

**І.Б. Єрмолович**, Р.В. Конакова, В.В. Міленін, О.Б. Охріменко, Р.А. Редько

## Модифікація дефектної структури $\text{SiO}_2/\text{GaAs}$ височастотним електромагнітним випромінюванням

*Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лаукарьова НАН України  
Пр. Науки 41, 03028, Київ, Україна, e-mail: [re\\_rom@ukr.net](mailto:re_rom@ukr.net)*

Проведено дослідження впливу електромагнітного випромінювання частотою 2,45 ГГц, на трансформацію дефектної структури в приконтактній області напівпровідникової гетероструктури  $\text{SiO}_2/\text{GaAs}$ . Показано, що вплив випромінювання на рекомбінаційні властивості та на спектр дефектних станів напівпровідника залежить від структурно-домішкових неоднорідностей вихідного напівпровідникового матеріалу. Обговорюються можливі механізми зміни випромінювальної рекомбінації під дією НВЧ випромінювання.

Ключові слова: люмінесценція, мікрохвильове опромінування, домішково-дефектний склад.

Стаття поступила до редакції 09.03.2006; прийнята до друку 15.08.2006.

### Вступ

Одне із найважливіших завдань сучасної мікроелектроніки є вивчення впливу різного типу зовнішніх чинників на властивості напівпровідникових матеріалів і приладів, створених на їхній основі, з метою з'ясування механізмів еволюції (деградації) властивостей цих матеріалів і приладів при даному впливі, а також пошук нових технологічних методів цілеспрямованого керування їхніми властивостями.

В даній роботі вивчався вплив НВЧ опромінення на спектр дефектних станів у приконтактній області напівпровідника гетероструктури  $\text{SiO}_2/\text{GaAs}$  до і після НВЧ опромінення різної тривалості. Відомо, що саме дефектні стани власного або домішкового походження в значній мірі визначають експлуатаційні та деградаційні характеристики напівпровідникових приладів.

### І. Зразки та методика експерименту

Зразки отримувались електронно-променевим випаровуванням кварцу у вакуумі  $6 \cdot 10^{-4}$  Па. В якості підкладки використовувався n-GaAs з орієнтацією поверхні (100) і концентрацією вільних носіїв  $\sim (2 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Товщини підкладок становили 350 мкм, шарів  $\text{SiO}_2$  -  $(0,4 \div 0,5)$  мкм. Перед нанесенням діелектрика пластини GaAs оброблялися в сірчаноокислому травнику і промивалися в дейонізованій воді і ізопропиловому спирті.

Вплив електромагнітного НВЧ випромінювання

на структури  $\text{SiO}_2/\text{GaAs}$  характеризували ступенем його впливу на атомний склад приконтактної області напівпровідника і на спектр дефектних станів в об'ємі та приконтактній області напівпровідника.

Фазовий склад поверхонь зразків GaAs визначали методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, а склад проміжного шару в структурі  $\text{SiO}_2/\text{GaAs}$  методом Оже-електронної спектроскопії після зтравлення півки  $\text{SiO}_2$  у розчині плавикової кислоти [1].

Дефектна структура зразків вивчалася фотолюмінесцентним (ФЛ) методом при 77 К у спектральному інтервалі  $\Delta h\nu = (0,5 \div 2,04)$  еВ з боку півки  $\text{SiO}_2$ . Джерелом збудження служила лампа ПЖ-100, зі спектра випромінювання якої за допомогою відповідних фільтрів виділялася ділянка з енергією кванта  $\geq 2,0$  еВ (коефіцієнт поглинання GaAs у цій спектральній області  $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$ ). Таким чином, спектр дефектних станів досліджувався в приповерхневих шарах, глибиною  $\sim 10^{-5}$  см. Приймачем світла люмінесценції служив PbS-фотоопір.

Мікрохвильове опромінення зразків проводилося в робочій камері магнетрона, навантаженого на квазістаціонарний НВЧ-резонатор на частоті 2,45 ГГц. Потужність випромінювання становила  $7,5 \text{ Вт/см}^2$ . Послідовні часи опромінення одного і того ж самого зразка становили 1; 1; 1; 5 і 5 хв (сумарний час опромінення був 1, 2, 3, 8 і 13 хв, відповідно).

