

APLICAÇÃO INDUSTRIAL DA TECNOLOGIA DE VÁCUO

James M. Lafferty
President, IUVSTA,
General Electric Company
Corporate Research and Development
Schenectady, New York
USA

Houve um considerável desenvolvimento na Ciência, Tecnologia e Aplicações de Vácuo nos últimos sessenta anos. Os antigos dispositivos apresentavam problemas de desgaseificação e materiais adequados. Enquanto que na década de 1940, as técnicas de medidas de vácuo não eram capazes de medir as baixas pressões obtidas, atualmente, já se tem condições de fazê-lo. São detalhadas as etapas no desenvolvimento de alguns dispositivos tais como medidor de ionização tipo magnetron e interruptores a vácuo, nas quais este autor desempenhou papel significativo.

Tecnologia de Vácuo, Histórico do desenvolvimento

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a tecnologia de vácuo vem desempenhando importante papel no desenvolvimento da produção de vários produtos comerciais e industriais.

Isto inclui tubos de Raios-X, lâmpadas, vários tipos de válvulas eletrônicas, interruptores a vácuo de circuito de alta potência e interruptores a vácuo. Atualmente, vários componentes eletrônicos não operam mais em vácuo, porém dependem desta tecnologia para sua fabricação. Entre eles, estão dispositivos de potência do estado sólido, circuitos integrados, criotons, dispositivos fotocondutores eletroluminescentes e sistemas de memórias ferromagnéticas.

todos dependentes de filmes evaporados a vácuo (1).

A qualidade e a vida das válvulas eletrônicas dependem da capacidade em produzir e manter um alto vácuo, dentro delas (1). Antigamente, os tubos tinham um vácuo muito baixo. Em alguns casos o inventor do tubo usava estas condições. De fato, a presença de alguns gases era essencial para o sucesso da operação. Nos primeiros tubos a gás de Raios-X, de Roentgen, o fluxo de elétrons era produzido por um catodo frio com descarga gasosa de baixa pressão. A corrente, a voltagem e a pressão do gás eram todas interdependentes. Era comum, naquela época, um radiologista usar uma série de tubos com diferentes pressões gasosas para produzir Raios-X de várias energias e voltagens.

Foi somente a partir de 1913, com o maior desenvolvimento da tecnologia de vácuo, que Coolidge, no General Electric Research Laboratory, conseguiu desenvolver um tubo de Raios-X de alto vácuo com um filamento aquecido de tungstênio dúctil para suprir os elétrons nos quais a corrente poderia ser ajustada independentemente da voltagem aplicada. Este aspecto controlável do moderno tubo de Coolidge tem facilitado imensamente a pesquisa e a aplicação de Raios-X na engenharia, particularmente quando se necessita de controle mais preciso.

O grau de evacuação desempenha ainda um papel importante nos tubos de raios catódicos e nos tubos de modernos televisores.

Nos primeiros tubos Braun de raios catódicos (Fig.1), os elétrons eram liberados de um catodo frio e concentrados através de uma descarga gasosa. Os íons positivos em torno do feixe de elétrons produzem um campo elétrico convergente que focaliza o feixe de elétrons. Os tubos de raios catódicos utilizados para focalização tinham, por necessidade, dispositivos lentos devido ao longo tempo de trânsito dos elétrons. Novamente, com o desenvolvimento da tecnologia de vácuo, a obtenção de alto grau de vácuo nos tubos de raios catódicos tornou possível o desenvolvimento dos cântons eletrônicos com filamento revestido de óxido por Von Ardenne, em Berlim e Zworykin, em Princetown, já em 1930.

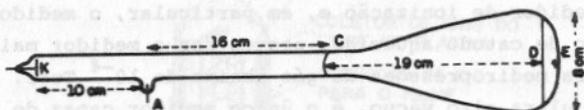


Figura 1 - Antigo tubo de raios catódicos, de Braun, utilizando gás para focalização.

