

В. 68



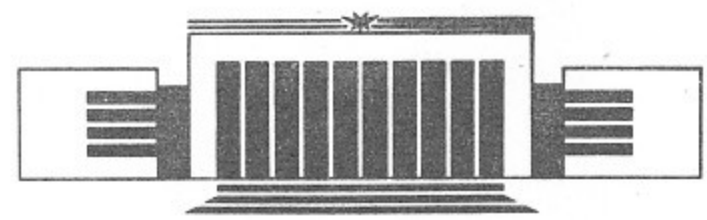
Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера

В.И. Волосов, И.Н. Чуркин

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД
ИМПЛАНТАЦИИ ИНТЕНСИВНЫМИ
АТОМАРНЫМИ ПОТОКАМИ В
ОБЛАСТИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ
(0.5 кэВ – 10 кэВ)

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИНВ. № _____

ИЯФ 96-58



НОВОСИБИРСК

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИМПЛАНТАЦИИ ИНТЕНСИВНЫМИ АТОМАРНЫМИ ПОТОКАМИ В ОБЛАСТИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ (0,5 КЭВ - 10 КЭВ).

В.И. Волосов, И.Н. Чуркин

ГНЦ РФ "Институт Ядерной Физики
им. Г.И. Будкера СО РАН", 630090, Новосибирск

Аннотация

В работе предлагается решение проблемы увеличения производительности имплантационных установок путем перехода к имплантации в области промежуточных энергий (0,5 кэв - 10 кэв) интенсивными атомарными потоками. Одним из вариантов источника атомарных потоков является источник быстрых тяжелых атомов типа ИСП. Физические принципы работы источника определяют его преимущества по сравнению с традиционными ионными источниками. Приводятся результаты экспериментов по облучению мишеней из титана и ниобия пучками атомов углерода ($\langle W \rangle \sim 2.5$ кэв, $j \sim 50$ мА/см²), показавшие возможность высокоэффективной имплантации атомарными потоками в области промежуточных энергий.

HIGH EFFECTIVE IMPLANTATION METHOD BY INTENSIVE
ATOMIC FLOWS IN INTERMEDIATE ENERGY RANGE
(0.5 KEV - 10 KEV)

V.I. Volosov, I.N. Churkin

The Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

The decision of the problem of the increase of the productivity of implantation devices is offered due to the implantation in the intermediate energy range (0,5 кэв - 10 кэв) by intensive atomic flows. One of version of source of atomic flows is the source of the fast heavy atoms of type ISP. The physical principles of the source define its advantages in the comparison with conventional ion sources. The experimental results of the irradiation of titanium and niobium targets by carbon atom beams ($\langle W \rangle \sim 2.5$ кэв, $j \sim 50$ мА / см²) shown the possibility of the high effective implantation by atomic flows of the intermediate energy range.

@ ГНЦ РФ "Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН"

1 Введение

Введение легирующих примесей в различные материалы позволяют управлять их свойствами.

Во многих случаях достаточно легировать и модифицировать поверхностные слои. Для этого используют имплантационные методы поверхностной обработки материалов.

С помощью ионной имплантации можно внедрять в приповерхностную область мишени практически любой элемент в контролируемых дозах. Имплантация приводит к неравновесной природе процесса и позволяет сплавлять материалы, не смешиваемые при обычных методах металлургии. Отсутствие резкой границы между легированным слоем и подложкой обеспечивает плавный переход между этими структурами.

Качество легированного поверхностного слоя определяется толщиной (300-1000 А и более) и концентрацией примеси (единицы-десятки %).

Толщина легированного слоя определяется глубиной проникновения имплантируемой частицы в твердое тело. Зависимость среднего пробега имплантируемой частицы от энергии близка к линейной, а концентрация примеси описывается гауссовым распределением [1].

2 Проблемы имплантации.

Традиционно для целей имплантации применяют ионные пучки с энергиями, обеспечивающими проникновение иона в материал на требуемую глубину.

Для непрерывных ионных имплантеров характерные энергии ионов в зависимости от сочетаний "ион-мишень" лежат в диапазоне 40-100 кэВ [2].

Концентрация легируемой примеси определяется глубиной проникновения и предельной дозой имплантации [3]: $D = (n_0 \cdot R_p) / S$, где n_0 - концентрация атомов мишени, S - коэффициент распыления, R_p - проективный пробег.

Для увеличения предельной дозы и толщины легированного слоя часто повышают энергию ионов, что снижает коэффициент распыления и увеличивает глубину проникновения.

Но при этом значительно возрастает стоимость высокоэнергетических имплантерных установок. Кроме того, повышение энергии ведет к значительному росту мощности имплантируемого пучка, что может перегреть мишень. При температуре $T > 2/3 T_{пл}$ изменяется структура мишени [4].

Для повышения производительности имплантационной обработки при заданной мощности падающего потока, определяемой температурными режимами обрабатываемой мишени, необходимо снижать энергию имплантируемых частиц.

При снижении энергии значительно уменьшается коэффициент распыления, что увеличивает концентрацию легируемого элемента в поверхностном слое.

По всей видимости, существует нижняя граница имплантации - при энергии до 100-200 эВ падающие частицы не проникают вглубь материала, а осаждаются на поверхности.

Вопрос о возможности эффективной имплантации в области промежуточных энергий (0.5-10 кэВ) дискутируется в течение долгого времени.

Как известно, в классической теории снижение энергии имплантируемой частицы приводит к уменьшению глубины проникновения, и, соответственно, толщины легированного слоя.

В кристаллических материалах существует эффект "каналирования" - проникновение падающей частицы в мишень вдоль каналов, образованных плотно упакованными атомными рядами [1]. В этом случае пробеги могут увеличиваться в 2-50 раз.

