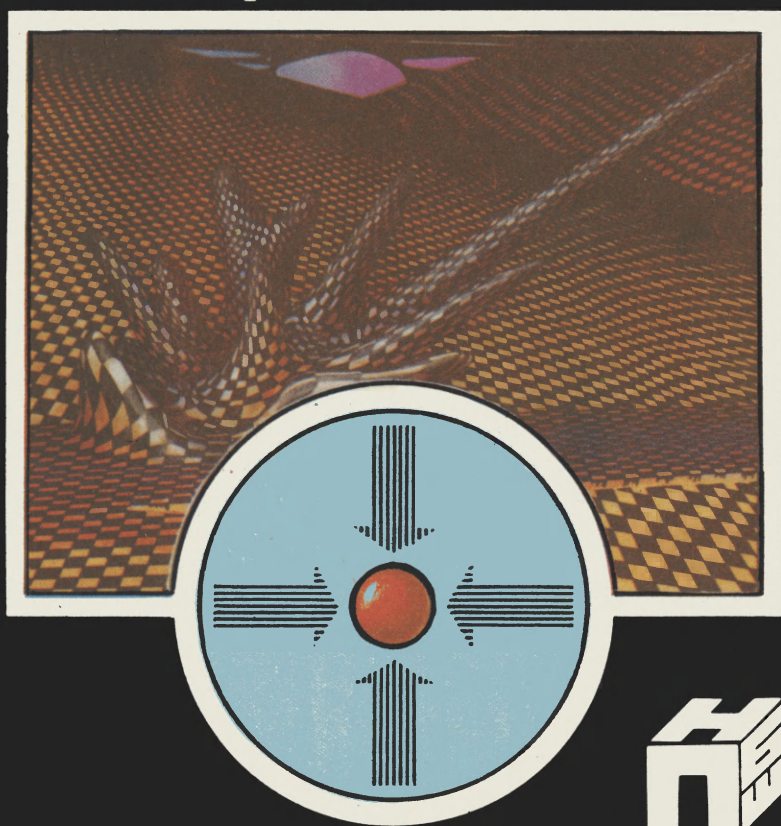


В.А. НИКЕРОВ

Электронные пучки за работой



НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

Основана в 1986 году

В.А. НИКЕРОВ

Электронные пучки за работой



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1988

ББК 22.38

Н62

УДК 539.124.18: 66.085

Р е ц е н з е н т Е. А. Абрамян

Никеров В.А.

Н62 Электронные пучки за работой. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 128 с.: ил. — (Научно-попул. б-ка школьника).

ISBN 5-283-03919-6.

На популярном уровне рассмотрены физические явления при облучении различных сред потоками ускоренных заряженных частиц. Рассказано об использовании электронных пучков в химической, медицинской, микробиологической и легкой промышленности, сельском и коммунальном хозяйстве, электронике, машиностроении, металлургии, геологии, традиционной и термоядерной энергетике.

Для широкого круга читателей. Может быть полезна для профессиональной ориентации школьников.

Н $\frac{1704070000-028}{051(01)-88}$ 107-88

ББК 22.38

ISBN 5.283 03919 6

© Энергоатомиздат, 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Появившиеся более полувека назад как инструмент постижения тайн материи ускорители заряженных частиц в последние годы вышли из научных лабораторий и прочно заняли свое место в промышленности. Развитие физики и техники электронных пучков являет собой пример того, как, казалось бы, узко академическая область научных исследований всего за одно-два десятилетия нашла успешное применение в большинстве отраслей народного хозяйства.

Действительно, до недавнего времени ускорители ассоциировались в первую очередь с романтикой исследований ядерных превращений и поиска новых элементарных частиц. Поэтому основная часть книг по данной тематике посвящалась проблемам создания и функционирования крупных ускорительных систем, предназначенных для этих целей. Однако быстрый прогресс ускорительной техники и радиационных технологий привел к тому, что в настоящее время на первый план выходят не только и не столько проблемы самих ускорителей, сколько вопросы, связанные с результатами применений ускоряемых с их помощью различных частиц. При этом по простоте получения и эффективности использования электронные пучки имеют преимущество по сравнению с пучками других частиц.

В повседневной жизни, дома и на работе, мы, не всегда догадываясь об этом, постоянно сталкиваемся с разнообразными следами работы электронных пучков. О том, как удастся с помощью потоков ускоренных электронов лечить болезни и улучшать качество полимеров, плавить сталь и повышать продуктивность сельского хозяйства, изготавливать интегральные микросхемы, а также делать многое другое, рассказано в этой книге.

Не вызывает сомнений, что пока мы находимся лишь на начальной стадии внедрения ускорительной техники в народное хозяйство. Поэтому, с одной стороны, значительная часть книги посвящена будущим, перспективным применениям электронных пучков, а с другой стороны, сделана попытка рассказать о трудностях и возможных опасностях, которые необходимо при этом преодолеть.

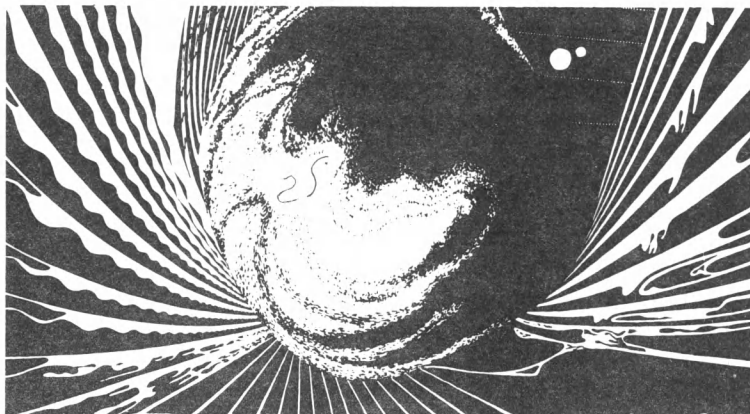
Автор не ставил целью изложить весь материал на одном, общедоступном уровне. По замыслу часть книги должна быть понятна и интересна самому несведущему читателю, а часть — давать пищу для размышлений даже специалисту. В целом же можно сказать, что для понимания основного содержания книги не требуются знания, выходящие за пределы школьной программы. Более того, она написана так, чтобы неподготовленный читатель мог опустить часть материала без большого ущерба для понимания остального текста. Например, при первом чтении можно опустить две первые главы, в которых сосредоточены сравнительно сложные теоретические выкладки.

Можно упомянуть об одной особенности изложения материала книги. В некоторых разделах сделана попытка использовать элементы системного подхода: освещаются различные стороны проблем и совершаются экскурсии в смежные области. Такой прием делает эти разделы и книгу в целом интереснее и познавательнее. Однако при этом задача автора становится существенно более трудной. Некоторые мысли могут показаться читателю излишне усложненными, другие — несколько поверхностными. Отдельные тезисы, вероятно, вызовут дополнительные вопросы, ответ на которые можно попробовать найти в специальной литературе (небольшой список рекомендуемой читателю литературы приведен в конце книги). Однако автор очень надеется, что некоторые эксперименты в изложении материала книги все же оказались удачными.

В книге использована международная система единиц (СИ). О внесистемной единице энергии ускоренных электронов — электрон-вольте (эВ), которая широко применяется в ядерной физике наряду с СИ и без которой не мог обойтись и автор этой книги, говорится на с. 15.

Автор благодарен доктору технических наук, профессору Е.А. Абрамяну за изучение рукописи и предоставление дополнительного материала по тексту. Хотелось бы выразить признательность члену-корреспонденту АН СССР В.Д. Русанову за стимулировавшие работу обсуждения, доктору физико-математических наук, профессору А.А. Рухадзе за ценные советы и поддержку, доктору физико-математических наук А.А. Фридману за полезные замечания, доктору физико-математических наук Г.В. Шолину за многочисленные консультации и помощь в работе. Автор благодарит также доктора физико-математических наук, профессора А.Т. Фоменко, который выполнил иллюстрации, использованные в качестве заставок к главам.

В.А. Никеров



1

ЭЛЕКТРОНЫ И ЗАКОН КУЛОНА

1. НАЧНЕМ С ОДНОГО ЭЛЕКТРОНА

Всегда ли свойства электронного пучка представляются как сумма свойств отдельных электронов? Нет, не всегда. Все зависит от того, какие свойства электронного пучка нас интересуют. При знакомстве с этой книгой читатель столкнется с эффектами, связанными с торможением электронных пучков. Ведь чтобы понять, на чем основаны применения электронных пучков, надо разобраться в том, как они тормозятся в различных средах и какие физические изменения при этом происходят.

Что может служить простой и наглядной моделью торможения? Шар, запущенный игроком в кегельбане? Или волна, набегающая на берег? Обе модели достаточно физичны и в ряде случаев неплохо помогают понять механизмы торможения электронных пучков.

Первая модель предполагает, что торможение каждого электрона (шара) происходит независимо от других электронов, а результирующая картина процесса получается путем сложения эффектов от торможения всех электронов. Такое приближение называется *одночастичным* и сводится к представлению электронного пучка как пучка отдельных электронов. Оно обычно

хорошо описывает биологические воздействия, радиационную обработку материалов и большинство других применений электронных пучков.

Однако, например, в задаче управляемого термоядерного синтеза на первый план выходят уже не одночастичные, а так называемые *коллективные эффекты*. При этом интенсивное взаимодействие электронов пучка между собой и со средой приводит к тому, что более плодотворным оказывается рассмотрение пучка как единого целого. Возникает примерно такая же ситуация, как для набегающей на берег волны, которую удобнее описывать как целое с помощью амплитуды и скорости, а не как набор отдельных тормозящихся о берег молекул.

Все же одночастичное приближение является наиболее общим и простым, и именно с него следует начать разговор о физике электронных пучков. Многие закономерности можно понять уже из законов сохранения импульса и энергии тормозящегося в среде электрона.

Следствие законов сохранения импульса и энергии

Как скоро быстрый электрон из пучка затормозится? Или, что одно и то же, как скоро он потеряет всю свою первоначальную кинетическую энергию?

Опыт игры в бильярд подсказывает, что движущийся шар может потерять всю свою энергию и остановиться уже при первом столкновении с другим точно таким же, но неподвижным шаром. То же самое может произойти при лобовом соударении быстрого электрона с электроном среды. Однако среда состоит не только из электронов, но и из включающих в себя протоны и нейтроны сравнительно тяжелых ядер атомов. А легкий шар при упругом соударении с массивным телом просто отскакивает от него и изменяет направление своего движения (и векторную характеристику движения — импульс), почти не меняя своей энергии (рис. 1).

Это легко доказать с помощью законов сохранения импульса и энергии для системы из двух сталкивающихся частиц. При лобовом ударе законы сохранения записываются так:

$$m_1 v = m_1 v_1 + m_2 v_2; \quad m_1 v^2 / 2 = m_1 v_1^2 / 2 + m_2 v_2^2 / 2.$$

Здесь m_1 и m_2 — массы сталкивающихся частиц; v — скорость

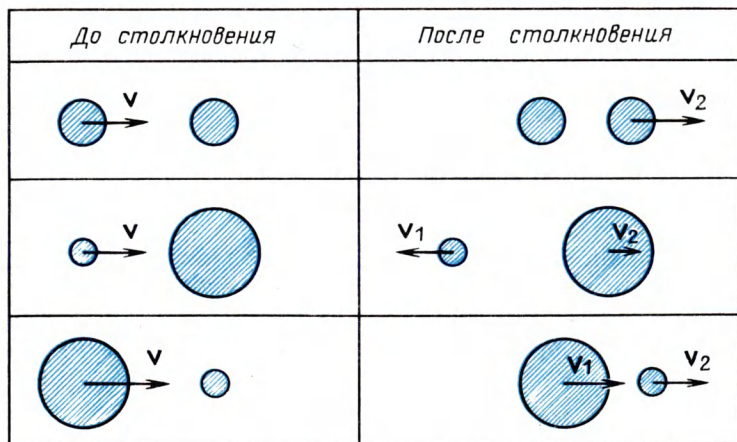


Рис. 1. Лобовое столкновение частиц с различным соотношением масс

налетающей (первой) частицы до соударения; v_1 и v_2 — скорости частиц после соударения.

