آزمایشگاه فیزیک پیشرفته

مطالعه پیوندگاه P-N

اهدف آزمایش:

آزمایش ۱: محاسبه جریان اشباع معکوس .I و ثابت η

آزمایش ۲: تعین ثابت دمایی ولتاژ پیوندگاه و محاسبه شکاف باند انرژی

آزمایش ۳: مطالعه ظرفیت خازن پیوندگاه و تغییرات آن نسبت با بایاس معکوس

مقدمه

نیمه‌هادی‌ها مواد مهمی از گروه جامدات‌اند که اکنون کاربردهای زیادی در حوزه تحقیقات شیمی، فیزیک و صنعت پیدا کرده‌اند. این مواد که هدایت الکتریکی بین فلزات و عایق ها دارند ساخت کاتالیزورها، قطعات الکترونیکی ،سلول های خورشیدی لیزرهای نیمه‌هادی، دیودهای نور گسیل و .... بکار می روند. نیمه‌هادی‌ها از سال ۱۹۲۰ مورد مطالعه قرار گرفته‌اندو Bardeen و Brattain در سال ۱۹٤۰ اولین ترانزیستورها را ساختند. پس از آن به‌طور وسیع نیمه‌هادی‌ها در صنایع الکترونیک و نهایتاً در تهیه مدارهای مجتمع (IC) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخی از ویژگی‌های مهم به شرح زیرند:

- کاهش مقاومت الکتریکی با افزایش دما
- وجود شکاف انرژی

یکی از خصوصیت‌های مهم تغییر خواص الکتریکی از جمله تعداد و نوع حامل های جریان و تحرک آنها با افزودن ناخالصی ها است که آنها را از نظر نوع حامل های اکثریت به دو نوع pو n تبدیل می کند.هم چنین خواص در پیوندگاه p-n آنرا مناسب جهت استفاده در یکسوسازها می کند که در این آزمایش این اثرات بررسی می‌شود.

نیمه‌هادی‌های نوع p و n

یک نیمه‌هادی خالص حاوی تعداد مساوی از حامل‌های بار یعنی الکترون‌ها و حفره‌ها می‌باشد. چون در اغلب کاربردها به موادی که یک نوع حامل بار اکثریت دارد نیاز است می توان با وارد کردن ناخالصی‌های مناسب این شرایط را امکان‌پذیر کرد. به عنوان مثال، اگر سیلسیم Si را با ناخالصی As آلایش دهیم الکترونها اکثریت ً حاملهای بار خواهند بود و مقاومت الکتریکی کاهش می یابد. اتمهای پنج ظرفیتی آرسنیک به طور تصادفی جایگزین بعضی از نقاط شبکه سیلسیم می‌شوند و چهار پیوند کووالانسی با نزدیک‌ترین همسایه‌ها برقرار می‌کنند. در حالیکه الکترون پنجم از ناخالصی دور شده و جزئی ازالترون های نوار رسانش می‌شود. چون ناخالصی آرسنیک الکترون به نوار رسانش داده است، این ناخالصی دهنده نامیده می‌شود. توجه کنید که الکترونهای موجود در باند رسانش بدون تولید حفره بوجود آمده‌اند. الکترون در اطراف اتم دهنده‌ی یونیزه شده، شبیه اتم هیدروژن است با این تفاوت که می‌توان فرض کرد ثابت دی‌الکتریک شبکه به مقدار ε افزایش یافته است. بنابر طبق مدل بوهر انرژی پیوندی مربوط به حالت پایه دهنده چنین است:

$$E_d = +\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{m_e}{m_0}\right)\left[\frac{em_0}{2(4\pi\varepsilon_0\eta)^2}\right]$$