Существует ряд теоретических работ [5,6] предсказывающие многократное увеличение (до 100-1000 раз) глубины проникновения имплантируемых частиц по сравнению с проективным пробегом за счет влияния помимо энергии частиц таких параметров имплантации, как интенсивность потока, температура мишени.

Возникающая усиленная диффузия, в первую очередь радиационно-стимулированная, значительно изменяет классическое распределение имплантируемого элемента в мишени [7]. При этом значительно увеличивается и предельная доза имплантации

$$D = \frac{n_0 \cdot R_p \cdot (1 + L_d \cdot q)}{S}$$

где L_d - диффузная длина дефекта, q - вклад радиационно-стимулированной диффузии в предельную дозу, причем этот вклад растет с уменьшением энергии.

Некоторые экспериментальные работы подтверждают влияние параметров имплантации на глубину проникновения частиц в мишени [8,9,10,11].

Следовательно, можно сделать вывод о возможности имплантации интенсивными потоками частиц промежуточных энергий.

Для ионных имплантеров получение высоких интенсивностей ионного потока затруднено из-за ограничений на предельный ионный ток по объемному заряду $I \sim W^{3/2} / M^{1/2}$,

где W , M - энергия и масса ионов.

При снижении энергии ионов уменьшается интенсивность ионного потока, особенно существенно для ионов больших масс, наиболее предпочтительных для целей имплантации (Ti, Ni, Mo, W и т.д.), что приводит к значительному росту времени облучения.

Одна из возможностей увеличения ионного тока - ионно-плазменная имплантация [12,13]. В плазменный объем помещается обрабатываемое изделие, на которое подается импульсное отрицательное напряжение, вытягивающее ионы.

Данный способ обладает рядом недостатков: загрязнение плазмы из-за распыления поверхности мишени; при росте плотности тока возникают электрические пробой, разряд переходит в дуговой. Кроме того, существует проблема получения плазменного разряда с тяжелыми (металлическими) ионами.

Практически все эти проблемы решаются при имплантации интенсивными атомарными потоками в области промежуточных

энергий. Получить такие потоки можно, используя специальные мощные источники атомарных потоков.

Один из таких источников, источник типа ИСП, описание которого приводится ниже, основан на следующих физических принципах:

А) Ускорение ионов происходит в объеме плазмы. При этом в плазме должны стационарно существовать электрические поля для ускорения ионов поперек магнитного поля до требуемых энергий. При выполнении этого условия не существует практически никаких ограничений на величину тока ускоряемых ионов.

В) Быстрые тяжелые ионы замагничены в объеме плазмы источника. Поток ускоренных ядер тяжелых атомов выводится из источника не в виде ионов, а в виде нейтральных атомов. Транспортировка атомарных потоков не создает каких-либо ограничений по объемному заряду.

С) Тяжелые ионы образуются при ионизации относительно холодных нейтральных атомов (своеобразный газ нейтральных атомов). Эти атомы, в свою очередь, образуются при распылении материала катода быстрыми тяжелыми ионами плазмы.

Следует подчеркнуть, высокую эффективность использования рабочего вещества и низкие энергетические потери. Каналы для ухода ионов из плазмы - падение на катод или перезарядка в объеме плазмы и уход за ее пределы в виде быстрых тяжелых атомов. Эффект самораспыления приводит к тому, что ион, падая на катод, фактически рождает сам себя.

Энергетическая цена одного быстрого атома ~ 1 кэВ, основные затраты - на распыление.

Принцип получения рабочего вещества за счет самораспыления материала катода позволяет источнику работать практически с любым материалом.

Рассмотрим подробнее принцип работы и конструкцию источника быстрых тяжелых атомов типа ИСП. Краткие сообщения об этом источнике были приведены на конференциях в Екатеринбурге [14] и Дубне [15] и Томске [16].

3 Источник быстрых тяжелых атомов.

Источник быстрых тяжелых атомов - установка со скрещенными полями (аксиальное магнитное и радиальное электрическое).

