

Б.В. Павлик, Р.М. Лис, Р.І. Дідик, Й.А. Шикоряк

Дослідження змін електропровідності опроміненних Х-променями кристалів р-Si в процесі пружної деформації

*Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Тарнавського, 107,
Львів, Україна, 79000, e-mail: lys_r@ukr.net*

Досліджувались зміни електропровідності опроміненних при кімнатній температурі монокристалічних зразків р-Si в процесі їх стиску та зняття механічного навантаження. Виявлено, що під час витримки досліджуваного зразка під навантаженням опір зразка зростає. Виявлено ефект «радіаційної пам'яті». Встановлено, що в процесі опромінення рентгенівськими променями опір зразків зростає пропорційно кореню квадратному із дози опромінення.

Ключові слова: монокристалічний кремній, одновісна деформація, омичні контакти, рентгенівське опромінення.

Стаття поступила до редакції 19.09.2013; прийнята до друку 15.03.2014.

Вступ

Широке застосування напівпровідникових приладів в різних галузях техніки ставить завдання створення нових матеріалів і приладів на їх основі, які володіють швидкодією, підвищеною стабільністю в полях дії радіації та деформації [1].

Основними факторами, що викликають деградацію напівпровідникових приладів (незворотні зміни їх характеристик), є виникнення, трансформація і міграція дефектів кристалічної ґратки. Дефекти утворюються в процесі вирощування кристалів, при подальшій термічній, радіаційній обробках; а також в процесі експлуатації, при прикладанні зовнішніх електромагнітних полів та деформації. Однак радіаційне опромінення може служити способом покращення параметрів приладів на основі кремнію [2, 3].

I. Вплив деформації на питомий опір кристалів р-Si

Розглянемо вплив деформації на питомий опір кристалів кремнію. Зміна електропровідності монокристалів кремнію в процесі пружної деформації обумовлена рядом факторів. Основні з них:

1. Деформація кристалічної ґратки р-Si може спричинити зміну структури його енергетичних зон, що, в свою чергу, призведе до зміни співвідношення між концентраціями «важких» та «легких» дірок (з

ефективними масами відповідно 0,52 та 0,16 маси електрона [4]). В кремнії основний вклад в пружні властивості вносять важкі дірки, кількість яких становить 85 % від загального числа дірок [5].

2. У пружно деформованій кристалічній ґратці виникають сили, які спричиняють рух дефектів, їх коагуляцію в кластери та конденсацію на дислокаціях [6]. Механічні напруження в кремнії можуть виникати і при напиленні на ньому металічних плівок [7]. Такі напруження виникають за рахунок невідповідності параметрів ґраток і коефіцієнтів температурного розширення кремнію та плівки. Крім того, напилена на поверхню Si металічна плівка, служить ефективним гетером для глибоко-рівневих структурних дефектів [8]. Такими дефектами, що гетеруються в приконтактному шарі напівпровідник-метал можуть бути домішкові атоми, винесені з об'єму зразка в приповерхневу область, атоми кремнію котрі виходять з вузлів ґратки у міжвузлову область та вакансії, що утворюються при такому виході [9]. Зміна дефектного фону в кристалі повинна вплинути на концентрацію та рухливість носіїв заряду, з якими пов'язана електропровідність напівпровідника.

У роботі [10] встановлено, що під дією низькотемпературної деформації при малих та середніх напруженнях (400 Мпа) дислокації в кремнії зароджуються лише у тонких приповерхневих шарах і на відміну від ростових дислокацій проявляються у вигляді невеликих («плитких») ямок травлення. При таких умовах основним типом дефектів структури, що створюються при короточасному (декілька хвилин) деформуванні є вакансії та вакансійно-

домішкові кластери, а при тривалих випробуваннях (декілька годин, діб) у приповерхневих шарах кристалів зароджуються також дислокації. Деформаційні дислокації мають гетерогенне походження і виникають на неоднорідностях, які періодично розташовані в «смугах росту», а ростові дислокації не проявляють себе у якості джерел нових дислокацій.

На початкових етапах деформування зразків їх мікропластична деформація відбувається за рахунок зміщення ростових дислокацій (механізм виснаження дислокацій), а вище деякого критичного напруження мікроповзучість контролюється появою нових дислокацій від гетерогенних джерел (механізм розмноження) [10].

