

ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВИХ СТАНІВ СТРУКТУРИ МЕТАЛ–ДІЕЛЕКТРИК–НАПІВПРОВІДНИК

О.О. Гаврилюк, В.Є. Клименко, О.Ю. Семчук

*Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України
вул. Генерала Наумова 17, Київ, 03164, Україна, sashatigerunik@rambler.ru*

Досліджена температурна залежність параметрів поверхневих станів структури метал–діелектрик–напівпровідник на високих частотах. Фазометричним методом досліджено імпеданс вбудованого каналу безкорпусного планарного польового транзистора з двома ізольованими затворами.

Вступ

Відомо, що характеристики приладів зі структурою метал–діелектрик–напівпровідник (МДН) контролюються поверхневими станами на межі розділу діелектрик–напівпровідник [1]. Для визначення властивостей МДН-структур та розробки на їх основі первинних вимірювальних перетворювачів температури (чутливих елементів, які першими взаємодіють з об'єктом вимірювання і видають сигнал вимірювальної інформації), необхідно дослідити фізичну природу тих процесів, які відбуваються на межі розділу діелектрик–напівпровідник. Перш за все потрібно визначити фізичні параметри поверхневих станів (ПС) та їх вклад в імпеданс МДН-транзисторів.

Поверхневі явища довгий час були «злими ворогами», що істотно погіршували роботу діодів, транзисторів і сонячних елементів. Саме через проблеми, пов'язані з поверхнею, транзистори до 1954 року не стали поширеними серійними приладами. У міру того як кремнієва пластинка – «чіп», який слугує основним елементом сучасних комп'ютерів ставав все мініатюрнішим, відношення його поверхні до об'єму швидко зростало. Тому поверхня чіпа, а не його об'єм, почала відігравати визначальну роль і при виконанні ним логічних функцій, і при взаємодії з іншими елементами. Поверхневі рівні обумовлюють викривлення енергетичних зон поблизу поверхні, тобто всі явища, які пов'язують з потенціальними бар'єрами, залежать від поверхневих станів. Вони можуть істотно змінити і кінетику електронних процесів, бо створюють центри рекомбінації носіїв заряду, що приводить до зменшення кількості носіїв струму і погіршують технічні характеристики напівпровідникових приладів. Тому всі явища, які пов'язані з нерівноважними станами електронів і дірок (фотопровідність, фотоЕРС, процеси в інжекційних напівпровідникових пристроях і т.п.), суттєво визначаються станом поверхні [2, 3]. Не є винятком і напівпровідникові прилади на основі МДН-структури [4– 6], коли важливо знати, які параметри ПС і за яких умов впливають на характеристики напівпровідникових пристроїв.

Параметрами, що характеризують ПС, є стандартне відхилення поверхневого потенціалу від зміщення на затворі (σ), час перезарядки ПС (τ) та густина ПС (N_{ss}). Час перезарядки ПС визначає час дрейфу носіїв заряду через шар діелектрика, а також інерційні властивості «електронно-діркової плазми», які зумовлюють реактивні властивості МДН-структури. Густина ПС є основною характеристикою МДН-структур і показує кількість ПС на одиницю площі в одиничному енергетичному інтервалі. Значення густини ПС вказує на наявність дефектів на поверхні. Чим менше значення

густини ПС, тим менше дефектів локалізовано на поверхні. Для роботи напівпровідникових приладів в мікроелектроніці допустиме значення густини ПС в інтервалі $(10^{11} - 10^{12}) \text{ см}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$.

Висока чутливість імпедансу МДН-структури до впливу різних чинників навколишнього середовища може бути використана при побудові широкого класу вимірювальних перетворювачів.

Розрахункові методи та експериментальна частина

Для чисельних розрахунків параметрів поверхневих станів використовують метод Ядави або його модифікацію, метод Ніколіана – Гоеццбергера, метод Діоса та інші [4 – 9].

