

**К.В. Михайловська, В.І. Минько, І.З. Індутний,
П.Є. Шепелявий**

ВПЛИВ ПЕРІОДИЧНОГО РЕЛЬЄФУ КРЕМНІЄВОЇ ПІДКЛАДКИ НА ПОЛЯРИЗАЦІЮ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ nc-Si-SiO_x НАНОСТРУКТУР

Досліджено спектральні та поляризаційні характеристики фотолюмінесценції (ФЛ) поруватих світловипромінювальних nc-Si-SiO_x наноструктур, сформованих на c-Si пластинах з рельєфною поверхнею у вигляді дифракційних ґраток з формою профілю штрихів, близькою до трапеції та трикутника. Формування ґратки на поверхні кремнієвої підкладки проводилося з використанням інтерференційної літографії на основі вакуумного халькогенідного фоторезисту та анізотропного рідинного травлення. Досліджені nc-Si-SiO_x структури було отримано шляхом термічного осадження під кутом монооксиду Si у вакуумі та наступного високотемпературного відпалу. Встановлено, що вихід ФЛ із структури nc-Si-SiO_x на рельєфній підкладці головним чином залежить від того, як це випромінювання поляризовано відносно напрямку штрихів ґратки, і набагато менше залежить від напрямку поляризації збуджуючого світла. Виміряні спектри відбиття структури nc-Si-SiO_x на рельєфній підкладці підтвердили вплив ґратки на вихід поляризованого випромінювання.

Ключові слова: кремнієві наноструктури, фотолюмінесценція, ефект пам'яті.

1. ВСТУП

Нанокompatитні напівпровідникові шари є базою новітніх приладних структур. Зокрема, композити на основі нанокристалів кремнію (nc-Si) дозволяють створити нове покоління оптоелектронних приладів з дуже широким спектром застосувань – від обчислювальної техніки до сенсорів та освітлювальних приладів [1, 2]. Було показано можливість практичного застосування таких структур у світловипромінюючих діодах, лазерах та оптичних підсилювачах [3]. На теперішній час лише структури на основі нанокристалів сферичної форми використовуються в оптоелектронних приладах. У той же час у деяких застосуваннях, наприклад у дисплейній техніці, флуоресцентні структури з поляризованим випромінюванням мають ряд переваг [4]. Поляризоване випромінювання цих наноструктур може мати потенційне застосування для підсвічування плоских дисплеїв і для біологічного маркування [5]. Тому розробка джерел поляризованого випромінювання на основі нанокремнію є актуальною задачею як з практичної, так і наукової точки зору.

Для кремнієвих наноструктур поляризаційні характеристики фотолюмінесценції (ФЛ) найбільш вивчені для поруватого кремнію [6, 7]. Зокрема, у поруватому кремнії (por-Si) спостерігалась так звана поляризаційна пам'ять (ПП), тобто залежність поляризації ФЛ від напрямку поляризації збуджуючого випромінювання. Експериментами на спеціально сформованих зразках з наночастинками Si заданої форми встановлено, що ПП пов'язана зі світінням nc-Si несферичної форми [8].

Одними з найбільш перспективних кремнієвих світловипромінюючих структур є тонкоплівкові структури nc-Si-SiO_x, в яких наночастинки кремнію знаходяться в оточенні матриці оксиду (SiO_x) [1, 3]. Перевагою nc-Si-SiO_x композитів, у порівнянні з por-Si, є механічна та хімічна стабільність, а також можливість суміщення з сучасною кремнієвою технологією. Але в таких структурах ефект ПП не спостерігається [9], оскільки nc-Si формуються внаслідок високотемпературного відпалу ізотропного аморфного оксиду і також є ізотропними. І навіть в анізотропних поруватих шарах nc-Si-SiO_x з колоноподібною структурою, які утворюються шляхом осадження під кутом монооксиду кремнію у вакуумі та наступного високотемпературного відпалу [10], ефект ПП не спостерігався [11].

У попередніх роботах було показано [10], що обробка таких структур у розчинах або парі плавикової кислоти може істотно підвищити інтенсивність ФЛ і змістити в короткохвильову область положення максимуму ФЛ у результаті часткового травлення *nc-Si* і пасивування їх поверхні. У пасивованих таким методом структурах ми виявили ефект ПП [10, 11], аналогічний тому, що спостерігається у *por-Si*.

