

LASER-PLASMA SOURCE OF IONS AND NUCLEI

Yu. A. BYKOVSKY

This paper discusses the methods of production of highly ionized states with the help of laser irradiation. It is shown that laser plasma is a simple and practical source of multi-charged ions and nuclei. Various applications of laser-plasma sources are presented.

В статье рассмотрена возможность получения с помощью лазерного излучения высокоионизированного состояния вещества. Показано, что лазерная плазма является простым и удобным источником многозарядных ионов и ядер. Рассказывается о различных практических применениях таких лазерно-плазменных источников.

ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ И ЯДЕР

Ю. А. БЫКОВСКИЙ

Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет)

Создание оптических квантовых генераторов — лазеров — открыло новую эпоху в развитии как фундаментальных исследований, так и в создании новых технологий в различных областях практического использования. Все это обусловлено прежде всего уникальными качествами основных характеристик лазерного излучения.

Это следующие свойства: а) высокая монохроматичность, то есть узость линии излучения, открывшая новые пути в спектроскопии; б) высокая пространственная и временная когерентность (то есть протекание световых колебаний согласованным способом, обеспечивающим получение отчетливой картины интерференции), давшие мощный толчок развитию голографии и оптическим методам обработки информации; в) сравнительно большая удельная энергия, которую может высвечивать рабочее тело лазера; г) возможность варьирования отрезка времени, в течение которого запасенная в рабочем теле лазера энергия может быть высвечена, в широком диапазоне: от непрерывного до нано-, пико- и фемтосекунд; д) малая расходимость, дающая возможность острой фокусировки. Благодаря этим свойствам, плотность мощности лазерного излучения, которой можно воздействовать на вещество, достигает гигантской величины порядка 10^{20} Вт/см². Следовательно, представляется возможным подвергать вещество воздействию лазерного излучения, изменяя плотность мощности в пределах 20 порядков. Эта фантастическая возможность детально исследуется последние 30 лет учеными разных стран.

Ясно, что, постепенно увеличивая энергию лазерного излучения и сокращая отрезок времени, в течение которого эта энергия излучается, можно проследить несколько стадий такого воздействия.

Сначала это постепенное повышение температуры, результатом которого будет нагрев до температур плавления практически любого вещества. Дальнейшее увеличение скорости ввода энергии в вещество приводит к столь быстрому нагреву, что начинается процесс интенсивного испарения и при этом возможен режим, когда испарение начинает происходить, минуя жидкую фазу. При таких условиях было обнаружено на первый взгляд удивительное явление: с ростом плотности мощности величина испаренной массы оставалась практически неизменной. Объяснение этого оказалось достаточно простым. Оно состоит в том, что в процессе

интенсивного воздействия пары начинают экранировать облучаемую поверхность. Поэтому значительная часть энергии лазерного излучения уже не доходит до поверхности, а поглощается в образованном лазерным излучением паре. Но при этом должна расти температура пара по мере увеличения плотности потока энергии лазерного излучения, а повышение температуры пара должно приводить к образованию плазмы, то есть ионизации испаренного вещества. Но что же здесь удивительного? А удивительно то, что при этом могут быть достигнуты крайне высокие температуры пара вплоть до температур столь больших, что становится возможной сильная ионизация атомов испаренного вещества. Достигаемые при лазерном воздействии температуры оказались столь высокими, что у ученых возникло желание попытаться реализовать таким образом реакцию синтеза легких ядер, то есть термоядерную реакцию.

Следует напомнить, что основным источником энергии в звездах является процесс термоядерного синтеза, когда при очень высоких температурах происходит слияние ядер легких элементов. При этом в результате образования более тяжелых ионов освобождается энергия связи. Такой процесс может происходить в результате синтеза тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития. При синтезе ядер дейтерия и трития образуется ядро гелия и нейтрон. Энергия, которая выделяется в виде кинетической энергии продуктов реакции, равна 17,6 Мэв. Подсчитано, что при использовании одного литра природной воды из содержащегося в этом объеме дейтерия можно в результате термоядерной реакции синтеза получить такое же количество энергии, как при сжигании 300 литров бензина. Процесс термоядерного синтеза требует температуры порядка 100 миллионов градусов Цельсия.

