

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМ ТИТАНОВОЕ ПОКРЫТИЕ/КРЕМНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ОСАЖДЕНИЕМ ТИТАНА НА КРЕМНИЙ В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫМИ ИОНАМИ

О.М. Михалкович, С.М. Барайшук, И.С. Ташлыков

Белорусский государственный педагогический университет, Минск, Беларусь,

Введение

Осаждение тонких плёнок на кремниевые пластины представляет как научный так и практический интерес. Оно позволяет формировать изолирующие или проводящие слои, лиофильные или лиофобные в разных средах поверхности изделий. Чтобы исключить введение в приповерхностный слой атомов благородных газов, желательно применять для радиационного ассистирования ионы атомов осаждаемого покрытия. Для управления свойствами покрытий при осаждении покрытий необходимо изучать композиционный состав систем покрытие/подложка, их морфологию и структуру. Поэтому в настоящем исследовании мы изучали элементный состав системы покрытие/кремний, сформированной ионно-ассистированным осаждением покрытия на кремний, глубинное распределение дефектов и топографию полученной структуры.

Результаты и обсуждение

Для осаждения титановых покрытий на кремний в условиях ионного ассистирования использовали резонансный источник вакуумной дуговой плазмы (вакуум 10^{-2} Па) Элементный послойный анализ конструкций пленка/кремний

выполняли используя резерфордское обратное рассеяние (РОР) ионов гелия He^+ с $E_0 = 2.0$ МэВ и компьютерное моделирование экспериментальных спектров РОР по программе RUMP [1]. Для построения глубинных профилей компонентов изучаемых конструкций мы используем понятие положения исходной поверхности подложки (ПИПП), которое определяли в экспериментах по введению ионной имплантацией в Si пластину ионов ксенона с энергией 10, 20, или 40 кэВ интегральным потоком от $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $2.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в качестве маркера.

В ранее проведенных экспериментах по осаждению покрытий было установлено, что при определённых условиях на поверхности пластин возможно появление капельной фракции. Так на рисунке 1 видно присутствие капельной фракции на поверхности структур кремний/титановое покрытие, которая создаёт существенные неоднородности на поверхности структуры покрытие/подложка и приводит к увеличению шероховатости поверхности.

Анализ топографии систем покрытие/подложка и чистого кремния и определение ее параметров был проведен с применением атомно-силового микроскопа. Были выбраны площадки размером 5x5 мкм и учтены рекомендации предложенные в [2].

