

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ГРАФИНОВ БАРИСТОР И MOSFET С ВГРАДЕН КАНАЛ

Мила Илиева-Обретенова

Минно-геоложки университет «Свети Иван Рилски» - София
e-mail: mila.ilieva@mgu.bg

Ключови думи: графин, MOSFET с вграден канал, Шотки бариера, хибриден елемент, транзистор

Резюме: Графиновият баристор представлява полеви транзистор с контролирана Шотки бариера между графин и силиций. Целта на статията е да се демонстрират предимствата на графинов баристор спрямо полеви транзистор MOSFET с вграден канал. Методологията включва сравнение на двата елемента по следните критерии: конструкция и означение, статични характеристики и режими на работа, температурни характеристики, височина на бариерата и енергия на Ферми, приложения. Сравнението на характеристиките показва, че хибридните устройства графин-силиций превъзхождат MOSFET с вграден канал за реализация на високоскоростни логически приложения.

COMPARATIVE ANALYSIS OF GRAPHENE BARRISTOR AND DEPLETION-MODE MOSFET

Mila Ilieva-Obretenova

Mining and Geology University "St.Ivan Rilski" – Sofia
e-mail: mila.ilieva@mgu.bg

Keywords: Graphene, Depletion-mode MOSFET, Schottky barrier, hybrid device, transistor

Abstract: Graphene barrister is a MOSFET with controlled Schottky barrier between graphene and silicon. The paper aims to demonstrate the graphene barrister advances to depletion-mode MOSFET. The methodology includes comparison of the two devices on the following criteria: construction and symbol, static characteristics and exploitation modes, temperature characteristics, barrier height and Fermi energy, applications. The characteristics comparison shows that hybrid devices graphene-silicon exceed depletion-mode MOSFET for realization of high-speed logical applications.

Въведение

MOSFET представлява полеви транзистор с конструкция метал-оксид-полупроводник. Разновидностите са две: с индуциран канал и с вграден канал. Индуцираният канал се създава след прилагане на право напрежение в два p-n-прехода. Вграденият канал е фабрично изработен между две обогатени области. Големината на тока се регулира чрез p-n-преход под канала – каналът се обогатява или обеднява на токоносителите [1], [2], [3]. Недостатъците на MOSFET с вграден канал са: големи размери, висока консумация и ниско бързодействие според съвременните изисквания. Това налага създаване на елемент с усъвършенствани параметри – графинов баристор.

Графиновият баристор представлява MOSFET с вграден канал. Над част от силициевия канал е разположен слой графин, който го обогатява или обеднява. Така се получава Шотки бариера между графин и силиций, която увеличава бързодействието и намалява консумацията на елемента[5].

Целта на статията е да се направи сравнителен анализ на графинов баристор и MOSFET с вграден канал и да се посочат предимствата на графиновия баристор.

Теория на метода

Основните параметри на MOSFET с вграден канал са:

1. Конструкция и означение,
2. Статични характеристики и режими на работа,
3. Температурни характеристики,
4. Височина на бариерата и енергия на Ферми,
5. Приложения.

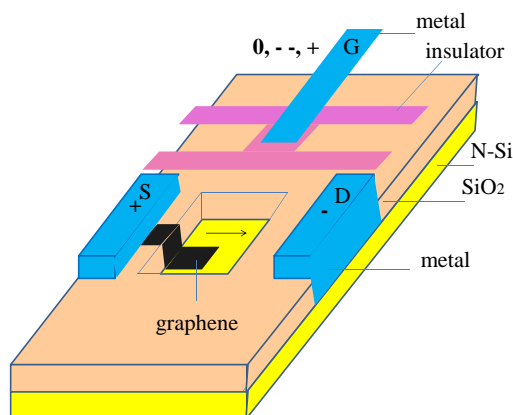
По тези критерии се оценява и графинов баристор в сравнение с MOSFET с вграден канал.

Резултати

1. Конструкции и означения на графинов баристор и MOSFET с вграден канал

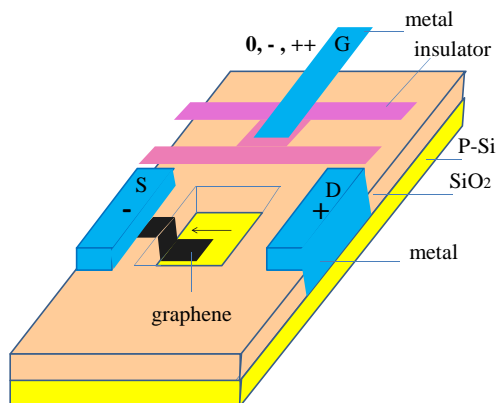
1.1. Конструкции

Графиновият баристор съществува в два вида: n-тип и p-тип. Името се определя от вида на полупроводника в елемента. На фигура 1 е показана конструкция на графинов баристор от n-тип.



