

01;10,11

Моделирование процесса двухпучковой высокодозной ионной имплантации в твердотельные мишени

© А.Ф. Комаров

Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко,
220064 Минск, Белоруссия
e-mail: kff@ffe.bs.uib.by

(Поступило в Редакцию 27 июля 2000 г. В окончательной редакции 18 января 2001 г.)

Разработана физико-математическая модель и программа динамического моделирования BEAM2HD, которая позволяет моделировать процесс одно- или двухпучковой высокодозной ионной имплантации в многослойные и многокомпонентные мишени. При этом число слоев не превышает трех, а число разных типов атомов в каждом слое не превышает семи. Моделирование реализовано методом Монте-Карло. Приводятся численные результаты работы по формированию сверхтвердых слоев $C_{x \rightarrow 3}N_{y \rightarrow 4}$ путем двухпучковой высокодозной ионной имплантации азота в многослойную систему $Si_3N_4/C/Si_3N_4/Si$.

Введение

В настоящее время существуют два основных метода моделирования пробегов ионов в твердых телах. Первый использует подход Монте-Карло [1–4] и рассматривает историю движения каждого иона в отдельности, второй основан на решении интегродифференциальных уравнений переноса частиц [5–8]. Метод Монте-Карло отличается гибкостью, он позволяет производить точные расчеты для многокомпонентных и многослойных мишеней, в том числе в случае облучения поверхностей сложной формы, что позволяет моделировать, например, современные технологические процессы производства СБИС или взаимодействие плазмы с поверхностью вакуумной камеры. Однако большинство стандартных методов моделирования ионной имплантации (в том числе и указанные выше [1–8]) сформулировано в приближении низких доз легирования. Такой подход не учитывает целого ряда эффектов, проявляющихся при высокодозной ионной имплантации и связанных с процессом накопления имплантированной примеси, каскадного перемешивания, распыления и набухания мишени. Между тем высокодозная ионная имплантация широко используется для синтеза соединений, применяемых в промышленности и микроэлектронике. Недавно были разработаны программы динамического моделирования [9–12], частично основанные на хорошо известных статистических программах TRIM [4] и MARLOWE [1] для учета некоторых из упомянутых выше дозовых эффектов. К существенным недостаткам вышеуказанных методов следует отнести невозможность моделирования процесса одновременной многопучковой имплантации. Однако следует ожидать, что структурная перестройка и соответственно формирование новых фаз в процессе одновременной многопучковой ионной имплантации будут принципиально отличаться по сравнению с раздельным процессом имплантации пучком одного сорта ионов, а затем другого.

В данной работе дается описание программы BEAM2HD, основанной на методе Монте-Карло, которая позволяет моделировать торможение ионов

в аморфных твердых телах. Данная программа представляет возможность моделировать процесс одно- или двухпучковой высокодозной ионной имплантации в многослойные и многокомпонентные мишени. При этом число слоев не превышает трех, а число разных типов атомов в каждом слое не превышает семи. Обсуждаются возможности данной программы для предсказания выхода распыления и имплантационных профилей, а также исследуется влияние отдельных высокодозных эффектов на профили распределения имплантированной примеси. Коэффициенты распыления определяются программой BEAM2HD для диапазона энергий от 1 до 300 keV при облучении кремния ионами аргона при нормальном угле падения. Рассчитаны глубинные концентрационные профили ионов азота с энергией 150 keV для доз от $4.5 \cdot 10^{17}$ до $1 \cdot 10^{18}$ N/cm².

Предполагается модель по формированию сверхтвердых слоев $C_{x \rightarrow 3}N_{y \rightarrow 4}$ путем высокодозной двухпучковой ионной имплантации азота в многослойную систему $Si_3N_4/CSi_3N_4/Si$. На основании программы BEAM2HD проведен расчет профилей распределения атомов азота в данной многослойной системе, определена толщина послойной эрозии за счет распыления в процессе имплантации, а также предложены оптимальные энергии и дозы имплантации азота для формирования слоя, близкого по стехиометрии к C_3N_4 .