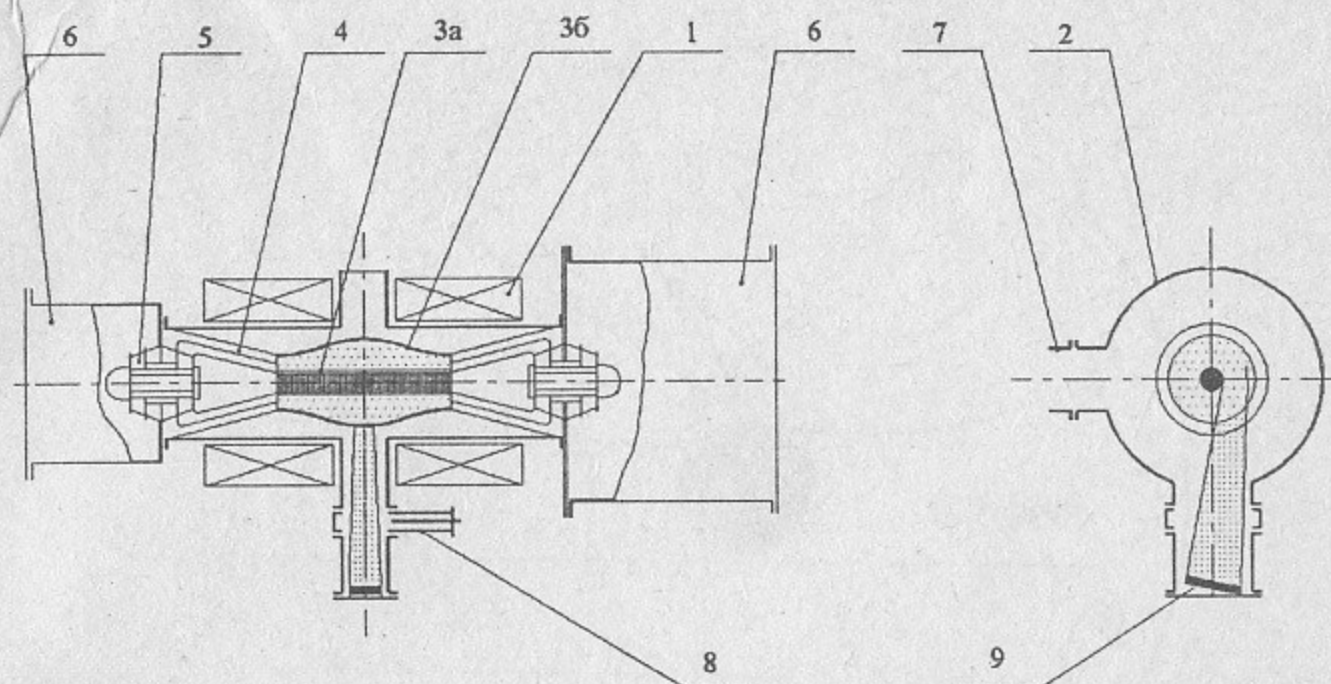


Рис.1 Источник быстрых тяжелых атомов (1- катушки электромагнита, 2-вакуумная камера, 3а-катод, 3б-анод, 4-торцевые электроды, 5-проходной изолятор, 6-система ВВ питания, 7-выпускной патрубков, 8-вакуумный лайнер, 9-облучаемый образец.)

Рассмотрим основные процессы, происходящие в источнике: рожденный в плазме ион падает на катод и распыляет с его поверхности атом. Радиальное электрическое поле в объеме плазмы поддерживается за счет электронной проводимости вдоль силовых линий магнитного поля и системы торцевых электродов (рис.1).

Распыленный тяжелый атом летит в радиальном направлении и ионизуется в плазме. В скрещенных полях источника тяжелый ион ускоряется, двигаясь по циклоидальной траектории (рис.2). Часть быстрых тяжелых ионов падает на катод и за счет эффекта самораспыления поддерживают баланс частиц в разряде. Остальные ионы, двигаясь по циклоидам, удерживаются в объеме плазмы до момента перезарядки на нейтральном газе, состоящем в основном из распыленных тяжелых атомов. Так как этот процесс является основным каналом потерь ионов, то источник довольно экономичен, то есть значительная часть энергии из источника уносится быстрыми тяжелыми атомами.

Энергия, уносимая быстрым тяжелым атомом, близка к энергии, затрачиваемой на получение этого атома в источнике, что указывает на высокую экономичность источника.

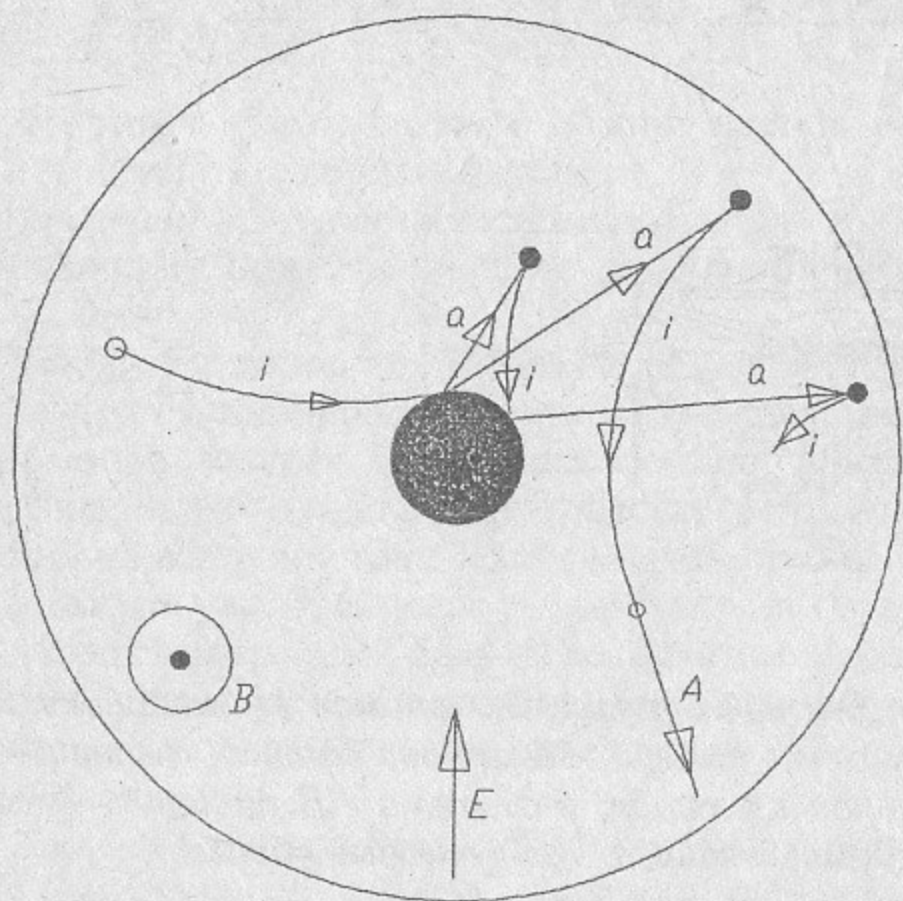


Рис.2 Основные процессы в источнике быстрых тяжелых атомов типа ИСП (А-быстрый тяжелый атом, а-распыленный атом, i-тяжелый ион).

