به نام خدا

عایق و فشار قوی

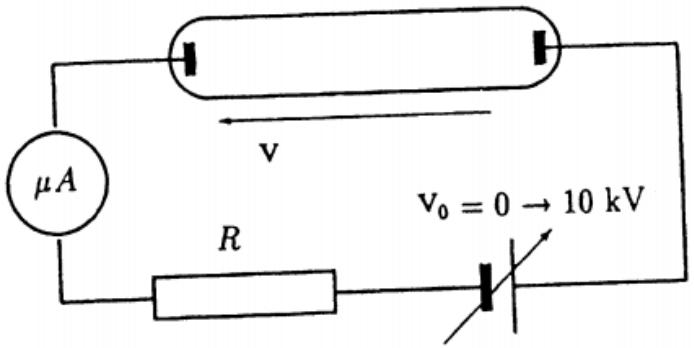
فصل دوم
عایق های گازی

مدرس:
بهروز آدینه

زمستان ۹۴

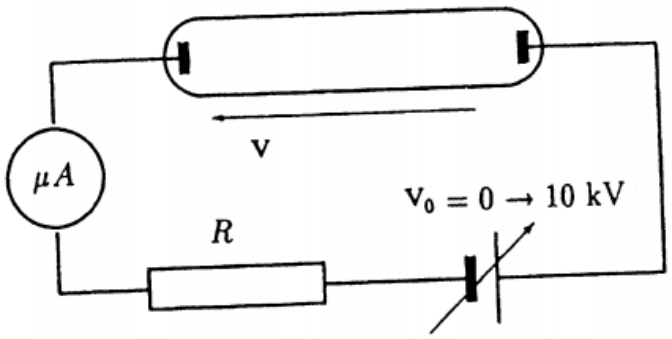
پدیدهٔ بهمن الکترونی و تخلیهٔ الکتریکی تانزند

مطابق شکل (۲-۹)، یک گاز را در بین دو الکترود قرار می‌دهیم و الکترودها را از طریق یک مقاومت و آمپرمتر سری در مدار به منبع ولتاژ دائم متّصل می‌کنیم. چون در اثر عوامل خارجی مانند اشعه‌های کیهانی و اشعهٔ ایکس، همواره تعدادی الکترون آزاد در داخل گاز وجود دارد و یا از سطح الکترود کاتد صادر می‌شود، با اعمال میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ منبع (V_0) الکترون‌های آزاد داخل گاز، در خلاف جهت میدان تحت تأثیر نیرویی که از طرف میدان الکتریکی به آن‌ها وارد می‌شود، به طرف آند حرکت می‌کنند و مرتباً انرژی آن‌ها توسّط میدان زیادتر می‌شود تا زمانی که به یک مولکول برخورد کنند. همچنین یون‌های مثبت داخل گاز به طرف کاتد و در جهت میدان حرکت می‌کنند. در این بین، تعدادی از الکترون‌ها و یون‌ها ترکیب شده، اتم خنثی را تشکیل می‌دهند و تعدادی از آن‌ها نیز انرژی کافی از میدان کسب کنند و می‌توانند الکترون‌هابه آند و یون‌های مثبت به کاتد برسند. در اثر الکترون‌ها و یون‌های رسیده به آند و کاتد، یک جریان الکتریکی در مدار برقرار می‌گردد و به‌وسیلهٔ آمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود که مقدار آن بسیار ناچیز است.