Таким чином, за рахунок осадження під кутом і пасивування в HF можна в деяких межах контролювати поляризаційні властивості випромінювання структури на основі *nc-Si*. Крім цього, ще одним способом контролю поляризаційних властивостей випромінювання від таких шарів може бути формування періодичних дифракційних структур на поверхні підкладки [12]. Мета даної роботи – дослідження впливу наноструктурування поверхні кремнієвої підкладки на властивості поляризації ФЛ поруватих світловипромінюючих *nc-Si-SiO_x* структур, які сформовані на таких підкладках з різною формою рельєфу поверхні.

2. ЕКСПЕРИМЕНТ

Матеріалом для підкладок, на яких формувалася періодичний поверхневий рельєф у вигляді ґраток, служив монокристалічний полірований кремній з орієнтацією $\langle 100 \rangle$. Формування ґратки на поверхні кремнієвої підкладки проводилося з використанням інтерференційної літографії на основі вакуумного халькогенідного фоторезисту. На попередньо очищену поверхню Si шляхом термічного випаровування у вакуумі $2 \cdot 10^{-3}$ Па послідовно наносили шари Cr та халькогенідної сполуки $As_{40}S_{30}Se_{30}$ товщиною 50 нм та 100–200 нм відповідно. Контроль товщин під час нанесення плівок здійснювався за допомогою кварцового вимірвача товщини (КИТ-1), після осадження – мікроінтерферометра МІІ-4. Експонування зразків для отримання резистивної маски здійснювалось інтерференційною картиною від двох когерентних пучків випромінювання аргонного лазера з довжиною хвилі 476,5 нм.

Після етапу експонування проводилось селективне видалення ділянок фоторезисту за негативним типом травлення (швидкість розчинення зменшується з ростом дози опромінення). Наступним етапом було видалення адгезійного шару крізь халькогенідну маску. Травлення халькогенідної сполуки здійснювалось безводними розчинами органічних лугів, а шару Cr – водним розчином HCl. Утворена таким чином двошарова резистивна маска $As_{40}S_{30}Se_{30}$ -Cr використовувалась для формування на поверхні Si відповідного рельєфу. Травлення кремнію проводилось лужними розчинами на основі етилендіаміну, які є травильними розчинами анізотропного типу.

Для визначення форми профілю отриманих рельєфних елементів та їх розмірів використовувався мікроскоп атомних сил Dimension 3000 Scanning Probe Microscope фірми Digital Instruments. На рис. 1а наведено АСМ зображення профілю періодичного рельєфу, отриманого на поверхні *c-Si* підкладки шляхом анізотропного травлення крізь захисну маску, що мала вигляд дифракційної ґратки з періодом біля 0,9 мкм. Час травлення кремнію для цього зразка становив 60 с. При цьому глибина рельєфу досягає 0,65 мкм, а форма профілю штриха близька до трикутної. При зменшенні часу травлення кремнію відповідно змінюється і форма профілю штриха. На рис. 1б зображено рельєф, утворений на поверхні Si за час травлення 20 с. Глибина рельєфу цієї ґратки становить приблизно 0,3 мкм, а форма профілю штриха близька до трапеції з кутом вершини $70,5^\circ$ та плоскою верхньою частиною.

Структури *nc-Si-SiO_x* отримували термічним випаровуванням у вакуумі $(1 \dots 2) \cdot 10^{-3}$ Па монооксиду кремнію SiO фірми CeraC. Inc. чистотою 99,9% на наноструктуровані та плоскі *c-Si* підкладки (100), які розміщували під кутом 75° чи 45° між нормаллю до поверхні підкладки та напрямком на випарник. У результаті додаткового окиснення залишковими газами потоку SiO на підкладці осаджувались нестехіометричні плівки SiO_x з $x > 1$. Товщина плівки SiO_x становила біля 800 нм. Під час осадження на структуровану пластину з трапецієподібним рельєфом (рис. 1б) площа падіння потоку випарюваного SiO на підкладку була ортогональною до штрихів ґратки, сформованої на поверхні підкладки. При

цьому внаслідок екранування потоку штрихами ґратки плівка SiO_x в основному осаджувалась лише на верхніх, плоских ділянках штрихів. У цьому випадку кут падіння потоку SiO на поверхню осадження був таким же, як і на плоскій, неструктурованій підкладці і дорівнював 75° . У випадку осадження на структуровану пластину з трикутним профілем штриха (рис. 1а) площа падіння потоку випарюваного SiO на підкладку була паралельною штрихам ґратки, а кут між нормаллю до поверхні всієї підкладки та напрямком на випарник дорівнював 45° . У цьому випадку плівка осаджувалась на бокові грані штрихів, причому кут між нормаллю до бокової грані штриха та напрямком на випарник (кут падіння потоку на поверхню осадження) дорівнював 73° .