Авторами [11, 12] виявлено, що напрямок дифузійних потоків вакансій і міжвузлових атомів в кристалі може визначитися зовнішнім механічним впливом. У такому випадку роль сили, що виділяє переважний напрямок дифузії точкових дефектів у твердому тілі, відіграє величина, яка пропорційна градієнту напруження. Діюча на вакансію сила спрямована у напрямі градієнта напруження, тобто у напрямі більш стисненої частини кристала, а діюча на міжвузловий атом сила спрямована у зворотньому напрямку [12]. Наприклад, при згинанні кристалу з'являється можливість дифузійного переміщення міжвузлових атомів уздовж дислокації на поверхню, яка розтягується; у зворотньому напрямку буде відбуватися переміщення вакансій.

Однак, домінування тих чи інших факторів на характер зміни опору при багатократному стискуванні напівпровідникового монокристалічного зразка та зняті з нього механічного навантаження, а також під час опромінення рентгенівськими променями в літературі не достатньо описане. Не достатньо є й інформації про вплив швидкості деформування кремнію на його провідність.

II. Методика експерименту

Експериментальні кремнієві зразки вирізалися з монокристалічного диску КДБ $1 \div 10$ з орієнтацією (111). Після шліфовки та хімічної поліровки зразок одержував розміри $4 \times 3,7 \times 7,6$ мм. Омічні контакти, у вигляді двох смужок шириною 1,5 мм біля торців зразка, на площинах (111) створювались напиленням у вакуумі на підігрітій до 593 К зразок.

Вимірювання опору проводилось у вакуумі при тиску залишкових газів порядку 10^{-3} Па та прикладанням одновісного стиску до торців (у напрямку $[11\bar{2}]$) силою від 15 до 40 МПа з швидкістю 8 або 32 мкм/хв.

III. Результати досліджень та їх результати

Результати досліджень зміни поздовжнього опору (R) не опроміненого зразка від одновісного навантаження (σ) подано на рис. 1.

З аналізу отриманих залежностей можна зробити висновок, що на зміну опору під час пружної деформації впливають щонайменше два основні процеси:

Процес 1. Поступове і тривале збільшення опору зразка має місце між окремими циклами деформації та у випадку призупинки стиску (після повного зняття навантаження на зразок, протягом $1 \div 2$ годин). Це свідчить про дифузійні процеси в кристалічній ґратці, в яких беруть участь точкові або невеликі скупчення дефектів. Названі дефекти, коагуючи у більшій кластери, у вигляді мікропор, скупчень міжвузлового кремнію та домішок, дифундуючи захоплюють основні носії заряду. Накопичення таких дефектів у кристалічній ґратці спричиняє зменшення її провідності.

Відомо, що при одночасній дії електростатичного

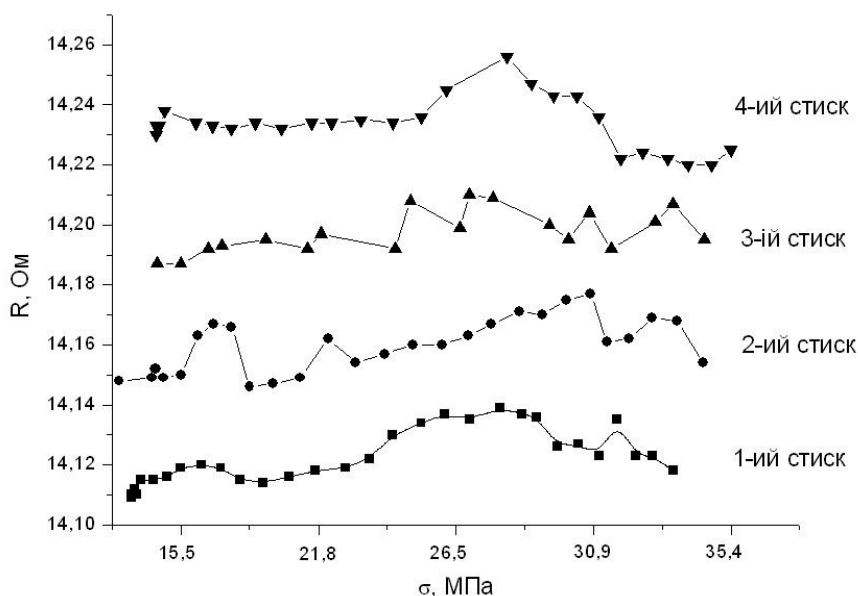


Рис. 1. Залежність поздовжнього опору зразка КДБ $1 \div 10$ під час пружної деформації із зростаючою силою стиску зі швидкістю 8 мкм/хв. $D = 0$ Гр.

