به نام خدا

عایق و فشار قوی

فصل دوم
عایق های گازی

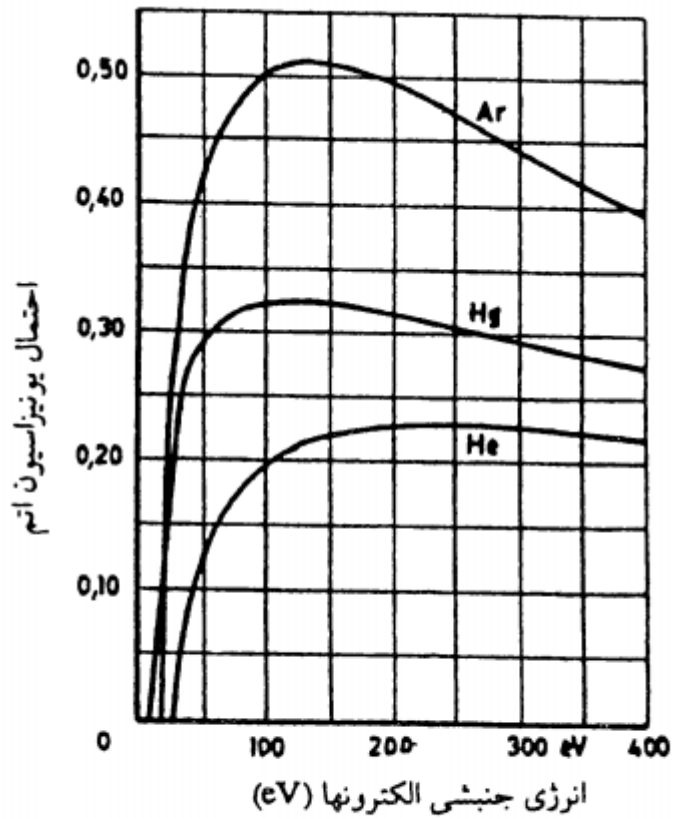
مدرس:
بهروز آدینه

زمستان ۹۴

احتمال یونیزاسیون در اثر برخورد

بالا رفتن سرعت ذرّهٔ محرّک (الکترون) در گاز، احتمال برخوردها را زیاد می‌کند؛ یعنی تعداد بیشتری از اتم‌ها شانس یونیزاسیون خواهند داشت و الکترون‌های آزاد بیشتری ایجاد می‌گردد. البتّه تجربه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این افزایش الکترون‌های آزاد، تا سرعت معیّنی است و از آن پس با زیادتر شدن سرعت (یعنی اضافه شدن انرژی الکترون‌ها)، احتمال یونیزاسیون کاهش می‌یابد. علّت این موضوع را می‌توان بدین صورت بیان نمود که در بر خورد یک الکترون با یک اتم، میدان‌های الکترومغناطیسی آن‌ها، یکدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مورد الکترون‌های با سرعت‌های خیلی زیاد، مدّت تأثیر این میدان‌ها بسیار کم می‌شود؛ یعنی انرژی انتقال یافته به اتم، بسیار کوچک خواهد بود.

به‌عبارت دیگر، با افزایش سرعت، مدّت زمان برخورد کاهش یافته، فرصت لازم برای انتقال انرژی و جدا کردن الکترون ایجاد نمی‌شود. شکل (۲-۳)، احتمال یونیزاسیون را بر حسب انرژی جنبشی الکترون‌ها (بر حسب eV) نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳): احتمال یونیزاسیون در اثر برخورد با الکترون‌ها به‌عنوان تابعی از انرژی جنبشی الکترون‌ها

یونیزاسیون ضربه‌ای مرحله‌ای

عموماً یونیزاسیون ضربه‌ای به‌شکل مرحله‌ای و به روش‌های زیر امکان‌پذیر است:

