

## نیمه هادی‌ها و ترانزیستور

نوشته :

غلامرضا مریدی

دپارتمان فیزیک دانشگاه بروئل - انگلستان

### بمناسبت بیست و پنجمین سالگرد اختراع ترانزیستور

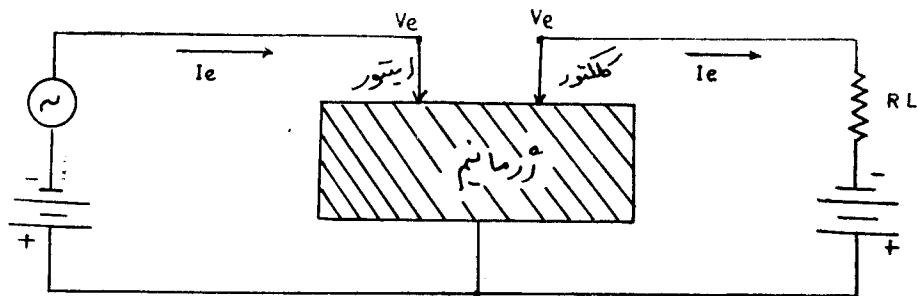
**چکیده :** در این مقاله راجع به نیمه هادیها و ترانزیستور کلیاتی مورد بحث قرار میگیرد که مطالعه آن برای کلیه علاقمندان مفید میباشد .

دفتر ثبت اختراعات درجهان شاهد درج اختراعات بسیار بوده است که زندگی بشر را بدین پایه از آسایش و جهان علم را بدین مرحله از پیشرفت رسانیده است . قدر بسیار میدانیم و برمخترعان آنها درج فراوان می نهیم ولی بجرأت میتوان گفت که تأثیر آنها در ایجاد این دگرگونی و تحول یکسان نبوده و پاره‌ای از آنها در مکانی برتر و مشخص تر قرار دارند ، و از آن جمله میتوان ترانزیستور را نام برد که تحول آخرین جهان علم و تکنولوژی بوده و دانشمندان همه در تأثیر شگرف و شگفت آور آن متفق القولند . بهمین مناسبت بیست و پنجمین سالگرد تولد و اختراع آن اخیراً با همکاری انستیتوی مهندسی رادیو (IRE) و انستیتوی مهندسی برق (IEE) بریتانیا، در لندن جشن گرفته شد که در آن ویلیام شاکلی William-Shockley یکی از مخترعان ترانزیستور و برنده جایزه نوبل در همین زمینه سخنرانی جالبی ایراد کرد که بسیار مورد توجه قرار گرفت . از طرفی در نمایشگاه فیزیک که از طرف انستیتوی فیزیک بریتانیا در فروردینماه گذشته در لندن برگزار شد اولین ترانزیستور ساخت بشر بنمایش گذارد شد ، و در برنامه سخنرانی و سمینارهای این نمایشگاه نخستین آن به ترانزیستور اختصاص یافت که توسط پروفیسور هوگارت Prof. Hogarth معاون انستیتوی فیزیک بریتانیا و رئیس دپارتمان فیزیک دانشگاه تکنولوژی بروئل، که خود از دانشمندان بنام در این زمینه بوده و کاشف اثر ترانزیستور در سولفور سرب ، تلرور سرب و سولنور سرب است ایراد گردید .

نگارنده فرصت را مغتنم شمرده تا گامی در راه شناسائی این اختراع بزرگ بردارد و به همین مناسبت مقاله حاضر تقدیم دوستداران و علاقمندان میگردد. در این مقاله ضمن اشاره به علم و تکنولوژی نیمه هادی ها، علل و عواملی را که منجر باختراع ترانزیستور گردید شرح داده و علاوه بر ترانزیستور و طرز کار آن، بدیگر وسایلی که از نیمه هادی ها ساخته میشوند اشاره خواهیم کرد.

بدون شک اختراع ترانزیستور در سال ۱۹۴۸ سرآغاز تحول جدی در علم فیزیک و صنعت الکترونیک است. نیمه هادی ها و اسباب های الکترونیکی که از آنها ساخته میشوند سالها در آزمایشگاه های تلفن بل (آمریکا) مورد مطالعه و تحقیق بودند. در سال ۱۹۴۰ گروهی از دانشمندان و محققین جهت مطالعات وسیع و دامنه دار در این زمینه تحت رهبری ویلیام شاکلی در آزمایشگاه های تلفن بل مشغول بکار شدند. باردین Bardeen و براتین (۱) Brattain اعضاء گروه مذکور، در مقاله ای که در ۲۰ ژوئن ۱۹۴۸ به نشریه علمی Physical Review ارسال داشتند عمل ترانزیستور را تشریح نمودند. این مقاله در شماره ۱۰ ژوئن همان سال در نشریه مذکور چاپ و منتشر گردید و در ۳ ژوئن نیز اختراع ترانزیستور رسماً از طرف شرکت آزمایشگاه های تلفن بل Bell Telephone Laboratories Incorporated اعلام گردید. بدین ترتیب علم فیزیک حالت جامد به مرحله نوینی وارد شد و در زندگی انسان نیز تسهیلات فراوان و غیر قابل وضعی بوجود آمد و رشته ای جدید در الکترونیک گشوده گردید.

اولین ترانزیستوری که توسط باردین و براتین ساخته شد عبارت بود از یک قطعه ژرمانیم (Ge) پلی کریستال نوع n بمقاومت ویژه حدود ۱ اهم سانتیمتر که دو کنتاکت نقطه ای بفاصله ۰.۰۰۵ ر. الی ۰.۲۰ ر. سانتیمتر روی آن تعبیه شده بود. شکل ۱ اولین ترانزیستوری را که توسط باردین و براتین ساخته شده نشان میدهد.



