

УДК 539.315

О.Ю. Бончик, З.Ю. Готра, ¹С.Г. Кияк, І.А. Могиляк, ¹І.П. Тростинський
 Інститут прикладних проблем механіки і математики НАН України,
¹НУ “Львівська політехніка”, кафедра електронних приладів

ЕФЕКТИ САМООРГАНІЗАЦІЇ В ПРОЦЕСАХ ВЗАЄМОДІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКАМИ

© Бончик О.Ю., Готра З.Ю., ¹Кияк С.Г., Могиляк І.А., ¹Тростинський І.П., 2001

A.Yu. Bonchik, Z.Yu. Gotra, *S.G. Kiyak, I.A. Mohyliak, *I.P. Trostynskyu

SELF ORGANIZATON EFFECTS IN LASERPROCESSING OF SEMICONDUCTORS

© Bonchik A. Yu., Gotra Z. Yu., ¹Kiyak S. G., Mohyliak I.A., ¹Trostynskyu I.P., 2001

Експериментально досліджено особливості морфології поверхні кремнієвих пластин в зонах дії секундних і мілісекундних лазерних імпульсів. Наведені результати мікроскопічних досліджень періодичних структур, які формуються на поверхнях з кристалографічною орієнтацією (100), (111), (110), а також на площинах, вирізаних під кутом 6° до площини (100) і на аморфних шарах B_2O_3 , нанесених на поверхню кремнію.

The peculiarities of Si surface in the zone of second and millisecond laser pulses effect have been investigated experimentally. The outcomes of the microscopic studies of the periodical structures formed at the surfaces with crystallographic orientation (100), (111), (100) and at the surfaces cut at the angle 6° to the plane (100) as well as on amorphous layers B_2O_3 deposited on the Si surface are presented.

Вступ. При дії мілісекундних і секундних лазерних імпульсів на напівпровідники типу кремнію максимальна концентрація фотоіндукованих нерівноважних носіїв заряду не перевищує $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ і є суттєво нижчою від значення, отриманого при збудженні напівпровідників наносекундними лазерними імпульсами ($\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Порівняно невисоку концентрацію електронно-діркової плазми (ЕДП), індукованої в напівпровідниках лазерними імпульсами мілісекундного і секундного діапазонів, можна перерозподіляти під впливом як зовнішніх полів, 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 [1 – 6].

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

Експеримент. Експерименти проводили на зразках бездислокаційного кремнію, орієнтованих у площинах (100), (110) і (111). Поряд із зразками, підготовленими за загальноприйнятою методикою, дослідження проводили на пластинах, отриманих методом сколювання кристалів у вакуумі в установці ВУП-5. Час знаходження свіжосколеної поверхні у вакуумі порядку 4×10^{-4} Па не перевищував 1с. Крім того, для зменшення термічних напружень, які виникають у зонах дії лазерного випромінювання і вирівнювання температурного

поля, на поверхню кристалів вакуумним напиленням наносили тонку ($\sim 200 \text{ \AA}$) аморфну плівку B_2O_3 . Опроміювання кристалів проводили рівномірно по всій поверхні з використанням двох типів лазерів: неперервного лазера на CO_2 ($\lambda = 10,6 \text{ мкм}$) потужністю 1 кВт і імпульсного неодимового лазера типу ГОС-300 ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$), який працював у режимі вільної генерації ($\tau_i \sim 10^{-3} \text{ с}$).

Результати та обговорення. Механізм нестійкості ЕДП зумовлений залежністю коефіцієнта поглинання світлового потоку від концентрації і температури носіїв заряду, а також термодифузією та залежністю потоку носіїв заряду від зміни ширини забороненої зони (рис. 1). При флуктуаційному збільшенні концентрації носіїв заряду в деякій області збільшується потужність поглинання енергії світлового потоку і, отже, збільшується локальне розігрівання напівпровідника. При високих температурах в неполярних напівпровідниках носії заряду в основному розсіюють свій імпульс на деформаційному потенціалі акустичних та оптичних фононів. 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 термодифузією 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.

