

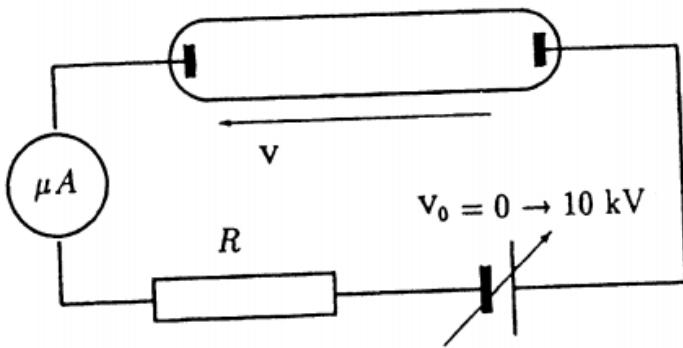
به نام خدا

عایق و فشار قوی

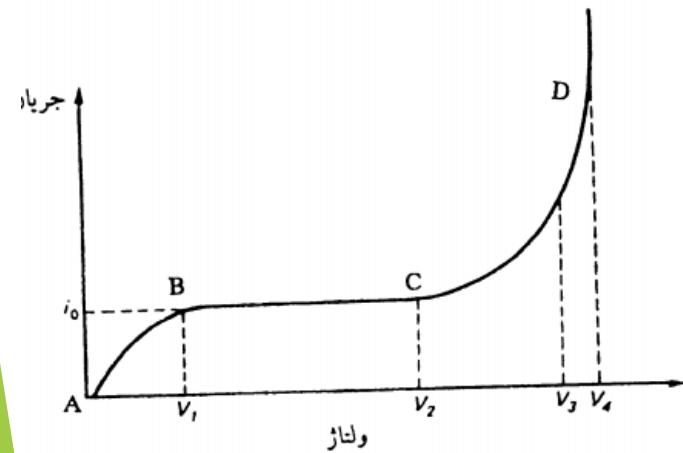
فصل دوم عایق های گازی

مدرس:
بهروز آدینه

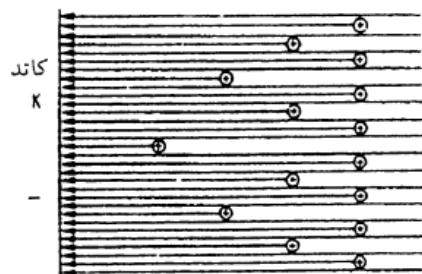
زمستان ۹۴



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



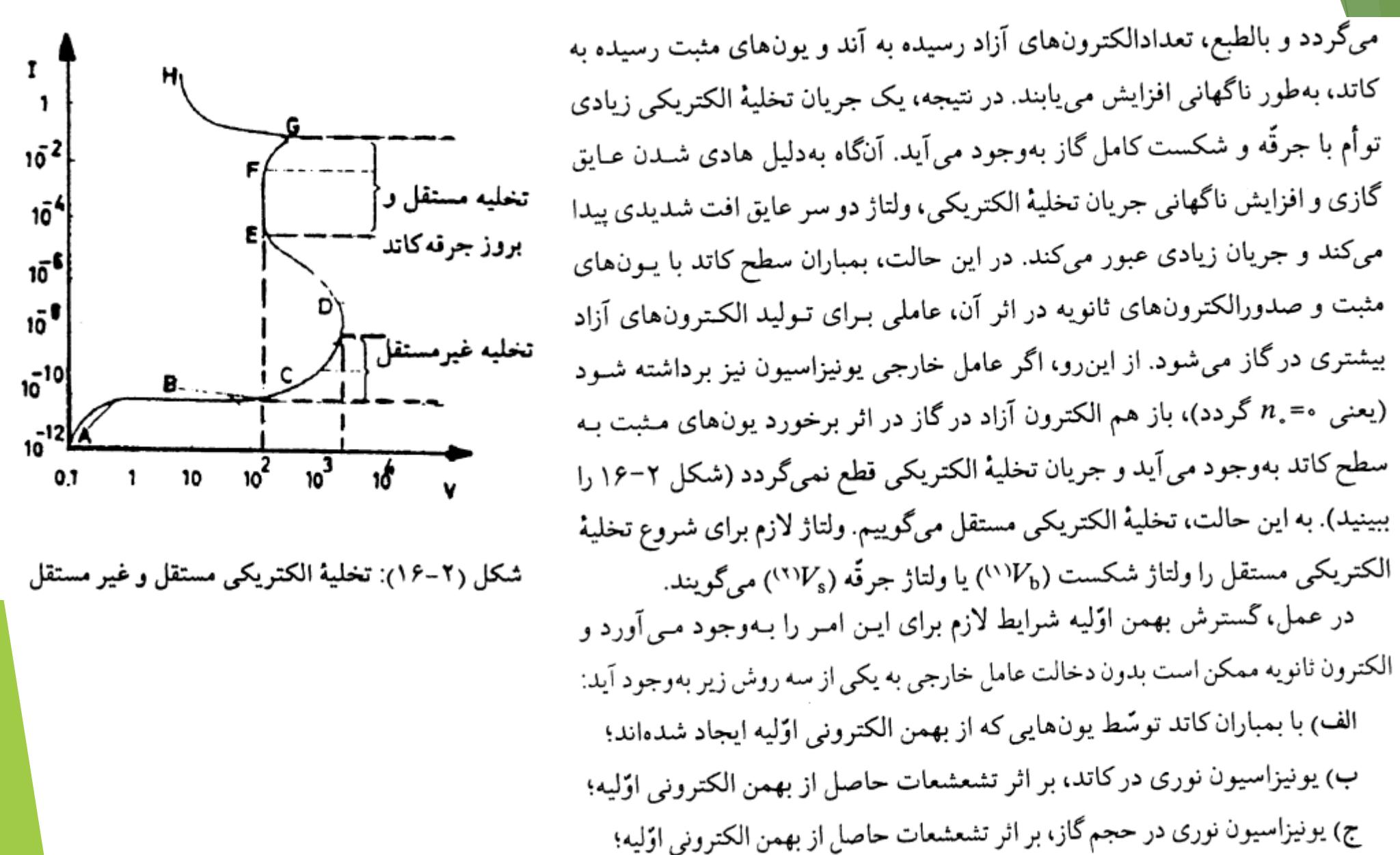
شکل (۱۰-۲): رابطه بین جریان و ولتاژ قبل از وقوع جرقه