Проведені раніше за допомогою електронного мікроскопа ZEISS EVO 50XVP дослідження структури осаджених під кутом плівок SiO_x показали, що вони мають порувану колоноподібну структуру [10]. Розміри колон, їх орієнтація, а також поруватість структури залежать від кута осадження плівки на поверхню. На структурованій підкладці з трапецієподібним профілем штрихів шар nc-Si-SiO_x складається із смужок, періодичність і орієнтація яких визначаються періодичністю рельєфу поверхні підкладки. На підкладці з трикутним профілем штриха шар nc-Si-SiO_x суцільний і покриває всю поверхню підкладки. Поруватість зразків, визначена в роботі [13], дорівнювала 51-53% для кута осадження плівки 75° , параметр x у SiO_x плівці становив 1,51 до відпалу та близько двох ($x \approx 1,92$) після відпалу. Після високотемпературного відпалу плівок SiO_x поруватість, а також розмір і орієнтація колон залишались незмінними.

Отримані плівки нестехіометричного складу відпалювали у вакуумній камері при залишковому тиску $1 \cdot 10^{-3}$ Па і температурі 975°C , внаслідок чого SiO_x частково розкладався на нанокристалічний кремній та SiO_2 . Пасивування відпалених зразків nc-Si-SiO_x проводили у герметичному боксі, в якому насичена пара HF знаходилась при температурі 30°C . Через взаємодію SiO_2 компонента з парою HF товщина плівки nc-Si-SiO_x зменшувалась протягом пасивації на 50–70%.

Спектри ФЛ досліджували при кімнатній температурі. Збудження ФЛ здійснювали лінійно поляризованим світлом імпульсного азотного лазера ($\lambda = 337$ нм), а також поляризованим випромінюванням напівпровідникового лазера ($\lambda = 415$ нм). Збуджуючий промінь падав майже нормально до поверхні зразка, а ФЛ реєстрували під малим кутом до напрямку збудження. Для вимірювань поляризаційних характеристик використовували плівкові поляризатори, один з них ставили на шляху збуджуючого світла, другий, аналізатор, – між двома лінзами, які фокусували ФЛ від досліджуваних структур на вхідну щілину монохроматора ЗМР-2. Спектральний склад випромінювання реєстрували фотопомножувачем ФЕУ-79. У спектрах ФЛ враховували спектральну чутливість вимірювальної установки і поляризаційну залежність чутливості монохроматора.

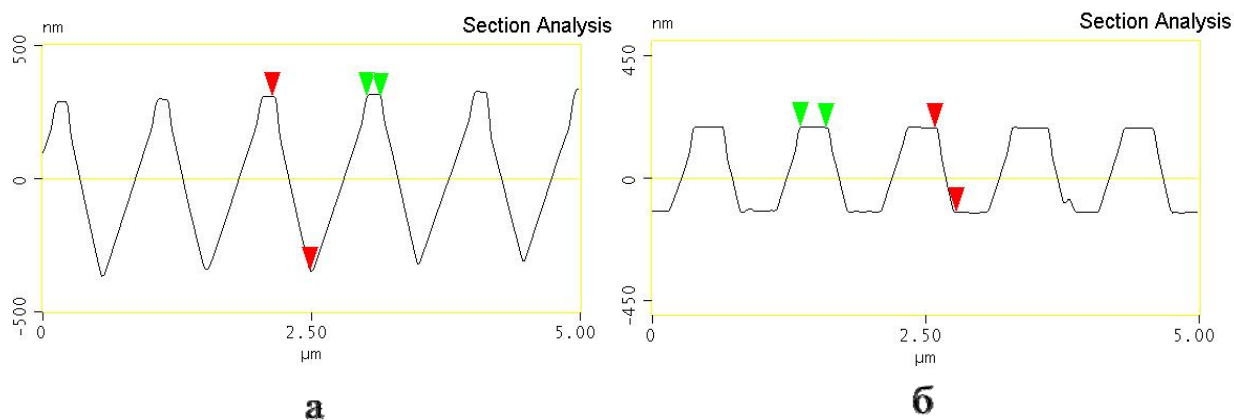


Рис. 1. АСМ зображення профілю періодичного рельєфу кремнієвої підкладки з формою профілю штриха, близькою до трикутника (а) та до трапеції (б).