الف) الکترونی (e_1) که انرژی کم‌تری از انرژی لازم برای یونیزاسیون (W_i) دارد، با اتم خنثی (A_1) برخورد می‌کند و الکترونی از آن را به مدار دورتری از هسته انتقال می‌دهد. حال چنانچه الکترون دیگری (e_2) این اتم تحریک شده (A_1^*) را مورد اصابت قرار دهد و انرژی خود را نیز به آن منتقل سازد، اتم پس از این اصابت و یا اصابت‌های بعدی، یونیزه شده، به الکترون (e) و یون مثبت ($\oplus$) تقسیم می‌شود. بدیهی است که در اینجا شرط لازم و کافی برای وقوع پدیدهٔ یونیزاسیون ضربه‌ای مرحله‌ای، زمان‌های بمباران و اصابت‌های متوالی است که باید حدّاقل کوتاه‌تر از زمان پایداری الکترون روی مداری غیر از مدار اصلی خود باشد. از اینجا اهمّیت حالات اتم تحریک شده با زمان ناپایداری بزرگ‌تر، در امکان دادن به تخلیهٔ الکتریکی گازها روشن می‌شود؛ زیرا در این حالات، الکترون به مدّت زمان 10^{-2} ثانیه روی مدار باقی می‌ماند. در روابط زیر، علامت KE مخفّف انرژی جنبشی[1] است.

$$e_1 + KE + A_1 \Rightarrow e_1 + A_1^* \quad \text{(برخورد نوع اوّل)}$$

$$A_1^* + e_2 + KE \Rightarrow \oplus + e + e_2 \quad \text{(برخورد نوع اوّل)}$$

1- Kinetic Energy

ب) بر اثر اصابت یک الکترون آزاد شده (e_1)، با یک اتم تحریک شده در حال برگشت (A_1^*)، اتم، انرژی از خارج گرفتهٔ خود را به الکترون می‌دهد و خود به‌حالت اصلی (A_1) باز می‌گردد. الکترون با گرفتن این انرژی، سرعت بیشتری می‌گیرد و با اصابت بعدی با اتم خنثای دیگری (A_2)، آن را یونیزه می‌کند.

$e_1 + KE + A_1^* \Rightarrow e_1 + KE + A_1$ (برخورد نوع دوم)

$A_2 + e_1 + KE \Rightarrow \oplus + e + e_1$ (برخورد نوع اوّل)

ج) بر اثر برخورد دو اتم تحریک شده با هم (A_1^* و A_2^*) که یکی از آن‌ها در حالت بازگشت به حالت عادی است، انرژی از اتم تحریک شده در حال برگشت، به اتم دیگر منتقل شده، در صورت تأمین انرژی یونیزاسیون، اتم تحریک شده، یونیزه می‌شود.

$A_1 + e_1 + KE \Rightarrow A_1^* + e_1$ (برخورد نوع اوّل)

$A_2 + e_2 + KE \Rightarrow A_2^* + e_2$ (برخورد نوع اوّل)

$A_1^* + A_2^* \Rightarrow \oplus + e + A_2$ (برخورد نوع دوم)

اصابت‌هایی که در آن‌ها یونیزاسیون با انتقال انرژی جنبشی یک ذرّه به ذرّهٔ دیگری انجام می‌شود، اصابت یا برخورد نوع اوّل نام دارد و یونیزاسیون‌هایی که بر اثر برخورد ذرّات و انتقال انرژی پتانسیل یکی به دیگری انجام می‌گیرد، برخورد نوع دوم نام می‌گیرند.

یونیزاسیون نوری

عامل مؤثّر دیگر برای ایجاد ذرّات با بار الکتریکی، یونیزاسیون نوری می‌باشد؛ بدین معنی که یونیزاسیون به‌وسیلهٔ تأثیر نور با طول موج‌های کوتاه انجام می‌گیرد. امواج نورانی با طول موج‌های کوتاه، دارای انرژی زیادی هستند که می‌توانند بر انرژی یونیزاسیون گازها غلبه کنند. برای آنکه تابش نور بر گاز، به یونیزاسیون آن منجر شود، لازم است تا انرژی نورانی (که طبق قانون پلانگ برابر فرکانس نور (f) ضرب در عدد ثابت پلانک (h) می‌باشد)، بزرگ‌تر از انرژی لازم برای یونیزاسیون گاز (W_i) باشد. یعنی،

$$h \cdot f \geq W_i$$

اگر طول موج نور را با λ نشان دهیم، با توجّه به رابطهٔ $\lambda = C/f$ خواهیم داشت:

$$\lambda \leq \frac{C \cdot h}{W_i}$$

در این معادله $C = ۳ \times ۱۰^{۸}$ m/sec سرعت نور است. برای مثال، در مورد بخار سزیم که حدّاقل انرژی یونیزاسیون $W_i = ۳/۸۸$ eV را در بین سایر گازها دارد، حدّاکثر طول موج نوری که بتواند آن را یونیزه کند عبارت است از:

$$\lambda = \frac{۳ \times ۱۰^{۸} \times ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}}{۳/۸۸ \times ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}} = ۳/۱۸۹ \times ۱۰^{-۷} \text{ m} = ۳۱۸۹ \text{ A}^{\circ}$$