شکل (۱۵-۲): برخورد یون‌ها به سطح کاتد و صدور الکترون از کاتد

تخلیه الکتریکی مستقل

در مدار آزمایش قبلی شکل (۹-۲)، فرض کنید که ولتاژ منبع را باز هم افزایش دهیم ($V > V_4$) در شکل (۱۰-۲). در این حالت، میدان الکتریکی داخل گاز قوی تر می‌شود؛ به طوری که یون‌های مثبت آنقدر انرژی از میدان کسب می‌کنند که می‌توانند در برخورد با سطح کاتد، بر انرژی آزاد سازی الکترون از سطح فلزی کاتد غلبه نمایند (شکل ۱۵-۲ را ببینید). در این صورت، علاوه بر e^- الکترون آزاد شده اولیه از سطح کاتد (در اثر عوامل خارجی)، یون‌های مثبت نیز تعدادی الکترون از سطح کاتد آزاد می‌کنند که این الکترون‌های ثانویه تولید شده نیز، در میدان الکتریکی انرژی گرفته، الکترون‌های آزاد بیشتری در داخل گاز در اثر یونیزاسیون تولید می‌نمایند. در نتیجه، این پروسه ادامه یافته، بهمن الکترونی بزرگ‌تری تشکیل



شکل (۱۶-۲): تخلیه الکتریکی مستقل و غیر مستقل

کاتد، به طور ناگهانی افزایش می‌یابند. در نتیجه، یک جریان تخلیه الکتریکی زیادی توأم با جرقه و شکست کامل گاز به وجود می‌آید. آنگاه به دلیل هادی شدن عایق گازی و افزایش ناگهانی جریان تخلیه الکتریکی، ولتاژ دوسر عایق افت شدیدی پیدا می‌کند و جریان زیادی عبور می‌کند. در این حالت، بمباران سطح کاتد با یون‌های مثبت و صدور الکترون‌های ثانویه در اثر آن، عاملی برای تولید الکترون‌های آزاد بیشتری در گاز می‌شود. از این‌رو، اگر عامل خارجی یونیزاسیون نیز برداشته شود (یعنی $n = 0$ گردد)، باز هم الکtron آزاد در گاز در اثر برخورد یون‌های مثبت به سطح کاتد به وجود می‌آید و جریان تخلیه الکتریکی قطع نمی‌گردد (شکل ۱۶-۲ را ببینید). به این حالت، تخلیه الکتریکی مستقل می‌گوییم. ولتاژ لازم برای شروع تخلیه الکتریکی مستقل را ولتاژ شکست ($V_{breakdown}$) یا ولتاژ جرقه (V_{spark}) می‌گویند.

در عمل، گسترش بهمن اولیه شرایط لازم برای این امر را به وجود می‌آورد و الکترون ثانویه ممکن است بدون دخالت عامل خارجی به یکی از سه روش زیر به وجود آید:

- الف) با بمباران کاتد توسط یون‌هایی که از بهمن الکترونی اولیه ایجاد شده‌اند؛
- ب) یونیزاسیون نوری در کاتد، بر اثر تشعشعات حاصل از بهمن الکترونی اولیه؛
- ج) یونیزاسیون نوری در حجم گاز، بر اثر تشعشعات حاصل از بهمن الکترونی اولیه؛

در فشارهای پایین گاز، یونیزاسیون در کاتد

نسبت به یونیزاسیون حجمی در گاز از اهمیت بیشتری برخوردار است و این نوع یونیزاسیون در ولتاژهای پایین‌تری اتفاق می‌افتد. در فشارهای متوسط، یونیزاسیون در کاتد توسط یون‌های مثبت به زمان نسبتاً زیادی نیاز دارد و احتمال وجود یونیزاسیون نوری در کاتد هم کم است. بنابراین، یونیزاسیون حجمی در این فشارها نقش عمده‌تری ایفا می‌کند و در فشارهای زیاد، یونیزاسیون نوری در حجم گاز دارای اهمیت بیشتری است.

