

11. Malomuzh M.N. Phase diagram of two-dimensional Coulombic gas // Ukr. J. Phys. – 2007. – 52. – P. 1108–1115.
12. Маломуж М.М. Кластерна структура та її прояв в особливостях фазової діаграми двовимірного кулонівського газу // Вісник Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки. – 2008. – № 1.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч. 1. – Москва: Наука, 1976. – 584 с.
14. Guillot B., Guissani Yv. Towards a theory of coexistence and criticality in real molten salts // Mol. Phys. – 1996. – 87. – P. 37–86.

Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка

Надійшло до редакції 19.03.2008

УДК 548.4:548.0:539.3.8

© 2008

Член-кореспондент НАН України В. А. Макара, Л. П. Стебленко,
А. О. Подолян, А. М. Курилюк, Ю. Л. Кобзар, С. М. Науменко

Фотопровідність кремнію в умовах магнітного впливу

It is shown that the action of magnetic fields (MF) of different nature (constant and variable MF and a microwave superhigh-frequency field) changes the relaxation kinetics of photoconductivity (PC) in silicon crystals. For an explanation of the obtained results, the mechanism, according to which differences in the relaxation times of PC are related to structural changes in the surface layer of Si that are stimulated by the magnetic influence, is offered.

Існує немало наукових робіт, в яких досліджується роль дефектів, зокрема, різноманітних домішок, існуючих в напівпровідниках, в процесах генерації і рекомбінації вільних електронів і дірок [1–7]. З іншого боку, відомо, що на рекомбінаційні характеристики і, відповідно, на характеристики фотопровідності (ФП) напівпровідників істотно впливає не лише наявність електричноактивних дефектів, але й стан поверхні, з якою пов'язана інтенсивна рекомбінація надлишкових носіїв заряду [5, 6, 8, 9]. Незважаючи на великий обсяг результатів, одержаних при вивченні фотоелектричних явищ у напівпровідниках, є ряд невирішених питань в даній області досліджень. Так, немає інформації щодо зв'язку між дією полів зовнішнього впливу на кристали напівпровідників і зміною в цих умовах електричної активності центрів, які пов'язані з домішками.

У дослідженнях, виконаних нами останнім часом [10], були виявлені зміни рельєфу поверхні та зміни домішкового стану приповерхневих шарів кристалів кремнію, викликані дією слабкого магнітного поля. З нашої точки зору цікаво було прослідкувати зв'язок між структурними змінами в приповерхневому шарі кремнію після його магнітної обробки та зміною характеристик фотопровідності. Дослідження вказаного зв'язку і з'ясування його фізичної природи і є метою даної роботи. Окрім поодиноких робіт [11, 12], подібні дослідження в літературі, практично, не представлені, що, в свою чергу, вказує на їх актуальність.

Методика. Дослідження проводилися на зразках кремнію *n*-типу, вирощених за методом Чохральського і легованих фосфором до питомого опору $\rho = 4,5$ Ом·см. Схема експерименту полягала в наступному. Зразки були розділені на три партії, кожна з яких піддавалась

магнітній обробці (МО). МО I партії зразків здійснювалася в постійному магнітному полі (МП) з індукцією $B = 0,17$ Тл протягом 7 діб; II партії — в змінному магнітному полі з індукцією $B = 0,33$ Тл протягом 180 хв; III партії — в мікрохвильовому електромагнітному полі міліметрового діапазону (частота НВЧ-поля складала $\nu = 53$ ГГц, а тривалість його дії — 1 год.). Далі на контрольних (еталонних) зразках Si, а також на зразках кремнію, оброблених вищезазначеними способами, за стандартною методикою здійснювалися виміри кінетики релаксації фотопровідності (РФП).

За кінетичними залежностями спаду фотопровідності був розрахований час релаксації ФП τ .

