

HIGH-CURRENT BEAMS
OF CHARGED PARTICLES

L. I. RUDAKOV

Controlled thermonuclear synthesis, strategic defense initiative – these challenging scientific and technical problems of past decades initiated the research and development of high-current beams of charged particles. This article describes high-current beams studies in gases and vacuum.

Управляемый термоядерный синтез, стратегическая оборонная инициатива – эти грандиозные научно-технические проблемы 70 – 90-х годов инициировали развитие исследований сильноточных пучков заряженных частиц. В статье рассказано об успехах в изучении сильноточных пучков в вакууме и газе.

**СИЛЬНОТОЧНЫЕ ПУЧКИ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Л. И. РУДАКОВ

Московский физико-технический институт

1. РАВНОВЕСНЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ПУЧОК

Пучки заряженных частиц – электронов известны науке много лет. Они используются в современных кинескопах. Пучки – мощный инструмент исследований в физике высоких энергий. Такие пучки управляются внешними электромагнитными полями. В современном ускорителе пучок может жить на орбите в течение многих часов.

В 70-х годах в результате развития техники и появления новых задач в поле зрения ученых попал новый объект – сильноточные пучки заряженных частиц. Ток, который переносят эти пучки, измеряется не в миллиамперах, как в случае традиционных электронных пучков, а в мегаамперах, то есть в миллионах ампер, и магнитные поля вокруг такого пучка могут составлять миллионы эрстед. Управлять таким пучком с помощью катушек магнитного поля, как это делается в традиционной технике, уже невозможно, и приходится использовать его собственные электромагнитные поля.

Что мы понимаем под термином “пучок”? Это поток параллельно или почти параллельно летящих заряженных частиц. Рассмотрим условия существования такого пучка. Пусть пучок распространяется в вакууме. Для простоты предположим, что пучок имеет цилиндрическую форму и направление распространения совпадает с осью Z цилиндра. Баланс сил, действующих в радиальном направлении, описывается силой Лоренца

$$F = -eE\frac{v}{c}B, \tag{1}$$

где E – напряженность электрического поля и B – напряженность магнитного поля, создаваемых пучком, v – скорость пучка, c – скорость света. Если это радиальная сила, то v – скорость пучка в направлении оси Z . Равновесие пучка в радиальном направлении возможно, если суммарная сила, действующая на пучок, близка или равна нулю. Электрическое поле объемного заряда определяется уравнением Пуассона:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} rE = -4\pi en, \tag{2}$$

а магнитное поле – уравнением Ампера:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} rB = -\frac{4\pi}{c} env. \tag{3}$$

Формулы (1) – (3) написаны в системе CGSE, e – заряд электрона, n – число электронов в 1 см^3 .

Электрическая сила действует в радиальном направлении, так как одноименные заряды отталкиваются. Параллельные токи, наоборот, стягиваются, а пучок есть совокупность параллельно направленных токов. Таким образом, электрическая и магнитная силы действуют в противоположных направлениях. Однако магнитная сила в вакууме всегда меньше электрической силы расталкивания, так как скорость частиц всегда меньше скорости света. Для электронов, движущихся со скоростью, близкой к скорости света, в релятивистских пучках эта разность мала, но суммарная радиальная сила, действующая на пучок, всегда приводит к его расширению.

Каким образом можно осуществить радиальное равновесие? Надо слегка уменьшить силу расталкивания. Этого эффекта можно достигнуть, если пучок распространяется не в вакууме, а через газ низкого давления. Тогда вследствие ионизации газа на пути пучка появятся ионы. Электроны газа будут вытолкнуты из области пучка его электрическим полем, и пучок будет двигаться по каналу с некоторым ионным зарядом. Это приведет к ослаблению силы расталкивания. Всегда можно вычислить необходимый заряд, который нужен для обеспечения равновесного в радиальном направлении состояния пучка. Для сильно релятивистских пучков нужно небольшое количество ионов. Такой пучок существует до первого столкновения с ионами или атомами газа на его пути. Если релятивистский пучок распространяется в разреженном газе, где число частиц в 1 см^3 составляет 10^{13} , то длина пробега электрона до первого столкновения будет составлять десятки тысяч километров.