Недолік методу Ніколіана – Гоеццбергера та методу Діоса пов'язаний зі складністю комп'ютерних розрахунків. Перевагою методу Ядави є його простота в комп'ютерних розрахунках, але для його реалізації потрібно фіксувати дві різні частоти, що є суттєвим недоліком під час проведення експерименту. Тому безперечний інтерес представляє модифікований метод Ядави – так званий двотемпературний метод дослідження ПС. Перевагами його є простота комп'ютерних розрахунків і те, що використовується одна фіксована частота при експериментальному вимірюванні. Саме тому для досягнення мети роботи було вибрано двотемпературний модифікований метод Ядави [5].

Використовуючи експериментальні дані і вираз (1), отриманий у [8], розраховувались дві криві нормованої провідності $G_p / \omega(\varphi_s)$ для різних значень температури T_1 і T_2 , діапазоні 150–500 К. При розв'язку даного рівняння відносно σ знаходилось стандартне відхилення поверхневого потенціалу в інтервалі від φ_{s1} до φ_{s2}

$$\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) = \frac{1}{S\sigma} \left[1 + \frac{0,7337(\sigma^2 + 1,6370)}{\sigma^2(\sigma^2 + 3)} \right] \Delta\varphi \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right), \quad (1)$$

де $R_1 = \frac{(G_p / \omega)_{T_1}}{(G_p / \omega)_{T_2}}$ для ПП φ_{s1} , $R_2 = \frac{(G_p / \omega)_{T_1}}{(G_p / \omega)_{T_2}}$ для ПП φ_{s2} .

Основні співвідношення для знаходження інших параметрів ПС можна отримати, скориставшись формулою з [5]

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qN_{ss}}{2\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{\pi}{(1-X)^{\sigma/2}} \frac{\exp(-aX^2 - b)}{\cos\left(\frac{\pi X}{2} \sqrt{\sigma/2}\right)}. \quad (2)$$

В результаті отримуємо

$$\tau = \frac{\exp(2\sigma^2 x)}{\omega}, \quad (3)$$

$$N_{ss} = \frac{2\sqrt{2\pi\sigma} \cdot (1-x)^{\frac{\sigma}{2}} \cdot \cos\left(\frac{\pi x}{2} \sqrt{\frac{\sigma}{2}}\right) \cdot \left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{T_1, \varphi_1}}{q\pi \cdot \exp(-ax^2 - b)} \quad (4)$$

Вимірювання імпедансу каналу МДН-транзистора (ділянки, утвореної леговоною областю напівпровідка, розташованою між підкладкою і затвором, через яку протікає струм в транзисторі) проводились фазометричним методом [10] на установці, зображеній на рис. 1, з використанням фазометра ФК2-12, який дозволяє працювати на

високих частотах при малих змінних тестових сигналах і низькій добротності досліджуваних приладів. При цьому низька добротність не впливає на точність вимірювання і виключає вплив оператора. Така установка дозволяє дослідницьких імпеданс чотирьохполюсників в широкому частотному і температурному інтервалах.

Вимірювання здійснювались залежно від частоти змінного сигналу, температури та зміщення напруги на затворі (U_3) в температурному інтервалі 20 – 120 °С і частотному інтервалі 10 – 800 МГц при зміщеннях напруги на затворі від –0,1 до –3,8 В.

Результати та обговорення

Розрахунок параметрів ПС. В [4] проведено дослідження ПС на межі розділу SiO₂–SiC на основі аналізу вхідної комплексної провідності МДН-структури, а в [5] представлена методика розрахунку енергетичного спектру поверхневих станів, яка ґрунтується на чисельних розрахунках кривих нормованої провідності. З використанням результатів, отриманих в цих роботах, було проведено дослідження параметрів ПС на межі розділу Si–SiO₂. Результати розрахунків параметрів ПС представлені в таблиці, з якої видно, що в заданому температурному інтервалі стандартне відхилення поверхневого потенціалу від зміщення на затворі, час перезарядки ПС та густина ПС в заданому температурному інтервалі від температури не залежать, тобто їх вплив на імпеданс ділянки «витік–стік» мінімальний. При цьому виявилось, що час перезарядки ПС залежить від зміщення напруги на затворі. Цей висновок узгоджується з результатами роботи [11].