Элементарные выкладки позволяют получить связь скоростей быстрой частицы до и после соударения:

$$v_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v.$$

Это дает возможность оценить относительную потерю в процессе соударения кинетической энергии налетающей частицы δ — отношение потерянной энергии ΔE к начальной энергии E :

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\Delta E}{E} = \frac{m_1 v^2 / 2 - m_1 v_1^2 / 2}{m_1 v^2 / 2} = 1 - \left(\frac{v_1}{v} \right)^2 = \\ &= \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Результат математически подтверждает наблюдение, что наиболее эффективный обмен энергией при упругих соударениях возможен только между частицами сравнимой массы. В частности, при лобовом соударении частиц одинаковой массы ($m_1 = m_2$) $\delta = 1$, что означает полную передачу энергии от налетающей частицы к неподвижной и остановку первой частицы в результате удара.

Если же массы соударяющихся частиц существенно различны ($m \ll M$), то в знаменателе последней формулы можно пренебречь малой массой по сравнению с большой. Результат показывает, что в этом случае доля теряемой при лобовом столкновении энергии невелика и составляет

$$\delta \approx 4m/M \ll 1. \quad (2)$$

Это справедливо, независимо от того, какая частица тяжелее — быстрая или неподвижная. Знание относительной потери энергии позволяет оценить число упругих лобовых столкновений Q , требуемых для практически полного торможения быстрой частицы:

$$Q \approx 1/\delta \approx M/m \gg 1. \quad (3)$$

Например, для соударений быстрых электронов с ядрами атомов водорода (протонами) $Q \approx 1000$.

Однако число необходимых для торможения соударений может заметно превышать даже это большое значение. Далеко не все соударения частиц лобовые. Обычно частицы при столкновении лишь слегка задевают друг друга, так что передача энергии при этом меньше, чем при лобовом ударе. Например, при соударениях твердых упругих шаров за счет таких боковых ударов средняя доля теряемой энергии составляет

$$\delta = 2m_1m_2/(m_1 + m_2)^2, \quad (4)$$

что вдвое меньше, чем в том случае, если учитывать только лобовые удары.

При торможении электронов эффект боковых соударений оказывается весьма существенным. Для его расчета требуется введение дополнительных характеристик соударения, — прицельного расстояния и сечения.

Прицельное расстояние
и сечение соударения

Прицельное расстояние ρ — это расстояние, на котором центр налетающей частицы прошел бы относительно центра неподвижной частицы, если бы не было столкновения (рис. 2, а).

Понятие *сечения соударения* удобно проиллюстрировать на примере столкновения твердых шаров радиусами r_1 и r_2 . Как

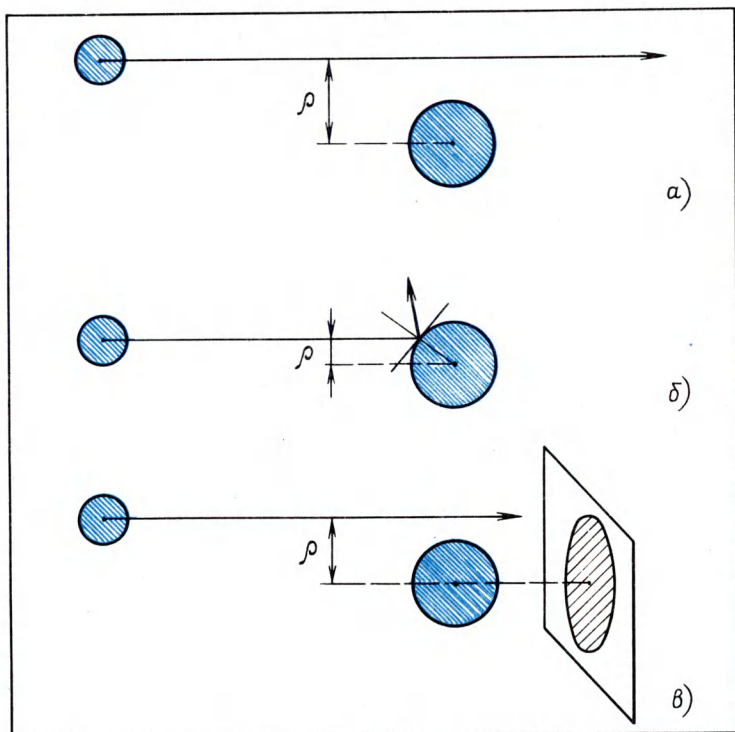


Рис. 2. К определению полного сечения столкновения

видно из рис. 2, а–в, столкновение имеет место только при $\rho < r_1 + r_2$. Прицельная площадка, заштрихованная на рис. 2, в, в которую должен попасть центр налетающей частицы, чтобы осуществилось соударение, и определяет геометрически полное сечение:

$$\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2. \quad (5)$$

При рассмотрении соударений в более сложных моделях, чем модель твердых шаров, все оказывается не так просто, и это определение не всегда подходит. Тем не менее все равно полное сечение можно представить как некую эффективную площадь.

В общем случае понятие сечения соударения дается для рассеяния большого числа одинаковых частиц и носит для каждого отдельного соударения вероятностный характер. При этом оно

характеризует скорости различных процессов соударений, а также их соотношение. Сечение по-прежнему имеет размерность площади, но определяет теперь вероятность столкновения и задается следующим образом:

$$\sigma = \zeta / (nv), \quad (6)$$

где ζ — число быстрых частиц, претерпевающих в единицу времени столкновения с одним неподвижным рассеивающим центром; n — концентрация быстрых частиц; v — их скорость до соударения. Можно показать, что формула (5) является частным случаем определения (6).

Часто бывает полезным знать не только полное, но и дифференциальное по потере энергии сечение, определяющее вероятность изменения энергии движущейся частицы в результате столкновения:

$$\sigma(\Delta E) = \zeta(\Delta E) / (nv). \quad (7)$$

В этом определении по аналогии с предыдущим $\zeta(\Delta E)d(\Delta E)$ — число рассеиваемых в единицу времени частиц, которые теряют при соударении энергию в интервале от ΔE до $\Delta E + d(\Delta E)$.

Как следует из определений, полное сечение можно получить из дифференциального путем интегрирования по потере энергии. В свою очередь, для расчета дифференциального сечения соударения полезно выразить его через прицельное расстояние. Для этого примем, что каждой конкретной потере энергии ΔE соответствует свое прицельное расстояние $\rho(\Delta E)$. Естественно, что чем дальше друг от друга пролетают сталкивающиеся частицы, тем слабее они взаимодействуют. Поэтому обычно чем больше прицельное расстояние, тем меньше потеря энергии быстрой частицей. С учетом этого потере энергии $\Delta E + d(\Delta E)$ отвечает прицельное расстояние

$$\rho[\Delta E + d(\Delta E)] = \rho(\Delta E) - d\rho(\Delta E).$$

Тогда дифференциальное по потере энергии сечение определяется геометрически как площадь кольца радиусом $\rho(\Delta E)$ и толщиной $d\rho(\Delta E)$:

$$\sigma(\Delta E)d(\Delta E) = 2\pi\rho(\Delta E)d\rho(\Delta E). \quad (8)$$

Таким образом, вычисление полного сечения путем интегрирования дифференциального геометрически сводится к суммированию площадей таких колец, каждое из которых соответ-

ствуем своим значениям прицельного расстояния и потери энергии. Однако часто основной вклад в значение интеграла вносит интервал интегрирования, отвечающий малым потерям энергии. В результате полное сечение столкновения определяется несущественными по физической сути актами рассеяния на малые углы, приводящими к малым потерям энергии быстрой частицей.

Поэтому важной характеристикой эффективности рассеяния, которая пригодится в дальнейшем, служит средняя потеря энергии быстрой частицей в процессе соударения:

$$\Delta E_{\text{ср}} = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta E \sigma(\Delta E) d(\Delta E) / \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\Delta E) d(\Delta E). \quad (9)$$

Теперь после краткой теоретической вводной части можно перейти непосредственно к изучению торможения быстрых электронов атомами среды.

2. КУЛОНОВСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

Тормозящие электронный пучок атомы состоят из ядер и вращающихся вокруг них электронов. Поэтому не удивительно, что взаимодействие обычно сводится к электростатическому притяжению или отталкиванию между атомными составляющими и электронами пучка. В результате характер торможения определяется законом Кулона:

$$F(r) = kq_1q_2/r^2,$$

где $F(r)$ — сила взаимодействия; k — коэффициент пропорциональности; q_1 и q_2 — электрические заряды взаимодействующих частиц; r — расстояние между ними.

В соответствии с формулой взаимодействие имеет место, как бы далеко ни были удалены частицы друг от друга. Однако на деле оно длится лишь короткий промежуток времени, пока сила притяжения или отталкивания относительно велика. Можно считать, что именно в этот момент наибольшего сближения частиц и происходит их столкновение. При столкновении быстрый электрон теряет часть кинетической энергии и изменяет направление своего движения.

Как это сказывается на торможении электронного пучка и какое торможение эффективнее — на атомных электронах или

на ядрах? Однозначного и простого ответа на эти вопросы нет, поэтому стоит их рассмотреть подробнее.

Как быстрый электрон взаимодействует с электронами и ядрами среды и чем различаются такие взаимодействия? Составим характеристики этих частиц. Во-первых, ядро на 3—5 порядков тяжелее электрона, а как нам уже удалось показать, соотношение масс сталкивающихся частиц в значительной мере определяет результат соударения. Во-вторых, ядро может иметь очень большой по сравнению с электроном электрический заряд и, значит, сильнее действовать на частицы пучка. В-третьих, заряд этот положительный, а не отрицательный, как у электрона.

Последнее, на первый взгляд, наиболее принципиальное различие, на деле оказывается несущественным. Не так это важно, какие силы действуют при столкновении — притяжения или отталкивания. А вот роль первых двух различий достаточно велика. Все это можно показать, решая соответствующие уравнения.

Сначала сделаем оценку. Рассмотрим кулоновское столкновение в предположении, что теряемая быстрым электроном энергия мала по сравнению с его начальной энергией. Тогда можно считать, что траектория электрона при соударении почти не искривляется и остается практически прямолинейной. Вторую частицу (электрон или ядро атома) будем считать покоящейся в процессе соударения. Из соображений симметрии тогда можно сделать вывод, что приобретаемый ею в результате столкновения импульс направлен перпендикулярно траектории налетающего электрона.

Второй закон Ньютона для изменения импульса первой (второй) частицы дает (рис. 3):

$$dp/dt = kq_1q_2/r^2.$$

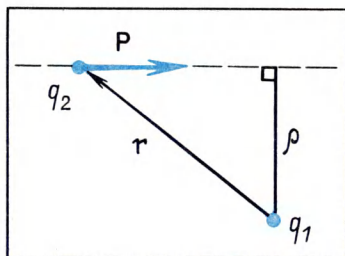
Для интересующей нас перпендикулярной компоненты имеем

$$\frac{dp_{\perp}}{dt} = \frac{kq_1q_2}{r^2} \frac{\rho}{r} = \frac{kq_1q_2\rho}{r^3}.$$

Интегрирование этого уравнения дает полное изменение импульса первой (и, следовательно, второй) частицы в процессе соударения:

$$\Delta p = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{kq_1q_2\rho}{r^3} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{kq_1q_2\rho dt}{(\rho^2 + v^2 t^2)^{3/2}} = \frac{2kq_1q_2}{\rho v},$$

Рис. 3. Кулоновское соударение частиц



где v — скорость налетающего электрона.