چنین طول موجی در محدودهٔ ماوراء بنفش قرار دارد. برای سایر گازها، به‌دلیل داشتن انرژی یونیزاسیون بیشتر، طول موج مورد نیاز، کم‌تر از مقدار فوق خواهد بود. بنابراین، نورهای مرئی (که طول موج آن‌ها بین ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ انگستروم A° است)، عملاً قادر به یونیزه کردن این گاز و سایر گازها نیستند. منابع معمولی تولید اشعهٔ ماوراء بنفش (لامپ‌های جیوه، کوارتز و غیره) طول موجشان کم‌تر از ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ انگستروم نیست. بنابراین، این منابع تنها قادر به یونیزه کردن گازهایی هستند که انرژی یونیزاسیون آن‌ها از ۶ تا ۸ الکترون‌ولت تجاوز نکند. امّا اغلب گازها دارای انرژی یونیزاسیون بیشتری هستند و بنابراین، به‌وسیلهٔ نور ماوراء بنفش قابل یونیزاسیون نمی‌باشند. امّا در عمل، بنابر دلایلی که ذکر می‌شود، یونیزاسیون نوری در اغلب گازها انجام‌پذیر است:

الف) همانند یونیزاسیون ضربه‌ای، مولکول و یا اتم گاز به‌طور متواتر، نور ساطع شده از اتم تحریک شده‌ای را که به حالت اصلی و معمولی خود باز می‌گردد، دریافت نموده و بالاخره یونیزه شود؛

ب) یک اتم تحریک شده و یک اتم تحریک نشده با هم مولکولی را تشکیل می‌دهند که انرژی یونیزاسیون آن از انرژی یونیزاسیون یک اتم کم‌تر است؛

ج) دلیل دیگر، وجود ذرّات خارجی معلّق در گاز، همانند گرد و غبار و رطوبت است که برای جدا شدن الکترون‌ها از مولکول‌های سطحی این ذرّات، انرژی کم‌تری از انرژی یونیزاسیون گاز لازم است و بر اثر برخورد فوتون‌ها با این ذرّات، الکترون‌های آزاد ایجاد می‌شوند؛

د) علاوه بر امواج ماوراء بنفش، امواج رادیواکتیو، اشعهٔ x، اشعهٔ گاما، و اشعه‌های کیهانی که در فرکانس‌های بالا (طول موج‌های کوتاه) بوده و انرژی زیادی دارند، قادر به یونیزاسیون نوری گازها هستند. در نتیجه، وجود تعداد کمی الکترون آزاد در کلّیهٔ گازها، به‌دلیل آن است که گازها به‌اندازهٔ بسیار کمی در معرض اشعه‌های کیهانی (که کم و بیش از خارج جو وارد جو زمین می‌شوند)، قرار می‌گیرند و تعداد کمی از اتم‌ها را یونیزه می‌کنند.

یکی از منابع مهّم یونیزاسیون نوری در گازها، برگشتن یون‌ها و مولکول‌های تحریک شده به وضعّیت عادی است. در این شرایط، مقدار زیادی فوتون‌های نوری آزاد می‌شوند که تعداد زیادی از آن‌ها انرژی لازم را برای یونیزاسیون گاز دارا هستند. چنان‌که بعداً خواهیم دید، این فوتون‌ها نقش بسیار مهمّی را در توسعه تخلیهٔ الکتریکی ایفا می‌کنند. یونیزاسیون نوری عامل مهمی در مکانیزم شکست الکتریکی تانزند[۱]، پدیدهٔ استریمر[۲] و پدیدهٔ کرونا[۳] است که در ادامهٔ این فصل، آن‌ها را بررسی خواهیم کرد.

