

FLUX METHOD AND HETERONJUNCTION TRANSISTORS

Jan VANĚK, Master Degree Programme (5)
Dept. of Microelectronics, FEEC, BUT
E-mail: xvanek12@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Dr. Michal Horák

ABSTRACT

This paper concerns the overview and basic features of the McKelvey's flux method, which forms the physical basis for modeling the complex device physics and description of the carrier transport in modern heterojunction bipolar transistors (HBTs). This method is also available to construct a physical model of the transistor with the quasi-ballistic transport in short base.

1 ÚVOD

Pro analýzu polovodičových přechodů stačilo až donedávna využít tradiční přístup založený na rovnici kontinuity a driftově-difúzních rovnicích. Rozměry polovodičových součástek se však s technologickými pokroky stále zmenšují a přestávají vyhovovat omezujícím předpokladům driftově-difúzního modelu. Šířka báze u moderních heteropřechodových tranzistorů je již tak malá, že se elektrony od kolektoru k emitoru pohybují téměř beze srážek nebo i úplně beze srážek, takže jejich pohyb není difúzní, ale kvazibalistický nebo i balistický, v případě, že ke srážkám nedochází vůbec. To se musí odrazit v nových přístupech k modelování submikrometrových tranzistorů.

Jednou z metod, používaných pro popis přenosů nosičů náboje v tranzistorech s heteropřechody, je tzv. metoda toků. Přehledem a základními vlastnostmi této metody se bude zabývat tento článek.

2 HETEROPŘECHODOVÝ TRANZISTOR

Heteropřechod vznikne tehdy, když se určitým technologickým postupem vytvoří kontakt mezi dvěma polovodiči z různých materiálů. Heteropřechodový tranzistor má alespoň jeden přechod (zpravidla báze-emitor) tvořen kontaktem dvou různých polovodičů. Kromě heteropřechodu báze-emitor je možné vytvořit i heteropřechod báze-kolektor. Pak hovoříme o tranzistorech se dvěma heteropřechody (double heterojunction bipolar transistor, DHBT).

Pokud bude tloušťka báze tranzistoru dostatečně malá, resp. menší než pětinašobek střední difúzní délky elektronů, začnou se projevovat tzv. nerovnovážné efekty – rychlost elektronů emitovaných z oblasti emitoru do báze se značně zvýší, protože elektrony

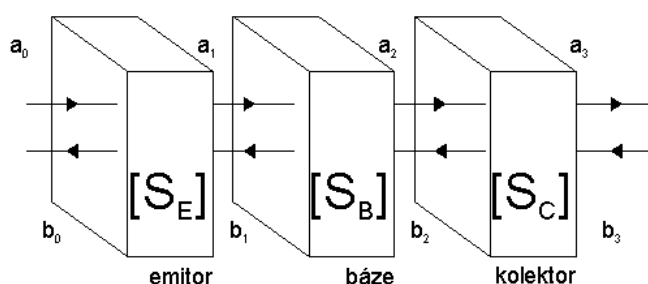
procházející skrz bázi budou jen mírně vychylovány z dráhy srážkami s kmitajícími atomy krystalové mříže, příměsemi apod., budou se pohybovat po tzv. kvazibalistických drahách – v případě, že srážek bude málo nebo i balisticky (žádné srážky).

3 METODA TOKŮ A MATEMATICKÝ POPIS TRANZISTORU

Teorii toků původně představil McKelvey [1]. Na práci McKelveye navázali další, metoda se tak dočkala několika vylepšení a dnes se používá v různých modifikacích.

Metoda toků má oproti tradičně užívanému modelu polovodičových přechodů, založeném na rovnici kontinuity a driftově-difúzním popisu několik výhod. Na rozdíl od klasické metody zde není nutný zmíněný omezující předpoklad, že rozměry heteropřechodu (zejména šířka báze u tranzistoru) jsou větší nebo srovnatelné se střední volnou dráhou nosičů náboje. Proto je metoda toků vhodným nástrojem k matematickému řešení kvazibalistického transportu pro modely polovodičových součástek s velmi malými rozměry v poměru se střední volnou dráhou elektronů.

Hlavní myšlenka spočívá v popisu jednotlivých oblastí tranzistoru (emitoru, báze a kolektoru) pomocí tzv. rozptylových matic rozměru 2x2. Obr. 1 znázorňuje bipolární tranzistor rozdělený na tři izolované oblasti popsané pomocí rozptylových matic $[S_E]$, $[S_B]$ a $[S_C]$. Transport nosičů náboje je popsán na základě toků dopadajících a vycházejících z každé oblasti.