Entretanto, mesmo 30 anos depois, os problemas de ionização do gás ainda não tinham sido superados nos tubos de televisão. Canhões eletrônicos com trapas de íons foram desenvolvidos para evitar a pulverização catódica destrutiva do revestimento de óxido, pelos íons positivos gerados na feixe eletrônico. Antes da proteção aluminizada ser adicionada à tela do tubo de imagem, a queima do íon no centro da tela fosforescente era frequente. Isto era causado pelo bombardeamento do material eletroluminescente pelos íons negativos em alta velocidade, formados pela ligação com elétrons. Com o aparecimento do tubo de televisores coloridos, o processamento de vácuo se desenvolveu até que trapas de íons não foram mais necessários.

Os tubos de Raios-X e tubos de raios catódicos são dois exemplos onde a tecnologia do vácuo teve uma grande importância no desenvolvimento e desempenho do tubo.

Medidas das Pressões para Ultra Alto Vácuo

Com o desenvolvimento da tecnologia de vácuo, houve uma época, por volta de 1945, em que não era possível medir as baixas pressões que podiam ser produzidas em laboratório (2).

O medidor de ionização e, em particular, o medidor de ionização de catodo aquecido, provou ser o medidor mais popular para medir pressões de gás abaixo de 10^{-4} Torr. Na faixa de ultra alto vácuo, é o único medidor capaz de medir tais pressões. Isso não é devido à sua alta sensibilidade, mas sim devido à capacidade das modernas técnicas de medir correntes extremamente pequenas. Ionização do gás por colisão com elétrons é, sem dúvida, o mais simples e mais efetivo método, devido à grande seção de choque envolvida.

Não obstante sua grande popularidade, o medidor de ionização possui muitas falhas. Em primeiro lugar, ele não mede pressões - mede densidade do gás. Não providencia um método absoluto de medida e a calibração é dependente da natureza do gás. O medidor de ionização pode dar medidas incertas, a menos que se tomem precauções, porque pode bombear, dissociar e reagir com o gás que se supõe estar medindo, pode gerar gás e si próprio, pode produzir outras correntes falsas que podem ser confundidas com correntes iônicas e pode ter instabilidades iônicas inerentes. Apesar de todas as dificuldades, quando projetado corretamente, o medidor de ionização pode ser confiável para dar leituras de pressões que são precisas dentro de uma ordem de grandeza ou talvez mesmo a uns poucos por cento das condições ideais, quando calibradas cuidadosamente para uma composição de gás conhecida.

Antes de 1948 não era possível medir pressões abaixo de 10^{-8} Torr com o medidor de ionização tipo triodo (Fig.2), apesar de haver evidência, por experiências de adsorção de gás nas superfícies, de que pressões mais baixas estavam sendo obtidas. Em 1947, o Prof. Nottingham, do Massachusetts Institute of Technology, apresentou evidência de uma corrente residual ao coletor iônico, independente da pressão do gás. Verificou-se que essa corrente era causada por fotoelétrons ejetados do coletor iônico por Raios-X leves produzidos por elétrons volt atingindo a grade.

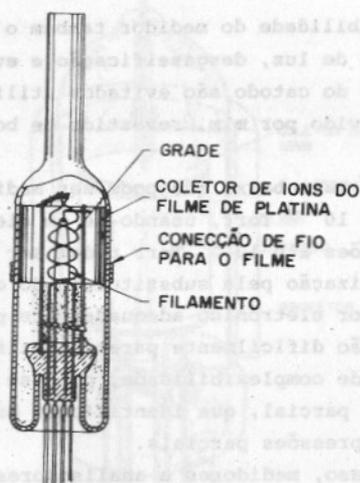


Figura 2 - Medidor de ionização do tipo triodo para medidas de pressão na faixa de 10^{-4} a 10^{-7} Torr.