Формулировка модели

а) Рассмотрение процессов рассеяния и торможения. В программе BEAM2HD при моделировании торможения и рассеяния влетающих ионов и атомов отдачи ядерное и электронное торможение рассматриваются как отдельные процессы. При этом для ядерного рассеяния применяется аппроксимация бинарных столкновений, в то время как электронное торможение рассматривается как непрерывный процесс. Для расчета углов рассеяния на ядрах использована приближенная формула из [4], а электронные потери энергии рассчитываются в соответствии с теорией Линдхарда и др. [13].

Учтено влияние следующих основных факторов, сопутствующих высокодозной ионной имплантации [14,15]: послойное распыление поверхности мишени, рассеяние имплантируемых ионов на ранее внедренных атомах примеси, распухание мишени в результате имплантации больших доз ионов.

Описываемая модель дает возможность описать имплантацию ионов примеси в мишень при помощи одного или двух пучков. При этом каждый пучок характеризуется своей начальной энергией, массой и зарядом ионов пучка, дозой и количеством моделируемых траекторий для каждого пучка. Каждой траектории ставится в соответствие "псевдочастица", представляющая собой некоторый интеграл внедряемой дозы, по аналогии с программами TRIDYN [11] и HIDOS [12], моделирование траекторий каждого пучка осуществляется поочередно. Мишень может состоять не более чем из трех разных физических слоев. Изначально вся толщина мишени (моделируемая область) делится на 100 равных динамических слоев, а в процессе ионного облучения динамическое изменение состава мишени рассматривалось в соответствии с подходами, предложенными в работах [11,12]. При этом изначально каждый слой мишени (физический, а не динамический) может содержать до семи разных компонент.

б) Учет фактора распухания и распыления мишени. Описание процессов распухания и распыления мишени в процессе высокодозной ионной имплантации подробно приводится в наших работах [14,15]. Если в результате моделирования очередной траектории "псевдочастица" останавливалась в некотором глубинном (динамическом) слое, то этот слой распухает и величина толщины данного слоя описывается формулой

$$\Delta(\Delta l) = \frac{\Delta D_{\text{imp}} \cdot 10^{-16}}{N_{\text{imp}}} (\text{\AA}), \quad (1)$$

где $N_{\text{imp}} (\text{\AA}^{-3})$ — атомарная плотность внедряемой примеси типа imp.

Если общая доза внедряемой примеси типа imp равна D_{imp} и моделирование ионной имплантации осуществляется с помощью N_H траекторий, то каждой траектории ставится в соответствие доза $\Delta D_{\text{imp}} = D_{\text{imp}}/N_H$.

Розыгрыш столкновений ионов и атомов отдачи, а также изменение стехиометрического состава в каждом динамическом слое подробно описаны в работе [15].

Толщина распыляемой поверхности мишени в результате налета одной "псевдочастицы" рассчитывается следующим образом:

$$d_{\text{imp}} = \frac{Y(E_0)}{N_{\text{target}}} \Delta D_{\text{imp}} 10^{-16} (\text{\AA}), \quad (2)$$

где $N_{\text{target}} (\text{\AA}^{-3})$ — атомарная плотность мишени, $Y(E_0)$ — коэффициент распыления.

Для расчета коэффициента распыления применялась эмпирическая формула, предложенная в [16,17], которая

пригодна для всех имеющихся экспериментальных данных в широком диапазоне энергий в случае нормального падения пучка. Однако для определенного интервала энергий и комбинаций ион-атом целесообразно, как будет показано далее, использовать формулу Зигмунда [18] для $Y(E_0)$ в случае перпендикулярного облучения мишени и в предположении линейного каскада.

