

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ СПЕКТРА ДЕЛЕНИЯ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ ИБР-2 С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ МОНОКРИСТАЛЛАМИ BN, BP(AIIIIV) И В₄C(AIIIIV)

А.Ю. Дидык¹⁾, А. Хофман^{1,2)}

¹⁾ *Лаборатория ядерных реакций, Объединенный институт ядерных исследований
ул. Жолио-Кюри, 6, 141980 Дубна, Россия,*

тел. (07)(49621)6-33-76, Факс: (07)(49621)6-50-83, e-mail: didyk@jinr.ru

²⁾ *Институт атомной энергии, 05-400 Отвоцк-Сверк, Польша, hofman@jinr.ru*

Выполнены расчеты дефектообразования в полупроводниковых монокристаллах В₄C (AIIIIV), BN и BP(AIIIIV) при их облучении в реакторе на быстрых нейтронах ИБР-2 нейтронами спектра деления. Показано, что дефектообразование по механизму упругого рассеяния от продуктов ядерных реакций $^4\alpha^+$ – частиц и ядер отдачи $^7\text{Li}^{3+}$ при захвате тепловых нейтронов ядрами легкого изотопа бора ($^{10}\text{B}^{5+}$) более, чем на два порядка превышает дефектообразование от быстрых нейтронов ($E_n > 0,1$ МэВ). Расчеты позволяют сделать вывод, что такое облучение позволяет создавать развитую вакансионную дефектную структуру в борсодержащих полупроводниковых монокристаллах (ППК) при однородном распределении вакансий по объему. Это может оказать важное значение на технологические применения, например, для более эффективной диффузии технологических химических примесей по вакансионному механизму при нанесении их на поверхность или имплантации в поверхность ППК при отжиге.

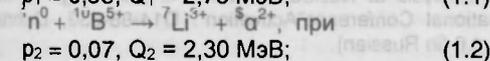
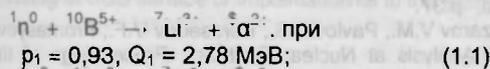
Введение

Изучение влияния различных видов облучения и сравнение их воздействия на полупроводниковые монокристаллы (ППК), как правило входящие в электронные устройства, которые находят применение в исследованиях в космическом пространстве, ядерно-физических установках (ядерных и термоядерных реакторах и источниках нейтронов), ускорительных центрах по высокоэнергетическим тяжелым ионам, кластерам частиц высоких энергий (C_{10} , C_{20} , C_{30} , C_{60} , Au_4), электронам и другим элементарным частицам (протонам, мю-мезонам и другим) представляет большое значение для фундаментальной радиационной физики твердого тела и для прикладного применения, в том числе и для современных бурно развивающихся нанотехнологий.

По-прежнему важное значение имеет проблема ионного легирования ППК технологическими примесями донорными или акцепторными. Создание развитой вакансионной структуры равномерно распределенной по объему ППК – одна из возможностей для диффузионного перераспределения неоднородно распределенных примесей.

Учет влияния продуктов от ядерных реакций на процессы дефектообразования

Ядерная реакция захвата нейтрона ядрами $^{10}\text{B}^{5+}$ с образованием α -частиц ядер отдачи $^7\text{Li}^{3+}$ имеет формулу:



В выражениях (1.1) и (1.2) $Q_{1,2}$ – энергетические выходы реакций, $p_{1,2}$ – вероятности данного распада.

В таблице 1 представлены параметры, характеризующие взаимодействие α -частиц и ядер

отдачи $^7\text{Li}^{3+}$ с борсодержащими ППК BN, BP и В₄C.

Вычисление параметров, характеризующих прохождение ионов через ППК выполнены на основе компьютерной программы TRIM-2000 [2]. Толщину образцов ППК считаем одинаковой и равной $Z_{\text{max}} = 50$ мкм. Пороговая энергия смещения для всех ППК выбрана равной $E_{\sigma} = 20$ эВ. В таблице 1 $N_{\text{vac}}^{\alpha\text{Li}}$ – число вакансий, создаваемых одной α -частицей и ядром отдачи $^7\text{Li}^{3+}$. В столбце для S_{inel}^{α} первая цифра относится к значению ионизационных потерь на входе в мишень, а вторая в максимуме ионизационных потерь энергии α -частиц. $\sigma_{\alpha, \text{Li}}^{\text{max}}$ – сечение дефектообразования за счет упругого рассеяния α -частиц и ядер отдачи $^7\text{Li}^{3+}$ в максимуме (пике Брега).