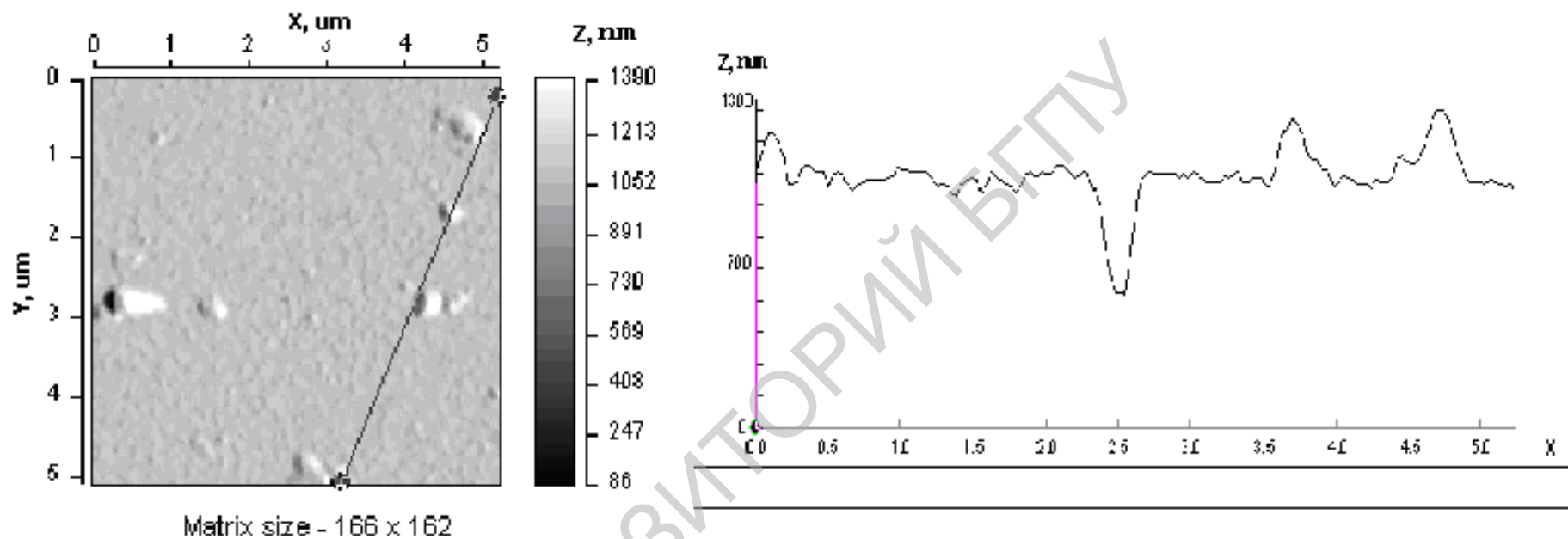


Рисунок 1 – топография поверхности кремния, с титановым покрытием (потенциал 3 кВ, расстояние до источника 5 см) и диаграмма неровностей

По изображению топографии (рис. 1) видно, что площадь капель в 10 – 40 превышает площадь неоднородностей основного рельефа поверхности структур покрытие/подложка, а высота этих вкраплений в 3 – 7 раз превышает среднее отклонение остального рельефа поверхности. Таким образом капельная фракция увеличивает шероховатость на ~ 15 – 20 %.

