

О.Ю. Бончик, С.Г. Кияк, І.А. Могиляк, Д.І. Попович

Особливості формування морфології поверхні кремнієвих пластин при дії лазерних імпульсів

*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України,
вул. Наукова, 3Б, Львів, 79060, Україна, e-mail: mohylyak@gmail.com*

В роботі проведено експериментальні дослідження особливостей геометрії поверхні кремнієвих пластин в зонах дії секундних і мілісекундних лазерних імпульсів. Наведені результати мікроскопічних досліджень періодичних структур, які формуються на поверхнях з кристалографічною орієнтацією (111), (110), (100), а також на площинах, вирізаних під кутом 6° до площини (100) і на аморфних шарах V_2O_5 , нанесених на поверхню кремнію. Одержані результати можуть бути використані для визначення кристалографічної орієнтації поверхні напівпровідників та експресної оцінки ступеня розорієнтації поверхні кристалів.

Ключові слова: електронно-діркова плазма, рекристалізована область, періодичні структури.

Стаття постуила до редакції 05.07.2017; прийнята до друку 05.09.2017.

Вступ

Моделювання поверхонь кристалічних твердих тіл і процесів їх взаємодії з потужними лазерними імпульсами займають вагоме місце в сучасному матеріалознавстві [1-3]. У даний час відкриваються великі можливості дослідження як класичних так і квантових, експериментально маловивчених процесів самоорганізації рельєфу, структурних та електронних явищ на поверхні конденсованих систем. Одержання функціональних поверхневих нано- і мікроструктур відкривають можливості надання поверхні нових оптичних властивостей за рахунок, зокрема, збудження поверхневих плазмонів придатних для створення елементної бази плазмонних електронних кіл, підвищеного поглинання світла, аналізу кристалографії поверхні тощо. При дії мілісекундних і секундних лазерних імпульсів на напівпровідники типу кремнію максимальна концентрація фотоіндукованих нерівноважних носіїв заряду не перевищує 10^{18}см^{-3} і є суттєво нижчою від значення, отриманого при збудженні напівпровідників наносекундними лазерними імпульсами ($5 \cdot 10^{19}\text{см}^{-3}$). Порівняно невисоку концентрацію електронно-діркової плазми (ЕДП), індукованої в напівпровідниках лазерними імпульсами мілісекундного і секундного діапазонів, можна перерозподіляти під впливом як зовнішніх, так і власних внутрішньокристалічних полів. Таке

розшарування електронно-діркової плазми призводить до виникнення нових фізичних явищ, зумовлених нестійкостями параметрів напівпровідників та самоорганізацією в системах, виведених із стану термодинамічної рівноваги. [4, 5].

У цій роботі наведені результати експериментальних досліджень фізичних процесів, які зумовлюють неоднорідне плавлення напівпровідників і призводять до формування поверхневих періодичних структур у зонах дії імпульсів лазерного випромінювання.

І. Експеримент

Експериментальні дослідження проводили на зразках бездислокаційного кремнію, орієнтованих у площинах (111), (110) і (100). Поряд із зразками, підготовленими за загальноприйнятою методикою, зокрема, для виявлення дислокаційних ямок травлення, дослідження проводили також на пластинах, отриманих методом сколювання кристалів у вакуумі в установці ВУП-5. Час знаходження свіжосколеної поверхні у вакуумі порядку 10^{-4} Па не перевищував 1 с. Крім того, для зменшення термічних напружень, які виникають у зонах дії лазерного випромінювання і вирівнювання температурного поля, на поверхню кристалів вакуумним напиленням наносили тонку (200 \AA) аморфну плівку V_2O_5 . Опромінювання кристалів

проводили рівномірно по всій поверхні з використанням двох типів лазерів: неперервного лазера на CO₂ ($\lambda = 10,6$ мкм) потужністю 1 кВт, діаметр пучка 3 см і імпульсного неодимового лазера типу ГОС-300 ($\lambda = 1,06$ мкм), який працював у режимі вільної генерації ($T_i = 10^{-3}$ с, $q = 10^4 \div 10^5$ Вт/см²). Вимірювання геометричної поверхні структури виконано на скануючому профілометрі Talysurf-5M. Дослідження проводились на зразку

розміром 1 см x 1 см. Діаметр зонда становив 2 мкм. На спеціальному програмному забезпеченні для цього профілометра створено стереометричні 3D рисунки поверхні зразка, який аналізувався.