В работе [3] обсуждается образование дефектов под действием

нейтронов спектра деления реактора на быстрых нейтронах ИБР-2 [4] Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, то есть непосредственно за счет упругого рассеяния быстрых нейтронов (при $E_n > 0,1$ МэВ) и ядерных реакций (1) от тепловых нейтронов (при $0,01 \text{ эВ} < E_n < 0,45 \text{ эВ}$) в аморфном сплаве $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_2\text{Si}_{14}\text{B}_7$. В таблице 2 приведено соотношение полных потоков нейтронов различных энергий Φ_n при облучении данного аморфного сплава в канале установки "РЕГАТА" с каналом пневматической транспортировки контейнеров с образцами в активную зону реактора ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ [5-7]. В таблице 3 представлены расчетные значения полного числа N_n атомов ^{10}B в ППК BP, В₄C и BN, число образовавшихся α -частиц (N_{α}) и атомов отдачи $^7\text{Li}^{3+}$ (N_{Li}), полученных из выражения:

$$N_{\alpha, \text{Li}} = N_{\text{B}}^{10} \cdot \sigma_{\text{capture}} \cdot \Phi_n^{\text{тот}} \quad (2)$$

доз повреждений от α -частиц (D_{α}) и атомов отдачи $^7\text{Li}^{3+}$ (D_{Li}):

$$D_{\alpha, \text{Li}} = N_{\text{V}}^{\text{vac}} \cdot N_{\alpha, \text{Li}} / N_{\text{V}} \quad (3)$$

Здесь N_{V} – полное число атомов в образце ППК с толщиной 500 мкм и размерами $1 \times 1 \text{ см}^2$,

а также полное сечение дефектообразования:

$$D_{\alpha, Li}^{total} = D_{\alpha} + D_{Li}, \quad (4)$$

Как видно из таблицы 2 дефектообразование в ППК (BN, BP и V_4C) при флюенсе быстрых нейтронов $\Phi_n^{fast} = 1,8 \cdot 10^{17}$ п/см² и сечении дефектообразования $\sigma_d = (2 \pm 4) \cdot 10^{-22}$ сна см²/п (Флюенс взят как в работе [3] и соответствует флюенсу по тепловым нейтронам $\Phi_n^{тепл} = 2,1 \cdot 10^{17}$ п/см² в рассматриваемом здесь случае) составляет:

$$D_n^{fast} = \sigma_d \cdot \Phi_n^{fast} \approx (3,6 \pm 7,2) \cdot 10^{-5} \text{ сна}. \quad (5)$$

Из сравнения значений $D_{\alpha, Li}^{total} > 10^{-3}$ сна и D_n^{fast} можно сделать вывод, что дефектообразования в борсодержащих ППК при воздействии на них полного нейтронного спектра деления (без кадмиевых поглотителей) реактора на быстрых нейтронах типа ИБР-2 (ЛНФ ОИЯИ) происходит преимущественно за счет ядерной реакции (1). При этом создаваемые радиационные дефекты практически равномерно распределены по объему облучаемых ППК. В связи с тем, что в химический состав данных ППК, типа АIIIВIV (V_4C) и АIIIВV (BP и BN), входят только легкие химические элементы, то активации продуктов их распада с большими периодами полураспада практически не будет.

Но в случаях, когда захват тепловых нейтронов ядрами ${}^{10}B$ (см. ядерную реакцию (1)) происходит вблизи боковых сторон ППК и поскольку распад ядер ${}^{10}B$ происходит в геометрии 4π , то α -частицы и от атомы отдачи ${}^7Li^{3+}$, вылетающие в сторону боковых поверхностей ППК с глубиной $Z < R_p^{\alpha}$ и $Z < R_p^{Li}$, соответственно могут покинуть облучаемый образец. Так как практически 60-70% точечных дефектов образуются в зоне пика Брега – максимума дефектообразования, то такие α -частицы и от ядер отдачи ${}^7Li^{3+}$ будут несколько занижать значения дозы повреждений, начиная от глубин, соответствующих их проективным пробегам и линейно уменьшаться по мере приближения к боковым поверхностям. Это было показано в работе [3].

Отметим, что по мере прохождения тепловых нейтронов с энергиями $0,01 \text{ эВ} < E_n^{тепл} < 0,453 \text{ эВ}$ через плоскопараллельные пластинки образцов ППК будет происходить их поглощение за счет вступления в ядерные реакции (1.1) и (1.2). Этот процесс, как и процесс радиоактивного распада можно описать дифференциальным уравнением:

$$d\Phi(Z)/dZ = -\lambda Z \cdot \Phi(Z), \quad (6)$$

откуда находим общую зависимость числа тепловых нейтронов, дошедших до глубины Z от поверхности образца, например ППК:

$$\Phi(Z) = \Phi_0 \exp(-\lambda Z), \quad (7)$$

где $\Phi_0 \equiv \Phi_n^{тепл} = 2,1 \cdot 10^{17}$ п/см² (для рассматриваемого в данной работе случая).

