

# فتوالکتریک

## پارسا رنگریز

آزمایشگاه فیزیک ۴، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

### ۱ مقدمه

بر اثر تابش نور به مواد، الکترون‌ها می‌توانند از سطح آنها خارج شوند. این اثر را فتوالکتریک می‌نامند. مشاهده شده است که تعداد الکترون‌های خارج شده از سطوح، به شدت نور و جنس فلز بستگی دارد؛ اما انرژی الکترون‌ها به فرکانس نور تابیده شده وابسته است. این پدیده با در نظر گرفتن کوانتای فوتون قابل تفسیر است. بر اثر برخورد فوتون‌ها با جسم، انرژی آنها به الکترون منتقل شده و اگر تابع کار الکترون‌ها کمتر از انرژی فوتون‌ها باشد، الکترون‌ها می‌توانند از جسم خارج شوند. انرژی جنبشی الکترون آزاد شده را می‌توان از رابطه آینشتاین بدست آورد

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \Phi \quad (1)$$

که  $m$  جرم الکترون،  $\Phi$  تابع کار است که به جنس سطح ماده بستگی دارد،  $v$  سرعت الکترون و  $\nu$  فرکانس نور تابیده شده است. شکل ۱ اجزای اصلی یک لامپ فوتوسل را نشان می‌دهد. نور به قسمتی از لامپ که به پتانسیم و یا دیگر مواد با تابع کار کم آغشته شده است، تابیده می‌شود و تولید الکترون‌های آزاد (فتوالکتریک‌ها) می‌کند. سپس در صورت اعمال میدان الکتریکی می‌توان الکترون‌ها را از جسم خارج و سرعت داد. الکترون‌ها به آندی از جنس پلاتین رسیده و تولید جریان  $I_P$  می‌کنند. با تغییر پتانسیل می‌توان جریان  $I_P$  را تغییر داد به گونه‌ای که با انتخاب  $V_0$ ، جریان  $I_P$  صفر شود. در این صورت

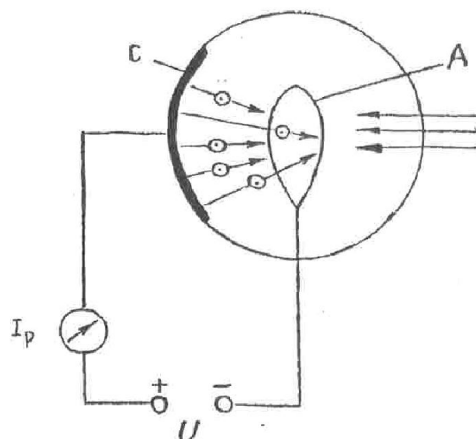
$$h\nu - \Phi = eV_0 \quad (2)$$

در صورتی که فرکانس نور تابیده به اندازه  $\Delta\nu$  افزایش پیدا کند، مقدار انرژی الکترون‌ها به اندازه  $h\Delta\nu$  افزایش پیدا کرده است. بنابراین پتانسیل منفی اند بایستی به اندازه  $\Delta V_0$  افزایش پیدا کند تا مجدداً  $I_P$  برابر صفر گردد. بنابراین  $e\Delta V_0 = \Delta\nu$  و از این رو منحنی  $V_0(\nu)$  نسبت به فرکانس دارای شیب  $\frac{h}{e}$  است. بدین وسیله ثابت پلانک با اندازه‌گیری شیب منحنی قابل اندازه‌گیری است.

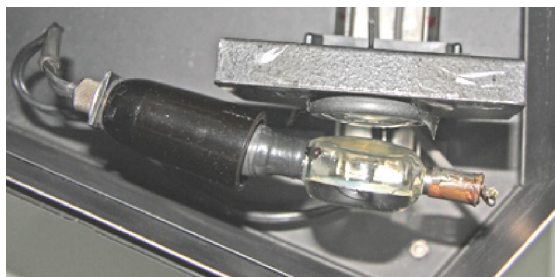
### ۲ وسایل آزمایش

مجموعه اپتیکی مورد نیاز شامل قطعات زیر است و در شکل ۳ نمایش داده شده است. این مجموعه در جعبه‌ای فلزی سیاه قرار دارد تا از بازتاب‌های درونی جلوگیری شود.