O ângulo sólido entre o coletor iônico e o raio-X pode ser reduzido utilizando um coletor iônico menor ou removendo-o da vizinhança imediata da grade ou ainda ambos. Isto deve ser feito sem reduzir substancialmente a fração dos íons coletada. Bayard e Alpert conseguiram isto em 1950 com seu bem conhecido medidor, no qual as posições do filamento e do coletor são trocados. Uma grande fração dos íons produzidos dentro da grade é coletada por um fio de 0,175 mm de diâmetro. A pequena área superficial do fio coletor apresenta um ângulo sólido para os raios-X que é centenas de vezes menor que no coletor convencional. Esse arranjo tem permitido baixar o limite de pressão mensurável até a faixa de 10^{-11} Torr. Um outro modo seria aumentar o limite de baixa pressão do medidor de ionização, através do aumento da sensibilidade do medidor. Se este é modificado de modo que o caminho percorrido pelos elétrons seja muito maior, antes que sejam coletados, a probabilidade de colisão e ionização de uma molécula de gás será bastante aumen-

tada e a sensibilidade do medidor também o será.

A emissão de luz, desgaseificação e evaporação dos metais alcalinos do catodo são evitados utilizando-se um filamento desenvolvido por mim, revestido de boreto de lantânio (3).

A pressão mais baixa que pode ser medida com o medidor de ionização é 10^{-14} Torr, usando-se um eletrômetro convencional. Pressões até 10^{-16} Torr podem ser medidas com um medidor de ionização pela substituição do coletor iônico por um multiplicador eletrônico adequadamente protegido.

Esta adição dificilmente parece justificada já que, com um pouco mais de complexibilidade, pode-se usar um analisador de pressão parcial, que identificará os gases residuais e medirá suas pressões parciais.

Em todo caso, medidores e analisadores de pressão parcial são disponíveis ou podem ser construídos para medir pressões mais baixas existentes atualmente, sem nenhum aumento da fotoemissão do raio-X. Um meio de aumentar a sensibilidade do medidor é usar campos magnéticos para que os elétrons tenham trajetórias mais longas, na forma de espiral. Em 1960, desenvolvi um medidor de ionização do tipo magnetron de catodo aquecido (Fig.3) com sensibilidade de mais de 10^8 Torr, que é 10^7 vezes mais sensível que os medidores convencionais do tipo triodos.

Este dispositivo consiste em um anodo cilíndrico do tipo magnetron operado em um campo magnético de cerca de 2,5 vezes o valor de corte. Placas polarizadas negativamente, nas extremidades, evitam o escapamento de elétrons. Uma das placas é cuidadosamente isolada e usada como um coletor de íons. Os elétrons emitidos pelo filamento têm trajetória espiral ao seu redor e poucos alcançam o anodo. O limite de raios-X do medidor é cerca de 10^{-14} Torr. Isto é o oposto da situação de 35 anos atrás.

É interessante que pressão, definida como força por unidade de área em uma superfície, situa-se entre aquelas quantidades físicas que o homem tem medido em uma faixa de mais de 20 ordens de grandeza.

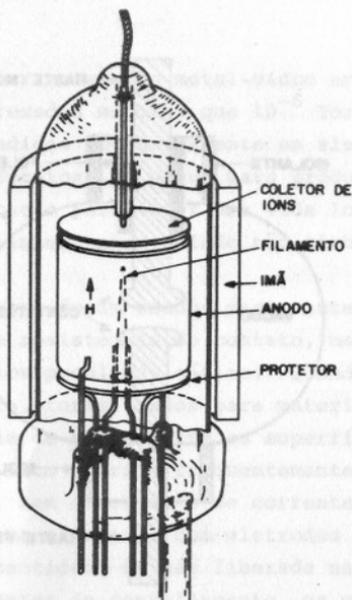


Figura 3 - Medidor de ionização de cátodo quente, do tipo magnetron com o limite inferior de pressão de 10^{-14} Torr.