محاسبه جریان تخلیه الکتریکی مستقل

تعداد الکترون‌های آزاد شده از سطح کاتد به وسیله برخورد یک یون مثبت به کاتد را "ضریب یونیزاسیون دوم تانزند" می‌گویند و با γ نمایش می‌دهند. چون همه یون‌های مثبت، انرژی لازم را برای آزادسازی الکtron از سطح کاتد ندارند، بنابراین، $\gamma > 1$ است. میزان انرژی کسب شده توسط یون‌های مثبت در مقدار γ مؤثر است و چون انرژی کسب شده توسط یون‌های مثبت نیز مانند الکترون‌ها تابعی از شدت میدان الکتریکی و فشار گاز است، بنابراین:

$$\gamma = f\left(\frac{E}{P}\right) \quad (48-2)$$

علاوه بر این، γ به میزان انرژی آزادسازی الکtron از سطح فلز کاتد نیز بستگی دارد. برای فلزات مختلف، مقدار γ تغییر می‌کند. همچنین، γ به نوع گاز نیز بستگی خواهد داشت. در جدول (۵-۲) ضریب γ برای بعضی از کاتدها و گازهای مختلف ارائه شده است.

آزادسازی الکtron از سطح کاتد به وسیله یون‌های مثبت را "صدور ثانویه الکtron" می‌گویند و الکترون‌های آزاد شده آن را "الکترون‌های ثانویه" می‌گویند. جدول (۶-۲) نحوه افزایش تصاعدی الکترون‌ها را با صدور ثانویه نشان می‌دهد.

جدول (۲-۵): ضریب دوم تانزند برای بعضی از کاتدها در گازهای مختلف

جنس کاتد	آرگون	هیدروژن	هليوم	هوا	اوز	شنون
آلومینیوم	۰/۱۲	۰/۱	۰/۰۳۵	۰/۰۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲
مس	۰/۰۶	۰/۰۵	-	۰/۰۲۵	۰/۰۶۵	-
آهن	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۲۲

جدول (۲-۶): روند تخلیه الکتریکی غیرمستقل و مستقل

تعداد یون‌های متبت تولید شده	الکترون‌های رسیده به آند	خروج الکترون از سطح کاتد
n_e^{ad}	n_e	n_e
$n_e^{ad} - n_e = n_e(e^{ad} - 1)$	$n_e e^{ad}$	n_e
$n_e^{ad} + \gamma n_e (e^{ad} - 1)$	$[n_e + \gamma n_e (e^{ad} - 1)] e^{ad}$	$n_e + \gamma n_e (e^{ad} - 1)$
$n_e^{ad} + \gamma^2 n_e (e^{ad} - 1)^2$	$[n_e + \gamma n_e (e^{ad} - 1) + \gamma^2 n_e (e^{ad} - 1)^2] e^{ad}$	\dots
\dots	\dots	\dots

در نهایت، جملات ستون دوم جدول (۶-۲)، معرف الکترون‌های رسیده به آشده می‌باشد که:

$$n_A = n_0 e^{\alpha d} [1 + \gamma (e^{\alpha d} - 1) + \gamma^2 (e^{\alpha d} - 1)^2 + \dots]$$

با فرض این‌که $z = \gamma(e^{\alpha d} - 1) < 1$ باشد آنگاه سری هندسی فوق همگرا می‌شود و مجموع آن قابل محاسبه است.

$$n_A = n_0 e^{\alpha d} [1 + z + z^2 + z^3 + \dots] = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1-z} = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (49-2)$$

با ضرب کردن رابطه اخیر در باریک الکtron داریم:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (50-2)$$

اکنون ثابت می‌کنیم که شرط تخلیه الکتریکی مستقل این است که مخرج کسر مساوی صفر و یا کوچک‌تر از آن باشد؛ یعنی،

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) \leq 0 \quad (51-2)$$

در این حالت، حتی اگر عامل خارجی نیز قطع گردد، جریان الکتریکی خیلی زیاد خواهد بود که همراه با شکست الکتریکی گاز می‌شود. به منظور توجیه شرط تخلیه مستقل می‌دانیم که $(1 - e^{\alpha d})$ تعداد یون‌های مثبت تولید شده در گاز توسط یک الکترون آزاد اولیه ($n = 1$) است. در نتیجه $(1 - e^{\alpha d})^z$ ، تعداد الکترون‌های آزاد شده از سطح کاتد در اثر برخورد $(1 - e^{\alpha d})$ یون مثبت به آن است. حال اگر $= 1 = (1 - e^{\alpha d})^z$ باشد، یعنی یون‌های مثبت تولید شده به وسیله یک الکترون آزاد اولیه می‌توانند در برخورد با سطح کاتد، همواره یک الکترون از سطح کاتد صادر کند و اگر عامل خارجی هم قطع شود و یک الکترون آزاد اولیه موجود نباشد، این الکترون آزاد تولید شده می‌تواند جانشین آن شود. بنابراین، بدون عامل خارجی، تخلیه الکتریکی پایدار می‌ماند (یعنی حداقل باید $= (1 - e^{\alpha d})^z > 1$ باشد). اگر > 1 آزاد اولیه بیش از یک الکترون جدید جانشین آن می‌شود و در نتیجه، جریان تخلیه الکتریکی مستقل با مقدار زیادی برقرار می‌گردد. بنابراین، در حقیقت ≥ 1 است و سری هندسی فوق همگرا نمی‌شود و مجموع آن رو به بی‌نهایت می‌گذارد. از این‌رو، رابطه $(50-2)$ صادق نیست و یک جریان بی‌نهایت از گاز عبور می‌کند که منجر به شکست کامل گاز توأم با جرقه می‌شود.