II. Результати та обговорення

Проведені дослідження рельєфу поверхні

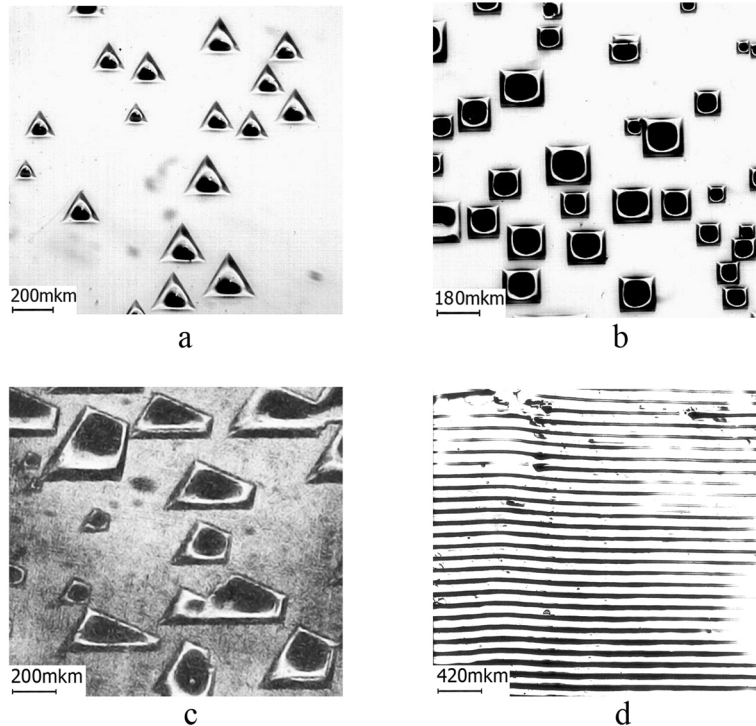


Рис. 1. Мікрофотографії поверхні кремнію в зоні дії секундних імпульсів CO₂ лазера: а - (111) Si, б - (100) Si, с - зріз під кутом 6° до площини (100) Si, d - періодична структура на Si.

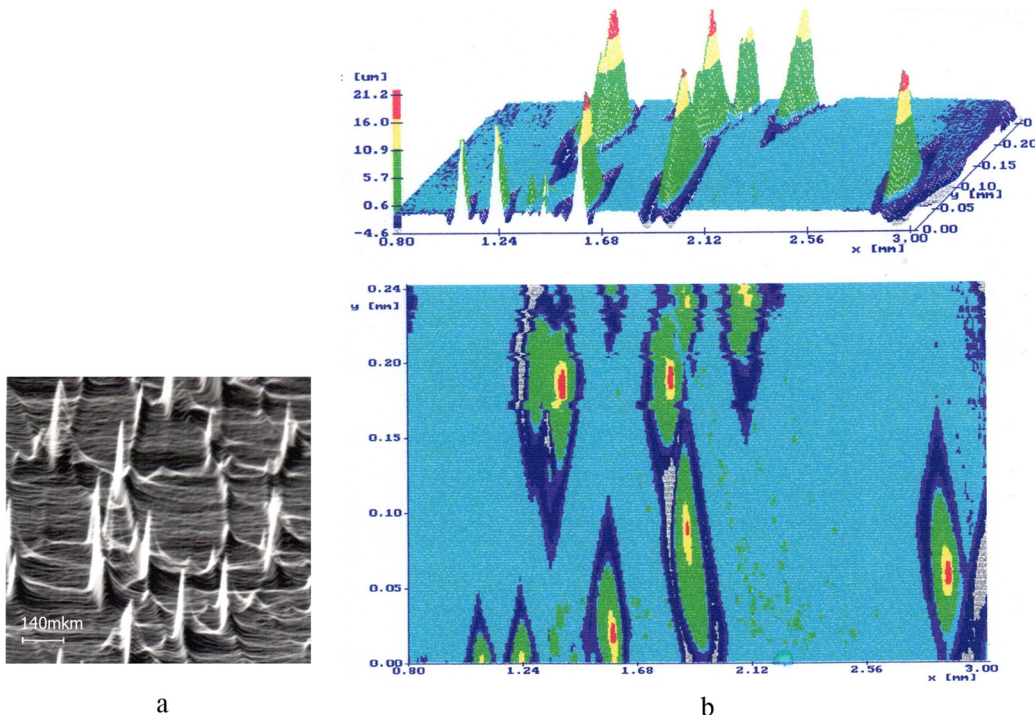


Рис. 2. Мікрофотографія локальних проплавів рекристалізованої лазером області пластини кремнію (а) та тривимірне зображення топографічної карти цієї області (б).