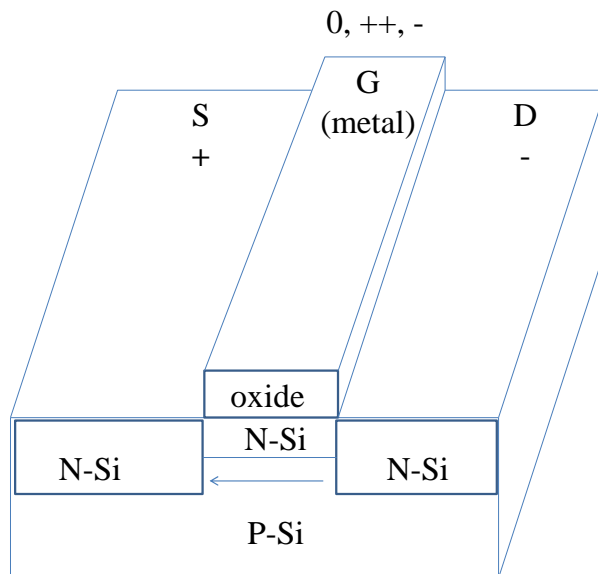
Фиг. 1. Конструкция на графинов баристор от n-тип

На фигура 2 е показана конструкция на графинов баристор от p-тип.

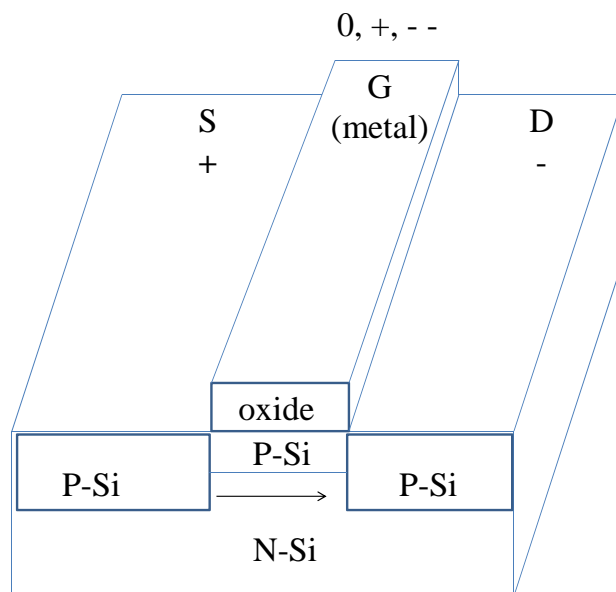


Фиг. 2. Конструкция на графинов баристор от p-тип

MOSFET с вграден канал също съществува в два вида: с n-канал и с p-канал. Името се определя от вида на канала. На фигура 3 е показана конструкция на MOSFET с вграден n-канал. На фигура 4 е показана конструкция на MOSFET с вграден p-канал. Предимство на графеновия баристор е по-малкият обем, обусловен от използването на слой графин върху силициевия канал. Намалява се и обемът на интегралните схеми с този елемент.



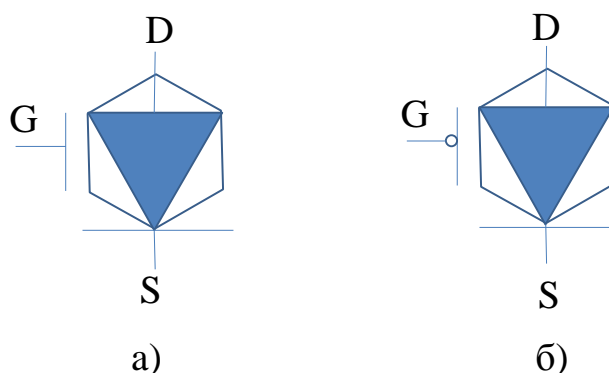
Фиг. 3. Конструкция на MOSFET с вграден n-канал



Фиг. 4. Конструкция на MOSFET с вграден p-канал

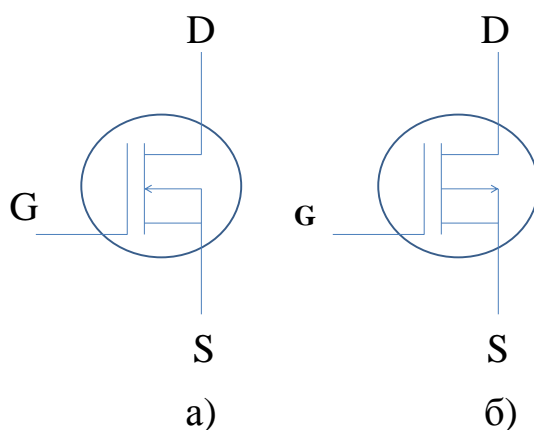
1.2. Означения

Означенията на графенов баристор съдържат означението на изправителен диод и шестоъгълник, символ на графин. Гейтът се означава успоредно на шестоъгълника. На **фигура 5** са показани означенията на n-тип и на p-тип графенов баристор.



