

С.П. Новосядлий, В.М. Бережанський, В.М. Вівчарук

Шляхи підвищення електрофізичних параметрів підзатворного діелектрика в субмікронних структурах

Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57,
м. Івано-Франківськ, 76018, Україна, [berezansky@mail.ru](mailto:berezhansky@mail.ru)

З ростом степені інтеграції великих інтегральних схем знижується товщина підзатворного діелектрика їх структур. Це вимагає адекватних конструкторсько-технологічних рішень на збереження високих пробивних напруг та зниження зарядового стану як на межі Si-SiO₂, так і в самому діелектрику. Дана робота вказує шляхи покращення електрофізичних параметрів і термопольової стабільності підзатворного діелектрика, сформованого процесами його нітридизації та легування.

Ключові слова: багатозарядна імплантація, МОН-структура, підзатворний діелектрик, нітридизація.

Стаття постуила до редакції 15.07.2010; прийнята до друку 15.09.2010.

Вступ

В останні роки особлива увага надається процесам нітридизації та легування підзатворного діелектрика як найбільш технологічних операцій при формуванні МОН-структур субмікронного діапазону [1,2,3]. В процесі нітридизації діоксиду кремнію утворюється оксинітридна плівка Si_xO_yN_z, яка має ряд переваг в порівнянні із термічними плівками SiO₂: високий дифузійний опір проникнення різного роду домішок (відіграє роль мембрани) [1,2], високі і однорідні значення напруги пробую [1,4,7], висока радіаційна стійкість [3], високі гетерні властивості [1,2], висока термопольова стабільністю порогової напруги [1,2,3].

Проте нітридизація підзатворного діелектрика може також спричинити і деградацію електрофізичних властивостей межі розділу Si-SiO₂ і самого діелектрика. Тут вирішальну роль відіграє процес високотемпературного відпалу (>650°C) в сухому кисні, інакше активації – реокислення. Нітридизацію і легування підзатворного діелектрика можна проводити з використанням процесів:

1. Високотемпературного окислення ($T > 1050^\circ\text{C}$) в сухому кисні з наступною нітридизацією швидким термічним легуванням (ШТЛ) в атмосфері аміаку NH₃;
2. Швидким термічним оксидуванням (ШТО) в сухому кисні з наступною швидкою нітридизацією в атмосфері NH₃;
3. Високотемпературним окисленням ($T > 1150^\circ\text{C}$) в атмосфері закисі азоту (N₂O);
4. Легуванням сформованого вже оксиду в сухому кисні до необхідної товщини багатозарядною

імплантацією азоту N⁺, N⁺⁺;

5. Високотемпературним формуванням підзатворного діелектрика в сухому кисні та легуючої домішки у вигляді хлорних сполук рідкісноземельних металів (HoCl₃, LaCl₃, YCl₃ та інших). Як бачимо фізика всіх процесів є різною, тому і вплив на електрофізичні параметри підзатворного діелектрика буде різним. Ці питання і є предметом досліджень, виконаних в даній статті.

I. Методика експерименту

Для експерименту вибирались пластини діаметром 100 мм типу КДБ 80 (100), які використовувались для формування структур схем пам'яті та мікроконтролерних схем. Хіміобробка Si-пластин перед окисленням була стандартною в перекисно-аміачній суміші з фінішною промивкою в деіонізованій воді. Всі процеси високотемпературного термічного оксиду формувались з використанням автоматизованої дифузійної системи АДС-100 при $T = 1050^\circ\text{C}$, при якій густина поверхневого заряду на межі Si-SiO₂ і рухомого заряду в окислі є мінімальними. Для ведення процесів іонної імплантації використовувався імплантатор «Везувій-3М», а всі процеси швидкого термічного відпалу (активації) чи нітридизації виконувались на Si-пластинах діаметром 100 мм КДБ-80 (100) на установці швидкого термічного відпалу ТМ410.

Процес окислення проводиться в сухому O₂ з точкою роси не гірше -70°C при $T = 1050^\circ\text{C}$ та тривалості процесу, який забезпечував товщину

оксиду в межах 120-130Å. Така товщина підзатворного діелектрика використовується в субмікронній технології структур ВІС для мінімальних топологічних розмірів 0,65-0,8 мкм. Процес нітридації оксиду теж проводився швидким процесом обробки в парах аміаку NH₃ (з чистотою <10ppm) протягом 10-60 с з метою отримання оксинітриду із заданим коефіцієнтом заломлення (1,75-2,1). Це перший головний термічний варіант. В цьому процесі також використовувалось хлорне окислення, направлене на зниження величини рухомого позитивного заряду в окислі Q_m , яке збільшувало швидкість окислення майже на 20%.

Другим варіантом формування оксинітриду кремнію проводилось теж високотемпературним хлорним окисдуванням при $T=1050^\circ\text{C}$ але вже в атмосфері закиси азоту N₂O (чистоти 10-15 ppm) з метою виключення впливу водню на процес відновлення оксиду. Товщина оксида теж вибиралась в межах 11-13 нм під товщину підзатворного діелектрика.