В 50-х годах замечательный советский физик А.М. Будкер предложил оригинальную идею использования сильноточных релятивистских пучков для передачи энергии на далекие расстояния. Как мы знаем, в металлических проводниках, используемых в линиях электропередач, существенная часть передаваемой энергии теряется в виде тепла. Идея Будкера заключалась в том, что можно передавать электрическую энергию на большие расстояния практически без потерь, если носителем энергии сделать релятивистские электроны, распространяющиеся внутри трубопровода с техническим вакуумом, что сегодня реализуемо, так как мы строим гигантские газопроводы и нефтепроводы. Тогда релятивистский пучок с энергией в несколько мегаэлектронвольт и током в сотни ампер будет переносить мощность в сотни мегаватт без потерь, и эта энергия может быть использована на станции-приемнике по назначению. (Один мегаэлектронвольт (1 МэВ) – это энергия электрона, ускоренного в электрическом поле с разностью потенциалов в один мегавольт.) Однако эта красивая идея, которая исследовалась в 60-х годах, не была реализована, по-

тому что практически невозможно контролировать количество ионов в канале пучка. Ионы накапливаются вследствие ионизации газа. Кроме того, имеется ряд динамических процессов, которые мы называем неустойчивостью пучка. Эти процессы перераспределяют плотность ионов в канале в радиальном и продольном направлениях и разрушают равновесную конфигурацию пучка.

2. ИМПУЛЬСНЫЕ СИЛЬНОТОЧНЫЕ ПУЧКИ КАК НОСИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

В 70-х годах появилось новое техническое направление, в котором сильноточные электронные и ионные пучки могли сыграть важную роль. Это направление называется “инерционный управляемый термоядерный синтез”. Физики предложили реализовать в лабораторных условиях термоядерный взрыв, аналогичный взрыву термоядерной бомбы, с целью использования выделяющейся энергии, подобно тому как взрыв химического горючего используется в двигателе внутреннего сгорания. Взрыв, осуществляемый в лаборатории, должен быть умеренной силы, чтобы он не разрушал стенок взрывной камеры и мог повторяться в камере миллионы раз. Он может быть осуществлен только с помощью новых источников энергии, которые способны на термоядерном устройстве размером в несколько миллиметров сконцентрировать энергию в несколько мегаджоулей за время, составляющее сотые доли микросекунды. Из имеющихся или мыслимых в то время источников для этой цели подходили импульсные лазеры и импульсные генераторы сильноточных электронных пучков, так как мощность, которую надо было донести до термоядерной мишени в очень короткое время, превышала мощность всех электростанций мира. Простые оценки показывают, что этого можно в принципе достигнуть, если пучок заряженных частиц с энергией в десяток мегаэлектронвольт сфокусировать на термоядерной мишени с общей площадью около одного квадратного сантиметра при токе пучка в десятки мегаампер.

В начале 70-х годов уже существовали технические предпосылки для генерации таких пучков, и физики приступили к изучению возможностей получения, фокусировки и транспортировки сильноточных пучков на термоядерную мишень. Инициатором этих исследований в Курчатовском институте был академик Е.К. Завойский.

Типичная конструкция импульсного электрического генератора изображена на рис. 1. Импульсная конденсаторная батарея и система газовых и водяных разрядников – ключей формирует электрический импульс, распространяющийся в очищенной от примесей и солей воде, которая является дешевым и практичным диэлектриком. Перегородка из оргстекла отделяет воду от вакуумного объема, где формируется пучок.

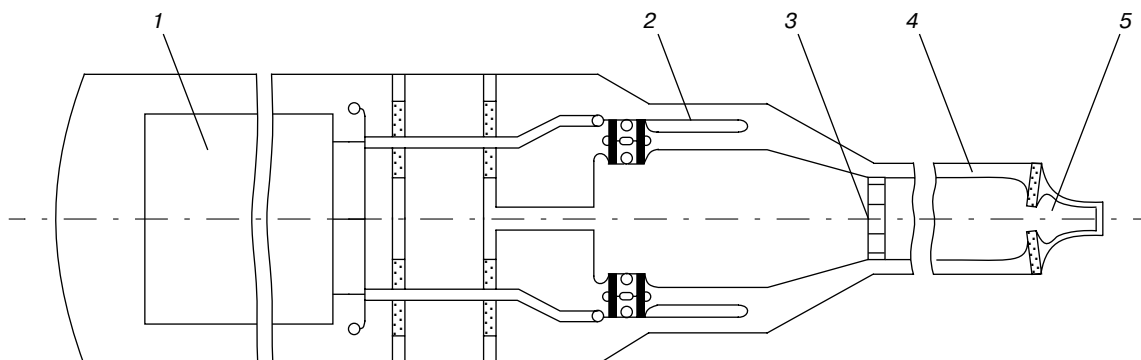


Рис. 1. Конструктивная схема модуля восьмимодульной установки АНГАРА-5. Длина модуля 15 м. 1 – генератор импульсного напряжения в объеме, наполненном маслом; 2, 4 – двойная формирующая (2) и передающая (4) линии в воде; 3 – разрядник для устранения предимпульса; 5 – ускорительная трубка (диод).