شکل (۱)

شاکلی (۲) بعدها حوادثی را که منجر بکشف ترانزیستور گردید تشریح نموده و توضیح داد که اختراع ترانزیستور یک اکتشاف تصادفی نبوده بلکه نتیجه مستقیمی است از تئوری حالت سطح Surface State

باردین (۳) که یکسال قبل از اختراع آن چاپ و منتشر گردیده بود. باردین و براتین (۴) نیز پس از اختراع ترانزیستور، جنبه‌های تئوری و عملی آنرا تشریح نمودند. در ژوئیه ۱۹۴۹ یک سری مقالات تحقیقی در زمینه ترانزیستور در نشریه *Bell System Technical Journal* منتشر گردید که در آنها اثر ترانزیستور مورد بحث قرار گرفت. از این سری نوشته‌ها مقاله کلاسیک شاکلی (۵) که در ژوئیه ۱۹۴۹ در صفحه ۴۳۵ جلد ۲۸ نشریه *Bell System Tech. J.* چاپ گردید حائز اهمیت فوق‌العاده‌ایست. در این مقاله شاکلی اتصال نوع P و n ژرمانیم را که تشکیل دیود میدهد مورد بحث قرار داده و تئوری اتصال (n-P) را پایه‌گذاری نمود و بعلاوه، محاسبات و تئوری ترانزیستوری را که از اتصال (P-n-P) و یا (n-P-n) نیمه‌هادی بوجود می‌آید، تشریح نمود. این نوع ترانزیستور برعکس ترانزیستور کنتاکت نقطه‌ای باردین و براتین (۱) که بر اساس خاصیت سطح نیمه‌هادی عمل می‌کند، بر پایه پدیدهای فیزیکی و الکترونیکی که در درون جسم نیمه‌هادی اتفاق می‌افتد، عمل نموده و بدین منظور کریستال واحد *Single Crystal* ژرمانیم برتری فراوانی نسبت به پلی کریستال آن نشان می‌دهد. اهمیت موضوع اخیر بحدیست که شاکلی (۲) می‌گوید «شاید بعد از اختراع ترانزیستور، در زمینه نیمه‌هادی‌ها هیچ کاری با اهمیت توسعه و تهیه کریستال واحد ژرمانیم نبوده‌است». اولین دیود (P-n) (۶) که در سال ۱۹۵۰ تهیه شد و همچنین اولین ترانزیستور اتصالی (۷) که در ۱۹۵۱ ساخته شد کاملاً مطابق تئوری شاکلی (۵) عمل نمودند.

اهمیت ترانزیستور اتصالی بیشتر در عملی بودن و ساده بودن آن از نقطه نظر صنعتی و اقتصادی است. اختراع ترانزیستور نشانه پیروزی کار دستجمعی و منظم، حتی در سطح بالاترین تحقیقات علمی است و این بزرگترین افتخاریست که نصیب شرکت آزمایشگاه‌های تلفن بل گردیده و مخترعین آن جان باردین *John Bardeen* و والتر براتین *Walter Brattain* و ویلیام شاکلی *William Shockley* جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۵۶ را مشترکاً بدست آوردند. مسلم است که این کشف بزرگ تنها نتیجه کار فیزیکدانان نبوده بلکه سالها کوشش و پژوهش متالورژیست‌ها و شیمیست‌ها نیز در زمینه تهیه مواد اولیه و کریستال واحد ژرمانیم سهم بسزائی داشته است.

کاشفین ترانزیستور نشان دادند که برخلاف بعضی ادعاها علم فیزیک بدو شعبه تئوری و عملی تقسیم نمیشود، بلکه یک تحلیل برجسته فیزیکی و طرح یک وسیله فیزیکی هر دو توأماً می‌توانند از یک قلم ناشی شده و در یک مقاله علمی نمایان گردند. کشف و توسعه ترانزیستور از طرفی دیگر علم مواد *Materials Science* را پایه‌گذاری نمود که هم‌اکنون بعنوان یک رشته علمی در اکثر دانشگاه‌های معتبر جهان تدریس میشود.

نیمه‌هادی‌ها یک سری از عناصر هستند که قابلیت هدایت الکتریکی آنها در فاصله  $10^{-9}$  تا  $10^3$  اهم برسانتیمتر، بین فلزات ( $10^4$  تا  $10^6$  اهم برسانتیمتر) و عایقها ( $10^{22}$  تا  $10^{30}$  اهم برسانتیمتر) قرار دارد. قابلیت هدایت الکتریکی نیمه‌هادی‌ها با افزایش درجه حرارت زیاد میشود درحالی‌که قابلیت هدایت

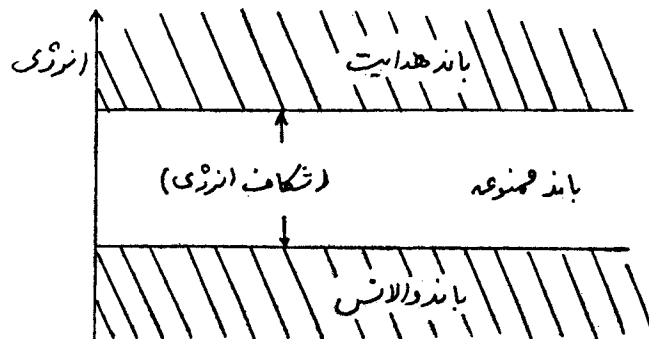
الکتریکی فلزات با ازدیاد درجه حرارت کاهش می‌یابد. خاصیت ازدیاد قابلیت هدایت الکتریکی با درجه حرارت که در مقایسه با فلزات جنبه غیرعادی دارد اولین بار توسط مایکل فارادی (۸) Micheal Faraday در سال ۱۸۸۲ در سولفور نقره کشف شد و بعدها در سال ۱۸۷۳ اسمیت (۹) Smith ضمن بررسی کابل زیرآبی تلگراف متوجه شد که مقاومتی که او برای منظور خاصی بکار می‌برده است با تابش نور تغییر پیدا می‌کند. این مقاومت که حدود چندین مگا اهم بوده است از سلنیم (Se) که یک نیمه هادی است ساخته شده بود. تغییر مقاومت و قابلیت هدایت الکتریکی نیمه هادی‌ها با تابش نور یکی از خواص برجسته آنهاست. خاصیت یکسوکننده گمی بعضی از جامدات در سال ۱۸۷۴ توسط بران (۱۰) Braun کشف گردید. این خاصیت نیز کاملاً با آنچه که قبلاً در فلزات مشاهده شده بود متفاوت بود. بدین معنی که این اجسام جریان الکتریسته را از یک سمت عبور داده و اگر جهت جریان تغییر کند آنرا از خود عبور نمی‌دهند. آداس Adams و دی (۱۱) Day در سال ۱۸۷۶ خاصیت یکسوکننده کنتاکت فلز و سلنیم (Se) را کشف کردند. در اولین روزهای اختراع رادیو، دیود جامدی که بعنوان دتکتور بکار میرفت عبارت بود از یک قطعه کریستال گلنا Galna (سولفور سرب PbS) و یک قطعه سیم بسیار ظریف که تماس نرمی با کریستال داشت. این سیم فلزی بسیار نازک اصطلاحاً «سبیل گربه» Cat's whisker نامیده میشد. در سال ۱۹۲۶ خاصیت یکسوکننده گمی کنتاکت مس و اکسید مس توسط گروندال (۱۲) Grondahl برای ولتاژهای کم، و تقریباً همزمان با آن در سال ۱۹۲۰ یکسوکننده فلز و سلنیم پرسر (۱۳) Presser برای جریانهای زیاد کشف و توسعه پیدا کرد و پس از آن یکسوکننده‌های اکسید مس و سلنیم و همچنین فتوسل‌های سلنیم بطور تجارتي تولید شدند ولی بهر حال پیشرفت کار بیشتر جنبه عملی و هنری داشت و کمتر توجهی با اتفاقات و پدیده‌های فیزیکی که درون آن رخ میدهد معطوف بود.