Третім цікавим варіантом формування оксинітриду був процес імплантації азоту в сформований оксид (одно та двозарядного) на імплантаторі «Везувій3М» при дозах 1-50 мкл/см² і енергії 20-75 кеВ для забезпечення різкого концентраційного профілю і глибини. Післяімплантаційна активація швидким термічним відпалом протягом 10-15 с забезпечувала якісне формування плівки оксинітриду кремнію, стехіометричний склад якого визначався за коефіцієнтом заломлення $n=1,8-2,0$.

Так як для схем пам'яті та приладів переносу зарядів ППЗ важливим є отримання діелектричних плівок конденсаторів з діелектричною проникливістю більшою, ніж в SiO₂ ($\epsilon_d=3,7$), чи Si₃N₄ ($\epsilon_d=4,5-7$), то четвертим варіантом формування підзатворного діелектрика відбувалась хлорним сухим окисдуванням з використанням хлоридів рідкісноземельних металів, (а саме HoCl₃, LaCl₃, чи YCl₃) тим же високотемпературним окисдуванням в системі АДС. Слід відзначити що ϵ_d для оксидів РЗЕ складає 10-12.

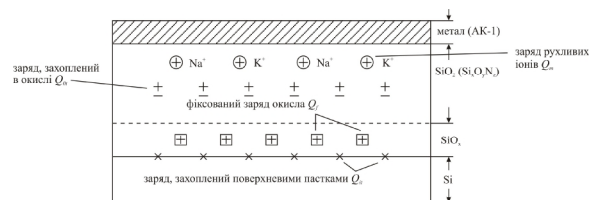
Для характеристики хімічного стану межі Si-Si_xO_yN_z після процесів нітридації, активації чи реокислення (повторний відпал в O₂) використовувався метод виміру опору термічному окисдуванню після його стравлювання в розчині плавикової кислоти (47% HF:H₂O=1:100). Кінець процесу травлення оксиду оцінювався за змочуванням травленої поверхні в деіонізованій воді. Враховуючи високу стійкість зв'язків Si-N в розчині плавикової кислоти (бо швидкість травлення нітридних плівок майже на 2 порядки є нижчою, ніж оксидних), можна вважати збереження на поверхні кремнієвих пластин практично всіх хімічних зв'язків азота з атомами кремнію, які існували до травлення оксинітридної плівки.

Товщини плівок вимірювались з допомогою лазерного еліпсометра ЛЕМ-5М ($\lambda=632,8$ нм). При розрахунках значень товщин в оксидних та оксинітридних плівках використовувались фіксовані

значення коефіцієнтів заломлення для термічного SiO₂ ($n=1,46$) і для оксинітрида Si_xO_yN_z ($n=1,7-2,1$). МОН-структури виготовлялись з алюмінієвим затвором з металізацією сплавами АК-1. Тестові структури МОН-конденсаторів формувались методом фотолітографії, а впалювання контактів проводилось при $T=450^\circ\text{C}$ в атмосфері азоту. В даній статті прийнята класифікація зарядів в термічно окисленому кремнії згідно [1,10]. Густина фіксованого заряду Q_f і густина поверхневих станів в середині забороненої зони N_{ss} обчислювались із імпульсних CV-характеристик. Густина заряду пробою (напряга пробою) вимірювалась в режимі інжекції постійного струму при змінному значенні потенціалу на затворі, щоб прослідкувати інжекцію носіїв на пастки. Оцінка стабільності зарядового стану системи Si-SiO₂ (Si_xO_yN_z) оцінювалась за температурним дрейфом порогової напруги.

II. Результати експерименту та їх обговорення

Для оцінки зарядового стану системи Si-SiO₂ (Si_xO_yN_z) є МОН-конденсатор метал-SiO₂ (Si_xO_yN_z)-Si. Проте природа різних електрофізичних процесів, що проходять на межі Si-SiO₂, сьогодні ще не отримала достатньо повного пояснення [5]. Вважається, що межу розділу Si-SiO₂ (Si_xO_yN_z), що виникла при термічному окисдуванні кремнію, необхідно розглядати як деякий перехідний шар із змінним хімічним складом, що зумовлює різні термічні напруження [5]. В цій моделі вважається, що



a)



б)

Рис. 1. Зарядова модель а) і електричний пробій термічного підзатворного оксиду б).

на межі монокремнію знаходиться певний моноатомний шар нестехіометричного складу SiO_x ($1 < x < 3$), що представляє собою не повністю проокислений кремній. Потім іде проміжний шар з великими внутрішніми напруженнями товщиною 1-2 нм, який вже переходить в стехіометричний діоксид SiO₂. Відмінність характеристик реальних МОН-структур від відповідних залежностей

ідеальних МОН-конденсаторів зумовлено існуванням поверхневих і об'ємних пасток та зарядів в оксиді. Сучасна теорія дає наступну їх класифікацію [1,5,10], що представлена на рис.1а. На цьому ж рисунку (рис.1б) показаний електричний пробій термічного підзатворного оксиду товщиною 10 нм.

