

## ВПЛИВ ЛОКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЮ ОКИСЛЕНИХ СТРУКТУР МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНІЮ З ПОКРИТТЯМ НАНОКРИСТАЛІВ CdS

О. Ю. Сапельнікова, д. т. н. Л. А. Карачевцева, к. т. н. О. О. Литвиненко, О. Й. Стронська

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України  
Україна, м. Київ  
sapelnikovaolena@gmail.com

*Для виготовлення ефективних світловипромінюючих елементів на основі структур макропористого кремнію з нанопокриттям запропоновано структури з оптимальною глибиною макропор та товщиною нанопокриття  $\text{SiO}_2$  і шару світловипромінюючих наночастинок CdS. Визначено вплив очистки поверхні структур шляхом їх окиснення та травлення оксиду на зниження концентрації центрів безвипромінювальної рекомбінації.*

*Ключові слова:* макропористий кремній, оксид кремнію, фотолюмінесценція, нанокристали CdS, ІЧ-поглинання.

Макропористий кремній є перспективним матеріалом для сучасної кремнієвої фотоніки. Кремнієва фотоніка є оптимальним рішенням для створення оптичних комп'ютерів, оскільки в цій області є розвинуті сучасні технології та ресурси для виготовлення гібридних систем з низькою вартістю. При цьому найбільш привабливим є середній інфрачервоний (ІЧ) діапазон (2—4 мкм), адже кремній має низькі втрати ІЧ-поглинання до довжини хвилі 8,5 мкм. Для створення повнооптичної фотонної системи необхідні активні пристрої: модулятори, випромінювальні та фотоприймальні елементи. Так, модулятори реалізуються з використанням в основному електрооптичних ефектів.

У цій роботі для виготовлення ефективних світловипромінювальних елементів на основі макропористого кремнію з нанопокриттями було розроблено технологію формування структур «макропористий кремній — нанопокриття оксиду кремнію з шаром наночастинок CdS» з оптимальними параметрами макропор для забезпечення великої випромінювальної площі їхньої поверхні. Структури макропористого кремнію виготовлялися методом фотоелектрохімічного травлення [1, 2] на монокристалічних кремнієвих підкладках товщиною 500 мкм з орієнтацією (100). Після фотоелектрохімічного травлення проводилося анізотропне травлення у 10% водному розчині КОН.

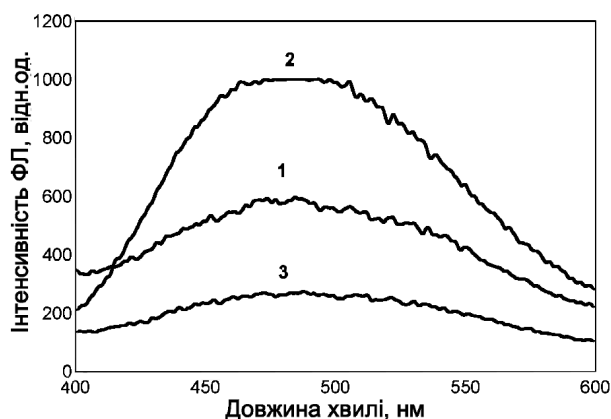
Поверхню структур макропористого кремнію очищували шляхом їх окиснення та травлення оксиду для зниження концентрації центрів безвипромінювальної рекомбінації. Перед окисненням для видалення забруднення з поверхні макропор проводилося ультразвукове очищення. Після цього виготовлялося нанопокриття  $\text{SiO}_2$  у дифузійній печі в атмосфері азоту. Шари оксиду товщиною 10 та 20 нм були сформовані в сухому кисні протягом 20—25 хвилин за температури 790 та 850 °С.

Наночастинки CdS розміром 1,8—2,0 нм осаджували з колоїдного розчину в поліетиленіміні на структури макропористого кремнію з шаром оксиду кремнію. Товщина шару CdS визначалася як відношення об'єму колоїдного розчину до площі поверхні структур макропористого кремнію.

Для оптимальних структур макропористого кремнію з нанопокриттям наночастинок CdS в поліетиленіміні з товщиною оксиду 10—20 нм та з глибиною макропор 75—120 мкм виміряно збільшення ІЧ-поглинання та амплітуди осциляцій, що відповідає зростанню напруженості електричного поля на границі «кремнієва матриця —  $\text{SiO}_2$  — шар наночастинок CdS». Для цього діапазону товщини оксиду та глибини макропор одержано також максимальне значення інтенсивності фотолюмінесценції. Відповідна напруженість електричного поля  $F = \Delta E/a$  складає  $(2,8—3,4) \cdot 10^3$  В/см для структур макропористого кремнію з глибиною макропор 75 мкм [3].

