرفته است .در فصل چهارم به طور همزمان یک سیستم اندازه گیری برای تعیین اتم های ناخالصی در یک نمونه ویفر InP به طور مشروح توضیح داده شده است. این فصل منجر به ترسیم دو منحنی شده که یکی تغییرات حامل های آزاد در عمق های مختلف نیمه هادی و دیگری تغییرات ناخالصی در همـان عمق ها

می باشد و با مطالعه در مورد تفاوت آنها نتایج جالبی در مورد پدیده اشباع شدن نیمه هادی از ناخالصی بدست آمده است.

**۱-۱ میکروسکوپ الکتروتابشی**

طراحی میکروسکوپ الکترونی بر مبنای دو کشف علمی پایه گذاری شد که عبارتند از:

۱- ارائه فرضیه موجی بودن ذرات توسط لوییس ویکتور دی بروگلی[1] در سال ۱۹۲۴ میلادی. وی به موجب ارایه این نظریه به پاس خدمات علمی ارزنده ای که داشت، توانست جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۲۹ میلادی به خود اختصاص دهد.

۲- کشف امکان تمرکز الکترون در میدان های الکترواستاتیکی و مغناطیسی توسط بوش[2] در سال ۱۹۲۶[۱].

اولین دستگاهی که بر مبنای اصول مذکور ساخته شد، حاصل تلاش نول[3] در سال ۱۹۳۵ میلادی بود. اما این دستگاه بیشتر با هدف بررسی پرتوهای ثانویه( که در بخش های بعد در ارتباط با آنها توضیح داده خواهد شد) ساخته شده بود و استفاده از آن به عنوان یک میکروسکوپ، به صورت اتفاقی رخ داد به همین دلیل بود که تمهیدات خاصی برای کاهش قطر پرتوالکترونی لحاظ نشده بود و قطر نهایی پرتو الکترونی در آن، حدود ۱۰۰ میکرومتر بود. لذا اولین میکروسکوپ الکترونی روبشی در سال ۱۹۳۸ توسط مانفردوان آردن ساخته شد. دراین میکروسکوپ، ثبت تصویر به روش عکس برداری بر روی یک استوانه در حال چرخش انجام می شد[۲].

در آن زمان کاربرد میکروسکوپ های الکترونی در هاله ای از ابهام قرار داشت. به همین دلیل برخی از محققین توجه خود را به کشف و ایجاد کاربرد میکروسکوپ های الکترونی روبشی معطوف ساختند. از آن دسته می توان به زوریکین، هیلیر و اشنایدر[4] اشاره نمود که روش بررسی نمونه های غیر شفاف در میکروسکوپ های الکترونی آن روز را ابداع و منتشر ساختند. نتایج عملی تحقیقات دانشمندان مذکور باعث ارائه نوع کامل تری از میکروسکوپ های الکترونی روبشی، در سال ۱۹۴۲ شد[۲]. کار تحقیقاتی مذکور به دلیل مشکلاتی متوقف گردید. مسأله اصلی در ساخت میکروسکوپ های الکترونی روبشی، بالا بودن نسبت نویز به سیگنال بود که منجر به افت شدید کیفیت تصاویر می شد. از سوی دیگر تجهیزات مورد استفاده در ثبت تصویر بسیار پیچیده و گرانقیمت بود. این امر منجر به تاخیر ۳۰ ساله در تولید تجاری میکروسکوپ های الکترونی روبشی گردید. اما در تمام طول این مدت تلاش در زمینه رفع عیوب

[1] Louis-Victor de broglie
[2] H.Bush
[3] knoll
[4] Zworykin,Hillier and Snyder

دستگاه در آزمایشگاه و مراکز تحقیقاتی ادامه داشت. بالاخره در سال ۱۹۶۵ اواتلی[1] و همکارانش در دانشگاه کمبریج بریتانیا موفق به ساخت یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با قابلیت احراز شرایط تولید تجاری شدند [۳]. در ادامه به بیان تاریخچه ای از عملکرد گروه تحقیقاتی مذکور پرداخته می شود.

