

МЕТОДИ ЗА УВЕЛИЧАВАНЕ НА СТЪРМНОСТТА НА ТРАНЗИСТОРА

Мила Илиева-Обретенова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, milailieva@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Стърмността на транзистора е важен параметър, отчитащ неговата енергийна ефективност. Стърмността се представя чрез изменението на изходния ток спрямо изменението на входното напрежение. Нейното изследване включва анализ на елементи с нови конструкции и нови материали по следните критерии: стъпка на изменение на входното напрежение, стойност на прагово напрежение и ток на утечка в състояние „изключен“. В статията са представени тунелен полев транзистор (TFET), триизмерен транзистор (Fin-FET), транзистор с два гейта (dual-gate), графенов баристор (graphene "barristor" - GB), фототранзистор с графин и квантови точки и фототранзистор с органични молекули с цел включване в учебник.

TRANSISTOR NONLINEARITY AUGMENTATION METHODS

Mila Ilieva-Obretenova

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, milailieva@abv.bg

ABSTRACT. Transistor nonlinearity is an important parameter, considering its energy efficiency. Nonlinearity is represented by the output current change to input voltage change. Its study includes analyses of elements with new constructions and new materials on the following criteria: change step of input voltage, threshold voltage value and leakage current in state "off". The paper presents Tunneling field effect transistor (TFET), 3D-transistor (Fin-FET), dual-gate transistor, graphene "barristor" – GB, phototransistor with graphene and quantum dots and phototransistor with organic molecules. The aim is inclusion in students' book.

Въведение

Стърмността на транзистора е важен параметър, отчитащ неговата енергийна ефективност. Тя представлява изменението на изходния ток спрямо изменението на входното напрежение. При сега използваните транзистори стърмността е 60mV/dec, т.е. ако входното напрежение се измени с 60mV (0,06V), изходният ток се изменя с фактор 10 (10 пъти). Тази стърмност се постига чрез р-п-преход между два вида полупроводник и полев ефект в полупроводник.

При р-п-прехода се използват неговите изправителни свойства – в права посока провежда електричен ток с голяма стърмност, в обратна посока – много малък ток. Параметрите на р-п-прехода са:

1. Потенциална бариера: 0,32V,
2. Стъпка на изменение на входното напрежение: 60mV,
3. Прагово напрежение, при което преходът преминава в състояние „включен“: 0,6V (ток: 1mA),
4. Отношение ток на включване/ток на изключване:

$$\frac{I_{on}}{I_{off}} = 10^5$$

5. Ток на утечка в състояние „изключен“: 1 μ A,
6. Напрежение за достигане на праговото напрежение: 300 mV (0,3V).

При полев ефект в полупроводник се използва протичането на ток под действие на електрично поле. Феноменът се прилага при полев транзистор с р-п-преход. В полупроводниковия кристал са създадени два

срещуположни прехода, свързани в обратна посока. Целта е да се регулира токът през полупроводника. Праговото напрежение отбелязва състояние „изключен“. Токът на утечка е много малък, но транзисторът е енергоемък – напрежението за достигане на прагово напрежение е 3V. Този проблем се решава чрез MOSFET транзистор с индуциран канал. Чрез изолиращ окисен слой и срещуположни р-п-преходи в права посока се намалява консумацията. Праговото напрежение сочи състояние „включен“. В състояние „изключен“ липсва ток на утечка, защото няма изграден канал. За да се намали още разходът на енергия, фабрично се създава канал между два р-п-прехода (MOSFET с вграден канал). Р-п-преходът в права посока обеднява канала и праговото напрежение сочи състояние „изключен“. Въпреки това токът на утечка е по-голям от този при MOSFET с индуциран канал (Велчев, 2006; Вълков, 2006; Колева, 2010).

Целта на настоящата работа е да се представят най-новите изследвания за усъвършенстване на параметрите на транзисторите, най-важният от които е стърмността.

Методология

Методологията за изследване на стърмност на транзистора включва анализ на елементи с нови конструкции и нови материали по следните критерии:

1. Стъпка на изменение на входното напрежение,
2. Стойност на праговото напрежение,
3. Ток на утечка при състояние „изключен“.