Фиг. 5. Означение на графинов баристор: а) n-тип; б) p-тип с инвертиран гейт

Означенията на MOSFET с вграден канал съдържат стрелка, указваща типа на канала. За MOSFET с вграден n-канал стрелката сочи към канала, за MOSFET с вграден p-канал стрелката сочи извън канала. На фигура 6 са показани означенията на MOSFET с вграден канал.



Фиг. 6. Означения на MOSFET с вграден канал: а) n-канал; б) p-канал

Предимство на означението на графиновия баристор е, че се илюстрира „обогатяването“ и „обедняването“ на елемента чрез символа за изправителен диод и вида на елемента, обогатяващ канала – графин – чрез шестоъгълник.

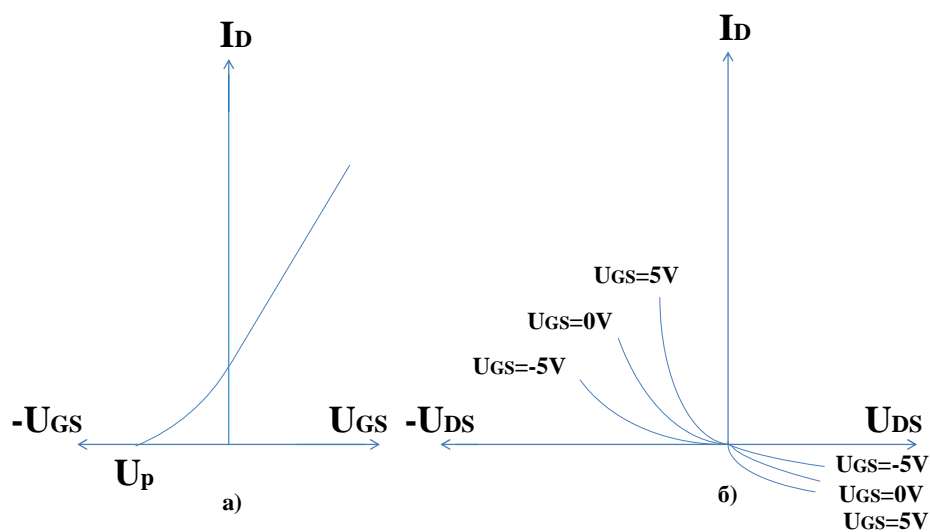
2. Статични характеристики и режими на работа

2.1. Статични характеристики

Статичните характеристики се изследват, като към електродите на елемента се подават напрежения, без да се включва товар. Статичните характеристики са два вида:

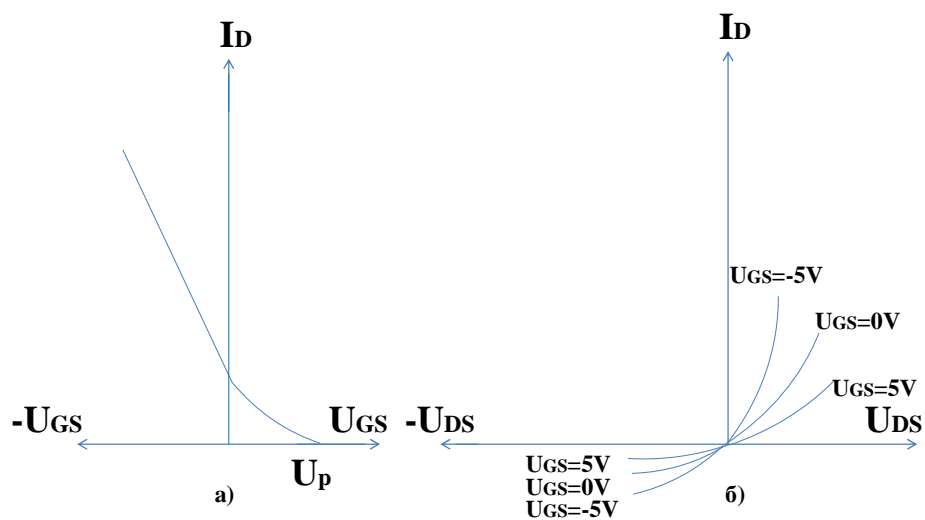
- Предавателна: $I_D = f(U_{GS})$, при $U_{DS} = \text{const}$;
- Изходна: $I_D = f(U_{DS})$, при $U_{GS} = \text{const}$.

На фигура 7 са показани статичните характеристики на графинов баристор от n-тип.