Експериментальні результати та їх обговорення. У процесі вимірів і розрахунків нами було встановлено, що РФП у контрольних зразках характеризується однією короткотривалою компонентою (τ_1) (див. п. 1 табл. 1).

Виявилось, що кінетика спаду ФП $\sigma(t)$ для всіх партій зразків, які пройшли магнітну обробку, має особливості і характеризується двома компонентами релаксації — короткотривалою (τ_1) та довготривалою (τ_2) (див. п.2, 3, 5, 7 табл. 1), а одержані експериментальні дані досить добре можна апроксимувати залежністю

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + \sigma_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (1)$$

де σ_0 — провідність зразка у відсутності світла; ($\sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2$) — провідність зразка при освітленні; t — час.

Таблиця 1. Значення часів релаксації фотопровідності в зразках кремнію, які пройшли різні види магнітних обробок

№ п/п	Зразок	Короткотривала компонента, τ_1 , мкс	Довготривала компонента, τ_2 , мкс	Додаткові відомості
1	Контрольний (еталонний) кремній	$17,37 \pm 0,04$	—	—
2	Кремній, що пройшов МО в постійному магнітному полі	$16,15 \pm 0,05$	161 ± 5	Виміри τ проводилися відразу після завершення МО
3	Кремній, що пройшов МО в постійному магнітному полі	$16,16 \pm 0,04$	162 ± 7	Виміри τ проводилися через 25 діб після завершення МО
4	Кремній, що пройшов МО в постійному магнітному полі	$16,25 \pm 0,08$	—	Виміри τ проводилися через 4 місяці після завершення МО
5	Кремній, що пройшов МО в змінному магнітному полі	$16,36 \pm 0,04$	230 ± 7	Виміри τ проводилися відразу після завершення МО
6	Кремній, що пройшов МО в змінному магнітному полі	$16,48 \pm 0,04$	—	Виміри τ проводилися через 4 місяці після завершення МО
7	Кремній, що пройшов обробку в НВЧ-полі	$16,06 \pm 0,03$	285 ± 9	Виміри τ проводилися відразу після завершення НВЧ-обробки
8	Кремній, що пройшов обробку в НВЧ-полі	$16,06 \pm 0,06$	—	Виміри τ проводилися через 4 місяці після завершення НВЧ-обробки

Криві спаду ФП для зразків Si, що пройшли магнітну обробку, мали форму, яка описується рівнянням (1) і відрізнялися лише різними значеннями параметрів, які входять в (1). Таким чином, на відміну від контрольних зразків, для зразків кремнію, які зазнали магнітного впливу, характерна наявність двох компонент. Останнє свідчить про те, що в умовах магнітної дії фотопровідність зазнає реальних змін.

Друга виявлена в роботі особливість спаду фотопровідності полягає в тому, що з часом, який минув після завершення МО, змінюється величина довготривалої компоненти РФП τ_2 . Вказана компонента, яка з'являється на кінетичних залежностях ФП відразу після завершення МО, з часом зменшується і, нарешті, через певний проміжок часу (4 місяці) повністю зникає.

Третьою особливістю фотопровідності в умовах магнітного впливу є деяке зменшення, порівняно з контрольними зразками кремнію, короткотривалої компоненти τ_1 . Поряд з цим короткотривала компонента РФП в зразках Si, які пройшли МО, з часом, фактично, не зазнає змін, тобто релаксації параметра τ_1 , до значень даного параметра в контрольних зразках не спостерігається.

Метод вимірювання РФП дозволяє нам обговорювати природу рекомбінаційних центрів, які виникають під впливом магнітних обробок і, відповідно, краще розуміти механізми виникнення в умовах магнітного впливу локалізованих поверхневих електронних станів (ПЕС).