Из рассмотренной выше схемы работы источника следует, что источник является универсальным и может работать практически с любым веществом, распыляемым при ионной бомбардировке.

Особенностью работы источника является сохранение стабильного напряжения на плазме при изменении разрядного тока в широком диапазоне (рис.3). Величина напряжения зависит от материала катода и макроскопических параметров (магнитное поле, геометрические размеры и т.д.).

В рассматриваемом варианте источник работает в импульсном режиме, длительность разряда зависит от мощности систем питания ($t \sim 1-20$ мсек). Отсутствует ограничение на разрядные токи (до 600 А и более).

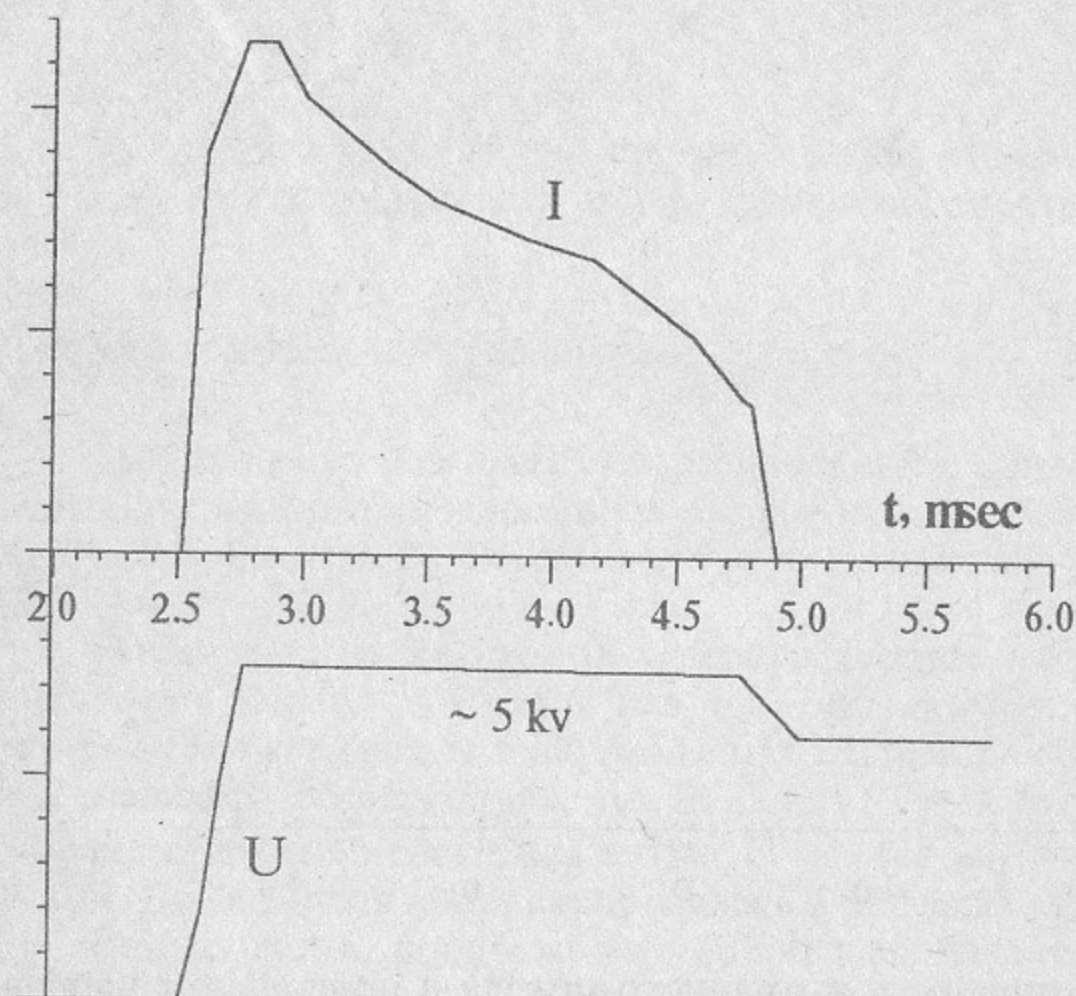


Рис.3 Характерные осциллограммы тока и напряжения в источнике быстрых тяжелых атомов.

Показана работоспособность источника с различными материалами катода (Mo, W, Ti, C, Cu, Ni, BN).

Модельные расчеты основных параметров источника хорошо согласуются с экспериментальными результатами [17].

4 Основные параметры атомарных потоков.

Верный атомарный поток, выходящий из источника, обладает практически абсолютной азимутальной однородностью на 2π . В продольном направлении равномерность порядка $\pm 25\%$ на расстоянии 25 мм от центральной плоскости (рис.4). Площадь одновременно облучаемой атомарным потоком поверхности не менее 1000 см^2 .