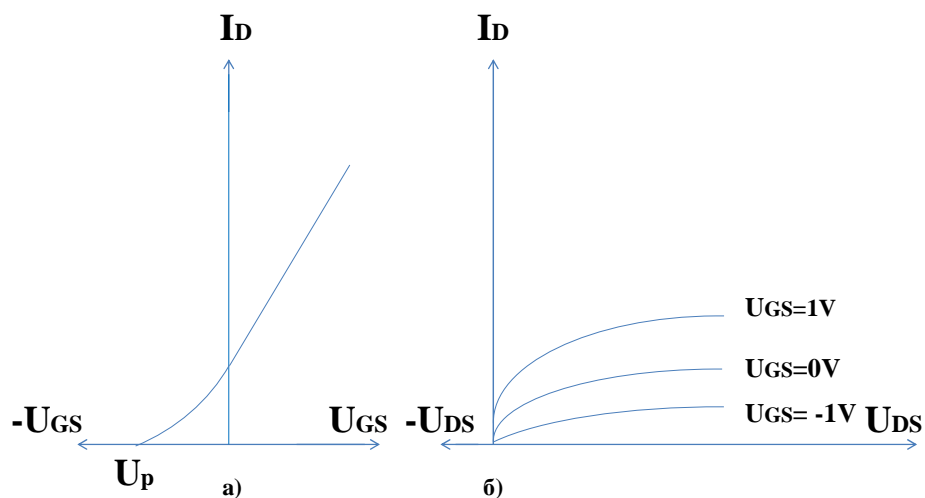


Фиг. 7. Статични характеристики на графиров баристор от n-тип: а) предавателна; б) изходна

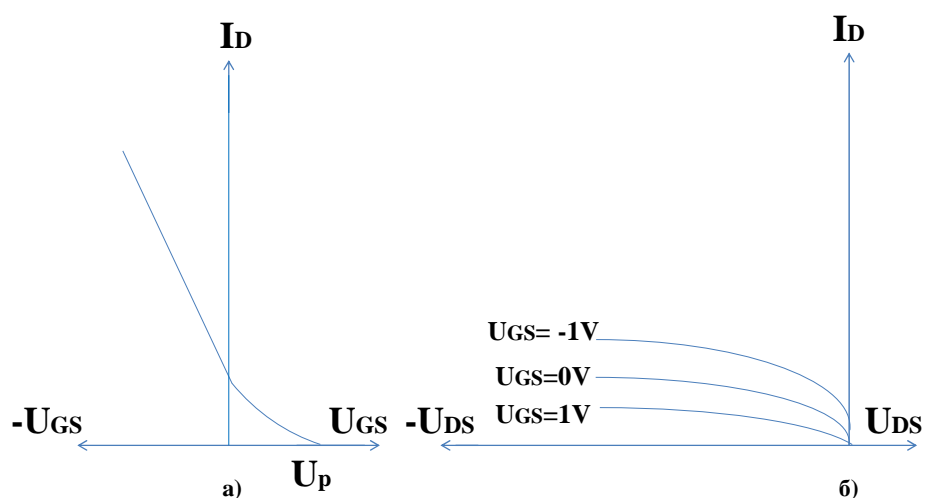
На фигура 8 са показани статичните характеристики на графиров баристор от p-тип. На фигура 9 са показани статичните характеристики на MOSFET с вграден n-канал. На фигура 10 са показани статичните характеристики на MOSFET с вграден p-канал. От статичните характеристики може да се види, че правото напрежение за единия елемент е обратно за другия.



Фиг. 8. Статични характеристики на графиров баристор от p-тип: а) предавателна; б) изходна



Фиг. 9. Статични характеристики на MOSFET с вграден n-канал: а) предавателна; б) изходна



Фиг. 10. Статични характеристики на MOSFET с вграден p-канал: а) предавателна; б) изходна

2.2. Режими на работа

От статичните характеристики на графинови баристори може да се види, че елементите имат два режима. Фигура 7 показва, че режимите на графинов баристор от n-тип са следните:

- При $U_{DS} < 0$: режим ключ – съпротивлението е малко и токът рязко нараства. Отношението ток на включване/ток на изключване е много голямо: $I_{on}/I_{off} = 10^5$. С U_{GS} може да се регулира съпротивлението:
 - При $U_{GS} > 0$: по-малко съпротивление;
 - При $U_{GS} < 0$: по-голямо съпротивление.
- При $U_{DS} > 0$: режим насищане – съпротивлението е по-голямо в сравнение с режим ключ. Отношението $I_{on}/I_{off} = 300$. С U_{GS} се регулира съпротивлението:

- При $U_{GS} > 0$: по-малко съпротивление;
- При $U_{GS} < 0$: по-голямо съпротивление.

