



УДК 548.4;548.0:539.3.8

© 2012

Член-кореспондент НАН України В. А. Макара, Л. П. Стебленко,
О. М. Кріт, Д. В. Калініченко, А. М. Курилюк, С. М. Науменко

Обумовлені дією рентгенівського випромінювання та магнітного поля особливості динамічної поведінки дислокацій у кристалах кремнію

Виявлено особливості в динамічній поведінці дислокацій, які проявляються при самостійній дії рентгенівського випромінювання, а також при комбінованому (рентгенівському і магнітному) впливі на кристали кремнію. Встановлені зміни в мікропластичних характеристиках кристалів кремнію аналізуються з точки зору стимулювання рентгенівською та магнітною дією міждефектних перетворень.

Вивчення взаємозв'язку між дією полів зовнішнього впливу і зміною властивостей кремнію є актуальним як для розуміння процесів структурної релаксації в напівпровідникових матеріалах, так і з точки зору модифікації їх властивостей. Традиційними залишаються дослідження властивостей напівпровідникових кристалів кремнію при дії радіаційного випромінювання [1–3]. Останнім часом особливий інтерес викликає можливість модифікації структури і зміни властивостей кремнію завдяки впливу магнітних полів [4–7].

Увагу науковців привертають також питання, пов'язані з вивченням структури та структурно-залежних властивостей слабомагнітних матеріалів, зокрема, напівпровідникових кристалів при комбінованих видах зовнішнього впливу (магнітного та радіаційного) [5, 6, 8], оскільки саме в таких умовах часто функціонують прилади, виготовлені на основі напівпровідникових структур.

Дослідницькі завдання в цьому напрямі на сьогодні остаточно не вирішені. У зв'язку з цим метою даної роботи було вивчення змін мікропластичних характеристик кремнію, зумовлених самостійним рентгенівським впливом та комбінованим впливом рентгенівського опромінення та магнітного поля.

Відгуком на зміну мікропластичних характеристик була величина середнього пробігу дислокацій при дії фіксованої температури та фіксованої зовнішньої напруги в процесі пластичного деформування кристалів. Використане в роботі рентгенівське випромінювання було низькоенергетичним (енергія $Cu_{k\alpha}$ лінії становила $W = 8$ кеВ) і малодозовим ($D = 10^2$ Гр). Магнітна обробка (МО) зразків кремнію здійснювалася шляхом витримки

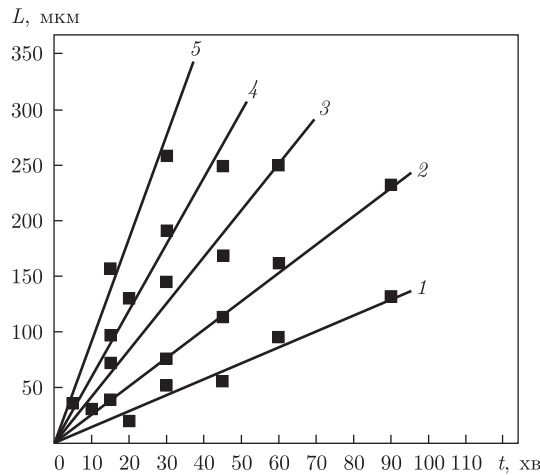


Рис. 1. Залежність величини пробігів дислокацій у кристалах кремнію p -типу залежно від часу дії механічного напруження $\sigma = 79,4$ МПа: 1 – зразки Si, які пройшли магнітну обробку в постійному магнітному полі ($B = 0,17$ Тл, $t_{\text{мо}} = 7$ діб) [7]; 2 – вихідні (контрольні) зразки Si; 3 – зразки кремнію, які пройшли комбіновану обробку типу МО + РО та типу РО + МО ($D = 0,3 \cdot 10^2$ Гр, $B = 0,17$ Тл, $t_{\text{мо}} = 7$ діб); 4 – зразки кремнію, які пройшли самостійну рентгенівську обробку ($D = 0,1 \cdot 10^2$ Гр); 5 – зразки Si, які пройшли самостійну рентгенівську обробку ($D = 0,3 \cdot 10^2$ Гр)

зразків у слабкому постійному магнітному полі з індукцією $B = 0,17$ Тл протягом 7 діб. Рентгенівську обробку (РО) з МО комбінували у послідовності РО + МО та у зворотній послідовності МО + РО.