Отсюда получаем энергию, переданную второй частице:

$$\Delta E = (\Delta p)^2 / (2m_2) = 2k^2 q_1^2 q_2^2 / (\rho^2 m_2 v^2). \quad (10)$$

Выведенная ранее связь (8) между дифференциальным по потере энергии сечением и прицельным расстоянием позволяет теперь получить для сечения

$$\begin{aligned} \sigma(\Delta E) d(\Delta E) &= 2\pi\rho(\Delta E) d\rho(\Delta E) = \\ &= \frac{2\pi k^2 q_1^2 q_2^2 d(\Delta E)}{m_2 v^2 (\Delta E)^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Приведенная оценка сделана в приближении $\Delta E \ll E$, что характерно для далеких столкновений, т.е. для больших значений прицельного расстояния. Но эта приближенность не снижает ценности расчета, поскольку, как уже говорилось, такие столкновения происходят наиболее часто и именно они определяют процесс торможения быстрых электронов в веществе. Это согласуется и с формулой (11), в соответствии с которой дифференциальное сечение обратно пропорционально квадрату потери энергии, т.е. большие потери маловероятны. Более того, точный расчет показывает, что формула (11) остается справедливой и для малых значений прицельного расстояния и при любом допустимом (законами сохранения энергии и импульса) соотношении потери энергии и энергии быстрой частицы:

$$0 \leq \Delta E \leq 4m_1 m_2 E / (m_1 + m_2)^2.$$

Полученная формула вполне пригодна для сравнения эффективностей торможения быстрых электронов электронами и ядрами атомов среды. Во-первых, как уже отмечалось, теряемая налетающим электроном энергия не зависит от знака электрического заряда тормозящей частицы. Это видно из фор-

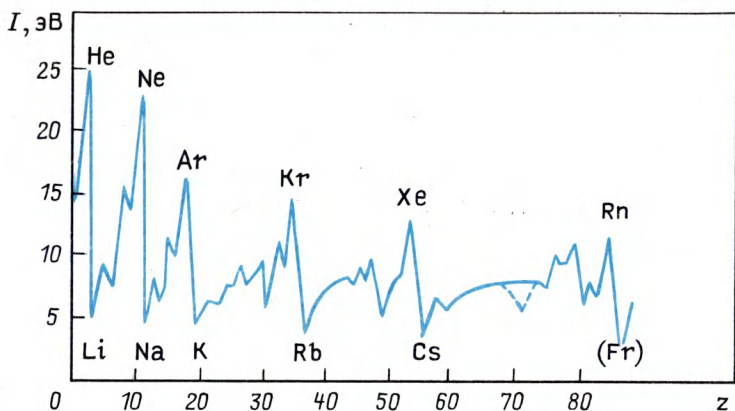


Рис. 4. Энергия ионизации различных атомов

мулы (10). Во-вторых, в соответствии с выражениями (10) и (11) как передаваемая энергия, так и дифференциальное по потере энергии сечение тем больше, чем больше заряд рассеивающей частицы и чем меньше ее масса. Понятно, что все определяется именно массой, поскольку разница масс электрона и ядра атома особенно велика (3–5 порядков).

Таким образом, можно сделать важный вывод: потеря энергии быстрым электроном происходит в основном за счет столкновений с электронами среды. При этом потерей энергии за счет столкновений с ядрами атомов можно пренебречь.

3. ИОНИЗАЦИЯ И ВОЗБУЖДЕНИЕ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Итак, удалось определить, какие столкновения приводят к потере энергии электронами пучка. Рассмотрим теперь подробнее соударения быстрых электронов с атомными. Такие соударения приводят к *ионизации* — полному отрыву атомного электрона от атома, или к *возбуждению* атома — перескоку атомного электрона из основного (невозбужденного) состояния в возбужденное. Ионизация и возбуждение происходят при столкновениях с электронами чаще внешних атомных оболочек, чем внутренних, поскольку их энергия связи сравнительно невелика и равна энергии ионизации атома I .

Энергия ионизации является важнейшей характеристикой, определяющей торможение электронных пучков. Она зависит от положения атома химического элемента в таблице Менделеева (рис. 4). Слабее всего связаны электроны в атомах одновалентных щелочных металлов — лития, натрия, калия и т.д. В таком атоме один внешний (валентный) электрон находится на сравнительно удаленной орбите и его легко оторвать. Прочнее всего связаны электроны в атомах инертных газов — гелия, неона, аргона и др. У них все электроны образуют замкнутые оболочки, которые трудно разрушить.

Энергия ионизации составляет от 3,89 эВ* для цезия до 24,58 эВ для гелия и периодически изменяется в зависимости от атомного номера z : в пределах одного периода таблицы Менделеева увеличивается с ростом z , в пределах одной группы элементов уменьшается с ростом z .

Процесс ионизации молекул проходит примерно так же, как и для атомов. Энергия ионизации молекул — того же порядка, что и для атомов, и обычно составляет от 5 до 15 эВ.

Для того чтобы произошла ионизация, атомному электрону необходимо при соударении получить энергию ΔE , превышающую I . Если же $\Delta E < I$, то ионизации нет, зато может произойти возбуждение атома. Однако и для возбуждения требуется, чтобы переданная энергия была не слишком мала и превышала порог возбуждения U , который пропорционален энергии ионизации данного атома:

$$U = \alpha I.$$

Здесь коэффициент пропорциональности α обычно составляет примерно 0,6.

Сделанные замечания позволяют решить сложную задачу — вычислить полные сечения ионизации атомов и молекул. Для

* Электрон-вольт (эВ) — это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1 В. Эта единица очень удобна и прямо связывает энергию электрона с напряжением ускорителя, в котором рождается электронный пучок. Приведем несколько примеров. При нормальной температуре энергия электронов составляет примерно 1/30 часть электрон-вольта. Характерная энергия электронов в газовом разряде 1 эВ. Энергия 1 кэВ соответствует уже довольно быстрым, хотя и нерелятивистским электронам. С энергией 1 МэВ, характерной для многих мощных пучков, применяемых в народном хозяйстве, движутся уже релятивистские (имеющие скорость, близкую к скорости света) электроны. Наконец, 1 ГэВ — весьма высокая энергия, позволяющая заряженным частицам свободно вступать во многие ядерные реакции.

этого достаточно в нужных пределах проинтегрировать дифференциальное сечение (11) по потере энергии.

Полное сечение ионизации атома или молекулы быстрым электроном получается интегрированием в пределах от I до E :

$$\sigma_{\text{ион}} = z_{\text{в}} \int_I^E \sigma(\Delta E) d(\Delta E) = z_{\text{в}} \pi k^2 e^4 \frac{2}{m v^2} \times \\ \times \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{E} \right) \approx z_{\text{в}} \pi k^2 e^4 \frac{2}{I m v^2}, \quad (12)$$

где $z_{\text{в}}$ — число валентных электронов атома или молекулы; e — заряд электрона; m — масса электрона. Полное сечение возбуждения атома или молекулы требует интегрирования в пределах от aI до I :

$$\sigma_{\text{возб}} = z_{\text{в}} \pi k^2 e^4 \frac{1 - a}{a} \frac{2}{I m v^2}. \quad (13)$$

Из полученных результатов следует ряд правильных выводов о том, как происходят ионизация и возбуждение быстрыми электронами. Они помогают понять тот факт, что вероятности ионизации и возбуждения обычно одного порядка:

$$\sigma_{\text{ион}} / \sigma_{\text{возб}} = a / (1 - a) \approx 1$$

в широком интервале энергии E от 1 кэВ до 1 МэВ и даже до более высоких энергий.

Формулы также показывают, что вероятности ионизации и возбуждения с ростом энергии налетающего электрона не увеличиваются, как на первый взгляд можно бы было предположить (сильнее ударил — больше ионизовал), а падают. При некотором размышлении нетрудно понять, почему это происходит. Ведь с ростом энергии увеличивается и скорость электрона, а значит, уменьшаются время взаимодействия сталкивающихся электронов и эффективность этого взаимодействия. Впрочем, скорость в любом случае в соответствии с теорией относительности не может превысить скорость света c . При $E \gtrsim 100$ кэВ, когда скорость электрона уже сравнима со скоростью света, с ростом E она почти перестает увеличиваться. В результате время взаимодействия электронов меняется медленно, и это способствует тому, что вероятности ионизации и возбуждения перестают резко падать с ростом энергии, оставаясь почти постоянными.

Полезно оценить в принятой модели среднюю потерю энергии налетающей частицей в процессе соударения с атомным электроном. Воспользовавшись формулой (9) и учтя, что суммарное дифференциальное по потере энергии сечение ионизации и возбуждения отлично от нуля только при $aI < \Delta E < E$, получим

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{ср}} &= \frac{E}{\int aI} \frac{d(\Delta E)}{\Delta E} \bigg/ \frac{E}{\int aI} \frac{d(\Delta E)}{(\Delta E)^2} = \\ &= \ln \frac{E}{aI} \bigg/ \left(\frac{1}{aI} - \frac{1}{E} \right) \approx aI \ln \frac{E}{aI}. \end{aligned} \quad (14)$$

Существенно, что средняя потеря энергии быстрым электроном слабо зависит от его энергии и составляет обычно 30–100 эВ на соударение. Это справедливо как при релятивистских, так и при нерелятивистских энергиях электрона. По сравнению с кинетической энергией средняя потеря действительно оказывается невелика.

На что тратится теряемая энергия? Естественно, на ионизацию и возбуждение атомов и молекул. Однако поскольку средняя потеря энергии велика по сравнению с энергиями ионизации и возбуждения, можно сделать вывод, что в основном она первоначально переходит в кинетическую энергию оторванного при ионизации вторичного электрона. Но этим дело не кончается. Далее имеет место целый каскад превращений, определяющий практически все физические, химические, биологические действия электронного пучка. Но этот вопрос заслуживает отдельного разговора, который и состоится в § 8.

А пока сделаем еще несколько оценок. Число соударений $Q_{\text{н}}$, необходимое для полной потери энергии быстрого электрона, пропорционально его начальной энергии E_0 и обратно пропорционально средней потере энергии $\Delta E_{\text{ср}}$:

$$Q_{\text{н}} = \frac{E_0}{aI \ln[E_0/(aI)]}. \quad (15)$$

Получается, что этих соударений должно быть не так уж и мало. Например, для $E_0 = 1$ МэВ имеем характерное число $Q_{\text{н}} \sim 10^4$.

Путь, пройденный быстрым электроном, пока он не растеряет свою энергию, оценивается так:

$$L_{\text{н}} = Q_{\text{н}} \lambda_{\text{н}} = Q_{\text{н}} / (N\sigma), \quad (16)$$

где λ_n — длина пробега быстрого электрона, на который он имеет одно неупругое соударение с атомом, приводящее к ионизации или возбуждению; N — концентрация атомов среды; σ — сечение неупругого соударения. При этом по известной формуле $\lambda_n = 1/(N\sigma)$.

Тормозной путь L_n определяет толщину слоя вещества, в котором тормозится пучок электронов, но только в том случае, когда траектория торможения прямолинейна. Если же траектория искривляется, то толщина этого слоя может оказаться заметно меньше L_n . А траектория движения действительно бывает криволинейной вследствие разворота электронов при соударениях.

4. РАЗВОРОТ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СОУДАРЕНИЯХ

Природу этого разворота проще всего понять, вернувшись к обсуждению рис. 3. Как уже удалось показать, кулоновские столкновения между заряженными частицами обычно приводят лишь к малым изменениям энергии и импульса налетающей частицы. Лобовые столкновения крайне редки. В результате разворот электрона происходит обычно не за одно соударение, а постепенно. Угол отклонения от начального направления движения меняется при соударениях хаотически. Временами он может не только возрастать, но и случайным образом уменьшаться. Иногда даже направление движения частицы может вновь совпасть с начальным. Процесс этот по сути напоминает броуновское движение частиц и носит диффузионный характер.

Попробуем теперь выяснить, на чем эффективнее идет разворот быстрых электронов — на атомных электронах или на ядрах. Соотношение масс сталкивающихся частиц теперь мало что определяет. Ведь хотя потеря энергии легкой частицей при столкновении с тяжелой частицей и мала, разворот при этом идет не менее эффективно, чем при столкновении частиц одинаковой массы. Это следует и из приведенной выше теории кулоновских соударений, в которой доказано, что изменение импульса (и угол поворота) быстрого электрона не зависит от массы рассеивающей частицы.

Получается, что в этом случае все определяется только зарядом ядра. Если речь идет об атомах водорода, то заряд ядра равен по модулю заряду электрона, так что разворот на них идет примерно одинаково. Интересней дело обстоит, если заряд яд-

ра больше ($z > 1$). Рассмотрим тогда рассеивающие свойства атома, состоящего из z элементарных зарядов e и одного заряда ze . (Здесь не имеет смысла обращать внимание на знаки зарядов, поскольку, как показано выше, от знака заряда ничего не зависит.) С одной стороны, электронов в z раз больше, чем ядер, и поэтому столкновения с ними в z раз чаще. С другой стороны, заряд ядра в z раз больше заряда электрона, и, следовательно, в z раз сильнее взаимодействие и больше угол поворота при каждом соударении.