کشف الکترون در اواخر قرن گذشته توسط تامسون تکمان بزرگی در جهت کوشش برای تشریح هدایت الکتریکی جامدات بود و پس از آن بود که تئوری الکترون آزاد برای هدایت الکتریکی جامدات توسط درود (۱۴) Drude در سال ۱۹۰۰ و لورنتز (۱۵) Lorentz در سال ۱۹۰۰ پایه گذاری گردید. مطابق این تئوری عده زیادی از الکترون‌های فلز آزاد هستند و این الکترون‌ها می‌توانند تحت اثر میدان نیروئی مثلاً میدان الکتریکی از سمتی بسمت دیگر حرکت کنند. حرکت الکترون‌ها در یک فلز تحت اثر میدان الکتریکی شباهت بحرکت ملکولهای گاز در یک ظرف بسته دارد و از اینجاست که درود و لورنتز تئوری خود را بر مبنای نظریه سینتیک گازها قرار دارند. در سال ۱۸۷۹ هال (۱۶) Hall اثر گالوانومنیتهیک را که امروزه با اسم خود او «اثر هال» معروف است کشف نمود.

ضریب حال با استفاده از تئوری الکترون آزاد بصورت:

$$R = \frac{-1}{n_f |e|}$$

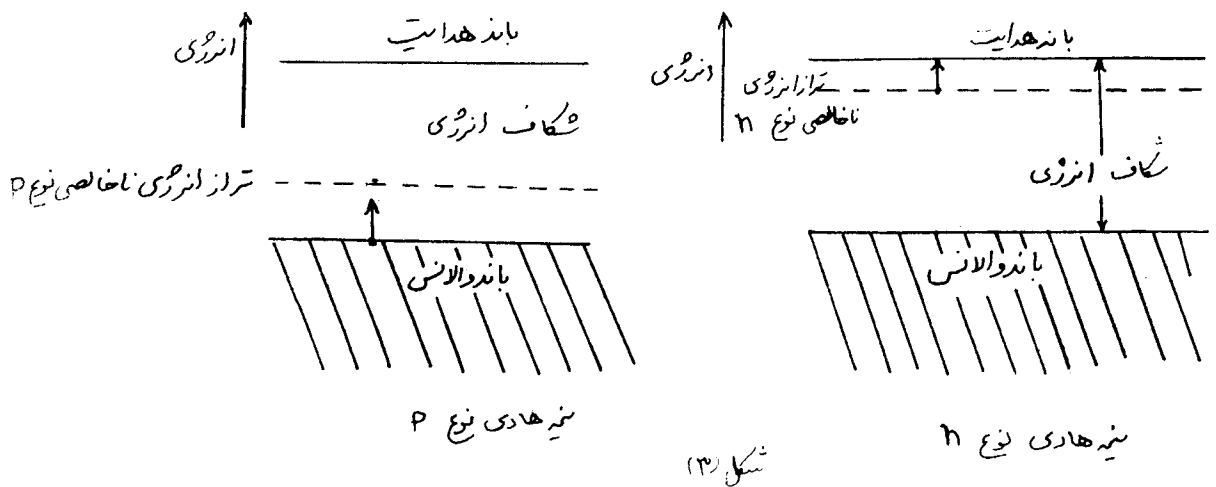
بیان میشود که در آن  $|e|$  قدرمطلق بار الکتریکی الکترون و  $n_f$  غلظت الکترون های آزاد است. بطوریکه از رابطه فوق پیداست ضریب هال  $R$  کمیت منفی است. پس از کشف اثر هال، در بعضی جامدات ضریب هال مثبت مشاهده گردید که کاملاً برخلاف انتظار و غیرعادی بود. این خاصیت غیرعادی تا سال ۱۹۳۱ بدرستی تعبیر نگردید تا اینکه ویلسون (۱۷) (۱۸) Wilson مفهوم مکانیک کوانتیکی «حفره» Hole را که دارای بار الکتریکی با علامت مثبت است بعنوان شریک الکترون در مکانیسم هدایت الکتریکی جامدات وارد فیزیک نمود. و بدین ترتیب ویلسون علم فیزیک مدرن نیمه هادی ها را پایه گذاری کرد. بطور کلی علم فیزیک حالت جامد پس از پیدایش مکانیک کوانتیک توسط پلانک Planck، شرودینگر Schrodinger هایزنبرگ Heisenberg، دیراک Dirac و دیگران با تئوری های سمرفلد (۱۹) Sommerfeld، بلاخ (۲۰) Bloch و ویلسون (۱۷) (۱۸) در مورد خواص و رفتار الکترون در فلزات و نیمه هادی ها وارد مرحله نوینی گردید. این تئوری ها بمنزله چهارچوبی برای فیزیک حالت جامد مدرن بشمار میروند و حتی هم اکنون نیز مفاهیم اساسی فیزیک حالت جامد را تشکیل میدهند. مطابق تئوری باند انرژی بلاخ (۲۰)، الکترونهاى آزاد در یک جسم جامد در سطوح آزاد انرژی توزیع شده اند. این سطوح آزاد انرژی توسط مناطق ممنوعه از هم دیگر جدا میگردند. سطحی که دارای انرژی بیشتری است «باند هدایت» و سطح انرژی که دارای انرژی کمتری است «باند والانس» نامیده میشود. حداقل این دو باند انرژی را «شکاف انرژی» Energy gap گویند. شکل ۲ مدل باند انرژی بلاخ را بطور شماتیک برای الکترونهاى آزاد جسم جامد نشان میدهد.