Em nossas prensas de diamante, no General Electric Research and Development Laboratory, as maiores pressões estáticas determinadas com precisão pelas figuras de difração de raios-X do níquel, são cerca de meio milhão de atmosferas enquanto que as menores pressões totais que medimos em um sistema de vácuo são da ordem de 10^{-16} atm. A pressão no centro da terra é estimada como sendo de 315 milhões de atmosferas e no espaço livre, da ordem de 10^{-19} atm. Assim o homem ainda tem uma difícil tarefa de atingir, em seu laboratório, as pressões extremas que existem na natureza não muito remota de seu ambiente.

Interruptor a Vácuo

Um dos mais intrigantes projetos em que já trabalhei consistiu no interruptor de circuito a alta potência a vácuo (Fig.4). A simplicidade e elegância em interromper com segurança grandes correntes em circuitos de alta voltagem, pela separação de contacto entre dois metais encapsulados

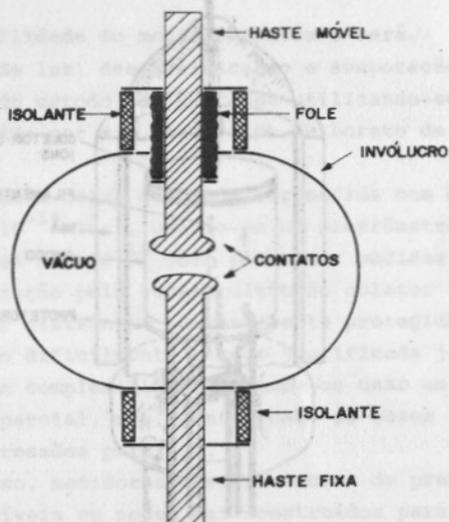


Figura 4 - Esquema dos elementos essenciais do interruptor a vácuo.

em vácuo tem, há muito, fascinado cientistas e engenheiros, mas as primeiras tentativas estavam destinadas ao fracasso devido à falta de técnica de apoio em processamento da metalurgia e tecnologia de vácuo. Por volta de 1920, no Institute of Technology, da Califórnia, o Prof. Millikan, na sua pesquisa no campo de emissão de elétrons dos metais, observou que as separações em vácuo tinham uma resistência dielétrica muito alta e que muitas dezenas de quilovolts não causariam descarga elétrica numa separação de somente uns poucos milímetros de largura, em vácuo. O Prof. Sorensen do California Institut of Technology aplicou este fenômeno em sua invenção dos interruptores a vácuo. Alguns dos primeiros trabalhos do Prof. Sorensen e da General Electric Company prometiam muito, mas logo se tornou evidente que o interruptor a vácuo selado de 1930 não poderia oferecer a alta segurança exigida pelas companhias elétricas.

Nestas experiências de 1930, um número considerável de falhas foi revelado a tecnologia de vácuo nesta época estava

num estado rudimentar. Junções metal-vidro eram frágeis e não confiáveis. Pressões menores que 10^{-6} Torr não podiam ser produzidas e medidas rotineiramente em sistemas industriais de vácuo. Técnicas de vácuo para produzir o alto grau de desgaseificação para obter uma vida longa e livre de problemas em um interruptor selado não tinham sido desenvolvidas.

Eletrodos de cobre foram usados para manter baixas a corrente de corte e resistência de contato, mas esta escolha introduziu vários problemas sérios. Quando metais leves, tais como cobre, foram usados para materiais de contato, houve ocorrência de solda entre as superfícies muito limpas, em vácuo. Isto ocorria frequentemente em pressões de contato normais, sem circulação de corrente.

Um outro problema associado com eletrodos de metais leves era a grande quantidade de gás liberada no centelhamento. Em altas correntes de centelhamento, os gases acumulavam-se no interruptor, após sucessivas operações, assim destruindo o vácuo e causando descarga no interruptor às baixas voltagens.

Nesta época, várias tentativas infrutíferas foram realizadas no G.E.R. Laboratory para obter cobre livre de gás por fusão em vácuo. Vinte anos depois, fizemos uma nova tentativa para resolver este velho problema. Rápidos avanços tinham sido feitos no processamento metalúrgico e na tecnologia de vácuo. Nova instrumentação eletrônica tornou possível estudar o fenômeno de centelhamento no vácuo, até então inacessível.