З рис. 2 видно, що з ростом величини від’ємного зміщення на затворі час перезарядки ПС зростає, впливаючи на величину імпедансу МДН-транзистора в обраному температурному і частотному інтервалах. З підвищенням температури зростає поверхневий потенціал, що приводить до зменшення часу перезарядки і зсуву точки інверсії знаку реактивності в область високих частот.

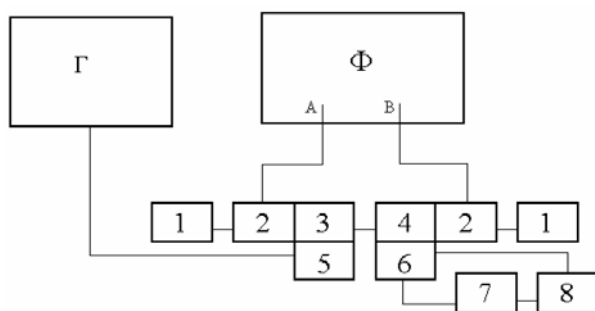


Рис. 1. Структурна схема експериментальної установки на базі фазометра ФК2-12: Ф – вимірювач різниці фаз ФК2-12; Г – генератор; 1 – коаксіальне навантаження; 2 – трійник ТП-1; 3 – трійник ТН, 4 – досліджуваний чотирьохполюсник; 5 – трійник ТС; 6 – піч; 7 – стабілізоване джерело живлення, Б5-50; 8 – термостабілізуючий пристрій.

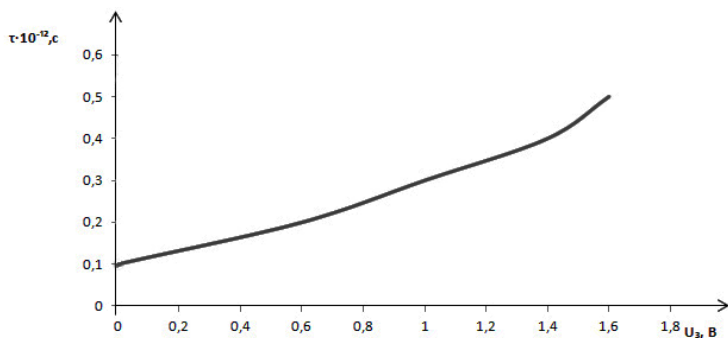


Рис. 2. Залежність часу перезарядки поверхневих станів від зміщення на затворі [11].

При фіксованих значеннях частоти і зміщення напруги на затворі з ростом температури збуджуються все більш глибокі енергетичні рівні, час перезарядки зростає, збільшується і величина індуктивної складової. В точці інверсії знаку реактивності час перезарядки ПС визначається частотою змінного сигналу.

Таблиця. Параметри поверхневих станів у частотному і температурному інтервалах при різних значеннях зміщення на затворі

ω , МГц	T, К	$-U_3$, В	σ , В	τ , 10^{-12} с	N_{ss} , 10^{10} cm^{-2} eB^{-1}
40	323	0,1	1,288	5,091	3,315
		0,9	1,726	5,179	3,526
		1,7	1,717	5,498	3,420
		2,4	1,729	5,126	3,545
		3,0	1,704	5,904	3,299
		3,5	1,730	5,097	3,555
		3,8	1,705	5,852	3,314
	366	0,7	1,728	5,147	3,538
		1,4	1,726	5,230	3,509
		2,0	1,736	4,946	3,611
		2,4	1,713	5,601	3,388
		2,8	1,730	5,107	3,551
		3,4	1,729	5,129	3,544
		3,9	1,715	5,537	3,408
50	323	0,1	1,288	6,378	4,086
		0,5	1,700	7,554	1,186
		1,1	1,720	6,729	1,271
		1,7	1,717	6,873	1,255
		2,2	1,730	6,395	1,310
		2,7	1,735	6,126	1,333
		3,4	1,734	6,243	1,330
		3,9	1,734	6,235	1,331
	366	0,7	1,728	6,433	1,306
		1,3	1,717	6,860	1,256
		1,7	1,775	4,961	1,526
		2,0	1,736	6,183	1,337
		2,7	1,735	6,205	1,335
		3,2	1,734	6,224	1,332
3,6	1,768	6,150	1,492		

Час перезарядки, а також час життя носіїв в каналі, час прольоту носіїв через канал та стала еквівалентного РС-ланцюжка, утвореного відповідними ємностями та опорами МДН-структури, визначають інерційні властивості «електронно-діркової плазми», які зумовлюють реактивні властивості МДН-структури.