Для реализации реакции синтеза необходимо нагреть смесь дейтерия и трития до термоядерных температур, используя, например, мощное лазерное излучение. Для осуществления термоядерной реакции синтеза положительно заряженные ядра дейтерия и трития необходимо столкнуть с высокими скоростями, чтобы преодолеть кулоновский барьер отталкивания. Самый простой способ — это нагрев смеси дейтерия и трития до настолько высоких температур, когда скорость теплового движения становится достаточной для преодоления силы электростатического отталкивания. Следует заметить, что для протекания реакции синтеза необходимо удерживать плазму в таком состоянии в течение определенного времени, не давая ядрам разлетаться в разные стороны. Практически более реализуемым является способ, который называется инерциальным термоядерным синтезом. В этом случае дейтерий-тритиевое топливо может иметь вид маленькой капли. Если такую каплю подвергнуть всестороннему облучению лазерным светом, то в процессе испарения с поверхности внутрь капли пойдет мощная

волна сжатия с большим давлением, которое будет сжимать каплю, увеличивая при этом в $10^3 - 10^4$ ее плотность. Это давление обеспечит повышение температуры капли до столь высокой температуры, при которой возможна термоядерная реакция синтеза. Время протекания реакции составляет величину $\sim 10^{-9}$ секунды и меньше того времени, за которое капля разлетится и исчезнут условия протекания реакции синтеза. Такие процессы удобно сравнить с крошечным (порядка миллиметров) солнцем. Для этого нужно иметь лазер с очень высокими энергией и мощностью.

Вместо лазерного излучения можно использовать пучки заряженных частиц, что обеспечивает значительно более эффективную передачу энергии дейтерий-тритиевой капле. Наиболее перспективным является пучок тяжелых ионов. По причине высокой зарядности их легче разогнать до высоких энергий. Во-вторых, легче получить более высокие значения тока, так как чем больше масса, тем меньше влияние расталкивания ионов в пучке из-за пространственного заряда. В-третьих, пучки тяжелых ионов с максимальной эффективностью будут передавать энергию мишени. В этом случае становится существенным вопрос о способах получения первичных пучков тяжелых многозарядных ионов для их последующего ускорения до высоких энергий в ускорительных системах. С этих позиций более простым способом реализации инерциальной управляемой термоядерной реакции является получение сначала с помощью мощного лазерного излучения пучков тяжелых многозарядных ионов и их дальнейшее использование для воздействия на дейтерий-тритиевую мишень для достижения термоядерной температуры. Таким образом, способы получения высоких температур и высокоионизированного состояния представляют большой практический интерес.

Итак, испарение вещества и нагрев пара приводит к плазменному состоянию, то есть при нагреве пара происходит отрыв электронов от атомов за счет повышения температуры. При этом чем выше температура, тем больше электронов будет вырвано из атома. Таким образом, ионизованный пар, то есть плазма, состоит из электронов и ионов. Если считать, что температура электронов и ионов одинакова, то, поскольку электроны во много раз легче ионов, последние будут иметь существенно большую скорость. За счет такой высокой скорости электроны в процессе газодинамического разлета будут первыми вылетать из плазменной области. Тогда на переднем фронте разлетающейся плазмы произойдет разделение отрицательного заряда вылетающих электронов и положительного заряда ионов. При этом за счет кулоновского взаимодействия электроны потянут за собой ионы. Такой процесс приведет к эшелонированию электронов и ионов, то есть разделению их в пространстве и во времени (эффектам закалки), которое препятствует процессам

рекомбинации электронов и ионов в лазерной плазме. Этот процесс приводит к формированию направленного потока ядер или ионов высокой зарядности в виде пучка, разлетающегося в направлении нормали к поверхности мишени. Для ионов максимальной зарядности и максимальной энергии угол вылета составляет всего лишь $\sim 15^\circ - 20^\circ$. В этом случае взаимодействие сфокусированного лазерного излучения с высокой плотностью потока энергии дарит нам простой источник ядер или многозарядных ионов без необходимости применения каких-либо вытягивающих или фокусирующих полей.