1- *Townsend Breakdown*

2- *Streamer Phenomena*

3- *Corona Phenomena*

یونیزاسیون حرارتی

به‌طور کلی، لفظ یونیزاسیون حرارتی، به یونیزاسیون حاصل از برخوردهای مولکولی و تشعشع و برخوردهای الکترونی به‌وجود آمده در گازهای با دمای بالا اطلاق می‌شود. یونیزاسیون حرارتی بیشتر در جرقه‌های شدید و شعله‌های اتش حاصل می‌شود.

در صورتی‌که درجه حرارت گاز خیلی زیاد باشد، سرعت ذرّات داخل گاز زیاد شده، در اثر انرژی جنبشی زیاد، مولکول‌ها می‌توانند در برخوردها انرژی یونیزاسیون را تأمین نمایند. البتّه این نوع یونیزاسیون، زمانی اتّفاق می‌افتد که درجهٔ حرارت گاز، چندین هزار درجهٔ سانتیگراد باشد که وقتی این حالت پیش می‌آید که جریان الکتریکی عبوری از گاز، خیلی زیاد باشد. در این صورت، مقدار زیادی از انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و در نتیجه، گاز را به شدّت گرم می‌کند (مانند شعله‌ها و قوس‌ها).

در قانون کلاسیک گازها ثابت می‌شود که برای ذرّه‌ای با جرم m، سرعت متوسّط V، و درجه حرارت T، در گاز رابطه‌ای به‌صورت زیر برقرار است :

$$\frac{۱}{۲} mV^{۲} = \frac{۳}{۲} KT \qquad (۱۶-۲)$$

در این رابطه، K ثابت بولتزمن و برابر $K = ۱/۳۸۰۴ \times ۱۰^{-۲۳}$ J/°K است. بنابراین، با افزایش درجهٔ حرارت گاز، سرعت حرکت مولکول‌ها زیادتر می‌شود و امکان این‌که ذرّات با سرعت زیاد و انرژی جنبشی در حدّ انرژی یونیزاسیون گاز به‌وجود آید، بیشتر می‌شود. همزمان با یونیزه شدن اتم‌های خنثای گاز، ترکیب مجدّد در اثر برخورد الکترون‌ها و یون‌ها نیز صورت می‌گیرد. اگر در هر لحظه، تعادلی بین ذرّات یونیزه شده و ترکیبات مجدّد صورت بگیرد، در آن‌صورت چگالی ذرّات باردار ثابت می‌ماند. بدیهی است با افزایش درجه حرارت، چگالی ذرّات باردار بیشتر خواهد شد. در حالت تعادل، درجهٔ یونیزاسیون θ نشان دهندهٔ نسبت تعداد مولکول‌های یونیزه شده در واحد حجم گاز به تعداد کلّ مولکول‌های گاز در واحد حجم گاز است. مقدار این درجهٔ یونیزاسیون، از رابطهٔ ساها[۱۱] به‌دست می‌آید:

$$\frac{\theta^{۲}}{۱-\theta^{۲}} = \frac{۱}{P} \frac{(۲\pi m_e)^{\frac{۳}{۲}}}{n} (KT)^{\frac{۵}{۲}} e^{-\frac{W_i}{KT}} \qquad (۱۷-۲)$$

1- *Saha Equation*

$$\frac{\theta^2}{1-\theta^2} = \frac{1}{P}\frac{(2\pi m_e)^{\frac{3}{2}}}{n}(KT)^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{W_i}{KT}} \qquad (۱۷-۲)$$

یا،

$$\frac{\theta^2}{1-\theta^2} = \left[\frac{2/4\times 10^{-4}}{P}\right]\left[T^{2/5}\right]\left[e^{-\frac{W_i}{KT}}\right] \qquad (۱۸-۲)$$

در این روابط، $\theta = \frac{N_i}{N}$ درجهٔ یونیزاسیون گاز (N_i تعداد مولکول‌های یونیزه شده در واحد حجم و N تعداد کلّ مولکول‌ها در واحد حجم)، P فشار گاز بر حسب mmHg ، W_i انرژی یونیزاسیون گاز بر حسب J و K ثابت بولتزمن است. از رابطهٔ (۲-۱۸) درمی‌یابیم که در درجه حرارت معمولی، یونیزاسیون حرارتی ناچیز است و تنها در درجه حرارت‌های بالاتر از ۱۰۰۰°K به حدّ قابل ملاحظه‌ای می‌رسد.