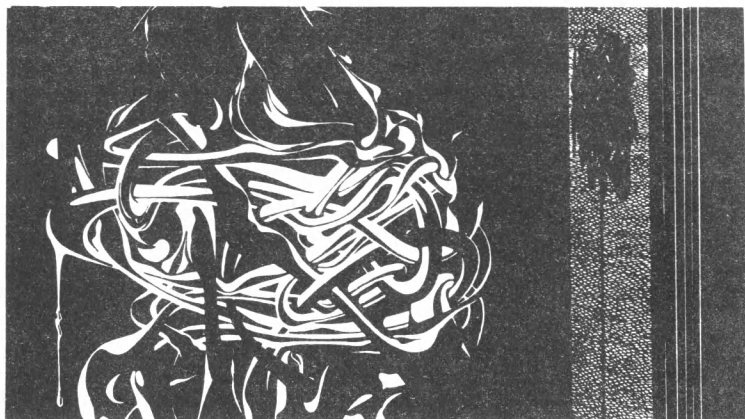
На первый взгляд, эффекты одинаковы. И все же это не так, поскольку по теории вероятности большое число малых отклонений менее эффективно, чем малое число больших.

Чтобы лучше понять это утверждение, полезно воспользоваться аналогией. Каждому соударению электрона с поворотом на малый угол φ в ту или иную сторону поставим в соответствие результат бросания монеты, которая падает на ту или иную сторону (орел или решка). Едва ли кто, бросив монету $Q_y = 1000$ раз, будет ожидать, что 1000 раз выпадет орел. Точно так же не следует ожидать, что электрон в результате каждого из Q_y соударений будет поворачиваться все время в одну сторону и результирующий угол составит $Q_y\varphi$. Более правильно, хотя и тоже нереалистично, предполагать, что орел выпадет в точности 500 раз (среднее значение). Статистика и здравый смысл подсказывают, что наверняка будут небольшие отклонения от среднего значения. Именно такие отклонения и приводят к результирующему развороту электрона пучка, определяемому отклонением направления движения от среднего (начального) направления.

Для случая с монетой ожидаемое отклонение пропорционально корню квадратному из числа испытаний $\sqrt{Q_y}$ и примерно равно 30. По аналогии результирующий угол разворота пропорционален корню квадратному из числа соударений и φ , т.е. равен $\sqrt{Q_y}\varphi$. Проведенные рассуждения позволяют оценить число соударений, необходимых для разворота быстрого электрона на достаточно существенный угол 1 рад. Полагая $\sqrt{Q_y}\varphi \approx 1$, получаем

$$Q_y \approx 1/\varphi^2. \quad (17)$$

Предположим, что мы рассчитали угол разворота на ядрах. Для сравнительной оценки разворота на атомных электронах, очевидно, нужно Q_y заменить произведением $Q_y z$, а φ — величиной φ/z . Полученный результирующий угол разворота $\sqrt{Q_y z}\varphi$, как и отмечалось, меньше, чем угол разворота на ядрах.



2

ТЕОРИЯ ЛЕСНОЙ ПРОГУЛКИ

5. ДЛИНА ПРОБЕГА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Прежде чем перейти к теме второй главы, стоит повторить некоторые мысли из предыдущей.

Главная задача книги — разобраться в физико-технических эффектах, связанных с торможением электронных пучков в различных средах. Наиболее простая модель торможения — одночастичная модель — сводится к представлению электронного пучка в виде набора отдельных, не взаимодействующих между собой электронов.

Такие быстрые электроны обычно тормозятся одновременно двумя путями. Во-первых, они постепенно теряют свою энергию, во-вторых, постепенно меняют направление своего движения, чем затрудняют свое продвижение вперед.

Потеря энергии быстрыми электронами происходит в основном за счет ионизации и возбуждения атомов и молекул среды. Разворот же пучка осуществляется вследствие упругих соударений с ядрами атомов. Оказывается, что если среда торможения состоит из атомов легких элементов (водорода и других, зарядовое число ядра которых порядка 1), то разворотом пучка можно пренебречь и считать, что электроны движутся прямолинейно до тех пор, пока полностью не потеряют свою энергию. Если же среда состоит из атомов достаточно тяжелых элементов (например, алюминия, ксенона или других, зарядовое число яд-

ра которых намного превосходит 1), то траектория движения электронов многократно искривлена. В этом случае пространственное взаимодействие электронного пучка со средой является более сложным и приводит к ряду на первый взгляд неожиданных эффектов. Об этих и других эффектах речь пойдет ниже.

Начнем с модели торможения быстрого электрона и оценки длины его пробега. Наиболее общую и при этом достаточно простую картину процесса на атомном уровне дает теория лесной прогулки. Действительно, представим себе, что человек, оставляя на своем пути следы, пробирается по дремучему лесу либо по сравнительно прямолинейной либо по очень запутанной и криволинейной траектории и передвигается до тех пор, пока не устанет и не сделает привал. Оказывается, что электрон, пока он полностью не растерял свою энергию, перемещается в среде так же, как этот прогуливающийся в лесу человек.

Попробуем разобраться, насколько глубоко человек сможет углубиться в лес, а электрон — в тормозящую среду. Длина пробега L определяется двумя характеристиками. Первая из них — это тормозной путь L_H , который проходит электрон, пока он не растеряет всю свою первоначальную кинетическую энергию. Вторая характеристика — пробег до разворота L_y , определяемый расстоянием, пройдя которое, электрон существенно меняет направление своего движения. Реально это означает, что направление должно измениться на угол около 1 рад.

Вид траектории движения определяется соотношением тормозного пути и пробега до разворота. Действительно, если $L_H \ll L_y$, то электрон, пройдя путь L_H , растеряет всю энергию и затормозится, так и не успев заметно искривить свою траекторию. Длина пробега в этом случае, очевидно, равна пройденному пути: $L = L_H$. Сложнее получается в противоположном предельном случае $L_y \ll L_H$, когда электрон за время полного торможения успевает многократно изменить направление своего движения. Перемещения его в среде при этом напоминают броуновское движение. Понятно, что при одинаковых тормозных путях полное торможение частицы, движущейся криволинейно, происходит в более тонком слое вещества, чем при прямолинейном движении. Естественно, что длина пробега все же должна превышать пробег до разворота. Высказанные соображения позволяют сделать предварительную оценку для этого случая: $L_y < L < L_H$. Из теории диффузии можно получить

и более точный результат: $L = \sqrt{(2/3)L_y L_H}$, из которого сле-

дует, что длина пробега в этом случае близка к среднему геометрическому тормозного пути и пробега до разворота.

Движение быстрого электрона по практически прямолинейной траектории происходит при торможении в средах, состоящих из атомов, порядковый номер в таблице Менделеева и заряд ядра которых невелик: $z \approx 1$. Это может быть, например, водород или бериллий. Диффузионный характер движения имеет место при торможении в средах, состоящих из тяжелых атомов с $z > 10 \div 20$. Это, например, свинец.

В промежуточном случае траектория обычно уже не прямолинейна, но еще и не многократно искривлена. Такая ситуация имеет место, например, при торможении электронных пучков в большинстве органических веществ. При этом обе предельные оценки дают примерно одинаковый результат, а при $L_y = (3/2)L_H$ они попросту совпадают. Поэтому в общем случае можно оценить длину пробега по объединенной формуле

$$L = \begin{cases} L_H & \text{при } L_y \geq (3/2)L_H; \\ \sqrt{(2/3)L_y L_H} & \text{при } L_y < (3/2)L_H. \end{cases} \quad (18)$$

$$(19)$$

Сразу можно подметить любопытное следствие приведенных формул, вытекающее из того, что тормозной путь пропорционален z^{-1} , а пробег до разворота — z^{-2} . Оно состоит в том, что для легких атомов длина пробега быстрых электронов пропорциональна z^{-1} , а для тяжелых — $z^{-1,5}$.

Рассмотренная теория при всей своей простоте имеет очень разнообразные приложения. Поэтому стоит упомянуть о некоторых из них.

Сначала несколько слов о парадоксе нейтронной бомбы. Этот кажущийся парадокс состоит в том, что от главного поражающего фактора нейтронной бомбы — потока быстрых нейтронов — эффективнее защищаться не свинцовым, а фанерным или картонным щитом. Объяснить его можно с помощью выражения (19), поскольку проникновение нейтронного потока через защитный слой по физической сути есть та же диффузия. Нейтрон — это электрически нейтральная частица, поэтому его взаимодействия не определяются законом Кулона, как в случае быстрых электронов. Быстрый нейтрон скорее подобен биллиардному шару, сталкивающемуся с другими шарами — ядрами атомов тормозящей среды.

Главное различие между свинцом и фанерой состоит в том, что атомы (и их ядра) свинцового щита тяжелы, а атомы фанерного щита сравнительно легкие. В данном случае парадокс со-

стоит в том, что именно большая масса атомов свинца не позволяет им тормозить нейтроны. Как показано в предыдущей главе, наиболее эффективный обмен энергией возможен между частицами одинаковых или близких масс.

В соответствии с формулой (4) при столкновении нейтрона с ядром атома водорода (а таких атомов в фанерном щите немало) вследствие равенства масс $m_1 = m_2$ быстрая частица теряет в среднем половину своей энергии. Это очень много. При столкновении же с ядром атома свинца $m_1 \approx m_2/200$ и теряется всего 1% энергии. В результате торможение быстрого нейтрона в фанере оказывается эффективнее, чем в свинце. Значит, формула диффузионной теории (19) подтверждает, что фанерный щит лучше защищает от потока нейтронов, чем свинцовый щит.

Еще один любопытный факт, который можно интерпретировать с помощью диффузии и нельзя объяснить в рамках чаще используемой теории прямолинейного распространения частиц в процессе торможения. Речь идет об отражении электронного пучка от тормозящего слоя. Понятно, что частицы пучка диффундируют не только вперед, но и в других направлениях, в том числе и назад. Такое обратное перемещение некоторых частиц и есть, по сути, отражение. Понятно, что при торможении электронного пучка в среде, состоящей из легких атомов, искривление траекторий движения частиц мало и отражение пучка практически отсутствует. Если же тормозящая среда состоит из очень тяжелых атомов, то вследствие диффузии половина частиц и более может отразиться от границы раздела. Все это и наблюдается экспериментально.

Наконец, несколько слов о приобретении средой заряда. Электронный пучок привносит в тормозящую среду избыточный отрицательный заряд. Этот заряд под действием собственного и других полей стремится стечь из области торможения пучка. Все определяется стоком, как правило, не первичных электронов пучка, которых относительно мало, а вторичных и других заряженных частиц, которых во много раз больше. В металлах этот сток происходит практически мгновенно и некомпенсированный заряд обычно не успевает привести к каким-либо ощутимым последствиям. А вот в полупроводниках и особенно в диэлектриках сток идет гораздо медленнее и избыточный заряд может играть большую роль. В ряде случаев он приводит к весьма разрушительным внутренним электрическим пробоям материала. Интенсивное накопление некомпенсированного отрицательного заряда способствует возникновению таких мощных

электрических полей, которые могут дополнительно тормозить электронный пучок и заметно сокращать длину его пробега. Внутренние электрические поля иногда приводят также к изменению некоторых физико-химических свойств материалов. Понимание этих эффектов требует одновременно анализа распределения длин пробегов электронов пучка в среде и механизмов стока заряда, и анализ этот обычно удобно проводить на основе элементов диффузионной теории торможения быстрых электронов.

6. УЧЕТ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Электроны — частицы небольшой массы. Поэтому даже при не очень высокой кинетической энергии скорость электрона велика и может быть сравнима со скоростью света. Движение такого (релятивистского) электрона должно описываться с учетом теории относительности.