شکل (۲)

برای اینکه الکترونی بتواند در عمل هدایت الکتریکی شرکت کند بایستی مقداری انرژی گرفته و از باند والانس به باند هدایت منتقل شود. ویلسون با بکار بردن مدل بلاخ و معرفی نمودن مفهوم «حفره» در نیمه هادی ها نشان داد که عناصری با شکاف انرژی حدود یک الکترون ولت می توانند در ردیف عناصر نیمه هادی قرار گیرند. توزیع آماری الکترون ها و حفره ها در یک نیمه هادی توسط ویلسون محاسبه گردید و وی نشان داد که چگونه غلظت الکترون ها و حفره ها در یک نیمه هادی با درجه حرارت تغییر میکند و بچه

نعوی در قابلیت هدایت الکتریکی نیمه هادی مؤثر است . بعلاوه او نشان داد که وجود ناخالصی در یک نیمه هادی می تواند تراز انرژی معینی را در شکاف انرژی ایجاد نماید و چگونه ناخالصی ها می توانند غلظت الکترونها و حفره ها را در نیمه هادی کنترل نمایند . بعضی از ناخالصی ها اگر یونیزه شوند الکترونی به باند هدایت فرستاده و در نتیجه مقدار الکترون های آزاد در نیمه هادی بیش از حفره ها خواهد بود ( نیمه هادی نوع n ) و بعضی دیگر الکترونی از باند والانس جذب نموده و حفره ای پشت سر تولید خواهند کرد که در آن صورت تعداد حفره ها بیش از الکترون ها خواهد بود ( نیمه هادی نوع P ) . شکل ۳ تراز انرژی دو نوع ناخالصی مذکور و نیمه هادی های نوع n و P را نشان میدهد .



ویلسون با استفاده از آمار فرمی Fermi - دیراک نشان داد که حاصل ضرب غلظت الکترونها و حفره ها در یک نیمه هادی در درجه حرارت معین مقادیر ثابت در یک نیمه هادی کاملاً خالص و عاری از هر گونه ناخالصی غلظت الکترونهای آزاد و حفره ها برابرند . زیرا هر الکترونی که از باند والانس به باند هدایت منتقل شود یک حفره در پشت سر خود در باند والانس بجای خواهد گذاشت . از آنجائیکه همزیستی الکترون و حفره در نیمه هادی ها شناخته شده بود خاصیت هدایت الکتریکی در اثر تابش نور نیز که قبلاً در سلنیم کشف شده بود و نیز ضریب هال مثبت بدینوسیله تعبیر گردید . در اثر تابش نور به یک نیمه هادی، جفت الکترون و حفره در آن ایجاد میگردد که در نتیجه غلظت الکترون و حفره در نیمه هادی بالا رفته و قابلیت هدایت الکتریکی آن فزونی می یابد .

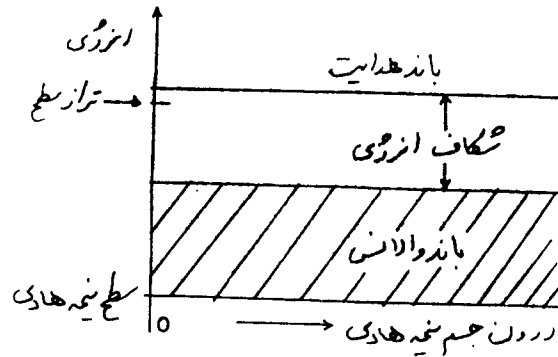
در اوایل سال ۱۹۳۰ خاصیت یکسو کنندگی و فتوولتائیک بعنوان پدیده هائی که مربوط بسطح جدائی نیمه هادی و فلزات تلقی گردید . این پدیده ها ناشی از اختلاف تابع کار Work function فلز و نیمه هادیست .

بدین معنی که الکترون‌های جسم جامد با تابع کار کمتر بطرف جسم دیگر که دارای تابع بزرگ‌تریست جریان پیدا میکنند و نتیجتاً دو منطقه « بار فضائی » Space Charge با بار مساوی و علامت مخالف در طرفین سطح تماس دو جسم بوجود می‌آید. این عمل تا آنجا که تعادل حرارتی بوجود آید ادامه پیدا میکند و وقتی که سد پتانسیل کافی بوسیله بارهای انباشته شده فضائی بوجود آمد مانع از جریان دیگر الکترون‌ها میگردد. بزرگی سد پتانسیل که پتانسیل کنتاکت نامیده میشود برابر است با اختلاف تابع کار دو جسم جامد. در کنتاکت فلز و نیمه‌های، منطقه بار فضائی بیشتر و عمیق‌تر در سمت نیمه‌هادی نفوذ میکند و این بدانجهت است که غلظت بارهای الکتریکی نیمه‌هادی (الکترون‌ها و حفره‌ها) خیلی کمتر از آن فلزات و بهمین ترتیب بیشترین مقدار پتانسیل کنتاکت در سمت نیمه‌هادی سطح تماس افت می‌کند.

در سال ۱۹۲۹ شاتکی (۲۱) Schottky در آلمان، مات (۲۲) Mott در انگلستان و داویدوف (۲۳) Davidov در شوروی مستقلانه تئوری براساس فوق برای کنتاکت یکسوکننده فلز - نیمه‌هادی بنا نهادند. مطابق این تئوری در سمت نیمه‌هادی کنتاکت، منطقه‌ای که خالی از اکثریت حامل‌های بار الکتریکی است بوجود می‌آید (منظور از حامل‌های الکتریکی، الکترون‌ها و حفره‌ها هستند). در یک نیمه‌هادی نوع n همچون منطقه تهی وقتی بوجود می‌آید که تابع کار نیمه‌هادی از تابع کار فلزی که با آن در تماس است کمتر باشد. ولتاژی که به یکسوکننده اعمال میشود به پتانسیل کنتاکت سوار (مدوله) میگردد و درجهتی آنرا پائین آورده و درجهت دیگر بالا میبرد. درحالیکه پتانسیل کنتاکت پائین می‌آید مقاومت یکسوکننده کاهش می‌یابد و درحالت دیگر که پتانسیل کنتاکت بالا می‌رود مقاومت آن افزایش می‌یابد. و بدین ترتیب مقاومت سیستم در دو جهت متقابل دو مقدار کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهد. در مورد نیمه‌هادی نوع P نیز مسأله مشابه حالت بالا است. تئوری شاتکی - مات - داویدوف درپیش‌بینی جنبه‌های اولیه عمل یکسوکردن و همچنین درفهم مسأله سطح تماس فلز و نیمه‌هادی اثر فراوانی داشته است. این تئوری بخصوص در دوران جنگ دوم در زمینه تکنولوژی تهیه یکسوکننده‌ها برای سیستم‌های رادار و سایر سیستم‌های فرکانس بالا فوق‌العاده مفید واقع گردید.