На рисунке 1 представлена схема лазерно-плазменного источника. В таком лазерно-плазменном источнике ионов степень ионизации регулируется плотностью мощного лазерного излучения и может достигать значений степени ионизации до нескольких десятков, то есть можно полностью ионизовать значительную часть элементов таблицы Менделеева. Следует заметить, что до появления лазеров практически трудно было достичь степени ионизации $Z \geq 10$ и тем самым, например, измерить энергию связи электронов в атоме. Подчеркнем, что в этом случае важным оказался не только чисто фундаментальный результат, но и ряд практически новых и перспективных применений.

Такой лазерно-плазменный источник ионов и ядер является перспективным для ускорителей заряженных частиц. В январе 1976 года силами ученых Московского инженерно-физического института и Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна) впервые в мире было реализовано ускорение ядер углерода из лазерно-плазменного источника (рис. 2). Ядра углерода из лазерно-плаз-

менного источника были введены в линейный ускоритель и ускорены в канале синхрофазотрона до энергии 50 ГэВ. Если раньше на ускорителе разгонялись однозарядные протоны, то при работе с многозарядными ионами сразу в Z раз возрастало значение энергии ускоренной частицы. Это позволило сделать очередной шаг в получении релятивистских пучков сложных ядер. В последние годы такие работы проводятся в ЦЕРНе (Швейцария) с целью получить с помощью лазерно-плазменного источника ионов многозарядные ионы тяжелых атомов с $Z > 50$. Естественно, что существуют и другие типы источников многозарядных ионов, но по своей простоте и технической доступности лазерно-плазменный источник тяжелых ионов существенно выигрывает.

В последние годы существенно растет интерес к широкому практическому использованию тяжелых ионов. Так, в Дубне (ОИЯИ) разработана уникальная технология получения фильтров. В полимерной пленке тяжелый ион при прохождении оставляет канал, имеющий большие радиационные нарушения, а сложные молекулы при этом разбиваются на более мелкие части — радикалы. По этой причине область трека (канала) становится чувствительной к химическому воздействию. После травления облученной тяжелыми ионами полимерной пленки образуются сквозные каналы. При этом диаметр таких каналов зависит от температуры и времени травления каналов и может изменяться от 5 нанометров до десятков микрон. Такие каналы могут быть использованы в биологии и медицине для разделения различных типов вирусов и бактерий (имеющих размеры более 0,2 микрона), белковых молекул (ферментов),

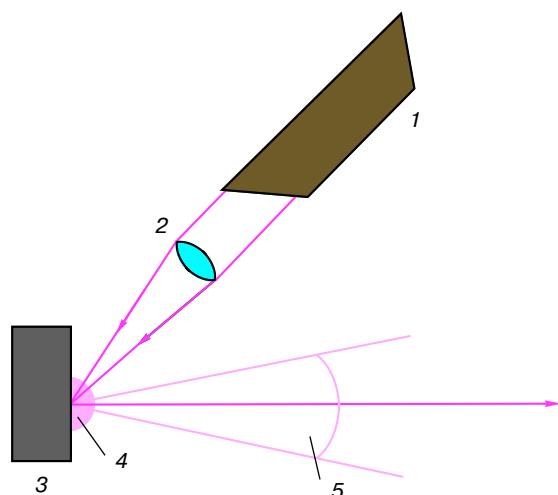


Рис. 1. Схема лазерно-плазменного источника ионов.
1 – лазер, 2 – фокусирующая линза, 3 – мишень, 4 – лазерная плазма, 5 – пучок ионов максимальной зарядности и максимальной энергии.

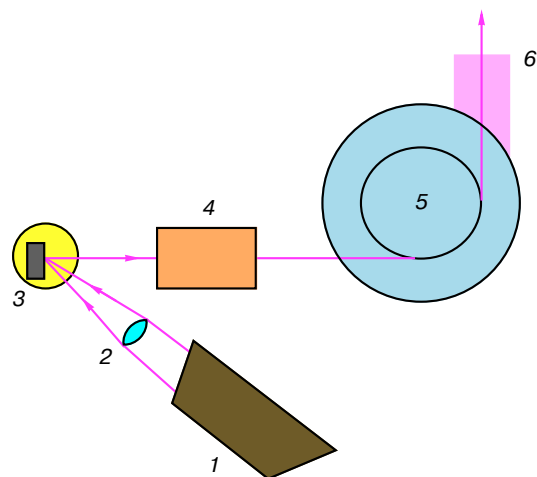


Рис. 2. Схема ускорения ядер углерода на синхрофазотроне с использованием лазерно-плазменного источника ядер углерода C^{6+} .
1 – лазер, 2 – линза, 3 – графитовая мишень, 4 – линейный ускоритель, 5 – синхрофазотрон, 6 – выходящий пучок.