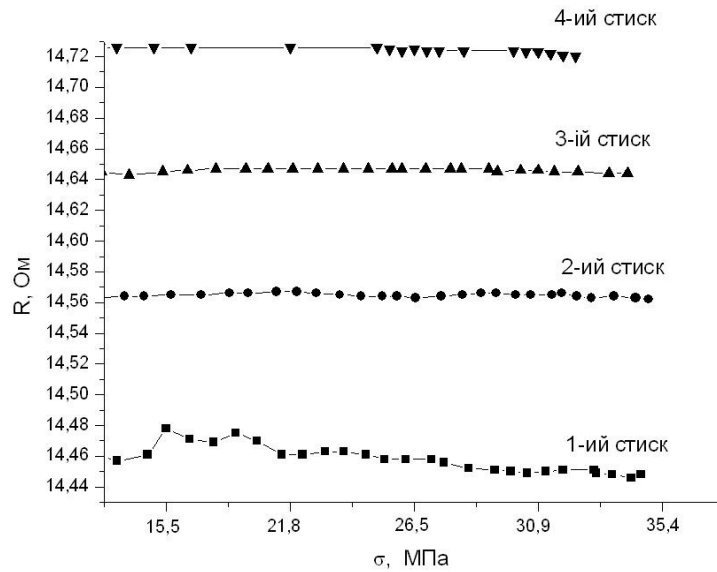


Рис. 2. Залежність поздовжнього опору опроміненого зразка КДБ 1 ÷ 10 під час пружної деформації із зростаючою силою стиску зі швидкістю 8 мкм/хв. D = 130 Гр.

поля (в нашому випадку це є вимірювання величини опору) та механічного напруження пробіги і, відповідно, швидкості дислокацій збільшуються у 2 - 4 рази, а часи затримки початку руху дислокацій зменшуються або зникають [10, 13-17]. Крім того авторами виявлено ефект «дислокаційної пам'яті» впливу електростатичного поля, який полягає у тому, що коли до зразка кремнію прикласти електростатичне поле, то дислокації запам'ятовують цей факт, і при наступному прикладанні самого лише механічного навантаження рухаються із такими швидкостями, які вони зазвичай мають при одночасній дії аналогічного електростатичного поля та механічного напруження.

Отже, у нашому випадку для не опроміненних кристалів зростання опору при збільшенні (стик) та зменшенні (розтиск) навантаження можна пояснити процесом руху дислокацій, які захоплюють на себе основні носії заряду. Що добре корелюється із літературними даними [10, 13-17].

Процес 2. Крім того, пружна деформація зразка може призводити і до зменшення його опору. Під час стиску кристалічної ґратки, як було сказано вище, може мінятися співвідношення між «важкими» і «легкими» дірками. Для нашого випадку, можна припустити, що в процесі стиску зменшується концентрація «важких дірок», що відповідно веде до збільшення провідності.

Тобто, процес 1 призводить до збільшення величини опору в полі дії механічного навантаження, а процес 2 – до зменшення опору. Як бачимо, для не опроміненних кристалів, при однобічному стиску внесок у величину опору процесу 1 суттєвіший за внесок процесу 2, тобто опір зростає.

Опір досягає насичення після чотирьох циклів стиск-розтиск. Подальше навантаження не призводить до зменшення провідності.

Аналогічні залежності були виміряні і для опроміненних зразків (рис. 2). Під час рентгенівського опромінення спостерігалось зростання опору, а сам

характер залежності $R(\sigma)$ був дещо іншим, ніж для не опроміненних зразків.