سد شاتکی از اختلاف تابع کار فلز و نیمه‌هادی ناشی میشود و بنابراین درجه یکسوکننده‌گی وابسته به پلاریته و بزرگی پتانسیل کنتاکت است. بعنوان مثال، فلزات با تابع کار بزرگتر سد پتانسیل بزرگتری را در نیمه‌هادی نوع n بوجود می‌آورند که منجر به یکسوکننده‌گی بهتری خواهد شد. در تئوری فوق بعدها نقائصی مشاهده گردید و مسائلی پیش آمد که تئوری شاتکی - مات - داویدوف قادر به پاسخگویی نبود. بنزر (۲۴) Benzer در سال ۱۹۴۷ نشان داد که کنتاکت بین دو قطعه ژرمانیم مشابه نوع n و P مقاومت زیادی را در هر دو جهت پلاریته نشان می‌دهد، گرچه پتانسیل کنتاکت خیلی کوچک و نزدیک صفر است. بدین معنی که در هر دو طرف کنتاکت سد پتانسیل با دو پلاریته مخالف بوجود آمده است. باردین (۳) در

سال ۱۹۴۷ سد پتانسیل را باین صورت توضیح داد که سد پتانسیل از تراز سطح ناشی میشود نه از پتانسیل کنتاکت بین نیمه هادی و فلز . تراز سطح عبارتست از یک تراز انرژی که در شکاف انرژی قرار دارد و فقط مربوط به سطح نیمه هادیست . شکل ۴ تراز سطح را در یک نیمه هادی نشان می دهد .



شکل (۴)

در سال ۱۹۳۲ تام (۲۵) (۲۶) Tomm در شوروی بر مبنای کاملاً تئوریک نشان داد که سطوح انرژی در سطح کریستال بایست با آنچه که در درون کریستال است متفاوت باشد . و این بدانجهت است که در سطح کریستال ابعاد جسم محدود میشود و خاصیت پریودی بودن شبکه که تئوری بلاخ بر آن پایه گذاری گردیده است سست میگردد . بی مناسبت نیست یادآوری کنیم که تز دکترای شاکلی (۲۷) نیز که در سال ۱۹۲۹ نوشته شد به همین مسأله تراز سطح اختصاص یافت ولی بهرحال نقش مهمی که این ترازهای انرژی در سطح نیمه هادی ایفا میکنند ناشناخته بودند . تئوری تراز سطح باردین (۲) (۱۹۴۷) باین صورت بیان میشود که الکترونهای درون نیمه هادی وسیله تراز سطح Surface State (که در سطح نیمه هادی قرار دارند) بدام میافتند و پشت سر ، بار مثبت (حفره) بجای میگذارند بطوریکه خنثی بودن جسم بهرحال برقرار میماند . بدین ترتیب یک منطقه بار فضائی در نزدیکی سطح نیمه هادی بوجود میآید که خود سد پتانسیلی را نیز در سطح ظاهر می کند . اگر غلظت ترازهای سطح به حد کافی باشد سد پتانسیل بوجود آمده حتی پس از آنکه فلزی با نیمه هادی تماس پیدا کرد تغییر فوق العاده کمی می نماید .

باردین نشان داد که غلظت ترازهای سطح چگونه ارتفاع سد پتانسیل را بالا و پائین می برد و در یک کریستال ژرمانیم نوع n بعلت همین ترازهای سطح یک لایه نوع P بضمخامت  $10^{-4}$  سانتیمتر می تواند در سطح آن بوجود آید . بنابراین یکسو کننده ای که از ژرمانیم مذکور ساخته میشود در واقع عبارتست از اتصال ژرمانیم نوع n با نوع P آن که در سطح بوجود آمده است . پس از آنکه باردین تئوری تراز سطح خود را بیان داشت کوشش های زیادی بخصوص در آزمایشگاههای تلفن بل در زمینه پدیده های فیزیکی که در سطح نیمه هادی ها اتفاق می افتد بعمل آمد . بیشتر این کوشش ها بسمت توسعه تئوری تراز سطح



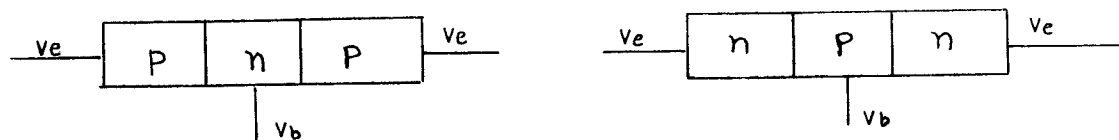
از یک طرف و بررسی مشخصات فیزیکی یکسوکننده ژرمانیم با کنتاکت نقطه‌ای از طرف دیگر معطوف گشت و در ضمن همین پژوهشها بود که باردین و براتین نشان دادند که اگر دو کنتاکت نقطه‌ای فلز روی ژرمانیم (شکل ۱) بطور مناسب بایس شوند بهره ولتاژ و حتی جریان نیز مشاهده میشود. و بدین ترتیب بود که عمل ترانزیستور وسیله باردین و براتین (۱) کشف گردید. (کلمه ترانزیستور transistor متشکل از قسمت اول و آخر دو کلمه resistor و transfer است).

وجود تراز سطح عملاً توسط شاکلی و پیرسون (۲۸) Pearson نشان داده شد و حتی آنها توانستند غلظت این ترازها را با آزمایش مستقیم تخمین بزنند. بدینسان دریک نیمه‌هادی مثلاً نوع n، قابلیت هدایت الکتریکی ممکن است از نوع n بنوع P در سطح جسم تغییر کند که در اینصورت یک لایه که «بار فضائی برگشته» نامیده میشود در سطح نیمه‌هادی تشکیل خواهد شد. دریک مقاله تحقیقاتی کلاسیک، باردین و براتین نشان دادند که همین لایه بار فضائی برگشته است که حاکم بر خاصیت یکسوکننده‌گی دیود ژرمانیم با کنتاکت نقطه‌ای است.

پروسسهای تزریق، ترکیب و تولید حامل‌های بار الکتریکی (الکترون و حفره) نقش عمده‌ای در عمل ترانزیستور ایفا میکنند. در سال ۱۹۴۹ شاکلی (۵) تئوری ترانزیستوری را که از اتصال به ترتیب نوع P-n-P و یا n-P-n (شکل ۵) بوجود می‌آید پایه‌گذاری نمود. شاکلی در این تئوری پروسسهای تزریق و ترکیب حامل‌های بار الکتریکی را بکار گرفت و رابطه دیود را برای اتصال P-n بدست آورد.

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{eV}{kT} \right) - 1 \right]$$

که در آن I شدت جریان، V ولتاژ،  $I_0$  شدت جریان اشباع، e بار الکتریکی واحد، T درجه حرارت مطلق و K ثابت بولتزمن Boltzmann است.