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити певні закономірності в поведінці дислокацій при самостійній та комбінованій дії використаних у роботі зовнішніх факторів впливу (рис. 1).

Як видно з рис. 1, самостійна рентгенівська обробка дислокаційних кристалів кремнію призводить до збільшення пробігів, а отже, і швидкості руху дислокацій порівняно з контрольними дислокаційними зразками, які не піддавалися дії рентгенівського опромінення. У середньому величина пробігів дислокацій під дією рентгенівського випромінювання зростала в 3–4 рази. При цьому ефект збільшення пробігів посилювався при збільшенні поглинутої дози випромінювання. Таким чином, дія низькоенергетичного рентгенівського випромінювання на кристали кремнію супроводжується появою в них радіаційно-пластичного ефекту (РПЕ). Комбінована обробка, незалежно від її послідовності, якоюсь мірою нівелювала ефект самостійного рентгенівського впливу і самостійного магнітного впливу (дослідженого в [7]) і приводила до появи деякого нового за величиною ефекту. Коротко зупинимося на фізичних механізмах, які лежать в основі виявлених ефектів зміни динамічної поведінки дислокацій.

Збільшення пробігів дислокацій, які спостерігаються при самостійній РО, може бути пов'язано зі зміною фізичного механізму, який контролює переміщення дислокацій. На нашу думку, у дислокаційних зразках кремнію, які піддавалися рентгенівській обробці, за рахунок дифузійного притоку радіаційних дефектів (РД) до дислокацій, дислокації можуть переміщатися не тільки консервативним шляхом ковзання, властивим контрольним зразкам кремнію, а й додатковим неконсервативним шляхом переповерхання [9]. Цей механізм руху дислокацій видається цілком можливим, якщо зважати на істотне зростання швидкості дислокацій в опромінених рентгеном кристалах.

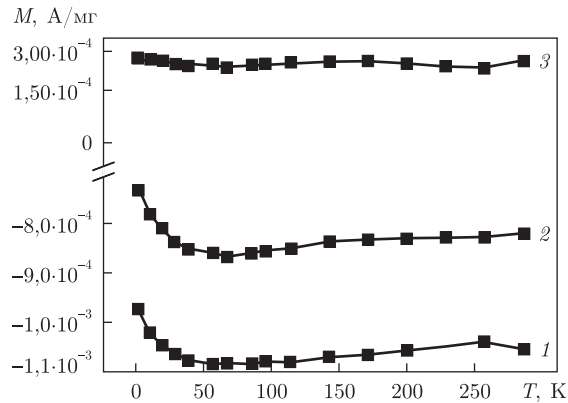


Рис. 2. Температурна залежність магнітного моменту зразків Si: 1 — зразок Si без дислокацій, відпалений при 700 °С, $\sigma = 0$ МПа, час відпалу — $t = 30$ хв; 2 — зразок Si з дислокаціями, деформований при 700 °С, $\sigma = 79,4$ МПа, час деформування $t = 30$ хв; 3 — внесок у магнітний момент, який утворився в результаті пластичної деформації

З нашої точки зору, у дислокаційних кристалах кремнію, які пройшли комбіновану обробку типу МО + РО або типу РО + МО, можуть протікати міждефектні твердотільні реакції, в яких беруть участь радіаційні дефекти (вакансії та міжвузлові атоми), а також дефекти, утворені в результаті магнітної дії — киснево-вакансійні комплекси, відомі як А-подібні дефекти [4]. Цей процес супроводжується зменшенням кількості РД, які поряд з А-подібними дефектами формують нові комплекси точкових дефектів. Зменшення кількості РД призводить до зменшення обумовленої нерівноважною концентрацією радіаційних дефектів пружної сили, яка зазвичай сприяє перепованню дислокації [9]. А це, в свою чергу, викликає зменшення швидкості руху дислокацій при комбінованих обробках. Отже, залучення до РО додаткової МО “гасить” РПЕ, який спостерігається при самостійній РО. З іншого боку, додаткова РО збільшує величину магнітопластичного ефекту (МПЕ), отриманого при самостійній МО [7]. Це може бути пов’язане з наступним. У роботах [5, 6] обговорюються можливі стимульовані магнітним полем спін-залежні процеси в кристалах, які відбуваються між парамагнітними центрами, локалізованими в ядрі дислокації, і центрами у вигляді точкових дефектів, що виникають в результаті різноманітних обробок.