## II. Експериментальні результати і їхнє обговорення

На рис. 1 представлені результати дослідження хімічного складу приконтактного шару GaAs до та після НВЧ-обробки. Плівка SiO<sub>2</sub> була видалена хімічним травленням. Як слідує з цих даних, нанесення плівки призводить до зміни поверхні убік збагачення її атомами As (рис. 1,а). Цей результат узгоджується з даними, раніше отриманими в [2], де було виявлено, що при нанесенні SiO<sub>2</sub> на GaAs галій ефективно захоплювався зростаючим діелектричним шаром.

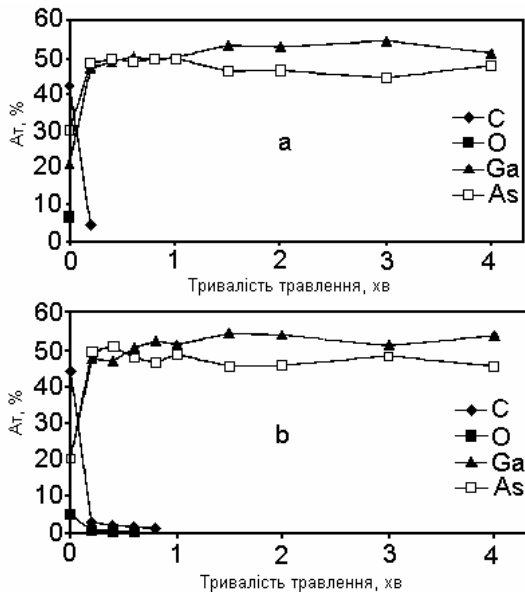


Рис. 1. Хімічний склад приповерхневої області GaAs під шаром SiO<sub>2</sub> до (а) та після мікрохвильового опромінення максимальною дозою (б).

Після мікрохвильового опромінення структури SiO<sub>2</sub>/GaAs максимальною дозою, концентрації Ga і As під шаром оксиду вирівнювалися (рис. 1 б) і мала місце немонотонна їхня зміна вглиб напівпровідника. Ці зміни супроводжувалися збільшенням вмісту кисню і вуглецю в приповерхньому шарі GaAs, тобто обробка вплинула на «окисляємість» поверхні і її забруднення домішками вуглецю. Збільшення вмісту розчиненого в напівпровіднику кисню і вуглецю після обробки у НВЧ полі спостерігали і в [3, 4]. Відзначимо, що вуглець формує в GaAs акцептор з енергією залягання 0,02 еВ вище стелі валентної зони, а кисень - дефект O<sub>As</sub> з енергією залягання E<sub>c</sub> - (0,70 ÷ 0,80)еВ [5].

Люмінесцентні дослідження показали, що по домішково-дефектному складу, досліджувані зразки можна розділити на дві групи (рис. 2). У вихідному стані для зразків 1-ої групи інтенсивність смуг люмінесценції в кілька разів вища, ніж для 2-ої, а в спектрах ФЛ домінує смуга з hv' = 1,04 еВ. Смуги з hv'<sub>m</sub> = 1,04 еВ і hv''<sub>m</sub> = 1,30 еВ, зв'язують із дифузією неконтрольованої домішки міді в напівпровіднику [6]. Настільки різочі відмінності спектрів ФЛ двох груп зразків можуть бути наслідком структурно-

домішкових мікронеоднорідностей напівпровідникового матеріалу, використовуваного в дослідженнях.