1. Заряд, захоплений поверхневими пастками Q_{it} , представляє собою заряд електронних станів, які локалізовані на межі розділу Si-SiO₂ і енергія яких лежить в глибині забороненої зони кремнію. U_G поверхневі стани часто називають швидкими, бо вони можуть швидко перезаряджатись, обмінюючись електронами з кремнієм. Вони викликані надлишковими атомами кремнію та пружними напруженнями, зумовленими порушеннями стехіометричного складу. Часто використовують їх густину $N_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE}$ (число зарядів/см²·eВ).

2. Фіксований заряд окисла Q_f , що розміщений на межі розділу Si-SiO₂ або в безпосередній близькості від неї і є величиною постійною при зміні електричного поля. Він є позитивним і має густину $N_f = Q_f/q$.

3. Заряд, захоплений в оксиді Q_{ox} . Цей заряд викликаний різними видами опромінення структур або інжекцією гарячих електронів в діелектрик і створює пастки, які рівномірно розміщені в оксиді. Може бути як позитивним, так і негативним.

4. Заряд рухомих іонів Q_m (позитивний заряд іонів лужних металів), які можуть швидко переміщуватись під дією електричного поля. Величину цих зарядів відносять до одиниці площі і вимірюють в Кл/см².

Нерухомий заряд в оксиді Q_f викликає паралельний зсув CV-характеристики МОН-структури вздовж осі затворних напруг U_G без спотворення її форми. Його вклад в напругу плоских зон складає: $\Delta U'_{FB} = -Q_f/C_{ox}$. Всі ці заряди певним чином визначають порогову напругу МОН-транзистора, яка визначається наступними співвідношеннями [1,2]:

$$U_{Tn} = U_{FB} + 2|\Phi_p| + |Q_d|/C_{ox} \quad (1)$$

для n-канального МОН-транзистора, що сформований на p-Si (КДБ-80) і

$$U_{Tp} = U_{FB} - 2|\Phi_n| - |Q_d|/C_{ox} \quad (2)$$

для p-канального МОН-транзистора, що сформований на n-Si (КЕФ-4,5).

В обох цих виразах Q_d є поверхнева густина об'єднаного заряду в режимі, коли поверхня напівпровідника інвертована. В цих виразах напруга плоских зон U_{FB} визначається формулою:

$$U_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q_f}{C_{ox}} - \frac{1}{C_{ox}} \int_0^{x_{ox}} \left(\frac{x}{x_{ox}} \right) r(x) dx \quad (3)$$

і визначається різницею робіт виходу матеріалу затворного електрода і кремнію Φ_{MS} та нерухомим зарядом в оксиді (два інших доданки).

$$\Phi_{MS} = \Phi_M - X - E_q/r_q m\Phi_{p(n)} \quad (4)$$

Зазвичай напруга плоских зон є завжди від'ємною як для n-канального, так і для p-канального транзистора. Величина потенціалу в Si-підкладці визначається виразами:

$$\Phi_p = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}, \quad \Phi_n = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{n_i} \quad (5)$$

Так як всі доданки в виразі (2) є від'ємними, то порогова напруга p-канального транзистора є завжди від'ємною при різних степенях легування Si-підкладки. Проте для n-канального транзистора сума двох доданків (позитивних) повинна бути більшою за величину $|U_{FB}|$, бо при цій умові можна отримати збагачений МОН-транзистор, тобто

$$U_{Tn} > 0 \text{ при умові } 2|\Phi_p| + |Q_d|/C_{ox} > |U_{FB}| \quad (6)$$

$U_{Tp} < 0$ при умові $2|\Phi_n| + |Q_d|/C_{ox} < |U_{FB}|$

Тобто, першим фактором, що визначає порогову напругу є рівень легування Si-підкладки, бо вона визначає величину потенціалу Φ_n або Φ_p . Другим способом зміни порогової напруги є зменшення питомої ємності підзатворного діелектрика C_{ox} збільшенням його товщини d_{ox} . Проте таке рішення є неприйнятним, бо воно веде до зменшення коефіцієнта підсилення через приведену крутизну q' :

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_G} = m_n C_{ox} \left(\frac{w}{L} \right) U_{DS} = q' \left(\frac{w}{L} \right) U_{DS} \quad (7)$$

Таким чином, головним технологічним фактором, що змінює порогову напругу є зміна степені легування підкладки в каналі МОН-транзистора. Така залежність порогової напруги від степені легування каналу графічно виглядає, як подано на рис.2. Таким чином, термопольова стабільність заряду в підзатворному діелектрику визначає термопольову стабільність порогової напруги. Тобто ΔU_{Tn} , ΔU_{Tp} стають критеріями оцінки технології формування підзатворного діелектрика МОН інтегральних схем субмікронної