- (۱) لامپ جیوه فشار بالا
- (۲) پوشاننده شکاف ورودی نور لامپ جیوه
- (۳) عدسی برای جمع کردن نور
- (۴) شکاف
- (۵) عدسی برای ایجاد تصویر
- (۶) منشور
- (۷) آینه
- (۸) ورودی‌های مختلف برای اندازه‌گیری و اتصال فیش.



شکل ۱: شماتیک سلول فوتوالکتریک



شکل ۲: سلول فوتوالکتریک

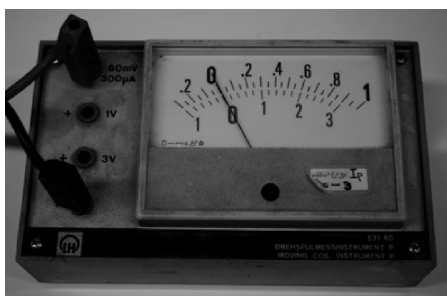
- (۱.۸) ورودی متصل به آمپلی فایر
- (۲.۸) جفت سوکت ورودی متصل به آند
- (۹) پیچ تغییر بازوی دستگاه برای تغییر مکان لامپ فتوسل و عدسی و شکاف موجود بر روی بازو نسبت به طول موج نور
- (۱۰) عدسی پوشاننده با شکاف فلزی که روی آن متصل می‌شود. (۱۱) لامپ فتوسل (شکل ۱ و ۲). این لامپ حاوی حلقه آند و کاتد (c) که لایه‌ای با تابع کار کم است.
- (۱۲) شکاف و پوشاننده پشت لامپ
- (۱۳) آمپرسنج (شکل ۴)
- (۱۴) تقویت‌کننده (شکل ۵)
- (۱۵) ولت‌متر

### ۳ شرح آزمایش

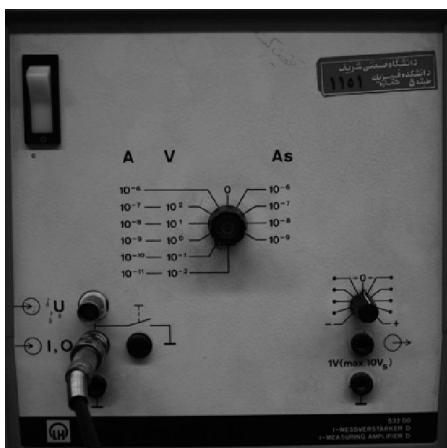
در هنگام آزمایش باید از دست زدن به قطعات تنظیم‌شده داخل جعبه خودداری کرد و سعی کنیم درپوش برداشته نشود. مدار آزمایش را مطابق شکل ۶ می‌بندیم. پتانسیل ورودی  $V$  را با استفاده از ولت‌متر ۲ ولت قرار می‌دهیم. سپس لامپ جیوه را روشن می‌نماییم. منبع ولتاژ را در حالت کمینه روشن نموده و بر روی ۲ ولت می‌گذاریم. دستگاه تقویت‌کننده  $I_p$  را در حالت کمینه روشن کرده و روی محدوده مناسب (مثلاً  $10^{-11}$ ) می‌گذاریم. با چرخش پتانسیومتر offset در حال عدم دریافت سیگنال، آن را صفر می‌کنیم. باید توجه داشت که تنظیم صفر آمپرسنج بسیار اهمیت دارد. با بستن دریچه از ورود هر نوری به سلول جلوگیری