Результаты и обсуждение

а) Распыление Si ионами Ar. На рис. 1 экспериментальные коэффициенты распыления из работ [19–26], приведенные в работе [12], сравниваются с расчетными данными, полученными по программе HIDOS [12] и BEAM2HD. Поверхностная энергия связи для кремния была взята равной $U_s = 7.8 \text{ eV}$ в [12] и в данной работе для расчета по [18], а для расчета по [16,17] использовано значение $U_s = 4.63 \text{ eV}$ из [17]. Наилучшее согласие между расчетными данными и экспериментом во всех случаях достигается для высоких энергий. Хорошее согласие расчета Y программой BEAM2HD с экспериментом для всего интервала энергий достигается при использовании эмпирической формулы из [16,17]. Однако для интервала энергий $5 < E < 50 \text{ keV}$ в

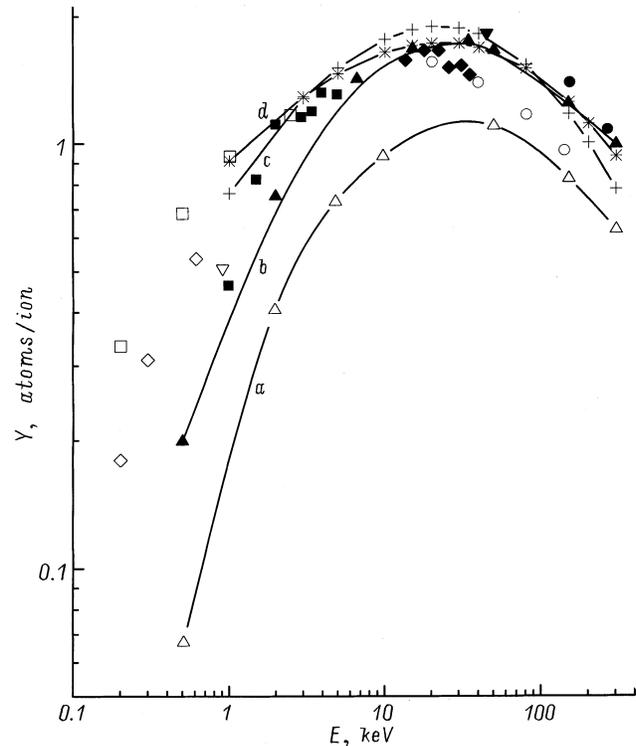


Рис. 1. Рассчитанные и измеренные коэффициенты распыления для облучения кремния ионами аргона при нормальном угле падения. *a* и *b* — расчетные данные из [12] (U_s было взято равным 7.8 и 3.9 eV соответственно); *c, d* — результаты настоящей работы; *c* — расчет Y по [15,16] ($U_s = 4.63 \text{ eV}$); *d* — расчет Y по [17] ($U_s = 7.8 \text{ eV}$). Экспериментальные данные: \square — [18], \blacksquare — [19], \circ — [20], \bullet — [21], ∇ — [22], \blacktriangledown — [23], \diamond — [24], \blacklozenge — [25].

случае распыления кремния из [16,17]. Однако для интервала энергий $5 < E < 50$ keV в случае распыления кремния аргоном расчет Y по [18] лучше согласуется с экспериментальными данными. Как видно из рис. 1, программа NIDOS [12], в которой расчет распыления проводится с учетом полных каскадов столкновений, вызванных первичным ионом при условии ($T \geq U_s$, где T — энергия, переданная атомам мишени), занижает коэффициент распыления в низкоэнергетическом диапазоне, в то время как использование эмпирической формулы из [16,17] позволяет достаточно хорошо рассчитывать коэффициент распыления для широкого интервала энергий 0.1–300 keV. Можно предположить, что в NIDOS [12] для случая низких энергий пучка ионов $E < 10$ keV занижено сечение ядерного торможения, так как изменение значения поверхностной энергии связи для кремния с 7.8 до 3.9 eV не приводит к удовлетворительному согласию с экспериментом в этом интервале энергий (кривые a и b на рис. 1).