Релятивистский телевизор

Релятивистские эффекты — это не что-то абстрактное. Они могут проявляться даже в обычном телевизоре, в котором, как известно, изображение на экране кинескопа формируется с помощью электронного луча. Напряжение, ускоряющее электроны в кинескопе цветного телевизора, достигает 25 кВ. Приобретаемая частицами энергия, очевидно, равна 25 кэВ. Как показывает выполненный с использованием теории относительности расчет, скорость электрона с кинетической энергией 25 кэВ составляет 90 000 км/с — почти треть скорости света! При такой скорости массу электрона в соответствии с теорией относительности уже нельзя считать постоянной. Она увеличивается при ускорении частиц в кинескопе на 5%.

В электронных пучках релятивистские эффекты часто проявляются еще сильнее. Такие пучки называют релятивистскими электронными пучками (РЭП). К примеру, имеющий массу применений РЭП с энергией электронов 1 МэВ — уже вполне релятивистский. Скорость электронов в нем всего на 6% меньше скорости света, масса частиц, движущихся с такой высокой скоростью, втрое превышает массу покоя.

Границу между релятивистскими и нерелятивистскими энергиями электрона принято определять с помощью так называемой энергии покоя электрона $E_{\text{п}} = mc^2 \approx 0,511$ МэВ. Если кинетическая энергия электрона $E \ll E_{\text{п}}$, то его можно считать нерелятивистским и описывать с помощью классических формул. Если же это не так и $E \gtrsim E_{\text{п}}$, то без теории относительности, как правило, не обойтись.

Приведем теперь без вывода оценочные формулы, учитывающие ряд релятивистских квантовомеханических эффектов:

$$L_y \approx \frac{m^2 c^4 \beta^4 \gamma^2}{2\pi k^2 e^4 N z (z + 1) [\ln(1 + 1/\eta) - 1/(1 + \eta)]} ; \quad (20)$$

$$L_n \approx \frac{m^2 c^4 \beta^2 (\gamma - 1)}{4\pi k^2 e^4 N z \left\{ \ln[2m v^2 \gamma^2 / (I_0 z)] - \beta^2 \right\}} \quad (21)$$

В этих формулах $m \approx 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона; $c \approx 3,00 \cdot 10^8$ м/с — скорость света; $\beta = v/c$; v — начальная скорость электрона (в соответствии с теорией относительности ее можно выразить через кинетическую энергию E :

$$v = c \sqrt{(E^2 + 2Emc^2)/(E + mc^2)^2}; \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2};$$

$e \approx 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; N — концентрация атомов тормозящей среды; z — заряд ядра атомов среды в единицах e ;

$$\eta = [\hbar \cdot 1,12 z^{1/3} / (mc\beta\gamma \cdot 0,855 a_0)]^2 / 2;$$

$a_0 \approx 5,29 \cdot 10^{-11}$ м — боровский радиус; $\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

На первый взгляд, приведенные выражения кажутся слишком громоздкими, чтобы дать им какую-либо качественную интерпретацию. Однако это не так. Каждый может попытаться перепроверить приведенные ниже выводы, следующие из анализа формул (18)–(21).

Длина пробега нерелятивистских быстрых электронов пропорциональна квадрату их начальной энергии. Такая сильная зависимость связана с тем, что с ростом энергии, во-первых, уменьшается частота соударений в единицу времени, во-вторых, увеличивается время торможения. В релятивистском случае, если тормозящее вещество состоит из легких атомов, то длина пробега пропорциональна уже первой степени энергии. Это объясняется тем, что частота неупругих соударений в единицу

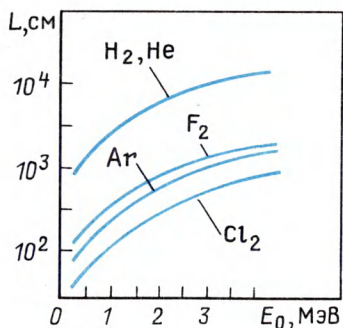


Рис. 5. Средняя длина пробега релятивистских электронов в газах, взятых при нормальных условиях

времени перестает зависеть от энергии. Если же тормозящее вещество состоит из тяжелых атомов, то за счет влияния упругих соударений длина пробега пропорциональна $E^{3/2}$.

Формулы (18)–(21) подтверждают, что для легких атомов длина пробега пропорциональна z^{-1} , а для тяжелых — убывает еще быстрее и пропорциональна $z^{-3/2}$. Средняя длина пробега, рассчитанная по формулам (18)–(21), для ряда газов приведена на рис. 5.

Сравнение сложных и простых формул

Интересно сравнить результаты сложных (релятивистских) квантовомеханических расчетов и простых оценок, выполненных в предыдущем параграфе на основе закона Кулона. Сопоставим для примера формулы для тормозного пути (16) и (21). При релятивистских энергиях оценка (16) дает в несколько раз завышенный результат по сравнению с практически точным расчетом по формуле (21). Погрешность, оцениваемая по формуле (16), определяется приближенностью расчета полного сечения σ — оно получается заниженным. При меньших, нерелятивистских энергиях быстрого электрона совпадение между результатами расчета по формулам (16) и (21) лучше. Оба они с точностью до коэффициента, примерно равного 2, близки к истинному тормозному пути.

Иногда полезно иметь совсем простую формулу для оценки длины пробега релятивистского электронного пучка. Для вывода ее за основу возьмем тормозной путь, пренебрегая искривлением траектории электрона. Из приведенных ранее формул видно, что тормозной путь в этом случае прямо пропорциона-

лен кинетической энергии электронов. Можно заметить, что произведение концентрации атомов N на заряд ядра z обычно пропорционально плотности. Тогда из формул следует, что тормозной путь обратно пропорционален плотности тормозящей среды. Этого достаточно, чтобы получить оценочное выражение для длины пробега релятивистского электронного пучка:

$$L = 4E_0/\rho, \quad (22)$$

где начальная энергия электронов выражена в МэВ, плотность ρ — в кг/м³, а L — в м.

Формула чрезвычайно проста и удобна в употреблении. Однако, как показано выше [см. (18)–(21)], длина пробега может более резко, чем линейно, возрастать с увеличением энергии и убывать с увеличением плотности тормозящей среды. Поэтому особой точности от формулы (22) ожидать не приходится, и в некоторых важных случаях, особенно для больших z , она дает результат, в несколько раз отличающийся от истинного значения.

Впрочем, ее можно уменьшить, если для $z > 10$ в формулу ввести дополнительный множитель, учитывающий разворот электронов: $L = (4E_0/\rho)\sqrt{10/z}$.

7. О РОЛИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ионизация и возбуждение являются основными каналами потерь энергии быстрыми электронами в широком диапазоне энергии в самых различных веществах. Однако иногда необходимо учитывать и другие одночастичные эффекты, например потери на тормозное излучение, испускаемое в виде фотонов высокой энергии при торможении заряженных частиц в электрическом поле. При торможении в среде основным источником этого поля служат ядра атомов среды.

В соответствии с теорией интенсивность тормозного излучения пропорциональна кинетической энергии E и квадрату ускорения a , возникающего при кулоновском взаимодействии с ближайшими ядрами атомов среды:

$$I_T \sim Ea^2 = E \left(\frac{F}{m} \right)^2 = E \left(k \frac{ze^2}{r^2} / m \right)^2 = z^2 E \frac{k^2 e^4}{m^2 r^4}, \quad (23)$$

где по второму закону Ньютона $a = F/m$; r — расстояние между взаимодействующими частицами.

Потери на тормозное излучение, как следует из полученной формулы, линейно возрастают с увеличением энергии электрона и квадратично — с увеличением заряда ядра атомов среды. Можно показать, что отношение потерь на излучение к потерям на ионизацию и возбуждение равно $Ez/800$, где E — в МэВ, а z — число протонов в ядре атомов среды. Например, тормозное излучение становится главным каналом потерь в свинце при энергии электрона, превышающей 10 МэВ, в воде — при энергии более 100 МэВ.

В ряде случаев для оценки удобно пользоваться понятием радиационной длины L_p , равной расстоянию, на котором энергия электрона уменьшается из-за радиационных потерь в e раз ($e \approx 2,72$):

$$L_p = R_p / \rho ,$$

где R_p — константа, равная для воды и воздуха 360 кг/м^2 , для алюминия 240 кг/м^2 , для свинца 60 кг/м^2 ; ρ — плотность вещества. Радиационные потери при малых значениях L_p могут приводить к сокращению длины пробега электронного пучка.

Подчеркнем, что тормозное излучение обладает в десятки раз большей проникающей способностью, чем рождающий его электронный пучок. Это свойство широко используется во многих радиационных технологиях, требующих глубокого объемного облучения. При этом на выходе электронного пучка устанавливают вспомогательную мишень, выполненную из тяжелого металла и способную генерировать тормозное излучение. Естественно, что эффективность преобразования энергии пучка в энергию излучения не является стопроцентной. неизбежны потери, с которыми приходится мириться. Однако высокоэнергетический релятивистский электронный пучок, сфокусированный на выполненной из тяжелого тугоплавкого металла мишени, вполне способен обеспечить требуемые промышленностью потоки излучения.

В последнее время большие надежды связывают с применениями так называемого *магнитотормозного* (или *синхротронного*) излучения. Оно возникает при движении быстрых электронов в магнитном поле вследствие ускорения, обусловленного силой Лоренца. Для энергии электронов порядка 100 МэВ интенсивность синхротронного излучения становится весьма значительной. Генерация его требует создания больших уско-

рительных систем. Существенно, что эффективность этих систем может приближаться к 100%. В результате тормозное излучение релятивистских электронов имеет большое значение как простой и интенсивный источник энергичных фотонов. Энергия этих фотонов распределена в весьма широком спектре и ограничена сверху лишь энергией излучающего электрона. К роли возникающего излучения мы еще не раз вернемся позже.

Здесь стоит упомянуть лишь о дополнительных мерах по радиационной безопасности, направленных на защиту от паразитного вторичного тормозного излучения. Его высокая проникающая способность требует установки защитных экранов, часто гораздо более толстых, чем нужно для защиты от быстрых электронов.

8. КАСКАД ПРЕВРАЩЕНИЙ

До сих пор подробно говорилось о том, что происходит с быстрыми электронами в ходе их торможения. Однако интересно не только это. Главное — понять физику процессов, инициированных торможением в среде.

Об ионизации и электронном возбуждении атомов и молекул среды уже упоминалось. Однако ими дело не ограничивается. Больше того, можно говорить о целом каскаде превращений в среде, вызванных прохождением пучка электронов. Начнем с того, что сами ионизация и возбуждение происходят не так просто, как кажется на первый взгляд. Как показали проделанные выкладки, средняя энергия вторичного электрона (электрона, выбитого из атома или молекулы при ионизации первичным электроном пучка) может достигать 100 эВ. Это примерно на порядок превышает пороги возбуждения и ионизации. Естественно, что такие быстрые частицы долго не живут. Вторичные электроны сталкиваются с атомами и молекулами, возбуждая и ионизуя их. В результате рождаются третичные электроны, которые обычно имеют энергию порядка энергии ионизации и тоже могут возбуждать и ионизовать, и т.д. Развитие такой лавины иногда называют ионизационным каскадом.

Попробуем сделать численные оценки для развития ионизационного каскада по теории кулоновских столкновений, изложенной в гл. 1. Возьмем наиболее характерные значения параметров; начальная энергия быстрых электронов $E_0 = 1$ МэВ, энергия ионизации $I = 10$ эВ, порог электронного возбуждения $\alpha I = 6$ эВ (при $\alpha = 0,6$). Все начинается с того, что первичный

электрон понемногу теряет свою энергию в столкновениях с атомами среды. Значение энергии последовательно уменьшается от E_0 практически до нуля, так что в среднем она составляет $E_1 \approx E_0/2 = 5 \cdot 10^5$ эВ. Средняя потеря энергии первичного электрона на один акт ионизации вычисляется по аналогии с формулой (14):

$$\Delta E_{1 \text{ ион}} \approx I \ln(E_1/I) = 108 \text{ эВ.}$$

Очевидно, что часть этой потери, равная I , тратится на работу по отрыву вторичного электрона от атома, а остаток переходит в начальную кинетическую энергию вторичного электрона, в среднем равную

$$E_{20} = \Delta E_{1 \text{ ион}} - I = 98 \text{ эВ.}$$

Необходимо подчеркнуть, что каждый вторичный электрон имеет свою энергию: от нуля до 200 эВ и даже большую, но для оценки все же будем рассматривать "средний" электрон. Это не вносит большой ошибки, но сильно упрощает теорию развития ионизационного каскада.

