

## ВОЗМОЖНЫЕ ЭФФЕКТЫ ЗАХВАТА БЫСТРЫХ БОМБАРДИРУЮЩИХ ИОНОВ $^{84}\text{Kr}^{7+}$ С НАЧАЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ $E_{\text{Kr}}=394$ МэВ и ПВА ОТ НИХ В РЕЖИМ АКСИАЛЬНОГО КАНАЛИРОВАНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО GaAs

Л.А. Власукова<sup>1)</sup>, А.Ю. Дидык<sup>2)</sup>, А. Хофман<sup>2,3)</sup>, В.Н. Ювченко<sup>1)</sup>, Е.А. Грачева<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Кафедра физической электроники, Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: vlasukova@bsu.by

<sup>2)</sup> Лаборатория ядерных реакций, Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 141980 Дубна, Россия, 6, e-mail: didyk@jinr.ru

<sup>3)</sup> Институт атомной энергии, 05-400, Отвоцк-Сверк, Польша, e-mail: hofman@jinr.ru

<sup>4)</sup> Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Староборисовский тракт, 36, 220141, Минск, Беларусь

В работе представлены результаты исследования радиационных повреждений в кристаллах GaAs [100], облученных тяжелыми ионами  $^{84}\text{Kr}^{7+}$  с энергией  $E_{\text{Kr}}=394$  МэВ до флюенса  $\Phi t=5 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>. Распределение повреждений по глубине кристалла вдоль траекторий ионов выявлялось с помощью селективного химического травления поперечных сечений.

### Введение

Для получения поперечных сечений кристаллы скалывались перпендикулярно поверхности, а затем обрабатывались в селективном травителе с последующим исследованием в растровом электронном микроскопе JSM-840. Как показало исследование протравленных сколов радиационные повреждения наблюдаются не только в приповерхностных областях, соответствующих высоким электронным потерям энергии ионов, но и в более глубоких слоях кристалла за проективным пробегом ионов. На рис. 1 и 2, в кристаллах GaAs представлена зона повреждений в области максимума ядерного торможения.

### Основная часть

В этой области наблюдается узкая контрастная полоса (показана стрелкой на рис.1) при  $R \approx R_p = 30,5$  мкм. За ней (более глубоко) зарегистрирован еще один слой непрерывный слой повреждений с шириной  $\Delta R \approx 15$  мкм, то есть достигающий глубины  $Z \approx 1,5R_p$  (рис. 2).

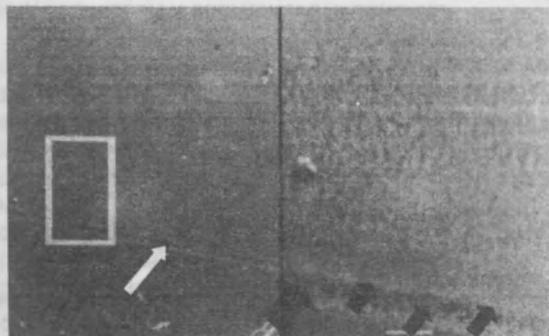


Рис. 1 – Изображение в растровом электронном микроскопе поперечного скола GaAs, облученного ионами  $^{84}\text{Kr}^{7+}$  (394 МэВ,  $5 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>) и обработанного в селективном травителе. Левая часть снимка представляет собой увеличенное изображение области, выделенной прямоугольником на правой части снимка. Стрелкой показана узкая полоса максимума дефектообразования в области пика Брэгга

В таблице 1 представлены результаты расчетов с использованием компьютерной программы TRIM-98 проективного пробега ионов  $^{84}\text{Kr}^{7+}$  с энергией  $E_{\text{Kr}}=394$  МэВ, значения их неупругих потерь энергии  $-(\partial E/\partial z)_{\text{inel}}$  и дозы повреждений вблизи поверхности  $D(Z \approx 0) = \sigma_{\text{Kr}}^d(Z \approx 0) \times (\Phi t)$  и в максимуме повреждений (подтравленной и проявившейся области)  $D(Z \approx 30,5) = \sigma_{\text{Kr}}^d(Z \approx 30,5) \times (\Phi t)$  при флюенсе  $(\Phi t) = 5 \cdot 10^{12}$  иону/см<sup>2</sup>.