Десятилетием позднее появилась другая научно-техническая проблема, печально известная в нашей стране, – “стратегическая оборонная инициатива”, или СОИ. Она возникла первоначально в США и имела целью создание глобальной системы защиты от возможного атомного нападения. Сразу же эти исследования были начаты и в Советском Союзе. Идея состояла в том, чтобы с помощью какого-либо мощного источника энергии, сформированного в виде направленного потока (это мог быть луч лазера, пучок заряженных или нейтральных частиц), нанести разрушительное повреждение ракете нападающей стороны, несущей атомную боеголовку, на достаточно большом расстоянии от цели.

К изучению сильноточных пучков были привлечены большие научные коллективы, строились крупные установки, широким фронтом велись исследования. Сразу же возникло понимание необходимости исследовать принципиально новую физику. Действительно, целью пучка было донести энергию до объекта, будь то термоядерная мишень или ракета противника. Энергия, которая может быть использована, – это поступательная кинетическая энергия заряженных частиц. Однако пучок заряженных частиц – это не только кинетическая энергия летящих частиц, а также электрическая и магнитная энергия, окружающая пучок. То есть, прежде чем формировать пучок или одновременно с этим мы формируем электромагнитные поля, окружающие пучок.

Давайте сравним энергию магнитного поля и кинетическую энергию, заключенную в сечении пучка. Если мы возьмем отношение этих двух величин, то оно окажется равным отношению тока, переносимого пучком, к некоей величине, составленной из универсальных констант и впервые введенной в физику пучков известным шведским физиком Альфеном; она получила название тока Альфена:

$$\frac{m\upsilon c^2}{e} \quad (4)$$

Если ток, переносимый пучком, больше тока Альфена, то магнитная энергия, окружающая пучок, превышает кинетическую энергию в пучке. Магнитная энергия не может быть использована для нагрева мишени. Следовательно, для эффективного использования пучка необходимо иметь ток меньше альфеновского. Но альфеновский ток для электронов составляет относительно небольшую величину. Так, при энергии частиц, равной 10 МэВ, альфеновский ток составляет всего лишь 300 кА, а для нагрева термоядерной мишени требуются токи в десятки раз большие. Таким образом, сам пучок, как физический объект, несет в себе свойства, казавшиеся бы, препятствующие возможности использования его как инструмента для мощного быстрого нагрева мишени.

Можно ли найти выход из этой ситуации? Да. Надо уменьшить величину магнитного поля, окружающего пучок. В импульсной электротехнике, где затраты на создание магнитного поля вокруг проводников также нежелательны, умеют бороться с этим эффектом. Для этого используют линии связи, в которых ток течет к нагрузке по центральному проводнику, а возвращается по внешней оплетке. Такой проводник называется коаксиалом. В нем магнитное поле сосредоточено только внутри изолятора, разделяющего внутренний проводник и оплетку. Объем, занятый магнитным полем, может быть снижен в десятки раз.

Мы не можем реализовать такой коаксиал для пучков, потому что пучок не есть твердая субстанция, но мы можем достичь того же эффекта, если пучок транспортировать через плазму. Плазма состоит из электронов и ионов, и ее проводимость достаточно высока для тех проблем, которые нас интересуют. Пучок в плазме малой плотности может распространяться, не испытывая столкновений. Мы получаем, таким образом, интересный физический объект.носителем энергии является пучок, а проводящая среда, в которой движется поток заряженных частиц, не испытывающих столкновений,

препятствует быстрому возникновению и проникновению магнитных полей.