شکل ۳: مجموعه اپتیکی آزمایش فوتوالکتریک

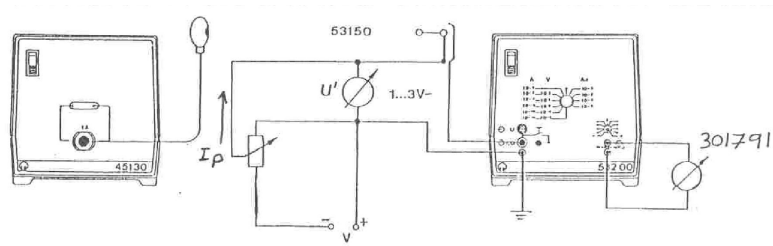


شکل ۴: آمپرسنج مورد استفاده



شکل ۵: تقویت کننده

کرده و در همین حال جریان خروجی از تقویت کننده را با کلید تنظیم روی صفر می گذاریم. درپوش ورودی نور لامپ را برداشته و به کمک پیچ تنظیم بازوی متحرک با بلند کردن درپوش جعبه به اندازه کوچک طیف را روی شکاف تنظیم می نماییم. با استفاده از رئوستا،  $V$  را تغییر داده و برای یک رنگ تابشی جریان  $I_P$  را بر حسب ولتاژ  $V$  اندازه گیری کرده و در جدول ۱ ثبت می کنیم. برای بقیه نورهای طیف، جریان  $I_P$  را به صفر رسانده و ولتاژ قطع  $V_0$  را در جدول ۲ می نویسیم.



شکل ۶: اجزای آزمایش و نحوه اتصال آنان

#### ۴ هدف آزمایش

هدف آزمایش مشخص کردن نوع آلاینده (p یا n) یک نیمه‌رسانا و همچنین برای بدست آوردن  $\sigma$  ضریب هدایت الکتریکی و  $\mu$  قابلیت تحرک الکتریکی بارهای یک نیمه‌رسانا یا رسانا، محاسبه  $R_H$  ضریب هال کریستال نیمه‌رسانا و همچنین اندازه‌گیری میدان مغناطیسی  $B$  و مطالعه خاصیت حاصل ضریبی اثر هال است.

## ۵ جدول داده‌ها

با توجه به عقربه آمپر متر، خطای آن این‌گونه است:

$$\Delta I = 10 \mu A \quad (3)$$

خطای فرکانس که زیر هر کدام نوشته شده است، از شکل ۹ بهره برده شده است.

$$\Delta f = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} f \quad (4)$$

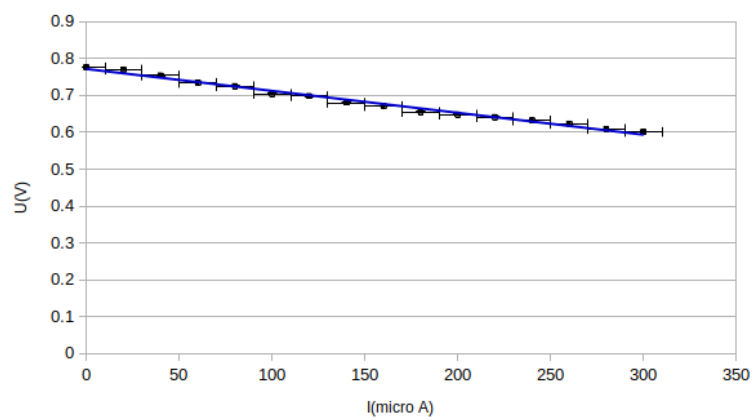
جدول ۱: جریان فوتوالکتریک بر حسب ولتاژ برای دو طیف

Color: $I(\mu A)$	Green $U(V)$	Red $U(V)$
0	0.776	0.807
20	0.770	0.756
40	0.754	0.679
60	0.734	0.639
80	0.725	0.597
100	0.704	0.570
120	0.698	0.538
140	0.680	0.506
160	0.671	0.474
180	0.655	0.454
200	0.648	0.431
220	0.641	0.409
240	0.632	0.394
260	0.623	0.374
280	0.609	0.358
300	0.601	0.344