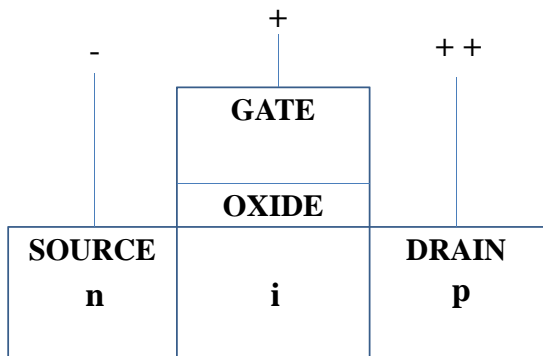
Резултати

1. Елементи с нови конструкции

1.1. Тунелен полев транзистор (Tunneling Field Effect Transistor - TFET)

В TFET (Seabaugh, 2013) е аранжиран полупроводников материал в p-i-n или n-i-p конфигурация. „i” означава истински (intrinsic) и показва, че каналът има толкова електрони, колкото и дупки. Това състояние кореспондира с максималното съпротивление, което един полупроводник може да има, т.е. въвежда се енергийна бариера, която токоносителите в сорса е невъзможно да преминават. Но когато бариерата е с дебелина под 10nm, има малка, но ненулева, вероятност електрон, който стартира от едната страна на бариерата, да се появи от другата.

В TFET се стимулира тази вероятност чрез прилагане на напрежение към гейта на транзистора. Това предизвиква припокриване на валентната зона в сорса и на проводящата зона в канала, като се отваря един тунелен прозорец. Докато се движат в канала, електроните преминават от проводящата във валентната зона за разлика от MOSFET, в който електроните се намират в едната зона (валентна зона – липса на канал) или в другата зона (зона на проводимост – индуциран канал). На Фиг.1 е показана конструкция на TFET.



Фиг.1. Конструкция на TFET

В n-канален MOSFET електроните се движат в проводящата зона (с енергия E_c) от сорса към дрейна. Състоянието на елемента може да се превключи от „изключен” към „включен”, ако се приложи достатъчно напрежение, което да намали енергийната бариера в p-n-прехода.

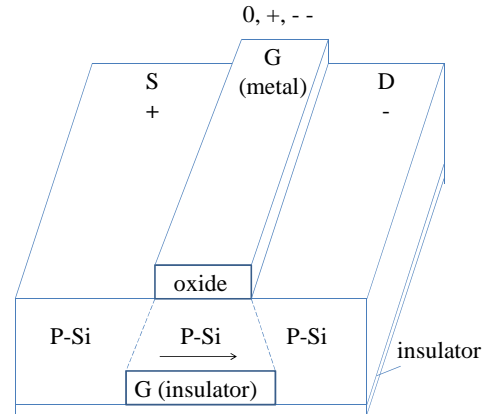
В n-канален TFET електроните произхождат от валентната зона на сорса (E_v), n-област. Малко положително напрежение на гейта увеличава проводящата зона на канала (електроните от сорса преминават в канала), така че тя се припокрива с валентната зона на дрейна (електроните от канала отиват в дрейна, p-област, който е по-положителен от гейта).

Тъй като тунелингът не се влияе от потока токоносителите през бариерата, TFET може да се превключва с много по-малко прагово напрежение и то може да се достигне с по-

малка стъпка на входното напрежение. Токът на утечка при състояние „изключен” се възпрепятства от „истинския” слой.

1.2. Транзистор с два гейта (dual-gate)

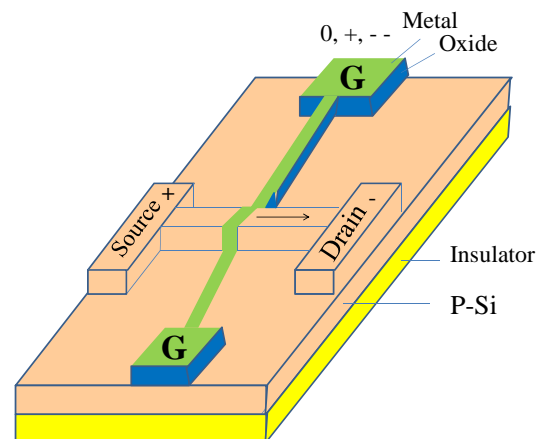
При транзистора с два гейта (Adee, 2007) първият е изпълнен както при конвенционалните MOSFET, а вторият се намира под канала. Целта е да се ограничи утечката на ток в състояние „изключен”. На Фиг.2 е показана конструкция на транзистор с два гейта.



Фиг.2. Конструкция на транзистор с два гейта

1.3. Триизмерен транзистор Fin-FET (Fin Field Effect Transistor)