Прояв фізичних ефектів, які зумовлюють різну кінетику РФП, різними авторами трактується по-різному. З точки зору авторів робіт [5, 6, 9], особливості кінетики фотопровідності пов'язані з впливом поля поверхневого бар'єра на рекомбінацію надлишкових носіїв заряду на поверхні і в приповерхневій області просторового заряду (ОПЗ) напівпровідника. Спираючись на зазначену точку зору, проаналізуємо ситуацію, яку ми маємо в нашому випадку. З того факту, що фотопровідність після МО змінюється, випливає, що змінюється і величина вигину зон біля поверхні. При бар'єрному механізмі рекомбінації ця зміна повинна приводити до зміни часу життя. Останнє ми і спостерігали експериментально. Згідно з [5], причинами зміни величини потенціального бар'єра на поверхні можуть бути: 1) перезарядка глибоких уловлювачів поблизу ОПЗ; 2) зміна концентрації заряджених уловлювачів в шарі природного окислу завдяки дії полів зовнішнього впливу; фотохімічні реакції поблизу поверхні, які приводять до зміни концентрації заряджених адсорбованих центрів.

Одержані нами раніше результати [10] дають підставу вважати, що з відзначених вище механізмів визначальним в нашому випадку є останній. Проте в приповерхневих шарах Si відразу після завершення МО в 2–4 рази зростає концентрація іонів лужних металів (K, Na, Ca) та концентрація іонів алюмінію. Природно припустити, що стимульована магнітним впливом особлива активність поверхневих станів і посилення перебігу процесів адсорбції на поверхні проявляється в гетеруванні поверхнею домішок як з об'єму кристалу, так і з оточуючого середовища. Адсорбовані магнітоактивною поверхнею заряджені домішки викликають зміну вигину зон, і відповідно, зміну кінетики фотопровідності.

В електричному полі потенціального бар'єра, який створюється адсорбованими завдяки магнітній активації поверхні іонами домішок, нерівноважні електрони і дірки просторово розділяються, а час їх рекомбінації значно зростає згідно з виразом:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\phi}{kT}\right), \quad (2)$$

де τ_0 — час рекомбінації в однорідному кристалі, а ϕ — висота потенціального бар'єра.

Отже, на наш погляд, наявність довготривалої компоненти ФП (τ_2) в кристалах кремнію після магнітної обробки зумовлена появою макроскопічного рекомбінаційного бар'єра, пов'язаного з сильним вигином зон біля поверхні Si.

Як видно з табл. 1, час рекомбінації носіїв τ_2 залежить від способу магнітної обробки. Це може бути пов'язане з різною інтенсивністю перебігу процесів адсорбції на магнітоактивованій поверхні Si. Як уже зазначалось, через певний час (4 місяці) довготривала компонента РФП зникає. Останнє свідчить про поступове відновлення зарядового стану поверхні і про релаксацію макроскопічного рекомбінаційного бар'єра, який виник під впливом сильного вигину зон.

Коротко зупинимося ще на одному питанні. Однією з особливостей кінетики фотопровідності в умовах магнітного впливу є те, що короткотривала компонента РФП (τ_1) дещо зменшується (в середньому \sim на 1 мкс). Останнє вказує на те, що дія МП приводить до генерації додаткової кількості поверхневих станів (ПС). Спираючись на літературні дані [13], а також на дані, одержані нами і наведені в [10], можна зробити висновок, що причиною генерації ПС в результаті МО є зростання на поверхні Si кількості обірваних кремній-кисневих зв'язків, існуючих на поверхні Si в природній окисній плівці. Не виключена також поява нових центрів рекомбінації, наприклад, іонів гідроксильних груп OH^- , які з'являються в шарі окислу за рахунок підсилення в результаті магнітної дії адсорбційної функції поверхні. Розірвані ненасичені зв'язки Si, а також заряджені іони гідроксильних груп виступають в ролі додаткових генераційно-рекомбінаційних центрів в Si, які знижують час життя τ_1 нерівноважних носіїв заряду. Слід зазначити, що вищезазначені ПС є стійкими. На це вказує той факт, що навіть через тривалий час (4 місяці) ці зарядові стани не релаксують і короткотривала компонента залишається без змін. В той же час, як уже відзначалося, зарядовий стан центрів, які відповідальні за довготривалу компоненту РФП (τ_2), є нестійким і з часом повністю релаксує. Це може бути пов'язано з тим, що вказані центри (нагадуємо, що в ролі цих центрів виступають іони домішок лужних металів і алюмінію, які гетеруються з об'єму матеріалу під впливом МП) вступають у стимульовані магнітним полем міждефектні реакції, наприклад, у реакції з гідроксильними групами, за рахунок чого їх зарядовий стан нейтралізується.