علاوه بر یونهای مثبت، مولکولهای تحریک شده گاز نیز می‌توانند هنگام بازگشت به حالت عادی خود، فوتونهای نورانی تابش نمایند که این فوتونها در برخورد با سطح کاتد می‌توانند موجب صدور الکترون آزاد از سطح کاتد شوند و فتویونیزاسیون در داخل حجم گاز نیز می‌توانند موجب افزایش تعداد ذرات باردار داخل بهمن الکترونی شود؛ تأثیر همه عوامل فوق را در همان ضریب β منظور می‌کنند.

ولتاژ شکست گاز در میدان های الکتریکی یکنواخت (قانون پاشن)

شرط لازم را برای شروع تخلیه الکتریکی مستقل توأم با شکست کامل گاز به صورت $\gamma = f_2(E/P) = e^{\alpha d} - 1$ بیان نمودیم. در این رابطه، $\alpha = P \cdot f_1(E/P)$ و $\gamma = f_2(E/P)$ است. حال در یک میدان الکتریکی یکنواخت با ولتاژ V و فاصله بین الکترودها برابر d شدت میدان الکتریکی برابر است با:

$$E = \frac{V}{d} \quad (52-2)$$

بنابراین، خواهیم داشت:

$$f_2\left(\frac{V}{P \cdot d}\right) \left(e^{P \cdot d \cdot f_1\left(\frac{V}{P \cdot d}\right)} - 1 \right) = 1 \quad (53-2)$$

برای فشار معین P در گاز و فاصله ثابت d بین الکترودها، در یک حداقل ولتاژ معینی مانند V_b ، شرط فوق برقرار می گردد که به آن "ولتاژ شکست گاز" یا "ولتاژ جرقه گاز" می گوییم. از رابطه فوق نتیجه می گیریم که ولتاژ شکست گاز، تابعی از حاصل ضرب $P \cdot d$ است؛ یعنی:

$$V_b = f(P \cdot d) \quad (54-2)$$

این بدین معنی است که برای دو میدان الکتریکی که در یکی از آنها فاصله d بزرگ ولی فشار P کم باشد و برای دیگری بر عکس، فاصله d کوچک و فشار P زیاد باشد (به طوری که حاصل ضرب ثابت $P \cdot d = P.d$ باشد)، ولتاژ شکست در هر دو یکسان خواهد بود. این میدان‌ها را "میدان‌های مشابه" می‌گویند.

تابعیت ولتاژ شکست از حاصل ضرب $P.d$ اولین بار به وسیله آقای پاشن به طریق تجربی و با آزمایش‌های متعدد، قبل از ارائه نظریه تانزنند ثابت گردید. از این‌رو، این قانون به نام "قانون پاشن"^(۱) معروف گردیده است. حال بر اساس شرایط شکست گاز در نظریه تانزنند، ولتاژ شکست گازها را محاسبه می‌کنیم. بدین منظور داریم:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$$

با تقسیم طرفین رابطه اخیر بر γ و با انتقال (۱-) به سمت راست معادله و انتگرال‌گیری از طرفین داریم:

$$\alpha \cdot d = \ln(1 + \frac{1}{\gamma})$$

قبل‌اً ضریب یونیزاسیون اول تانزنند را به صورت $\alpha = APe^{-BP/E}$ محاسبه کردیم. در میدان‌های یکنواخت $E = V/d$ است که برای محاسبه ولتاژ شکست به جای V ولتاژ شکست V_b را جایگزین می‌کنیم. در نتیجه، با جایگذاری α و E در معادله اخیر، خواهیم داشت:

$$APde^{-BPd/V_b} = \ln(1 + \frac{1}{\gamma})$$

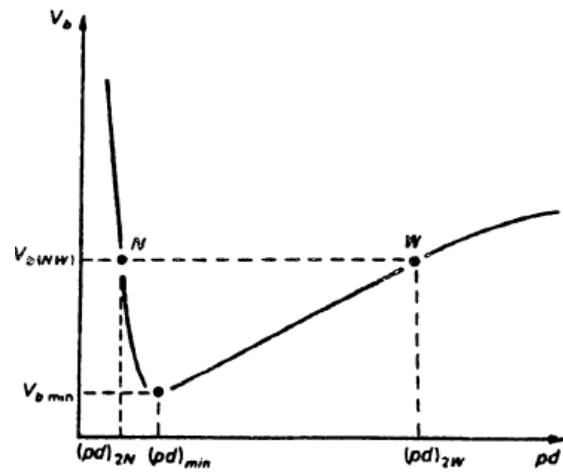
بالگاریتم گرفتن از دو طرف رابطه اخیر داریم:

$$\ln(AP.d) - \frac{BP.d}{V_b} = \ln \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right]$$

$$\frac{BP.d}{V_b} = \ln \left[\frac{AP.d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]$$