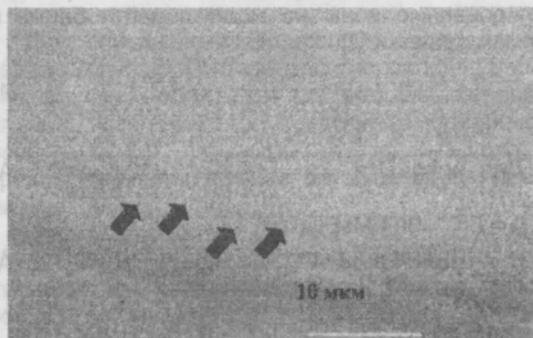


Рис. 2 – Широкий поврежденный слой повреждений от  $\text{Kr}^{7+}$ , расположенный под полосой максимума дефектообразования в области пика Брэгга

Таблица 1

Ион	$^{84}\text{Kr}^{7+}$
Энергия, МэВ	394
Флюенс, ион/см <sup>2</sup>	$5 \cdot 10^{12}$
$-(\partial E/\partial z)_{\text{inel}}$ , кэВ/нм	15,4
$D(Z \approx 0)$ , сна	$1,78 \cdot 10^{-4}$
$D(Z \approx 30,5)$ , сна	$1,93 \cdot 10^{-2}$

В таблице 2 представлены максимально переданные атомам Ga и As энергии, вычисленные по известной формуле:

$$E_{\text{Ga/As}}^{\text{max}} = \frac{4 M_{\text{Kr}} M_{\text{Ga/As}}}{(M_{\text{Kr}} + M_{\text{Ga/As}})^2} E_{\text{Kr}} \quad (1)$$

и соответствующие проективные пробеги.

Таблица 2

Тип иона	E, МэВ	R <sub>p</sub> , мкм
<sup>84</sup> Kr <sup>7+</sup>	394	30,3 ± 0,7
Ga	389,6	33,7 ± 0,7
As	392,7	32,3 ± 0,6

Как видно, расположение сильно растравленной узкой полосы на глубине Z=30,5 мкм, отмечающей конец пробега ионов криптона, очень хорошо совпадает с расчетным значением проективного пробега и глубины залегания максимума дефектообразования  $R_p = 30,3 \pm 0,7$  мкм. Пробеги первично выбитых и тормозящихся в мишени GaAs атомов Ga и As значительно меньше, чем глубина залегания широкой полосы дефектов (рис.2). По нашим предположениям, эта широкая полоса повреждений связана с треками от первично выбитых ионов Ga и As, которые попали в критические углы аксиального каналирования для ПВА Ga и As можно вычислить по формуле (см.[1, 2]):

$$R_{\text{ион}} = \frac{2Z_1 Z_2 e_0^2}{(E_{\text{ион}} d)^{1/2}} \quad (2)$$

$$\text{при } E_{\text{ион}} \geq \frac{2Z_1 Z_2 e_0^2 d}{a^2} \quad (3)$$

Считаем далее, что для GaAs параметры, входящие в (2) и (3) можно взять следующими: для гранецентрированной кубической решетки и направления [100]  $d \approx 0,5 a_0 = 0,5 \times 5,69 = 2,845$  Å, а параметр  $a$  – радиус экранировки Томаса-Ферми, то есть минимальное расстояние, на которое каналированные ионы не могут подойти ближе к атомам решетки [2]:

$$a = \frac{0,468}{\left[ Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right]^{1/2}} \text{ Å} \quad (4)$$