Таким чином, відсутність релаксації короткотривалої компоненти РФП (τ_1) і наявність релаксації РФП (τ_2) у довготривалої компоненти свідчить про різну стійкість зарядового стану центрів, які зумовлюють час життя носіїв і визначають, відповідно, релаксацію ФП на виявлених двох ділянках РФП.

1. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. – Москва: Мир, 1984. – 472 с.
2. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. – Москва: Мир, 1974. – 463 с.
3. Глинчук К. Д., Литовченко Н. М., Сальник З. А., Скрыль С. И. О влиянии термообработки на время жизни неосновных носителей тока в кислородосодержащем кремнии // Фізика и техника полупроводников. – 1985. – **19**, вып. 2. – С. 341–343.
4. Неймаш В. Б., Саган Т. Р., Цмоць В. М. и др. О некоторых механизмах влияния тепловой предыстории на поведение параметров Si под облучением // Там же. – 1991. – **25**, вып. 11. – С. 1857–1863.
5. Балагуров Л. А., Омеляновский Э. М., Фистуль В. И. Отрицательная фотопроводимость и фотопамять, обусловленные потенциальным барьером на поверхности InAs // Там же. – 1978. – **12**, вып. 5. – С. 944–947.
6. Лашкарев В. Е., Любченко А. В., Шейнман М. К. Неравновесные процессы в полупроводниках. – Киев: Наук. думка, 1981. – 264 с.
7. Вавилов В. С., Кисельов В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на його поверхні. – Москва: Наука, 1990. – 216 с.

8. Литовченко В. Г., Фролов О. С., Бао Ши Мао. Исследование длинновременных изменений электрических свойств поверхности германия // Физика тверд. тела. – 1962. – 4. – С. 833–845.
9. Карева Г. Г., Коноров П. П. Фотопроводимость германия и кремния в условиях сильных приповерхностных изгибов зон // Физика и техника полупроводников. – 1972. – 6, вып. 2. – С. 271–275.
10. Макара В. А., Стебленко Л. П., Кордубан А. М. и др. Изменение топологии поверхности и дефектно-примесного состояния монокристаллического кремния под влиянием слабого постоянного магнитного поля // II Междунар. науч. конф. “Материалы и структуры современной электроники”. – Минск, 5–6 октября 2006 г. – С. 189–192.
11. Венгер Е. Ф., Ермолович И. Б., Миленин В. В. и др. Влияние внешних радиационных, СВЧ- и механических возбуждений на образование дефектов в неметаллических кристаллах // Вопросы атомной науки и техники (Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение). – Харьков: ННЦ “Харьков. физ.-техн. ин-т”, 1999. – Вып. 3(75). – С. 60–72.
12. Кадменский А. Г., Кадменский С. Г., Левин М. Н. и др. Релаксационные процессы в МДП-элементах интегральных схем, вызванные ионизирующим излучением и импульсным магнитным полем // Письма в ЖТФ. – 1993. – 19, вып. 3. – С. 41–45.
13. Левин М. Н., Зон Б. А. Воздействие импульсных магнитных полей на кристаллы Cz-Si // Журн. эксперим. и теорет. физики. – 1997. – 111, № 4. – С. 1373–1397.

*Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка*

Надійшло до редакції 14.02.2008