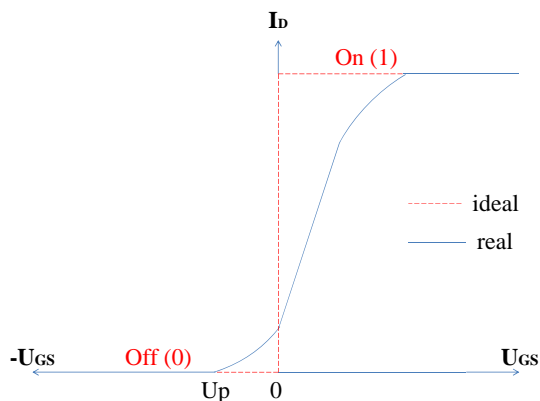
Fin-FET (Adee, 2007) представлява триизмерна реализация на транзистора с два гейта. Сорсът, дрейнът и гейтът са издигнати над подложката. Каналът сорс-дрейн е от материала на подложката, т.е. няма p-n-преход, за разлика от конвенционалните MOSFET. Силициевият кристал е разположен върху изолиращ материал. Този клас транзистори се нарича мултигейт, защото гейтът обгражда канала от три страни вместо от една. Каналът е изолиран от гейта чрез окисен слой. На Фиг.3 е показана конструкция на Fin-FET.



Фиг.3. Конструкция на Fin-FET

Токът е ограничен само в издигнатия канал между сорса и дрейна и електроните вече нямат път, през който да изтичат в режим „изключен”. Това позволява намаляване на стъпката на входното напрежение и понижава праговото напрежение. Волт-амперните характеристики са както при планарния вариант. На Фиг.4 е показана

предавателна статична характеристика на Fin-FET: $I_D = f(U_{GS})$. На фигурата с прекъснатата линия е показано идеалното превключване – със скок, а с пълтна линия – реалното – с голяма стръмност.

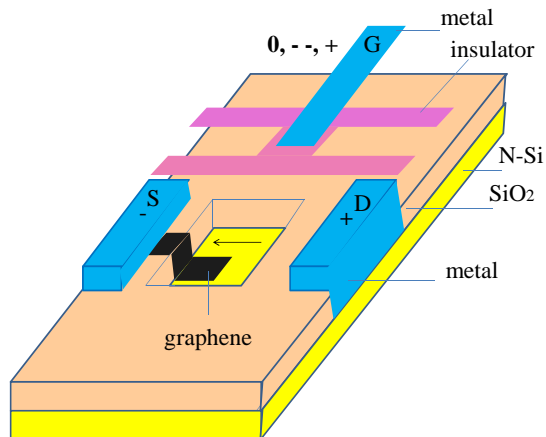


Фиг.4.Предавателна статична характеристика на Fin-FET

2. Елементи с нови материали

2.1. Графинов баристор – Graphene “barristor”

В графинов баристор (Yang, 2012) е създаден Шотки-преход (преход метал-полупроводник, графинът има метален характер) между графин и хидриран силиций. Липсата на ниво на Ферми (забранена зона) между двата материала позволява височината на потенциалната бариера да се намали до 0,2V при стойност от 0,32V за р-р-преход. Вместо каналът да се обогатява и обеднява чрез р-р-преход, той се обогатява и обеднява чрез лист графин, разположен върху част от него. Резултатът е намаляване на стъпката на входното напрежение и следователно понижаване на праговото напрежение. На Фиг.5 е показана конструкция на графинов баристор с п-канал. Статичните характеристики наподобяват тези на MOSFET с вграден р-канал.

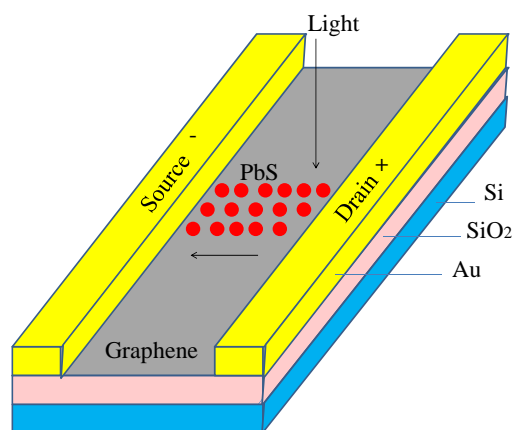


Фиг.5. Конструкция на графинов баристор

2.2. Фототранзистор с графин и квантови точки

Фототранзисторът с графин и квантови точки (Konstantatos, 2012) се състои от един или два слоя графин, покрити с тънък филм колоидни квантови точки от оловен сулфид (PbS). Абсорбирането на светлина в слоя квантови точки създава електрични заряди, които се

