

CANHÃO PULSADO PARA PRODUÇÃO DE FEIXE DE ELETRONS

C.C. Motta, H.S. Maciel, J.P. Sudano e E. Gerck

Depto. de Física - ITA/CTA - São José dos Campos - SP

Descreve-se a construção e operação de um canhão pulsado de eletrons, que utiliza arco de vapor metálico como fonte de partículas carregadas. Observa-se um feixe de eletrons com energia de (60-100) keV e 100 A de valor de pico de corrente com uma duração típica de $1\mu\text{seg}$. O sistema utiliza um gerador Marx para produção de pulso de alta tensão. Evidências de que ocorre emissão por campo na fase de pré-ruptura são relatadas. A pressão de vácuo do canhão é da ordem de 10^{-5} a 10^{-6} Torr.

Canhão de Eletrons, Emissão por Campo, Arco Metálico e Gerador Marx.

1. INTRODUÇÃO - Pela investigação de canhões pulsados de eletrons para ionização uniforme de misturas gasosas^{1,2} verificou-se que um canhão que utiliza plasma em forma de arco de vapor metálico como fonte de geração de eletrons é bastante adequado pois é de simples construção, produz um feixe altamente energético e de elevada corrente, utilizando apenas um gerador de pulso de alta tensão. Foi testado o funcionamento do canhão por mais de 6 horas consecutivas com uma taxa de repetição de 1Hz. Taxas maiores também podem ser obtidas. Foram investigadas também propriedades físicas do mecanismo de emissão.

2. DESCRIÇÃO GERAL - No circuito utilizado, existem dois estágios capacitivos para armazenamento de energia. O primeiro estágio consiste de um banco de capacitores interligados numa das possíveis configurações proposta por Marx³, isto é, durante a carga os capacitores estão em paralelo e durante a descarga em série. Este chaveamento é feito por "spark-gaps". Uma das vantagens de trabalharmos com o gerador Marx vem do fato que a tensão d.c. necessária por estágio é cerca de menos de 1/3 do valor de pico da tensão de disparo do canhão. O segundo estágio tem uma capacitância de aproximadamente oito vezes menor do que a do primeiro estágio. Dessa forma um ganho de tensão é propiciado pela carga capacitiva na saída do gerador Marx. O segundo estágio é carregado através de uma indutância em série com o primeiro estágio, de modo que, quando o gerador Marx dispara, o segundo estágio é carregado até um valor de tensão suficiente para disparar o canhão.

Os eletrons produzidos no canhão são originados de uma descarga do tipo arco em vácuo.

O catodo consiste de uma placa plana circular com perfil de Rogowskii⁵ e o anodo de uma tela com transparência de aproximadamente 50%, paralela ao catodo. Tanto o anodo quanto o catodo são de aço inoxidável.

Quando o canhão dispara, eletrons são acelerados em direção ao anodo sendo que uma parte desses são absorvidos pela tela e outra parte a atravessa e atinge a região de deriva, constituindo assim um feixe de eletrons de alta energia. O diagrama esquemático do sistema é mostrado na figura 1.

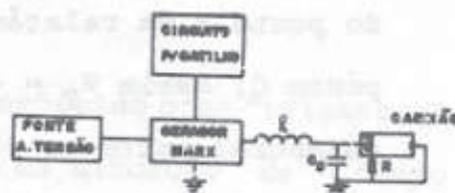


Figura 1 - Diagrama esquemático do sistema.

3. APARATO EXPERIMENTAL - O diagrama do circuito elétrico do gerador Marx utilizado é mostrado na figura 2.

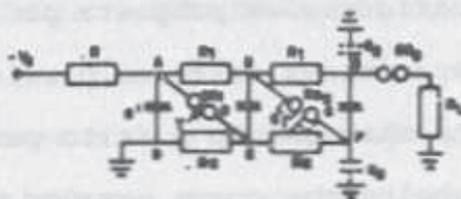


Figura 2 - Diagrama do Circuito Elétrico do Gerador Marx.

A análise do funcionamento do gerador é feita admitindo-se as seguintes hipóteses: Uma vez que o circuito seja carregado pela fonte d.c. até um valor $-V_C$, através dos resistores R , R_1 e R_2 , admite-se que no momento em que o "spark-gap" G_1 dispara, os resistores de carga R e R_1 , como também os de descarga R_2 estejam abertos. O potencial no ponto B então varia de $-V$ para $-2V$. Desse modo a tensão no ponto F, V_F é calculada pelo divisor capacitivo formado por C_1 e $C_2 // C_3$, onde C_1 é a capacitância parasita do "spark-gap", C_2 a capacitância do ponto F em relação ao terra e de modo análogo C_3 , para o ponto C, assim $V_F = -2V_C C_1 / (C_1 + C_2 + C_3)$. Logo a diferença de potencial entre os eletrodos do "spark-gap" é dada por $V_{G_2} = -2V_C (1 - C_1 / (C_1 + C_2 + C_3))$. Observa-se que se C_1 é zero, V_{G_2} atinge seu valor máximo e que se C_2 e C_3 são ambos nulos, V_{G_2} é zero e o gerador não funciona. É aparente portanto, que as condições mais favoráveis para a operação do gerador é quando C_1 é pequena em comparação com $C_2 + C_3$.