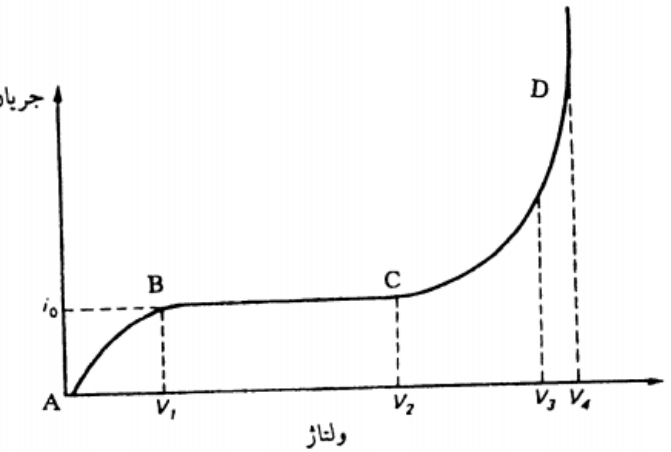


شکل (۲-۹): مدار آزمایش برای نشان دادن عبور جریان گاز

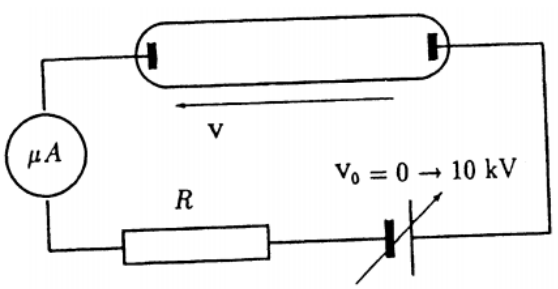
حال وقتی ولتاژ منبع را افزایش دهیم میدان الکتریکی داخل گاز زیادتر شده، در نتیجه، یون‌ها و الکترون‌ها با سرعت بیشتری و کسب انرژی زیادتری حرکت می‌کنند. در این حالت، الکترون‌ها و یون‌ها فرصت کم‌تری برای ترکیب مجدد دارند و تعداد زیادتری الکترون و یون به آند و کاتد می‌رسد. بنابراین، جریان الکتریکی بیشتری به‌وسیلهٔ آمپرمتر سنجیده می‌شود. این افزایش جریان در اثر افزایش ولتاژ، یک رابطهٔ تقریباً خطی است (قسمت AB در مشخّصهٔ ولتاژ– جریان عایق در شکل ۲–۱۰). هنگامی‌که ولتاژ عایق به V_1 می‌رسد، دیگر با افزایش ولتاژ منبع، جریان الکتریکی در مدار تقریباً ثابت می‌ماند و به حالت اشباع می‌رسد (قسمت B تا C). در این حالت، جریان مستقل از ولتاژ دو سر الکترود می‌گردد؛ زیرا از ولتاژ V_1 تا V_2 هر چه الکترون و یون به‌واسطه عوامل خارجی در گاز وجود دارند، به آند و کاتد می‌رسند و بیش از این، ذرّات بارداری وجود ندارند. بنابراین، با افزایش ولتاژ و کسب انرژی بیشتر توسّط ذرّات باردار، در تعداد ذرّات رسیده به آند و کاتد تغییری حاصل نمی‌شود و جریان ثابت می‌ماند. در این حالت، فقط اگر شدّت عامل خارجی افزایش یابد، مقدار این جریان اشباع، زیادتر می‌گردد.



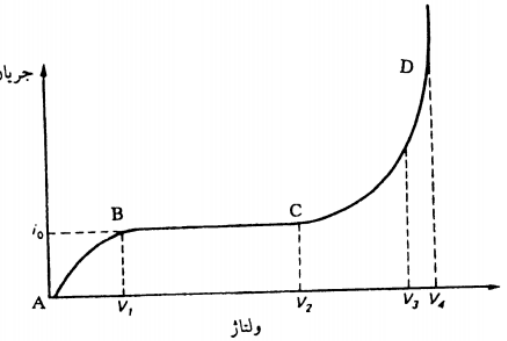
شکل (۲–۹): مدار آزمایش برای نشان دادن عبور جریان گاز



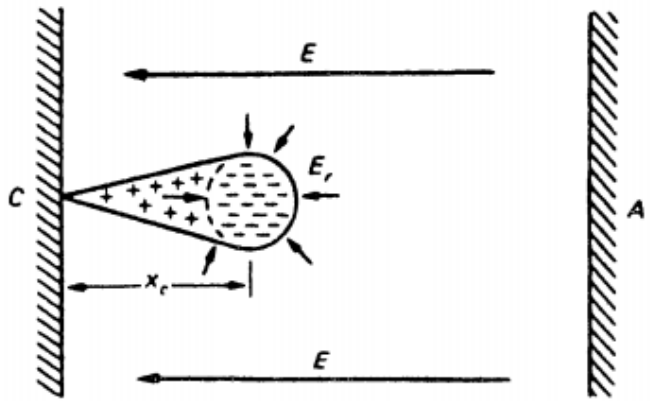
شکل (۲–۱۰): رابطهٔ بین جریان و ولتاژ قبل از وقوع جرقه