НВЧ обробка зразків, які відносяться до 2-ої групи, призводить до росту інтенсивності обох смуг люмінесценції при досягненні деяких граничних значень часу експозиції (рис. 2, б). Можна думати, що такий вплив опромінення зумовлений послабленням каналу безвипромінювальної рекомбінації, зумовленого структурним розпорядкуванням приповерхневого шару напівпровідника, що виникає при нанесенні оксидного шару. На перебудову структурно-домішкової підсистеми напівпровідника під дією сильних високочастотних полів і пов'язаними з ними ефектами гетерування вказують і дані узагальнені в [7]. Було виявлено, що НВЧ обробка призводить до зміни параметрів домішкових скупчень, часу життя носіїв струму, густини дислокацій. Причому характер структурних перетворень у напівпровідниках при НВЧ впливах свідчить про протікання фізичних процесів, відмінних по своїй природі від швидкого високотемпературного нагрівання або традиційних відпалів у вакуумі.

При НВЧ впливах на зразки 1-ої групи, спостерігався довгохвильовий зсув положення люмінесцентних піків і протифазна зміна їх інтенсивностей від дози експозиції (рис. 2, а). Інтенсивність смуги з hv'<sub>m</sub> ≈ 1,04 еВ з ростом часу експозиції спочатку послаблювалася, а смуги з hv''<sub>m</sub> = 1,30 еВ збільшувалася. При t ≈ 8 хв інтенсивності обох смуг ФЛ практично зрівнялися. При більших часах експозиції інтенсивність смуги з hv'<sub>m</sub> ≈ 1,04 еВ зростала, а смуги hv''<sub>m</sub> = 1,30 еВ падала. Такий характер трансформації спектрів ФЛ вказує як на зміну типу випромінюючих центрів, так і їхньої концентрації. А протифазні зміни їх інтенсивностей свідчать про взаємне перетворення дефектних центрів.

Так як фізико-хімічна природа центрів ФЛ із hv'<sub>m</sub> = 1,04 еВ і hv''<sub>m</sub> = 1,30 еВ остаточно не встановлена, пояснення особливостей структурної перебудови центрів випромінювальної рекомбінації під дією НВЧ зазнає труднощів. З огляду на цю обставину становить інтерес проаналізувати можливі енергетичні джерела пов'язані із НВЧ обробкою, які забезпечували спостережувані структурні зміни.

Так як провідність напівпровідника досить низька, а шар SiO<sub>2</sub> практично не поглинає НВЧ-випромінювання, центрами дисипації енергії НВЧ коливаль, очевидно, є області з підвищеним вмістом дефектів і домішок. Для включення сферичної форми максимальну температуру розігріву можна розрахувати з рівняння [8]:

$$T_{\max} = T_0 + \frac{P_T R^2}{3k} \quad (1)$$

де T<sub>0</sub> - температура на границі поділу напівпровідник - «включення», P<sub>T</sub> - густина потужності тепла, яке виділяється в області включення при поглинанні НВЧ енергії, k - коефіцієнт теплопровідності.

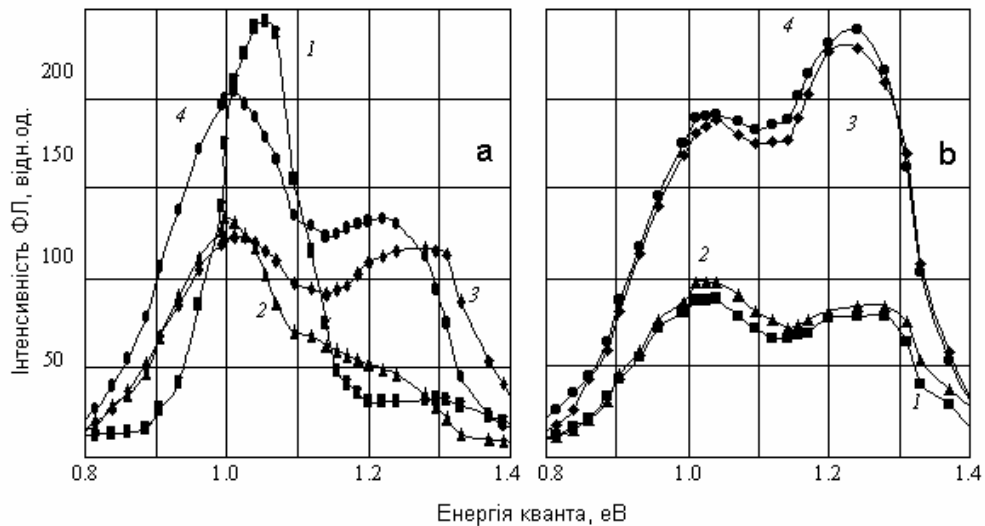


Рис. 2. Спектри фотолюмінесценції зразків SiO<sub>2</sub>/GaAs (а та б) до (1) та після НВЧ опромінювання протягом 2 хв (2), 8 хв (3), 13 хв (4).