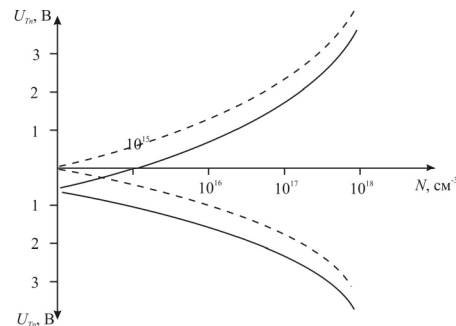


Рис. 2. Залежність U_{Tn} , U_{Tp} від концентрації домішки в Si-підкладці.

технології.

Змінити порогову напругу можна також з допомогою подачі напруги зміщення на Si-підкладку, яке дає зсув порогової напруги на величину ΔU_T , яка визначається виразом для різкого p-n-переходу:

$$\Delta U_T = g \left[\left(2|\Phi_p| + U_{SB} \right)^{1/2} - \left(2|\Phi_p| \right)^{1/2} \right], \quad (8)$$

для n-канального МОН-транзистора, і $g = (2e_s q N_a / C_{ox})^{1/2}$ – коефіцієнт впливу Si-підкладки.

З врахуванням напруги Si-підкладки формули для визначення порогових напруг для n- і р-канальних МОН-транзисторів приймуть вигляд:

$$U_{Tn} = U_{FB} + U_C + 2|\Phi_p| + (1/C_{ox}) \left[2e_s q N_a (2|\Phi_p| + U_C - U_B) \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$U_{Tp} = U_{FB} + U_C - 2|\Phi_n| - (1/C_{ox}) \left[2e_s q N_a (2|\Phi_n| + U_C - U_B) \right]^{1/2} \quad (10)$$

Із цих виразів видно, що при певних напругах зміщення U_B , U_C та різних зарядових станах і легування каналів, можна отримати симетричні порогові напруги n- і р-канальних МОН-транзисторів (на рис.2 ці залежності подані пунктирними кривими).

Тепер повернемося до наших експериментальних досліджень. На рис.3 показані сімейства вольт-амперних характеристик тонких плівок підзатворного діелектрика, сформованих вище описаними процесами 1-5. В області напруг до 2,5 В спостерігається сповільнений ріст струму, який можна описати залежністю:

$$I = I_0 \left[1 - \exp(-IU) \right], \quad (11)$$

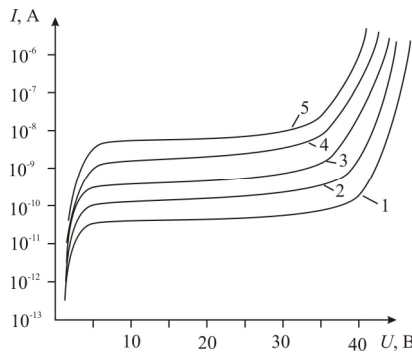


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики підзатворного діелектрика сформованого різними процесами.

де величина I_0 слабо залежить від температури і товщини плівки, коефіцієнт λ має значення $0,2 \div 0,4$. При більш високих напругах ВАХ досягають насичення при різних напругах, а потім починається лавинний ріст струму через діелектрик.

При низьких напругах і температурах проходить інтенсивне захоплення інжектованих носіїв на пастки. При деякій напрузі, що відповідає повному заповненню пасток настає насичення струму, яке в подальшому при зростанні напруги приводить до подальшої іонізації діелектрика і локальному пробію плівки. Так як ефект заповнення пасток є оберненим, то такі МОН-структури можна також використовувати в пристроях стабілізації струму або в порогових ключах напруги.

1 – високотемпературне оксидування при $T=1050^\circ\text{C}$ в сухому кисні та легуючої домішки HoCl_3

(1,5%);

2 – легування сформованого вже оксиду високотемпературним оксидуванням при $T=1050^\circ\text{C}$ в сухому кисні та імплантацією азоту N^+ дозою $D=5$ мкл/см² при $E=50$ кеВ;

3 – високотемпературне оксидування при $T=1050^\circ\text{C}$ в атмосфері закисі азоту;

4 – швидке термічне оксидування (ШТО) при $T=1050^\circ\text{C}$ в сухому кисні та наступною швидкою нітридизацією в атмосфері NH_3 ;

5 – високотемпературне оксидування при $T=1050^\circ\text{C}$ в сухому кисні та наступною швидкою нітридизацією в атмосфері NH_3 ;

Як бачимо із графіків рис.3, найбільшу пробивну напругу мають плівки підзатворного діелектрика у вигляді SiO_2 , легованого окислом рідкісноземельного металу. Очевидно, що РЗМ мають дуже високу пасиваримість, що приводить до різкого зменшення поляризації діелектрика і росту пробивної напруги. В таких плівках величина напруженості електричного поля досягає величини $E=4 \cdot 10^7$ В/см або 40 МВ/см. Із графіків випливає, що для режимів 1 і 2 поляризованість діелектрика є мінімальними і складають менше 1%.

