

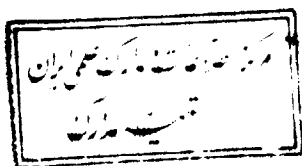


۲۴۱۶۴

**پیوندهاى فلز - نیمه هادى ،  
ویژگیها و کاربردهاى آنها**

۲۴۱۶۴

۱۳۷۸ / ۱۴ / ۲۰



**عنوان پروژه:** پیوندهای فلز- نیمه هادی، ویژگیها و کاربردهای آنها

**پروژه کارشناسی ارشد:** سید مهدی بیضایی

**استاد راهنما:** دکتر سید حسین کشمیری

**استاد مشاور:** دکتر ناصر شاه طهماسبی

**هیات داوران:** دکتر محمد مهدی اسکویی تبریزی (دانشگاه صنعتی شریف)،

دکتر ناصر شاه طهماسبی (دانشگاه فردوسی مشهد)،

دکتر ناصر تجبر (دانشگاه فردوسی مشهد)،

دکتر سید حسین کشمیری (دانشگاه فردوسی مشهد).

**ارائه در تاریخ:** دهم آبانماه هزار و سیصد هفتاد و چهار

**محل انجام پروژه:** دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، آزمایشگاه تحقیقاتی

میکروالکترونیک

1745/2

## **تقدیم به :**

پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی  
برایم مشوقی مهربان و معلّمی دلسوز بوده‌اند.

## پیشگفتار:

باتوجه به پیشرفتهای روزافزون تکنولوژی نیمه‌هادیها و مدارهای تجمعی اهمیت اتصالات فلز-نیمه‌هادی روزبه‌روز بیشتر می‌شود. باوجود سابقه طولانی تحقیق در زمینه پیوندهای فلز-نیمه‌هادی، مطالعات زیادی در دهه اخیر صورت گرفته است که نشان‌دهنده اهمیت کاربردی آنها در تکنولوژی جدید قطعات نیمه‌هادی می‌باشد. در این پروژه سعی شده تمام نظریه‌های اصلی، در مورد پیوندهای فلز-نیمه‌هادی باتوجه به روند تاریخی آنها ارائه شده و نقایص هر نظریه مشخص شود.

به‌طور کلی در سه فصل اول فیزیک پیوندهای سد شاتکی که خاصیت یکسوسازی دارند به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. در فصل چهارم اهمیت و نقش حالت‌های سطحی با بیانی دقیق‌تر برای پیوندگام‌های فلز-نیمه‌هادی و فلز-عایق-نیمه‌هادی بررسی شده است. در فصل پنجم مواد مورد استفاده در پیوندهای فلز-نیمه‌هادی و مراحل ساخت دیو‌های سد شاتکی آورده شده است. در فصل ششم کاربردهای متنوع پیوندهای فلز-نیمه‌هادی سد شاتکی شرح داده شده و در فصل هفتم نتایج کارهای انجام شده در این پروژه

ارائه شده است.

## سپاسگذاری:

از اساتید محترم، آقایان دکتر محمد مهدی اسکویی تبریزی، دکتر ناصر شاه‌طهماسبی، دکتر ناصر تجبر و دکتر سید حسین کشمیری که زحمت مطالعه این پایان‌نامه و حضور در جلسه دفاعیه را پذیرفتند سپاسگذارم. از استاد عزیزم جناب آقای دکتر سید حسین کشمیری که برای من معلمی دلسوز و متعهد و مشوقی مهربان بودند کمال تشکر و سپاسگذاری را دارم و از خداوند متعال، موفقیت و بهروزی ایشان را در تمام زمینه‌های علمی و تحقیقاتی و رسیدن به اهداف عالی‌شان را خواستارم.

از دوستان عزیزم، آقایان محمد مهدی باقری محقق، سعید صمدپور و حاجی‌علی که در تمام مراحل این پروژه مرا یاری کردند کمال تشکر را دارم.