могут быть применены в полупроводниковой технологии и для фильтрации воды.

Пучки тяжелых ионов весьма перспективны для радиотерапии, в частности для лечения раковых новообразований. Применение лазерно-плазменных пучков тяжелых ионов не идет ни в какое сравнение с использованием для этих целей больших, дорогих установок, так как возможна радиотерапия ограниченных участков человеческого тела за счет большого заряда ионов. Источники тяжелых ионов необходимы для синтеза новых трансурановых химических элементов, лежащих на так называемых “островках” стабильности, которые предсказываются в области $Z = 114$ и $Z = 126$.

Не менее интересной и практически важной областью применения лазерно-плазменных источников ионов является ионная имплантация металлов. Экспериментально показано, что при бомбардировке поверхности металлов ионами можно добиться существенного изменения физических свойств этих металлов. Причиной этого является, во-первых, эффект внедрения тех или иных ионов, то есть изменение элементного состава путем легирования, и, во-вторых, изменение структуры приповерхностных слоев. Такие методы стали развиваться начиная с 70-х годов; они показали, что ионная имплантация позволяет заметным образом изменить физические свойства металлов, в том числе коррозионную стойкость, трение, свойства поверхности, износостойкость, и др. Следует подчеркнуть, что лазерно-плазменный имплантор для модификации поверхности металлов привлекает внимание еще и тем, что он имеет малые габариты, позволяет очень просто переходить от одного типа ионов к другим и так же просто получать многоэлементные пучки ионов с нужным стехиометрическим составом. При этом легко получить в импульсе значение тока порядка ампера и при использовании стандартного частотного лазера иметь разумные значения времени для набора необходимой дозы облучения (порядка часа).

Еще одним очень важным и перспективным является использование воздействия лазерного излучения на вещество для аналитических целей, то есть для определения элементного состава облучаемого лазером вещества. Физическими предпосылками этого явились следующие экспериментальные факты: возможность испарения любого вещества независимо от его состава, природы и физико-химических свойств, то есть лазерным излучением при соответствующих энергетических и мощностных параметрах можно испарять металлы, полупроводники, ткань, диэлектрики, керамику, биологические объекты (живую ткань, кровь) и т.д. И, как уже отмечалось ранее, за счет экранировки плазмы испаряется практически постоянное количество вещества порядка одной миллионной доли грамма. Следующим важным обстоятельством является то, что ис-

паренное вещество практически нацело ионизуется в том же луче лазера, а ионы формируются в виде пучка, направленного по нормали к облучаемой лазером мишени. Так что остается к лазерно-плазменному источнику ионов добавить уже давно и детально разработанные схемы разделения частиц в электрических и магнитных полях и системы регистрации.

На рисунке 3 представлена схема времяпролетного масс-анализатора, использующего лазерно-плазменный источник ионов. Самая простая схема — это совмещение лазерно-плазменного источника ионов с электростатическим анализатором и разделением масс по времени пролета. На рисунке 3 показан принцип действия такого лазерного прибора для проведения экспрессного элементного анализа (на схеме не показана система вакуумирования). Излучение от лазера фокусируется на мишень, элементный состав которой мы хотим определить. При “вспышке” лазера часть мишени испаряется и ионизуется. Основная часть ионов формируется в направленный по нормали к поверхности мишени пучок ионов, соответствующий составу мишени. Электростатический анализатор выделяет пучок ионов в идеале с одним значением энергии. Тогда этот монохроматический пучок ионов, состоящий из ионов с различной массой, будет разделяться во времени, то есть вначале до системы регистрации долетят самые легкие ионы, а последними самые тяжелые. С системы регистрации электрический сигнал подают на осциллограф, на экране которого каждому максимуму соответствует определенная масса химического элемента. Такой времяпролетный масс-спектрометр с лазерно-плазменным источником ионов позволяет в реальном времени

