

SIMULATIONS OF FRACTAL CAPACITORS

Ladislav Chvila

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xchvil01@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Pavel Hruska

E-mail: hruskap@feec.vutbr.cz

Abstract: This paper reports about simulations of fractal capacitors using Matlab, SolidWorks and Comsol Multiphysics. Effect of corners and fillets to capacitance density and maximum of electric field is discussed. Lateral flux capacitors with fractal electrodes and smooth sinus fractal are described. In this paper there is also written how can be the complex geometric structure for simulations generated.

Keywords: fractal, Hilbert Curve, Comsol Multiphysics, Matlab, SolidWorks, lateral flux capacitor, sinus fractal

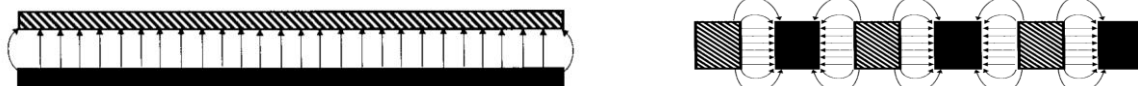
1. ÚVOD

Kapacitor je klíčová pasivní součástka integrovaných obvodů nacházející uplatnění v široké řadě obvodů. Kapacitorem bývá obvykle zabrána velká část plochy na substrátu, z tohoto důvodu je žádoucí efektivnějšího využití plochy, tzn. zmenšení plochy, kterou kapacitor zabírá při nezměněné velikosti kapacity.

Na substrátu lze kapacitor realizovat dvěma způsoby:

- kapacitor s vertikálním polem, deskový kapacitor (VPP - Vertical Parallel Plate)
- kapacitor s horizontálním polem, laterální kapacitor (Lateral Flux Capacitor)

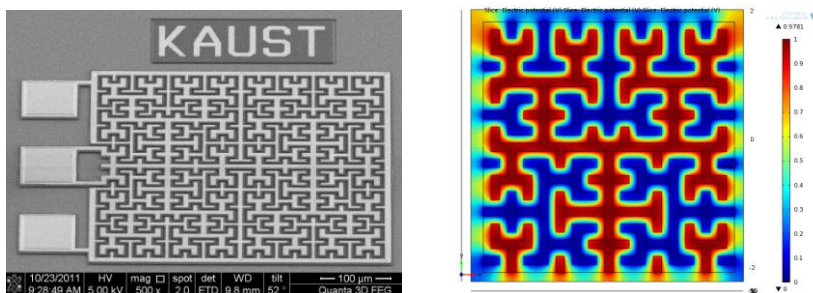
Výhodou první skupiny je velmi dobrá linearita, velká jakost a malá teplotní závislost. Kapacita je omezena poměrně velkou tloušťkou oxidu který odděluje jednotlivé vrstvy substrátu. Se zvyšující se integrací a zvětšováním rozlišení se zmenšuje horizontální vzdálenost mezi vodivými cestami. Aby nedocházelo k přeslechům mezi různými vrstvami, tloušťka mezi vrstvami zůstává téměř konstantní, proto změna měřítka (rozlišení) nemá zásadní vliv na velikost kapacity [1]. Z toho plyne výhoda laterálních kapacitorů, které mohou být tvořeny pouze v jedné vrstvě. Zvyšující se integrace zmenšuje mezery mezi elektrodami a kapacita tak vzrůstá. Další výhodou laterálních kapacitorů je redukce parazitní kapacity do substrátu, lepší souběh, menší sériový odpor nebo vyšší rezonanční kmitočet [1]. U laterálního kapacitoru může být rozhraní tvořeno fraktální geometrií.



Obrázek 1 - Vertikální kapacitor - vlevo, laterální (horizontální) kapacitor - vpravo [2]