Conhecimento básico adquirido de pesquisa sobre centelhamento a vapor de metal beneficiaram a tecnologia do interruptor a vácuo.

Dos problemas não resolvidos, discutidos inicialmente, estava claro que a produção e manutenção de um alto vácuo no interruptor, sem tomar em conta a severidade do serviço de interrupção, era de primeira importância. Afortunadamente grandes juntas vidro-metal, cerâmica-metal e "bellows" metálicos flexíveis já tinham sido desenvolvidos, capazes de resistirem às tensões mecânicas e térmicas esperadas em

interruptores de vácuo de alta potência. Além disso, a tecnologia de vácuo havia avançado ao ponto onde vácuo da ordem de 10^{-9} Torr podia ser produzido e medido rotineiramente. Este progresso através dos anos resolveu dois problemas básicos.

Entretanto, a liberação de gás durante a centelha dos materiais do eletrodo, tais como cobre, não foi resolvido. Cálculos mostraram que os eletrodos deveriam ter menos que 1 parte em 10 milhões de impurezas gasosas (ou compostos que poderiam ser dissociados em gás não condensáveis pelo centelhamento, para manter a pressão abaixo de 10^{-5} Torr em um interruptor típico de 10.000 amperes.

Sabíamos que as impurezas tendem a segregar nos contornos do grão cristalino. Isto nos induziu a tentar eletrodos feitos de cristais isolados de cobre que haviam sido obtidos da fusão. Estes eletrodos eram remarcadamente livres de gás e deram as primeiras indicações de um avanço tecnológico significativo, mas era muito caro para manufatura em grande escala. Tentamos então cobre refinado por fusão zonal, fazendo uso de técnicas desenvolvidas pela indústria de semicondutores para purificar silício. Este processo era relativamente barato e as medidas efetuadas em cobre refinado por fusão zonal mostraram um conteúdo total gasoso, sem o uso de absorvedor (getter), de 1 parte em 1 bilhão. Encontrou-se que o gás residual consistia de 60% de metano de 40% de monóxido de carbono, com traços de hidrogênio. A refinação por fusão zonal havia resolvido o problema do eletrodo livre de gás.

O eletrodo ou contato ideal em um interruptor de vácuo deve não só ser livre de gás mas também satisfazer vários outros requerimentos, simultaneamente.

Os contatos não devem soldar-se durante a condução de altas correntes momentaneamente ou durante a interrupção num curto circuito. A resistência elétrica deve ser baixa para minimizar o aquecimento durante passagem normal da corrente. Os eletrodos devem ser duros, de modo a manter sua forma sob as altas tensões mecânicas dos rápidos abertura e fechamento, normalmente encontradas em interruptor de alta

corrente. Finalmente a pressão de vapor do material do eletrodo deve ser suficientemente alta para manter um arco estável a baixas correntes, para impedir a geração de alta sobretensão por uma interrupção abrupta da corrente de arco (corrente de corte).

Os contatos feitos de metais com alta pressão de vapor são macios, tem baixo ponto de fusão e tendem a fixar e soldar facilmente no vácuo.

Contatos de metais duros, como tungstênio, não se soldam e mantêm sua forma, mas tem severos problemas de corrente de corte devido à sua baixa pressão de vapor. É aparente que nenhum material ideal para eletrodo pode ser encontrado se nos limitarmos a metais puros.

Para contornar este problema, considere vários compostos intermetálicos e ligas binárias de 2 fases para os eletrodos nos interruptores de vácuo, que poderiam simultaneamente resolver os problemas de resistência, retalhamento e soldagem. Estes materiais conjugados deveriam ser duros, ter ponto de fusão relativamente alto, ser bons condutores elétricos e conter pelo menos um componente com alta pressão de vapor. Uma das ligas mais interessantes que encontrei, foi uma liga de duas fases, de cobre com poucos por cento de bismuto.