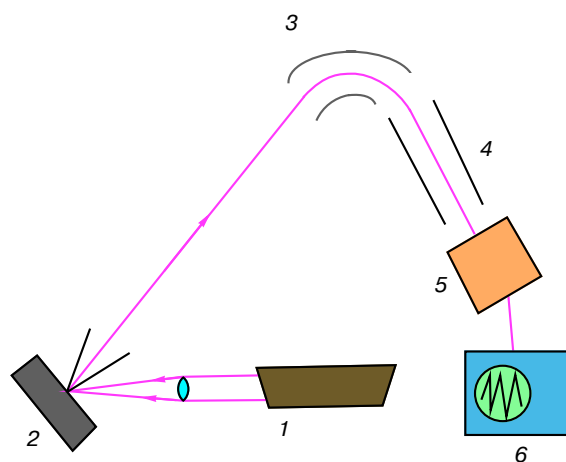


Рис. 3. Схема времяпролетного масс-спектрометра с лазерно-плазменным источником ионов. 1 – лазер, 2 – облучаемая мишень, 3 – электростатический анализатор, 4 – дрейфовая трубка, 5 – система регистрации ионов, 6 – осциллограф.

производить элементный анализ широкого класса материалов с чувствительностью $10^{-3} - 10^{-4}$ атомных процентов с разрешением по массам ~ 300 .

Очень полезным и перспективным явилось использование лазерно-плазменного источника ионов в известной схеме масс-спектрометра с двойной фокусировкой (рис. 4), сочетающим электростатический анализатор с разверткой по массам в магнитном поле. В этом случае пучок ионов из исследуемой мишени проходит через электростатический анализатор, где происходит монохроматизация пучка, а затем попадает в однородное магнитное поле, где, как известно, происходит разделение ионов по отношению заряда к массе. Поскольку используются однозарядные ионы, то сформированный пучок ионов с различной массой разворачивается магнитным полем и регистрируется, например, на фотопластинке. Такой прибор обладает более высокими аналитическими характеристиками. Разрешение по массам достигает значений 5000, а это значит, что можно разделить изотопы всех элементов таблицы Менделеева и зарегистрировать все элементы от водорода до урана. При этом оказалось возможным регистрировать примеси в веществе до $10^{-5} - 10^{-6}$ атомного процента.

Особенностью работы такого масс-спектрометра с лазерно-плазменным источником ионов, кроме его универсальности, анализа любых веществ, является и то, что одновременно регистрируются все элементы, а, зная испаренную массу, можно

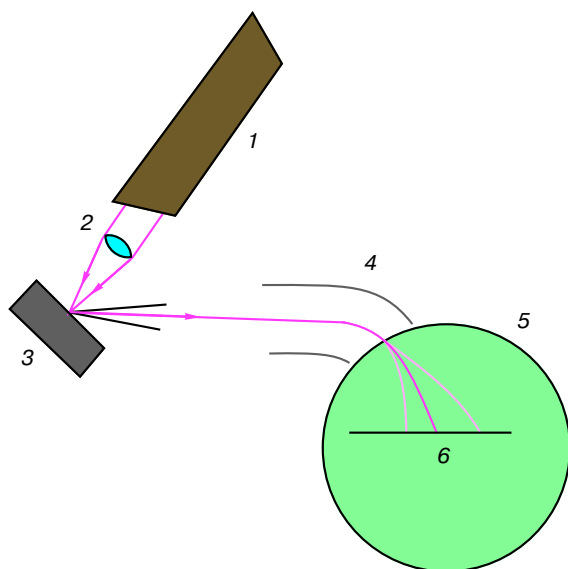


Рис. 4. Схема масс-спектрометра с двойной фокусировкой с лазерно-плазменным источником ионов.

1 – лазер, 2 – фокусирующая линза, 3 – анализируемая мишень, 4 – электростатический анализатор, 5 – магнит, 6 – фотопластинка.

проводить анализ практически без эталонов, используя в качестве контрольных измерений природные соотношения изотопов различных элементов. Эти характеристики определяют широкие возможности применения масс-спектрометров с лазерно-плазменным источником ионов. Это не только контроль за чистотой и примесями в металлах и полупроводниках, но и широкие возможности проведения экологического контроля за загрязнениями в воздухе и в почве. Измерения состава пшеничных зерен, собранных ближе 300 метров от сильно загруженного транспортом шоссе, обнаружили свинец. В перламутровой губной помаде обнаруживается ртуть. Анализ чешуи рыб, пойманных в воде вблизи неочищенных стоков в реке, обнаруживает большой набор тяжелых металлов.