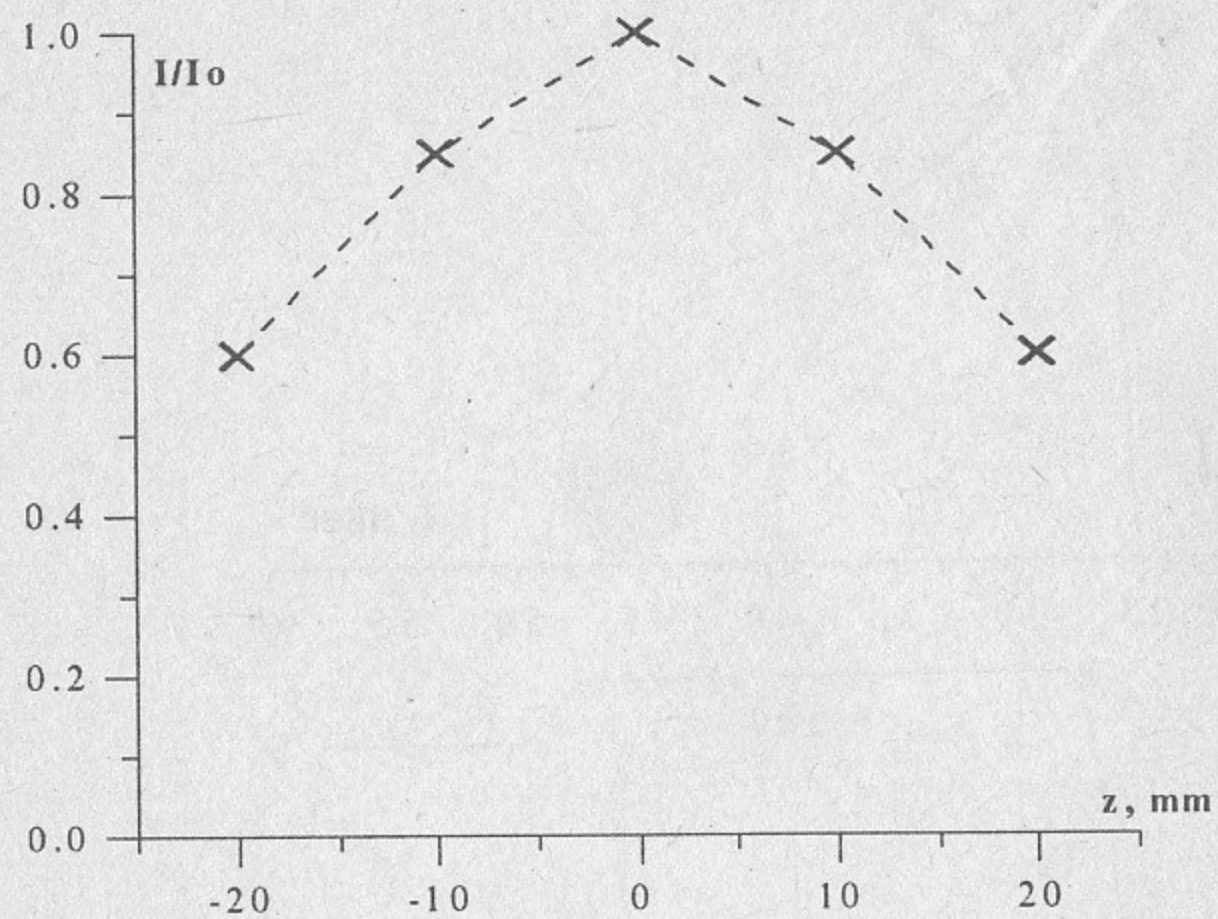


Рис.4 Равномерность атомарного потока в продольном направлении

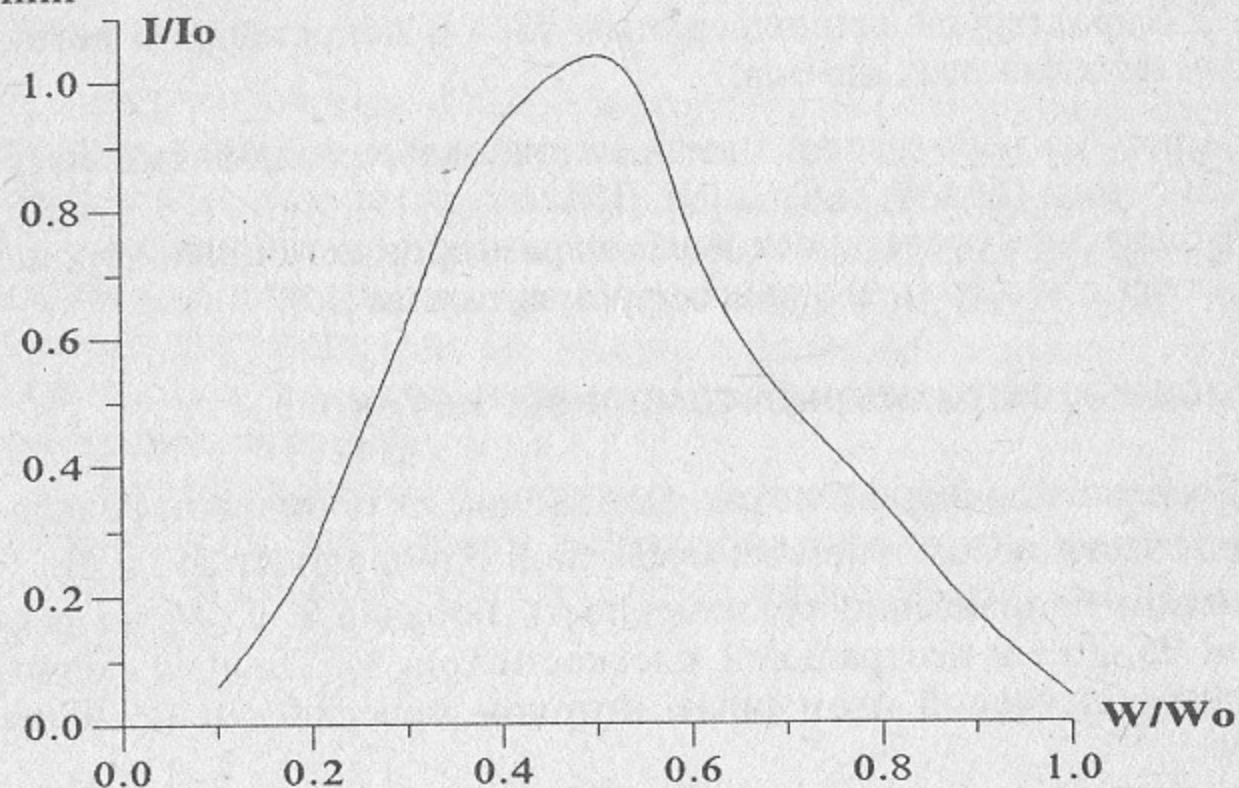


Рис.5 Характерный энергетический спектр быстрых тяжелых атомов ($W_0=5$ кэв).