پس ولتاژ شکست گاز در میدان‌های یکنواخت برابر است با:

$$V_b = \frac{B P.d}{\ln \left[\frac{AP.d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]} \quad (55-2)$$



شکل (۲-۱۷): رابطه بین V_b - $P.d$ (منحنی پاشن)

رابطه اخیر، ولتاژ شکست را به صورت تابعی از حاصل ضرب فشار در فاصله الکترودها بیان می‌کند. ضریب γ در رابطه اخیر با بررسی‌های نظریه به راحتی قابل محاسبه نیست. علاوه بر این، مقدار آن به فشار، حرارت، شدت میدان، و حتی در فشارهای کم به جنس کاتد نیز، بستگی دارد. به همین علت، این ضریب را به طور تجربی به دست می‌آورند. برای هوا و در فشار کم، مقدار γ در حدود $(0.25 - 0.40)$ می‌باشد. اگر این معادله را روی محورهای مختصات و بر حسب $P.d$ رسم کنیم، منحنی ولتاژ شکست گاز بر حسب d مطابق شکل (۲-۱۷) برای هر گازی و برای جنس معین کاتد به دست می‌آید. به این منحنی، به اصطلاح، "منحنی پاشن" می‌گویند.

مثالاً برای گاز هوا با کاتد از جنس مس داریم:

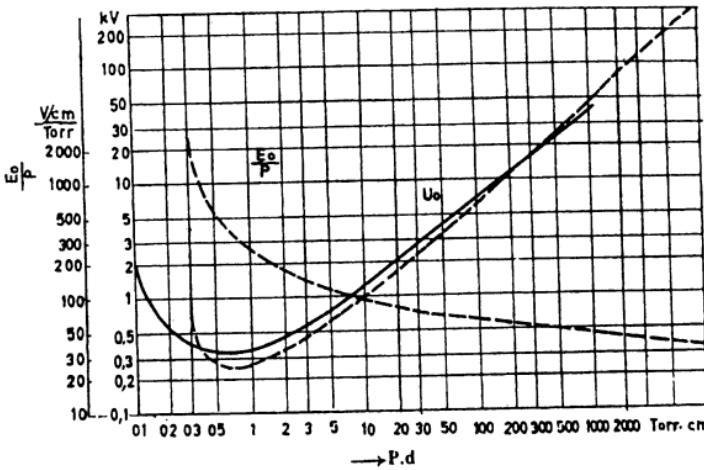
$$A = 14/6 \frac{1}{\text{cm.mmHg}}, \quad B = 365 \frac{\text{Volt}}{\text{cm.mmHg}}, \quad \gamma = 0.025$$

از شکل (۱۸-۲) در می‌باییم که حداقل ولتاژ شکست هوا در $P.d = 0.5 \text{ V cm.mmHg}$ و در ولتاژ $U_d = 325 \text{ kV}$ اتفاق می‌افتد.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نیز بسیار نزدیک به مقادیر به دست آمده از فرمول حاصل شده می‌باشند که صحبت آن را تأیید می‌کنند.

برای تعیین نقطه حداقل منحنی ارائه شده در شکل (۱۷-۲)، از رابطه (۵۵-۲) نسبت به $P.d$ مشتق می‌گیریم و آن را برابر صفر قرار می‌دهیم.

$$\frac{dV_b}{d(P.d)} = 0$$



شکل (۱۸-۲): منحنی پاشن برای گاز همگن هوا (تئوریک --- تجربی)

حداقل ولتاژ شکست به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_{bmin} = B \cdot (P.d)_{min} \quad (57-2)$$

لازم به ذکر است که هر چه فشار گاز بالاتر رود، جنس الکترودها اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. همچنان که از شکل (۱۷-۲) ملاحظه می‌شود، گازها در $P.d$ ‌های خیلی کم و $P.d$ ‌های خیلی زیاد، از استقامت الکتریکی بالایی برخوردارند و در یک معین، کمترین استقامت الکتریکی را دارند.