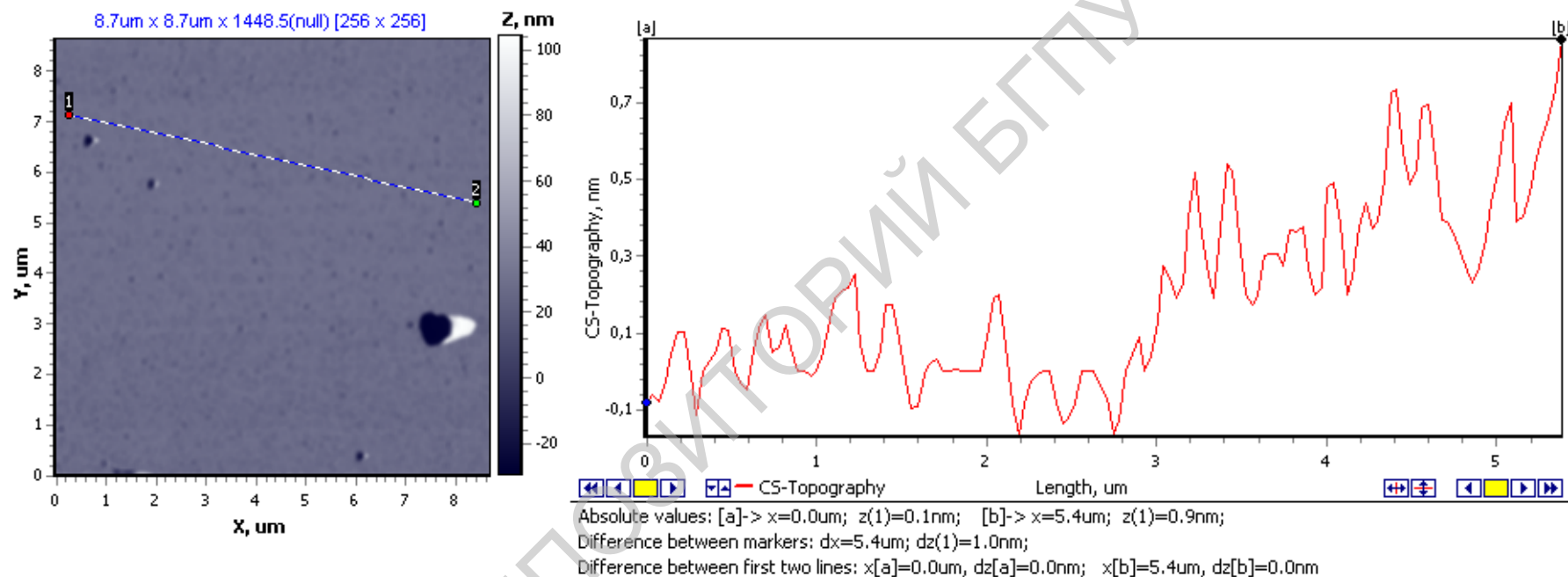


Рисунок 2 – топография поверхности кремния, с титановым покрытием (потенциал 3 кВ, расстояние до источника 15 см) и диаграмма неровностей

Для устранения этого эффекта использовалась методика, обсуждённая в [3], в соответствии с которой было увеличено расстояние между источником и подложкой.

Применение такого приёма в опытах по ионно-ассистированному нанесению металлосодержащих покрытий в условиях самооблучения на кремний привело хоть и к уменьшению скорости нанесения покрытия, но и уменьшило удельную площадь капельной фракции на поверхности образца с осаждёнными покрытиями в 4 – 6 раз (рис. 1 и рис. 2).

Таблица 1 – Характеристики топографии поверхности исходного кремния и модифицированного нанесением металлопокрытий в течение 1 часа при энергии ассистирования 7 кэВ, площадка сканирования 5x5 мкм

Параметр	Кремний исходный	Ti
Средняя шероховатость, нм	0.169	1.101
Отношение полной площади участка к его проективной площади	1.0027	1.0044

Как следует из данных, приведенных в таблице 3.3, средняя шероховатость исходного кремния весьма незначительна и изменяется от 0.2 нм до 1.1 нм на поверхности кремния с покрытием на основе титана. Полная площадь фрагмента практически не отличается от проективной площади. Из таблицы видно, что при нанесении всех изученных металлопокрытий наблюдаются качественно подобные изменения свойств топографии поверхности, заключающиеся в увеличении шероховатости и отношения полной площади поверхности к проективной.

На рисунке 3 показаны профили глубинного распределения компонентов конструкции, получаемой при нанесении титановой пленки на Si, без введенного ксенонового маркера и с ним.