областей, що утворилися внаслідок кристалізації локальних лунок проплаву напівпровідника показали наявність характерного поверхневого контуру цих ділянок. Після досягнення максимального плавлення завдяки дії сил поверхневого натягу в розплаві формується поверхня розділення рідка фаза – повітря мінімальної площі. Рівень поверхні нерівноважного розплаву виявляється нижчим порівняно з початковим рівнем поверхні твердого тіла, оскільки при температурі плавлення кремнію питомий об'єм рідини є меншим, ніж об'єм твердої фази: $V_{тв,ф} = 12,1 \text{ см}^3/\text{моль}$, $V_{р,ф} = 10,9 \text{ см}^3/\text{моль}$ (рис. 1, а, б, с). Кристалізація розплаву починається на межі розділення рідкої та твердої фаз, під час якої відбувається зміна поверхневого контуру області за рахунок збільшення об'єму кремнію під час рекристалізації.

Оскільки симетрія внутрішньокристалічного поля визначається симетрією кристала, то при однорідному збудженні напівпровідників лазерним випромінюванням з допороговою потужністю (нижчою, ніж порогове значення, при якому відбувається однорідне плавлення поверхневого шару) на опроміненій поверхні формуються локально розплавлені області, які відтворюють розподіл концентрації нерівноважних носіїв заряду, промодульований внутрішньокристалічним полем. При цьому форма локальних лунок проплаву однозначно пов'язана з кристалографічною орієнтацією поверхні напівпровідника (рис. 1). Наприклад, на площині (100) формуються квадратні лунки проплавів, на площині (111) – трикутні, а на площині (110) лунки локальних проплавів мають шестикутну форму. При певних дещо вищих енергетичних параметрах світлового потоку за рахунок дії внутрішньокристалічних полів відбувається формування поверхневих періодичних структур (рис. 1, d). Крім визначення кристалографічної орієнтації поверхонь напівпровідників, лазерний метод також можна використати для експресної оцінки ступеня розорієнтації поверхні кристалів.

Рівень поверхні біля границі області нерівноважного розплаву знаходиться нижче від початкового рівня кристала і має виступ у центрі. Висота виступу становить значення порядку 10 % від горизонтальної ширини області. Встановлено, що морфологія поверхні напівпровідників у зонах дії лазерного випромінювання залежить від початкової температури зразків T_0 . При підвищенні T_0 рельєф поверхні стає мілкішим, середній період між локальними лунками проплавів зменшується. Середній період між окремими зонами локальних проплавів при $T_0 = 80 \text{ K}$ в півтора рази перевищує відповідне середнє значення періоду при $T_0 = 300 \text{ K}$.

Механізм нестійкості ЕДП зумовлений залежністю коефіцієнта поглинання світлового потоку від концентрації і температури носіїв заряду, а також термодифузійною та залежністю потоку носіїв заряду від зміни ширини забороненої зони (рис. 3) [6]. При флуктуаційному збільшенні концентрації носіїв заряду в деякій області збільшується потужність поглинання енергії світлового потоку і,

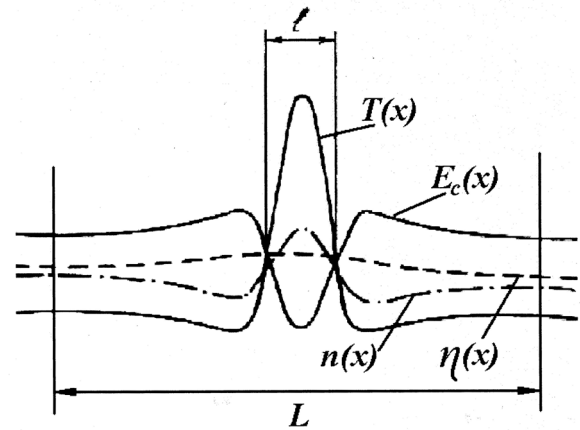


Рис. 3. Розподіл температури $T(x)$, енергетичного рівня дна зони провідності $E_c(x)$ і концентрації носіїв заряду $n(x)$ у вигляді однієї страти, які реалізуються при квазістаціонарному нагріванні напівпровідника.