На втором этапе все повторяется.

Следующий этап — торможение вторичных электронов, в ходе которого их энергия уменьшается от E_{20} до 0, так что в среднем она составляет $E_2 = E_{20}/2 = 49$ эВ. Средняя потеря энергии вторичного электрона на один акт ионизации по понятным причинам ниже, чем для первичного электрона:

$$\Delta E_{2 \text{ ион}} = \ln(E_2/I)/(1/I - 1/E_2) = 20,0 \text{ эВ.}$$

По-прежнему 10 эВ тратится на работу по отрыву электрона от атома, а остаток переходит в начальную кинетическую энергию третичного электрона, в среднем равную

$$E_{30} = \Delta E_{2 \text{ ион}} - I = 10,0 \text{ эВ.}$$

После первичных, вторичных и третичных электронов можно было бы рассмотреть электроны четвертого, пятого и последующих поколений. Но видно, что средняя энергия уже третичных частиц настолько мала, что образованием электронов четвертого поколения можно пренебречь. Третичные электроны способны лишь еще каждый по разу возбудить атом, после чего их энергия в среднем составит $E_{30} - \alpha I = 4$ эВ. Про такие частицы, уже не пригодные ни на ионизацию, ни на электронное возбуждение, говорят, что они ушли в подпороговую область.

Было бы интересно подсчитать число атомов, ионизованных и возбужденных при торможении одного первичного электрона. Для этого понадобится еще несколько не очень сложных выкладок с привлечением теории, изложенной в гл. 1. Средняя потеря энергии в соударении первичного электрона

$$\Delta E_1 = \alpha I \ln [E_1 / (\alpha I)] = 68 \text{ эВ},$$

вторичного —

$$\Delta E_2 = \ln [E_2 / (\alpha I)] / [1 / (\alpha I) - 1 / E_2] = 14,4 \text{ эВ}.$$

С учетом этого среднее число соударений первичного электрона в процессе торможения оценивается как

$$N_1 = E_0 / \Delta E_1 = 1,47 \cdot 10^4.$$

В результате ионизовано атомов (и образовано вторичных электронов)

$$N_{1 \text{ ион}} = N_1 \alpha = 8,83 \cdot 10^3,$$

а возбуждено

$$N_{1 \text{ возб}} = N_1 (1 - \alpha) = 5,88 \cdot 10^3.$$

Поскольку каждый из вторичных электронов сталкивается в среднем $E_{20} / \Delta E_2$ раз, полное число соударений всех вторичных электронов

$$N_2 = N_{1 \text{ ион}} E_{20} / \Delta E_2 = 6,02 \cdot 10^4.$$

В результате ионизовано атомов (и образовано третичных электронов)

$$N_{2 \text{ ион}} = N_2 \frac{(1 - I/E_2) \alpha / (1 - \alpha)}{(1 - I/E_2) \alpha / (1 - \alpha) + 1} = 3,28 \cdot 10^4,$$

возбуждено

$$N_{2 \text{ возб}} = N_2 - N_{2 \text{ ион}} = 2,74 \cdot 10^4.$$

Наконец, можно вычислить полное число атомов, ионизованных при торможении одного первичного быстрого электрона. Оно равно, очевидно, сумме вторичных и третичных электронов:

$$N_{\text{ион}} = N_{1 \text{ ион}} + N_{2 \text{ ион}} = 4,16 \cdot 10^4.$$

Полное число возбужденных атомов определяется суммой эффектов от первичного, вторичных и третичных электронов:

$$N_{\text{возб}} = N_1 \text{ возб} + N_2 \text{ возб} + N_2 \text{ ион} = 6,61 \cdot 10^4.$$

В прикладных исследованиях часто употребляют понятия *цены ионизации* и *цены возбуждения*, которые показывают, во сколько электрон-вольт обходится электронному пучку один ион и один возбужденный атом. По расчетам цена ионизации равна

$$\Delta E_{\text{ион}} = E_0/N_{\text{ион}} = 24 \text{ эВ.} \quad (24)$$

Это близко к общепринятому значению, которое в широком интервале начальных энергий принимают обычно равным удвоенной энергии ионизации. Цена возбуждения получилась равной

$$\Delta E_{\text{возб}} = E_0/N_{\text{возб}} = 15 \text{ эВ.} \quad (25)$$

Нетрудно вычислить в принятой модели долю энергии электронного пучка, которая пошла на ионизацию:

$$\eta_{\text{ион}} = N_{\text{ион}} I / E_0 = 42\%$$

и на возбуждение:

$$\eta_{\text{возб}} = N_{\text{возб}} a I / E_0 = 40\%.$$

Очевидно, что оставшиеся 18% энергии принадлежат подпороговым электронам и могут быть затрачены в каждом конкретном случае на свои, подпороговые процессы.

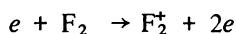
До сих пор говорилось о каскаде превращений в среде, обусловленном столкновениями электронов с электронами. Однако в некоторых случаях к заметным изменениям в среде приводят и столкновения быстрых электронов с ядрами атомов. Речь идет в первую очередь о радиационных дефектах, возникающих в кристаллической решетке твердого тела при выбивании из решетки ядер и, следовательно, атомов в целом электронами пучка. Как показано выше, эффективность обмена кинетической энергией между частицами с существенно разной массой весьма мала и ограничивается значением порядка отношения масс легкой и тяжелой частиц. В данном случае это отношение не превосходит сотых и даже тысячных долей процента. Вот почему при не очень больших энергиях электронов пучка переданная атому кристаллической решетки кинетическая энергия оказывается недостаточной для нарушения решетки. Однако уже для электронов с энергией сотни и тысячи кило-

электрон-вольт, как показывает несложная оценка, вероятность прямого выбивания атомов и возникновения радиационных дефектов в среде довольно значительна. Такие радиационные дефекты нежелательны, в частности, в полупроводниковых структурах электронной техники, и с этим приходится считаться. В то же время выбивание атомов приводит к усилению диффузии в твердом теле, и это может быть использовано в соответствующих технологиях.

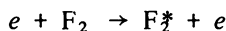
9. ПРИМЕРЫ КАСКАДА

Рассмотрим примеры ионизационных каскадов в различных средах. Инициирование лазерных, плазменных и плазмохимических процессов часто требует инжекции релятивистского электронного пучка энергией порядка 1 МэВ в молекулярный газ давлением порядка атмосферного. Помимо ионизации и электронного возбуждения здесь важны и некоторые другие процессы. В первую очередь это *диссоциация* — развал молекул на атомы, а также *колебательное возбуждение* — колебания атомов молекулы относительно друг друга и *вращательное возбуждение* — вращение молекулы как целого вокруг своей оси.

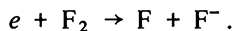
В мощном химическом фторводородном лазере, рабочая смесь которого состоит из фтора, водорода и различных добавок, многое определяется мощностью инициирования — скоростью наработки активных атомов фтора за счет диссоциации молекул. При этом помимо ионизации молекул фтора



и их возбуждения

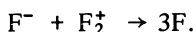


большую роль играют и другие процессы — те, которые приводят к образованию атомов фтора. Это, в первую очередь, диссоциативное прилипание, приводящее к рождению отрицательно заряженного иона F^- и весьма эффективное для электронов энергией порядка 1 эВ:



И наконец, вторичный, тоже полезный процесс диссоциативной рекомбинации, приводящий к рождению целых трех атомов фто-

ра в каждом столкновении:



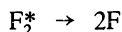
Приведенная схема реакций позволяет узнать *цену образования* атома фтора ΔE_F . В соответствии с ней возникновение одного иона F_2^+ сопровождается рождением четырех атомов фтора. Цену ионизации фтора, как уже отмечалось, можно принять равной удвоенному потенциалу ионизации:

$$\Delta E_{\text{ион}} = 2I \approx 32 \text{ эВ},$$

где учтено, что для молекулярного фтора $I \approx 16$ эВ. Тогда очевидно:

$$\Delta E_F = \Delta E_{\text{ион}}/4 = I/2 = 8 \text{ эВ}.$$

На самом деле процесс образования активных атомов фтора проходит гораздо сложнее. В ряде случаев за счет конкурирующих паразитных процессов ΔE_F может быть больше, а, например, дополнительное рождение атомов фтора за счет диссоциации возбужденных молекул



может несколько уменьшить ΔE_F . Но все же цена образования атома фтора при иницировании фторводородного лазера электронным пучком обычно близка к 8 эВ. При этом, как показывает расчет, доля энергии электронного пучка, направленная непосредственно на диссоциацию (диссоциационная эффективность), составляет порядка 10%.

Часто представляет интерес оценка доли энергии электронного пучка, которая пошла непосредственно на колебательное возбуждение молекул, а также на излучение возбужденных молекул. В этих случаях соответствующие эффективности также обычно не превышают 10%.

В приведенном примере рассмотрен ионизационный каскад быстрых электронов в газе. Если же электронный пучок тормозится в твердом теле или в жидкости, то физика многих процессов такая же, как и для случая с газом. Подробнее об этом будет рассказано в следующих главах. Пока же стоит отметить, что возможны и некоторые различия, связанные с относительно высокой плотностью конденсированных сред. К примеру, цена ионизации в твердом теле и жидкости может оказаться на 1–2 порядка выше, чем в соответствующем газе. Объяснить, почему это происходит, несложно. Дело в том, что

в газе ионизация имеет место каждый раз, когда атомный электрон получает энергию, превышающую энергию ионизации. Этого ему вполне достаточно, чтобы навсегда покинуть родной атом и без приключений улететь от своего иона на достаточно большое расстояние, на котором можно пренебречь кулоновским притяжением между частицами и считать их вполне самостоятельными.

В твердом теле и в жидкости все не так просто. Вследствие большой концентрации атомов в конденсированных средах вторичный электрон, еще не успев отлететь от своего иона достаточно далеко и стать свободным, испытывает большое число столкновений с близлежащими атомами среды. Потери энергии в этих столкновениях весьма существенны. Даже те вторичные электроны, первоначальная кинетическая энергия которых намного превосходит энергию ионизации, зачастую запутываются в частокле близлежащих атомов, теряют при этом энергию и под действием кулоновского притяжения возвращаются к своему же иону. В результате ионизации так и не происходит. Этот эффект приводит к тому, что цена ионизации в конденсированных средах составляет не две энергии ионизации, как в газах, а в десятки раз больше — обычно от 20 до 120 энергий ионизации.

И еще об одном красивом каскаде превращений. В предыдущих примерах ионизационный каскад сводился в основном к тому, что каждая быстрая первичная частица, постепенно тормозясь, рождала вторичные частицы и вторичные процессы. Бывает и по-другому.

При прохождении релятивистских электронов через среду возникает тормозное излучение (об этом говорилось в предыдущем параграфе). Важной особенностью тормозного излучения, представляющего собой поток энергичных фотонов, является то, что оно часто обладает более высокой проникающей способностью по сравнению с первичными электронами. В результате энергия последовательно может передаваться от быстрых электронов к фотонам, которые, в свою очередь, обладают высокой ионизирующей способностью и могут опять трансформировать свою энергию в энергию электронов.

Такого рода каскад может иметь большое число ступеней, и в нем может участвовать множество частиц разного типа и происходить множество процессов. В природе его развитие могут инициировать космические лучи.

Нельзя не отметить, что ионизационный каскад — явление весьма неравновесное и требующее для своего поддержания

возмущающий источник — электронный пучок. Физически это выражается в неравновесности функции распределения частиц по энергии, значение которой пропорционально числу частиц данной энергии.

В равновесной (или близкой к равновесной) ситуации функция распределения обычно имеет экспоненциальный вид. Это означает, например, следующее. Если взять достаточно большое число частиц $N_0 = 10^{20}$ с характерной энергией E_x , то экспоненциальная зависимость позволяет оценить число частиц N с энергией, близкой к заданной $E \gg E_x$:

$$N \approx N_0 \exp(-E/E_x).$$

Получается, что для $E = 50 E_x$ число частиц наверняка равно нулю ($N \approx 0,02 \ll 1$), т.е. вследствие быстрого убывания экспоненты вероятность наличия частиц с энергией, намного превышающей E_x , практически равна нулю.