No gerador construído os valores de R_1 e C' foram de $50k\Omega$ e $4.8nF$, respectivamente, R_2 foi variado a fim de obtermos o tempo de cauda de onda desejado e $-V_C$ foi variado de $-15kV$ até $-30kV$. O estágio secundário consiste de um capacitor

tor C_s de 230 pF que é carregado através de uma indutância $L = 100\mu\text{H}$ pelo gerador. O sistema C_s e L em conjunto com a capacitância equivalente do gerador constitui uma linha formadora de pulso gerando uma onda 0,35/1,5. Após o disparo a tensão atinge seu valor de pico num tempo correspondente, aproximadamente, a metade do primeiro semiciclo dado por $T = 2\pi\sqrt{LC_{eq}}$ onde $C_{eq} = C_{Marx}/C_s$, com um valor teórico do pico de tensão de $2 \cdot \hat{V}_{Marx} / (C_{Marx} + C_s) \cdot (-3V_c)$. O gerador Marx é gatilhado pelo primeiro "spark-gap"⁶ através de um terceiro eletrodo que é colocado entre os dois eletrodos e polarizado de tal maneira que seu potencial corresponda àquele da equipotencial formada pelo sistema a dois eletrodos, veja figura 3.

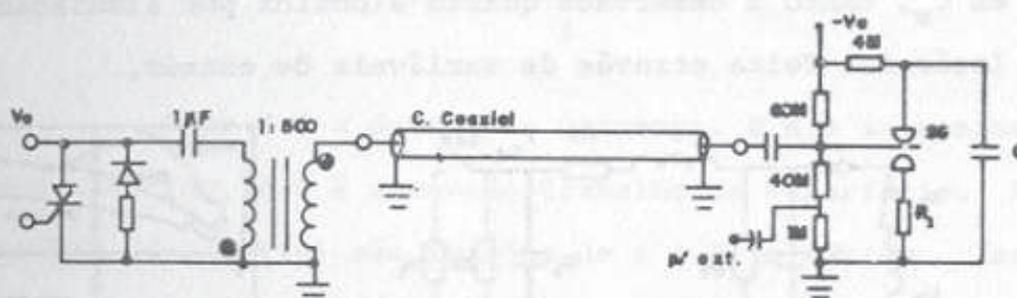


Figura 3 - Diagrama elétrico para o disparo do "spark-gap".

O "spark-gap" utilizado é conhecido como "trigatron" e seu gatilhamento é explicado através da distorção de campo elétrico⁸ provocada pela chegada do pulso de gatilho ocasionando uma rápida ruptura do gás. O "jitter" do "trigatron" foi medido, seu valor não ultrapassou a 10 ns. O circuito utilizado para a determinação do "jitter" é mostrado na fig. 4.

O canhão dispara para um determinado valor de tensão que é fixado pela distância entre o catodo e anodo. Esta distância é no presente caso regulável. Quanto maior a distância, maior será a tensão necessária para disparar o canhão e

também mais energético será o feixe. O circuito equivalente do sistema é mostrado na figura 5.

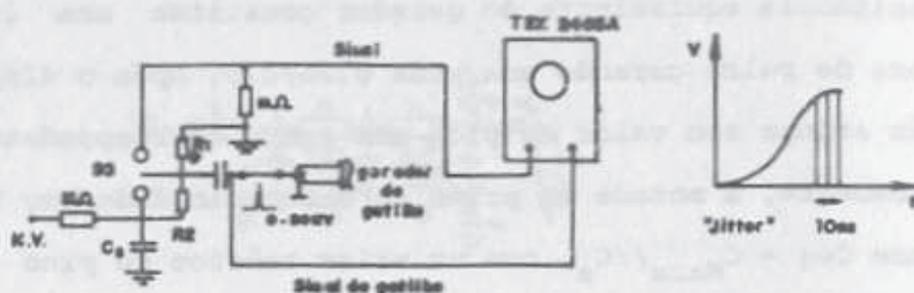


Figura 4 - Circuito utilizado para a determinação do "jitter" do "crigatron".