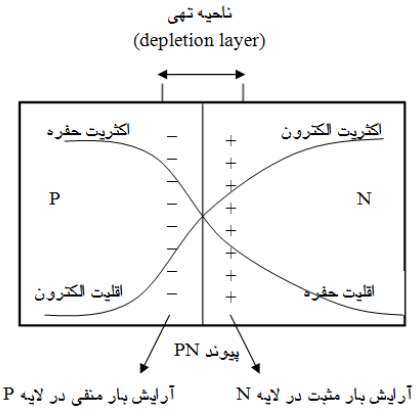
در اینجا m_o جرم الکترون در حالت آزاد و m_e جرم الکترون در ماده است. انرژی پیوندی مربوط به دهنده به اندازهٔ ضریب

$$+\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{m_e}{m_0}\right)$$

که غالباً کمتر از ۱ است، کاهش یافته است. به عنوان مثال برای $\varepsilon = 10$ و $\frac{m_e}{m_0} = 0.2$ انرژی دهنده در حدود $\frac{1}{500}$ انرژی الکترون در اتم هیدروژن است. در نوع دیگر نیمه‌هادی، حامل‌های اکثریت بار حفره‌ها هستند و مقاومت الکتریکی آنها توسط حفره‌ها تنظیم می‌شود. مانند سیلسیمی که با یک ناخالصی سه ظرفیتی مانند گالیم آلایش یافته است. این گونه‌ها را پذیرنده یا نوع p می‌نامند. حفره‌ها در اینجا به دام ناخالصی‌هایی که به طور منفی یونیزه شده‌اند، می‌افتند و مانند نوع‌دهنده انرژی پیوندی حفره مقدار E_d است.

پیوندگاه p-n

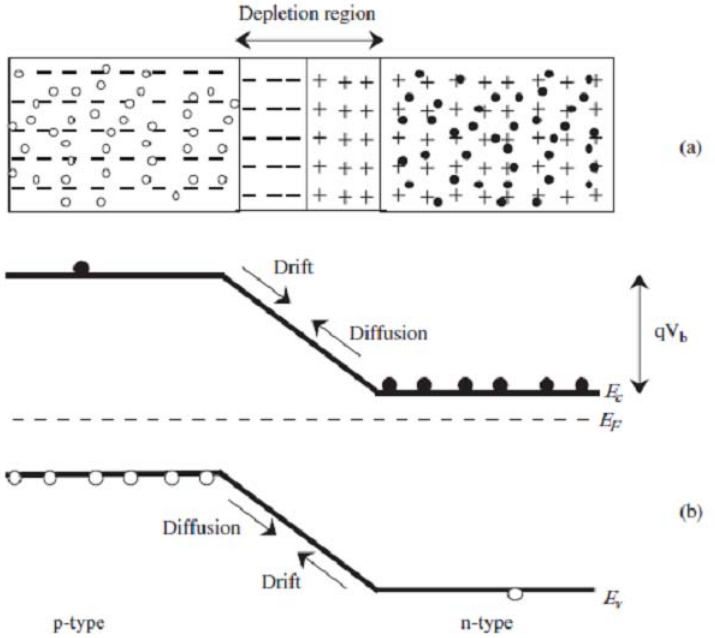
حال اگر دو گونه‌های n و p به هم متصل شوند پیوندگاه p-n را تشکیل می‌دهند. تراکم دهنده‌ها N_d و پذیرنده‌ها N_a اند که در پیوندگاه تیز مطابق شکل (۱) نمایش شده است.



شکل ۱: پیوندگاه p-n

اختلاف پتانسیل که حتی در حالت تعادل بوجود می‌آید به پتانسیل تماس مشهور است و مقدار آن معمولاً بین ۱ تا ۰/۱ ولت متغیر است. چون در ناحیه n تراکم الکترون‌ها و در ناحیه p تراکم حفره‌ها زیادند، الکترون‌ها به سمت ناحیه p و همچنین حفره‌ها به سمت ناحیه n نفوذ می‌کنند. نتیجه این نفوذ کاهش تراکم حامل‌های آزاد در دو ناحیه و ایجاد یک خازن در دو طرف پیوندگاه می‌شود. شکل ۲ پیوندگاه p-n را از دیدگاه نوار انرژی نشان می‌دهد. در واقع حضور مقدار بار منفی خالص

در ناحیه p باعث افزایش پتانسیل این ناحیه نسبت به ناحیه n می‌شود. با داشتن پتانسیل تماس φ اختلاف انـرژی در ناحیـه برابر با $e\varphi$ می‌باشد.