Na fase líquida o bismuto é solúvel em cobre mas, na solidificação, ele precipita nos contornos de grão e na superfície do cobre. Uma vez que o bismuto é virtualmente insolúvel no cobre, a alta condutividade do cobre é retida. O precipitado de bismuto nos contornos do grão do cobre endurece a liga e produz uma fraca e quebradiça interface apresenta para a solda. Esta interface é facilmente quebrada no impacto quando o interruptor é acionado. Finalmente, a presença de bismuto com alta pressão de vapor durante a centelha reduz a corrente de corte. Essa liga simples, de duas fases, cobre e bismuto, livre de gases, resolveu essencialmente todos os problemas do contato do interruptor a vácuo de alta potência.

Não obstante sua complexidade o centelhamento a vácuo está pronto para servir como um interruptor a vácuo de cir-

cuitos de alta potência. A pesquisa que levou ao desenvolvimento da primeira linha mundial de interruptores de alta potência comercialmente bem sucedidos, está descrita em um livro publicado no ano passado: Vacuum Arcs: Theory and Application (4). Este livro agora está sendo traduzido para a língua russa e será publicado por Verlag Mir.

Interruptor Iniciado de Separação à Vácuo

A capacidade de uma separação à vácuo (Fig.5) em suportar alta voltagem e recuperar sua resistência dielétrica rapidamente depois do centelhamento, tem tornado-o atrativo como um dispositivo de proteção contra sobrecarga de voltagem e como interruptores rápidos de corrente.

As primeiras aplicações destes dispositivos, durante a década de 1920, nos pára-raios em linhas de transmissão elétrica, deram resultados satisfatórios nos testes iniciais, mas centelhamentos repetidos levaram ao fracasso. A principal dificuldade era uma acumulação de gás na câmara de vácuo, que se desprendia dos eletrodos durante o centelhamento. O outro problema era a descarga imprevisível na se-

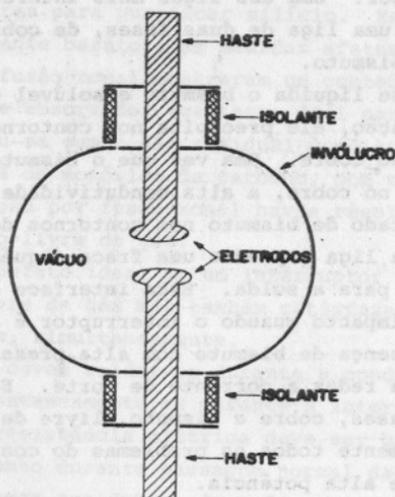


Figura 5 - Esquema dos componentes básicos do interruptor de separação a vácuo.

paração, particularmente após o centelhamento, resultando numa baixa razão entre a voltagem de descarga do impulso e a voltagem de descarga de 60 Hertz.

O problema em manter uma pressão adequadamente baixa na câmara de vácuo foi resolvido pelo desenvolvimento da tecnologia de processamento a vácuo e pela capacidade em obter metais livres de gás pelas técnicas de refinamento por fusão zonal, desenvolvida para eletrodos de interruptores a vácuo.

Resolvi o problema da descarga imprevisível na separação a vácuo por um único esquema de interruptor iniciado, que torna a voltagem de centelhamento independente do espaçamento entre os eletrodos ou das condições da superfície do eletrodo após centelhamento. Um canhão coaxial de plasma (Fig.6) inicia a descarga pela injeção de um plasmóide de alta velocidade na separação principal (5). As paredes interiores dos eletrodos coaxiais são cobertas com um hidreto metálico que fornece o hidrogênio para descarga auxiliar. Esta descarga é dirigida para a separação principal

