

Gerador de Pulsos Eletromagnético de VHF

VHF Electromagnetic Pulses Generator

Samuel Nunes Nascimento Silva, Marcelo Bender Perotoni

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar um circuito eletrônico que gera pulsos e ruídos eletromagnético numa faixa de frequência entre dezenas de Hertz até aproximadamente 1MHz. O princípio de funcionamento desse circuito está baseado no efeito avalanche de corrente elétrica que, no circuito em estudo, ocorre na junção coletor-base de um transistor bipolar no momento em que a tensão aplicada no coletor ultrapassa a respectiva tensão de avalanche. O gerador é composto por dois estágios: circuito de disparo que é responsável por fazer o transistor conduzir e o circuito oscilador que é responsável por gerar pulsos e ruídos elétricos que são convertidos em pulsos e ruídos eletromagnético.

Embora este tipo de tecnologia seja capaz de danificar aparelhos eletrônicos quando os sinais gerados são de potências elevadas, ela pode ser aplicada, desde que a potência do sinal gerado não esteja dentro da faixa destrutiva, em situações onde haja necessidade de bloquear sinais de rádio frequência utilizados indevidamente, análise de distorção de sinais em probes de osciloscópio, geração de ruído base para estudo de EMC (compatibilidade eletromagnética) em circuitos eletrônicos entre outras aplicações.

Palavras-chave: Gerador de Pulso e Ruído Eletromagnético, Frequência, Sinais, Análise Elétrica no o Domínio do Tempo e Análise Elétrica no Domínio da Frequência.

Abstract

This work presents an electronic circuit that generates electromagnetic pulses in a frequency range from tens of Hertz up to approximately 1MHz. The operation principle of this circuit is based on the avalanche effect of electric current that, in the circuit under study, occurs at the collector-base junction of an NPN transistor at the moment the voltage applied to the collector exceeds the avalanche voltage (VCBO). The generator consists of two stages: a trigger circuit that is responsible for making the transistor start its conduction and the oscillator that is responsible for generating pulses and electrical noise that are converted into pulses and electromagnetic noise.

Although this type of technology is capable of damaging electronic devices when the generated signals have high power, it can be applied in situations when the signal power is not within the destructive range in order to intentionally block radio frequency signals, signal distortion analysis in oscilloscope probes, base noise generation for EMC (electromagnetic compatibility) studies in electronic circuits among other applications.

Keywords : Pulse and Electromagnetic Noise Generator, Electrical Time Domain Analysis and Electrical Frequency Domain Analysis.

1.Introdução

A geração de pulsos via transistores operando na condição de avalanche (breakdown) é conhecida desde a década de 60, onde a demanda por pulsos rápidos era crítica para aplicações na área de defesa, em geral relacionados com temporizações de intervalos curtos, como em experimentos de detonação de artefatos nucleares. Ainda não haviam sido disponibilizados com eficiência transistores de radiofrequência, com comprimentos de gate suficientemente pequenos, assim essa era a alternativa

disponível. Os princípios de operação foram sintetizados em [1], onde o sistema é modelado analiticamente, apontando no modelo de operação o análogo a um circuito com resistência e capacitância negativas, que geram o caráter oscilatório. Mais recentemente, com o surgimento de sistemas UWB (*Ultra Wide Band*), a necessidade de pulsos rápidos no domínio tempo ressurgiu com outros propósitos, tais como radares [2] [3]. Em aplicações onde seja necessária a radiação de campos provenientes de altas correntes, denominadas LCR (*Large Current Radiators*), transistores operando como geradores de pulso por efeito avalanche também foram usados [4]. Em função da simplicidade e relativo baixo custo estes geradores encontraram aplicações em GPR (*Ground Penetration Radar*) [5]. Esses geradores de pulso, baseados no fenômeno avalanche não totalmente reproduzível de maneira determinística e geram tensões relativamente altas (entre 20 V a 100 V), frequências de repetição entre kHz e MHz mas com jitters consideráveis [6].