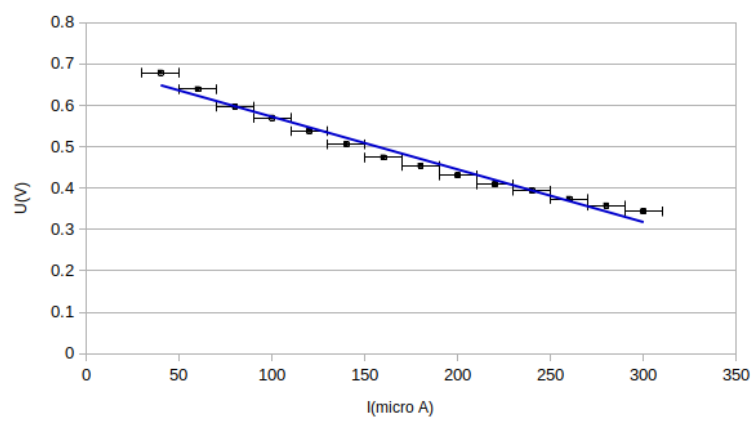
جدول ۲: ولتاژ قطع جریان برای طیف‌های مختلف

$f(Hz)$	$5.2 \times 10^{14}$	$5.5 \times 10^{14}$	$6.1 \times 10^{14}$	$6.9 \times 10^{14}$	$7.4 \times 10^{14}$
$\Delta f(Hz)$	$0.2 \times 10^{14}$	$0.3 \times 10^{14}$	$0.1 \times 10^{14}$	$0.3 \times 10^{14}$	$0.3 \times 10^{14}$
Color	Yellow	Green	Green-Blue	Blue	Purple
$U_0^{(1)}(V)$	0.847	0.879	0.917	1.010	1.030
$U_0^{(2)}(V)$	0.843	0.884	0.920	1.005	1.028
$U_0^{(3)}(V)$	0.851	0.884	0.924	1.005	1.029
$\bar{U}_0(V)$	0.847	0.882	0.920	1.007	1.029

## ۶ نمودار داده‌ها



شکل ۷: نمودار جدول ۱ (رنگ سبز)



شکل ۸: نمودار جدول ۱ (رنگ قرمز)

## ۷ خطا

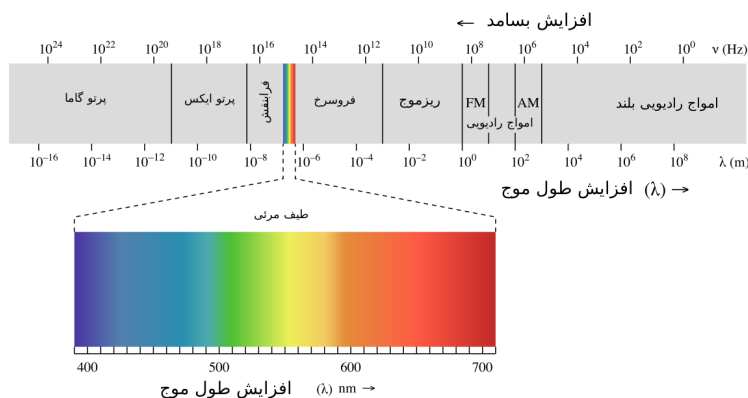
عوامل خطا که اتفاقاً نتایج غیر قابل انتظار و دور از عدد دقیق را نشان می‌دهد به شرح زیر است:

- (۱) تنظیم نکردن دقیق رنگ بر روی فرکانس مورد نظر آزمایش (شکل ۹)
- (۲) بازه بسیار گسترده طیف‌های متمایل به بنفش و آبی
- (۳) خطای سیستماتیک آمپرسنج و ولت‌متر به دلیل کم بودن جریان
- (۴) ورود نور محیط درون محفظه تاریک آزمایش و ایجاد اختلال در سنجش جریان خطای شیب نمودار خطی فیت شده نیز این‌گونه بدست می‌آید:

$$\Delta b = b \sqrt{\frac{1}{N-2} \left( \frac{1}{r^2} - 1 \right)} \quad (5)$$

که  $N$  تعداد داده‌ها و  $r$  رگرسیون است. خطای ثابت پلانک نیز به راحتی بدست می‌آید:

$$\Delta h = e \Delta b \quad (6)$$



شکل ۹: بازه طیف نور مرئی

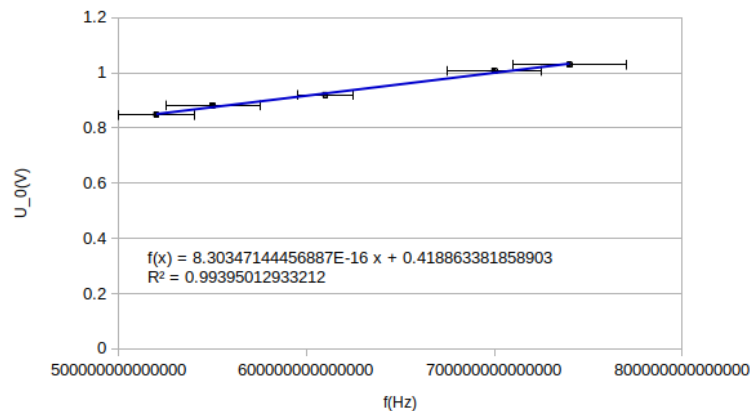
## ۸ نتیجه گیری

(۱) نتیجه فیزیکی مهمی که می‌توان از این پدیده گرفت این است که برخلاف فیزیک کلاسیک که میزان جریان الکترون‌ها را وابسته به شدت فوتون تابشی می‌دانست، این آزمایش در نمودارهای جدول یک نشان می‌دهد که جریان عبوری به فرکانس تابشی حساس است و شیب آن تغییر می‌کند. بنابراین به یک مفهوم جدیدی می‌رسیم که توجیه‌کننده این تناقض ظاهری است و آن بسته‌های انرژی فوتون‌هاست. (۲) از مقادیر میانگین پتانسیل قطع در جدول ۳ می‌توان بهره برد و نمودار پتانسیل قطع بر حسب فرکانس را رسم کرد که مطابق شکل ۹ است. از طریق این منحنی می‌توان ثابت پلانک و تابع کار فلز را یافت. در حقیقت داریم (معادله ۲)

$$U_0 = \frac{h}{e} F - \frac{\Phi}{e}$$

با استفاده از نمودار داریم:

$$(7)$$



شکل ۱۰: نمودار جدول ۲

۲) اگر از نمودار جدول دو (شکل ۱۰) بهره ببریم، می‌بینیم که با استفاده از شیب و عرض از مبدا بدست آمده با یک آزمایش بسیار پرخطایی سر و کار داریم. به طوری که ثابت پلانک بدست آمده به صورت زیر است:

$$eb = h = (1.33 \pm 0.06) \times 10^{-34} J.t \quad (۸)$$

که مقدار دقیقی این ثابت برابر با  $6.63 \times 10^{-34}$  است. بدین ترتیب ما 79 درصد خطا داریم! که به معنای واقعی فاجعه است. از طرفی عرض از مبدا نمودار مثبت شده است که طبق تئوری پیش‌بینی عرض از مبدائی منفی داشتیم که بنابراین نمی‌توان کار کار فلز را محاسبه کرد؛ اما ذکر این نکته مهم است که چون خطای فرکانس بالاست، می‌توان این امید را داشت که عرض از مبدا منفی نیز شود ولی در محاسبات ما این اتفاق رخ نداد.

