

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Stanislav Koc

Gunnův jev - příklad záporného diferenciálního odporu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 16 (1971), No. 6, 311--314

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137640>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1971

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

GUNNŮV JEV — PŘÍKLAD ZÁPORNÉHO DIFERENCIÁLNÍHO ODPORU

STANISLAV KOC, Praha

S pojmem záporného elektrického odporu setkáváme se v oblasti výbojů v plynech při výkladu anomálního chování elektrického oblouku, u něhož pokles napětí je doprovázen vzrůstem proudu. Vzhledem k tomu, že uvažujeme o přírůstcích či úbytcích napětí a proudu, doplňuje se tento pojem slovem diferenciální, tj. mluví se o záporném diferenciálním odporu. Jeho význam je ovšem mnohem širší a jeho použití je dnes běžné v mnoha oblastech moderní elektroniky.

Záporný diferenciální odpor může u reálných objektů existovat pouze v určité omezené oblasti; představíme-li si obecnou E-I charakteristiku, snadno dojdeme k závěru, že mohou existovat dva odlišné tvary E-I charakteristik s oblastí záporného diferenciálního odporu. Podle vnější podobnosti tvaru charakteristiky s velkými písmeny abecedy bývají označovány jako typ N a S. Z vnitřních souvislostí vyplývá, že u N-typu pouze napětí jednoznačně definuje polohu na charakteristice, zatímco proud v určitém oboru vede k mnohoznačnosti u elektrického pole. Říkáme proto tomuto typu záporný diferenciální odpor řízený napětím. Obdobná úvaha vede u typu S k tomu, že mluvíme o záporném odporu řízeném proudem. Nejdůležitějším důsledkem existence oblasti záporného diferenciálního odporu na grafu E-I charakteristiky je, že se pro materiál vyskytuje obor s nestabilními elektrickými podmínkami. A to vede k vážnému závěru: materiál původně homogenní, aby dosáhl stabilních podmínek, stává se elektricky nehomogenní.

Vzpomeneme-li si na elektrický oblouk s V-A charakteristikou S-typu (s negativním diferenciálním odporem řízeným proudem), vytváří se v původně úplně homogenním prostředí při přiložení dostatečně vysokého napětí výbojový kanál s vysokou proudovou hustotou, prostorově svými vlastnostmi ostře odlišný od zbývající části okolí. Ukážeme si, že podobný úkaz prostorové diferenciace elektrických vlastností je důsledkem také v druhém případě, tj. u V-A charakteristiky typu N s negativním diferenciálním odporem řízeným napětím. V tomto případě dochází ke vzniku oblasti s vysokým elektrickým polem, tzv. domény. Již předem vidíme, že oba případy jsou si značně podobné a mají navzájem „zrcadlové“ vlastnosti. Nehomogenita prostředí u typu N má rozhraní rovnoběžná s equipotenciálami a proud mimo i uvnitř domény je totožný; nehomogenita u typu S probíhá kolmo na equipotenciály a shodné uvnitř i vně kanálu je napětí.

Pokusme se představit si vznik elektrické domény na konkrétním případě GaAs. Galium arsenid má poněkud zvláštní pásové schéma své elektronové struktury. Vodivostní pás je vytvářen jednak elektrony s nízkou efektivní hmotou, jednak elektrony s mnohem vyšší efektivní hmotou. Jak známo souvisí velikost efektivní hmoty s pohyblivostí nositelů náboje: elektrony s nízkou efektivní hmotou jsou „lehké“

a snadno se pohybují v elektrickém poli, tj. mají vysokou pohyblivost. A dalším důsledkem je nižší hustota jejich stavů. Pro „těžké“ elektrony je tomu opačně. V GaAs mají lehké elektrony pohyblivost okolo $8000 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$, zatímco těžké (jejichž stavy začínají o cca 0,36 eV výše než v lehkých) mají pohyblivost jen $150 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ (tj. cca $50 \times$ menší). A nyní si představme, že ke vzorku ze silně legovaného N-typu GaAs s ohmickými kontakty na protilehlých stranách přiložíme napětí. Vzorkem začne protékat proud způsobený pohybem volných elektronů. Při malých napětích zůstává záporný náboj elektronů v celém objemu vzorku kompenzován kladným nábojem stacionárních iontů mřížky, takže krystal zůstane elektricky neutrální a homogenní. Náhodné místní narušení rovnovážné koncentrace elektronů dané přirozenými fluktuacemi vede např. při zvýšení počtu elektronů v daném místě k lokálnímu zvýšení pole mezi tímto místem a anodou a k poklesu pole směrem ke katodě. To má za následek zvýšený odchod elektronů k anodě a snížení proudu od katody, tj. k snížení až vymizení uvažované fluktuace. Co se nyní stane, budeme-li ke vzorku přiložené napětí zvyšovat? Po překročení určitého prahového elektrického pole (u GaAs asi 3000 V/cm) část elektronů, které získávají energii z elektrického pole a jejichž takto získaná energie nebyla odčerpána nějakým rozptylovým mechanismem, dostane se do podmínek tzv. těžkých elektronů, tj. jejich pohyblivost — jak již bylo uvedeno — silně klesne. A protože proud v dané oblasti je dán součinem koncentrace nositelů náboje a jejich pohyblivosti, proud klesne. Při zvýšení přiloženého napětí proud dále klesá, takže máme typický projev negativního diferenciálního odporu.