O transistor bipolar apresenta, quando polarizado em condições de corte, apenas corrente de fuga. Essa corrente apresenta usualmente valores diminutos em condições de temperatura ambiente. Contudo, ao aumentar a tensão reversa da junção coletor-base, ocorre o denominado efeito breakdown – onde a corrente se torna independente da tensão e é limitada não mais pelo dispositivo, mas pelo circuito externo. Na operação de avalanche os pares elétron-lacuna adquirem alta energia cinética, através do campo elétrico de alta amplitude gerado na junção coletor-base que por sua vez faz a junção coletor-emissor entrar em condução. Esses pares acabam por gerar sucessivos pares por colisões sucessivas, advindo daí o nome avalanche [7]. A operação do dispositivo BJT na região de breakdown também é conhecida como avalanche (figura 1). As tensões BV_{CEO} e BV_{CBO} são, respectivamente, as tensões de avalanche para as junções coletor-emissor e coletor base. Percebe-se que nessa região existe um comportamento de resistência negativa entre o coletor e o emissor, responsável pelo efeito oscilatório.

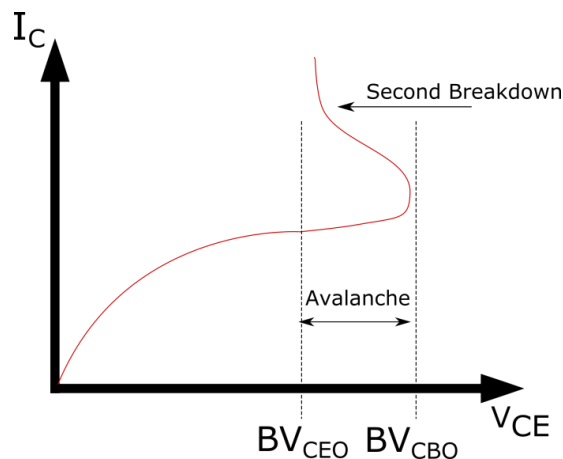


Figura 1: Região da curva de operação do transistor onde ocorre o fenômeno avalanche. Por exemplo, para o transistor 2N2222 temos $BV_{CEO} = 30$ V e $BV_{CBO} = 60$ V.

O fator de amplificação M no dispositivo pode ser escrito como [8]:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{CB}}{BV_{CBO}}\right)^m} \quad (1)$$

Onde V_{CB} é a tensão entre o coletor e base e m uma constante empírica, dependendo fundamentalmente da construção e dopagem do transistor – para transistor de Silício usualmente assume-se m próximo de 4.

$$I_C = M(\alpha I_E + I_{CBO}) \quad (2)$$

Onde I_{CBO} representa a corrente de saturação que flui entre a base e o coletor e α o ganho base comum (I_E/I_C), aproximadamente unitário para o transistor operando na região ativa. Manipulando-se a expressão chega-se em:

$$I_C = \frac{\alpha I_B + I_{CBO}}{1 - \alpha - \left(\frac{V_{CE} - V_{BE}}{BV_{CBO}}\right)^m} \approx \frac{\alpha I_B + I_{CBO}}{1 - \alpha - \left(\frac{V_{CE}}{BV_{CBO}}\right)^m} \quad (3)$$

Onde tomou-se a queda de tensão entre V_{CB} como sendo a diferença entre V_{CE} e V_{BE} . A simplificação da expressão 3 segue assumindo-se V_{CE} maior que V_{BE} .

Para a operação em avalanche toma-se a condição onde o denominador da eq. (3) torna-se zero, ou seja:

$$V_{CE} = \frac{BV_{CBO}}{\sqrt[m]{\beta + 1}} \quad (4)$$

Onde β é o ganho de corrente (I_C/I_B) do transistor bipolar.

O fenômeno avalanche, descrito acima, é o responsável pelo funcionamento do circuito gerador de pulsos e ruídos eletromagnético que será apresentado ao logo desse trabalho.

2. Funcionamento elétrico do gerador de pulsos eletromagnético

No circuito da figura 2 há, basicamente, duas subdivisões: circuito de disparo (responsável por fazer o transistor Q1 conduzir) e circuito gerador de pulsos elétricos.