Электромагнитные поля могут проникнуть в проводящую среду только на глубину так называемого скин-слоя. Величина скин-слоя зависит от электропроводности материала и от времени импульса. В тех задачах, о которых идет речь, глубина скин-слоя может составлять доли миллиметра. Это означает, что пучок заряженных частиц, входящий в плазму, оставляет свое магнитное поле в вакууме. То есть в плазме генерируется обратный ток, подобно тому как это происходит в коаксиале. Но в отличие от коаксиала пучок индуцирует в плазме обратный ток, который практически полностью компенсирует магнитное поле пучка в каждой точке объема канала пучка. Это утверждение является приближенным. Действительно, если глубина скин-слоя превышает размер пучка, то магнитное поле может возникнуть в канале пучка, при этом обратный ток, индуцированный пучком, затухнет. Таким образом, существует физическое явление, которое позволяет управлять величиной магнитного поля в канале пучка.

Для того чтобы потери энергии на создание магнитного поля не были чрезмерными, суммарный ток, текущий по каналу пучка, должен быть меньше тока Альфена. Это означает, что степень уменьшения суммарного тока должна быть велика в задаче о транспортировке пучка на термоядерную мишень, и требуется очень точное управление этим эффектом. Это сделать сложно, однако возможно. Что касается создания плазмы, то здесь нет необходимости использовать дополнительные источники энергии. Пучок заряженных частиц сам ионизует плазму своими электрическими и магнитными полями. На это тратится лишь небольшая доля энергии пучка. Проблема состоит в преодолении нестационарных, слабо контролируемых явлений, которые мы называем неустойчивостью и которые весьма типичны для плазмы вообще.

3. ФИЗИКА ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ

Возможности генерации мегаамперных пучков с энергией в несколько мегаэлектронвольт были подготовлены прогрессом импульсной техники, которая позволяет сегодня генерировать электрические импульсы с мощностью в десятки тысяч гигаватт. Пучки получают ускорением заряженных частиц в зазоре катод – анод диода. Типичная конфигурация диода и траекторий электронов изображена на рис. 2. Импульсная конденсаторная батарея заряжает катод избытком электронов. Электроны эмитируются в вакуумный промежуток и ускоряются электрическим полем в сторону анода. Анод представляет собой тонкую фольгу или хорошо проникаемую сетку. Есть ограничение на величину тока, который может быть ускорен в диоде заданной геометрии. Это прежде всего связано с накоплением

объемного заряда. С увеличением объемного заряда происходит экранирование электрического поля на катоде, и благодаря этому ток, эмиттируемый из катода, уменьшается. Объемный заряд ускоряемых электронов в вакуумном промежутке как бы перемещает катод от его реального положения в вакуум, в сторону анода. Это ограничение объемного заряда может быть рассчитано из уравнения Пуассона (см. формулу (2)), а ток, текущий через диод, равен произведению плотности электронов на скорость, которая также связана с приложенным потенциалом. Отсюда следует выражение для тока, генерируемого в диоде, известное как закон Ленгмюра:

$$I = \frac{\sqrt{2} m v c^2}{9} \left(\frac{eU}{mc^2} \right) \left(\frac{R}{d} \right)^2, \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (5)$$

(Ленгмюр – знаменитый американский ученый, классик физики плазмы и физической электроники.)

Физики, занявшиеся сильноточными пучками в 70-х годах, столкнулись с новым ограничением на величину тока диода, связанным с сильноточностью. Действительно, согласно формуле (1), кроме электрической силы, ускоряющей электроны от катода к аноду, на них действует магнитная сила, заворачивающая электроны к оси диода, а если магнитное поле достаточно велико, магнитная сила поворачивает электроны назад к катоду. Мы можем написать простое соотношение, определяющее верхний предел для тока электронов, который может протекать через диод. Это условие состоит в том, что зазор катод – анод d должен быть меньше радиуса вращения электрона в магнитном поле тока.

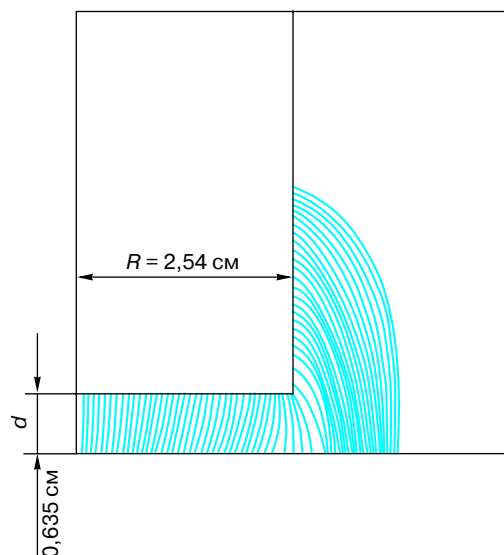


Рис. 2. Расчетные стационарные траектории электронов в диоде с плоскими круглыми электродами (ток меньше альфеновского).