Одержані в даній роботі з залученням надпровідного квантового інтерференційного магнетометра результати (рис. 2) вказують на те, що наявність дислокацій призводить до зменшення магнітного моменту, а отже, до зменшення магнітної сприйнятливості кристалів Si. А це, в свою чергу, означає, що пластична деформація призводить до появи додаткового парамагнітного та до зменшення додаткового діаманітного внеску. Залежність 3 на рис. 2 ілюструє внесок у магнітний момент, який утворюється в результаті пластичної деформації.

Враховуючи те, що домішкові атмосфери, які сформувалися навколо дислокацій при використаних в даній роботі самостійних та комбінованих обробках кристалів Si, різні, можна припустити, що спін-залежні процеси, які лімітують дислокаційно-домішкову взаємодію, можуть протікати в досліджуваних кристалах по-різному. Згідно з цим, різними мають бути як константи швидкості руйнування “квазімолекули”, утвореної дислокацією (як парамагнітним центром) та її домішковою атмосферою, так і швидкості дислокації після відкріплення від домішкової атмосфери. Останнє і спостерігалось експериментально.

1. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники: Уч. руководство. – Москва: Наука, 1988. – 192 с.
2. Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. – Москва: Наука, 1990. – 212 с.
3. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. Неоднорідності напівпровідників і актуальні задачі між-дефектної взаємодії в радіаційній фізиці і нанотехнології. – Київ: Луцьк, 2006. – 316 с.
4. 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.
5. Головин Ю. И. Магнитопластичность твердых тел // Физика тв. тела. – 2004. – **46**, № 5. – С. 769–803.
6. Моргунов Р. Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности // Усп. физ. наук. – 2004. – **174**, № 2. – С. 131–153.
7. Steblenko L. P., Kurylyuk A. N., Koplak O. V. et al. Changes in nanostructure and micro-plastic properties of silicon crystals under action of magnetic fields // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2010. – **13**, No 4. – P. 389–393.
8. Альшиц В. И., Даринская Е. В., Казакова О. Л. Влияние рентгеновского облучения на магнитопластический эффект в кристаллах NaCl // Письма в ЖЭТФ. – 1995. – **62**, № 4. – С. 352–357.
9. Новиков Н. Н. Структура и структурно-чувствительные свойства реальных кристаллов. – Киев: Вища шк., 1983. – 264 с.

Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка

Надійшло до редакції 10.10.2011

Член-корреспондент НАН України **В. А. Макара, Л. П. Стебленко, А. Н. Крит, Д. В. Калиниченко, А. Н. Курилюк, С. Н. Науменко**

Обусловленные действием рентгеновского излучения и магнитного поля особенности динамического поведения дислокаций в кристаллах кремния

Вывявлены особенности в динамическом поведении дислокаций, которые проявляются при самостоятельном действии рентгеновского излучения, а также при комбинированном (рентгеновском и магнитном) влиянии на кристаллы кремния. Установленные изменения в микропластических характеристиках кристаллов кремния анализируются с точки зрения стимулирования рентгеновским и магнитным действием междефектных превращений.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **V. A. Makara, L. P. Steblenko, O. M. Krit, D. V. Kalinichenko, A. M. Kuryliuk, S. M. Naumenko**

The dynamic behavior of dislocations in silicon crystals caused by the action of X-rays and a magnetic field

The dynamic behavior of dislocations under the influence of X-ray radiation and the combined (X-ray + magnetic field) influence on silicon crystals is investigated. The changes in microplastic characteristics of silicon crystals are analyzed under the assumption of interdefect transformations.