б) Высокодозная имплантация N в Si. Для создания скрытых слоев Si_3N_4 по КНИ-технологии путем ионной имплантации необходимы высокие дозы азота [27–34]. В данном случае толщина верхнего слоя кремния имеет большое значение. Если дозовые эффекты приводят к значительному изменению концентрационного профиля или пробега, следует установить необходимую имплантационную энергию с тем, чтобы достигнуть желаемых глубин.

На рис. 2 приведены рассчитанные на основании BEAM2HD распределения ионов азота с энергией 150 keV и дозами $4.5 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ в кремнии в сравнении с NIDOS [12], аналитическими расчетами, выполненными на основании распределения Пирсона-IV [34], и экспериментальными данными [33]. Как видно, форма и ширина расчетных профилей практически не зависят от дозы ионов. Проективный ионный пробег, однако, уменьшается почти линейно с увеличением дозы ионов в исследованном диапазоне доз $5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. При дозе $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, приводящей к количеству азота, равному 65 at.%, в максимуме профиля этот сдвиг составляет $\approx 5\%$ (24 nm). Основная причина для сдвига профиля — распыление. Определенный по формуле (4) из нашей более ранней работы [14] коэффициент распыления $Y(E_0) = 0.119$ атомов на ион. Рассчитанные концентрационные профили распределения азота в области максимума превышают примерно на 8% профили, полученные по NIDOS [12]. Проективный пробег R_p тоже несколько отличается в настоящей работе (для дозы $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$), он равен 321 nm, а в [12] $R_p \approx 318$ nm. Это различие можно объяснить выбором сечений ядерного торможения, а не расчетом толщины послойного распыления, так как коэффициенты распыления в [12] $Y = 0.12$ и полученный в данной работе $Y = 0.119$ почти равны.

Имплантация высоких доз азота приводит к изменениям в силе торможения и распуханию мишени. Ожидается, что непрерывно увеличивающаяся атомная плотность в глубинной области должна приводить к уменьшению

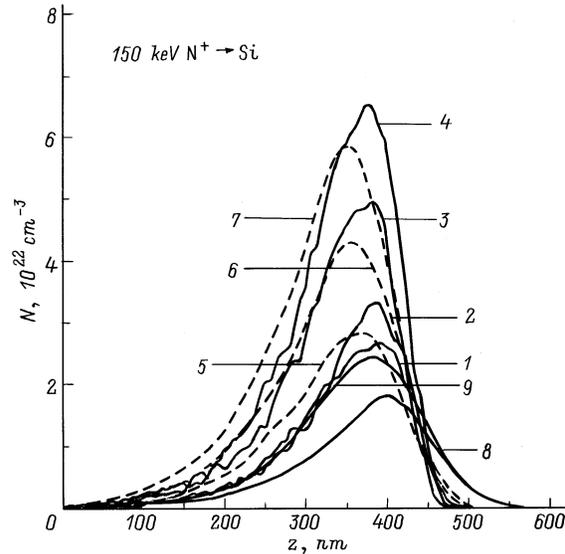


Рис. 2. Рассчитанные глубинные профили распределения азота в кремнии для разных доз имплантации. Сплошные кривые — результаты настоящей работы: доза $4.5 \cdot 10^{17}$ (1), $5 \cdot 10^{17}$ (2), $7.5 \cdot 10^{17}$ (3), $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (4); штриховая — работа [12]: $5 \cdot 10^{17}$ (5), $7.5 \cdot 10^{17}$ (6), $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (7); 8 — эксперимент [33] для дозы $4.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$; 9 — Пирсон-IV [34] для дозы $4.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.

в проективном пробеге и ширине профиля, но и тот и другой эффект в большей степени компенсируется распуханием мишени (34 nm после облучения до $1 \cdot 10^{18}$ атом/ cm^2).