Как известно, электрон в магнитном поле совершает ларморовское вращение и радиус вращения выражается через скорость и магнитное поле согласно формуле

$$\frac{m\upsilon c}{eB}. \quad (6)$$

Если мы воспользуемся формулой (3) для магнитного поля, то получим величину максимального тока, который может протекать через диод:

$$I = \frac{m\upsilon c^2 R}{2e d}. \quad (7)$$

Здесь опять появилось выражение для альфеновского тока: ток, идущий через диод, равен альфеновскому току, умноженному на отношение радиуса диода к анод-катодному промежутку. В релятивистском случае у этой формулы другая зависимость от величины приложенного напряжения. Энергия электронов может быть записана в виде mc^2 , где m – релятивистская масса частицы. Эти две формулы отличаются тем, что в формуле Ленгмюра отношение R к d во второй степени, а не в первой, как в формуле (7) (закон Чайлда–Ленгмюра).

Таким образом, если мы желаем получить сильнооточный пучок с током много больше альфеновского, у нас есть две возможности: повышать напряжение и увеличивать отношение R/d , увеличивая площадь диода. Уменьшать d слишком сильно нельзя, так как в сильнооточных диодах и на катоде, и на аноде возникает плазма, которая движется навстречу друг другу. В результате очень быстро происходит короткое замыкание промежутка, и диод перестает генерировать энергичные электроны. Поэтому все сильнооточные диоды работают при напряжении, близком к мегавольту или выше, так что электроны, генерируемые в диоде, надо рассматривать уже как релятивистские частицы, а сильнооточные пучки электронов называются релятивистскими электронными пучками. Для определения величины тока, идущего через диод, надо пользоваться формулой (7).

Второе важное обстоятельство, которое следует из физики ускорения электронов в диоде, состоит в том, что электроны в диоде движутся не параллельно, а каждый по своей орбите, стягивающейся к оси диода. На оси диода нет магнитного поля, там электроны движутся в направлении от катода к аноду, а крайние частицы заворачиваются магнитным полем наиболее сильно (см. рис. 2). Поэтому пучок, проходящий через анодную фольгу, имеет разные направления движения. Хотя такой пучок может потом быть захвачен собственным магнитным полем и распространяться через плазму, но это будет некачественный пучок. Его трудно будет сфокусировать. Это обстоятельство сильно усложняет использование электронных пучков для нагрева термоядерной мишени.

Физики, работавшие над проблемой поджига термоядерного микровзрыва, в конце 70-х годов предложили использовать для этой цели не электронные, а ионные пучки. Они менее чувствительны к магнитному полю. Ионы также совершают в магнитном поле ларморовское вращение, но ларморовский радиус ионов почти в сто раз больше, чем у электронов. В ленгмюровском диоде ускоряются не только электроны, но и ионы. Ион, вышедший из анода, попадает в электрическое поле и начинает двигаться к катоду. Пройдя зазор, он получит такую же энергию, как электрон, но при этом скорость иона будет меньше, так как его масса больше. В обычном слаботочном диоде ионный ток в корень квадратный из соотношения масс электрона к иону меньше, чем электронный ток, и обычно им можно пренебречь.

Однако можно реализовать условия, когда ионный ток будет сравним с электронным и даже будет превышать его. Возьмем для этого диод с большим отношением R/d , так чтобы согласно формуле (6) ларморовский радиус электрона, определяемый величиной тока, стал меньше зазора d . В этом случае диод будет работать в режиме, когда основной ток, текущий через него, будет ионным, а электроны в магнитном поле тока будут замагничены и не будут достигать анода. Такая ситуация изображена на рис. 3. Она может быть легко достигнута путем выбора соответствующего генератора тока и напряжения и соотношения R/d . Ионы при этом будут лететь почти параллельно оси, и мы можем пренебречь их поворотом в магнитном поле, если ток не слишком велик. Как видим, одно и то же устройство с разным отношением R/d может генерировать электроны или ионы.

В настоящее время программа поиска путей поджига термоядерного микровзрыва с помощью ионных пучков развивается в США в государственной лаборатории Сандия и в Германии в научном центре Карлсруэ. Простота генерации ионных пучков служит стимулом этих исследований. Тем не менее исследователи встречаются с серьезными трудностями, так как течение ионов в диоде, как показывают теория и эксперимент, неустойчиво.