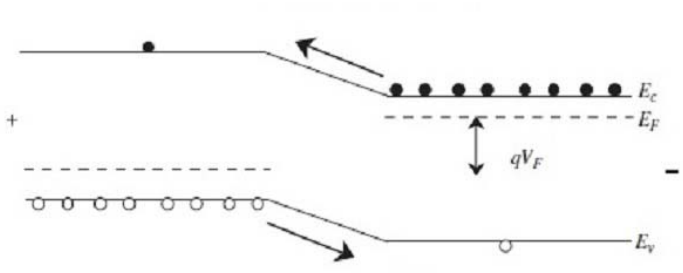


شکل ۲: پتانسیل تماس

چگالی جریان الکترونی و حفره‌ای به سمت اتصال، در حالت تعادل برابرند یعنی

$$j_{nr} = j_{ng}$$
$$j_{pr} = j_{pg}$$

حال با این توضیحات می‌توانیم خاصیت یکسوسازی را مورد بررسی قرار دهیم. فرض کنید پتانسیل خارجی V_o را به محـل پیوندگاه اعمال کنیم. در مرحله اول فرض کنید ناحیه p به پتانسیل مثبت و ناحیه n به پتانسیل منفی متصل شـده اسـت. ایـن نوع اتصال به پتانسیل را بایاس مستقیم (forward Bias) می‌نامند و در شکل ۳ نشان داده شده اسـت. ناحیـه n بـه انـدازه eV_o به سمت بالا تغییر مکان می‌دهد. اکنون اثر این ولتاژ را بر روی چگالی جریان‌های موجود بررسی می‌کنیم.



شکل ۳: بایاس مستقیم و دیاگرام نوار انرژی

چگالی جریان تولیدی از ولتاژ بایاس مستقل است، زیرا در حضور ولتاژ باز هم تعدادی الکترون به پایین سد پتانسیل منحرف می‌شوند پس

$$j_{ng} = j_{ngo}$$

چگالی جریان بازترکیب به اندازه فاکتور $e^{\frac{eV_0}{KT}}$ افزایش می‌یابد یعنی

$$j_{nr} = j_{nro} e^{\frac{ev_0}{K_B T}}$$

بنابراین جریان الکترونی خالص ایجاد شده از سمت راست به سمت چپ برابر است با:

$$I_n = e\left(J_{nr} - J_{ng}\right) = ej_{ngo}\left(e^{eV_0/K_B T} - 1\right)$$

همچنین جریان حفره‌های خالص ایجاد شده از سمت راست به سمت چپ برابر است با:

$$I_p = e\left(J_{pr} - j_{pg}\right) = ej_{pgo}\left(e^{eV_0/K_B T} - 1\right)$$

جریان کل ایجاد شده در اثر بایاس رو به جلو برابر است با:

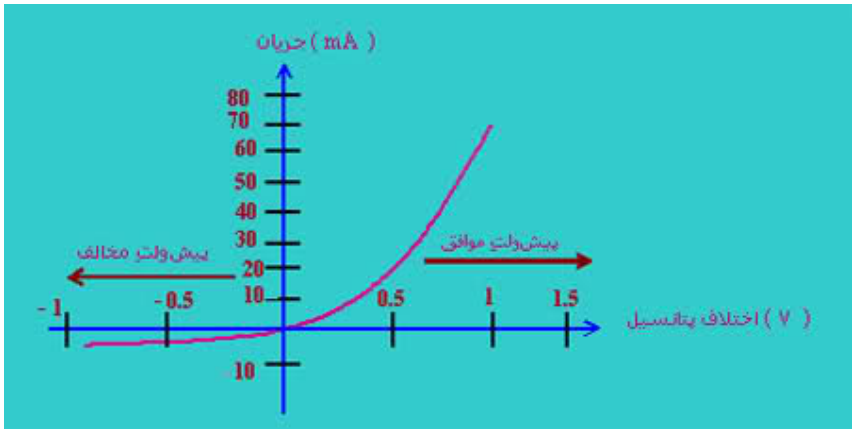
$$I = I_n + I_p = e\left(J_{ngo} + J_{pgo}\right)\left(e^{\frac{eV_0}{KT}} - 1\right)$$

$$I = I_0\left(e^{\frac{eV_0}{KT}} - 1\right)$$

که در آن

$$I_0 = e\left(J_{ngo} + J_{pgo}\right)$$

توجه کنید که I_o مستقل از ولتاژ بایاس می‌باشد. شکل ٤ نمایشی از I بر حسب V_o نشان می‌دهد.