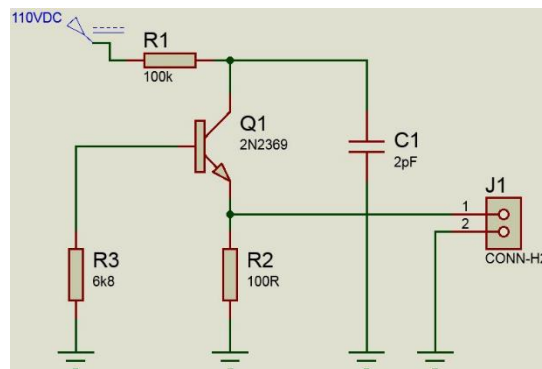


Figura 2: Esquema elétrico do gerador de pulsos eletromagnético proposto.

O circuito de disparo é composto por um resistor (R1) que carrega o capacitor (C1). Esse circuito tem por característica acionar o transistor Q1 no momento em que a tensão do capacitor C1 atingir V_{CBO} (tensão coletor-base - entre 40VDC e 120VDC). Quando o Q1 entra em condução, C1 é descarregado pelo resistor R2, ou seja, o C1 trabalha carregando e descarregando conforme pode ser observado na figura 3.

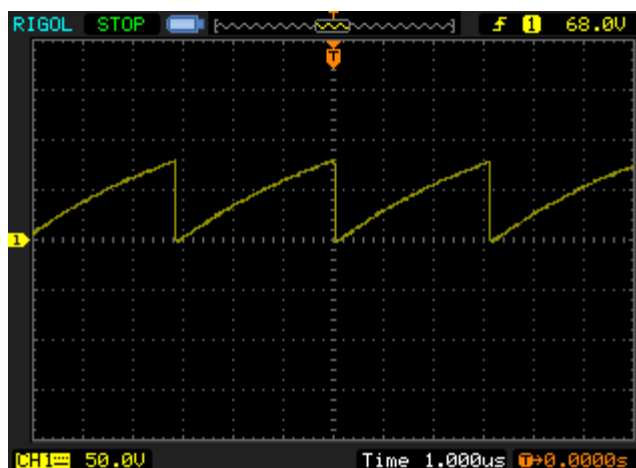


Figura 3: Carga e descarga do capacitor C1.

O sinal apresentado na figura 3 tem amplitude de aproximadamente 80V com tempo total de carga e descarga de 3.2us. Para o transistor utilizado nesse trabalho a tensão de breakdown ocorreu exatamente no momento em que a carga do C1 atingiu o seu pico máximo de tensão (80V). Vale salientar que o tempo de carga e descarga do capacitor C1 não é fixo em 3.2us sendo na realidade dependente de vários fatores que o fazer variar no tempo estocasticamente, caracterizando assim a geração de ruído.

O circuito gerador de pulsos elétricos é constituído pelo resistor R3, transistor Q1 e o resistor R2. No momento em que a tensão da junção coletor-base atingir 80VDC, começará a fluir uma corrente elétrica nessa junção que é capaz de polarizar a junção base-emissor através dos resistores R3 e R2 e nesse momento, o transistor Q1 entra em condução fazendo o C1 descarregar através de R2. O resultado desse processo é a geração de pulsos elétricos que podem ser observados na figura 4.

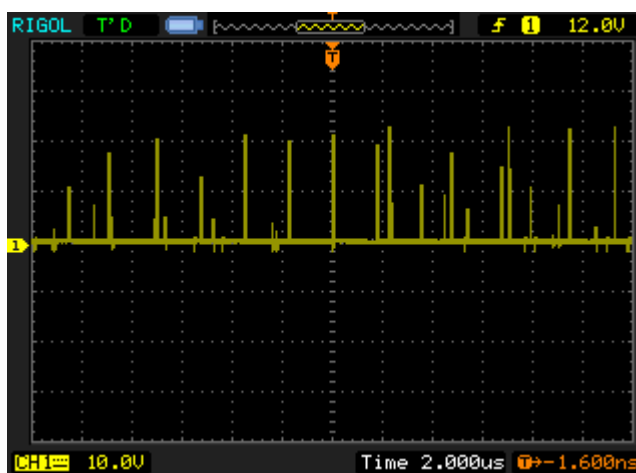


Figura 4: Pulsos elétricos medidos no emissor de Q1.