Фигура 8 показва, че режимите на графинов баристор от p-тип са следните:

- При $U_{DS} < 0$: режим насищане – съпротивлението е по-голямо в сравнение с режим ключ. Отношението $I_{on}/I_{off} = 300$. С U_{GS} може да се регулира съпротивлението:
 - При $U_{GS} > 0$: по-голямо съпротивление;
 - При $U_{GS} < 0$: по-малко съпротивление.
- При $U_{DS} > 0$: режим ключ – съпротивлението е малко. Отношението $I_{on}/I_{off} = 10^5$. С U_{GS} се регулира съпротивлението:
 - При $U_{GS} > 0$: по-голямо съпротивление;
 - При $U_{GS} < 0$: по-малко съпротивление.

От статичните характеристики на MOSFET с вграден канал може да се види, че елементите имат два режима. Фигура 9 показва, че режимите на MOSFET с вграден n-канал са насищане и запушване:

- При $U_{DS} > 0$: режим насищане – съпротивлението е малко. Регулира се с U_{GS} .
 - При $U_{GS} > 0$ съпротивлението е по-малко – обогатяване на канала с токоносителите;
 - При $U_{GS} < 0$ съпротивлението е по-голямо – обедняване на канала.
- При $U_{DS} < 0$: режим запушване – съпротивлението е много голямо.

Фигура 10 показва, че режимите на MOSFET с вграден p-канал са насищане и запушване:

- При $U_{DS} > 0$: режим запушване – съпротивлението е много голямо.
- При $U_{DS} < 0$: режим насищане – съпротивлението е малко. Регулира се с U_{GS} .
 - При $U_{GS} > 0$ съпротивлението е по-голямо – обедняване на канала на токоносителите.
 - При $U_{GS} < 0$ съпротивлението е по-малко – обогатяване на канала.

Ключовият режим на баристора осигурява по-високо бързодействие спрямо това на MOSFET с вграден канал. Управлението на двата режима на баристора с различни съпротивления осигурява повече функции на елемента. Това дава възможност за създаване на схеми с по-малко елементи и способства за миниатюризация.

3. Температурни характеристики

За температурните характеристики на графинов баристор се изхожда от диодното уравнение на елемента:

$$(1) \quad I = A \cdot A^* \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{q \cdot \Phi_b}{k_B \cdot T}} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_{bias}}{\eta_{id} \cdot k_B \cdot T}} - 1 \right)$$

Където:

I е изходният ток,

A – областта на Шотки преход,

A^* - ефективната константа на Ричардсон,

T – температурата,

q – елементарният заряд,

Φ_b – височината на Шотки бариерата,

k_B – константата на Болцман,

V_{bias} – изходното напрежение, $Bias = U_{DS}$,

η_{id} – идеалност на диода: десетичен логаритъм на плътността на тока за cm^2 .

От фигура 7 се вижда, че графинов баристор от n-тип при обратно напрежение $U_{DS} > 0$ е в режим насищане. Следователно

$$(2) \quad e^{\frac{q \cdot V_{bias}}{\eta_{id} \cdot k_B \cdot T}} \ll 1$$

В този режим диодният ток става нечувствителен към V_{bias} , $A = 1$, $A^* = 1$. Тогава токът на насищане е:

$$(3) \quad I_{sat} = T^2 \cdot e^{-\frac{q \cdot \Phi_b}{k_B \cdot T}}$$

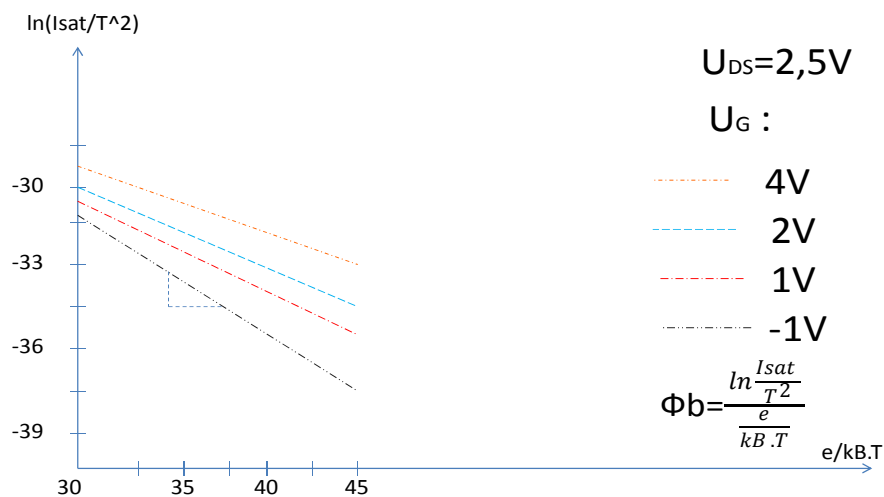
Вижда се, че диодният ток зависи от квадрата на температурата. Температурната характеристика се изразява като $\ln \frac{I_{sat}}{T^2}$

във функция на $\frac{q}{k_B \cdot T}$

при $U_{DS} = \text{const}$ и $U_{GS} \neq \text{const}$, q се замества с елементарния заряд на електрона e^- . Височината на Шотки бариерата Φ_b се оценява за дадено напрежение на гейта от стръмността на всяка графика:

$$(4) \quad \Phi_b = \frac{\ln \frac{I_{sat}}{T^2}}{\frac{e}{k_B \cdot T}}$$

На фигура 11 са показани температурни характеристики на графинов баристор от n-тип.