Ясно, что наибольшее поглощение тепловых нейтронов за счет ядерных реакций (1) будет

происходить в ППК V_4C , в котором в 1 см³ содержится $1,0984 \cdot 10^{23}$ B^{10} /см³. Учитывая, что в природном химическом элементе боре содержится только 19,8 % примеси ${}^{10}B$, используя выражение (2) для вычисления числа произошедших ядерных реакций типа (1) в слое ППК V_4C с толщиной $\Delta Z = 1$ мкм, находим для полного числа проваимодействовавших с атомами ${}^{10}B$ тепловых нейтронов:

$$\Delta N_{\alpha, Li}(\Delta Z) = N_B^{10}(\Delta Z) \cdot \sigma_{capture} \cdot \Phi_n^{тепл} = 1,753 \cdot 10^{15},$$

где $N_B^{10}(\Delta Z = 1 \text{ мкм}) = 2,175 \cdot 10^{18}$ ядер. Следовательно при флюенсе тепловых нейтронов $\Phi_n^{тепл} = 2,1 \cdot 10^{17}$ п/см² даже грубая оценка пробега тепловых нейтронов дает значение для $Z_{max} \approx 2,1 \cdot 10^{17} / 1,753 \cdot 10^{15} = 120$ мкм. На этой глубине в мишени $\Phi_n^{тепл}(Z_{max}) = 0$. Отметим, что в данной оценке была взята линейная аппроксимация для зависимости поглощения тепловых нейтронов от глубины в мишени, но на самом деле реализуется более затянута экспоненциальная зависимость. Поэтому в расчетах и было взято значение толщины ППК $Z_{max} = 50$ мкм с тем, чтобы не учитывать эффекты с изменением концентрации образованных в результате реакции (1) α -частиц и ядер отдачи ${}^7Li^{3+}$.

Выводы

Расчеты позволяют сделать вывод, что такое облучение позволяет создавать развитую вакансионную дефектную структуру в борсодержащих полупроводниковых монокристаллах (ППК) при однородном распределении вакансий по объему. Это может оказать важное значение на технологические применения, например, для более эффективной диффузии технологических химических примесей по вакансионному механизму при нанесении их на поверхность или имплантации в поверхность ППК при отжиге.

Список литературы

1. Блатт Дж., Вайскопф В. Теоретическая ядерная физика. М.: Изд.: Иностранная литература, 1954. 658 с.
2. Biersack J.P., Haggmark L.G. //Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1980, B174, pp.257-269.
3. Голубок Д.С., Дидык А.Ю., Иванов Л.И., Новакова А.А., Семина В.К., Хофман А. //Радиационная физика твердого тела: Материалы XVII Международного совещания, Севастополь, Крым, 9-14 июля 2007 года.
4. Peresedov V.F., Rogov A.D. //J. Radioanal. and Nucl. Chem., Letters.- 1996, 214(4). - p.283.
5. M.V.Fronsayeva, S.S.Pavlov.//Preprint E14-2000-177.- 2000, Dubna, 2000. 8 p.
6. Nazarov V.M., Pavlov S.S., Peresedov V.F., Frontasyeva M.V. //JINR Rapid Communications.-1985, No.6-85, Dubna.- p.37.
7. Nazarov V.M., Pavlov S.S., Peresedov V.F., Frontasyeva M.V.// Analysis at Nuclear Reactors: Proceedings of the International Conference "Activation". D14-88-833, Dubna, 1988. p.6 (in Russian).

Секция 2. "Радиационные эффекты в твердом теле"

ТАБЛИЦА 1.1. Характеристические параметры при взаимодействии α -частиц с энергией $E_\alpha = 1,77$ МэВ и ядер отдачи ${}^7\text{Li}^{3+}$ с энергией $E_L = 1,01$ МэВ, образованными в реакции (1.1) с тепловыми нейтронами с борсодержащими полупроводниковыми монокристаллами (ППК).

Для α -частиц (энергия $E_\alpha = 1,77$ МэВ)

ППМК		N, атом/см ³	T _{пл} , К	R _p ^{α} МКМ	N _V ^{α} , вак/ α	S _{inel} ^{α} , кэВ/нм	σ_{Li}^{max} , сна·см ² / α
BP	2,89	0,833·10 ²³	1400	4,72±0,10	142,9	0,34/0,43	3,40·10 ¹⁷
B ₄ C	2,52	1,373·10 ²³	2723	4,26±0,07	106,4	0,36/0,53	2,37·10 ¹⁷
BN	2,34	1,135·10 ²³	3000	4,87±0,10	130,4	0,34/0,46	2,70·10 ¹⁷

Таблица 1.2. Характеристические параметры при взаимодействии ядер отдачи ${}^7\text{Li}^{3+}$ с энергией с энергией $E_L = 1,01$ МэВ, образованными в реакции (1.1) с тепловыми нейтронами, с борсодержащими полупроводниковыми монокристаллами (ППК).