отже, збільшується локальне розігрівання напівпровідника. При високих температурах в неполярних напівпровідниках носії заряду в основному розсіюють свій імпульс на деформаційному потенціалі акустичних та оптичних фотонів. Тому коефіцієнт дифузії зменшується із збільшенням температури, а значить, в область підвищеної температури кристалічної ґратки спрямований також термодифузійний потік носіїв заряду, який призводить до подальшого збільшення ступеня поглинання потужності світлового потоку. Якщо ширина забороненої зони E_g є спадною функцією температури, то в область підвищеної температури буде також спрямований потік носіїв заряду, який зумовлений локальним згином зон. Тому, розподіл температури під час розігрівання буде суттєво неоднорідним тільки тоді, коли швидкість вирівнювання неоднорідного розподілу температури є меншою за швидкість нагрівання напівпровідника. Отже, механізм нестійкості електронно-діркової плазми при дії на напівпровідники інтенсивних світлових потоків зумовлений передусім термодифузійною електронів та дірок і збільшенням температури за рахунок рекомбінації в областях з підвищеною концентрацією носіїв заряду, або інакше кажучи, термодифузійна нестійкість ЕДП зумовлена підкачкою в області з вищою температурою додаткової концентрації носіїв заряду, які, своєю чергою, призводять до збільшення ступеня поглинання світлового потоку і, значить, зумовлюють підвищення температури. При цьому виникає додатний зворотний зв'язок між температурою кристалічної решітки і концентрацією носіїв заряду в області їх флуктуації, який призводить не тільки до підсилення початкових флуктуацій температури, але й до формування в напівпровідниках квазіперіодичних температурних полів великої амплітуди. Неоднорідні температурні поля визначають особливості плавлення, кристалізації і формування рельєфу поверхні напівпровідників в зонах дії лазерного випромінювання. Крім того, квазінейтральна

електронно-діркова плазма, ініційована в напівпровідниках дією мілісекундних і секундних лазерних імпульсів, може виступати дуже чутливим індикатором дії на матеріали, як зовнішніх полів (температурних, деформаційних), так і власних внутрішньокристалічних полів. Особливості модуляції розподілу фотоіндукованих носіїв заряду внутрішньокристалічним полем легко виявляються за морфологією поверхні в зонах дії лазерного випромінювання.

формування визначеної морфології поверхні можна ефективно використати для визначення кристалографічної орієнтації поверхні напівпровідників та для експресної оцінки ступеня розорієнтації поверхні кристалів і аналізу власнодефектної структури напівпровідників.

III. Висновок

Ініційоване в напівпровідниках дією лазерних імпульсів мілісекундного і секундного діапазонів розшарування електронно-діркової плазми та

Бончик О.Ю. - кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;
Кияк С.Г. - професор, доктор фізико-математичних наук, в.о. провідного наукового співробітника;
Могиляк І.А. - аспірант;
Попович Д.І. - доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри №16 Фізико-математичного моделювання низькорозмірних систем.

- [1] Є.Ф. Венгер, О.Ю. Семчук, О.О. Гаврилюк, Лазер-індуковані наноструктури в твердих тілах (Академперіодика, Київ, 2016).
- [2] Б.К. Котлярчук, Л.Г. Мансуров, Г.В. Пляцко, Д.И. Попович, В.Г. Савицкий, Украинский физический журнал 27(7), 1066 (1982).
- [3] В. Kovalyuk, V. Mocharskyi, Yu. Nikiforov, V. Onisimchuk, D. Popovych, A. Serednytski, V. Zhyrovetsky, Physica Status Solidi (c) 10(10), 1288 (2013).
- [4] А.Ю. Бончик, В.В. Гафійчук, С.Г. Кияк, Г.В. Савицкий, Поверхность (физика, химия, механика) 5, 142 (1986).
- [5] В.В. Гафійчук, В.Э. Гашпар, ДАН УССР, Сер. А. 9, 74 (1985).
- [6] Б.С. Кернер, В.В. Осипов, Журнал экспериментальной и теоретической физики 74(5), 1675 (1978).

O.Yu. Bonchuk, S.G. Kiyak, I.A. Mohylyak, D.I. Popovych

Peculiarities Of Morphology Formation of Silicon Surface under the Action of Laser Pulses

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, Naukova Str.3B, 79060, Lviv, Ukraine, e-mail: mohylyak@gmail.com

The experimental studies of geometry features of silicon layers in areas of second and millisecond laser pulses were carried out. The results of microscopic studies of periodic structures that are formed on the surfaces with crystallographic orientation (111) (110) (100) and on planes, cut at an angle of 6° to the plane (100) and amorphous layers B₂O₃ deposited on the surface of silicon were presented. The results can be used to determine the crystallographic orientation of the semiconductor surface and express assessment of disorientation degree of crystal surface.

Keywords: electron-hole plasma, recrystallized area, periodic structures.