یونیزاسیون سطحی

تاکنون از تشکیل الکترون‌ها و یون‌ها بر اثر یونیزاسیون در حجم گاز صحبت کردیم. امّا الکترودهایی که گاز مورد نظر به‌عنوان عایق الکتریکی، فضای بین آن‌ها را پر کرده است (به‌ویژه کاتد)، نقش بسیار مهمّی را در تخلیهٔ الکتریکی ایفا می‌کنند. علّت این موضوع آن است که الکترون‌ها می‌توانند تحت شرایطی از سطح الکترودها خارج شوند که این را یونیزاسیون سطحی می‌نامند. این الکترون‌ها در شروع یونیزاسیون حجمی گاز، تخلیهٔ الکتریکی و نگهداشتن آن، و تکمیل قوس الکتریکی بسیار مؤثّرند. در شرایط عادی، نیروهای الکترواستاتیکی بین الکترون‌ها و یون‌های شبکهٔ مولکولی فلز الکترودها، مانع از خروج الکترون‌ها می‌شوند؛ بنابراین، برای جدا شدن الکترون‌ها از سطح الکترود، باید مقدار معیّنی کار انجام شود. انرژی لازم برای این امر را انرژی آزادسازی (خروج) (W_a) می‌گویند که این انرژی، به جنس و وضعیّت سطح الکترودها بستگی دارد. الکترون‌های آزاد یک فلز در میدان الکتریکی شبکهٔ کریستالی (که از یون‌های مثبت تشکیل شده است) واقع شده‌اند. این میدان در داخل فلز دارای پتانسیل ثابت U_0 است. این پتانسیل، محدود به داخل فلز بوده، در خارج از فلز وجود ندارد. با توجّه به این‌که این میدان به‌وسیلهٔ یون‌ها (که دارای بار الکتریکی مثبت هستند) پدید می‌آید و همچنین با توجّه به منفی بودن بار الکتریکی الکترون‌ها، انرژی پتانسیل در داخل فلز، منفی خواهد بود و مقدار آن برابر با $E_0=-eU_0$ است. این انرژی در خارج از فلز در حالی که میدان الکتریکی خارجی

موجود نباشد، برابر صفر خواهد بود. بنابراین، انرژی (پتانسیل) الکترون خارج از فلز، بزرگ‌تر از انرژی آن در داخل فلز بوده و تغییر این انرژی در سطح فلز جهشی است. با این تعریف می‌توان در روی سطح فلز به اصطلاح "پلّه‌ای از انرژی" تصوّر کرد که الکترون در موقع خروج خود از فلز باید از آن بگذرد و چون الکترون‌ها در فلز از همه سو به‌وسیلهٔ چنین پلهٔ انرژی محصور است، پس اصطلاحاً می‌توان گفت که الکترون‌های آزاد روی یک فلز در یک "گودال پتانسیل" با عمقی برابر U_0 قرار گرفته‌اند که نمی‌توانند بدون کمک انرژی خارجی، از فلز خارج گردند. جدول (۲-۲) انرژی خروجی الکترون را برای تعدادی از فلزها نشان می‌دهد. مقادیر بزرگ‌تر در این جدول، متعلّق به فلزهای کاملاً خالص است که از طریق شیمیایی و آزمایشگاهی به‌دست آمده‌اند.

جدول (۲-۲): انرژی آزاد سازی الکترون در چندین فلز مختلف

نام فلز	انرژی لازم برای خارج ساختن الکترون بر حسب الکترون‌ولت
ناتریم	۲/۱۲ – ۲/۲۸
آلومینیوم	۱/۷۷ – ۳/۹۵
مس	۳/۸۹ – ۴/۸۲
اکسید مس	۵/۳۴
نقره	۳/۰۹ – ۴/۷۴
طلا	۴/۳۳ – ۴/۹۰
آهن	۳/۹۲ – ۴/۷۹
نیکل	۳/۶۸ – ۵/۰۲
پلاتین	۳/۶۳ – ۶/۳۰
اکسید باریم	۱/۰۰
وانادیم	۰/۷۱