Os pulsos elétricos gerados pelo circuito em questão não ocorrem em tempos fixos, conforme observado na figura 4, e estão compreendidos numa faixa de frequência entre dezenas de Hertz até aproximadamente 1GHZ e não podem ser representados em apenas uma figura. O processo de carga e descarga do capacitor C1 e a geração de pulsos elétricos são sincronizados. No momento em que o capacitor C1 está sendo carregado o transistor Q1 está cortado e, por isso, não há geração de pulsos elétricos. Na figura 5 pode ser notado que o pulso elétrico só ocorre no momento em que C1 atingiu a tensão de breakdown (VCBO igual a 80VDC) do Q1.

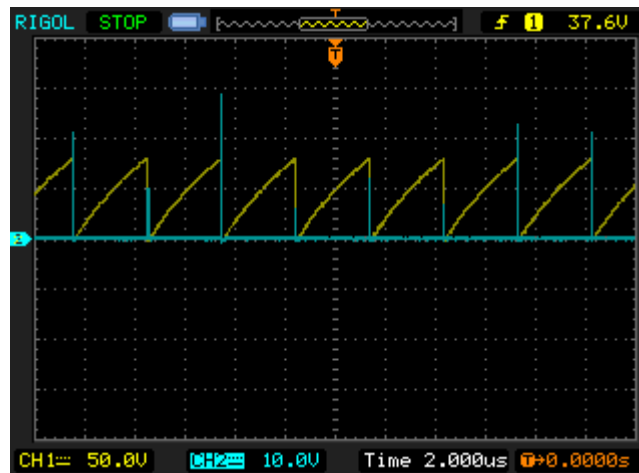


Figura 5: Representação do tempo de carga e descarga de C1 e geração dos pulsos elétricos. Sinal em amarelo representa o comportamento de carga e descarga do C1 e em azul, os pulsos elétricos gerados.

A escolha de R1 e C1 é razoavelmente arbitrária. Em geral, C1 pode variar de alguns pF até dezenas de pF e R1 pode variar de 100KΩ a 1MΩ. Quanto maior for o valor de C1, maior será a largura dos pulsos de avalanche devido ao aumento do tempo de descarga RC (R_2C_1), mas C1 não pode ser de valor muito elevado porque a energia liberada durante a avalanche aumenta com o aumento do valor do capacitor podendo causar falha da junção PN do transistor ou até mesmo a sua completa destruição. Para os valores dados, a frequência de pulsação é de aproximadamente 500kHz e quanto maior a frequência de pulsação, maior será a energia espectral do circuito, ou seja, a potência do sinal conduzido ou irradiado aumenta.

O valor do resistor R3 influencia na intensidade do pulso elétrico gerado no momento da avalanche e deve ser o menor possível para promover um sinal mais potente. R3 sendo de valor mais baixo faz com que a corrente na junção base-emissor aumente e quando essa corrente aumenta, o transistor Q1 é mais polarizado diminuindo a resistência entre coletor e emissor de Q1 fazendo o fluxo de corrente dessa junção ser mais intenso.

3 - Resultados

O gerador de pulsos e ruídos eletromagnético foi montado numa placa universal e ensaiado em conjunto com uma antena telescópica conectada a um analisador de espectro. Foram coletadas informações no domínio do tempo (sinais conduzidos em todo circuito) e também no domínio da frequência (sinais irradiados).

O sinal de interesse para esse trabalho é o que foi medido no emissor do transistor Q1 (figura 6). Como foi mencionado anteriormente, esse sinal pode ser utilizado em diversas aplicações e o que mais interessante nesse projeto é que o circuito gerador dispensa sinais externos para funcionar, basta apenas alimentar o circuito com uma tensão entre 90V a 120VDC para que na saída (J1) haja o sinal de interesse.