Аналіз спектральних характеристик даних варіантів підзатворного діелектрика в певній мірі підтверджує закономірність, яка демонструвалась на графіку рис.3. Вивчення спектрів інфрачервоного поглинання для $\lambda=0,2-25$ мкм вказує на наявність як мілких (рис.4) так і глибоких пасток (рівність поглинання) з енергіями 0,08, 0,09, 0,22, 0,33, 0,56 еВ.

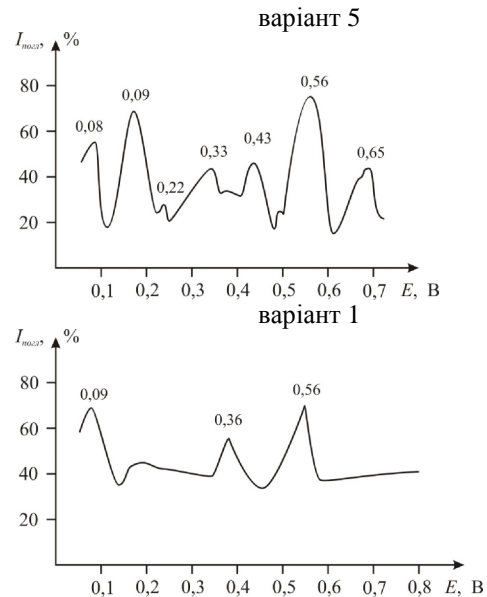


Рис. 4. Спектральні характеристики ІЧ-спектрів для різних варіантів підзатворного діелектрика.

Спектральні криві поглинання плівок $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ в оптичному діапазоні 0,37-0,77 нм говорить про наявність глибоких пасток вже з енергіями 1,3, 2,2, 3,0, 3,8, 5,2 еВ. Природа цих рівнів різна і їх кількість визначається процесами формування підзатворного діелектрика. Для порівняння візьмемо варіанти 1 і 5 плівок.

Оцінка ширини забороненої зони для таких плівок складала величину $E_g=7,2-8,0$ еВ, а показник заломлення n приймав значення від 1,7 до 2,15. Це значить, що в нас були плівки оксинітрида кремнію, бо плівки термічного SiO_2 мають коефіцієнт заломлення $n=1,38$. Дані графіки говорять про те, що процес нітридизації та легування РЗМ підзатворного діелектрика збільшує ширину забороненої зонидіелектрика від 7,2 еВ (для SiO_2) до 7,9 еВ (для

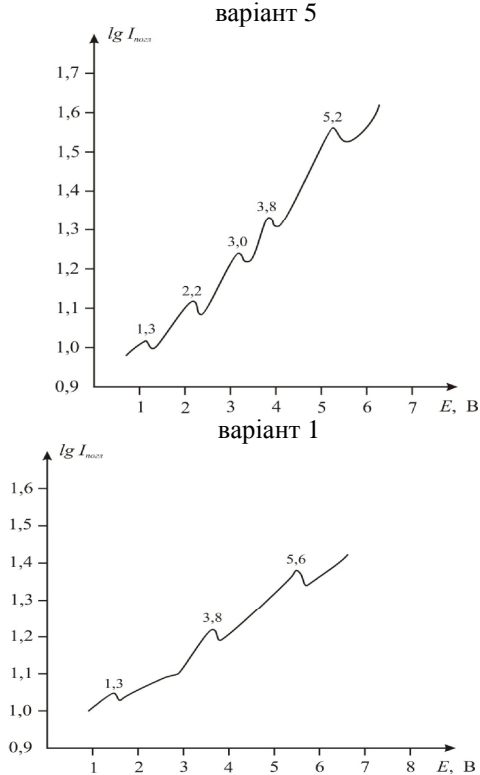


Рис. 5. Спектральні характеристики оптичного пропускання плівок підзатворного діелектрика для різних варіантів процесу їх формування.

$\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$) та 8,2 еВ (для легованого РЗМ SiO_2). Крім того зростає їх щільність та посилюються хімічні зв'язки. Це підтверджується зміною товщини плівок та опору окисленню (швидкості їх травлення), що зображені на рис.6. Розглянемо ці залежності. Тут більшому опору термічному окисленню відповідають менші значення товщин підзатворного діелектрика.