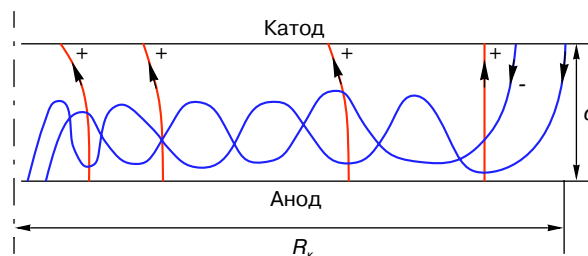


Рис. 3. Геометрия диода и схема траекторий электронов (-) и ионов (+). R_k – радиус катода, d – зазор анод – катод.

В нем возникают неконтролируемые колебания, и качество ионного пучка, выходящего из диода, хуже, чем предсказывает простейшая теория. Ионный термояд сегодня проигрывает по контролю качества пучков лазерному управляемому синтезу, где термоядерная мишень поджигается мощными сфокусированными лазерными лучами. Однако ионные пучки в будущем могут выиграть это состязание, так как единица лазерного света, доставленная на мишень, чрезвычайно дорога. Генератор ионных пучков дает в десятки раз более дешевую энергию, и затраты на его строительство также значительно меньше. Современный лазерный генератор, который способен только продемонстрировать возможность поджига термоядерной мишени, стоит более миллиарда долларов. Тем не менее научное сообщество, правительства и налогоплательщики развитых стран согласны платить гигантские суммы за то, что ученые получают свидетельство принципиальной возможности достижения термоядерного микровзрыва в лаборатории, то есть возможности иметь альтернативный источник энергии для человечества в будущем.

4. ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ

Применение электронных и ионных пучков не ограничивается такой амбициозной проблемой, как термоядерный синтез, или скандальными задачами типа СОИ. В 80-х годах в связи с разработкой СОИ в исследования по генерации и физике пучков, по развитию экспериментов были вовлечены большие коллективы, были вложены большие средства. В начале 90-х годов после изменения политической ситуации в мире и окончания военного противостояния программа СОИ потеряла актуальность. Перед учеными, занимавшимися импульсной техникой и сильноточными пучками, встала задача использования накопленных знаний для мирных применений, то есть проблема конверсии.

Приведу несколько примеров возможности эффективного использования этой техники. Импульсные пучки заряженных частиц используются для повышения износостойкости материалов и оборудования, для изучения структуры поверхностей и закаливания. Ионные, электронные, лазерные пучки имеют малую глубину проникновения в твердые материалы, поэтому при облучении поверхностей таким излучением происходит расплав

тонкого поверхностного слоя толщиной от десяти до ста микрон. Затем происходит очень быстрое остывание этого тонкого слоя. При этом не успевает произойти кристаллизация в полном объеме, и полученные таким путем поверхности имеют очень малую зернистость, аморфную структуру. Такие поверхности обладают большой износостойкостью, не происходит микроотколов, охрупчивания, и срок службы изделий, прошедших такую обработку, увеличивается во много раз.

Другой пример использования импульсной техники – генерация мощных импульсов рентгеновского излучения для тестирования стойкости военной техники к воздействию излучений ядерного взрыва. Сегодня мировая общественность активно выступает против проведения подземных ядерных испытаний. Физики считают, что большая часть эффектов воздействия ядерного взрыва и защиты от них могут быть изучены в лабораторных условиях. Источником сверхмощного излучения могут быть системы, созданные на основе генераторов сильноточных пучков и импульсных генераторов тока. Сильноточный самостягивающийся разряд в газе, осуществляемый импульсным током в миллионы ампер, может дать короткую вспышку рентгеновского излучения необходимой мощности. Над этим работают сейчас крупнейшие военные лаборатории мира.

Более детальное освещение импульсной электротехники и физики пучков читатель может найти в приведенной литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.
2. *Миллер Р.* Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. Перевод с англ. М.: Мир, 1984.
3. Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков / Под ред. Л.И. Рудакова. М.: Энергоатомиздат, 1990.

* * *

Леонид Иванович Рудаков, доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института, директор Отделения прикладной физики Российского Научного Центра "Курчатовский институт", лауреат двух Государственных премий. Автор более 200 научных публикаций, трех монографий.