P-n-P ترانزیستور

n-p-n ترانزیستور

(شکل ۵)

ناگفته نماند که در سال ۱۹۳۸ داویدوف (۲۹) در شوروی مقاله‌ای در زمینه اتصال P و n منتشر کرد و رابطه دیود را نیز بدست آورد ولی مقداری که او برای جریان اشباع  $I_0$  بدست آورد با آنچه که در

عمل دیده می‌شد متفاوت بود. اشکال کار داویدوف در این بود که او تزریق حامل‌های بار الکتریکی اقلیت (الکترون در نیمه‌هادی نوع P و حفره در نیمه‌هادی نوع n) را نادیده گرفته بود. این پروسس بطور قاطع در کارهای اولیه فیزیک ترانزیستور توسط شاکلی، باردین و براتین مطرح گردیده بود. موقعی که عمل تزریق حامل‌های بار الکتریکی به نیمه‌هادی انجام می‌گیرد، الکترون‌ها و حفره‌ها بطور یکسان وارد آن می‌گردند. اگر نیمه‌هادی بفرض نوع P باشد در حالت تعادل ترمودینامیکی تعداد حفره‌ها خیلی بیشتر از الکترون‌هاست ( $P \gg n$ ) و در ضمن عمل تزریق غلظت حفره‌ها تغییر چندانی نمی‌کند در حالیکه غلظت الکترون‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. به همین ترتیب در مورد نیمه‌هادی نوع n در موقع تزریق حامل‌ها غلظت الکترون‌ها تغییر چشم‌گیری نمی‌کند در حالیکه غلظت حفره‌ها بمقدار زیادی افزونی می‌یابد. اینجاست که عبارت «تزریق حامل‌های اقلیت» برای اولین بار معرفی شد و «عمر حامل‌های اقلیت» *minority carrier lifetime* و «درازای نفوذ» *diffusion length* تعریف گردیدند. عمر حامل‌های اقلیت مدت زمانی است که مقدار حامل‌ها پس از آنکه عمل تزریق قطع شد باندازه  $\frac{1}{e}$  (عدد نپر است) تعداد اولیه می‌گردد و درازای نفوذ مقدار فاصله‌ایست که یک حامل آزاد پس از تزریق می‌تواند در زمان یک عمر در نیمه‌هادی طی کند. این دو کمیت اخیر «عمر حامل» و «درازای نفوذ» در طرح ترانزیستور نقش بسیار عمده‌ای دارند. سه ترمینال ترانزیستور امیتر *Emitter*، کلکتور *Collector* و بیس (پایه) *Base* نامیده می‌شوند. عبارت امیتر ناشی از تزریق الکترون یا حفره بداخل جسم نیمه‌هادی و تشابه مختصری با کاتد لامپ الکترونیکی دارد.

بی‌مناسبت نیست تذکر دهیم که در سالهای اولیه اختراع ترانزیستور، نیمه‌هادی که برای تهیه ترانزیستور با اتصال *P-n-P* یا *n-P-n* و ترانزیستور کنتاکت نقطه‌ای بکار میرفت فقط ژرمانیم بود. گرچه عمل ترانزیستور در سلیکن (Si) نیز پیش‌بینی می‌شد ولی تا سال ۱۹۵۴ که سلیکن خالص و مناسب برای ترانزیستور تهیه نشده بود سلیکن برای ساخت ترانزیستور بکار نمی‌رفت. پس از آن، با توجه باینکه ژرمانیم عنصریست کمیاب، پیشنهادات جدی جهت تهیه ترانزیستور از سلیکن مطرح گردید. در آن موقع تولید سالانه ژرمانیم در دنیا فقط ۶ کیلوگرم بود و مسلماً این مقدار تولید جوابگوی میابونها ترانزیستور و دیود مورد نیاز صنایع الکترونیک نبود. از طرف دیگر سلیکن بوفور در طبیعت یافت می‌شود. شن معمولی دارای درصد زیادی سلیکن است. با توجه بمسائل فوق تکنولوژی تهیه کریستال واحد سلیکن توسعه فراوانی یافت و مطالعات وسیعی روی این نیمه‌هادی بعمل آمد بطوریکه امروزه مصرف سلیکن برای تهیه ترانزیستور و سایر اسباب‌های نیمه‌هادی بیش از ژرمانیم و نیمه‌هادی‌های دیگر است.

در سال ۱۹۵۰ بن‌بری *Banbury*، گبی *Gebbie* و هوگارت (۳۰) *Hogarth* عمل ترانزیستور

را در کریستال طبیعی سولفور سرب (PbS) گزارش دادند و در ۱۹۰۱ و ۱۹۰۲ (هوگارت (۳۱) (۳۲) عمل ترانزیستور را در سولفور سرب (Pb Se) و تلور سرب (Pb Te) نشان داد. از سال ۱۹۰۲ در آلمان مطالعات پرمیانه‌ای در مورد خواص نیمه‌هادی‌هایی که از ترکیب عناصر گروه III و V جدول پریودی عناصر بوجود می‌آیند توسط ولکر (۳۳) Welker و همکارانش آغاز شد. آنها نشان دادند که ترکیبات عناصر گروه III مانند آلومینیوم (Al) گالیم (Ga) و اندیم (In) با عناصر گروه V مانند فسفر (P)، آرسنیک (As) و آنتیموان (Sb) خواص مشابهی با عناصر گروه IV مثل ژرمانیم و سلین دارند. گرچه این ترکیبات نتوانسته‌اند بعنوان ترانزیستور مورد استفاده قرار گیرند ولی اسباب‌های دیگری از آنها تهیه گردیدند که درخور اهمیت فراوانی هستند.

توسعه نیمه‌هادی‌های غیر کریستالی (آمورف) نیز از چند سال اخیر آغاز شده است و گرچه اثر سویچ از حالت امیدانسی زیاد بحالت امیدانسی کم در این نوع نیمه‌هادی‌ها که از جنس شیشه‌اند توسط اوشینسکی (۳۴) Ovshinsky شناخته شده است معه‌ذا این سری بزرگ از نیمه‌هادی‌ها بطور کامل بررسی نشده و هنوز مراحل تکامل و توسعه خود را طی میکنند.