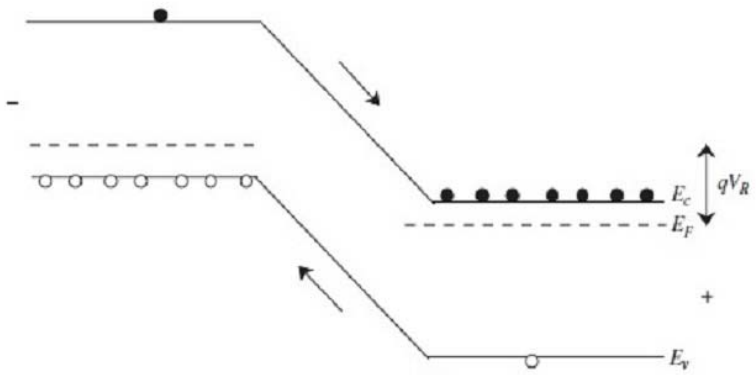


شکل ٤ نمایشی از I بر حسب V_o

با توجه به اینکه معمولاً در دمای اتاق $eV_0 \rangle\rangle KT$ است می‌توان نوشت:

$$I \approx I_0 e^{\frac{eV_0}{KT}}$$

اکنون اثر ولتاژ بایاس معکوس را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در این حالت ناحیه p به پتانسیل منفی متصل می‌شود و ناحیه n به پتانسیل مثبت. اثر ولتاژ بایاس معکوس بر روی تراز انرژی‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت مشاهده می‌کنیم که اختلاف انرژی بین سطوح p و n به اندازه eV_0 افزایش یافته است.



شکل ۵: اثر ولتاژ بایاس معکوس بر روی ترازهای انرژی‌ها

چگالی جریان تولیدی از ولتاژ بایاس مستقل است ولی چگالی جریان بازترکیبی تحت تأثیر ولتاژ بایاس معکوس قرار می‌گیرد و اکنون جریان کل ایجاد شده برابر است با:

$$I = I_n + I_p = e\left(J_{ngo} - J_{nr}\right) + e\left(J_{pgo} - J_{pr}\right) = eJ_{ngo}\left(1 - e^{\frac{eV_0}{KT}}\right) + eJ_{pgo}\left(1 - e^{\frac{eV_0}{KT}}\right)$$

$$I = I_0\left(1 - e^{\frac{eVo}{KT}}\right)$$

در دمای اتاق و با توجه به $eV_0 \rangle\rangle KT$ خواهیم داشت

$$I \approx I_0$$

اکنون می‌بینیم که در این حالت جریان مستقل از ولتاژ بایاس است. به طور کلی می‌توان جریان ایجاد شده را به فرم زیر نوشت:

$$I = I_0\left(e^{\frac{eV_0}{KT}} - 1\right)$$

برای ولتاژ بایاس مستقیم V_o مثبت و برای ولتاژ بایاس معکوس V_o منفی قلمداد می‌شود. همچنین جریان مثبت نشان دهنده جریان از p به n و جریان منفی نشان‌دهنده جریانی از n به p است. مشاهده می‌کنیم که جریان برای ولتاژ بایاس مستقیم خیلی بیشتر از جریان برای ولتاژ بایاس معکوس می‌باشد. بدین معنی است که پیوندگاه به عنوان یکسوساز عمل می‌کند. کمیت I_o

در حالت ولتاژ بایاس، جریان اشباع معکوس نامیده می‌شود. یک مقدار نـوعی از چگـالی جریـان اشـباع $10^{-5}\ \frac{A}{cm^2}$ اسـت. جریان در حالت ولتاژ بایاس مستقیم، شدیداً به ولتاژ وابسته است. یک مقدار نوعی برای ولتاژ بایـاس مسـتقیم V_o= ۰,۲ V برابر با ۱۰۰ mA است.

وسایل مورد نیاز:

دستگاه اندازه‌گیری مشخصه‌های پیوندگاه، کوره، اسیلوسکوپ، دیود BC ۱۰۷B (Si) , ۱N ۵٤۰۸ (Si)

آزمایش۱ : تعیین جریان اشباع معکوس I_0 و ثابت η.