Фиг. 11. Температурни характеристики на графинов баристор от n-тип

От фигурата се вижда, че с увеличаване на температурата и на U_{GS} височината на Шотки бариерата намалява и токът се увеличава.

Анализът на температурните характеристики на MOSFET с вграден канал е аналогичен.

4. Височина на бариерата и енергия на Ферми

Изменението на височината на Шотки бариерата може да се изчисли като разлика между височината на бариерата при определена енергия на Ферми и височината на бариерата при нулево изменение на енергията на Ферми.

$$(5) \quad \Delta \Phi_b = \Phi_b - \Phi_b (\Delta E_F = 0)$$

Изменението на енергията на Ферми ΔE_F се изчислява след измерването на плътността на

токоносителите на Хол – η_H . Тогава

$$(6) \quad \Delta E_F = h \cdot v_F \cdot \sqrt{\pi \cdot \eta_H},$$

където:

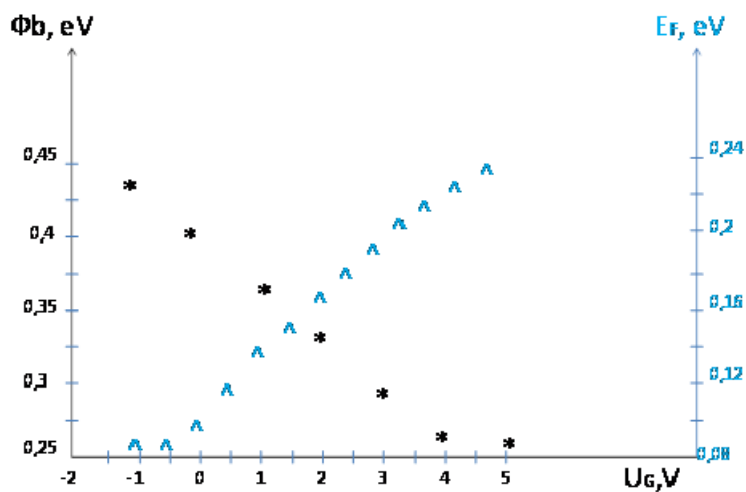
h е константата на Планк,

v_F е скорост на Ферми за графин.

В резултат на това се наблюдава следното:

$$(7) \quad \Delta E_F = -\Delta \Phi_b$$

С други думи изменението на енергията на Ферми е приблизително равно на изменението на височината на бариерата с обратен знак. Процесът се управлява чрез напрежението на гейта, т.е. U_G е отговорно за вариациите на Φ_b . На фигура 12 са показани графики на височината на Шотки бариерата Φ_b и на енергията на Ферми E_F в зависимост от напрежението на гейта U_G за графинов баристор от n-тип.



Фиг. 12. Височина на Шотки бариера Φ_b и енергия на Ферми E_F за графинов баристор от n-тип

Анализът на височината на потенциалната бариера и енергията на Ферми за MOSFET с вграден канал е аналогичен. Предимство на баристора е краткото време и ниската консумация за включване на елемента поради липсата на забранена зона в графин и краткото време и ниската консумация за изключване на елемента поради обратното включване на прехода графин-силиций.

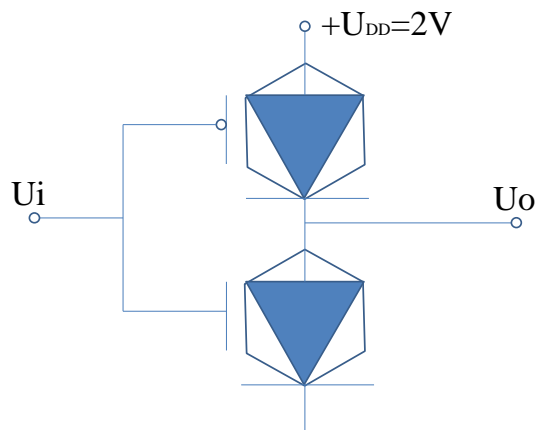
5. Приложения

5.1. Приложения на графинов баристор

Основните приложения на графинов баристор са инвертор и полусуматор.