Спектри відбиття зразків на плоских та структурованих підкладках були виміряні для поляризації відбитого світла паралельно штрихам ґраток, а також перпендикулярно до них, використовуючи стандартне Al дзеркало. Відбитий промінь проходив крізь аналізатор і спектральний прилад, як і при дослідженні поляризованої фотолюмінесценції.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Залежність поляризації ФЛ від напрямку поляризації збудження, тобто ефект ПП, можна проілюструвати, використовуючи ступінь лінійної поляризації ФЛ

$$\rho = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}},$$

де I_{\parallel} – інтенсивність ФЛ, поляризованої паралельно поляризації збудження, а I_{\perp} – поляризованої у перпендикулярному напрямку. Як показано у попередніх роботах [11, 14], де досліджувались структури, нанесені на плоскі, неструктуровані підкладки, ефект ПП на поруватих, пасивованих у HF пс-Si-SiO_x шарах, які мають колоноподібну структуру, проявляє асиметрію у площині зразка. Для випадку поляризації збудження перпендикулярно до проекції нахилених SiO_x нанокolon на площину зразка, різниця між I_{\parallel} та I_{\perp} помітно менша, ніж для паралельної орієнтації. Відповідно значення ρ для перпендикулярної орієнтації є меншим, ніж для паралельної орієнтації. Зроблено висновок, що анізотропні видовжені наночастинки кремнію мають переважну орієнтацію у півці, причому проекція цієї орієнтації на площину зразка збігається з напрямком проекції нанокolon.

Проте для зразків зі структурованими підкладками є два джерела оптичної анізотропії, які можуть впливати на поляризаційні властивості їх ФЛ, а саме: нахилені нанокolони оксидної матриці та рельєф ґратки на поверхні підкладки. На рис. 2а, 2б показано спектри ФЛ пс-Si-SiO_x зразка, нанесеного на структуровану підкладку з трапецієподібним профілем штрихів. Криві 1 та 2 відповідають орієнтації аналізатора паралельно та перпендикулярно до поляризації збуджуючого випромінювання, крива 3 – значення ρ . Рис. 2а відповідає зразку, який орієнтований так, що поляризація збуджуючого світла паралельна штрихам ґратки (і одночасно ортогональна до проекції нахилених SiO_x нанокolon). Видно, що інтенсивність I_{\parallel} (крива 1) є набагато більшою, ніж I_{\perp} (крива 2), а максимальна величина ρ (крива 3) дорівнює 0,26. Це значення в 2 рази більше, ніж максимальне значення ρ , яке спостерігалось на аналогічних зразках, нанесених на плоскі підкладки.

На рис. 2б наведено спектри ФЛ того ж пс-Si-SiO_x зразка, але для збудження поляризованого ортогонально до штрихів ґратки і паралельно проекції SiO_x нанокolon. Видно, що в цьому випадку інтенсивність I_{\perp} вища, ніж I_{\parallel} , тобто ФЛ переважно поляризується вздовж напрямку штрихів ґратки незалежно від поляризації збуджуючого світла. Отже, параметр ρ характеризується від'ємними значеннями (крива 3), мінімальне значення ρ дорівнює -0,18 (відмітимо, що для аналогічних пс-Si-SiO_x структур на плоских підкладках значення ρ є додатним для обох орієнтацій поляризації збуджуючого випромінювання відносно проекцій SiO_x нанокolon). Тобто для обох орієнтацій зразка на структурованій підкладці вирішальний вплив на поляризаційні властивості ФЛ має рельєф поверхні підкладки, а не орієнтація оксидних нанокolon.