A resistência R_M , indutância L_M e capacitância C são intrínsecas do sistema. É mostrado também as formas de onda da tensão em C_S , tanto a observada quanto a obtida por simulação. A simulação foi feita através de variáveis de estado.

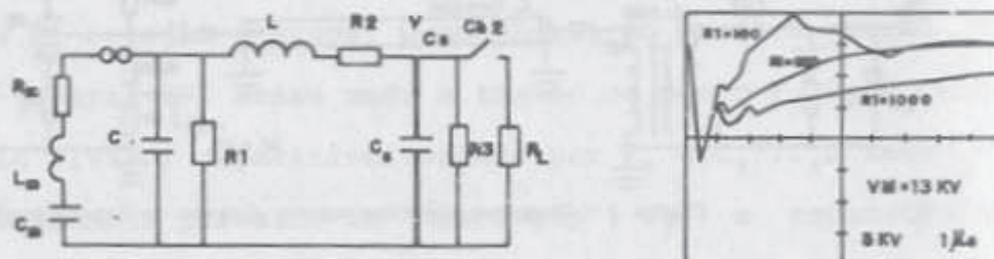


Figura 5 - Circuito equivalente e formas de onda de V_C .

A chave CH_2 representa o próprio canhão: o catodo e anodo em alto vácuo formam uma chave de alta tensão. O desenho esquemático do canhão está mostrado na figura 6.

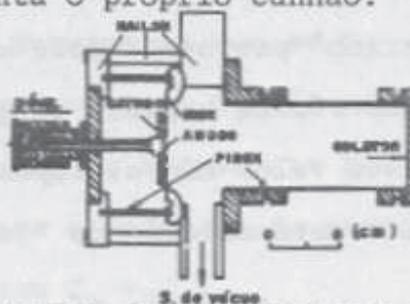


Figura 6 - Desenho esquemático do canhão.

4. DESEMPENHO - Inferimos que a descarga inicia-se mediante o processo de emissão de campo, dadas as condições de vácuo (10^{-5} - 10^{-6} Torr) e o espaçamento entre os eletrodos, (déci

mos de mm): Quando campos macroscópicos, com intensidades acima de 2×10^7 V/cm são aplicados a qualquer superfície sólida ocorre emissão de elétrons da superfície. A emissão de campo inicia-se a partir de imperfeições microscópicas do material ou "whiskers", devido aos altíssimos campos microscópicos locais. A densidade de corrente por emissão de campo é dada pela equação de Fowler-Nordheim,

$$J = \frac{1.541 \times 10^{-2} E^2}{\phi t^2(y)} \exp \left[\frac{-6.831 \times 10^9 \phi^{3/2} v(y)}{E} \right] \text{ A/m}^2$$

Eq. 4.1

$$y = \frac{3.795 \times 10^{-3} \sqrt{E}}{\phi}$$

Onde J é a densidade corrente, E é a intensidade do campo elétrico, e ϕ é a função trabalho da superfície. As expressões $v(y)$ e $t(y)$ são funções de ϕ e E , e variam lentamente com ϕ e E são frequentemente consideradas como constantes⁴.

Na forma em que a Eq. 4.1 é apresentada, alguns aspectos tornam difícil sua comprovação experimental pois para o experimentalista o que se mede é o valor do potencial V e da corrente I . Para contornar estas dificuldades podemos escrever a Eq. 4.1 da seguinte forma⁷.

$$\log_{10} \left[\frac{I}{V^2} \right] = -\log_{10} \frac{t^2(y) \ell^2}{1.541 \times 10^{-2} \bar{A} \bar{E}^2} - \frac{6.831 \times 10^9 v(y) \phi^{3/2} \ell(1/V)}{2.3026 \bar{E}}$$

Eq. 4.2

onde \bar{A} é a área média do emissor dada por I/J e \bar{E} é conhecido como fator de valorização do campo elétrico dado por

$$E_c = \bar{\beta} V_B / \ell \quad \text{Eq. 4.3}$$

O valor de $\bar{\beta}$ é determinado através da curva $\log_{10} \left[\frac{I}{V^2} \right] \times \left[\frac{1}{V} \right]$ e é dado pela expressão

$$\bar{\beta} = \frac{6.831 \times 10^3 \phi^{3/2} \ell}{2.3026 \text{ (coeficiente angular)}} \quad \text{Eq. 4.4}$$

onde ℓ é a distância entre anodo e catodo. O valor de $s(y)$ foi admitido unitário como de maneira usual⁴.

A corrente na Eq. 4.2 corresponde à corrente pré-ruptura. Foi monitorado esta corrente e também a tensão pré-ruptura. As formas de onda de I e V são mostradas na Fig. 6. Desse modo foi possível construir o gráfico de $\log \left[\frac{I}{V^2} \right] \times \left[\frac{1}{V} \right]$ e verificação da Eq. 4.1.