Фотолюмінесценцію вимірювали в діапазоні довжини хвиль 400—680 нм. При цьому максима-

льний квантовий вихід фотолюмінесценції був виміряний за максимальної напруженості електричного поля на границі «Si — SiO<sub>2</sub>», яка дорівнює  $6,8 \cdot 10^4$  В/см [4]. Максимальне значення інтенсивності фотолюмінесценції було одержано також для структури макропористого кремнію з нанопокриттям CdS через 1 тиждень після його нанесення при товщині оксиду 20 нм (глибина макропор 75 мкм, див. криву 2 на рисунку). Крім того, для очищених окисленням та ультразвуковою обробкою структур макропористого кремнію з нанопокриттям CdS було виміряно квантовий вихід фотолюмінесценції, який збільшується в 3,5—4 рази зі зростанням товщини нанопокриття CdS-поліетиленімін від 8 до 25 нм і досягає 28% в умовах неповного поглинання світла, що падає [4, 5]. Це свідчить про істотне зниження безвипромінювальної рекомбінації на границі з оксидом зі зростанням товщини нанопокриття CdS-поліетиленімін.



Спектральні залежності інтенсивності фотолюмінесценції структур макропористого кремнію з нанопокриттям CdS через 1 тиждень після його нанесення за товщини оксиду 20 нм та різної глибини макропор: 1 — 37 мкм; 2 — 75 мкм; 3 — 120 мкм

Для окиснених структур макропористого кремнію з нанопокриттям CdS-поліетиленімін фотолюмінесценція визначається не тільки існуванням розподілу поверхневих станів за енергією, але й суттєво залежить від відстані між наночастинками CdS та їх взаємодії з оточенням полімеру та границею «CdS — SiO<sub>2</sub>/Si». Максимальну інтенсивність фотолюмінесценції було одержано в умовах:

- максимальної напруженості електричного поля на границі «Si — SiO<sub>2</sub>»;
- збільшення потоку електронів з кремнієвої матриці у напрямку до нанокристалів CdS;
- зростання часу перебування електронів на границі «Si — SiO<sub>2</sub>», що суттєво знижує швидкість безвипромінювальної рекомбінації на границі «CdS — SiO<sub>2</sub>».

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Карачевцева Л.А., Литвиненко О.А., Маловичко Э.А. Стабилизация процесса электрохимического формирования макропор в p-Si. *Теор. и эксперим. химия*, 1998, т. 34, № 5, с. 314–318.
2. Карачевцева Л.А., Литвиненко О.А., Маловичко Э.А., Стронская Е.И. Исследование процесса электрохимического формирования макропор в кремнии. *Теор. и эксперим. химия*, 2000, т. 36, № 3, с. 193–197.
3. Karachevtseva L., Goltviansky Yu., Sapelnikova O. et al. Wannier–Stark electro-optical effect, quasi-guided and photonic modes in 2D macroporous silicon structures with SiO<sub>2</sub> coatings. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 388, № 1, p. 120–125.
4. Karachevtseva L., Kuchmii S., Stroyuk O. et al. Light-emitting structures of CdS nanocrystals in oxidized macroporous silicon. *Applied Surface Science*, 2016, vol.388, № 1, p. 288–293.
5. Карачевцева Л.А., Кучмій С.Я., Стрюк О.Л. та ін. *Світловипромінююча структура*. Патент України, № 110543 від 12.01.2016.

O. Yu. Sapelnikova, L. A. Karachevtseva, O. O. Lytvynenko, O. Y. Stronska

#### **Influence of local electric field on photoluminescence of oxidized structures of macroporous silicon coated with CdS nanocrystals**

*To produce effective light-emitting elements based on the macroporous silicon structures with nanocoating, the authors propose structures with the optimal depth of macropores and the thickness of the SiO<sub>2</sub> nanocoating and the of light-emitting CdS nanoparticles. The effect of cleaning the structure surface by oxidation and oxide etching on the reduction of the concentration of non-radiative recombination centers is determined.*

*Keywords: macroporous silicon, silicon oxide, photoluminescence, CdS nanocrystals, IR absorption.*