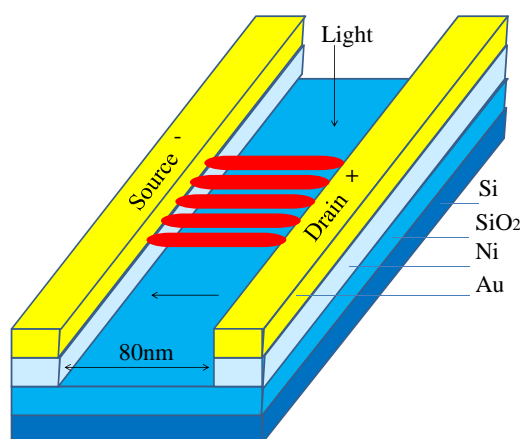
предават към графин. Там те циркулират много пъти поради високата мобилност на зарядите и дългия жизнен цикъл в слоя с квантови точки. В резултат на това се получава усилване $(I_o/I_i) 10^8$ електрона за фотон. Това води до увеличаване на изходния ток при една и съща входна мощност от $10^{-2} A/W$ при чисто графиновите детектори до $10^7 A/W$ при транзистор с графин и квантови точки. Това означава, че стъпката на входното напрежение може да се намали, а следователно – и праговото напрежение за поддържане на необходимото отношение I_{on}/I_{off} . На Фиг.6 е показана конструкция на фототранзистор с графин и квантови точки.



Фиг.6.Конструкция на фототранзистор с графин и квантови точки

2.3. Фототранзистор с органични молекули

Фототранзисторът с органични молекули (Faramarzi, 2012) съдържа нановлакна, самосглобяващи се между два метални електрода – всеки от никел и злато. Използва се разтвор на триариламин под едновременното действие на бяла светлина за 10 секунди и електрично поле. Органичните молекули се подреждат в редица, формирайки нановлакна, паралелни на полето. Ширината на канала е 80nm. Отчита се стойност на проводимостта $G > 5 \cdot 10^3 S/nm$. На Фиг.7 е показана конструкция на фототранзистор с органични молекули.



Фиг.7.Конструкция на фототранзистор с органични молекули

Проводимостта на органичния материал може да се представи в следния вид:

$$G = \frac{1 \cdot 10^{-1} \text{ mA}}{20 \text{ mV}} \cdot \frac{1}{\text{nm}}$$

За канал с дължина 80nm проводимостта е:

$$G = \frac{1 \text{ mA}}{2,5 \text{ mV}}$$

Това означава, че ако входното напрежение се увеличава с 2,5mV, изходният ток се увеличава с 1mA. Тази проводимост е по-малка от проводимостта (стръмността) на неорганичните материали. Въпреки това стъпката на входното напрежение е много малка: 2,5mV спрямо 60mV. Праговото напрежение, при което конвенционалният транзистор се включва, е 0,6V, токът е 1mA. Транзисторът с органични влакна достига ток 1mA при прагово напрежение 2,5mV. Ток на утечка в състояние „изключен“ няма, защото липсва канал. Недостатък на тези транзистори е, че изходен ток от 1000mA се достига при входно напрежение над 2V, за разлика от конвенционалните транзистори, които достигат този ток при напрежение под 2V. Предимство на транзисторите с органични влакна е високата им чувствителност.

Заклучение

Увеличаването на стръмността на транзистора може да се постигне основно по два начина:

1. Въвеждане на нови конструкции – без p-n-преход – с изолиращ слой между p- и n-силиций или само с един вид полупроводник;
2. Използване на нови материали – графин, хидриран силиций, квантови точки и органични молекули.

Възможно е управляващото напрежение да се замени със светлина. По този начин се усъвършенстват основните параметри: стъпка на изменение на входното напрежение, прагово напрежение и ток на утечка при състояние „изключен“. Бъдещата работа по темата включва симулационен анализ с подходящ софтуер.

Съвременните полупроводникови елементи с увеличена стръмност могат да се внедряват в памети (Динамична памет с произволен достъп - DRAM), които имат много по-строги изисквания към параметрите, отколкото логическите схеми. В паметите евентуалните загуби не са само топлина или енергия, а информация. Освен това конструкциите на новите елементи предлагат технологии, които улесняват моделирането на памети.

Литература

- Велчев, Н., 2006, 100 години Електроника, *Академично издателство „Проф. Марин Дринов”, София*
- Вълков, С., Ямаков, И., Дойчинова Р., Христов, М., Василева, Т., 2006, Електронни и полупроводникови елементи и интегрални схеми, *Издателство „Техника”, София*
- Колева, Е., 2010, Индуриална електроника, *Издателство Екс-Прес, Габрово*
- Adee, S., 2007, Transistors go vertical, <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/design/transistors-go-vertical>
- Faramarzi, V. et al., 2012, Light-triggered self-construction of supramolecular organic nanowires as metallic interconnects, *Nature Chemistry*, 4, pp. 485-490
- Konstantatos, G. et al. 2012, Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain, *Nature Nanotechnology* 7, pp. 363-368
- Seabaugh, A., 2013, The Tunneling Transistor, <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/the-tunneling-transistor>
- Yang, H. et al., 2012, Graphene Barristor, a Triode Device with a Gate-Controlled Schottky Barrier, *Science*, 1 June 2012: vol.336, №6085, pp. 1140-1143

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.