انرژی لازم برای صدور الکترون از فلز را می‌توان از طریق راه‌های زیر به فلز منتقل نمود:

الف) انتشار فتوالکتریکی[1] یا یونیزاسیون سطحی نوری: فوتون‌هایی که دارای انرژی بیش از انرژی آزادسازی باشند ($h.f \geq W_a$)، در برخورد با الکترودها می‌توانند الکترون از آن‌ها خارج کنند (انرژی فوتون‌ها به فرکانس نور مورد نظر بستگی دارد). برای بیشتر فلزات، فرکانس f در محدودهٔ امواج ماوراء بنفش قرار دارد؛ در حالی‌که انرژی فوتون بیش از انرژی آزاد سازی باشد، مازاد انرژی ممکن است به انرژی جنبشی الکترون تبدیل شود که،

$$\frac{1}{2} m_e V_e^2 = h.f - h.f_0 \qquad (19-2)$$

که m_e جرم الکترون و V_e سرعت آن، و $h.f_0$ انرژی حدّی لازم برای صدور الکترون از کاتد ($h.v_0 = W_a$) می‌باشد.

1- *Photo Electric Emission*

ب) انتشار الکترون بر اثر بمباران سطح کاتد به‌وسیلهٔ یون‌ها و اتم‌های تحریک شده: انرژی یون‌هایی که به سمت کاتد می‌روند از دو مؤلّفهٔ انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل تشکیل شده‌اند. یون‌ها این انرژی‌ها را در زمان پدید آمدن (بر اثر یونیزه شدن اتم)، به‌دست می‌آورند. اگر انرژی جنبشی یون، در موقع برخورد به سطح کاتد زیاد باشد، می‌تواند الکترون‌هایی را از آن جدا کند و آزاد سازد؛ لیکن یون‌های با سرعت کم (که فاقد انرژی جنبشی کافی برای یونیزاسیون سطحی است)، در موقع برخورد به سطح کاتد، الکترون‌ها را به‌وسیلهٔ انتقال انرژی پتانسیل خود آزاد می‌سازد. این امر وقتی عملی است که انرژی پتانسیل یون (که برابر انرژی یونیزاسیون W_i است) حدّاقل دو برابر انرژی لازم برای خروج الکترون باشد. یعنی،

$$W_k + W_p \geq ۲W_a \qquad (۲۰-۲)$$

که W_k و W_p به ترتیب انرژی جنبشی و پتانسیل یون می‌باشند. البتّه به دلیل سرعت کم یون‌ها، انرژی پتانسیل یون که از طریق ترکیب مجدّد آزاد می‌شود، نقش عمده‌تری دارد. وقتی انرژی پتانسیل یون مثبت آزاد می‌گردد که این یون با یک الکترون، مجدّداً تشکیل اتمی بدهد؛ بدین معنی که وقتی یک الکترون آزاد در سطح کاتد روی آخرین مدار یک یون قرار می‌گیرد، انرژیی برابر اختلاف انرژی یونیزاسیون با انرژی خروجی الکترون ($W_i + W_a$) آزاد می‌شود. این اختلاف انرژی که برابر با انرژی خروجی W_a است به الکترون آزاد دومی انتقال یافته و آن را از سطح فلز جدا می‌سازد. این الکترون پس از جدا شدن از سطح فلز، وارد میدان

الکتریکی شده، بنابر قانون کولمب، جذب آند می‌گردد. با نگاهی به جدول (۲-۱) و (۲-۲)، دیده می‌شود که انرژی یونیزاسیون گاز، اکثراً بیش از دو برابر انرژی خروجی الکترون از سطح کاتد است. بنابراین، شرط لازم اشاره شده در بالا ($W_i \geq 2W_a$) یا ($W_k + W_p \geq 2W_a$) درست است؛ لیکن نباید از آن‌چه گفته شد نتیجه گرفت که هر یون با اصابت روی سطح کاتد، الکترونی را از آن آزاد می‌سازد؛ زیرا احتمال آن‌که انرژی داده شده به‌وسیلهٔ یون صرف آزاد شدن الکترونی شود بسیار کم است که در حدود ۱٪ تا ۲٪ می‌باشد. بنابراین، در برخورد هر یون مثبت با سطح فلز، الکترون آزاد نمی‌شود. با آن‌که تاکنون نحوهٔ انتقال انرژی یون مثبت به الکترون‌های آزاد فلز کاملاً روشن نشده است، این واقعیت که انرژی یون در آزاد ساختن الکترون‌ها مؤثّر است، قابل قبول همگان است. لازم به ذکر است که در این میان آن قسمت از انرژی جنبشی یون که باقی می‌ماند، به‌وسیلهٔ مولکول‌های خنثی در فلز جذب می‌شود، الکترون‌های آزاد شده از سطح کاتد (به‌وسیلهٔ یون) دارای سرعت اولّیهٔ کمی هستند.