Энергетический спектр быстрых тяжелых атомов представлен на рис.5. Спектр размыт по энергии из-за особенностей работы источника.

5 Результаты экспериментов.

Для проверки возможности имплантации в области промежуточных энергий интенсивными атомарными потоками были проведены эксперименты на источнике быстрых тяжелых атомов типа ИСП.

Параметры пучка атомов углерода хорошо моделируют поставленную задачу: $\langle W \rangle \sim 2.5$ кэв при широком энергетическом спектре $W < 5$ кэв (рис.5), $j \sim 50$ А/см²). Мишени - образцы из титана и ниобия, обработанные по 12 классу. Температура мишеней во время облучения составила $t \sim 100^\circ$ С за счет нагрева падающим пучком. Доза имплантации варьировалась в пределах - $(1-5) \cdot 10^{18}$ см⁻²

Как известно, процессы атомарной имплантации принципиально не отличаются от ионной, так как взаимодействие имплантируемого потока с мишенью не зависит от заряда частиц.

Диагностика имплантированных образцов проводилась методом рентгено-структурного анализа в ИЯФ на станции СИ "Аномальное рассеяние". Обнаружены карбидные фазы Nb₂C, TiC (рис.6,7).

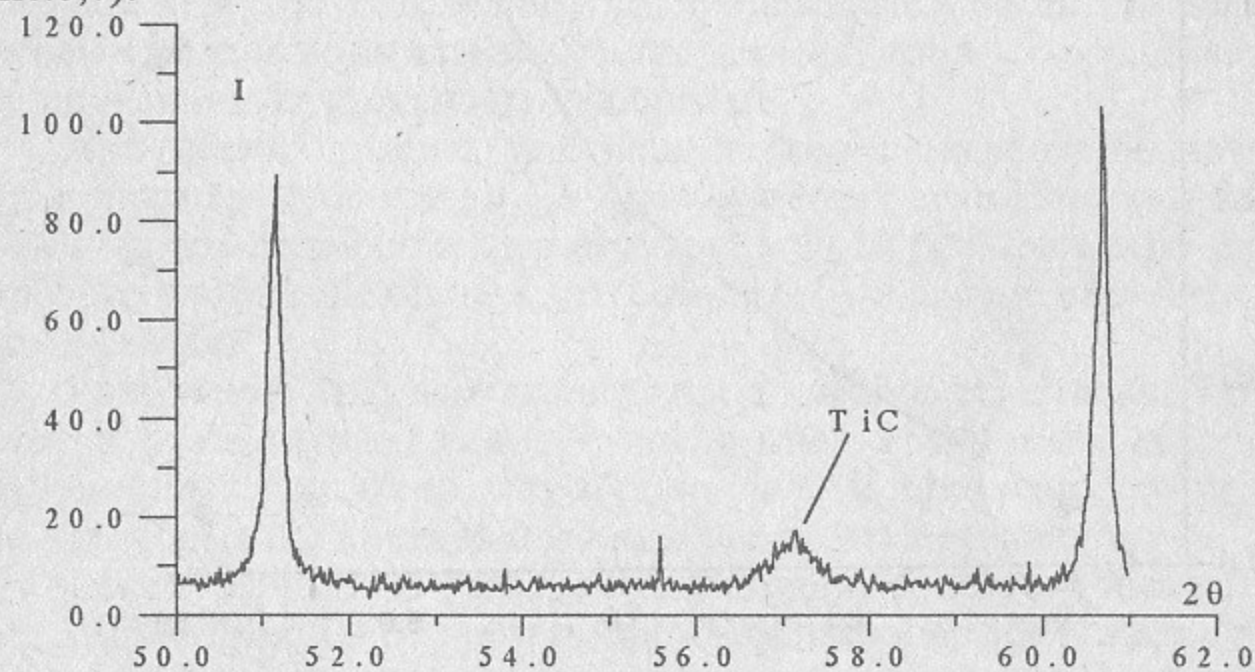


Рис.6 Рентгенограмма облученного титанового образца ($\sim 5\%$ TiC на 13.5 мкм при $D \sim 3 \cdot 10^{18}$ см⁻²).