همانطور که می‌دانیم جریان در پیوندگاه p-n برابر است با:

$$I = I_0\left(e^{\frac{eV_0}{\eta KT}} - 1\right)$$

در اینجا

e: بارالکترون برابر با 1.602×10^{-19}

η: ثابت ماده

K: ثابت بولتزمن و برابر با $1.38\times10^{-23}\ \frac{J}{K}$

T : دمای برحسب کلوین

V : ولتاژ برحسب ولت

چون جریان اشباع معکوس I_o به اندازه کافی کوچک است و نمی‌توان آن را به طور مستقیم اندازه‌گیری کرد. از این رو جهت اندازه‌گیری آن از روش‌های غیرمستقیم کمک می‌گیریم. برای $eV_0 \rangle\rangle KT$ داریم

$$I = I_0 e^{\frac{eV_0}{\eta KT}}$$

$$LnI = LnI_0 + \frac{eV}{\eta KT}$$

در اینجا اگر نمودار LnI برحسب V رسم شود با استفاده از شیب نمودار می‌توان η و با استفاده از عرض از مبداء می‌توان I_o را محاسبه کرد. بدین منظور دیود BC۱۰۷B که Si است را انتخاب کنید و آن را به دستگاه مطابق شکل متصل کنید. سپس کلیدهای سمت راست دستگاه را در حالت Junction و CURRENT قرار دهید. اکنون جریان را بوسیله پیچ تنظیم حداکثر تا (۱۰ mA) بالا برده وجریان اعمالی و ولتاژهای ایجاد شده را از روی نمایشگرهای دستگاه خوانده و در جدول (۱) یادداشت کنید و از روی داده‌ها، نمودار ولتاژ پیوندگاه را بر حسب LnI مربوطه رسم کنید و مقادیر مورد نظر را محاسبه کنید.

Forward Current I (mA)	Ln I	Junction Voltage (V)
۰,۱		
۰,۲		
۰,٤		
۰,۷		
۱		
۲		
٤		
۷		
۱۰		

آزمایش ۲: تعیین ثابت دمایی ولتاژ پیوندگاه و شکاف انرژی

در این قسمت کوره و دیود BC ۱۰۷B (Base-Emitter Junction) (Si) را به دستگاه متصل کنید. دیود را داخل کوره قرار دهید و جریان رو به جلو ثابتی در حد ۱ mA برای آن انتخاب کنید. اکنون انتخابگر ۱ را روی حالت TEMP قرار دهید و به کمک پیچ مربوطه دمای کوره را از دمای اتاق تا دمای ۳٦۰ K تغییر دهید و از روی نمایشگرهای دستگاه درجه حرارت کوره و ولتاژ را هر ۵ دقیقه در جدول (۲) زیر یادداشت کنید.

Temperature (K)	Junction Voltage (V)
۳۰۵	
۳۱۰	
۳۱٦	
۳۱۹	
۳۲۱	
۳۲٦	
۳۳۱	

٣٣٩	
٣٤٧	
٣٦٠	

در اینجا نمودار V بر حسب T را رسم کنید. از روابط زیر برای محاسبه شکاف انرژی استفاده کنید.

در این حالت جریان اشباع معکوس و جریان دیودی مستقیم به ترتیب از روابط زیر مشخص می‌شوند:

$$I_0 = KT^m e^{-\frac{eV_{G0}}{\eta KT}}$$

$$I = I_0\left(e^{\frac{eV_0}{KT}} - 1\right) \approx I_0 e^{\frac{eV}{\eta KT}}$$

که در اینجا $m = 1.5, \eta = 2$ برای Si است

همچنین داریم

$$Ln I = Ln K + m\, Ln T + \frac{e(V_0 - V_{Go})}{\eta KT}$$

در جریان مستقیم ثابت با دیفرانسیل‌گیری نسبت به دما داریم:

$$0 = 0 + \frac{m}{T} + \frac{d}{dT}\left[\frac{e(V_0 - V_{Go})}{\eta KT}\right]$$

$$0 = \frac{m}{T} + \frac{e}{\eta KT}\frac{dV_0}{dT} - \frac{e(V_0 - V_{Go})}{\eta KT^2}$$

پس

$$V_{Go} = V - T\frac{dV}{dT} - \frac{m\eta KT}{e}$$

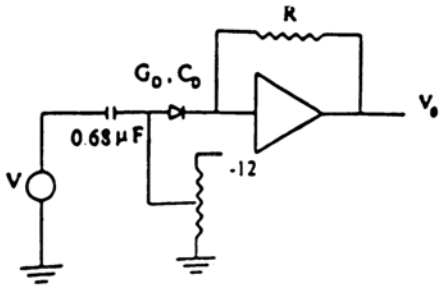
با استفاده از نمودار V بر حسب T می‌توان $\frac{dV}{dT}$ را بدست آورد و برای سه دمای مختلف بـا داشـتن V(T) در همـان دمـا V_{Go} را از رابطه بالا بدست آورید. V_{Go} همان شکاف انرژی است.