## باسمه تعالی

شماره صفحه	فهرست مطالب
۱	<b>فصل اول: پیوند فلز - نیمه هادی سدّ شاتکی</b>
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۱-۲ تابع کار و اثر شاتکی
۶	۱-۳ منشاء ارتفاع سدّ
۶	۱-۳-۱ تنوری شاتکی - موت پیوند فلز نیمه هادی ایده آل
۱۴	۱-۳-۲ اصلاحات تنوری شاتکی
۱۹	۱-۴ تقسیم بندی فصل مشترکهای فلز - نیمه هادی
۲۰	۱-۴-۱ فصل مشترکهای واکنشی
۲۱	۱-۴-۲ فصل مشترک با حضور لایه بین رویه ای و حالات سطحی
۲۵	۱-۴-۳ فصل مشترکهای تمیز فاقد لایه میانی
۲۹	<b>فصل دوم: اندازه گیری ارتفاع سدّ</b>
۳۰	۲-۱ روشهای اندازه گیری ارتفاع سدّ
۳۰	۲-۱-۱ روش C-V
۳۱	۲-۱-۲ روش I-V
۳۲	۲-۱-۳ روش فتوالکتریک
۳۲	۲-۲ نتایج اندازه گیری ارتفاع سدّ
۳۲	۲-۲-۱ ارتفاع سدّ سطوح تمیز شده
۳۴	۲-۲-۲ ارتفاع سدّ سطوح تمیز شده در خلاء
۳۵	۲-۲-۳ نتیجه گیری
۳۷	۲-۳ مشخصه ظرفیت - ولتاژ

- ۳۷ ۲-۳-۱ میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل در ناحیه تهی
- ۴۱ ۲-۳-۲ ظرفیت ناحیه تهی سد شاتکی ایده آل
- ۴۴ ۲-۳-۳ اثر حاملهای اقلیت
- ۴۵ ۲-۳-۴ اثر لایه بین رویه ای
- ۴۶ ۲-۳-۵ اثر تله های عمیق

### فصل سوم: سازوکار عبور جریان از پیوندگاه فلز نیمه هادی

- ۴۸
- ۴۹ ۳-۱ سازوکارهای عبور جریان
- ۴۹ ۳-۱-۱ پخش و گسیل گرمایونی
- ۵۵ ۳-۱-۲ تونل زنی از میان سد
- ۵۹ ۳-۱-۳ تولید و باز ترکیب حاملها در ناحیه تهی
- ۶۰ ۳-۱-۴ تزریق حامل اقلیت
- ۶۲ ۳-۲ مشخصه های جریان مستقیم
- ۶۶ ۳-۳ مشخصه های جریان معکوس
- ۶۸ ۳-۴ رفتار حالت گذرا
- ۷۰ ۳-۵ پیوند اهمی

### فصل چهارم: حالات سطحی و فصل مشترک

- ۷۳
- ۷۴ ۴-۱ اثر حالات سطحی و مستقل بودن خواص یکسوسازی از تابع کار
- ۷۸ ۴-۲ نقش حالات سطحی در ارتفاع سد
- ۸۲ ۴-۳ توزیع حالات سطحی و فصل مشترک
- ۸۴ ۴-۴ فازهای سوّم و نقش حالات سطحی در آنها
- ۸۵ ۴-۵ محاسبه چگالی حالت های سطحی