Aplikujme nyní na tento případ pokus s lokální fluktuací v hustotě elektronů, což je jev naprosto přirozený. V prostoru směrem k anodě elektrické pole stoupne, což má za následek pokles odtoku elektronů; mezi katodou a uvažovanou fluktuací pole klesne, a proud tedy stoupne. To ovšem znamená, že v daném místě se narušení původní nábojové rovnováhy dále prohloubí, přisun elektronů od katody stoupne, jejich odchod se sníží a navíc se celý proces lavinovitě rozeběhne. Jednoduchá úvaha o difúzi nositelů do stran, tj. kolmo k směru proudu ukazuje, že celá fluktuace se rychle rozroste ve tvaru tenké vrstvy prostorového náboje, která je shodná s equipotenciální plochou v daném místě. Vznikla elektrická doména. Doména vysokého elektrického pole je dipólová vrstva tvořená akumulací vrstvou elektronů a vrstvou polovodiče bez volných nositelů (tzv. depletion layer), kde převládá kladný náboj ionizovaných atomů příměsí — donorů.

Elektrické pole uvnitř domény dosahuje řádu 10^5 V/cm , zatímco pole vně klesá pod kritické prahové pole, čímž se zastaví uvažovaný lavinovitě se rozšiřující proces a ustaví se rovnováha, vyznačující se elektricky nehomogenními podmínkami v materiálu, jenž byl až do přiložení napětí vyššího než prahové naprosto homogenní. Doba potřebná k vytvoření domény, tzv. nukleační čas, se odhaduje na 10^{-10} sec .

Vzniklé doméně prostorového náboje ovšem nic nebrání, aby se nepohybovala pod vlivem přiloženého napětí směrem k anodě. Její rychlost přitom souvisí samozřejmě s pohyblivostí nositelů. Z přesných měření vyplývá, že je blízká, avšak mírně vyšší než průměrná rychlost nositelů v podmínkách malých intenzit elektrického pole.

Po příchodu domény k anodě a zaniknutí jejího prostorového náboje v ní, objeví se velmi krátce na vzorku opět nadkritické pole, jež dá téměř okamžitě na vhodném místě či fluktuaci opět vznik další nové domény. Přitom se ukazuje, že příhodné podmínky pro vznik domény bývají poblíž katody, kde díky blízkosti kovového kontaktu jsou poměry mírně odlišné od kompaktního materiálu vzorku. A tak se proces opakuje. Doména za doménou probíhají vzorkem a nová vždy znovu a znovu vzniká u katody po zániku předešlé na anodě. Proud protékající vzorkem udržuje se během pohybu domény mezi elektrodami na konstantní hodnotě, zatímco při jejím zániku a vzniku nové krátce silně vzroste. Jinými slovy vzorek osciluje. Kmitočet oscilací závisí na geometrické délce vzorku a v typických případech lze snadno získat pulsy s opakovací frekvencí řadu desítek GHz, tj. v oblasti mikrovln.

Právě popsaný jev dostal označení GUNNŮV jev podle svého experimentálního objevitele v roce 1963, i když jeho existence byla již dva roky předem předpokládána právě na základě představ o vlivu záporného diferenciálního odporu řízeného napětím a znalostí o zvláštní elektronové struktuře některých polovodičů (s existujícími několika typy nositelů náboje téhož znaménka — many-valley semiconductors). Stejný jev byl pak pozorován také na GaP, jeho slitinách s GaAs a na InP.