آزمایش ۳: مطالعه خازن پیوندگاه و تغییراتش نسبت به ولتاژ بایاس معکوس

برای انجام این قسمت از آزمایش از فیش‌های قسمت چپ دستگاه استفاده کنید. در اینجا از دیـود بـا شناسـه (Si) ۱N ۵۴۰۸ استفاده می‌کنیم. دیود مورد نظر در محل اتصال مربوطه بر روی دستگاه قرار گرفته اسـت. **توجه: سیم اضافی با دیود بـه‌کـار برده نشود.** هدف بررسی دیود در فرکانس‌های کاری مختلف برای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی پیوندگاه است و بدین منظور از یک اسیلوسکوپ استفاده می‌کنیم. در این حالت انتخابگر سمت چپ دستگاه را در حالت BIAS قرار دهید و رابـط CRO را برای اندازه‌گیری ولتاژهای ورودی و خروجی در بایاس مشخص و فرکانس مشخص به اسیلوسکوپ وصل کنید.

اساس آزمایش مطابق مدار نمایش داده شده در شکل٦ می‌باشد. در اینجا C_D وG_D خازن پیوندگاه و ادمیتانس نشـتی مربـوط بـه دیـود آزمـایش اسـت.V، سـیگنال ورودی اعمـالی توسـط دسـتگاه کـه در هـر دو حالـت فرکانس‌های $\omega_1 = 5kHz, \omega_2 = 20kHz$ دارای مقدار یکسانی است. با اعمال ولتاژهـای بایـاس مختلـف کـه در اینجـا از مقدار صفر تا ۱۰ V- تغییر می‌دهیم، مقدارهای ولتاژهای خروجیV_1(ولتاژ پیک تـا پیـک بـرای فرکـانس $\omega_1 = 5kHz$) و V_2(ولتاژ پیک تا پیک برای فرکانس $\omega_2 = 20kHz$) را در جـدول (۳) مربوطـه یادداشـت کنیـد. ولتاژهـای خروجـی در فرکانس‌های ω_1 و ω_2را می‌توان به صورت زیر نوشت $(\omega_2 \rangle \omega_1)$:

$$V_1 = -V(G_D + j\omega_1 C_D)R$$
$$V_2 = -V(G_D + j\omega_2 C_D)R$$



شکل ٦

با به توان ۲ رساندن و تفریق معادلات بالا از همدیگر خواهیم داشت:

$$V_2^2 - V_1^2 = V^2 R^2 (\omega_2^2 - \omega_1^2) C_D^2$$

$$C_D = \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{VR\sqrt{\omega_2^2 - \omega_1^2}}$$

در دستگاه حاضر مقادیر V وω_1 وω_2 و R و به قرار زیرند:

V=۱۶۰ mV

R=۱۰۱۰ kΩ

$\omega_1 = 2\pi \times 5 \times 10^3$

$$\omega_2 = 2\pi \times 20 \times 10^3$$

بنابراین C_D برابر است با $C_D = 0.5\sqrt{V_2^2 - V_1^2}\,(pF)$

Bias Voltage (V)	V_1 (mV) p-p ۵ kHz	V_2 (mV) p-p ۲۰ kHz	C_D (pF)
۰,۰			
-۰,۵			
-۱,۰			
-۲,۰			
-۳,۰			
-٤,۰			
-۵,۰			
-۷,۰			
-۱۰,۰			

نمودار ظرفیت خازنی پیوندگاه را بر حسب ولتاژ بایاس اعمالی رسم کنید.

بررسی نتایج و سئوالات:

۱- نیمه هادی‌ها چگونه آلائیده می‌شوند؟

۲- آلائیده‌گی را چگونه تغییر دهیم تا منحنی I-V اتصال به رفتار خطی نزدیک شود.

۳- یک قطعه ای که در آن نیمه هادی قرار دارد را تشریح کنید.

٤- خواص نوری نیمه هادی ها چگونه است؟