### فصل پنجم: مواد و مراحل ساخت دیوهای سد شاتکی

- ۸۸
- ۸۹ ۵-۱ مقدمه
- ۹۰ ۵-۲ انتخاب مواد نیمه هادی



۹۴	۵-۳ سیستمهای فلز - نیمه‌هادی
۹۴	۵-۳-۱ سیستمهای فلز - سیلیکون
۹۹	۵-۳-۲ سیستمهای فلز - گالیم آرسنید
۱۰۱	۵-۳-۳ سیستمهای فلزی چند لایه‌ای
۱۰۲	۵-۴ تکنولوژی ساخت
۱۰۲	۵-۴-۱ آماده‌سازی سطح نیمه‌هادی
۱۰۲	۵-۴-۲ جایگذاری لایه دی‌الکتریک
۱۰۵	۵-۴-۳ تشکیل پیوند ایمی
۱۱۰	۵-۴-۴ لیتوگرافی
۱۱۲	۵-۴-۵ روشهای جایگذاری فلز
۱۱۴	۵-۴-۵-۱ تبخیر حرارتی و ستون الکترون
۱۱۸	۵-۴-۵-۲ اسپاترینگ
۱۲۳	۵-۴-۶ غیر فعال‌سازی

### فصل ششم: کاربردهای پیوندهای سد شاتکی

۱۲۴	
۱۲۵	۶-۱ مقدمه
۱۲۶	۶-۲ جذب نور در نیمه‌هادی
۱۲۸	۶-۳ اثر فتوولتایی و بازده سلولی خورشیدی
۱۳۱	۶-۴ گزینش مواد و نکات مربوط به طراحی
۱۳۱	۶-۴-۱ ملاحظات طیفی
۱۳۲	۶-۴-۲ ملاحظات مربوط به مقاومت‌های سری
۱۳۴	۶-۴-۳ بازتاب سطحی
۱۳۴	۶-۴-۴ تکنولوژیهای مختلف و ملاحظات مربوط به هزینه
۱۳۵	۶-۵ سلولهای خورشیدی MS و MIS سد شاتکی
۱۳۷	۶-۶ سلولهای خورشیدی SIS سد شاتکی
۱۳۸	۶-۶-۱ سلولهای خورشیدی ITO/n-Si به روش ستون الکترون
۱۴۰	۶-۶-۲ سلولهای خورشیدی ITO/Si به روش اسپاترینگ
۱۴۱	۶-۶-۳ سلولهای خورشیدی ITO/SiO <sub>2</sub> /Si به روش اسپری پایرولیزیز
۱۴۳	۶-۷ دیودهای نورگسیل MIS LED و SIS سد شاتکی

- ۱۴۴ ۶-۸ آشکار سازها و دیودهای نوری سد شاتکی  
 ۱۴۶ ۶-۹ ترانزیستور کران بند سد شاتکی

## فصل هفتم: نتایج کارهای انجام شده

- ۱۴۵  
 ۱۵۰ ۷-۱ مقدمه  
 ۱۵۲ ۷-۲ بررسی پیوندهای فلزات مختلف با سیلیکون نوع n و p  
 ۱۵۲ ۷-۲-۱ آماده سازی سطح سیلیکون  
 ۱۵۳ ۷-۲-۲ ایجاد پیوند اهمی در پشت و یفرهای سیلیکون نوع n و p  
 ۱۵۴ ۷-۲-۳ تهیه ماسک و برش زنی و یفرها  
 ۱۵۵ ۷-۲-۴ جایگذاری فلزات مختلف  
 ۱۵۷ ۷-۲-۵ اندازه گیری مشخصه I-V و محاسبه ارتفاع سد  
 ۱۶۵ ۷-۲-۶ نتیجه گیری  
 ۱۶۷ ۷-۳ ساخت سلولهای خورشیدی Au/SiO<sub>۲</sub>/n-Si  
 ۱۶۷ ۷-۳-۱ مراحل مختلف ساخت  
 ۱۶۸ ۷-۳-۲ اندازه گیری I-V و نتایج حاصله  
 ۱۷۰ ۷-۴ ساخت سلولهای خورشیدی SIS  
 ۱۷۱ ۷-۴-۱ سلولهای خورشیدی ITO/SiO<sub>۲</sub>/Si  
 ۱۷۱ ۷-۴-۱-۱ آماده سازی سطح و یفر سیلیکون  
 ۱۷۱ ۷-۴-۱-۲ اکسیداسیون  
 ۱۷۱ ۷-۴-۱-۳ جایگذاری لایه هادی شفاف ITO  
 ۱۷۴ ۷-۴-۱-۴ مراحل دیگر  
 ۱۷۵ ۷-۴-۱-۵ تعیین ویژگیهای سلولهای ITO/SiO<sub>۲</sub>/n-Si  
 ۱۷۸ ۷-۴-۲ ساخت سلولهای خورشیدی In<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>/SiO<sub>۲</sub>/p-Si  
 ۱۷۸ ۷-۴-۲-۱ فرایندهای ساخت سلولهای خورشیدی In<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>/SiO<sub>۲</sub>/Si  
 ۱۷۹ ۷-۴-۲-۲ ویژگیهای سلولهای بلوری In<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>/SiO<sub>۲</sub>/p-Si  
 ۱۷۹ ۷-۴-۲-۳ ویژگیهای سلولهای چند بلوری In<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>/SiO<sub>۲</sub>/p-Si  
 ۱۸۰ ۷-۴-۳ نتیجه گیری