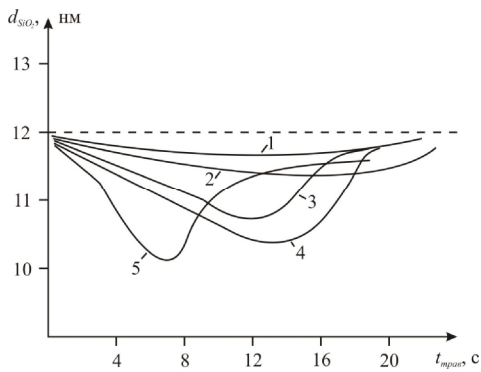


Рис. 6. Залежність товщини плівки підзатворного діелектрика від опору окислення (часу травлення) для різних процесів формування підзатворного діелектрика.

Точка на осі ординат і заштрихована пунктирна лінія, яка виходить з даної точки, відповідає високотемпературному термічному оксиду без хлорного окислення та нітридизації. Збільшення часу травлення плівок вказує на більш стійкі хімічні зв'язки Si-O-N, ніж SiO з однієї сторони, та Si-O-Ho з іншої. А це веде до зменшення концентрації пасток (швидких поверхневих станів), що в кінцевому рахунку веде до збільшення пробивної напруги підзатворного діелектрика.

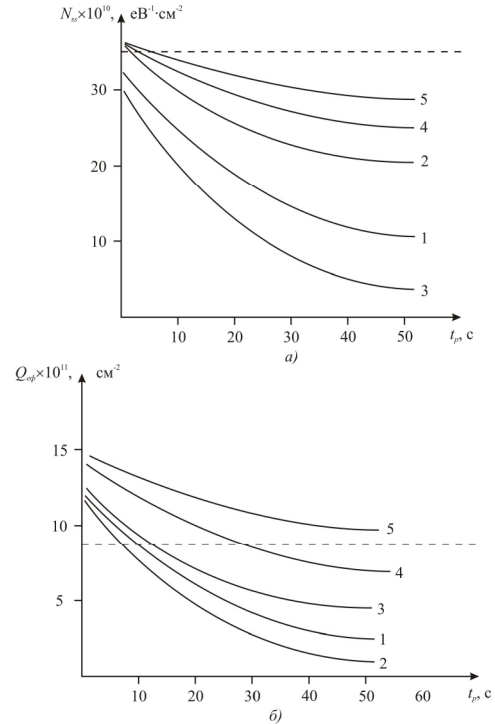


Рис. 7. Залежність густини швидких поверхневих станів N_{ss} а) і величини фіксованого заряду Q_f б) від часу реокислення плівок підзатворного діелектрика, сформованих різними процесами.

Значне зменшення концентрації швидких поверхневих станів N_{ss} спостерігається після повторного швидкого відпалу в сухому кисні, при $T=1100^\circ\text{C}$ (так званому реокисленню). Це можна сказати і про фіксований заряд Q_f , величина якого при реокисленні зменшується (рис.7). Ці залежності вказують на те, що процесом реокислення розірвані зв'язки відновлюються, густина станів і заряду зменшується, плівки підзатворного діелектрика стають більш досконалими.

На рис.8 приведені характеристики діелектричного шару $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$, сформованого іонною імплантацією одно- і двозарядних іонів азоту N^+ , N^{++} з різною дозою і при різних температурах постімплантаційного відпалу. На відміну від SiO_2 плівки підзатворного діелектрика на основі оксинітриду кремнію, сформованого імплантацією азоту получаются з більш чіткими границями за дефектністю. Густина дислокацій та дефектів над такою плівкою зменшується до $0,5-10$ см^{-2} , тоді як в типовому SiO_2 така дефектність складає 10^3-10^5 см^{-2} . Це вказує на високі гетерні властивості оксинітридних плівок. Слід відзначити, що гетерна ефективність визначається її коефіцієнтом

заломлення, оптимальна величина якого складає 1,82-1,95.

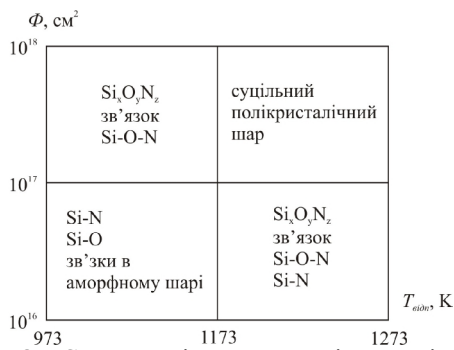


Рис. 8. Структурні властивості оксинітридного шару $Si_xO_yN_z$, отриманих імплантацією N^+ в залежності від температури активації.