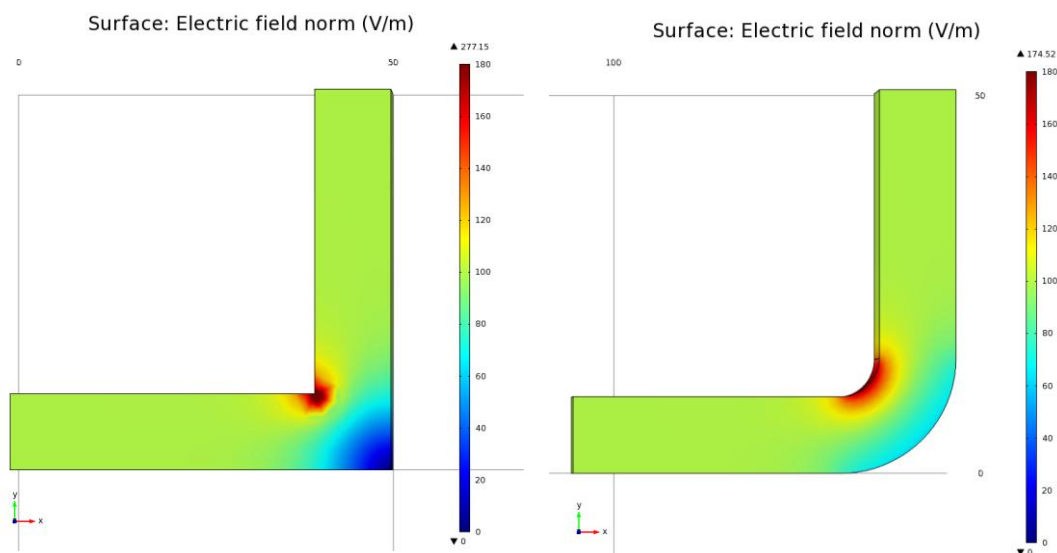
1.1. FRAKTÁLNÍ KAPACITORY

K efektivnímu využití plochy lze využít fraktální geometrie. Výhodou fraktálů je jejich rostoucí délka s každou iterací, délka teoreticky roste do nekonečna. Fraktální kapacitor tvořený v jedné vodivé vrstvě má vlastnosti laterálních kapacitorů, elektrické pole se rozprostírá především v horizontálním směru. Fraktální křivky, které mohou tvořit dielektrické rozhraní kapacitorů jsou např. Hilbertova křivka (obrázek 2), Peanova křivka, Moorova křivka a podobně.



Obrázek 2 - Fraktální kapacitor s motivem Hilbertovy křivky zhotovený v jedné vodivé vrstvě na substrátu [3] a výsledek počítačové simulace v Comsolu (zobrazeno je napětí 0 až 1 V)

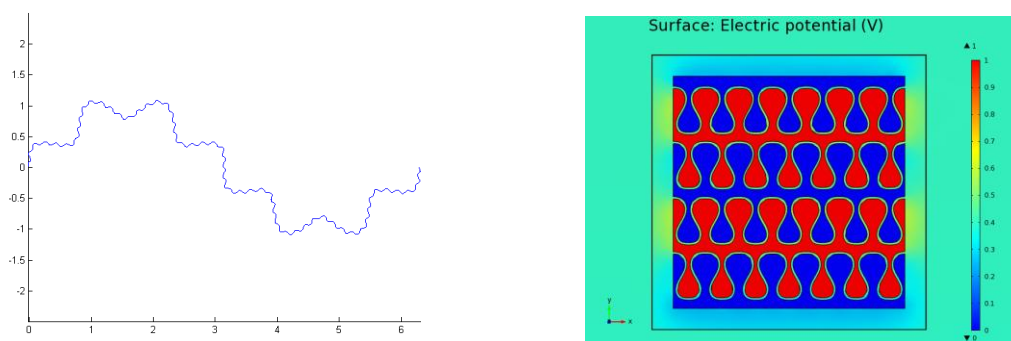
Nevýhodou těchto křivek jsou ostré hrany, které způsobují vysoká maxima elektrického pole E , což z důvodu elektrické pevnosti snižuje provozní napětí. Možným řešením je zaoblení těchto rohů, viz. obrázek 3, kde kapacitor s ostrým rohem dosahuje maximální velikosti $E = 277,15$ V/m, zaoblením bylo dosaženo maximální velikosti $E = 174,52$ V/m. Průřez obou struktur tvoří čtverec o straně 10 mm, délky vnějších hran jsou 50 mm. Druhá struktura vyobrazená na obrázku 3 vpravo vychází z první, hrana je nahrazena zaoblením o poloměru 10 mm.