Аналогічні дослідження було проведено на зразках, нанесених на структуровані підкладки з трикутним профілем штрихів ґратки. На рис. 3а, 3б показано спектри ФЛ такого зразка, орієнтованого таким чином, що поляризація збуджуючого світла паралельна штрихам ґратки (і одночасно також паралельна проекції нахилених SiO_x нанокolon) (рис. 3а) та ортогональна до штрихів (рис. 3б). Позначення кривих такі ж, як і на рис. 2. Видно, що особливості поляризації ФЛ в основному аналогічні тим, які спостерігались на зразку з трапецієподібним профілем штриха. Зокрема, ФЛ і даного зразка переважно поляризується вздовж напрямку

штрихів ґратки незалежно від поляризації збуджуючого світла, крім короткохвильової ділянки спектра, де інтенсивності поляризованих компонент ФЛ збігаються.

При дослідженні поляризованої ФЛ поруватого кремнію в геометрії торцевого збудження, коли світло падає на зріз зразка rog-Si (перпендикулярно до напрямку хімічного травлення), отримано також від'ємні значення ρ [17]. Автори цієї роботи пов'язували від'ємні значення ρ у rog-Si з переважною орієнтацією видовжених еліпсоїдальних nc-Si вздовж напрямку травлення. Але оскільки структура шарів nc-Si-SiO_x на плоских та на структурованих підкладках однакова, зміна знака ρ , показана на рисунках 2, 3, не може бути пояснена переважною орієнтацією видовжених наночастинок Si . Ми вважаємо, що основним фактором, що визначає поляризаційні властивості ФЛ зразка на структурованій підкладці, є вплив періодичного рельєфу на ефективність виходу випромінювання. Цей вплив може бути пов'язаний з різною дифракційною ефективністю структурованої підкладки для світла, поляризованого вздовж і поперек штрихів ґратки.

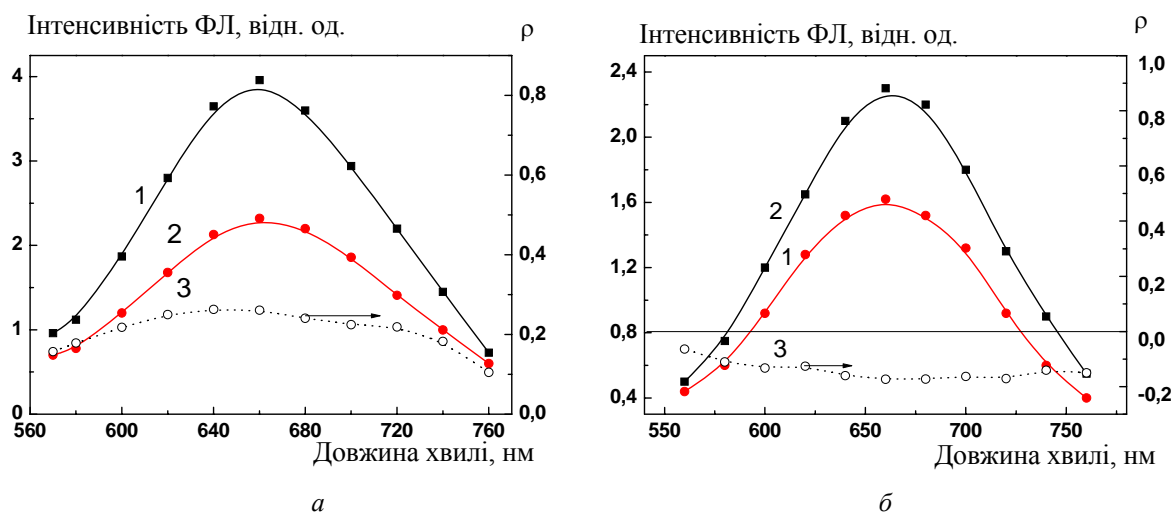


Рис. 2. ФЛ спектри півки nc-Si-SiO_x на структурованій c-Si підкладці з трапецієподібним профілем штрихів для орієнтації поляризації збуджуючого випромінювання паралельно (а) та перпендикулярно (б) до штрихів ґратки. Криві 1 та 2 відповідають орієнтації аналізатора паралельно та перпендикулярно до поляризації збуджуючого випромінювання. Криві 3 – спектральна залежність ступеня лінійної поляризації ФЛ ρ .