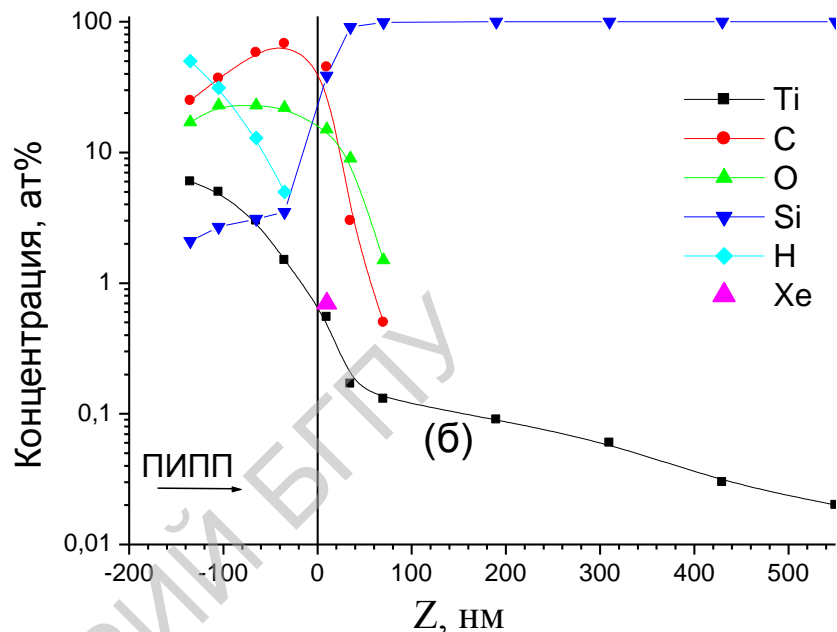
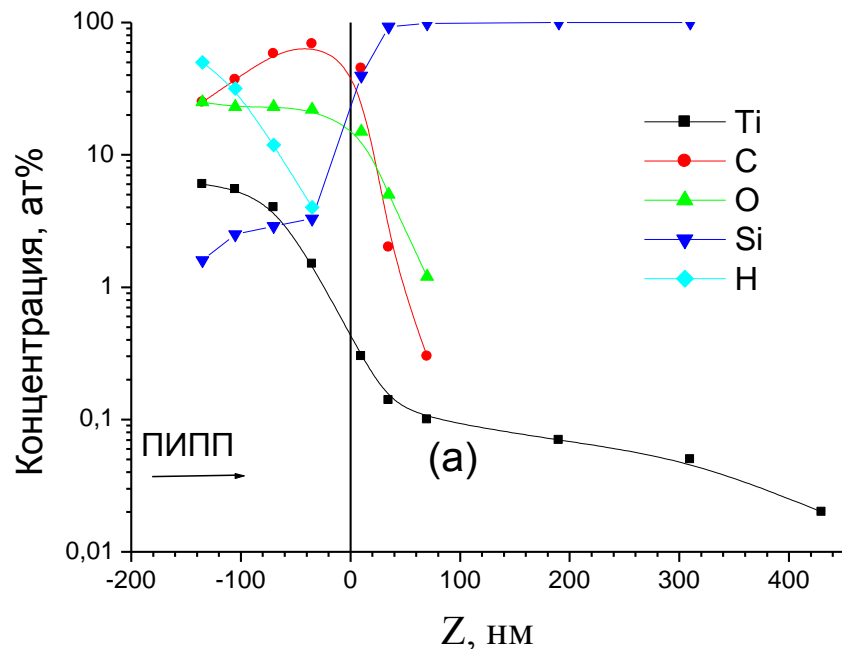


Рисунок 3. Распределение элементов по глубине в структурах Ti покрытие/Si, сформированных: (а) – методом ИАНПУС, б) – методом ИАНПУС на кремнии с предварительно имплантированным маркером Xe с энергией 20 кэВ и интегральным потоком 9×10^{14} Xe/cm²

Профиль Ti характеризуется концентрацией, снижающейся от 6 ат % на поверхности, до 1 ат % в области межфазной границы системы. Атомы Ti идентифицируются в Si на глубине ~430 нм с концентрацией ~0.03 ат %, что свидетельствует об их радиационно-стимулированной диффузии вглубь в процессе нарастания покрытия под радиационным воздействием ассистирующих ионов. Водород распределен в покрытии неравномерно, и его концентрация спадает от 49.9 ат % на поверхности пленки, до 5 ат % в области положения исходной поверхности подложки. В кремнии водород не идентифицируется.

Кислород распределен в покрытии неравномерно: его концентрация возрастает с 17 ат % на поверхности покрытия до 23 ат % вблизи исходной поверхности подложки, а в кремнии на глубине < 100 нм его концентрация снижается в несколько раз до значений порядка десятых долей атомного процента. Профиль С качественно подобен пространственному распределению кислорода в покрытии, однако его концентрация в примерно 2,5 раза выше. В подложке же количество углерода в 2 раза ниже количества кислорода на сопоставимой глубине. Кислород и углерод проникают в подложку на глубину ~ 70 нм.