На рис. 2 проведено также сравнение расчетного (кривая 1) и экспериментального [33] (кривая 8) профилей распределения ионов азота с энергией 150 keV и для дозы $4.5 \cdot 10^{17} \text{ N/cm}^2$. Как видим, наблюдается соответствие глубин залегания максимумов расчетного и экспериментального профилей распределения имплантированного азота в кремнии. Однако расчетный концентрационный профиль распределения азота в кремнии гораздо уже экспериментального и в области максимума превышает экспериментальный профиль примерно на 25%. Это отличие в некоторой степени можно объяснить несоответствием (завышением) выбранной при расчете массовой плотностью формируемых преципитатов нитрида кремния Si_xN_y , а она выбиралась равной 3.19 g/cm^3 [35]. Но основной причиной различия расчетного и экспериментального профилей распределения азота в кремнии является отсутствие учета как в программе BEAM2HD, так и в программах TRIDYN [11] и NIDOS [12] процесса радиационно-стимулированной диффузии (РСД) имплантированного азота в кремнии, приводящей при таких дозах имплантации к значительному уширению и соответственно уменьшению объемной концентрации в области максимального распределения. Различие между формами аналитического профиля (кривая 9), полученного на основании распределения Пирсона-IV [34], и экспериментального (кривая 8) в основном также объясняется моделированием без учета РСД.

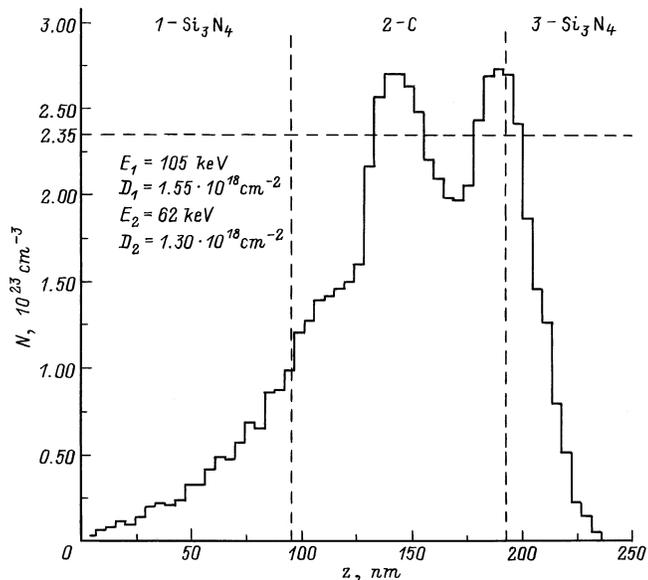


Рис. 3. Распределение по глубине азота, имплантированного в режиме двухпучковой ионной имплантации в многослойную систему $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{C}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$.

Таким образом, даже для доз $1 \cdot 10^{18} \text{ N/cm}^2$ обнаружены только небольшие изменения в пробеге ионов и ширине профиля. Послойное распыление приводит к поверхностной эрозии на 26 нм при дозе имплантации $1 \cdot 10^{18} \text{ N/cm}^2$. Полученные результаты в основном согласуются с результатами теоретической [12] и экспериментальной [33] работ. Однако для более адекватного описания процессов взаимодействия ионных пучков с твердым телом при высокодозной ионной имплантации наряду с процессами распыления, распухания и изменения плотности мишени необходим еще учет процессов РСД и формирования новых фаз.

в) Моделирование процесса формирования сверхтвердых слоев C_3N_4 . Предполагается модель по формированию сверхтвердых слоев $\text{C}_x \rightarrow 3\text{N}_y \rightarrow 4$ путем высокодозной одновременной двухпучковой ионной имплантации азота в многослойную систему $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{C}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$. Слои нитрида кремния под и над углеродным слоем служат в качестве барьера для диффузии атомов азота из углеродного слоя в данной системе, а также как затравочные слои для роста фазы C_3N_4 с тем же типом решетки, что и в случае Si_3N_4 . На рис. 3 приведены результаты моделирования одновременной двухпучковой ионной имплантации азота в систему $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{C}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$. Массовая плотность слоев Si_3N_4 выбиралась равной 3.19 g/cm^3 [35], а плотность углеродного слоя (структура алмаза) — равной 3.516 g/cm^3 . Толщины нитридных слоев и углеродного слоя в данной системе выбирались исходя из технической возможности проведения подобного эксперимента. При моделировании процесса формирования однородного концентрационного профиля азота в углеродном слое со стехиометрическим составом, близким к 4/3, решались две задачи.