На рис.9 представлені концентраційні профілі азоту, імплантованого у вигляді іонів N^+ з енергією 50 кеВ та дозою $1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (крива 1) та іонів N^{++} з такою ж енергією і дозою $1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (крива 2). Змінюючи енергію імплантації та використовуючи двозарядні іони азоту N^{++} можна формувати підзатворний оксинітридний гетер на різній товщині діелектрика, а значить в широких межах змінювати зарядні властивості підзатворного діелектрика, причому це можна робити локально в наперед задані

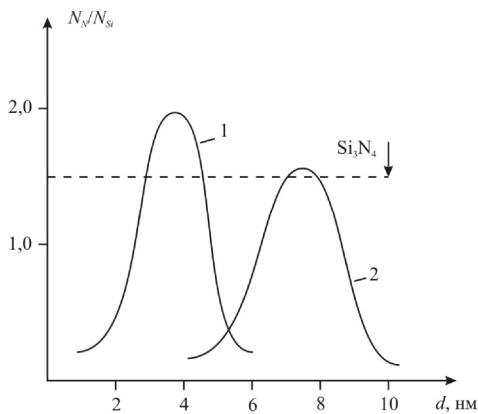


Рис. 9. Концентраційні профілі азоту, імплантованого у високотемпературний оксид (1 – для іонів N^+ , 2 – для іонів N^{++}).

області.

Інтегральним параметром, який визначає якість підзатворного діелектрика, є термопольова стабільність порогової напруги МОН-транзистора та CV-характеристики МОН-структури. Перехід в субмікронний діапазон топологічних розмірів структур ВІС накладає на таку нестабільність свої обмеження. Хлорна технологія формування підзатворного діелектрика мінімізує величину заряду рухливих іонів Q_m . Тоді вся нестабільність підзатворної системи визначається зарядами Q_f – фіксованим зарядом в окислі, Q_{ot} – зарядом захоплення в оксиді та зарядом Q_{it} – зарядом поверхневих пасток. Саме ці 5 видів технології повинні оцінити свою ефективність в нестабільності їх CV-характеристик і порогової напруги ΔU_T . Повернемось до виду CV-характеристики для

кремнію р-типу (n-канальні МОН-транзистори) та n-типу (р-канальні МОН-транзистори) і їх зсуву при дії додатного чи від'ємного фіксованого заряду Q_f (рис.10). Інші заряди спотворюють гістерезисну форму CV-характеристики.

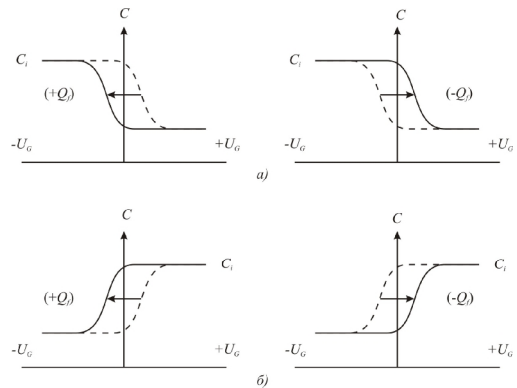


Рис. 10. Зсув CV-характеристики по осі напруг під дією позитивного і негативного фіксованого заряду Q_f для а) напівпровідника р-типу, б) напівпровідника n -типу;

Для різних процесів формування підзатворного діелектрика ця величина ΔU_f для гістерезисних кривих знятих при кімнатній температурі та температурі $+250^\circ\text{C}$ складала: 1 – $\Delta U_f = 1 \div 1,5 \text{ В}$; 2 – $\Delta U_f = 0,8 \div 2,0 \text{ В}$; 3 – $\Delta U_f = 1,0 \div 2,5 \text{ В}$; 4 – $\Delta U_f = 0,8 \div 1,9 \text{ В}$; 5 – $\Delta U_f = 2-4 \text{ В}$.

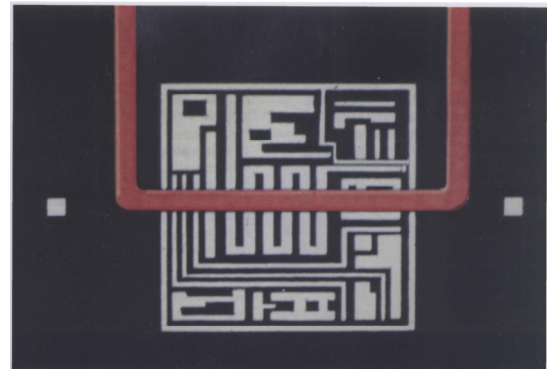


Рис. 11. Фотошаблон із пеліклом (тонкою органічною мембраною).

Висновки

Відповідно самий мінімальний термопольовий дрейф порогової напруги ΔU_T забезпечили два види технологій формування підзатворного діелектрика

- високотемпературне оксидування при $T=1050^\circ\text{C}$ в сухому кисні та легуючої добавки NoCl_3 (1-5%) на рівні 0,5-1,8 В;

- легування сформованого високотемпературного оксиду при $T=1050^\circ\text{C}$ в сухому кисні імплантацією азоту (одно- та двозарядною) з дозою 1-10 мкл/см² при $E=30-50 \text{ кеВ}$ на рівні 0,6-2,2 В.

1. Опір термічному оксидуванню, який визначається швидкістю травлення попередньо вирощеної оксинітридної плівки $Si_xO_yN_z$ є дуже

чутливим методом для оцінки міцності хімічних зв'язків Si-O-N, Si-N, Si-O.