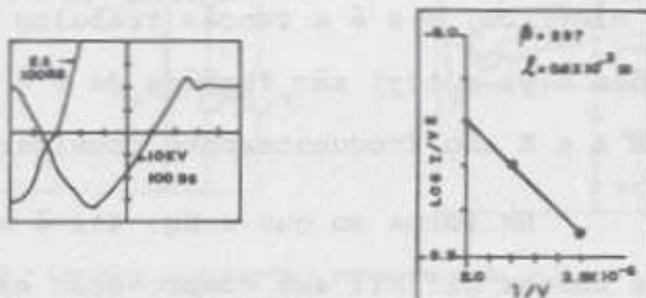


Figura 7 - Gráfico da Corrente I de pré-ruptura, da tensão V e do $\log \left[\frac{I}{V^2} \right] \times \frac{1}{V}$.

Na medida em que inicia-se a emissão de campo, esta corrente produz aquecimento ôhmico até chegar a explosão do "whisker". Quando o "whisker" é explodido vários mecanismos de emissão estarão presentes, entre eles emissão termoiônica. A explosão do "whisker" introduz vapor metálico dentro do espaçamento anodo-catodo acarretando a ignição do arco elétrico.

5. DESEMPENHO - O desempenho do canhão foi investigado direta

mente pela medida da corrente dos eletrons que chegam ao coletor, isto é, a corrente de feixe. Em todas as experiências de medida de corrente, o formato do pulso não variou muito em relação àquele mostrado na Fig. 7. O pico de corrente foi medido em função do pico de tensão necessário para o disparo, variando-se a distância entre catodo e anodo.

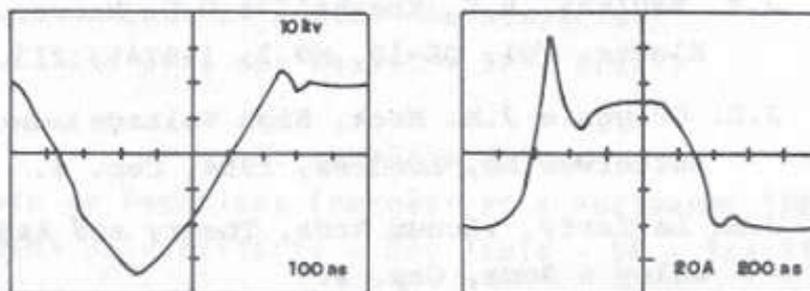


Figura 8 - Forma de onda da tensão de ruptura V e da corrente de feixe.

6. CONCLUSÃO - A característica de alta corrente é observada no presente experimento chegando ao valor de 100 amperes de valor de pico, as vezes até maior, com duração do pulso de $1 \mu s$. Pela observação da curva da tensão do catodo e da corrente do feixe, verificamos que o pico de tensão corresponde a ignição do arco de vapor metálico, como anteriormente citado. A partir desse ponto a corrente do feixe, começa a crescer, a tensão atinge seu valor mínimo, que é da ordem do potencial de ionização do vapor metálico, e a corrente de feixe atinge seu valor máximo. Pela curva $\log_{10} [I/V^2] \times 1/V$ e posterior determinação de $\beta \sim 297$, o qual está dentro dos limites aceitáveis ($200 < \beta < 1200$)⁴, verificamos a validade da Eq. 4.1 para a corrente de pré-ruptura.

Atualmente acredita-se que o feixe não apresenta simetria radial, exceto em alguns disparos, devido ao fato de que o ponto de formação do arco é aleatório. A energia do feixe ainda não foi medida, contudo ela pode ser estimada através

da tensão de disparo.

7. BIBLIOGRAFIA

1. C.H.H Carmichael, R.K. Garnsworthy, e L.E.S. Mathias. Rev. Sci. Instrum., Vol. 44, Nº 6 (1973), 701.
2. J.R. Bayless, R.C. Knechtli e G.N. Mercer. IEEE J. Q. Electr. Vol. QE-10, Nº 2, (1974), 213.
3. J.D. Craggs e J.M. Meek, High Voltage Laboratory Technique Butterworths, Londres, 1954, Cap. 4.
4. J.M. Lafferty. Vacuum Arcs, Theory and Application. John Wiley & Sons, Cap. 2.
5. J.D. Cobine. Gaseous Conductors, Dover, 1954, Cap. 7.
6. F.B.A. Frugel. High Speed Pulse Technology. Academic Press 1965, Cap. B.
7. D. Alpert, D.A.; Lee, E.M. Lyman and H.E. Tomaschke J. Vac. Sci. Technol., Vol. 1 (1964) 35.