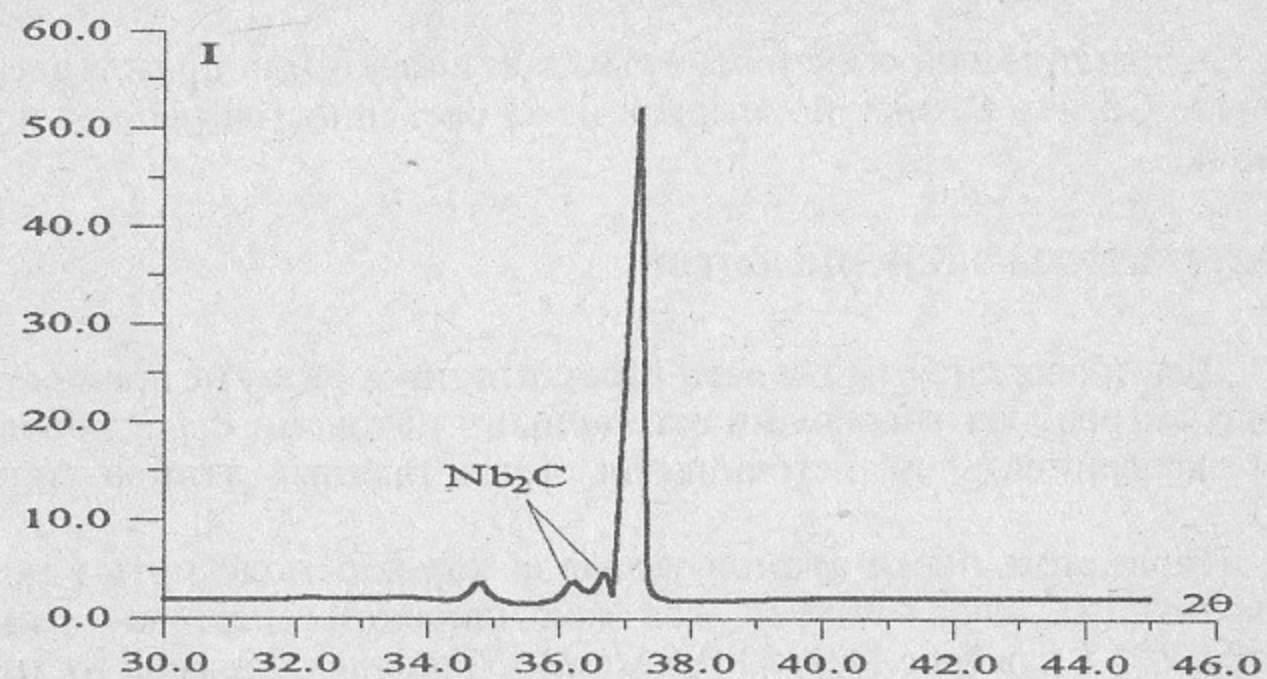


Рис.7 Рентгенограмма облученного ниобиевого образца (~3% Nb₂C на 10 мкм при D~10¹⁸см⁻²).

Измерение скользящим рентгеновским пучком позволило точнее оценить толщину примесного слоя TiC (рис.8).

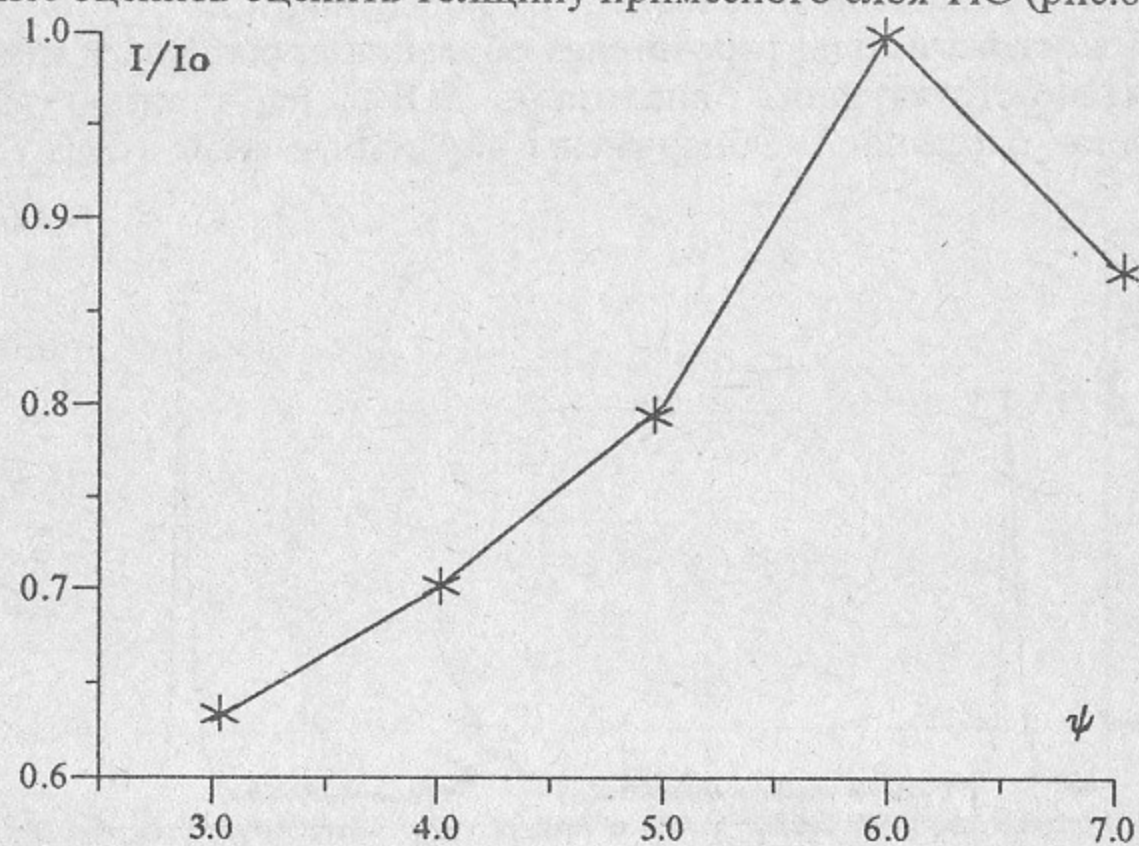


Рис.8 Интенсивность рефлекса карбида титана в зависимости от угла скольжения рентгеновского пучка (1.3845 Å).

Толщины примесных слоев: TiC ~ 3.5 мкм, Nb₂C ~ 0.8 мкм, что говорит о глубоком проникновении атомов углерода в мишень с образованием новой фазы.