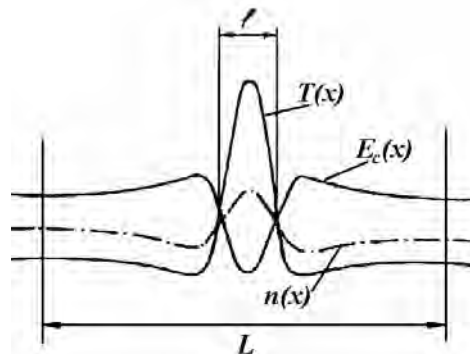


Рис. 1. Розподіл температури $T(x)$, енергетичного рівня дна зони провідності $E_c(x)$ і концентрації носіїв заряду $n(x)$ у вигляді однієї страти, які реалізуються при квазістаціонарному нагріванні напівпровідника. L – довжина вільного пробігу носіїв заряду. l – довжина неоднорідного збурення температури.

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.

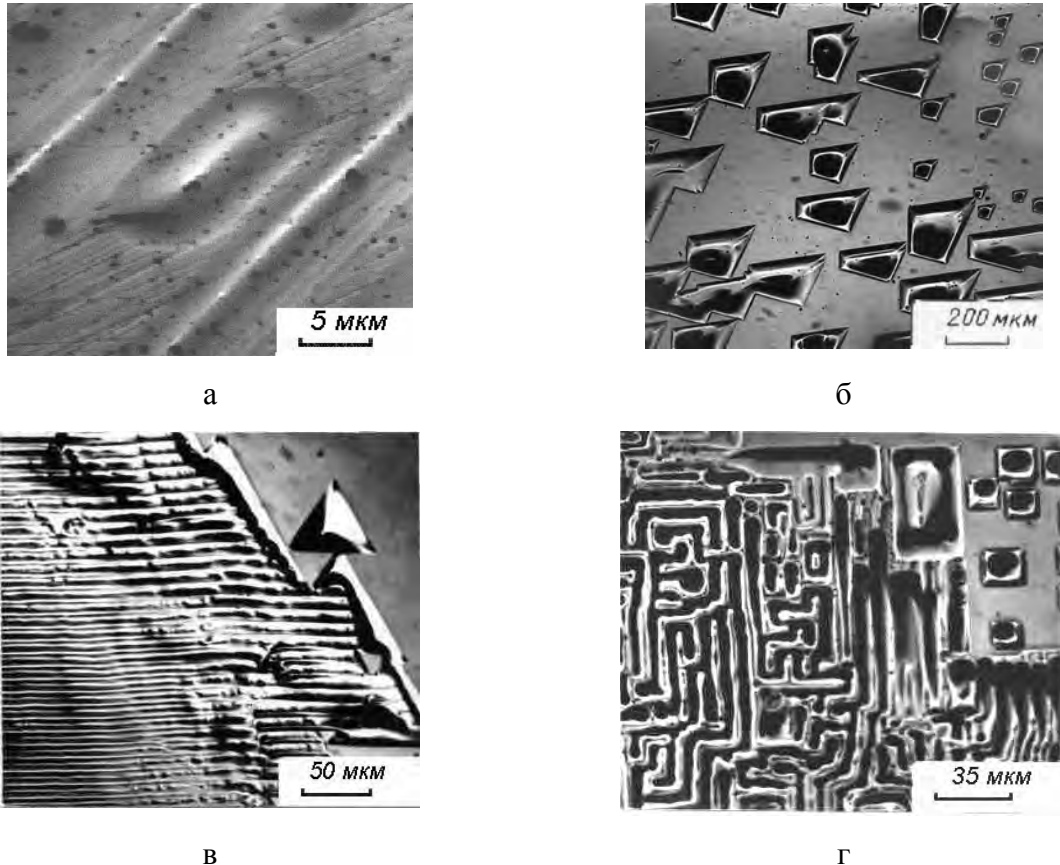
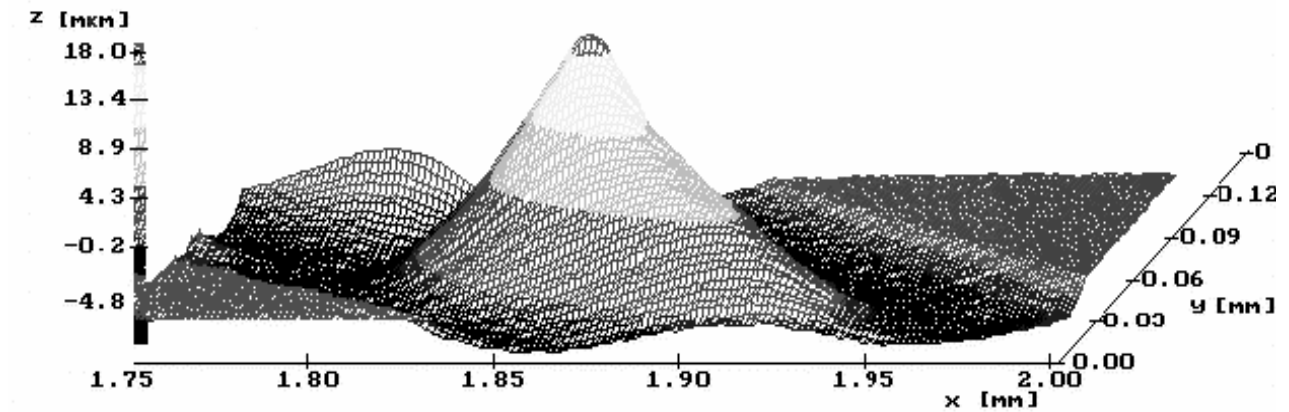