По-другому получается в сильно неравновесных системах. В этом случае функция распределения обычно уменьшается по степенному закону с ростом энергии. Показатель степени по расчетам лежит, как правило, в пределах от 1 до 3. Степенная энергетическая зависимость неравновесных функций распределения заложена уже в исходных формулах, необходимых для их расчета. В случае ионизационного каскада это, например, степенная зависимость (11) дифференциального сечения кулоновского соударения электронов от потери энергии. Для сильно неравновесной системы можно сделать оценку:

$$N \approx N_0 (E_x/E)^2.$$

Даже для высоких ($E = 50 E_x$) энергий $N \approx 4 \cdot 10^{16}$, т.е. весьма велико. Получается, что гарантировано сравнительно большое число высокоэнергичных частиц. В области высоких энергий характерным признаком ионизационного каскада является длинный "хвост" функции распределения электронов по энергии (убывающей по степенному закону). Он играет определяющую роль во многих практических приложениях электронных пучков.

10. КОГДА В ЛЕСУ МНОГОЛЮДНО

Ранее говорилось о взаимодействии отдельных электронов пучка с отдельными атомами среды. Однако в ряде случаев описание отдельных частиц не дает пред-

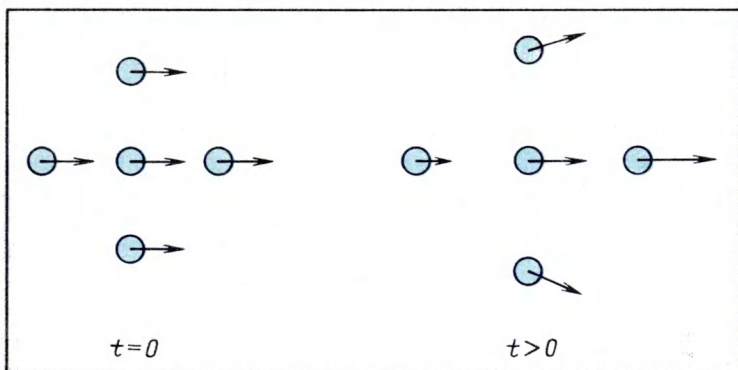


Рис. 6. Кулоновское расталкивание электронов пучка (векторами обозначена скорость частиц) :

$t = 0$ – первоначально мононаправленный моноэнергетический пучок;
 $t > 0$ – спустя некоторое время электроны имеют разброс в направлениях движения и скоростях (и, следовательно, в энергиях)

ставления о картине распространения пучка в целом. Например, это может иметь место для сильноточного (током около 1 кА и выше) электронного пучка или в случае, если тормозящая среда включает в себя большое число ионов и является плазмой.

Возвращаясь к аналогии, введенной в гл. 2, отметим, что в многолюдном лесу прогулка может носить совсем иной характер, чем в дремучем лесу. Приходится здороваться и беседовать с другими путниками, а также постоянно наткаться на следы человеческой деятельности. Но вернемся к нашим электронам.

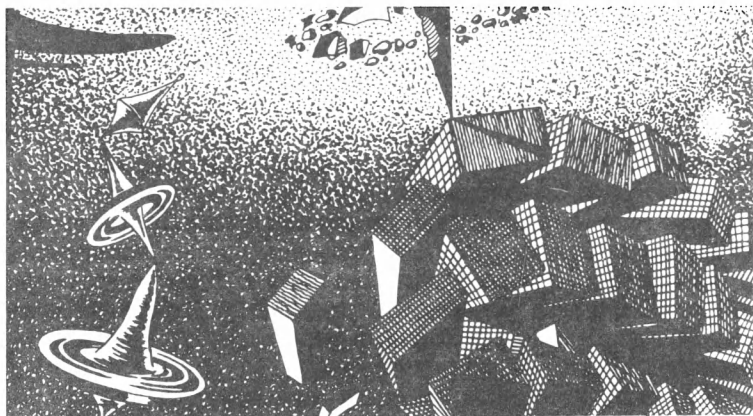
Простейший пример коллективного процесса – кулоновское расталкивание электронов пучка. Чем больше концентрация электронов, тем сильнее каждая заряженная частица отталкивается от остальных. Это приводит к тому, что в потоке электронов, первоначально имевших одинаковое направление движения и одну энергию, появляется разброс в направлениях движения и энергиях частиц (рис. 6). Для сильноточных электронных пучков эффект весьма значителен. "Хвост" пучка тормозится "головой", в результате поток электронов, не дойдя до цели, может попросту рассыпаться и разлететься в разных направлениях. В такой ситуации длина пробега пучка в вакууме может оказаться короче, чем в газе малой концентрации (порядка 0,1% атмосферной). Объясняется это тем, что в газовой среде

уменьшение плотности объемного заряда может достигаться не за счет развала пучка, а вследствие разлета вторичных, образованных при ионизации электронов.

Другой пример — магнитное сжатие электронного пучка. Механизм этого сжатия в условиях зарядовой нейтрализации пучка прост. Электронный поток можно представить как набор параллельных токов, вследствие магнитного взаимодействия притягивающихся друг к другу. Собственное магнитное поле может запереть сильноточный релятивистский электронный пучок, загнув траектории частиц к центру пучка и воспрепятствовав продвижению электронов вперед. Для увеличения длины транспортировки в этом случае часто применяют стабилизирующее внешнее магнитное поле (о роли магнитных полей подробнее см. в гл. 4). Решению проблемы способствуют также обратные токи, возникающие под действием прямого тока пучка в проводящей тормозящей среде и приводящие к частичной компенсации собственного магнитного поля электронного пучка.

Особого внимания заслуживают многочисленные коллективные механизмы торможения электронных пучков в плазме. При этом зачастую сама плазма создается и поддерживается тем же пучком, вызывающим ионизацию атомов и молекул. Для плазмы характерно множество типов электромагнитных колебаний, которые в ней постоянно поддерживаются и могут по ней распространяться. Взаимодействие поля электронного пучка с электромагнитными полями плазмы может приводить к обмену энергией между пучком и плазмой. Поскольку пучок — среда более неравновесная, более энергичная, чем плазма, обмен этот обычно сводится к передаче энергии быстрых электронов плазме и их торможению.

Рассмотрим для примера процесс возникновения таким путем пучковой неустойчивости. Первоначально поток быстрых электронов способен вызвать в некоторой небольшой области смещение электронов плазмы. В результате создаются области избыточного отрицательного и избыточного положительного зарядов, притягивающихся друг к другу. Избыточный отрицательный заряд подобен грузу на растянутой пружине, стремящемуся вернуться к положению равновесия и совершающему при этом гармонические колебания. Такие гармонические колебания зарядовой плотности, способные возникать и затухать и в отсутствие пучка, характерны для плазмы и называются *плазменными колебаниями*. Эти колебания взаимодействуют с электронами пучка и, забирая у них энергию, раскачиваются.



3

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ В ПРИРОДЕ

11. КОЕ-ЧТО ОБ АНОМАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЯХ

Сведущие люди знают, что такое аномальные явления. Они вам объяснят: это широкий круг реальных и не вполне реальных явлений (шаровые молнии, "летающие тарелки", атмосферные оптические эффекты и так далее), происхождение которых представляется нам загадочным. Правда, такое определение в значительной мере условно. Ведь то, что одни люди, в том числе ученые, считают очевидным и ясным, другие полагают необъяснимым.

Было время, когда значительную часть таких явлений связывали с существованием вокруг нас разумных космических пришельцев. Сегодня стало ясно, что подавляющее большинство прежних аномальных явлений все же имеют более или менее простое объяснение. Появилось множество теорий, и с каждым годом их становится все больше. Причем эти теории не столько конкурируют между собой, сколько позволяют сделать вывод о многообразии аномальных явлений. Сегодня существуют десятки таких, дополняющих одна другую теорий, каждая из которых более или менее убедительно объясняет определенную категорию аномальных явлений.

Как можно догадаться, потоки ускоренных электронов играют во многих из этих явлений немалую роль. Но прежде чем

начать разговор о природных электронных пучках, хочется сделать еще несколько замечаний об аномальных явлениях в целом.

Традиционно значительное место среди них занимают эффект-но сгорающие в плотных слоях атмосферы реальные пришельцы из космоса: кометы, метеориты, искусственные спутники и их фрагменты. Такие космические пришельцы проявляют себя с каждым годом все больше, что связано с активным освоением космоса человечеством. Уже сегодня над произвольной точкой на планете в телесном угле 1 ср (стерадиан) летает в среднем не менее одного такого искусственного объекта. Если же учитывать все искусственные объекты, которые может видеть наблюдатель из данной точки (включая и расположенные близко к горизонту), то число их превышает сотню.

Выявилось несколько забавных закономерностей. Если человек один раз увидел аномальное явление, то чрезвычайно велика вероятность второго такого случая и даже третьего! В какой-то степени этот факт может быть связан, например, с тем, что данный человек живет в местности, где подобные явления — не редкость, либо с тем, что он по профессии геолог и ему приходится много путешествовать. Однако более вероятным представляется объяснение, что существует категория людей, которые вольно или невольно заблуждаются относительно того, что они видят. Еще один любопытный статистический факт. Среднее число свидетелей появления НЛО (неопознанных летающих объектов) или того, что принимают за НЛО, — два-три человека, в то время как число свидетелей каждого "похищения людей инопланетянами", почти никогда не превышает одного человека. Наличие не более одного свидетеля похищения, разумеется, может свидетельствовать о стеснительности или боязливости инопланетян. Однако, скорее всего, появление второго очевидца просто приводит к развенчанию легенды о космических похитителях, созданной первым "свидетелем".

И на вопрос о достоверности фактов посещения нашей планеты разумными космическими пришельцами, судя по всему, уместно ответить английской пословицей: это слишком прекрасно, чтобы быть правдой. Похоже, что романтика аномальных явлений заложена в поиске не столько братьев по разуму, сколько научных фактов, не объяснимых в рамках современных представлений, а значит, способных дать заметный толчок к развитию естественных наук. Именно это и есть сегодня самое интересное в аномальных явлениях.

Настало время перейти к роли электронных пучков в природных явлениях. Потоки электронов — весьма распространен-

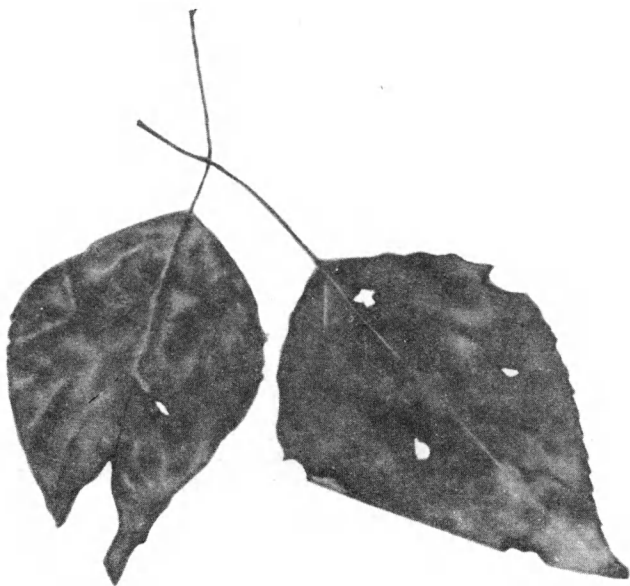


Рис. 7. Листья тополя, сорванные с дерева при взрыве в его кроне шаровой молнии. На листьях видны прожженные отверстия

ное явление в нашей Вселенной. Достаточно сказать, что они являются существенной компонентой космических лучей, постоянно воздействующих на нашу планету. Эти электроны могут иметь и галактическое, и солнечное происхождение. Многие из них вторичны и рождаются под действием первичных космических лучей.

Кстати, космические лучи, по-видимому, служат причиной эффектных белых звездообразных вспышек, которые иногда видны космонавтам. Эти вспышки, имеющие частоту 1–2 раза в минуту, можно наблюдать как с открытыми, так и с закрытыми глазами. Иногда такие вспышки видны и исследователям, работающим на ускорителях заряженных частиц.