1) Для ионов Kr:  $Z_1 = \frac{Z_{\text{Ga}} + Z_{\text{As}}}{2} = 32$ ,  $a_{\text{Kr}} = 0,1$  Å,

$$E_{\text{ион}} = E_{\text{Kr}}^{\text{max}} = 394 \text{ МэВ};$$

2) Для ПВА Ga:  $Z_1 = Z_{\text{Ga}} = 31$ ,  $Z_2 = 32$ ,  $a_{\text{Ga}} = 0,105$  Å,

$$E_{\text{ион}} = E_{\text{Ga}}^{\text{max}} = 389,6 \text{ МэВ};$$

3) Для ПВА As:  $Z_1 = Z_{\text{As}} = 33$ ,  $Z_2 = 32$ ,  $a_{\text{As}} = 0,102$  Å,

$$E_{\text{ион}} = E_{\text{As}}^{\text{max}} = 392,7 \text{ МэВ}.$$

Тогда находим,  $E_{\text{ион, Kr}}^{\text{пороз}} > \frac{27 \dots Z_1 e_0^2 d}{a^4} = 9,44 \text{ МэВ}$ , а

соответствующие критические углы каналирования для ПВА Ga, As и ионов <sup>84</sup>Kr<sup>7+</sup> с максимальными переданными им энергиями имеют значения:

$$\Psi_{\text{крит}}^{\text{Kr}}(E_{\text{Kr}}^{\text{max}}) = 0,31^\circ \text{ и } \Psi_{\text{крит}}^{\text{Ga, As}}(E_{\text{Ga, As}}^{\text{max}}) = 0,29^\circ. \quad (5)$$

Отметим, что при облучении монокристаллов GaAs образцы специально не ориентировались по отношению к пучку ионов <sup>84</sup>Kr<sup>7+</sup>. Тем не менее, при рассеянии ионов <sup>84</sup>Kr<sup>7+</sup> и соударениях, близких к лобовым, как видно из (5) возможно попадание ПВА Ga, As и ионов <sup>84</sup>Kr<sup>7+</sup> в режим каналирования при соблюдении условия:

$$E_{\text{ион, Kr}}^{\text{пороз}} < E_{\text{Ga, As}} < E_{\text{Ga, As}}^{\text{max}} \quad (6)$$

## Выводы

1. Измеренные пробеги ионов <sup>84</sup>Kr<sup>7+</sup> с энергией  $E_{\text{Kr}} = 394$  МэВ в монокристалле GaAs [100] находятся в согласии с проектным пробегом и положением максимума дефектообразования (сильно растравленная зона на рис.1), вычисленным с использованием компьютерной программы TRIM-98.

2. Как видно из рис.2, структура сильно растравленной области состоит из двух областей, расположенных на расстоянии, примерно равном:  $\Delta Z \approx 3,08$  мкм, при этом центральная часть как бы не растравлена совсем. Этот экспериментальный факт требует дальнейших исследований.

3. Видимые за сильно растравленными областями структуры (см. рис.1 и 2) и простирающиеся до глубин, примерно равных 45 мкм, по-видимому, обусловлены выбитыми при упругом рассеянии ионов <sup>84</sup>Kr<sup>7+</sup> атомов-ионов Ga и As или самими ионами <sup>84</sup>Kr<sup>7+</sup>, вошедшими в режим аксиального каналирования (см. выражения (2)-(5)).

## Список литературы

1. Калашников Н.П. Когерентные взаимодействия заряженных частиц в монокристаллах, М.: Атомиздат, 1981.
2. Кумахов М.А., Ширмер Г. Атомные столкновения в кристаллах, М.: Атомиздат, 1980.

## POSSIBILITIES OF CAPTURE OF SWIFT BOMBARDING HEAVY <sup>86</sup>Kr IONS WITH ENERGY $E_{\text{Kr}} = 394$ MeV AND FKA FROM ITS INTO AXIAL CHANNELING REGIME UNDER IRRADIATION GaAs SINGLE CRYSTAL

L.A. Vlasukova<sup>1</sup>, A.Yu. Didyk<sup>2</sup>, A. Hofman<sup>2,3</sup>, V.N. Yuvchenko<sup>1</sup>, E.A. Gracheva<sup>4</sup>  
 Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie, 6, 141980 Dubna, Russia, didyk@jinr.ru

The results of radiation damage study at GaAs [100] after irradiation by swift heavy <sup>84</sup>Kr<sup>7+</sup> with energy  $E_{\text{Kr}} = 394$  MeV up to the fluence  $\Phi = 5 \cdot 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>. The distribution of damage along the projected ranges of ions in crystal was investigated using selective chemical etching of cross-sections.