1. На основании решения обратной задачи [36] (полиэнергетическая ионная имплантация) были получены приближенные значения энергий и доз для формирования однородного профиля азота с объемной концентрацией $2.35 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ в слое углерода. Задавался режим двух имплантаций.

2. По программе BEAM2HD (рис. 3) подобраны более точно энергия и доза каждого из двух пучков, а также рассчитан суммарный концентрационный профиль азота в углеродном слое. Значения энергий пучков выбирались из условия останковки имплантированных атомов азота в углеродном слое, а интегральные дозы каждого из пучков — из условия получения однородного суммарного концентрационного профиля азота в углероде со стехиометрическим составом, близким к 4/3.

Как видим из рис. 3, суммарный концентрационный профиль азота в области 2 максимумов (для заданных параметров имплантации каждого из пучков) несколько превышает значение $2.35 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$. Однако следует предположить, что в силу радиационно-стимулированной диффузии эти два пика сгладятся. Послойное распыление приводит к поверхностной эрозии на 45 нм при суммарной дозе имплантации двух пучков $D_{\text{imp}} = 2.85 \cdot 10^{18} \text{ N/cm}^2$. Для учета фактора осаждения углеродной пленки из остаточных газов в камере [37], что приводит к уменьшению пробегов атомов азота, энергии имплантации двух пучков азота при моделировании выбирались несколько завышенными. На рис. 3, как видно, моделируемый суммарный профиль распределения азота в углеродном слое заглублен на $\cong 50 \text{ nm}$ для компенсации влияния вышеуказанного фактора.

Подводя итог, отметим, что на основании разработанной программы BEAM2HD можно предсказать коэффициент распыления, толщину послойной эрозии за счет распыления в процессе имплантации и имплантационный профиль для одно- или двухпучковой высокодозной ионной имплантации в многослойные и многокомпонентные мишени.

Заключение

Разработана физико-математическая модель и программа BEAM2HD для моделирования процесса одно- или двухпучковой высокодозной ионной имплантации в твердотельные многослойные и многокомпонентные мишени. Данная программа позволяет учитывать следующие эффекты: рассеяние имплантируемых ионов на ранее внедренных атомах примеси, распыление поверхности мишени различными ионными пучками, а также влияние эффекта распухания мишени. В качестве выходных данных работы программы можно получить таблицы и графики распределений имплантированных ионов в мишени, длин пробегов ионов, распределения вакансий, созданных в процессе имплантации, распределения электронных и ядерных потерь энергии имплантированных частиц. На основании программы BEAM2HD проведен расчет профилей распределения атомов азота

в многослойной системе $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{C}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$, определена толщина послыонной эрозии за счет распыления в процессе имплантации, а также предложены оптимальные энергии и дозы имплантации азота для формирования однородного слоя, близкого по стехиометрии к C_3N_4 .

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, а также Международного фонда им. Ж. Миановского (Фонд поддержки науки, Варшава).