Obrázek 3 - Rozložení velikosti intenzity elektrického pole, kapacitor s ostrou hranou (vlevo) a se zaoblenou hranou (vpravo). Červená barva odpovídá maximální velikosti E

1.2. VYUŽITÍ HLADKÝCH FRAKTÁLŮ

Jako možné řešení redukce velkých maxim elektrického pole se nabízí využití fraktálů, které nemají žádné ostré hrany, jsou hladké. Pro tento účel byla autorem zkonstruována křivka, která byla nazvána jako sinus fraktál, obrázek 4. Tvorba sinus fraktálu je následující: iniciační křivkou je sinusoida, v první iteraci se k původní křivce superponuje druhá sinusoida, která má menší amplitudu a větší frekvenci. V další iteraci se postupuje stejně, na předchozí křivku se opět superponuje další zmenšená sinusoida s větší frekvencí. Principem je tedy způsob jakým se další sinusoida přičítá, hodnoty další sinusoidy se přičítají ve směru normál k původní křivce. Obdobným způsobem lze generovat jakýkoliv jiný fraktál, iniciační křivkou může být například kružnice, půlkruh, polynom apod., různé křivky lze generovat i změnou parametrů, na obrázku 4 vpravo je zobrazena struktura kapacitoru s dielektrikem opisující křivku, která vznikla obdobným principem jako sinus fraktál.



Obrázek 4 - Sinus fraktál 2. iterace (vlevo), možné uspořádání elektrod laterálního kapacitoru (vpravo), červená barva značí kladnou elektrodu, modrá zápornou

1.3. VLIV GEOMETRICKÉHO TVARU ELEKTROD NA KAPACITU

Porovnáním kapacitorů z obrázku 3 bylo zjištěno, že větší kapacity dosahuje struktura s ostrou hranou, rozdíl činí zhruba 1,2%, avšak druhá struktura má vlivem zaoblení o 4,7 % menší objem dielektrika. Pokud by byla uvažována struktura se stejnými rozměry bez jakékoliv hrany či zaoblení - kapacitor ve tvaru hranolu o shodném objemu dielektrika jako u struktury s ostrou hranou, kapacita by vzrostla o 5%. Dalšími simulacemi bylo zjištěno, že fraktální kapacitory poskytují delší rozhraní, ale růst kapacity je brzděn většími vzdálenostmi elektrod v některých částech struktury. Tento efekt je patrný porovnáním kapacit rovné a zaoblené struktury, elektrody mohou být v hranách různě vzdálené nebo se vlivem zakřivení zkracuje jejich délka.

1.4. KONSTRUKCE SLOŽITĚJŠÍCH GEOMETRIÍ KAPACITORŮ

Konstruování složitějších struktur určených k simulaci v programu Comsol Multiphysics je časově náročné vzhledem k omezeným možnostem prostředí, ve kterém se geometrie vytváří. Geometrii lze importovat jako samostatný soubor nebo využít některého z rozhraní LiveLink, případně využít přímého zásahu do generovaného kódu v Matlabu. Jako vhodný způsob tvorby složitějších geometrií se osvědčilo propojení s programem SolidWorks, kde lze pomocí nástrojů kopírování a přesunu entit snadno vykreslit širokou škálu fraktálů. Protože v SolidWorks není možnost exaktně definovat např. sinusoidu, je použito nástroje importu souřadnic bodů ze souboru, kdy potřebná křivka je nejdříve matematicky zkonstruována v Matlabu, exportována ve správném formátu do textového souboru a nakonec načtena v SolidWorks připravena k dalším úpravám.

2. ZÁVĚR

Simulacemi laterálních kapacitorů bylo zjištěno, že struktury s ostrými hranami dosahují vysokých maxim elektrického pole. Aby došlo k jejich snížení, lze využít zaoblení. Obě simulované struktury mají menší kapacitu než kapacitor s rovnými elektrodami. U kapacitorů s fraktální geometrií bylo zjištěno, že délka rozhraní elektrod roste, avšak vlivem ostrých hran a zaoblení nedochází k většímu nárůstu kapacit. Zjištěnou výhodou hladkých fraktálů je pokles lokálních maxim elektrické intenzity. Konstrukce složitějších geometrií kapacitorů a jejich simulace je realizována v programech Comsol Multiphysic, SolidWorks a Matlab.

3. REFERENCE

- [1] C. Gimeno, S. Celma, B. Calvo, J. Revuelto.: *Hilbert Curve Based Lateral Flux Capacitors*, IEEE J., Electron Devices, p. 219-22, Feb. 2009
- [2] H. Samavati, A. Hajimiri, A. R. Shahani. : *Fractal capacitors*, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 33., no 12, Dec. 1988.
- [3] A. M. Elshurafa, A. G. Radwan, A. Emira , K. N. Salama.: *RF MEMS Fractal Capacitors With High Self-Resonant Frequencies*, IEEE J. Microelectromechanical Systems, vol. 21,no 1, Feb. 2012