Рис. 2. Мікрофотографії поверхні кремнію в зоні дії секундних імпульсів CO_2 лазера. Орієнтація поверхні: а – (110), б – зріз під кутом 6° до площини (100), в – (111), з – (100)

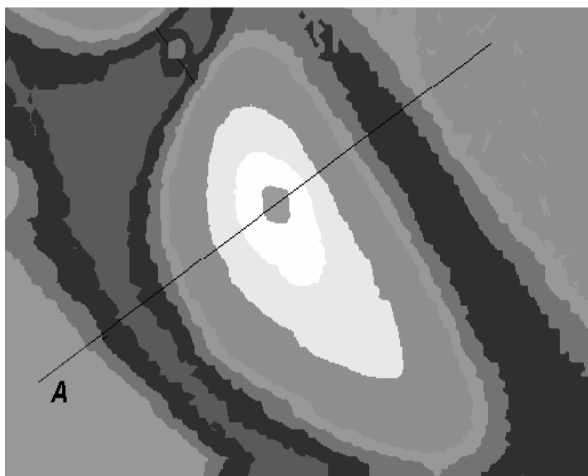
Оскільки симетрія внутрішньокристалічного поля визначається симетрією кристала, то при однорідному збудженні напівпровідників лазерним випромінюванням з допороговою потужністю (нижчою, ніж порогове значення, при якому відбувається однорідне плавлення поверхневого шару) на опроміненій поверхні формуються 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. Наприклад, на площині (100) формуються квадратні лунки проплавів, на площині (111) – трикутні, а на площині (110) лунки локальних проплавів мають шестикутну форму (рис. 2, а). Крім визначення кристалографічної орієнтації поверхонь напівпровідників, лазерний метод також можна використати для експресної оцінки ступеня розорієнтації поверхні кристалів (рис. 2, б).

Дослідження рельєфу поверхні областей, що утворилися внаслідок кристалізації локальних лунок проплаву напівпровідника показало наявність характерного поверхневого контуру цих ділянок. Після досягнення максимального плавлення завдяки дії сил поверхне-