Список литературы

- [1] *Robinson M.T., Torrens M.I.* // Phys. Rev. 1974. Vol. B9. P. 5008–5024.
- [2] *Guttner K., Ewald H., Schmidt H.* // Rad. Eff. 1972. Vol. 13. P. 111–114.
- [3] *Ishitani T., Shimizu R., Murata K.* // Jap. J. Appl. Phys. 1972. Vol. 11. P. 125.
- [4] *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon Press, 1985.
- [5] *Gibbons J.F.* // Nucl. Instr. and Meth. 1987. Vol. B22. P. 83–86.
- [6] *Lizunov Yu.D., Ryazanov A.I.* // Rad. Eff. 1982. Vol. 60. P. 95–100.
- [7] *Burenkov A.F., Komarov F.F., Kumakhov M.A., Temkin M.M.* Tables of Ion Implantation Spatial Distributions. New York; London; Paris: Gordon and Breach, 1986.
- [8] *Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Темкин М.М.* // Поверхность. 1989. № 4. С. 15–21.
- [9] *Karpuzov D.S.* // Phys. St. Sol. (a). 1986. Vol. 94. P. 365.
- [10] *Mazzone A.M.* // Appl. Phys. 1987. Vol. A42. P. 193.
- [11] *Möller W., Eckstein W., Biersack J.P.* // Comput. Phys. Commun. 1988. Vol. 51. P. 355–368.
- [12] *Schönborn A., Heckng N., Kaat E.H.* // Nucl. Instr. and Meth. 1989. Vol. B43. P. 170–175.
- [13] *Lindhard J., Scharff M., Schiott H.E.* // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1963. Vol. 33. N 14. P. 1–36.
- [14] *Komarov A.F., Komarov F.F., Żukowski et al.* // Nukleonika. 1999. Vol. 44. N 2. P. 363–368.
- [15] *Комаров А.Ф., Комаров Ф.Ф., Шукан А.Л. и др.* // Изв. Национальной академии наук Беларуси. Сер. физико-технических наук. 1999. № 3. С. 19–23.
- [16] *Yatamura Y., Matsunami N., Itoh N.* // Rad. Eff. 1983. Vol. 71. P. 65.
- [17] *Matsunami N et al.* // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1984. Vol. 31. N 1. P. 2
- [18] *Sigmund P.* // Phys. Rev. 1969. Vol. 184. P. 383.
- [19] *Zalm P.C.* // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. P. 2660.
- [20] *Southern A.L., Willis W.R., Robinson M.T.* // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 153.
- [21] *Blank P., Wittmaack K.* // J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. P. 1519.
- [22] *Nisse E.P.E.* // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 480.
- [23] *Poate J.M., Brown W.L., Homer R. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 1976. Vol. 132. P. 345.
- [24] *Andersen H.H., Bay H.L.* // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. P. 1919.
- [25] *Laegreid N., Wehnwr G.K.* // J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 365.
- [26] *Sommerfeldt H., Mashkova E.S., Molchanov V.A.* // Phys. Lett. 1972. Vol. 38A. P. 237.
- [27] *Pavlov P.V., Kruze T.A., Tetelbaum D.I. et al.* // Phys. St. Sol. (a). 1976. Vol. 36. P. 81.
- [28] *Komarov F.F., Solov'yev V.S., Tishkov V.S. et al.* // Rad. Eff. 1983. Vol. 69. P. 179.
- [29] *Reeson K.J.* // Nucl. Instr. and Meth. 1987. Vol. B19/20. P. 269.
- [30] *Kachurin G.A., Akhmetov V.D., Tyschenko I.E., Plotnikov A.E.* // Nucl. Instr. and Meth. 1993. Vol. B74. P. 399–404.
- [31] *Markwitz A., Arps M., Bauman H. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 1997. Vol. B124. P. 505–514.
- [32] *Кривелевич С.А., Маковийчук М.И., Паршин Е.О.* // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 5. С. 363–369.
- [33] *Barabanenkov M.Yu., Agafonov Yu.A., Mordkovich V.N. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 2000. Vol. B171. P. 301–308.
- [34] *Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Темкин М.М.* Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
- [35] Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Landolt-Börnstein. New Series III/7c1 / Ed. K.H. Hellwege. Heidelberg: Springer, 1978.
- [36] *Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 3. С. 559–566.
- [37] *Komarov F.F., Komarov A.F., Pilko V.V. et al.* // Proc. Intern. Symp. "Ion Implantation of Science and Technology". Lublin (Poland), 1997. P. 38–41.