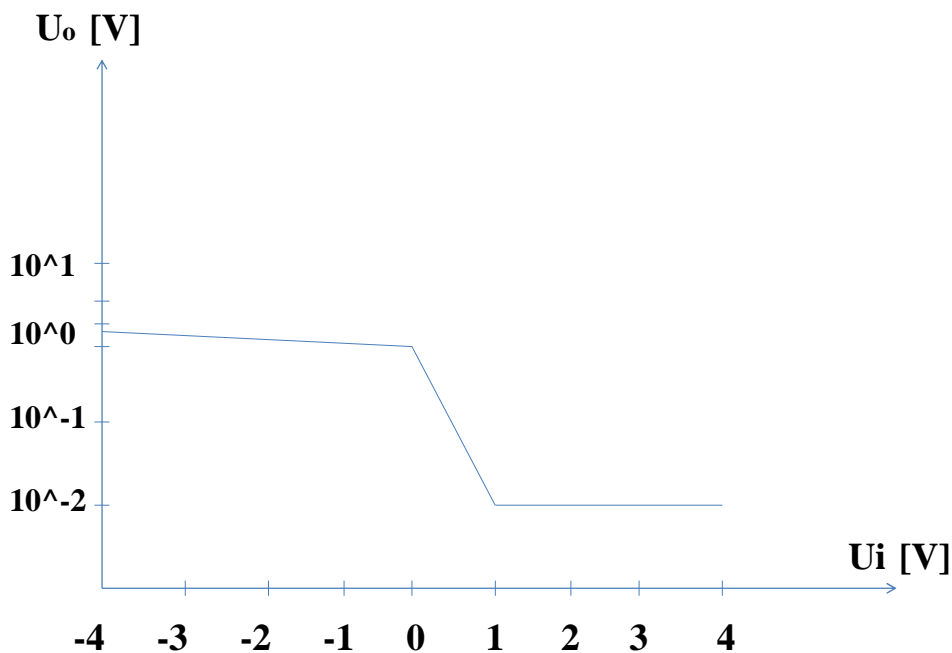
5.1.1. Инвертор

На фигура 13 е показан инвертор, реализиран с графинов баристор от р-тип и графинов баристор от n-тип. Захранващото напрежение на дрейна е $2V$: $U_{DD} = 2V$. При подаване на положително напрежение на дрейна на графинов баристор от р-тип елементът е в режим ключ. Баристорът от n-тип е в режим насищане. При подаване на отрицателно напрежение на входа на инвертора $U_i = U_G < 0$ съпротивлението на баристора от р-тип е малко, съпротивлението на баристора от n-тип е голямо. Токът преминава от баристора от р-тип и изходното напрежение U_o е приблизително равно на захранването: $U_o \approx U_{DD}$. При подаване на положително напрежение на входа на инвертора $U_i = U_G > 0$ съпротивлението на баристора от р-тип е по-голямо, а съпротивлението на баристора от n-тип е по-малко. Токът от входа преминава през баристора от n-тип и U_o е приблизително равно на 0: $U_o = 0$.



Фиг. 13. Инвертор с комплементарни графинови баристори

Фигура 14 показва амплитудната характеристика на инвертор с графинови баристори. Бързодействието на схемата е високо, тъй като изходният кондензатор се презарежда през транзистора в ключов режим с малка времеконстанта. Консумацията е незначителна, особено в статичен режим, когато единият транзистор винаги е в режим насищане с голямо съпротивление.