تهیه مواد اولیه ترانزیستور و بخصوص تکنولوژی سلین در دهه ۱۹۰۰ الی ۱۹۶۰ همزمان با تئوری ترانزیستور توسعه یافت. برای تهیه ترانزیستور جهت فرکانس‌های بالا و قدرت زیاد و بعنوان سویچ، تکنیک‌های متفاوتی بکار برده شد و این تکنیک‌ها روز بروز گسترش یافت. امروزه ترانزیستور کاربرد فراوانی در زندگی انسان یافته است. از رادیوی کوچک ترانزیستوری و تلویزیون تا کامپیوتر، از ماهواره و سفائن فضائی تا سیستم‌های مخابرات نوین همه شامل مدارات پیچیده ترانزیستوری هستند. اهمیت ترانزیستور بحدیست که تا کنون حدود ۳ جلد کتاب در زمینه فیزیک، طراحی، کاربرد و تکنولوژی آن برشته‌ی تحریر درآمده است و بیش از چند هزار مقاله تحقیقی در نشریات علمی جهان جای گرفته است. در واقع میشود گفت که کشف ترانزیستور سنگ زیربنای تاریخ تحقیقات و تکنولوژی نیمه‌هادی‌هاست و کوشش فوق‌العاده‌ای که در هردو زمینه فوق در بیست و پنج سال اخیر بعمل آمده است. نشان دهنده اهمیت فوق‌العاده آن در تمدن امروزی انسان است. در سال ۱۹۶۰ ترانزیستور فلز-اکسید (عایق) - نیمه‌هادی توسط اتالا Attala و کنگ (۳۵) Kahng بر اساس نظریه شاکلی و پیپرسون (۲۸) ساخته شد. این نوع ترانزیستور بطور اختصار MOSFET (مخفف Oxide-Semiconductor-Effect-Transistor) و یا IGFET (مخفف Insulate-Gate-Field-Effect-Transistor) نامیده میشود و در آن فقط یک نوع از حامل‌های بار الکتریکی (الکترون یا حفره) در عمل ترانسپورت شرکت میکنند (در حالیکه در ترانزیستور اتصال P-n-P یا n-P-n الکترون و حفره هردو در عمل ترانسپورت شرکت دارند) و

اکثر سلیکن بعنوان نیمه هادی و اکسید آن بعنوان عایق بکار می‌رود. این نوع ترانزیستور برای فرکانس‌های بالا تا ۱۰ GHz بسیار مناسب می‌باشد.

دیود تونلی Tunnel Diode در سال ۱۹۰۸ توسط لئو ایساکسکی (۲۶) Leo Esaki در ژاپن تهیه گردید. این دیود که ایساکسکی نیز خوانده می‌شود عبارتست از اتصال P و n ژرمانیم که هر دو نوع دارای مقدار زیادی ناخالص بیش از حد معمول است (نیمه هادی degenerate). ایساکسکی در مقاله معروف خود که در نشریه Physical Review چاپ و منتشر گردیده عمل این دیود را بر اساس مفهوم مکانیک کوانتومی «تونل زدن» بیان داشت. آنچه که در دیود ایساکسکی بیش از همه جلب توجه می‌کند اینست که منحنی مشخصه جریان و ولتاژ آن مقاومت منفی نشان می‌دهد. این دیود بعنوان سوئیچ سریع و نیز تقویت کننده مایکروویو در مدارات الکترونیکی مورد استعمال دارد. در سال ۱۹۵۲ ایزز Ebers (۳۷) فکر ترانزیستوری را که از چهار لایه P-n-P-n بوجود می‌آید بمیان کشید. در سال ۱۹۵۶ مول Moll (۳۸) و همکارانش اولین ترانزیستور P-n-P-n را تهیه کرده و اصول کار آنرا تدوین نمودند. این ترانزیستور که SCR (مخفف Silicon Controlled Rectifier) و یا تایرستور Thyristor (بروزن لامپ تایراترون Thyatron) نامیده می‌شود دارای خاصیت سوئیچ است، بدین معنی که می‌تواند از حالت امپدانس زیاد (حالت خاموشی) بحالت امپدانس کم (حالت روشنی) و برعکس تبدیل گردد. تایرستورها بیشتر برای کنترل قدرت بکار می‌روند و در مواقع با اختراع آنها مهندسی قدرت تحول تازه‌ای یافته است. یک تایرستور معمولی می‌تواند تا ۱۰۰۰ آمپر جریان را عبور داده و فشار بیش از ۱۰۰۰ ولت را نیز تحمل کند. دیود اتصال P-n شکلی (e) بعنوان یک سوکند کننده جریان متناوب، تنظیم کننده ولتاژ، مقاومت متغیر Varistor، و راکتانس متغیر Varactor در مدارات الکترونیکی بکار می‌رود.

غیر از اسباب‌های الکترونیکی که از نیمه هادی‌های اتصال ساخته می‌شوند اسباب‌های اپتوالکترونیکی-Optoelectronic Devices نیز حائز اهمیت زیادی هستند. این نوع اسباب‌های نیمه هادی انرژی نوری را به الکتریکی و یا انرژی الکتریکی را به نور تبدیل می‌نمایند. مهمترین این سری اسباب‌ها لیزر نیمه هادی است. فکر اشعه لیزر که در ۱۹۵۴ توسط تاونز (۳۹) Townes و همکارانش در آمریکا بمیان آمده بود مسبب شد که اولین لیزر جامد توسط سایمن (۴۰) Maiman در سال ۱۹۶۰ با استفاده از یاقوت تهیه گردد و یکسال بعد در ۱۹۶۱ اولین لیزر گازی نیز با استفاده از مخلوط گاز هلیوم و نئون توسط علی جوان (۴۱) (دانشمند ایرانی مقیم آمریکا) و همکارانش تهیه گردد. در فاصله سالهای ۱۹۵۷-۱۹۶۱ نی‌شیزاوا (۴۲) Nishizawa در ژاپن و Basov (۴۳) در شوروی مستقلانه طرح لیزری را که از اتصال نیمه هادی P و n بوجود می‌آید تهیه نمودند و در سال ۱۹۶۲ اولین لیزر نیمه هادی از اتصال P-n نیمه هادی Ga(As<sub>1-n</sub>P<sub>n</sub>) ساخته شد.

مهمترین نوع اسباب‌های فوتولتائیک که انرژی نورانی را به الکتریکی تبدیل می‌کند باطری‌های خورشیدی هستند، این نوع باطری‌ها در حال حاضر برای تهیه قدرت در ماهواره‌های مصنوعی و سفاین فضائی مورد استفاده‌اند. طرح باطری‌های خورشیدی که ابتدا در سال ۱۹۵۴ توسط پیرسون (۴۴) و همکارانش توسعه یافت یک اتصال نیمه‌هادی نوع P با n است که از سلیکن و یا نیمه‌هادی‌های دیگر مانند ارسنورگالیم (GaAs) و یا سولفورکادمیم (CdS) ساخته می‌شود. لایه نیمه‌هادی نیز از اتصال (P-n) نیمه‌هادی Ga(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) ساخته می‌شود که نور مرئی تولید می‌کند. از این سری اسباب‌های نیمه‌هادی انواع فتودیودها نیز قابل ذکر هستند.

علاوه بر اسباب‌هایی که در بالا به آنها اشاره گردید اسباب‌هایی دیگری نیز هستند که در آنها بجای اتصال n-P فقط نیمه‌هادی نوع n یا P به تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین این سری اسباب‌ها دیود گان (۴۰) (۴۶) Gunn است. گان در ۱۹۶۳ ضمن مطالعه روی ارسنورگالیم (GaAs) و فسفورانندیم (InP) مشاهده کرد که پس از اعمال میدان الکتریکی حدود چند هزار ولت برسانتیمتر قانون اهم نقص گردیده و نیمه‌هادی مقاومت دیفرانسیل منفی نشان می‌دهد. دیود گان بعنوان نوسان‌ساز و نیز تقویت‌کننده مایکروویو مورد استفاده است.