O sinal apresentado na figura 6 faz parte de um série de pulsos (figura 4) gerados pelo circuito proposto. Neste caso, o pulso tem amplitude de 33V, T_r (tempo de subida do sinal) e T_f (tempo de descida do sinal) igual a 3.5ns e largura de banda do sinal de aproximadamente 100MHz ($B_w = 0.35/T_r$). Esse sinal tem um comportamento exponencial porque ele é resultante da carga e descarga do capacitor C1 (equação 5).

$$V_c(t) = V_{DC} * (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (5)$$

Onde V_{DC} é a tensão de alimentação do circuito.

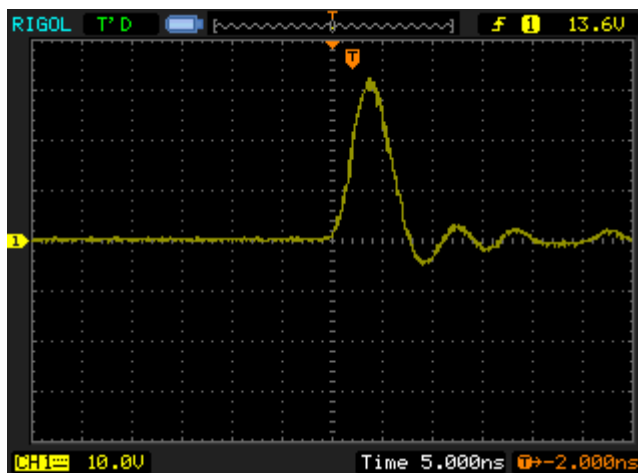


Figura 6: Pulso medido no emissor de Q1.

Após o término do pulso, é possível observar uma oscilação do sinal que é causada pela indutância parasita do C1. Para que haja uma diminuição considerável dessa oscilação é necessário utilizar capacitores com baixa indutância parasita associada. Outro fator que colabora com o aumento da oscilação ao término do pulso é a indutância parasita provocada pelos terminais do capacitor, por isso, os terminais devem ser o mais curto possível.

O capacitor escolhido deve ter uma frequência de auto-oscilação diferente do sinal em questão porque senão o sinal será acoplado ao GND do circuito. Quando o capacitor entra em ressonância, a impedância do mesmo diminui drasticamente e o seu valor se restringe a resistência parasita dele (ESR) e se essa resistência é muito baixa, o sinal é acoplado ao GND, ou seja, o sinal terá amplitude desprezível.

Quanto maior o valor de R2, maior será o T_f do sinal porque o tempo de descarga do C1 irá aumentar. Um valor alto de R2 diminui o fluxo de corrente entre C1 e R2 que resulta num sinal irradiado de baixa potência porque o campo magnético gerado pelo sinal está diretamente ligado a corrente.

O circuito proposto foi intitulado como Gerador de Pulsos Eletromagnético de VHF (30MHz-300MHz) porque a potência do sinal medido é mais significativo entre essa faixa de frequência (figura 7).



Figura 7: Medida do espectro do sinal irradiado pelo circuito gerador de pulsos.

O sinal irradiado apresentado na figura 7 foi coletado por um analisador de espectro a uma distância de aproximadamente 1.5m da fonte sinal. A análise espectral foi realizada numa varredura de frequência entre 0 a 1GHz e o sinal apresentou maior potência (-25.8 dBm) em torno de 100MHz. Isso quer dizer o circuito, naquele momento, apresentou o melhor rendimento em 100MHz. Esses resultados podem mudar de acordo com a frequência de transição do transistor, valores de R1 e C1 diferenciados, tipos de antenas diferentes ou com ganhos diferentes, tipo de conexão entre a saída do sinal e a antena, layout da placa, disposição de componentes na placa, efeitos parasitários no circuito como um todo entre outros.

O componente que provoca uma maior alteração na resposta do circuito gerador de pulsos eletromagnético em relação à frequência é o capacitor C1, por isso, todas as considerações feitas anteriormente devem ser levadas em consideração.

Num teste realizado com um rádio FM foi possível notar que nenhuma emissora funcionava enquanto o gerar de pulsos estava operando próximo (distância de 1.5m aproximadamente) a ele.

O ruído de fundo do ambiente (sem presença de sinal irradiada pelo do circuito) pode ser vista na figura 8.