З (1) слідує, що навіть для граничних розмірів включень, які становили  $\approx 100$   $\mu\text{м}$ , при допущенні, що  $P_T$  дорівнює максимальному значенню густини потоку енергії НВЧ випромінювання  $T_{\text{max}} \approx T_0$ . Таким чином, відсутній розігрів локальної області неоднорідностей у напівпровіднику і пов'язаних з ними виникнення градієнтів температури, що впливають як на дифузійні перерозподіли домішок і дефектів, так і на характер розподілу пружних напружень у зразках, що також призводять до перерозподілу структурних дефектів.

Розглянемо можливий механізм зміни дефектно-домішкового складу напівпровідника, пов'язаний з нетермічними факторами впливу НВЧ випромінювання.

Відомо, що в сильних електромагнітних полях вільні носії струму в напівпровідниках здобувають кінетичну енергію, достатню для міжзонної або домішкової йонізації, тобто має місце низькотемпературний лавинний пробій, супроводжуваний різким збільшенням концентрації носіїв струму. У результаті йонізації в локальних областях кристала змінюється зарядовий стан атомів решітки і наступна їхня електростатична взаємодія між собою або з домішками призводить до утворення точкових дефектів (вакансій, атомів у міжвузлях, комплексів точковий дефект - атом домішки).

Оцінімо, чи достатня напруженість електричного поля  $E$  для утворення йонізованої лавини в GaAs при максимально можливій густині потоку енергії випромінювання, використовуючи вираз для потужності втрат електромагнітної хвилі, при опроміненні в режимі вільного простору [9]. Для використовуваної мікрохвильової обробки розрахована величина виявилася рівна  $E \approx 75,2$  В/см.

Таким чином, величина електричного поля електромагнітної хвилі явно недостатня для виникнення міжзонної ударної йонізації, а також домішкового пробою в GaAs [10].

Тому вирішення проблеми, зв'язаної з структурною модифікацією GaAs при НВЧ

опроміненні, очевидно, варто шукати поза рамками сформованих традиційних підходів до причин генерації і анігіляції структурних дефектів.

Одна із причин такого впливу мікрохвильового опромінювання на кінетику відпалу і перебудову як протяжних так і точкових дефектів може бути пов'язана з полями статичних механічних напруг, якщо їхня величина і градієнти, що виникають через структурні порушення в напівпровіднику досить великі. Однак у реальних умовах вплив напруг на міграцію дефектів як правило незначний. Цей вплив може різко зростати, якщо процес перебудови носить колективний характер. Необхідною умовою для цього є наявність у напівпровіднику невеликих по розмірі скупчень дефектів, а також, щоб час протягом якого в процес перебудови буде залучений весь кластер був би малий в порівнянні із часом деформаційного відгуку речовини на структурні зміни. У цьому випадку, як було показано в [11], зниження бар'єра для перебудови або анігіляції дефектів  $\Delta E = 8 \cdot 10^{-23} \cdot V \cdot \epsilon N$ , де  $V$  – модуль пружності,  $\epsilon$  – локальна деформація в області дефекту,  $N$  – число дефектів в області скупчення. Легко бачити, що для досить великих кластерів це зниження може досягати декількох десятків eВ.