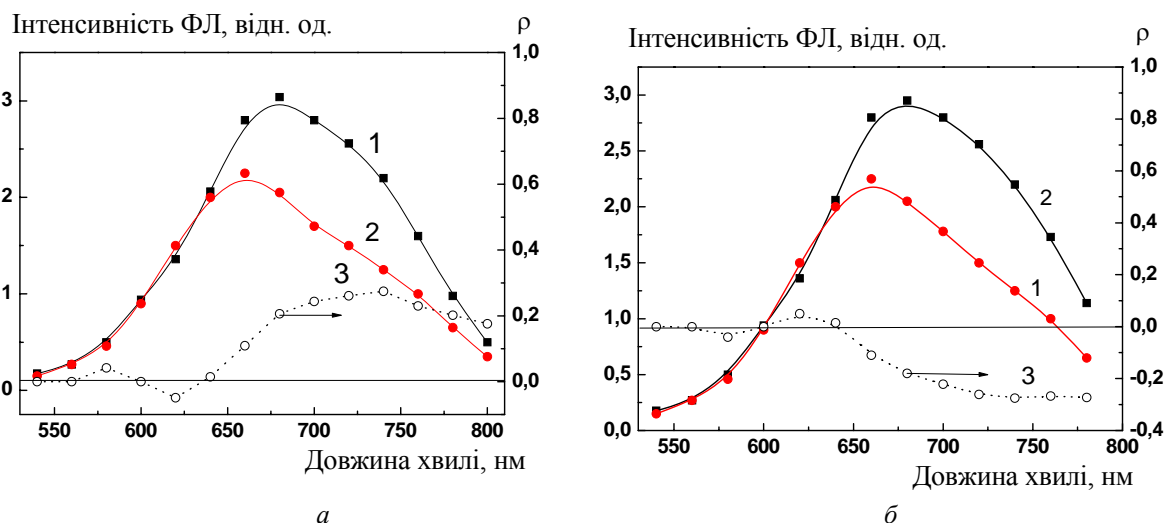


Рис. 3. ФЛ спектри півки nc-Si-SiO_x на структурованій c-Si підкладці з трикутним профілем штрихів для орієнтації поляризації збуджуючого випромінювання паралельно (а) та перпендикулярно (б) до штрихів ґратки. Криві 1 та 2 відповідають орієнтації аналізатора паралельно та перпендикулярно до поляризації збуджуючого випромінювання. Криві 3 – спектральна залежність ступеня лінійної поляризації ФЛ ρ .

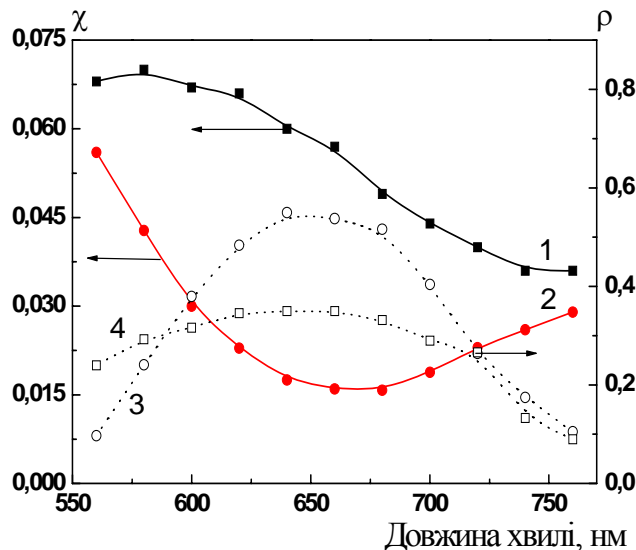


Рис. 4. Спектри відбиття плівки pc-Si-SiO_x на структурованій c-Si підкладці для світла, поляризованого уздовж штрихів ґратки (1) та в ортогональному напрямку (2). 3 та 4 – спектральні залежності параметра асиметрії відбиття χ та ступеня лінійної поляризації ФЛ ρ відповідно.

Для визначення впливу такої структурованої поверхні на вихід поляризованого випромінювання із pc-Si-SiO_x ми дослідили спектр відбиття цих зразків при нормальному падінні світла. Результати досліджень для зразка на підкладці з трапецієподібним профілем штрихів показано на рис. 4, де крива 1 відповідає поляризації відбитого світла, електричний вектор якого спрямований вздовж штрихів ґратки, а крива 2 відповідає поляризації, яка ортогональна до штрихів. Різницю значень відбиття для цих двох поляризацій світла можна характеризувати параметром асиметрії відбиття χ . Параметр χ визначався як $\chi = \frac{r_{\parallel} - r_{\perp}}{r_{\parallel} + r_{\perp}}$, де r_{\parallel}

та r_{\perp} – інтенсивність відбитого світла з електричним вектором, паралельним і перпендикулярним до штрихів ґратки відповідно. Спектральну залежність параметра χ показано на рис. 4, крива 3.