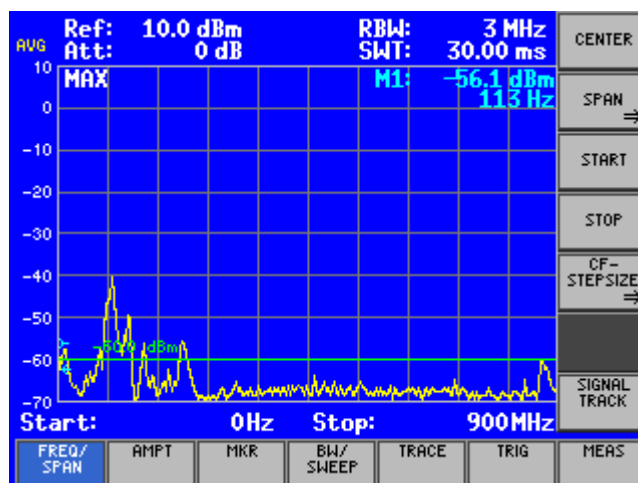


Figura 8: Ruído de fundo presente no ambiente de teste.

Como pode ser observado na figura 8, o laboratório aonde foi feito todos testes do circuito proposto não está imune de sinais externos e, por isso, foi captado sinais de rádio AM (530KHz-1600KHz) e FM (88MHz-108MHz), telefonia móvel (824MHz-900MHz) entre outros.

4 - Considerações finais

Testes envolvendo um gerador de ruído eletromagnético baseado em um transistor comum mostraram ser possível atingir frequências na faixa de VHF. O uso de transistores com maiores frequências de transição (fT) permitirá estender a faixa de geração de ruído.

Referências

- [1] J. S. T. Huang, "Study of Transistor Switching Circuit Stability in the Avalanche Region," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-2, no. 1, pp. 10–21, 1967.
- [2] A. A. H. Ameri, G. Kompa, and A. Bangert, "Balanced pulse generator for UWB radar application," *2011 8th Eur. Radar Conf.*, no. October, pp. 198–201, 2011.
- [3] J. D. Taylor, *Ultra-Wideband Radar Applications and Design*. CRC Press, 2001.
- [4] S. A. M. K. A. Lukin, G. P. Pochanin, "Large-Current Radiator with Avalanche Transistor Switch," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 39, no. 2, pp. 156–160, 1997.
- [5] C. L. S. Luo, P. Tang, "A circuit design of UWB GPR transient source based on avalanche transistor," in

- 2012 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, 2012, pp. 3–4.
- [6] J. Sachs, *Handbook of Ultra-Wideband Short-Range Sensing*. Wiley VCH, 2012.
- [7] Q. Wu and W. Tian, “Design of electronic circuits of nanosecond impulser based on avalanche transistor,” *Proc. - 2010 11th Int. Conf. Electron. Packag. Technol. High Density Packag. ICEPT-HDP 2010*, pp. 774–777, 2010.
- [8] W. D. Roher, *Motorola High-speed Switching Handbook*. 1963.
- [9] J. P. Hansen, “A Nanosecond , High-Current Pulse Generator Using Paralleled Avalanche Transistors A Nanosecond , High-Current Pulse Generator Using Paralleled Avalanche Transistors,” *Nav. Res. Lab. Rep.* 6539, 1967.
- [10] R. J. Baker, “High voltage pulse generation using current mode second breakdown in a bipolar junction transistor,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, no. 4, pp. 1031–1036, 1991.
- [11] A. M. Zou, H. B. Wang, Y. Z. Wang, and D. F. Cheng, “Nanosecond pulser based on serial connection of avalanche transistors,” in *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2010*, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 752–755.
- [12] W. G. Magnuson, “Variable-Width Pulse Generation Using Avalanche Transistors,” Oregon State University, 1963.
- [13] H. Liang, Z. Hu, Y. Lin, J. Du, and Z. Sun, “A subnanosecond pulser and a monopole antenna design for UWB applications -,” in *IET International Radar Conference 2015*, 2015, pp. 1–4.