Анализируя полученные результаты, рис. 3 а и б, отметим, что атомы углерода и кислорода проникают в кремниевую подложку на ~ 30 нм глубже, если в систему покрытие/подложка предварительно вводился маркер ксенона. Атомы же титана проникают в кремний на глубины во много раз большие проективного пробега рассчитанного по программе TRIM, и в разы превышающие проникновение атомов кислорода и углерода в кремний. В пластине Si с предварительно имплантированными ионами Xe^+ глубина проникновения атомов титана увеличивается еще на ~ 120 нм. При этом концентрация атомов титана на сопоставимой глубине возрастает примерно в 1.5 раза. Такой эффект проникновения можно объяснить радиационно-усиленной диффузией при осаждении покрытий атомов металла в глубь кремния по дефектам, создаваемых ионами ксенона. Заметим, что при предварительной имплантации ионов ксенона в качестве маркера в кремний наблюдается незначительное увеличение концентрации атомов кремния в покрытии, что может также свидетельствовать о роли дефектов в усилении процессов встречной диффузии.

Диффундируя на большую глубину, атомы Ti способствуют диффузии атомов кислорода и углерода. Это также можно объяснить тем, что при введении ксенонового маркера в кремниевой подложке образуются дефекты, по которым и происходит усиленное проникновение атомов компонентов покрытия. При этом отметим что, концентрация кислорода и

углерода на сопоставимой глубине в кремнии с введенным маркером как и титана выше, чем в образцах только с покрытием, рис. 3 а и б.

Отметим, что физические процессы формирования структур Ti покрытие/подложка качественно сопоставимы с процессами, протекающими при нанесении на кремний кобальтовых покрытий.

Для изучения пространственного распределения радиационных дефектов, генерируемых в конструкциях покрытие/подложка ассистирующими ионами Ti^{+} , применяли метод РОР/КИ ионов He^{+} с энергией 2 МэВ. Разрешение детектора было 25 кэВ. Величина среднего проективного пробега элементов в матрице были рассчитаны при помощи компьютерной программы TRIM-89 [2].

На рис. 4 представлены профили распределения по глубине радиационных дефектов в кремнии (междоузельные атомы Si) имплантированном ксеноном(1), с титановым покрытием на исходном Si (2) и на Si с ксеноном (3).