مراجع

## پیوند فلز - نیمه هادی سد شاتکی

- ۱-۱ مقدمه
- ۱-۲ تابع کار و اثر شاتکی
- ۱-۳ منشاء ارتفاع سد
  - ۱-۳-۱ تئوری شاتکی - موت پیوند فلز نیمه هادی ایده آل
  - ۱-۳-۲ اصلاحات تئوری شاتکی
- ۱-۴ تقسیم بندی فصل مشترکهای فلز - نیمه هادی
  - ۱-۴-۱ فصل مشترکهای واکنشی
  - ۱-۴-۲ فصل مشترک با حضور لایه بین رویه ای و حالات سطحی
  - ۱-۴-۳ فصل مشترکهای تمیز فاقد لایه میانی

## پیوند فلز - نیمه هادی سد شاتکی

### ۱-۱ مقدمه

پیوند فلز - نیمه هادی که خاصیت یکسوسازی داشته باشد به نام پیوند سد شاتکی نامیده می شود. شاتکی اولین کسی است که مدلی برای تشکیل سد پتانسیل در محل پیوندگاه فلز - نیمه هادی ارائه کرد. دانش ما در مورد پیوندهای فلز - نیمه هادی به یک قرن قبل برمی گردد، اما با وجود این سابقه طولانی، هنوز نحوه عملکرد و رفتار این پیوندها به خوبی فهمیده نشده و بعضی از مفاهیم به صورت نادرست مورد استفاده قرار می گیرند. البته پیشرفتهای اساسی و مهمی، در سالهای اخیر به وقوع پیوسته است.

دیودهای اتصال نقطه‌ای که در آنها یک سیم فلزی به شکل خاصی به سطح نیمه هادی پیوند داده شده، مدت‌ها به عنوان آشکارساز امواج رادیویی استفاده می شدند. این دیودها در دهه ۱۹۲۰ به وسیله دیودهای خلاء که کارایی بهتری دارند، جایگزین شدند. اما در طی جنگ جهانی دوم، دیود اتصال نقطه‌ای با کاربرد جدیدی در آشکارسازهای میکروموج تراز پائین و مبدل فرکانس دوباره مورد استفاده قرار گرفتند. سپس نوع دیگری از اتصال فلز - نیمه هادی که از جایگذاری لایه نازک فلزی روی سطح تمیز نیمه هادی ایجاد شد با دیودهای اتصال نقطه‌ای جایگزین گردید. این اتصالات ویژگیهای مطلوبتری داشتند و در حقیقت دانش کنونی ما مدیون مطالعات انجام شده