در سال ۱۹۴۸ میلادی اواتلی گروه تحقیقاتی " میکروسکوپ الکترونی روبشی" را در دانشکده مهندسی کمبریج، پایه گذاری نمود. اولین دستگاه ساخته شده در این گروه در سال ۱۹۵۳ میلادی توسط مک مولان ارائه شد. در این میکروسکوپ نسبت نویز به سیگنال کاهش یافته بود اما هنوز قدرت عملکرد بسیار محدودی در بررسی نمونه ها داشت و قادر به بررسی گستره وسیعی از نمونه ها نبود. پس از آن اسمیت با تلاش فراوان توانست بسیاری از مشکلات میکروسکوپ مک مولان[2] را مرتفع کند و یک میکروسکوپ الکترونی روبشی با کارآیی بسیار بهتر را در سال ۱۹۵۸ میلادی ارائه نماید. لذا با تکمیل میکروسکوپ الکترونی روبشی اسمیت[3] در سال ۱۹۶۵ میلادی، اولین میکروسکوپ الکترونی روبشی با مشخصه های تجاری توسط شرکت کمبریج، تولید گردید. موفقیت ارزنده این گروه به دلیل اعمال ولتاژ مثبت بـه جمع کننده سیگنـال بـود که قدرت جمع آوری پرتوهای ثانویه را به خوبی فراهم می ساخت[۳].

در همین زمان بود که قدرت میکروسکوپ های الکترونی در بررسی گستره وسیعی از نمونه ها و در شاخه های متنوعی از علوم، شناخته شد. همانطور که گفته شد تکنولوژی پیچیده و گران قیمت تجهیزات میکروسکوپ های الکترونی روبشی، مشکلات تکنیکی موجود و عدم شناخت کافی از کاربردهای دستگاه مورد بحث منجر به ۳۰ سال تأخیر از اختراع تا تولید تجاری میکروسکوپ های الکترونی روبشی شد.

امروزه میکروسکوپ الکترونی روبشی به طور وسیعی در دانشگاه ها و مراکز صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند و تلاش های بسیاری در راستای استفاده آسانتر و کاربرد گسترده تر از نتایج، صورت گرفته است. به طوری که با به کارگیری قابلیت های نرم افزاری و گرافیکی، اطلاعات بسیار مفیدی در راستای مشخصه یابی مواد در زمینه علوم مختلف به دست می آید. در اینجا بهتر است قبل از آشنایی با اساس کار میکروسکوپ های الکترونی روبشی و قسمت های مختلف و کاربردهای آن در زمینه علوم مختلف و نانوتکنولوژی، نگاهی اجمالی به روند کار با میکروسکوپ الکترونی روبشی داشته باشیم.

---

[1] C.W.Oatley
[2] McMullan
[3] K.C.A.Smith

قبل از شروع به کار با یک میکروسکوپ الکترونی روبشی رایج، لازم است، ارزیابی اولیه ای بر روی نمونه انجام گیرد که طی آن موارد مختلفی از جمله بررسی صلب و جامد بودن، اتصال اجزا (پایداری نمونه درخلاء)، رسانایی الکتریکی وابعاد نمونه مورد توجه قرار می گیرد. در صورت جامد، صلب، رسانا و مناسب بودن ابعاد نمونه، می توان آن را به طور مستقیم توسط میکروسکوپ های الکترونی روبشی رایج بررسی نمود. میکروسکوپ های الکترونی روبشی رایج عموماً درخلاء کار می کنند لذا ابتدا دستور شکسته شدن خلاءِ دستگاه توسط نرم افزار آن داده می شود و پس از مدتی فشار داخلی به فشار محیط رسیده و در محفظه، باز می شود نمونه، روی پایه داخل محفظه دستگاه قرار داده شده و پس از تنظیم ارتفاع آن، در محفظه بسته شده و فرمان ایجاد خلاء در داخل محفظه، توسط نرم افزار، به دستگاه داده می شود. پس از رسیدن به خلاء مناسب و ارسال پیامی مبنی بر ایجاد شرایط مذکور از طریق نرم افزار، می توان کار بررسی را آغاز کرد این مرحله با روشن کردن (ایجاد) پرتو الکترونی انجام می شود که دستور آن توسط نرم افزار به دستگاه داده می شود. پس از آن با انجام عملیات روبش توسط پرتو الکترونی بر روی سطح نمونه، از سطح آن تصویری شبیه تصویر تلویزیون بر روی صفحه نمایشگر مشاهده می گردد. با جابجا کردن نمون توسط اهرم های دستی یا اتوماتیک می توان محل های مختلفی از سطح نمونه را مشاهده نمود. به علاوه با تغییر ابزار ثبت پرتو دستگاه، می توان تصاویری با اطلاعات مختلف از سطح نمونه تهیه نمود، مثلاً تصاویری از پستی بلندی سطح و یا تصاویری از چگونگی توزیع فازها در سطح تحت روبش نمونه. در شکل (۱-۱) یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی امروزی نشان داده شده است.

شکل۱-۱ دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی امروزی[۱].