ج) **انتشار حرارتی**[۱]: در فلزات و در درجهٔ حرارت معمولی، الکترون‌ها انرژی لازم برای ترک سطح الکترودها را ندارند. اگر الکترون‌های گاز را در درجه حرارت معمولی در نظر بگیریم، آنگاه انرژی متوسّط حرارتی آن‌ها به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\frac{1}{2}mV^2 = \frac{3}{2}KT = 3/8 \times 10^{-2}\,(\text{eV}) \qquad (۲-۲۱)$$

این مقدار انرژی، خیلی کم‌تر از انرژی آزادسازی (که در جدول (۲-۲) آورده شده است) می‌باشد. در صورتی‌که درجه حرارت فلز به ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ درجه کلوین افزایش یابد، الکترون‌ها از جنبش‌های حرارتی شبکهٔ فلز، انرژی کافی را به‌دست می‌آورند. در نتیجه از سد پتانسیل فلز (سطح فلز)، می‌گذرند و سطح آن را ترک می‌کنند. این طریق صدور الکترون از فلز کاتد را "صدور گرم الکترون"[۲] می‌گویند. جریان انتشار الکترون، به درجه حرارت فلز بستگی دارد و چگالی آن از رابطهٔ "ریچاردسون"[۳] به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$J_s = \frac{4\pi m_e e K^2}{h^3} T^2 e^{-\frac{W_a}{KT}} \quad \text{Amp/m}^2 \qquad (۲-۲۲)$$

که e و m_e بار و جرم الکترون، h ثابت پلانک، K ثابت بولتزمن، T درجه حرارت مطلق، و W_a انرژی آزادسازی است. اگر $A = \frac{4\pi m_e e K^2}{h^3}$ باشد، آنگاه با جای‌گذاری این مقادیر ثابت داریم:

$$A = 120 \times 10^4 \ \text{Am}^{-2}\text{deg}^{-2}$$

$$J_s = A T^2 e^{-\frac{W_a}{KT}} \quad \text{Amp/m}^2 \qquad (۲-۲۳)$$

این رابطه نشان می‌دهد که چگالی جریان با افزایش درجه حرارت، زیاد شده، با افزایش انرژیِ آزاد سازی، کم می‌شود.

1- *Thermionic Emission* 2- *Electron Emission*

3- *Richardson*

د) انتشار الکترون بر اثر شدّت میدان قوی: میدان الکترواستاتیکی قوی هم می‌تواند موجب خروج الکترون‌ها از سطح کاتد شود؛ زیرا میدان الکتریکی قوی در سطح الکترودها، تراز پتانسیل را در سطح فلز الکترود تغییر می‌دهد. و امکان خروج الکترون‌ها را فراهم می‌سازد. این امر به "اثر تیونل[۱۱]" معروف است. صدور الکترون از فلز کاتد را با این روش، "صدور سرد الکترون" می‌گویند. برای ایجاد جریان انتشاری حدود چند میکروآمپر، شدّت میدانی در حدود $۱۰^۷$ تا $۱۰^۸$ ولت بر سانتیمتر لازم است. البتّه در سیم‌های نازک، نقاط تیز و نامنظمی‌های میکروسکوپی ممکن است در ولتاژهای نسبتاً پایین (حدود ۲ تا ۵kV)، شدّت میدان الکتریکی به این مقادیر برسد. به‌هر حال، شدّت میدان لازم برای خروج الکترون‌ها از سطح کاتد به مراتب قوی‌تر از میدان الکتریکی لازم برای تخلیهٔ الکتریکی گازها حتّی در فشارهای زیاد می‌باشد.