روی رفتار چنین پیوندهای فلز - نیمه هادی می باشد. اولین گام مؤثر در درک فرآیند یکسوسازی فلز - نیمه هادی توسط شاتکی برداشته شد. شاتکی و موت<sup>(۱)</sup> نحوه تشکیل سد و مدل‌هایی برای محاسبه ارتفاع سد را ارائه کردند [۴ و ۵]. سپس گام بزرگ دیگری توسط بت<sup>(۲)</sup> با ارائه تئوری گسیل گرمایونی در رابطه با سازوکار عبور جریان از سد برداشته شد [۶]. در دهه ۱۹۶۰ تحقیقات وسیعی روی دیویدهای سد شاتکی انجام شد که بیشتر در جهت کاربرد آنها در تکنولوژی نیمه هادیها بود. از دهه ۱۹۷۰ به بعد تحقیقات در این زمینه در دو جهت پیشرفت کرد که یکی در جهت کارهای قبلی و استفاده از تجارب بدست آمده در صنعت و تولید تجارتي قطعات نیمه هادی و دیگری در جهت کاملتر کردن تئوری فصل مشترک فلز - نیمه هادی بود. شرح جامعی از این کارها و تئوری پیوندهای فلز - نیمه هادی توسط هنیش<sup>(۳)</sup> ارائه شده است [۱ و ۷].

در این فصل ابتدا تابع کار و اثر شاتکی را معرفی کرده و سپس با توجه به روند تاریخی، در بخش سوم، برای پی بردن به منشاء ارتفاع سد، تئوری شاتکی - موت را در مورد پیوند فلز - نیمه هادی ایده آل بررسی می کنیم. بعد اصلاحات تئوری شاتکی و همچنین فصل مشترکهای مختلف فلز - نیمه هادی و نقش آنها در سد پتانسیل را مورد بحث و بررسی قرار خواهیم داد.

## ۲-۱ تابع کار و اثر شاتکی

اختلاف انرژی بین تراز خلاء و تراز انرژی فرمی، تابع کار فلز نامیده می شود. به عبارت دقیقتر تابع کار یک فلز،  $\phi_m$ ، به عنوان کمترین انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز و رسانیدن آن به فضای آزاد در صفر مطلق تعریف شده است. تابع کار فلزات  $\phi_m$  بسته به نوع فلز بین ۲ تا ۶ الکترون ولت تغییر می کند، مقادیر تابع کار، عموماً به شکل سطح و آلودگی سطحی خیلی

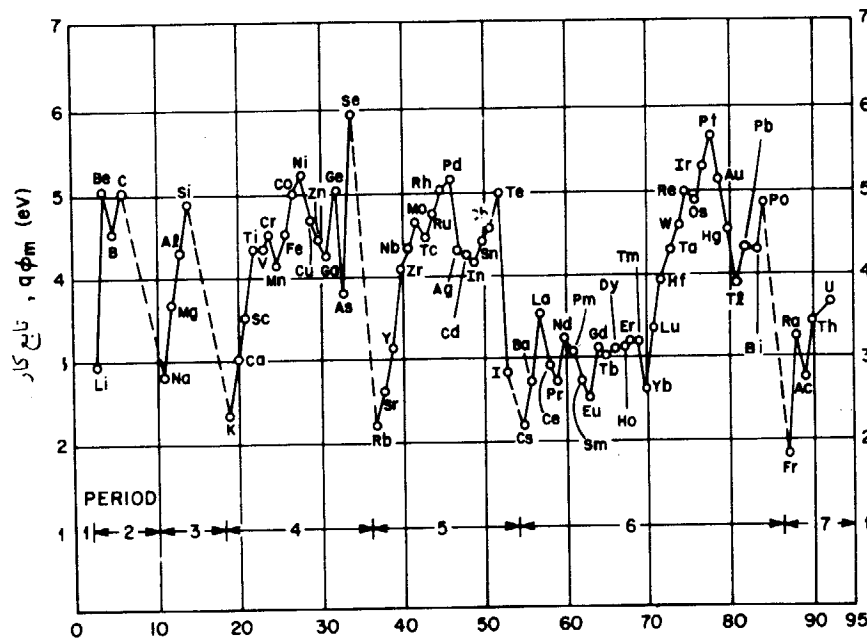
1. Schottky and Mott

2. Bethe

3. Henisch

وابسته هستند. در شکل ۱-۱ مقادیر تابع کار برای بعضی از عناصر داده شده است [۲]. در ضمیمه

(۱) هم مقادیر معتبری برای توابع کار عناصر مختلف با سطوح تمیز جمع آوری شده است [۳].