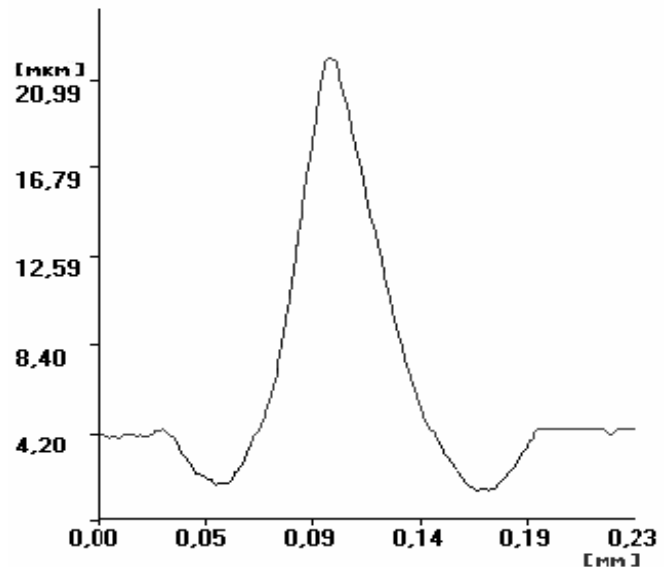
вого натягу в розплаві формується поверхня розділення рідка фаза – повітря мінімальної площі. Рівень поверхні нерівноважного розплаву виявляється нижчим порівняно з початковим рівнем поверхні твердого тіла, оскільки при температурі плавлення кремнію питомий об'єм рідини є меншим, ніж об'єм твердої фази: $V_{\text{тв.ф.}} = 12,1 \text{ см}^3/\text{моль}$; $V_{\text{р.ф.}} = 10,9 \text{ см}^3/\text{моль}$ (рис. 3). 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.



а



б



в

Рис. 3. Топографічна карта рекристалізованої області локального проплаву на пластині кремнію. Орієнтація (100). а – тривимірне зображення, б – двовимірне зображення, в – рельєф поверхні по лінії А

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. При певних енергетичних параметрах світлового потоку за рахунок дії внутрішньокристалічних полів відбувається формування поверхневих періодичних структур (рис. 2, в, г) Встановлено, що морфологія поверхні напів-

провідників у зонах дії лазерного випромінювання залежить від початкової температури зразків T_0 . При підвищенні T_0 рельєф поверхні стає мілкішим, а середній період між локальними лунками проплавів зменшується. Середній період між окремими зонами локальних проплавів при $T_0=80$ К в півтора раза перевищує відповідне середнє значення періоду при $T_0=300$ К.

Висновок. Розшарування електронно-діркової плазми, ініційованої в напівпровідниках дією лазерних імпульсів мілісекундного і секундного діапазонів, можна ефективно використати для визначення кристалографічної орієнтації поверхні напівпровідників, для експресної оцінки ступеня розорієнтації поверхні кристалів і визначення структури напівпровідників взагалі.

1. Бончик А.Ю., Гафійчук В.В., Кияк С.Г., Савицький Г.В. Морфология поверхности полупроводников при воздействии импульсного лазерного излучения миллисекундной длительности. // *Поверхность (физика, химия, механика)*. 1986. – № 5. С. 142 – 144. 2. Кияк С.Г., Бончик А.Ю., Гафійчук В.В., Гонов С.Ж., Южанин А.Г. Анизотропное плавление полупроводников под действием импульсного лазерного излучения. // *Доклады АН УССР. Серия А*. 1987. №5. С. 61 – 65. 3. Кияк С.Г., Бончик А.Ю., Гафійчук В.В., Южанин А.Г. Формирование регулярного рельефа на поверхности полупроводников под действием миллисекундных лазерных импульсов. // *Украинский физический журнал*. 1987. 32. № 7. С. 1079 – 1083. 4. Бончик О.Ю., Дацко Б.Й., Демчук В.І., Кияк С.Г., Паливода І.П., Шнир А.Ф. Нестійкості формування локально розплавлених областей на поверхні напівпровідників в зонах дії лазерних імпульсів. // *Вісник державного університету "Львівська Політехніка"*. 2000. Електроніка. № 397. С. 58 – 65. 5. Гафійчук В.В., Гашпар В.Э. Возникновение неоднородных структур при импульсном разогреве полупроводников. // *Физика твердого тела*. 1985. 27. вып. 5. С. 1354 – 1358. 6. Гафійчук В.В., Гашпар В.Э. Квазипериодические температурные поля в полупроводниках при лазерной обработке. // *ДАН УССР*. 1985. вып. 9, сер. А. С. 74 – 78.