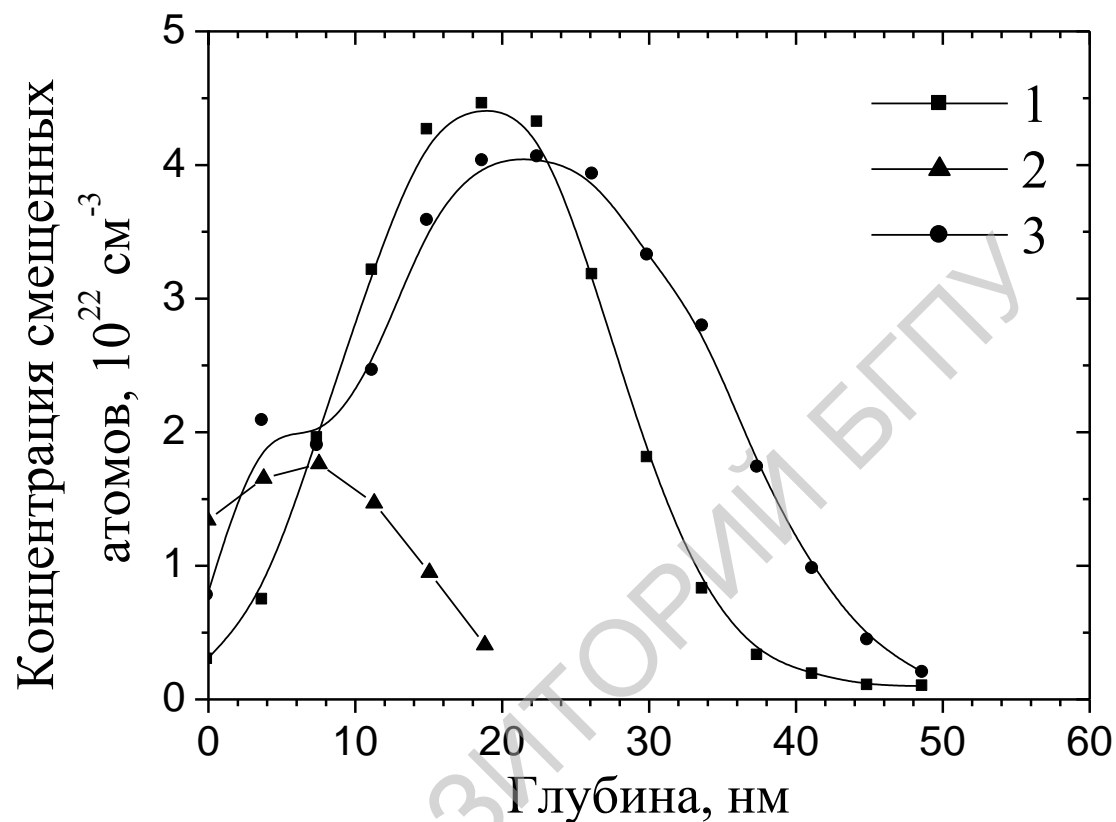


Рисунок. 4. Распределение концентрации дефектов по глубине в кремнии после: 1 - имплантации ионов Xe^+ с $E = 40$ кэВ и дозой: $D=27 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 2 – только ионно-ассистированного в условиях самооблучения нанесения титана, 3 – ионно-ассистированного осаждения Ti на кремний с предварительно имплантированным Xe .

Глубина максимальной концентрации дефектов, производимых при имплантации ионов ксенона, сравнима с глубиной проникновения ионов Xe^+ с соответствующими энергиями в кремнии, которая рассчитана по программе TRIM.

Так для ионов ксенона с энергией 40 кэВ средний проективный пробег и страгглинг пробега составляет $R_p \pm \Delta R_p = 27,1 \pm 7,1$ нм.

Характер повреждения структуры кремния при его модифицировании, отсутствие “полочки” на профиле дефектов, генерируемых ионами Ti^+ , кривая 2 на рис. 3, свидетельствует о том, что смещенные в междоузлия атомы Si диффундируют на поверхность и далее входят в состав покрытия.

Максимальная концентрация смещенных из узлов атомов кремния, полученная при имплантации ионов He^+ , уменьшается при последующем ионно-ассистированном нанесении Ti, Co покрытий в условиях самооблучения, что объясняется нами с активацией миграционных процессов в глубь и к поверхности кремния, что также способствует вхождению атомов кремния в покрытие, с одной стороны, и миграции атомов компонентов покрытия в глубь подложки.

Заключение

В данной работе обсуждается композиционный состав структур Ti покрытие/кремниевая подложка, полученных методом ионно-ассистированного нанесения. Показано взаимопроникновение атомов покрытия в подложку и встречная диффузия атомов подложки в покрытие. Определены значения шероховатости образцов. Показано, что шероховатостью поверхности образцов можно управлять, создавая поверхность, для разных функциональных применений. Рассмотрены механизмы диффузии элементов и предложено качественное объяснение явлениям протекающим на границе раздела покрытие/подложка.

Список использованных источников

1. Chu W.K., Mayer J.W., Nicolet M.A. Backscattering spectroscopy. – N.Y.: Academic Press, 1978. – 377 p.
2. Atomic force microscopy tip radius needed for accurate imaging of thin film surfaces / K.L. Westra, D.J. Thomson // J. Vac. Sci. Technol. B, – 1994, – Vol. 12, – N. 6, – P. 3176 – 3181.
3. Изучение физико–химических процессов на межфазной границе систем покрытие – пленка, облучаемых ускоренными ионами в условиях управляемой плотности выделенной энергии. Разработка «чистой» технологии нанесения тонких слоёв материалов, сопровождаемого облучением ускоренными ионами : отчет о НИР (заключ) / Фонд фундаментальных исследований Республики Беларусь; рук. темы И.С. Ташлыков. Минск., 1994. – 109 с. – № Ф8 – 123.
4. Шипатов Э.Т. Обратное рассеяние быстрых ионов: теория, эксперимент, практика. – Ростов на Дону: РГУ, 1988. – 153 с.