عدد اتمی

شکل ۱-۱ تابع کار فلز با سطح فیلی تمیز بر حسب عدد اتمی رسم شده است و از شکل

ماهیت تناوبی توابع کار در هر گروه جدول تناوبی مشخص است [۲].

احتمال کندن یک الکترون از سطح فلز به مؤلفه عمودی سرعت الکترون نسبت به سطح فلز

وابسته است. کمترین انرژی جنبشی برای کندن الکترون از سطح از رابطه زیر داده می شود.

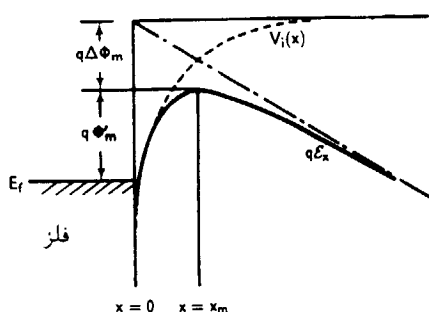
$$\frac{1}{2} (m_1 v_1^2) \geq q \phi_m$$

که  $v_1$  سرعت عمود بر سطح الکترون، و  $m$  جرم الکترون آزاد می باشد. اگر فلز در میدان الکتریکی

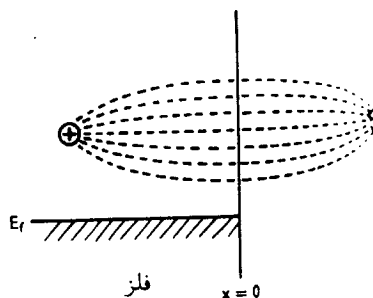
خارجی قرار داشته باشد، هنگام کندن الکترون از سطح فلز، آنچه که اثر شاتکی یا اثر پائین آوری

بار تصویری نامیده می شود، ظاهر می گردد. برای فهمیدن اثر شاتکی، نمودار نوار انرژی نشان داده

شده در شکل ۱-۲ را در نظر می گیریم.



(الف)



(ب)

شکل ۱-۲ اثر شاتکی در فصل مشترک فلز - فلز در حضور یک میدان الکتریکی خارجی:

الف) نمودار در میدان خارجی  $\epsilon_x$ ، پتانسیل تصویری  $V_i$ ، پتانسیل پائین آوری تصویر  $\Delta\phi_m$ .

ب) بار تصویری القاء شده در داخل فلز.

وقتی که فلز در یک میدان الکتریکی خارجی قرار داشته باشد، الکترونهايي که از سطح فلز جدا می‌شوند، دو نیروی خارجی را احساس می‌کنند؛ یکی نیروی بار تصویری مثبت القاء شده در فلز و دیگری نیروی لورنتس میدان الکتریکی خارجی می‌باشد. نیروی جاذبه‌ای بارهای تصویری مثبت تمایل دارند الکترونهايي کنده شده را جذب کنند، که از رابطه زیر مقدار آن بدست می‌آید.

$$F_i = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x^2} \quad (1-1)$$

انرژی پتانسیل این نیروی بار تصویری به صورت زیر است

$$V_i(x) = -\int F_i dx \quad (1-2)$$

و انرژی پتانسیل مربوط به میدان الکتریکی خارجی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$V_a(x) = -q\epsilon_x x \quad (1-3)$$