2. Способи нітридизації та легування РЗМ оксиду кремнію є дуже ефективними технологіями підвищення електричної міцності підзатворного діелектрика в субмікронних структурах ВІС, де його товщина складає менше 15 нм.

3. Швидкий термічний відпал (реокислення) оксинітридних плівок при $T=1100^{\circ}\text{C}$ в атмосфері сухого кисню протягом 4-20 с якісно відновлює хімічні зв'язки Si-N, Si-O-N і зменшує заряд в оксиді і на межі Si-SiO₂.

4. Мінімальний термопольовий дрейф як CV-характеристики, так і порогові напруги МОН-транзисторів досягається за рахунок:

– високотемпературного оксидування при $T=1050^{\circ}\text{C}$ в сухому кисні та легуючої добавки HoCl₃ (1-5%);

– легуванням сформованого високотемпературного оксиду при $T=1050^{\circ}\text{C}$ в атмосфері сухого кисню імплантацією (одно-, двозарядних) іонів азоту з дозою 1-10 мкл/см² та енергії 30-50 кеВ.

5. Використання аміака NH₃ для нітридизації підзатворного діелектрика є небажаним, бо водень, відновлюючи кремній, додатково розриває хімічні

зв'язки Si-N, Si-O і веде до збільшення термопольового дрейфу порогової напруги МОН-транзисторів.

6. МОН-структури з підзатворним діелектриком SiO₂-Ho₂O₃ та оксинітридом відзначаються високою радіаційною стійкістю до α-опромінення (<10⁴ рад), термопольовий дрейф CV-характеристики та порогової напруги ΔU_T мають мінімальне значення <0,5 В, що є особливо важливим при проектуванні радіаційно-стійких схем пам'яті адресного типу.

7. Для зниження дефектності підзатворного діелектрика до рівня 0,6 деф/см² крім його оксинітридизації проводився попередній захист ПФО пеліклами – тонкою органічною мембраною із смугою світлопропускання 250-600 нм (рис.11). Такий захист знімає всі дефекти, які повторюються при фотолітографічній обробці самої підзатворної системи.

Новосядлий С.П. – доктор технічних наук, професор;
Бережанський В.М. – інженер СНДЦ «Мікроелектроніка»;
Вівчарук В.М. – аспірант;

- [1] С.П. Новосядлий, Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС,-Івано-Франківськ: Сімик, 2003, 351с.
- [2] С.П. Новосядлий, В.М. Бережанський, Дослідження термічних напружень в субмікронних структурах ВІС // *Фізика і хімія твердого тіла* – 7(4) – сс. 771-775 (2006).
- [3] С.П. Новосядлий, Р.І. Запухляк, П.І. Мельник, Прогнозування надійності структур ВІС за допомогою імпульсних нерівноважних вольт-фарадних характеристик // *Фізика і хімія твердого тіла*, 6(1) сс.153-160 (2005).
- [4] Нітрид кремнію в електроніці // Под ред. Романова А.В. Новосибирск: Наука, 1982, 200с.
- [5] А.Ф. Андреева, М.А. Гильман, М.Д. Сигалин, Перспектива применения пленок оксидов редкоземельных металлов в оптической и электронной промышленности // *В книге: Получение и свойства тонких пленок* Киев:ИПМ АНУССР, сс.154-159 (1987).
- [6] Ш.Д. Кумашов, И.М. Викулин, С.В. Ленков, Кремниевые МДП-структуры с оксидами редкоземельных элементов в качестве диэлектрика // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре* 6(11-12) сс.6-8, (2001).
- [7] R.P. Vasquez, A Madhukar, F.J. Grunthaler, M.L. Naiman // *J. Appl. Phys.* 60 (1) pp.226-229, (1986).
- [8] Б. Данилин, Реактивная полная имплантация как метод создания структур // *Зарубежная электронная техника*, 4 – сс.62-80, (1986).
- [9] В.Е. Deal, Standardized Terminology for oxide charges associated with thermally oxidized silicon // *IEEE Trans. Electron Devices*, 27 – pp.606-610, (1980).
- [10] Д.И. Чернябрыкин, В.В. Бахтипов, Диэлектрические свойства пленок окислов редкоземельных элементов // *В книге: Диэлектрики* – Киев: Изд-во КПУ, сс.96-100, (1991).

S.P. Novosyadly, V.M. Berezhansky, V.M. Vivcharuk

Methods of Increase Electro-Physical Parameters of Gate Dielectric in Submicrometer Structures VLSI

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Shevchenko st., 57, Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, berezhansky@mail.ru

The thickness gate dielectric IC structures goes down with growth degrees of integration of large-scale. This work specifies the ways of improvement of electro-physical parameters and termopolarity stability of gate dielectric, formed the processes of him nitriding and doping..