۳) تابع کار فلز، انرژی نیاز برای الکترون است که اگر چنین انرژی دریافت کند می‌تواند از نیروهای درون فلزی که الکترون را مقید می‌کند، فرار کرده و از فلز گسیل شود. مقدار این تابع، به جنس فلز مورد آزمایش بستگی دارد.

۴) الف) فیزیک کلاسیک قادر به توصیف نمودارهای جدول ۱ نیست چرا که اگر شدت تابشی یکسان باشد و فرکانس متفاوت، نباید جریان عبوری وابسته به فرکانس شود و فیزیک کلاسیک قادر به توصیف این پدیده نیست. ضمناً ولتاژ قطع فلز با اینکه تابشی صورت می‌پذیرد، رخ می‌دهد ولی در فیزیک کلاسیک، با داشتن یک تابش، حتماً باید جریان عبوری رخ دهد.

ب) فیزیک جدید با معرفی پدیده‌ای به نام کوانتای انرژی، سعی بر رفع این مشکل می‌کند. به طوری که نور از فوتون تشکیل شده و هر فوتون بسته‌ای از انرژی به همراه خود دارد و انرژی هر فوتون وابسته به فرکانس نور تابیده شده است.  $(E = hf)$  در این صورت هر فوتونی که انرژی خود را به الکترون بدهد، آن الکترون می‌تواند از فلز عبور کند یا نکند و تمام این پدیده وابسته به فرکانس تابیده شده است. یعنی شدت چه بالا رود چه نرود، اگر فرکانس کم باشد، فوتونی که به الکترون می‌رسید بسته انرژی کمی به الکترون می‌دهد تا فرار کند و جریانی بوجود نمی‌آید. اما اگر به فرکانس مورد نظر رسیدیم، با افزایش شدت، جریان نیز افزایش می‌یابد چون احتمال رسیدن فوتون‌ها به الکترون‌ها بیشتر می‌شود. ضمناً با تابش به فلز، جریان شروع می‌شود در صورتی که در کلاسیک چنین اتفاقی محال است. ولی دریافت فوتون توسط الکترون‌ها آنی رخ می‌دهد.

۵) در ساخت سلول‌های فوتوالکتریک معمولاً از فلزات قلیایی نظیر پتاسیم استفاده می‌شود؛ چرا که در لایه ظرفیت خود تنها یک الکترون دارند و بنابراین انرژی کمتری برای فرار از اتم نیاز دارند و به این سبب تابع کار فلز کم‌تر خواهد بود.

۶) سلول‌های فوتوالکتریک در بازپردازش صدای سینما، تنظیم دمای کوره، تنظیم روشن و خاموش شدن چراغ‌های برقی، مطالعه طیف ستارگان و دمای آنها کاربرد دارد.

۷) در سلول فوتوالکتریک آند به صورت یک حلقه است؛ چرا که وقتی فوتون‌ها از آند به سمت کاتد که می‌روند، پس از برخورد در تمامی جهات مختلف پخش می‌شوند. بنابراین یک آند حلقوی برای جمع‌آوری این الکترون‌ها نیاز است.

۸) اگر از یک لیزر استفاده کنیم و یک صفحه در جلوی کاتد قرار داده تا فوتوالکترن‌های خارج شده از کاتد به صفحه برخورد کنند، در این صورت نمی‌توان از نور مرئی لیزر پرشدت اشعه ایکس تولید کرد؛ زیرا مرتبه انرژی لیزر هم‌مرتبه با انرژی فوتوالکترن‌هاست و افزایش شدت نور لیزر تنها و تنها تعداد الکترون‌های خروجی را افزایش می‌دهد. با توجه به توضیحی که



قبلا داده شد، انرژی مورد نظر به فرکانس مربوط است و نمی‌توان با افزایش شدت فرکانس را تغییر داد. بنابراین فرکانس ایکس دست‌یافتنی نیست.