Для ионов ${}^7\text{Li}^{3+}$ ($E_L = 1,01$ МэВ)

ППМК	ρ , г/см ³	N, атом/см ³	T _{пл} , К	R _p ^{Li} МКМ	N _V ^{Li} , вак/Li	S _{inel} ^{Li} , кэВ/нм	σ_{Li}^{max} , сна см ² /Li
BP	2,89	0,833·10 ²³	1400	2,13±0,14	316,8	0,71	6,80·10 ¹⁷
B ₄ C	2,52	1,373·10 ²³	2723	1,88±0,07	244,4	0,79	5,60·10 ¹⁷
BN	2,34	1,135·10 ²³	3000	2,27±0,10	292,7	0,91	5,85·10 ¹⁷

Таблица 2. Характеристики нейтронов по их энергиям и набранным флюенсам при облучении сплава Fe₇₇Ni₂Si₁₄B₇ [3], σ_d - примерное сечение дефектообразования на быстрых нейтронах при $E_n > 0,1$ МэВ, σ_{capture} - сечение реакции захвата (1).

Тип Нейтронов	Энергия, E _n , эВ	Флюенс, п/см ²	σ_d , сна·см ² /п	σ_{capture} , барн
Тепловые	0,01-0,45	$\Phi_n^{\text{тепл}} = 2,1 \cdot 10^{17}$	-	3838 [3]
Резонансные	0,45-10 ⁵	$\Phi_n^{\text{резон}} = 4,7 \cdot 10^{17}$	-	-
Быстрые	10 ⁵ -2,0·10 ⁷	$\Phi_n^{\text{быстр}} = 1,8 \cdot 10^{17}$	$\approx (2 \pm 4) \cdot 10^{-22}$	-

ТАБЛИЦА 3. В таблице 3 представлены расчетные значения полного числа N_B¹⁰ атомов ¹⁰B в ППК BP, B₄C и BN, число образовавшихся α -частиц (N _{α}), атомов отдачи ${}^7\text{Li}^{3+}$ (N_{Li}), доз повреждений от α -частиц (D _{α}) и от атомов отдачи N_{Li} (D_{Li}), полное сечение дефектообразования: D _{α} ,Li^{total} = D _{α} + D_{Li}, при флюенсе тепловых нейтронов $\Phi_n^{\text{тепл}} = 2,1 \cdot 10^{17}$ п/см² и толщине образцов 50 мкм.

ППК	Число атомов в объеме (N ^V) 1x1x0,005 см ³ (V=0,005 см ³)	N _B ¹⁰ , атом (19,8%)	$\Phi_n^{\text{тепл}}$, п/см ²	σ_{capture} , барн	N _{α} /N _{Li} , ·10 ¹⁶	D _{α} /D _{Li} , ·10 ³ сна	n_{Li}^{total} , ·10 ³ на
BP	4,165·10 ²⁰	4,12·10 ¹⁹	2,1·10 ¹⁷	3838	3,26	1,11/2,47	3,58
B ₄ C	6,865·10 ²¹	1,09·10 ²⁰	2,1·10 ¹⁷	3838	8,79	1,35/3,13	4,48
BN	5,675·10 ²⁰	5,62·10 ¹⁹	2,1·10 ¹⁷	3838	4,52	1,03/2,33	3,36

INTERACTION OF SPECTER FISSION NEUTRONS OF REACTOR ON FAST NEUTRONS IBR-2 WITH SEMICONDUCTOR SINGLE CRYSTALS BN, BP (AIIIBV) AND B₄C (AIIIBV)A. Yu. Didyk¹⁾, A. Hofman^{1,2)}¹⁾Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie str., 6, 141980 Dubna, Russia, office phone. (07)(49621)6-33-76, Fax: (07)(49621)6-50-83, e-mail: didyk@jinr.ru²⁾Institute of Atomic Energy, 05-400 Otwoc-Swierk, Poland, hofman@jinr.ru

Calculations of damage creation at semiconductor single crystals B₄C (AIIIBIV) and BN, BP (AIIIBV) under its irradiation into fast neutrons reactor IBR-2 by fission specter of neutrons were carried out. It was shown that damage creation by elastic scattering mechanism on semiconductor atoms of fission fragments as α^- - particles and nuclear recoil - ${}^7\text{Li}^{3+}$ produced by thermal neutrons in nuclear reactions with light isotope of ¹⁰B more then two order higher damage creation by fast neutrons ($E_n > 0,1$ MeV). Calculation shown that such irradiations allow to create developed vacancies structure at single crystal semiconductors (SCS) with homogeneous vacancy distribution. This effect can be used for following technological applications, as example for more effective diffusion of technological chemical impurities using vacancies mechanism after covering of SCS surface or implantation its to the layer near surface at the processes of annealing.