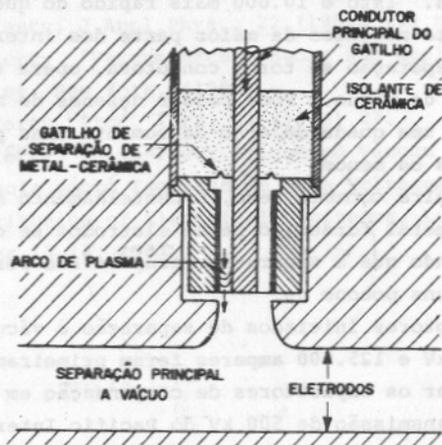


Figura 6 - Interruptor iniciado de separação a vácuo usando canhão coaxial de plasma.

por forças magnéticas resultantes do circuito da corrente de descarga. Conforme o plasma e a radiação do pulso iniciador se espalham na separação principal, uma descarga de alta corrente é inicialmente estabelecida entre os principais eletrodos. A descarga difusa é transformada em um arco, conforme pontos catódicos são estabelecidos sobre o principal eletrodo negativo, com o desprendimento do vapor de metal. Com uma energia de pulso iniciador de somente 0,01 J, a separação principal pode ser descarregada em menos de 0,1 μ s com tempo de vibração de 30 ns. A quantidade de hidrogênio liberada é extremamente pequena com um aumento de pressão de somente 10^{-6} Torr.

Sob operação normal não repetitiva do interruptor, não há um aumento cumulativo de pressão devido ao hidrogênio. O hidrogênio é eventualmente absorvido por um absorvedor de titânio. Isto tudo foi possível devido a uma compreensão básica e aplicação da moderna tecnologia de vácuo.

A separação de vácuo é basicamente um interruptor de vácuo normalmente aberto, no qual os contatos são permanente separados mas que podem se tornar condutores em menos de um décimo de μ s. Isto é 10.000 mais rápido do que é possível ao fechamento mecânico da maior parte dos interruptores. Uma vez que a separação se torna condutora, opera tal e qual um interruptor de vácuo. Pode passar dezenas de milhares de amperes com uma queda de arco de somente umas poucas centenas de volts ou menos.

Na primeira corrente zero, o centelhamento é extinto e o vapor de metal fornecido pelos eletrodos se condensa, assim permitindo que a separação recupere sua resistência dielétrica em uns poucos μ s.

Interruptores iniciados de separação à vácuo com capacidade de 73 kV e 125.000 amperes foram primeiramente usados para proteger os capacitores de compensação em série na linha de transmissão de 500 kV do Pacific Intertie AC, que vai desde o Columbia River até Los Angeles, nos Estados Unidos (6).

CONCLUSÕES

Há muitas outras aplicações da tecnologia de vácuo para modernos produtos industriais e comerciais que não mencionei. Estas incluem lâmpadas que obtenham sua luz diretamente da radiação do plasma do vapor do metal e de dispositivos de potência do estado sólido e circuitos integrados envolvendo evaporação do metal, pulverização catódica, implantação iônica, decomposição à baixa pressão, recozimento a vácuo, soldagem e recarga. Destes poucos exemplos de aplicação industrial de vácuo, não é surpreendente que a IUVSTA, que é uma confederação internacional de 22 organizações nacionais de vácuo devotadas ao desenvolvimento da ciência e tecnologia de vácuo, recentemente estabeleceu uma estrutura de divisões para promover a ciência de superfície, filmes finos, materiais eletrônicos e eventualmente, a metalurgia a vácuo e a tecnologia de fusão.

REFERÊNCIA

1. J.M.Lafferty e T.A.Vanderslice, Proc.IRE, 49 (1961)1136.
2. J.M.Lafferty, J.Vac.Sci.Technol., 9 (1972) 101.
3. J.M.Lafferty, J.Appl.Phys., 22 (1951) 299.
4. J.M.Lafferty, "Vacuum Arcs: Theory and Application", John Wiley, New York, (1980).
5. J.M.Lafferty, Proc. IEEE, 54 (1966) 23.
6. J.M.Lafferty, "High-Power Triggered Vacuum Gap", Conferência sobre Isolação de Alta Voltagem a Vácuo, The Institution of Electrical Engineers, London, September 13-14, 1967.