З підвищенням частоти змінного сигналу ємнісна складова переходить в індуктивну, період змінного сигналу стає меншим часу перезарядки. Це приводить до зменшення ступеня заповнення ПС і до виникнення додатного зворотного зв'язку за струмом, що експериментально проявляється як індуктивність. При частоті змінного сигналу, коли його період більший часу перезарядки, ступінь їхнього заповнення збільшується і реактивна компонента імпедансу має ємнісний характер.

Подяка. Автори вдячні Н.С. Кравчук за плідне обговорення та Я.М. Гнелиці за допомогу у проведенні експериментальних досліджень.

Література

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – Москва: Мир, 1984. – (В 2-х кн. / Зи С.: кн. 2). – 456 с.
2. Киселев В.Ф., Козлов С.Н., Зотеев А.В. Основы физики поверхности твердого тела. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1999. – 284 с.

3. Бонч-Бруевич В.П., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – Москва: Наука, 1977. – 672 с.
4. Иванов П.А., Пантелеев В.Н., Самсонова Т.Г., Челноков В.Е. Исследование поверхностных состояний на границе раздела Si–SiO путём анализа входной комплексной проводимости МОП-структуры в широком температурном интервале // Физика и техника полупроводников. – 1995. – Т. 29, № 2. – С. 271-277.
5. Бормонтов Е.Н., Котов С.В., Лукин С.В., Головин С.В. Исследование поверхностных состояний в МДП-структурах методом двухтемпературной полной проводимости // Физика и техника полупроводников. – 1995. – Т. 29, № 4. – С. 644-653.
6. Веденеев А.С., Гайворонский А.Г., Ждан А.Г. Определение электронных характеристик границ раздела полупроводник–диэлектрик по полевым зависимостям электропроводимости и ёмкости инверсных каналов // Физика и техника полупроводников. – 1992. – Т. 26, № 12. – С. 2017-2023.
7. Трутко А. Ф. Методы расчёта транзисторов. – Москва: Энергия, 1971. – 272 с.
8. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Кравчук Н.С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом.– Вінниця: Універсум-Вінниця, 2007. – 163 с.
9. Осадчук В.С., Яремчук В.Ф., Кравчук Н.С. Дослідження поверхневих станів на межі SiO₂-Si, легованого бором // Матеріали міжнар. симпо. «Наука і підприємництво». – Вінниця-Львів. – 1997. – С. 98.
10. Соловов В. Я. Фазовые измерения. – Москва: Энергия, 1977. – 121 с.
11. Гаврилюк О.О., Гнелиця Я.М., Кравчук Н.С. Дослідження впливу поверхневих станів на імпеданс МДН-структури // Актуальні проблеми математики, фізики і технологічної освіти: Збірн. наук. праць. – В. 8. – Вінниця: ФОП Данилюк В.Г., 2011. – С. 295-298.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК

А.А. Гаврилюк, В.Е. Клименко, А.Ю. Семчук

*Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины
ул. Генерала Наумова 17, Киев 03164, Украина*

Исследована температурная зависимость параметров поверхностных состояний структуры металл–диэлектрик–полупроводник на высоких частотах. Фазометрическим методом исследован импеданс встроенного канала бескорпусного планарного полевого транзистора с двумя изолированными затворами.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF SURFACE STATE PARAMETERS OF METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR STRUCTURES

O.O. Gavrilyuk, V.E. Klymenko, O.Yu. Semchuk

*Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
17 General Naumov Street, Kyiv 03164, Ukraine*

Investigation temperature dependence of surface states parameters o metal-insulator-semiconductor are calculated a the high frequencies. The impedance of a built-channel bodiless planar field-effect transistor with two isolated gates are studied by a phase metrical method.