Бачимо що дія рентгенівського опромінення призводить до того, що під час стиску опір практично не змінюється. Це може свідчити про те, що внесок у величину опору процесу 1 та 2 в опроміненних зразках є співмірний під час збільшення навантаження. Зростання опору за рахунок процесу 1 компенсується його зменшенням за рахунок процесу 2.

Про те, що в процесі деформації відбувається і зменшення опору (процес 2) свідчить рис. 3.

Збільшення швидкості стиску із 8 мкм/хв до 32 мкм/хв призводить до зменшення опору опроміненних зразків в процесі збільшення навантаження (процес 2 переважає над процесом 1). Слід зазначити, що для не опроміненних кристалів зміна швидкості практично не впливала на загальний вигляд залежностей $R(\sigma)$ [18].

В процесі розтиску зразків спостерігалось стрімкіший ріст опору, ніж це було для неопроміненних кристалів. Тобто при зменшенні навантаження роль процесу 1 ще більша, ніж для вихідних зразків.

Така залежність опору від механічного навантаження може бути пояснена наступним чином.

Після рентгенівського опромінення кристалів р-Si, стиск призводить до зменшення швидкості дислокацій, а розтяг – до збільшення. Зазначимо, що до опромінення швидкість дислокацій не залежала від знаку механічної деформації.

Такі ефекти можливо пов'язані зі збільшенням концентрації радіаційних точкових дефектів за рахунок гетерування їх поверхнею, під металічними контактами. Відмінності в швидкостях дислокацій пов'язані із наявністю в зразках після дії опромінення сильних внутрішніх пружних напруг, які зумовлені підвищеною концентрацією точкових радіаційних дефектів. В процесі дії механічного навантаження напруги призводять до зміни ширини забороненої зони кремнію, що призводить до зміни заповненості

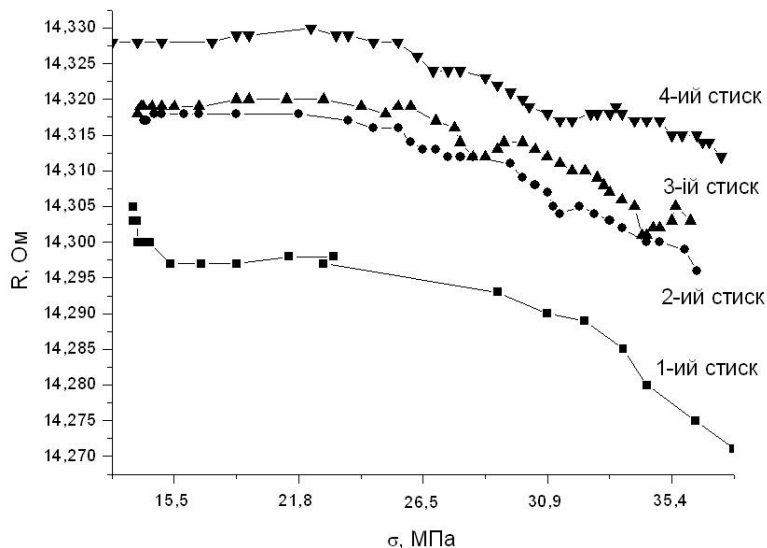


Рис. 3. Залежність поздовжнього опору опроміненого зразка КДБ 1 ÷ 10 під час пружної деформації із зростаючою силою стиску зі швидкістю 32 мкм/хв. D = 130 Гр.