6 Обсуждение.

1. Полученные результаты по имплантации в области промежуточных энергий с использованием мощного источника быстрых тяжелых атомов: глубина проникновения углерода в титане ~ 3.5 мкм при проективном пробеге ~45Å [18], свидетельствуют о наличии мощной диффузии, в первую очередь радиационно-стимулированной, в процессе облучения, связанной, наиболее вероятно, с высокой интенсивностью потока (~50 mA/cm²). Аналогичные выводы, отмечающие влияние на процесс имплантации, помимо энергии частиц, таких параметров, как интенсивность падающего потока, температура мишени, были сделаны в ряде теоретических и экспериментальных работ [5,6,7,8,9,10].

Таким образом показано, что интенсивные потоки имплантируемых частиц с промежуточными энергиями могут модифицировать поверхностные слои достаточно большой толщины.

2. Отметим важную особенность имплантации в области промежуточных энергий - возможность существенного повышения производительности процесса имплантации. Это очевидно связано с тем, что основные ограничения на скорость обработки материалов и, соответственно, на производительность связаны с тепловым режимом имплантируемых деталей, точнее с ограничением на максимальную скорость теплосъема.

При прочих равных условиях снижение энергии падающих ядер, например от 50 кэВ до 1.5-2 кэВ, означает возможность увеличения потоков падающих ядер (атомов) в 20-30 раз при сохранении теплового потока на мишень, что означает ускорение обработки в то же число раз.

Увеличение интенсивности потока, которое естественно появляется в этом случае, может существенно увеличивать скорость диффузионных процессов, что в свою очередь приводит к улучшению некоторых параметров имплантированных материалов.

Таким образом, переход от традиционной ионной имплантации к имплантации в области промежуточных энергий позволяет не только существенно увеличить производительность имплантационной обработки, но и заметно улучшить ее эффективность.

7 Выводы

1. Показано, что имплантация в области промежуточных энергий реализуется при энергии атомов углерода 2.5 кэВ - фаза образованного в титане карбида (TiC) занимает по глубине 3.5 мкм.

2. Имплантация в области промежуточных энергий позволяет существенно увеличить технологическую производительность по сравнению с традиционными методами.

3. Высокая интенсивность потоков может быть существенна для улучшения качества имплантации за счет диффузионных процессов.

4. При использовании атомарных потоков решаются проблемы имплантации в диэлектрические материалы.

5. Использование источника быстрых тяжелых атомов типа ИСП позволяет реализовать преимущества имплантации в области промежуточных энергий. Следует отметить универсальность этого источника, а также возможность получения достаточно мощных потоков быстрых тяжелых атомов.

Литература.

1. Комаров Ф.Ф. // Ионная имплантация в металлы, М., Металлургия, 1990.
2. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Курагин И.Б. // Воздействие пучков заряженных частиц на поверхности металлов и сплавов, М., Энергоатомиздат, 1987.
3. Гусева М.И. // Итоги науки и техники, сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии., т.5, 1989, ВИНТИ, с.13.
4. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. // Ионная и лазерная имплантация металлических материалов, М., Энергоатомиздат, 1991
5. Шалаев А.М. // Радиационно-стимулированная диффузия в металлах. - М., "Атомиздат", 1972, с.147
6. Макареу Н.В., Фалько Г.Л., Федорченко А.М. // Поверхность, №5, 1984, с.29-32

7. Макареу Н.В., Фалько Г.Л., Федорченко А.М. // Поверхность, №1, 1985, с.116-120
8. Габович М.Д., Буденная Л.Д., Порицкий В.Я., Проценко И.М. // Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Ч.2, Киев, 1974, с.136-139.
9. Гусева М.И. // Поверхность. №4, 1982, с.32
10. Гусева М.И. // "Глубокая ионная имплантация", 1 Международный Симпозиум "Пучковые технологии -95", Дубна.
11. Гаврилов Н.В., Емелин Д.Р., Мизгулин В.Н., Hennins I., Kern K., Munson C.p., Rey D.J., Nastasi M.N., Scheuer J.T., Walter K.C. // Тезисы докладов IV Всероссийской конференции "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". -Томск. 1996.-с.283-285.
12. Matosian Jn. // Journal of Vacuum Science and Technology, 1994, V.12(2), p.850-853
13. Brown Ig., Anders A., Anders S., Dickinson Mr., Macgill Ra. // Journal of Vacuum Science and Technology, 1994, V.12(2), p.823-827.
14. Волосов В.И. // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". -Свердловск. 1991.-с.63.
15. Волосов В.И., Чуркин И.Н., Поляков В.А. // Источник быстрых тяжелых атомов, 1 Международный Симпозиум "Пучковые технологии -95", Дубна.
16. Волосов В.И., Чуркин И.Н. // Тезисы докладов IV Всероссийской конференции "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". -Томск. 1996.-с.14-16.
17. Волосов В.И., Чуркин И.Н. // Вольт-амперные характеристики разряда с тяжелыми ионами в ловушке со скрещенными полями. Препринт ИЯФ 94-75.
18. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей, Минск, Изд-во БГУ, 1980.

В.И. Волосов, И.Н. Чуркин

**Высокопроизводительный метод
имплантации интенсивными
атомарными потоками
в области промежуточных энергий
(0.5 кэВ – 10 кэВ)**

V.I. Volosov, I.N. Churkin

**High effective implantation method
by intensive atomic flows
in intermediate energy range
(0.5 keV – 10 keV)**

ИЯФ 96-58

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 18.06. 1996 г.

Сдано в набор 29.07.1996 г.

Подписано в печать 29.07.1996 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.9 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 58

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапинтере ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.