На рисунку також показано спектральну залежність величини ρ для того ж зразка (крива 4), отриману для тих самих орієнтацій аналізатора відносно штрихів ґратки при поляризації збудження вздовж штрихів (тобто крива 3 на рис. 2а). Видно, що спектральний хід обох кривих є однаковим і в області максимуму ФЛ (≈ 650 нм) ρ та χ мають найбільші значення. Це свідчить про те, що вихід поляризованого випромінювання з плівки pc-Si-SiO_x на структурованій підкладці в основному визначається поляризаційними характеристиками відбиття ґратки і значно менше залежить від поляризації збуджуючого світла. Ця невелика залежність від орієнтації поляризації збудження зумовлена орієнтацією видовжених наночастинок уздовж наноколон SiO_x. На зразку з трапецієподібним профілем штриха вона практично не проявляється при орієнтації поляризації збудження вздовж штрихів (рис. 2а та 4), оскільки в цьому зразку проєкції наноколон орієнтовані поперек штрихів і в такій геометрії вклад асиметрії наночастинок у ρ невеликий. Оскільки має місце більший вклад асиметрії pc-Si-SiO_x структури при ортогональній орієнтації зразка (рис. 2б), тому тут спектральний хід абсолютної величини ρ дещо відхиляється від спектра χ .

Для зразків на підкладці з трикутним профілем штрихів спектральна залежність відбиття поляризованого випромінювання більш складна (не наведено), що проявляється у вказаній вище відмінності в спектральній залежності ρ (рис. 3), порівняно зі зразками на підкладках із трапецієподібним рельєфом (рис. 2). Але і в цьому випадку визначальним фактором у поляризації ФЛ є орієнтація штрихів рельєфу підкладки. На зразках із структурованою

підкладкою ефект асиметрії наночастинок перекривається сильним впливом асиметрії відбиття поляризованого випромінювання від ґратки. Чим більша різниця відбиття ґратки для поляризації світла вздовж і поперек штрихів, тим сильніше її вплив на поляризацію випромінювання кремнієвих наноструктур, сформованих на таких рельєфних підкладках.

4. ВИСНОВКИ

Установлено, що ФЛ світловипромінюючих nc-Si-SiO_x наноструктур, сформованих на c-Si пластинах з рельєфною поверхнею у вигляді дифракційних ґраток з різною формою профілю штрихів, поляризується переважно вздовж напрямків штрихів ґратки незалежно від поляризації збуджуючого світла.

Показано, що основним чинником, що визначає поляризаційні властивості ФЛ, є вплив періодичного рельєфу на ефективність виходу випромінювання з nc-Si-SiO_x за рахунок різниці відбиття ґратки для поляризацій світла вздовж і поперек штрихів.

Таким чином, формування періодичних дифракційних структур на поверхні підкладки є ефективним методом управління поляризаційними властивостями ФЛ світловипромінюючих структур на основі наночастинок кремнію.

THE INFLUENCE OF THE PERIODIC RELIEF OF THE SILICON SUBSTRATE ON POLARIZATION OF PHOTOLUMINESCENCE OBSERVED IN nc-Si-SiO_x NANOSTRUCTURES

K.V. Michailovska, V.I. Mynko, I.Z. Indutnyi, P.E. Shepeliavyi

The investigation of the spectral and polarization characteristics of photoluminescence (PL) of porous light-emitting nc-Si-SiO_x nanostructures formed on the patterned c-Si plates with a relief surface in the form of diffraction grating with trapezoidal and triangular groove profiles were performed. Interferential lithography with vacuum chalcogenide photoresist and anisotropic wet etching were used to form a periodic relief (diffraction grating) on the surface of the substrates. The studied nc-Si-SiO_x structures were produced by oblique-angle deposition of Si monoxide in vacuum and the subsequent high-temperature annealing. It was found that the yield of PL from the nc-Si-SiO_x structure on the patterned substrate depends on how this radiation is polarized with respect to the grating grooves and is much less dependent on polarization of the exciting light. The measured reflection spectra of nc-Si-SiO_x structure on the patterned c-Si substrate have confirmed influence of the pattern on the fraction of polarized emission from nc-Si-SiO_x.