پس از کشف ترانزیستور بنظر می‌رسد که عناصر الکترونیکی جامد مانند ترانزیستور، خازن و مقاومت وغیره می‌توانند یکجا و در یک تکه سلیکن ساخته شوند. در سال ۱۹۵۹ کیلیبی (۴۷) Kilby تکنیک اولین مدار مولتی ویراتور جامدی را که از یک تکه سلیکن ساخته شده بود تشریح نمود. این مولتی ویراتور شامل ۲ ترانزیستور، ۸ مقاومت و ۲ خازن بود. بدینسان ساخت مدارات Integrated circuits آغاز شد و تا با روز که از ظریف‌ترین و پیچیده‌ترین تکنیک‌ها برخوردار است.

خواص مکانیکی و پیزوالکتریک نیمه‌هادی‌ها بخصوص در زمینه تولید تقویت امواج اولتراسونیک از اهمیت خاصی برخوردار است و اسباب‌هایی نیز بهمین منظور از ارسنورگالیم و سولفورکادمیم تهیه شده‌اند. توسعه و کشف مواد نیمه‌هادی جدید از طرفی و ابداع اسباب‌های الکترونیکی، اهنوالکترونیکی و مکانیکی از آنها از طرف دیگر با سرعت هرچه تمامتر ادامه دارد و هنوز این میدان وسیع علم و تکنیک در درانتظار تئوری‌ها، تکنیک‌ها و ایده‌های جدید است. افتخار جاویدان بحق از آن سه برنده جایزه نوبل فیزیک که سهم بزرگی در تکامل فیزیک، مهندسی و الکترونیک و حتی بهبود کیفیت زندگی انسان داشته‌اند.

## فهرست مراجع

- 1) Bardeen, J; and Brattain, W. H; Phys. Rev. 64 (1948) 230.
- 2) Shockley, W; The Age of Electronics, ed. Overhage, C. F. J; P. 135, McGraw Hill, Co; N. Y. 1962.
- 3) Bardeen, J. Phys. Rev. 71 (1947) 717.
- 4) Bardeen, J; and Brattain, W. H; Phys. Rev. 75 (1949) 1209.
- 5) Shockley, W; Bell System Tech. J. 28 (1949) 435.
- 6) Teal, G. K; Sparks, M; and Buehler, E; Phys. Rev. 81 (1951) 637.
- 7) Shockley, W; Sparks, M; and Teal, G. K; Phys. Rev. 83 (1951) 151.
- 8) Faraday, M; Diaries, Note 317 (1833).
- 9) Smith, W; Nature. 7 (1873) 303 .
- 10) Braun, F; Pogg. Ann. 153 (1874) 556.
- 11) Adams, W. G; and Day, R. E; Proc. Roy. Soc; London, 25 (1876) 113 .
- 12) Grondahl, L. O; Science 64 (1926) 306 .
- 13) Presser, E; Funkbastler (1925) 558 ;
- 14) Hall, E. H; Amer. J. Matte. 2 (1879) 287 .
- 15) Drude, P; Ann. Physik 1 (1900) 566; 3 (1900) 369 .
- 16) Lorentz, H. A; The lectures of Lorentz under the title of «The Theory of Electrons» .  
Dover, Second Ed. 1952.
- 17) Wilson, A. H; Proc. Roy. Soc; London A 133 (1931) 458.
- 18) Wilson, A. H; Proc. Roy. Soc; London A 134 (1931) 277 .
- 19) Sommerfeld, A; Z. Physik 47 (1928) 1, 43 .
- 20) Bloch, F; Z. Physik 52 (1928) 555 .
- 21) Schottky, W; Z. Physik 113 (1939) 367 .
- 22) Mott, N. F; Proc. Roy. Soc; London, A 171 (1939) 27 .
- 23) Davidov, B; J. Phys. (ussr) 1 (1939) 167.

- 24) Benzer, S; Phys. Rev. 71 (1947) 141 .
- 25) Tamm, I. E; Z. Phys. 76 (1932) 849.
- 26) Tamm, I. E; Phys. Z. Sowjet. 1 (1932) 733 .
- 27) Shockley, W; Phys. Rev. 56 (1939) 317 .
- 28) Shockley, W; and Pearson, G. L; Phys. Rev. 74 (1948) 232 .
- 29) Davidov, B; Tech. Phys. (USSR) 5 (1938) 87 :
- 30) Banbury, P. C; Gebbie, H. A; and Hogarth, C. A; Semiconducting materials, London, Butterworths Scientific publications (1951) P. 78.
- 31) Hogarth, C. A; Proc. Phys. Soc. London B, 64 (1951) 822.
- 32) Hogarth, C. A; Proc. Phys. Soc. London B, 65 (1952) 958.
- 33) Welker, H; Z. Naturforsch 79, 744.
- 34) Ovshinsky, S. R; Electronics 32 (1959) 76.
- 35) Kahng, D; and Atalla, M. M; IRE Solid-state Device Research Conference, Carnegie Inst. of Tech; Pittsburg, Penn. (1960) .
- 36) Esaki, L; Phys. Rev. 109 (1958) 603 .
- 37) Ebers, J. J; Proc. IRE, 40 (1952) 1361 .
- 38) Moll, J. L; Tanenbaum, M; Goldey, J. M; and Holonyak, N; Proc. IRE, 44 (1956) 1147.
- 39) Gordon, J. P; Zeiger, H. J; and Towns, C. H; Phys. Rev. 95 (1954) 282.
- 40) Maiman, T. H; Nature, 187 (1960) 493 .
- 41) Javan, A; Bennett, W. B; Jr. and Herriott, D. R; Phys. Rev. Letters, 6 (1961) 106.
- 42) Nishizawa J. I; and Watanabe, Y; Electronics, P. 117 (Dec. 1967) .
- 43) Basov, N. G; Krokhin, O. N; and Popov, Y. M; Soviet Phys. Uspekhi 3 (1961) 7 .
- 44) Chapin, D. M; Fuller, C. S; and Pearson, G. L; J. Appl. Phys. 25 (1954) 676 .
- 45) Gunn, J. B; Solid State Comm. 1 (1963) 88 .
- 46) Gunn, J. B; IBM J. of Res. Develop. 8 (1964) 141 .
- 47) Kilby, J. S; Electronics 32 (Aug 1959) 110 .