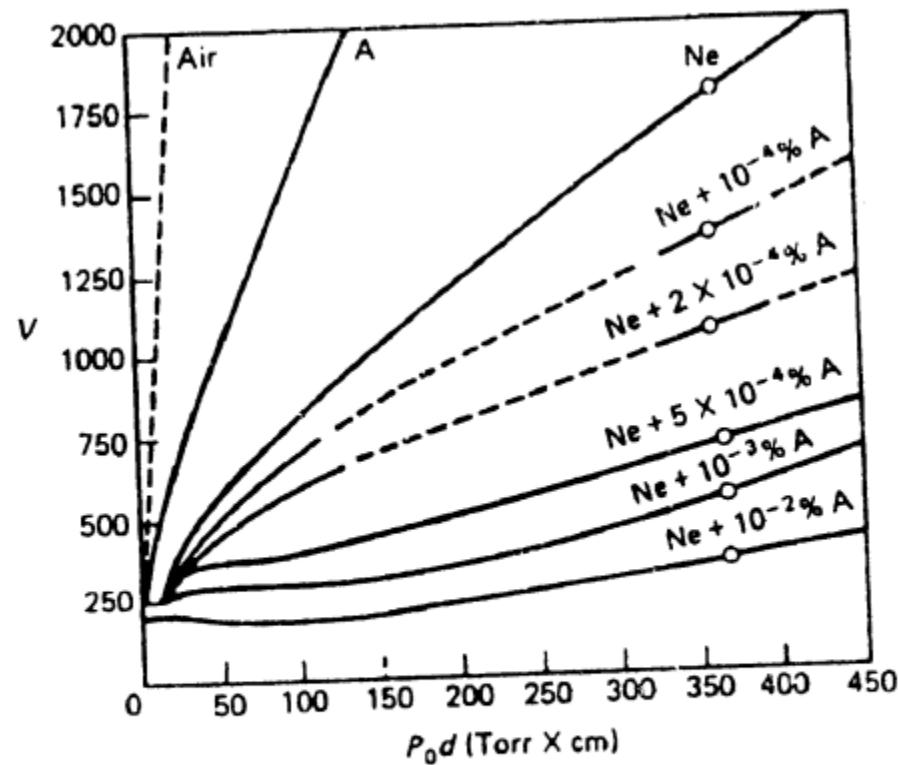
حوزهٔ صحّت قانون پاشن

قانون پاشن در محدودهٔ فشارهای خیلی زیاد و فاصله‌های خیلی زیاد بین الکترودها صادق نخواهد بود. برای هر گازی تا یک محدوده‌ای از Pd ، این قانون معتبر است که علت این موضوع، مؤثر واقع شدن ناصافی سطح قطب‌ها، صدور سرد الکترون از قطب‌ها و اثر میدان الکتریکی ناشی از بارهای الکتریکی موجود در بهمن الکترونی روی میدان الکتریکی بین قطب‌هاست.

ولتاژ شکست گازهای الکترونگاتیو

اتم‌ها و مولکول‌های بعضی از گازها خاصیت الکترون‌پذیری دارند و پس از کسب الکترون آزاد، تبدیل به یون منفی می‌شوند. اتم این گازها در مدار آخر خود، یک الکترون کم دارند و تمایل آنها به دریافت الکترون به همین دلیل است. یون‌های منفی به علت جرم زیاد، تحرک و سرعت کمتری دارند. به دلیل داشتن میانگین فاصلهٔ آزاد کوتاه‌تر (در سرعت‌های بالا، میانگین فاصلهٔ آزاد آنها، $\frac{1}{3}$ الکترون‌هاست) در یونیزاسیون نقشی را ایفا نمی‌کنند و مانند این است که آن الکترون از دست رفته باشد. بنابراین، امکان یونیزاسیون در گاز کمتر شده، موجب افزایش، استقامت عایقه، این دسته گازها می‌شود و ولتاژ شکست الکتریکی آنها نسبت به سایر گازها مقدار بیشتری خواهد بود. گاز SF_6 مهم‌ترین گاز الکترونگاتیو است و در صنعت برق مصارف زیادی به عنوان عایق گازی دارد.

ولتاژ شکست در گازهای مخلوط (اثر پنینگ^(۱۱))



شکل (۲۰-۲): منحنی ولتاژ شکست در مخلوط نئون-آرگون
در فاصله هوایی ۲cm در ${}^{\circ}\text{C}$ (اثر پنینگ)

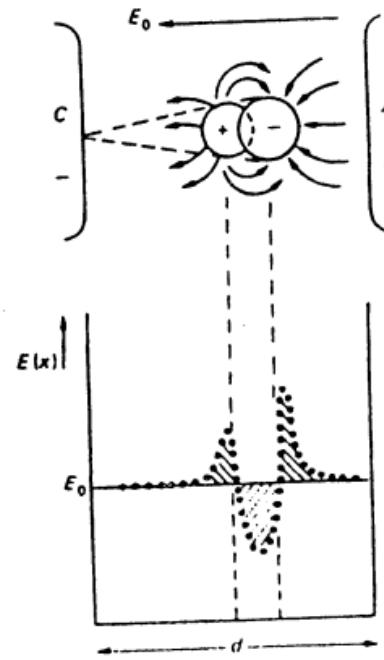
قانون پاشن در مخلوط بعضی از گازها صادق نیست. به عنوان مثال شاخصی از این نوع گازهای مخلوط، می‌توان به مخلوط گازهای نئون و آرگون اشاره کرد. با اضافه کردن مختصری گاز آرگون به گاز نئون، ولتاژ شکست گاز مخلوط از ولتاژ شکست هر یک از گازها به تنها یک کمتر است و هر چه درصد آرگون اضافه شده بیشتر شود، ولتاژ شکست گاز مخلوط کمتر می‌شود؛ به طوری که با اضافه کردن ۱۰٪ گاز آرگون به نئون، ولتاژ شکست با تغییر فشار گاز چندان تغییر نمی‌کند. این موضوع در شکل (۲۰-۲) نشان داده شده است. از این خاصیت در لامپ‌های نئون استفاده می‌شود. در این لامپ‌ها، تغییر فشار داخلی لامپ در خط تولید باعث تغییر شدید ولتاژ شکست گاز نمی‌شود. علت این امر مربوط به اهمیت یافتن یونیزاسیون مرحله‌ای در مخلوط دو گاز است.