Keywords: silicon nanostructure, photoluminescence, polarization memory effect.

1. Molinary M., Rinnert H., Vergnat H. Visible photoluminescence in amorphous SiO_x thin films prepared by silicon evaporation under a molecular oxygen atmosphere. *Appl. Phys. Lett.* 2003. **82**, No 22. P. 3877–3879.
2. Kanemitsu Y. Efficient light emission from crystalline and amorphous silicon nanostructures. *J. Lumin.* 2002. **100**, No 1-4. P. 209–217.
3. Heitmann J., Müller F., Zacharias M., Gösele U. Silicon nanocrystals: size matters. *Adv. Mater.* 2005. **17**, No 7. P. 795–803.
4. Hasegawa Masaki, Hirayama Yuki, and Dertinger S. Polarized fluorescent emission from aligned electrospun nanofiber sheets containing semiconductor nanorods. *Appl. Phys. Lett.* 2015. **106**, No 5. P. 051103.
5. Chan W.C.W., Nie S. Quantum dots bioconjugates for ultrasensitive nonisotopic detection. *Science*. 1998. **281**. P. 2016–2018.
6. Polisski G., Andrianov A.V., Kovalev D., Koch F. Light-stimulated anisotropy in porous silicon. *Brazil J. Phys.* 1996. **26**, No 1. P. 89–192.
7. Bruhn B., Valenta J., Linnros J. Controlled fabrication of individual silicon quantum rods yielding high intensity, polarized light emission. *Nanotechnology*. 2009. **20**, No 50. P. 505301.
8. Valenta J., Juhász R., Linnros J. Photoluminescence from single silicon quantum dots at room temperature. *J. Lumin.* 2002. **98**, No 1-4. P. 15–22.
9. Diener J., Kovalev D., Polisski G., Koch F. Polarization properties of the luminescence from silicon nanocrystals. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2000. **3**, No 4. P. 445–448.

10. Indutnyi I.Z., Michailovska E.V., Shepeliavyy P.E., Dan'ko V.A. Visible photoluminescence of selective etched porous nc-Si-SiO_x structures. *Semiconductors*. 2010.-**44**, No 2. P. 206–210.
11. Michailovska K.V., Indutnyi I.Z., Kudryavtsev O.O. et al. Polarization memory of the luminescence related with Si nanoparticles embedded into oxide matrix. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2015. **18**, No № 3. P. 186–191.
12. Liu Y., Xu J., Sun H. et al. Depth-dependent anti-reflection and enhancement of luminescence from Si quantum dots-based multilayer on nano-patterned Si substrates. *Opt. Exp.* 2011. **19**, No 4. P. 3347–3352.
13. Indutnyy I., Lysenko V., Maidanchuk I. et al. Effect of chemical and radiofrequency plasma treatment on photoluminescence of SiO_x films. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2006. **9**, No 1. P. 9–13.
14. Michailovska K.V., Indutnyi I.Z., Shepeliavyy P.E. and Sopinsky M.V. Polarization memory effect in the photoluminescence of nc-Si-SiO_x light-emitting structures. *Nanoscale Res. Lett.* 2016. **11**. P. 277.
15. Allan G., Delerue C., Niquet Y.M. Luminescence polarization of silicon nanocrystals. *Phys. Rev. B*. 2001. **63**, No 20. P. 205301.
16. Horiguchi S. Conditions for a direct band gap in Si quantum wires. *Superlattices Microstructures*. 1998. **23**, No 2. P. 355–364.
17. Kovalev D., Ben Chorin M., Diener J. et al. Porous Si anisotropy from photoluminescence polarization. *Appl. Phys. Lett.* 1995. **67**, No 11. P. 1585–1587.
18. Sychugov I., Sangghaleh F., Bruhn B. et al. Strong absorption enhancement in Si nanorods. *Nano Lett.* 2016. **16**, No 12. P. 7937–7941.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.С. Лашкарьова НАН України,
41, проспект Науки, 03680 Київ, Україна
E-mail: indutnyu@isp.kiev.ua