Další fyzikální rozpracování ukázalo, že oblast záporného diferenciálního odporu řízeného napětím může být také výsledkem jiných mechanismů než jen komplikovaného transportu volných nositelů v polovodiči se speciální elektronovou strukturou. Dnes známe tentýž jev, tj. vznik elektrické domény při nejmenším u dalších dvou typů materiálů. Jedním jsou piezoelektrické polovodiče (CdS, ZnO) se silnou interakcí mezi elektrony a fonony, u nichž se doména pohybuje rychlostí šíření zvuku v daném prostředí. Dalším typem jsou tzv. materiály s pomalou doménou. Patří sem např. germanium silně legované zlatem nebo mědí nebo téměř intrinzické polovodiče GaAs či CdS, u nichž dochází k přednostnímu záchytu rychlých elektronů na ionizovaných příměsích, jež působí jinak na normální nositele náboje odpudivě svou coulombovskou bariérou. Rychlost domén tohoto druhu se pohybuje kolem 1—100 cm/sec.

Analýza Gunnova jevu vede k závěru, že existence záporného diferenciálního odporu na VA charakteristice použitého materiálu (související s jeho zvláštní elektronovou strukturou) je sice podmínkou nutnou, nikoliv však postačující pro vznik Gunnova jevu. Šíře domény, jež souvisí s koncentrací ionizovaných příměsí, nesmí samozřejmě překročit geometrickou délku vzorku, protože pak se v ní nemůže vytvořit dostatečný náboj, a tím ani elektrické pole. To znamená, že k plnému vytvoření domény dochází jen v materiálech, jejichž dotace je dostatečně vysoká. Při nesplnění této podmínky nelze sice dosáhnout nenarušeného Gunnova typu provozu, avšak přesto je možno využít takovýchto pracovních podmínek k zesilování mikrovlnných signálů (nikoliv tedy přímo k jejich generaci). Třetí typ provozu součástek, v nichž se vyskytuje elektrická doména, se označuje jako LSA (Limited Space-charge accumulation). Vnutíme-li takové součástce pracovní kmitočet vyšší než odpovídá normálnímu Gunnovu jevu, např. připojením k vnějšímu laděnému obvodu

(mikrovlnný dutinový rezonátor) s vysokým koeficientem jakosti Q , pak dříve než vzniklá doména má čas proběhnout celým vzorkem, zaniknou vnější elektrické podmínky pro její existenci, tj. napětí klesne pod prahovou hodnotu a doména se rozpadne. Tento poslední LSA provoz se v poslední době považuje za velmi perspektivní.

Celkově se Gunnovu jevu připisuje obdobné postavení a přínos jako objevu tranzistorového jevu v době těsně po druhé světové válce. Umožňuje jednoduchý způsob zesilování i generace mikrovln a zvyšuje velmi podstatně frekvenční hranici elektronických zařízení. Technologie součástek využívající Gunnova jevu je obdobná a sloučitelná s moderním přístupem k výrobě integrovaných obvodů. Předpokládá se, že jevu bude možno využít také ve velmi rychlé počítačové technice, generaci tvarových pulsů apod. V současné době je v zahraničí již v provozu a výrobě malý přenosný (ruční) mikrovlnný radar.

Literatura

B. R. PAMPLIN: Negative Differential Conductivity Effects in Semiconductors. *Contemp. Phys.* 11, (1970), No 1,1.

MINULOSTĚ A PERSPEKTÍVY FYZIKY V MAĎARSKU*)

(K dvom významným jubileám maďarskej fyziky)

MATEJ RÁKOŠ, JUDITA FEHÉROVÁ, Košice

Fyzikovia v Maďarskej ľudovej republike majú v poslednej dobe dve príležitosti bilancovať svoju prácu v minulosti a súčasne robiť plány do budúcnosti. Tohoto roku (1971) je tomu 80 rokov od založenia stavovskej organizácie maďarských fyzikov *Eötvös Loránd Fizikai Társulat* (Fyzikálna spoločnosť Loranda Eötvösa). Rok predtým oslavovali 20. výročie založenia prvého a súčasne aj doteraz najväčšieho fyzikálneho výskumného pracoviska v MLR nesúceho názov *Központi Fizikai Kutató Intézet* (Ústredný fyzikálny výskumný ústav). Keď súčasne uvažíme, že obidve výročia spadajú do 25. výročia vzniku Maďarskej ľudovej republiky, zaiste bude to vhodné práve teraz, aby sme sa v našom časopise oboznámili s organizačnou a vedeckou prácou fyzikov v našom susedstve, s ktorými udržujeme dobré a užitočné styky a spoluprácu. Predpokladáme, že československých fyzikov, členov JČSMF bude zaujímať práca organizácie, majúca analogické úkoly u našich maďarských susedov.

*) Článek byl zpracován podle materiálu, který dal redakci na její žádost k dispozici předseda ELFT akademik Szigeti. Pozn. red.