Obr. 1: Znáornění bipolárního tranzistoru rozděleného na 3 izolované oblasti

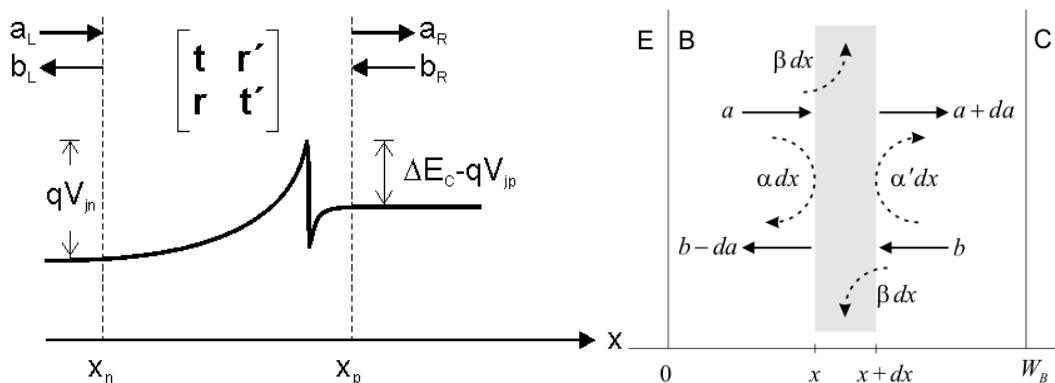
Princip toků v heteropřechodu ilustruje obr. 2, kde je vidět souvislost vstupujících toků a_L , b_R a vystupujících toků a_R , b_L :

$$\begin{bmatrix} a_R \\ b_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & t' \\ r & r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_L \\ b_R \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} a_L \\ b_R \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde $[S]$ je rozptylová matice pro jednotlivou oblast. Protože předpokládáme, že báze je homogenní, a dva heteropřechody jsou orientovány proti sobě, rozptylové matice mají tvar:

$$[S_E] = \begin{bmatrix} t_E & t'_E \\ r'_E & r_E \end{bmatrix}, [S_B] = \begin{bmatrix} t_B & r_B \\ r'_B & t_B \end{bmatrix}, [S_C] = \begin{bmatrix} r'_C & t'_C \\ r_C & r'_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

kde t , t' a r , r' jsou přenosové a zpětně přenosové (reflexní) pravděpodobnosti pro toky přicházející z levé resp. z pravé strany. Prvky matice jsou reálná čísla, která leží v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, a označují pravděpodobnosti transportu částice.



Obr. 2: Definice prvků rozptylové matice vzhledem k N-p orientaci heteropřechodu a dopadajících a vystupujících toků v bázi.

3.1 ROZPTYLOVÉ MATICE PRO EMITOR BÁZI A KOLEKTOR

Prvky rozptylových matic emitoru a kolektoru lze odvodit následující vztahy [2]:

$$t_i = \exp\left(\frac{-qV_{jn}}{k_B T}\right), \quad t'_i = \exp\left(\frac{\Delta E_C - qV_{jp}}{k_B T}\right), \quad (3)$$

kde index i značí emitor ($i = E$) nebo kolektor ($i = C$), $\Delta E_C - V_{jp}$ a V_{jn} jsou odpovídající potenciálové bariéry (viz obr. 2) Bázové koeficienty t_B, r_B vycházejí z řešení diferenciálních rovnic, sestavených na základě dopadajících toků a odražených a rekombinačních složek ve vrstvě tloušťky dx (obr. 2), přičemž rozptylová složka je značena αdx , $\alpha' dx$, rekombinační složka βdx . Podle appendixu [2] lze nalézt:

$$t_B = \frac{1}{\cosh(\beta\kappa W_B) + (\kappa^2 + 1)/2\kappa \sinh(\beta\kappa W_B)}, \quad r_B = \frac{(\kappa^2 + 1)/2\kappa \sinh(\beta\kappa W_B)}{\cosh(\beta\kappa W_B) + (\kappa^2 + 1)/2\kappa \sinh(\beta\kappa W_B)}, \quad (4)$$

κ je veličina vyjádřená pomocí teplotní rychlosti v_T , bázového difúzního koeficient D_B , a rekombinační doby života τ_{rec} jako: $\sqrt{v_T^2 \tau_{rec} / D_B + 1}$.

4 ZÁVĚR

V tomto článku jsou představeny hlavní principy popisu tranzistoru pomocí rozptylových matic McKelveyovy metody toků, jejíž podrobný rozbor bude podstatnou částí mojí diplomové práce. V současné době probíhá vývoj programu v prostředí Mathematica, který po zadání materiálových a vnějších parametrů modeluje výstupní veličiny heteropřechodových tranzistorů s kvazibalistickou bází včetně grafických výstupů.

LITERATURA

- [1] McKelvey, P., Longini, L., Brody, P.: Phys. Rev. 123, 51 (1961)
- [2] Tanaka, S., Lundstrom, S.: Solid-St. Electron. 37, 401 (1994)
- [3] Lundstrom, S., Solid-St. Electron 29, 1173 (1986)