رشد عامل‌های بار در یک بهمن الکترونی، در میدانی یکنواخت ($E=V/d$) با $e^{\alpha d}$ توصیف شده است. این موضوع تا وقتی معتبر است که بتوان از میدان‌های الکتریکی مربوط به بارهای فضای الکترون‌ها و یون‌ها در مقایسه با میدان خارجی E صرف نظر کرد. نظریه تانزند بر مبنای انتشار الکترون‌های ثانویه از کاتد بر اثر بمباران آن توسعه یون‌های مثبت استوار است و مشاهده کردیم که به علت تحرک کم یون‌ها، این امر به زمانی حدود چند میکرو ثانیه نیاز دارد. لیکن در عمل و به ویژه در فشارهای بالاتر گاز، شکست الکتریکی بسیار سریع تر رخ می‌دهد. از طرفی در نظریه تانزند، افزایش جریان و تخلیه الکتریکی به شکل الکترودها مربوط نمی‌شود. همچنین در حالی که نظریه تانزند شکل منظم و گسترده‌ای را برای تخلیه الکتریکی ارائه می‌کند، در عمل این پدیده به صورت کانال‌های باریک و نامنظم جرقه مشاهده می‌شود. بنابراین، نظریه تانزند از توجیه این مشاهدات باز می‌ماند. بنابراین، نظریه استریمر برای توجیه شکست گازها در این حالات ارائه گردیده است که به صورت‌های مختلفی توسعه دانشمندانی مانند آقایان لوب^(۲)، میک^(۳)، و رائدر^(۴) ارائه شده است. در نظریه‌های استریمر، تخلیه الکتریکی مستقیماً به وسیله یک بهمن الکترونی و فتویونیزاسیون داخل گاز توجیه می‌شود. بنابراین، تخلیه الکتریکی بدون

نیاز به انتشار ثانویه الکترون‌ها از کاتد و تنها از طریق تشدید یونیزاسیون حجمی در جلو بهمن الکترونی صورت می‌گیرد؛ اما این فرآیند نیاز به میدان الکتریکی شدیدی دارد که با توجه به فرض یکنواختی میدان الکتریکی در فاصله بین الکتروودها باید به توجیه آن پرداخت. بر اساس نظریه استریمر وقتی که تعداد الکترون‌های آزاد داخل یک بهمن الکترونی تشکیل شده در داخل گاز، به حدود 10^{+8} یا بیشتر می‌رسد، خود بهمن الکترونی، ایجاد یک میدان الکتریکی بسیار قوی می‌کند که آن موجب تشویش در میدان خارجی اعمال شده به گاز (بین الکتروودها) می‌شود. در جلو بهمن الکترونی، میدان اصلی با میدان حاصل از الکترون‌ها طبق شکل (۲۱-۲) هم جهت است. بنابراین، میدان منتجه تقویت می‌شود. کمی عقب‌تر در وسط بهمن میدان الکتریکی، بین الکترون‌ها و یون‌های بهمن الکترونی در خلاف جهت میدان اصلی است و میدان منتجه تضعیف می‌شود. در قسمت پشت بهمن، باز میدان حاصل از یون‌های بهمن با میدان اصلی هم جهت است و سبب تقویت میدان منتجه می‌شود؛ اما به دلیل

پراکندگی بیشتر یون‌ها، میدان منتجه در این ناحیه از ناحیه جلو ضعیفتر خواهد بود.

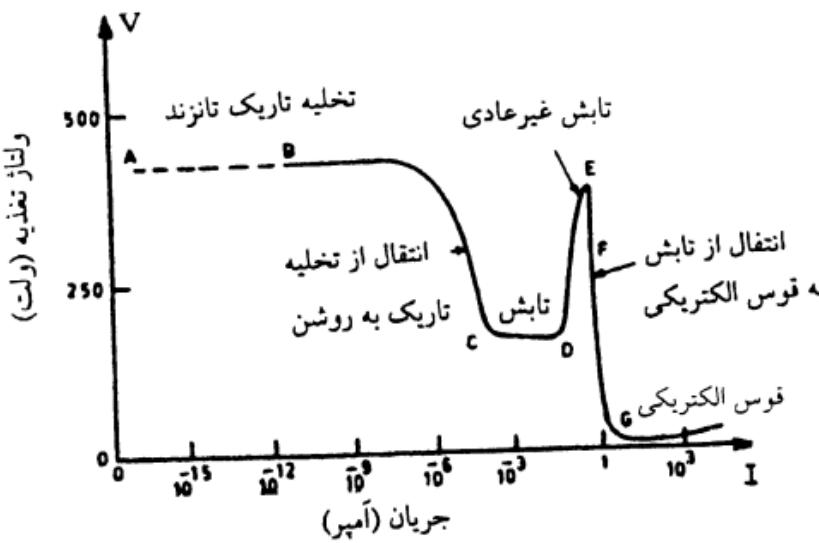
اعوجاج در میدان الکتریکی وقتی قابل ملاحظه است که تعداد الکترون‌های داخل بهمن حداقل به 10^{+8} رسیده باشد. در این صورت، میدان‌ها در جلو و پشت بهمن به حدود میدان الکتریکی خارجی E_0 می‌رسند؛ در غیر این صورت، چون بعد بهمن الکترونی کوچک است، اعوجاج در میدان فقط در یک منطقه خیلی کوچک مجاور بهمن اتفاق می‌افتد و اثر مهمی ندارد.