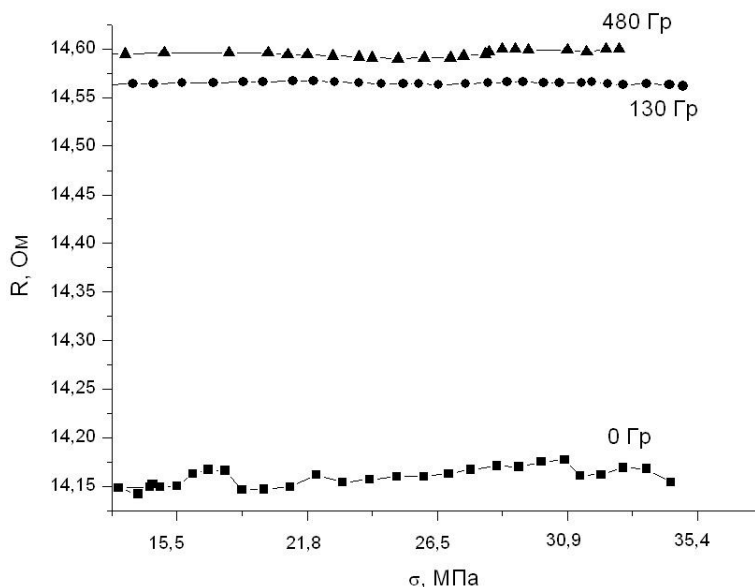


Рис. 4. Залежність поздовжнього опору (другий стиск) зразка КДБ 1 ÷ 10 під час пружної деформації із зростаючою силою стиску зі швидкістю 32 мкм/хв, при різних дозах рентгенівського опромінення.

акцепторних станів дислокації. Як наслідок, відбувається зміна потенціального бар'єру, який зумовлений існуванням навколо дислокації просторового заряду. Таким чином, в опромінені зразках, знак механічного навантаження впливає на зміну висоти потенціального електростатичного бар'єру. Іншими словами, рентгенівське опромінення може впливати на зарядовий стан дислокацій та точкових дефектів навколо неї (хмаринки Котрела). Такі експериментальні залежності (рис. 2) добре узгоджуються із результатами робіт [10, 13-17], де було досліджено аналогічні ефекти при дії ІЧ-, УФ-випромінювання та ультразвукової обробки кристалів кремнію.

Залежність опору експериментальних зразків від навантаження при різних дозах опромінення зображена на рис. 4. Результати представлені для других по порядку стиків. Аналогічні залежності

спостерігалися і для решти стисків. Із одержаних експериментальних залежностей можна зробити висновок, що після попереднього опромінення, дія деформації практично не впливає на питомий опір при швидкості деформації 8 мкм/хв.

Аналогічні залежності простежуються і в зразках, які були спочатку опромінені, а потім піддані впливу однобічного навантаження. Це свідчить, що дія рентгенівського опромінення призводить до появи у зразках ефекту «радіаційної пам'яті». Аналогічні ефекти спостерігалися у роботах авторів [10, 13-17] при дії лазерного, ІЧ- та УФ-випромінювання («оптична пам'ять»). Радіація (так як ІЧ, УФ і лазерне опромінення) можуть викликати зміну зарядового стану дислокацій та, відповідно, кулонівської взаємодії з оточуючими домішковими атмосферами. Це спричинює появу у зразках «радіаційної пам'яті».

Перебудувавши дані залежності у вигляді функцій $R/R_0 = f(D)$ (рис. 4) можна зробити наступний висновок: з ростом величини дози рентгенівського опромінення опір p-Si зростає. Причому величина опору R є прямопропорційною до кореня квадратного із дози опромінення \sqrt{D} :

$$R=R_0 (A\sqrt{D}+1) \quad (1)$$

де R_0 – опір до опромінення. Для досліджуваних зразків стала $A = (0,001 \div 0,003) \text{ Гр}^{-1/2}$.

Генеровані міжвузлові атоми кремнію в полі дії радіації, внаслідок різкого збільшення коефіцієнту дифузії, беруть участь у заліковуванні структурних дефектів (“ефект малих доз”). Такі рекомбінаційні процеси приводять до певного зростання відносної зміни опору після опромінення [19].

Висновки

Попередньо опромінені експериментальні кристали p-Si володіють властивістю зберігати свій питомий опір під впливом одновісного стиску (швидкість деформації 8 мкм/хв), в межах пружної деформації, вздовж напрямку.

Встановлено вигляд емпіричної залежності опору

досліджуваних зразків від величини поглинутої дози, згідно якої величина питомого опору є пропорційною до кореня квадратного із поглинутої дози опромінення.

Встановлено, що дія рентгенівського опромінення призводить до появу у зразках ефекту «радіаційної пам'яті». Тобто, якщо опромінювати не деформовані попередньо зразки кремнію рентгенівським опроміненням, а потім деформувати, то залежність опору від деформації є така ж, як і попередньо деформованих та опромінених зразків.

У попередньо опромінених зразках p-Si залежність опору від одновісного механічного навантаження істотно залежить від швидкості деформації. При малих швидкостях навантаження (8 мкм/хв) опір зростає при збільшенні механічного навантаження; при високих швидкостях (32 мкм/хв) – спадає.