Так як концентрація включень для різних областей напівпровідника різна, то й розподіл величин локальних полів пружних напружень неоднорідний по пластині, а, отже, різний їхній вплив на локальну перебудову дефектів. З огляду на те, що тип дефектів у скупченнях і їхні енергії активації розрізняються, варто очікувати різної картини структурної модифікації для зразків, вирізаних з різних ділянок однієї й тої ж пластини. І, нарешті, відзначимо ще одну обставину, що може вплинути на характер змін спектра люмінесценції при мікрохвильовій обробці. Нерівномірний розподіл по пластині заряджених дефектів, призводить до нерівномірного розподілу швидкодифундуючих домішок, які гетеруються цими дефектними областями (наприклад, домішок Cu). Зміна

зарядового стану кластерів або статичних пружних напружень стимулює дифузійні перерозподіли домішок з можливим утворенням складних дефектів, які включають їх у свій склад або ж з переведенням їх у неактивний стан.

У висновку відзначимо, що більш глибоке розуміння природи спостережуваних явищ у напівпровідникових структурах діелектрик-напівпровідник під дією НВЧ обробки вимагає

проведення подальших досліджень і, зокрема, по встановленню природи центрів люмінесценції і їхніх зв'язків зі структурною неоднорідністю напівпровідника і деформаційних ефектів, що виникають як внаслідок структурної неоднорідності напівпровідника, так і при нанесенні на нього діелектричних шарів.

- [1] Л. Фелдман, Д. Майер. *Основы анализа поверхности и тонких пленок*: Пер. с англ. Мир, М. 344 с. (1989).
- [2] Ю. Брежа, П.И. Диденко, Р.В. Конакова и др. Влияние  $\gamma$ - облучения на свойства структур  $\text{SiO}_2\text{-GaAs}$  // *ЖТФ*, **65**(5), сс.122-131 (1995).
- [3] В.И. Пашков, В.А. Перевошиков, В.Д. Скупов. Влияние отжига в поле СВЧ излучения на остаточную деформацию и примесный состав приповерхностных слоев кремния // *Письма в ЖТФ*, **20**(8), сс.14-17 (1994).
- [4] А.Е. Беляев, А.А. Беляев, Е.Ф. Венгер и др. *Материалы 6-й Международной Крымской микроволновой конференции. 16-19 сентября 1996 г.* Севастополь, Крым, Украина, сс.71-89 (1996).
- [5] Р.А. Малинаускас, Л.Я. Перова, В.И. Фистуль. Энергетические модели кислородосодержащих центров в GaAs // *ФТП*, **16**(3), сс.466-469 (1982).
- [6] Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, Ю.В. Жилаев и др. Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев арсенида галлия n- типа. // *ФТП*, **2**(10), сс.1441-1447 (1968) .
- [7] А.Е. Belyaev, E.F. Venger, I.B. Ermolovich, R.V. Konakova, P.M. Lytvyn, V.V. Milenin et. al. *Effect of microwave and Laser radiations on the parameters of semiconductor structures*. Інтас, К., 191 p. (2002).
- [8] А.В. Ключник. Влияние интенсивного СВЧ излучения на структуру морского льда. // *ЖТФ*, **62**(7), сс.99-107.
- [9] Н.П. Гроссе. *Свободные электроны в твердых телах*. Пер. с нем. Мир, М. 270 с. (1982).
- [10] А. Милнс. *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках*. Пер. с англ. Мир, М. 568 с. (1977).
- [11] В.Д. Скупов, Д.И. Тетельбаум. О влиянии упругих напряжений на трансформацию скоплений дефектов в полупроводниках. // *ФТП*, **21**(8), сс. 1495-1497 (1987).

I.B. Ermolovich, R.V. Konakova, V.V. Milenin, O.B. Okhrimenko, R.A. Redko

## Modification of $\text{SiO}_2/\text{GaAs}$ Defect Structure by High Frequency Electromagnetic Radiation Treatment

*V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics  
41, pr. Nauki, Kyiv, 03028, Ukraine, e-mail: [re\\_rom@ukr.net](mailto:re_rom@ukr.net)*

The influence of electromagnetic radiation on transformation of defective structure in contact area of the semiconductor heterostructure based on  $\text{SiO}_2/\text{GaAs}$  are researched. It is shown, influence of radiation on recombination properties and on a spectrum of defective state of the semiconductor depends from the structural - impurity nonuniformity of an initial semiconductor material. Possible mechanisms of observable changes in recombination light, caused by a microwave irradiation has been discussed.