شکل (۲۱-۲): نموداری از اغتشاش میدان در یک فاصله هوایی به سبب بار فضای بهمن الکترونی

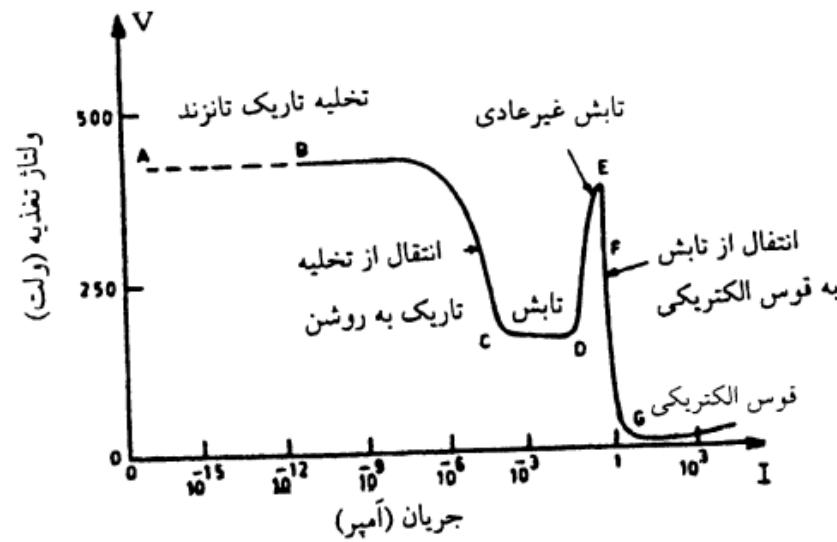
پدیده پس شکست و کاربردها

پس شکست^(۱۱)، پدیده‌ای است که پس از شکست الکتریکی در گاز رخ می‌دهد و به لحاظ فنی دارای اهمیت زیادی است. تابش و قوس الکتریکی، پدیده‌های پس شکست هستند و دستگاه‌های زیادی در این ناحیه فعالیت می‌کنند. در تخلیه تانزند (مطابق با شکل ۲۶-۲)، جریان به صورت تابعی از ولتاژ اعمال شده است که به تدریج زیاد می‌شود و این افزایش جریان تا نقطه B ادامه می‌یابد. در این نقطه، تخلیه تانزند به سمت تابش پیش می‌رود و در ناحیه B تا C، تخلیه غیرمستقل انجام می‌شود. در نقطه C تا D، جریان، مقداری افزایش و ولتاژ الکترودها اندکی کاهش می‌یابد و از نقطه D تا E، دوباره ولتاژ شروع به افزایش می‌کند. در نقطه E به بعد، با افزایش جریان، ولتاژ افت ناگهانی دارد (E-G). پدیده‌ای که در ناحیه C تا G رخ می‌دهد، پدیده پس شکست است که از ناحیه تابش (C-E) و ناحیه قوس الکتریکی (E-G) تشکیل می‌شود.



شکل (۲۶-۲): دیاگرامی از نواحی مختلف تخلیه

اگر جریان فضای الکترودها به حدود $1A$ یا بیشتر افزایش یابد، ولتاژ به طور ناگهانی به حدود 20 تا 50 ولت کاهش می‌یابد. این تخلیه به صورت درخسان و مغشوش ظاهر می‌شود (ناحیه E-G) که این مرحله را "قوس تخلیه" می‌گویند. در این تخلیه، چگالی جریان ناحیه کاتد به حدود 10^3 تا $10^7 A/cm^2$ می‌رسد. همچنین درجه حرارت قوس زیاد در حدود $1000^\circ C$ تا چند هزار درجه سانتیگراد است. قوس ایجاد شده، دارای چگالی زیادی از الکترون‌ها و یون‌هاست که "پلاسمای نامیده می‌شود. مطالعه قوس در کلیدهای قدرت (دژنگتورها) و دیگر کلیدهای اهمیت فراوانی دارد. قوس الکتریکی، یک منبع حرارتی با دمای بالا و منبع نوری شدید است که از آن در جوشکاری و برش فلزات استفاده می‌شود. همچنین در لامپ‌های کربنی به عنوان منبع نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. پلاسمای با حرارت زیاد، برای تولید برق در هیدرومگنو دینامیک‌ها (MHP) و یا فرآیند پیوند هسته‌ای به کار می‌رود.



شکل (۲-۲): دیاگرامی از نواحی مختلف تخلیه