Павлик Б.В. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри електроніки;
Лис Р.М. – асистент кафедри електроніки;
Дідик Р.І. – кандидат фізико-математичних наук, провідний інженер кафедри електроніки;
Шикоряк Й.А. – науковий співробітник кафедри електроніки.

- [1] Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин, Л.И. Хируненко, В.И. Яшник, ФТП 34(9), 1035 (2000).
- [2] В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Действие излучений на полупроводники (Наука, Москва, 1988).
- [3] V.V. Pavlyk, R.M. Lys, A.S. Hrypa, D.P. Slobodzyan, I.O. Khvyshchun, I.A. Shykoryak, R.I. Didyk, Ukr. J. Phys. 56(1), 64 (2011).
- [4] В.П. Савчин, Р.Я. Шувар, Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах (Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, Львів, 2008).
- [5] А.А. Скворцов, О.В. Литвиненко, А.М. Орлов, ФТП 7(1), 17 (2003).
- [6] А.М. Косевич, Теория кристаллической решётки (Наукова думка, Киев, 1988).
- [7] V. Pavlyk, M. Kushlyk, R. Didyk, Y. Shykoryak, D. Slobodzyan, A. Hrypa, R. Lys, B. Kulyk, Electronics and information technologies 2, 57 (2012).
- [8] Л.С. Берман, И.В. Грехов, Л.С. Костина, Е.И. Беякова, Е.Д. Ким, С.Ч. Ким, Письма в ЖТФ 25(1), 75 (1999).
- [9] V.V. Pavlyk, M.O. Kushlyk, R.I. Didyk, Y.A. Shykoryak, D.P. Slobodzyan, B.Y. Kulyk, Ukr. J. Phys. 58(8), 743 (2013).
- [10] В.О. Надточій, автореф. докт. дис. (Національний технічний університет «ХПІ», Харків, 2006).
- [11] В.А. Надточій, Н.К. Нечволод, Н.Н. Голоденко, Вісник Харківського університету, серія: Фізика, 600(7), 101 (2003).
- [12] А.М. Косевич, УФН 114(3), 509 (1974).
- [13] И.В. Островский, Л.П. Стебленко, А.Б. Надточий, ФТТ 42(3), 478 (2000).
- [14] В.В. Красильников, В.Ф. Клепиков, С.Е. Савотченко А.А. Пархоменко, Вопросы атомной науки и техники, серия: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение 5, 26 (2005).
- [15] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, А.Н. Крит, Д.В. Калиниченко, А.Н. Курилюк, С.Н. Науменко, ФТТ 54(7), 1356 (2012).
- [16] Л.П. Стебленко, С.М. Науменко, О.М. Кріт, О.В. Коплак, Ю.Л. Кобзар, А.М. Курилюк, О.В. Руденко. Вісник Київського університету, серія: фізико-математичні науки 3, 44 (2009).
- [17] Л.П. Стебленко, автореф. канд. дис. (Київ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2004).
- [18] V. Pavlyk, R. Didyk, Y. Shykoryak, R. Lys, M. Kushlyk, D. Slobodzyan, A. Hrypa, Electronics and information technologies 3, 28 (2013).
- [19] Б.В. Павлик, Р.І. Дидик, Й.А. Шикоряк, М.О. Кушлик, І.І. Чегіль, Теоретична електротехніка 61, 171 (2010).

B.V. Pavlyk, R.M. Lys, R.I. Didyk, J.A. Shykoryak

Investigation of Conductibility Changes of Irradiated p-Si Crystal by X-rays During the Recoverable Deformation

Ivan Franko National University of L'viv, 79000 L'viv, Ukraine

Changes in conductivity of irradiated and exposed to room temperature single-crystal p-Si samples in the process of compressing and removing mechanical stress were investigated. It was found that the resistance of the sample increases during its exposure under the load. Gradual and prolonged increases in sample resistance were noticed amid separate deformation cycles. "Radiation memory effect" was found out. It was also found that the sample resistance increases proportionally the square root of irradiation dose during the irradiation by X-rays.

Keywords: single-crystal silicon, uniaxial deformation, ohmic contacts, X-ray irradiation.