Фиг. 14. Амплитудна характеристика на инвертор с графинови баристори

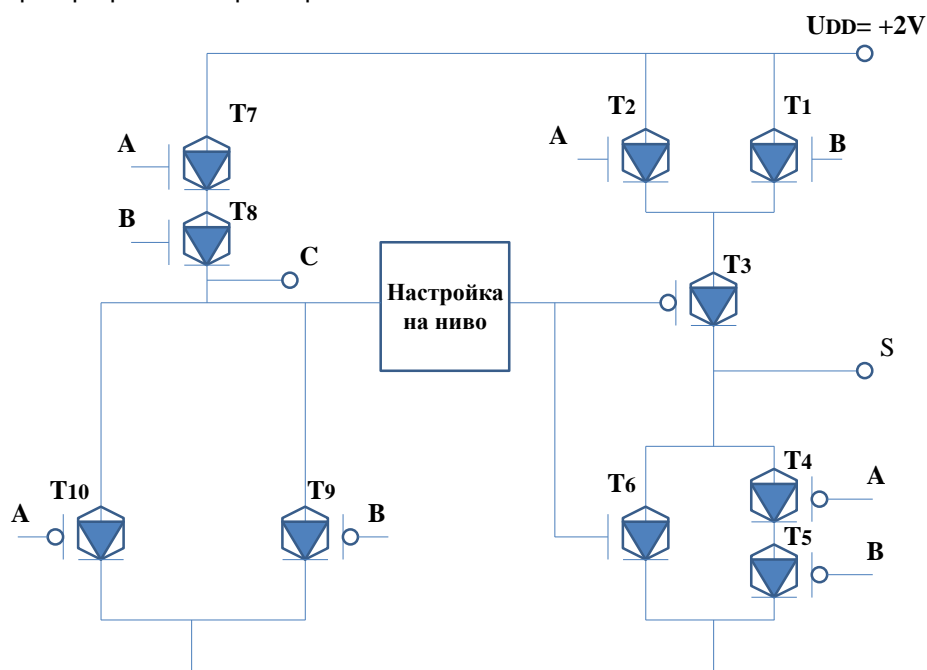
5.1.2. Полусуматор

Полусуматорът е интегрална схема, която сумира две еднобитови числа. Процесът се извършва чрез две функции: сумиране $S = A \cdot B + A \cdot B^{\bar{}}$ (A-черта по B + A по B-черта) и пренос $C = A \cdot B$. В таблица 1 са дадени логическите стойности на A, B, S и C. Вижда се, че сумата на 1 и 1 е 0 и има пренос на 1 в по-горен разряд [4].

Таблица 1. Логически стойности на входовете и изходите на полусуматор

A	B	S	C
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Всяка от двете функции в полусуматора се извършва от отделна част. Всяка част се реализира с два типа транзистори – товарни, играещи роля на съпротивление, и активни, играещи роля на разрядни елементи. Товарните транзистори се реализират с графинови баристори от n-тип, а активните – с графинови баристори от p-тип. На фигура 15 е показана принципна схема на полусуматор с графинови баристори.



Фиг. 15. Принципна схема на полусуматор с графинови баристори

От фигурата може да се установи, че при еднакви стойности на A и B транзисторите T₁ и T₂ са в режим насищане, а T₄ и T₅ са в режим ключ. В резултат на това на изход S се получава логическа 0. При различни стойности на A и B T₁ и T₂ са в режим насищане, но единият от тях е с по-малко съпротивление. T₄ и T₅ са в режим ключ, но единият е с по-малко съпротивление. В резултат на това на изход S се получава логическа 1. Транзистор T₃ служи за предаване на стойността на S към функцията Пренос (C). Транзистор T₆ служи за гарантиране на преминаването на тока през T₄ и T₅. Функцията S се реализира чрез T₄ и T₅. Функцията C се реализира чрез товарните транзистори T₇ и T₈. Транзисторите T₉ и T₁₀ служат за разряд на напрежението. При постъпване на 0 на входове A и B T₇ и T₈ преминават в режим насищане с голямо съпротивление. На изход C се получава логическа 0. Логическата 0 от S включва T₉ и T₁₀ в режим насищане с малко съпротивление и те разреждат напрежението. При постъпване на 1 на входове A и B T₇ и T₈ преминават в режим насищане с малко съпротивление. На изход C се получава логическа 1. Логическата 0 от S включва T₉ и T₁₀ в режим насищане с голямо съпротивление. Това поддържа логическата 1 на изход C.

5.2. Приложения на MOSFET с вграден канал

Основните приложения на комплементарни MOSFET с вграден канал са логически схеми ИЛИ-НЕ и И-НЕ. Детайли по тях са дадени в [3]. Предимство на схемите с графинови баристори е по-ниската консумация: +2V. Захранването на схемите с MOSFET с вграден канал е +5V.

Заклучение

В статията е направен сравнителен анализ на графинов баристор и MOSFET с вграден канал по пет критерия. В резултат на това може да се установи, че графиновият баристор усъвършенства параметрите на MOSFET с вграден канал по отношение на консумация, бързодействие и обем. Недостатък на графиновия баристор е все още високата цена. Понастоящем са създадени прототипи на два вида логически схеми с баристор – инвертор и полусуматор. В бъдеще приложенията могат да се разширят до суматор, регистър и по-сложни схеми за изчислителната техника.

Литература:

1. Вълков, С., Ямаков, И., Дойчинова, Р., Христов, М., Василева, Т., Електронни и полупроводникови елементи и интегрални схеми, Издателство „Техника“, София, 2006
2. Колева, Е., Индуриална електроника, Издателство Екс-Прес, Габрово, 2010
3. Петков, С., Костов, Д., "Основи на електрониката и електронни устройства за минната промишленост", Техника, София, 1986
4. "Half Adders, Full Adders, Ripple Carry Adders",
<http://www.cs.umd.edu/class/sum2003/cmssc311/Notes/Comb/adder.html>
5. Yang, H. et al., Graphene Barristor, a Triode Device with a Gate-Controlled Schottky Barrier, Science, 1 June 2012: vol.336, №6085, pp. 1140-1143
<http://www.sciencemag.org/content/336/6085/1140.full>