شکل (۲-۹): مدار آزمایش برای نشان دادن عبور جریان گاز



شکل (۲-۱۰): رابطهٔ بین جریان و ولتاژ قبل از وقوع جرقّه



شکل (۲-۱۱): شکل کلّی یک بهمن الکترونی

حال اگر ولتاژ را باز هم افزایش دهیم، با افزایش شدّت میدان، الکترون‌های آزاد داخل گاز، آن قدر از میدان الکتریکی انرژی کسب می‌کنند که می‌توانند در مسیر خود در برخورد با مولکول‌های گاز، آن‌ها را یونیزه نمایند و الکترون‌های آزاد جدیدی را به‌وجود آورند. این الکترون‌های آزاد جدید نیز از میدان الکتریکی، انرژی کسب می‌کنند و در مسیر خود به طرف آند، الکترون‌های جدیدتری را در برخورد با مولکول‌های گاز به‌وجود می‌آورند. بدین ترتیب، به‌طور تصاعدی، تعداد الکترون‌ها و یون‌های مثبت داخل گاز افزایش می‌یابد و یک بهمن الکترونی تشکیل می‌شود. الکترون‌های آزاد به دلیل جرم کم‌تر و در نتیجه سرعت زیادتر آن‌ها، در سر پهن و کروی شکل این بهمن قرار می‌گیرند. همچنین یون‌های مثبت به‌دلیل جرم زیادتر و سرعت کم‌تر، در دنبالهٔ مخروطی شکل آن قرار می‌گیرند که در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده است.

به‌سبب افزایش تصاعدی در تعداد الکترون‌های رسیده به آند و یون‌های مثبت رسیده به کاتد، جریان الکتریکی به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد و یک تخلیهٔ الکتریکی غیر مستقل به‌وجود می‌آید (منطقهٔ C-D در شکل ۲-۱۰). این تخلیه را از آن جهت، غیرمستقل می‌گویند که اگر عوامل خارجی قطع گردد، پروسهٔ تشکیل بهمن الکترونی قطع می‌شود و جریان الکتریکی نیز به صفر رسیده، قطع می‌گردد.

محاسبهٔ جریان تخلیهٔ الکتریکی غیر مستقل

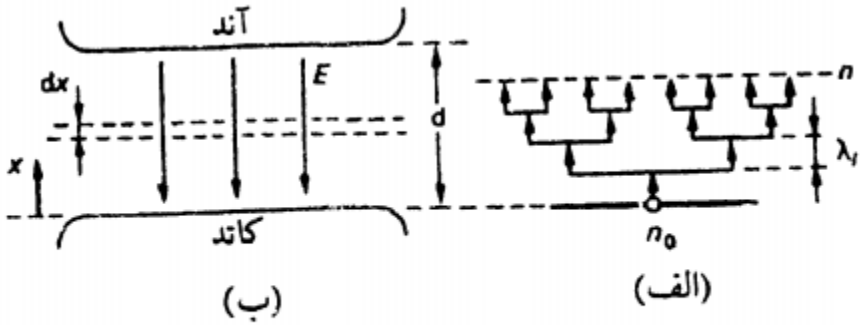
برای محاسبهٔ جریان تخلیهٔ الکتریکی غیر مستقل، فرض می‌کنیم به‌دلیل عوامل خارجی در هر لحظه، n_0 الکترون آزاد از کاتد به طرف آند حرکت می‌کند. اگر این الکترون‌های آزاد اوّلیه (n_0)، در مسیر حرکت خود به طرف آند، در اثر برخورد با مولکول‌های گاز، یونیزاسیون انجام دهند و الکترون‌های آزاد جدیدی را به‌وجود آورند واین پروسه ادامه یابد، در آن صورت در فاصلهٔ x از سطح کاتد، تعداد الکترون‌های آزاد به n می‌رسد. این موضوع در شکل (۲-۱۲) قابل مشاهده است. میزان افزایش تعداد الکترون‌های آزاد در لایهٔ dx را (که در فاصلهٔ x از سطح کاتد قرار دارد) در اثر یونیزاسیون برابر dn در نظر می‌گیریم. با توجّه به این‌که تعداد الکترون‌های آزاد به‌وجود آمده در واحد طول به‌وسیلهٔ یک الکترون، همان ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند است، بنابراین، داریم:

$$dn = n\,\alpha\,dx$$

$$\frac{dn}{n} = \alpha\,dx$$

با انتگرالگیری در تعداد الکترون‌های آزاد از n_0 تا n و نیز در طول فاصلهٔ الکترودها از صفر تا x خواهیم داشت:

$$\int_{n_0}^{n} \frac{dn}{n} = \int_{0}^{x} \alpha \cdot dx$$



شکل (۲-۱۲): نمودار تکثیر یک بهمن الکترونی

و برای میدان یکنواخت که شدّت میدان الکتریکی و در نتیجه α در تمام نقاط آن ثابت است، خواهیم داشت:

$$\ln n \mid_{n_0}^{n} = \alpha \cdot x \mid_{0}^{x}$$

$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

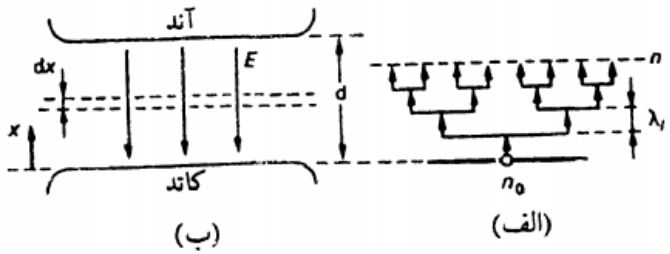
در نتیجه، برای فاصلهٔ کاتد تا آند ($x=d$) تعداد الکترون‌های آزاد که به آند می‌رسند، برابر است با:

$$n_A = n_0 e^{\alpha d} \qquad (۴۴-۲)$$

اگر طرفین رابطهٔ اخیر را در بار الکتریکی الکترون ضرب کنیم، شدّت جریان را به‌دست می‌آوریم (سطح الکترودها واحد فرض شده است):

$$I = I_0 e^{\alpha d} \qquad (۴۵-۲)$$

چنان‌که از رابطهٔ اخیر مشخّص است، جریان I با پیش رفتن الکترون‌ها به سمت آند و انجام یونیزاسیون به‌طور نمایی اضافه می‌شود و I_0 مربوط به الکترون‌های آزاد اوّلیه است که برای وجود جریان، حضور این الکترون‌های اوّلیه الزامی است. این الکترون‌ها توسّط یک عامل خارجی (مثلاً تاباندن اشعه ماوراء بنفش به کاتد) تولید می‌شوند. بدین جهت، این مقطع از یونیزاسیون و تخلیهٔ الکتریکی در گاز را یونیزاسیون غیرمستقل یا تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل گویند؛ زیرا در این مقطع، برای ادامهٔ جریان یونیزاسیون، باید الکترون یا الکترون‌های اوّلیه توسّط عامل خارجی به‌وجود آید. لازم به یادآوری است که چون بهمن الکترونی در پی یونیزه شدن ذرّات گاز به‌وجود می‌آید و یونیزاسیون همواره با فرآیند ترکیب مجدّد همراه است، پس در این پدیده، مقدار زیادی فوتون‌های نوری آزاد می‌شود و معمولاً تخلیه با نور همراه است.



شکل (۲-۱۲): نمودار تکثیر یک بهمن الکترونی

ارتباط جریان تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل با فاصلهٔ الکترودها

در قسمت قبل، جریان تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل را به‌صورت $I = I_0 e^{\alpha d}$ به‌دست آوردیم. حال اگر از دو طرف این معادل ، لگاریتم بگیریم خواهیم داشت:

$$\ln I = \ln I_0 + \alpha d \qquad (۴۶-۲)$$

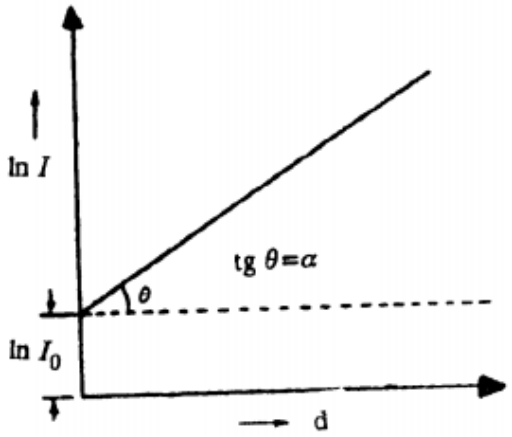
این رابطه نشان می‌دهد که منحنی $\ln I$ بر حسب فاصلهٔ بین الکترودها (d) باید خط مستقیمی با شیب α باشد. اگر $\ln I$ را بر حسب فاصلهٔ الکترودها (d) رسم نماییم یک رابطهٔ خطّی مطابق شکل (۲-۱۳) به‌دست می‌آید که از مقدار $\ln I_0$ شروع شده و شیب آن هم، همان ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند (α) است. برای اندازه‌گیری مقدار ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند (α) با ثابت نگهداشتن E و P و اندازه‌گیری جریان‌ها برای دو مقدار d_1 و d_2 می‌توان مقدار α را محاسبه نمود:

$$I_1 = I_0 e^{\alpha d_1}$$

$$I_2 = I_0 e^{\alpha d_2}$$

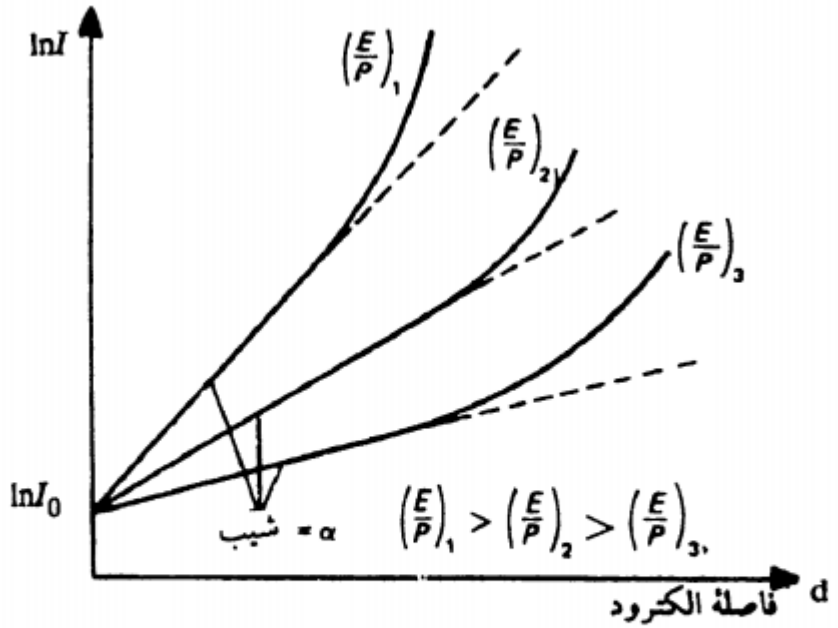
$$\frac{I_1}{I_2} = e^{\alpha(d_1 - d_2)}$$

$$\alpha = \frac{1}{d_1 - d_2} \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \qquad (۴۷-۲)$$



شکل (۲-۱۳): رابطهٔ خطّی بین **ln I** و فاصلهٔ الکترودها

تانزند ضمن ازمایش‌هایی مشاهده کرد که در ولتاژهای بالاتر، افزایش جریان از رابطهٔ (۲-۴۶) پیروی نمی‌کند و در این ولتاژها شدّت جریان، افزایش بیشتری را نسبت به آن‌چه از رابطهٔ (۲-۴۷) بر می‌آید، داراست. شکل (۲-۱۴) نمودار واقعی $\ln I$ بر حسب فاصلهٔ الکترودها را در نسبت‌های مختلف $\frac{E}{P}$ نشان می‌دهد. برای توضیح این اثر، وی به این نتیجه رسید که در ولتاژهای بالا، عامل دیگری بر افزایش جریان تأثیر می‌گذارد و همین امر موجب تخلیهٔ الکتریکی مستقل (خودنگهدار یا خودی) در گاز می‌شود که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.



شکل (۲-۱۴): تغییرات لگاریتم جریان فاصلهٔ هوایی متناسب با طول فاصلهٔ الکترودها در یک میدان یکنواخت