Несомненна перспектива применения таких приборов в биологии и медицине. Возможно проведение элементного состава крови по кусочку марли, смоченной кровью, или капле крови, нанесенной на подложку. Например, для криминалистики важно, что в крови человека индивидуально содержание некоторых тяжелых элементов. При анализах элементов биологической ткани обнаруживаются резкие сдвиги в количестве различных элементов, таких, как Ca, Cl, Si, Al и др., при определенных заболеваниях.

Нельзя не упомянуть еще об одном очень важном и интересном применении лазерной плазмы. Поскольку в лазерной плазме можно достичь высокой степени ионизации, то на ранних стадиях разлета лазерная плазма становится интенсивным источником мягкого рентгеновского излучения, имеющего тормозную и рекомбинационную природу, то есть излучения, возникающего вследствие изменения скорости при взаимодействии заряженных частиц и рекомбинации электронов и ионов. При этом длина волны рекомбинационного излучения определяется степенью ионизации и может регулироваться как за счет параметров лазера, так и за счет использования материалов с различными потенциалами ионизации (длина волны λ может составлять от 0,5 до 5 нанометров). Мягкое рентгеновское излучение можно сфокусировать и сформировать, таким образом, пучки с высокими энергетическими характеристиками.

Такой лазерно-плазменный источник весьма перспективен для применения в рентгенолитографии при изготовлении полупроводниковых микросхем. За счет малой длины волны (3 – 5 нм) и малых размеров пятен фокусировки можно существенно улучшить разрешение фотошаблона, применяемого в производстве полупроводниковых микросхем. Кроме того, лазерно-плазменный источник мягкого рентгеновского излучения дает возможность создания микроскопа, работающего в диапазоне мягкого рентгена, то есть использующего кванты с такой малой энергией, которая не будет вызывать

генетических мутаций и разрушать структуру живой клетки, но позволит проследить за поведением отдельных химических элементов.

Еще одним очень перспективным технологическим применением лазерной плазмы является получение тонких пленок сложного состава. В этом случае используются потоки плазмы, образующейся при взаимодействии с веществом излучения лазера, работающего в режиме модулированной добротности, то есть в режиме высокой скорости ввода энергии в вещество. При этом мишень может быть набрана из различных материалов, определяющих желаемую стехиометрию получаемой пленки. В этом случае высокие скорости ввода энергии, как уже отмечалось выше, позволяют сохранить стехиометрический состав мишени и получить на подложке сложные соединения. Использование в такой технологии частотных лазеров позволяет наращивать материал эпитаксиально, то есть небольшими порциями, слой за слоем, сохраняя кристаллическую структуру. Кроме получения сложных полупроводниковых соединений, такая технология оказалась очень полезной при создании высокотемпературных многокомпонентных соединений сверхпроводников.

В этой технологии удивительным является то, что на подложках растут сложные соединения в виде монокристаллов. Можно предположить, что одной из причин этого является сопутствующее рекомбинационное излучение из лазерной плазмы, которое активизирует в процессе кристаллизации электронные оболочки атомов, стимулируя тем самым рост кристаллов с более энергоемкими ориентациями. Экспериментально было показано, что,

испаряя углерод излучением лазера из графитовой мишени, в процессе конденсации при определенных условиях можно получать тонкие алмазоподобные пленки.

Таковы далеко не полные примеры новых возможных применений плазменных образований, получаемых при воздействии мощного лазерного излучения на вещество.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение, 1978.
2. Басов Н.Г., Крохин О.Н. ЖЭТФ, 1964. Т. 46. С. 171.
3. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. М.: Мир, 1981.
4. Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный термоядерный синтез. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Быковский Ю.А., Неволин В.Н. Лазерная масс-спектрометрия. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Барашенков В.С. Новые профессии тяжелых ионов. М.: Атомиздат, 1977.
7. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. М.: Атомиздат, 1991.

* * *

Юрий Алексеевич Быковский, профессор, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой физики твердого тела и квантовой радиофизики. Лауреат Государственной премии, Заслуженный деятель науки Российской Федерации. Автор более 300 статей, двух монографий.