Другой пример естественного потока энергичных электронов — молния. Причиной молнии обычно является высокая напряженность электрического поля, возникающего во время грозы. Развитие молнии приводит к тому, что по ее светящемуся каналу распространяется мощный поток релятивистских элект-

ронов. Линейная молния — весьма частое явление. Каждую секунду на планете происходит до ста ее разрядов. Нередко в природе наблюдается и шаровая молния, происхождение которой пока остается во многом загадкой для науки. Довольно многие люди (возможно, 1%) утверждают, что видели шаровую молнию. Еще больше людей полагают, что сталкивались со следами ее существования (рис. 7). Можно предполагать, что важную роль в развитии шаровой молнии играют мощные электрические поля и энергичные заряженные частицы. Косвенным подтверждением этого является то, что ставшие жертвами шаровой молнии люди иногда тяжело болеют и симптомы этой болезни зачастую такие же, какие бывают при радиоактивном облучении и при поражении током высокого напряжения. Интересно, что именно с помощью электронных пучков удастся сравнительно неплохо моделировать некоторые виды шаровой молнии.

В природе мы часто сталкиваемся с потоками энергичных электронов. Однако в ряде случаев возникающие явления настолько грандиозны и впечатляющи, что заслуживают отдельного разговора. Таким явлениям и посвящены следующие два параграфа.

12. ЭЛЕКТРОНЫ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Полярное сияние — действительно масштабное и впечатляющее явление. Достаточно сказать, что на поддержание его свечения расходуется мощность, на несколько порядков превосходящая мощность всех электростанций мира. Полярные сияния в настоящее время изучены довольно хорошо, но все же продолжают оставаться объектом пристального внимания ученых самых различных профессий — от физиков до медиков.

Происхождение их берет начало от Солнца и связано с процессами, проходящими на его поверхности (рис. 8). Дело в том, что с поверхности Солнца непрерывно исходит поток плазмы переменной интенсивности, называемый солнечным ветром. Этот поток губителен для всего живого на планете. Однако, к счастью, в атмосферу он попадает в существенно ослабленном виде, так как его проникновению препятствует магнитное поле Земли. Тем не менее частично солнечный ветер в атмосферу все же проникает. Вблизи северного и южного магнитных полюсов это особенно часто заметно. Во время вспышек на Солнце сол-

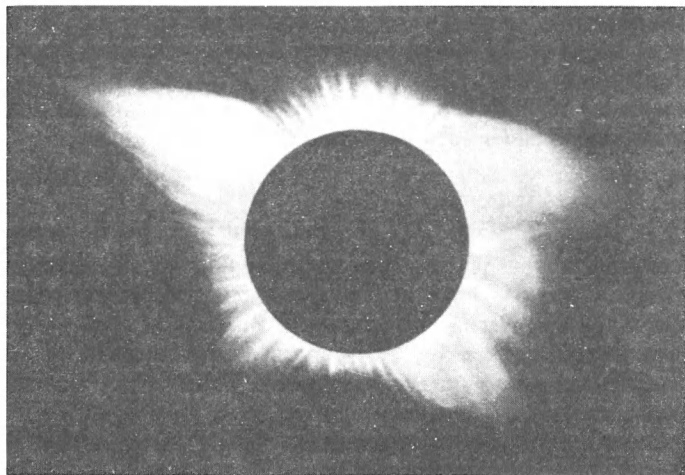


Рис. 8. Корона Солнца, сфотографированная при полном солнечном затмении

нечный ветер усиливается, и попадание в верхние слои атмосферы вблизи магнитных полюсов большого числа энергичных электронов и в ряде случаев протонов приводит к красивому свечению — полярному сиянию.

Итак, магнитное поле может определять направление движения заряженных частиц и, в частности, препятствовать их распространению в определенных направлениях. Этот факт чрезвычайно важен не только для полярных сияний. Он широко используется также при создании и использовании ускорителей заряженных частиц, поэтому стоит поговорить об этом подробнее.

Все мы знакомы с магнитным взаимодействием хотя бы на примере компаса или притягивающихся и отталкивающихся магнитов. Известно, что между магнетизмом и электричеством имеется глубокая связь, которая может проявляться самым неожиданным образом. Можно показать, что магнитное взаимодействие является следствием закона Кулона. Доказательство, в общем, не так уж и сложно, правда, требует знания основных следствий теории относительности. Например, объяснение известного опыта о магнитном взаимодействии двух проводников с током, в частности, опирается на релятивистское сокращение длины движущегося объекта (в данном случае движущийся объект — это совокупность переносчиков тока — электронов).

Таким образом, закон Кулона в очередной раз проявил себя как ключ к пониманию самых разнообразных и сложных свойств электронных пучков.

Известно, что на движущийся заряд в магнитном поле действует сила Лоренца $F_{\text{Л}}$, отклоняющая движение частицы:

$$F_{\text{Л}} = qv_{\perp} B,$$

где q — заряд частицы; v_{\perp} — составляющая скорости, перпендикулярная направлению магнитного поля; B — магнитная индукция. Сила Лоренца перпендикулярна как составляющей v_{\perp} , так и вектору магнитной индукции \mathbf{B} .

Если направление скорости частицы \mathbf{v} параллельно вектору магнитной индукции, то сила Лоренца равна нулю и частица свободно движется вдоль поля.

Если же $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$, то сила Лоренца действует в направлении, перпендикулярном скорости, и сообщает частице массой m нормальное ускорение $a_{\text{н}}$:

$$F_{\text{Л}} = ma_{\text{н}} = qv_{\perp} B = mv_{\perp}^2/R, \quad (26)$$

так что ее движение происходит по кругу радиусом

$$R = mv_{\perp} / (qB), \quad (27)$$

называемому *ларморовским радиусом*. При этом необходимо помнить, что в релятивистском случае, когда скорость частицы сравнима со скоростью света, масса частицы m в формулах перестает быть константой и увеличивается с ростом скорости и энергии.

В общем случае, когда скорость частицы направлена под произвольным углом к направлению магнитного поля, одно движение накладывается на другое и частица движется по спирали (рис. 9). Заряженные частицы как бы нанизываются на силовые линии магнитного поля и сохраняют способность свободно передвигаться только в направлении вдоль силовой линии.

Получается парадоксальный, на первый взгляд, результат. Магнитное поле не совершает работы над заряженными частицами и не меняет их кинетической энергии (по законам механики работа равна нулю, если сила перпендикулярна направлению перемещения). Тем не менее магнитное поле тормозит продвижение заряженных частиц поперек поля, закручивая их траекторию и позволяя им углубиться на расстояние, всего лишь примерно равное ларморовскому радиусу.

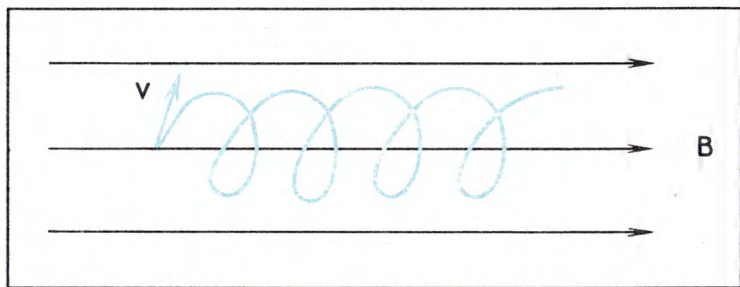


Рис. 9. Движение заряженной частицы в магнитном поле

Магнитное поле Земли, образующее земную магнитосферу, достаточно обширно и простирается заметным образом на 70–80 тыс. километров в направлении Солнца и на многие миллионы километров в противоположном направлении. У поверхности Земли напряженность его равна в среднем 40 А/м, на границе магнитосферы — порядка 0,1 А/м. Происхождение его связывают с перемещением зарядов в проводящем жидком ядре нашей планеты. При этом Земля напоминает большой магнит, полюса которого почти совпадают с географическими полюсами — Северным и Южным, определяющимися вращением уже на ядра, а планеты в целом. На этом не совсем случайном совпадении, как известно, основан принцип работы компаса. На самом деле существует некоторое смещение магнитных полюсов относительно географических (рис. 10). Например, это смещение приводит к тому, что северный магнитный полюс расположен не в Северном Ледовитом океане, как географический, а на территории Канады.

Интересно, что картина магнитного поля Земли не является стационарной, а постоянно изменяется. Сами магнитные полюсы только за последние 80 лет сместились довольно ощутимо — почти на тысячу километров. Этот удивительный факт поддается довольно простому объяснению. Ведь наша планета — не застывшее, а постоянно меняющееся образование. Внешние эти перемены проявляются и в крупных землетрясениях, и в периодической деятельности вулканов, и в грандиозных изменениях направления океанических течений. Очевидно, что перемены затрагивают и планетные токи, формирующие картину геомагнитного поля.

Заряженные частицы, бомбардирующие магнитосферу со стороны экватора, захватываются магнитным полем и дрейфуют

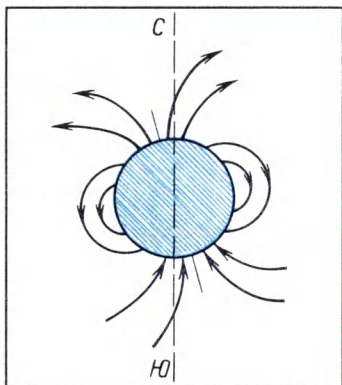


Рис. 10. Магнитные и географические полюсы Земли

вдоль силовых линий, первоначально не достигая атмосферы. Однако в районе магнитных полюсов силовые линии меняют свою ориентацию и входят в глубь атмосферы. В результате на планете имеются две области размером несколько сотен километров, которые пропускают в атмосферу часть солнечной радиации. Энергичные электроны взаимодействуют здесь с более холодной плазмой верхней атмосферы, в результате чего возникают изменяющиеся во времени электромагнитные поля и наблюдаются электромагнитные бури и полярные сияния.

Само свечение обусловлено в основном излучением молекул азота и атомов кислорода, возбуждаемых при соударениях с электронами энергией несколько килоэлектрон-вольт. Возбужденные атомы кислорода, находящиеся на высоте 100—150 км, излучают яркий зеленый свет. На больших высотах атомарный кислород излучает красный свет. Молекулы азота также излучают красный свет. Эти и другие цвета создают величественное зрелище, которое может продолжаться долгие минуты и даже часы, непрестанно меняя форму, положение, цвет, яркость.

Однако солнечная активность и ее проявления имеют, естественно, не только и не столько зрелищное значение. Все живое очень чувствительно к ее изменениям, которые периодически повторяются. Многовековыми наблюдениями установлено, что цикл солнечной активности, включающий минимум и максимум, длится от 7 до 17 лет, в среднем чуть больше 11 лет.

В пору максимальной деятельности Солнца многие растения особенно пышно цветут, наблюдаются относительно высокие урожаи. От силы солнечного ветра зависит климат. Например,

сильные засухи повторяются раза три в столетие и почти в одни и те же десятилетия — раз в три солнечных цикла.

Человеческий организм, как и любой живой организм, можно рассматривать как электромагнитную систему: есть там свои собственные и наведенные снаружи электрические токи (биотоки), электрические заряды и магниты. Например, напряженность магнитного поля сердца человека составляет порядка 10^{-4} А/м, мозга — 10^{-7} А/м. И сегодня для получения дополнительной информации о работе сердца врачи наряду с электрокардиограммой снимают магнитокардиограмму.

Воздействие сильных внешних магнитных полей может нанести существенный вред живому организму и даже убить его. Для человека считают допустимым пределом воздействия поля напряженностью до десятков тысяч ампер на метр. Однако и гораздо более слабые магнитные поля могут оказывать заметное влияние.

Поэтому неудивительно, что человек ощутимо реагирует на повышение солнечной активности. Во время магнитных бурь обостряется течение ряда сердечно-сосудистых и нервно-психических заболеваний, глаукомы, увеличивается число несчастных случаев на производстве. Наблюдается довольно четкая связь с эпидемиями и другими заболеваниями и событиями.

Интересно, что явления, подобные полярным сияниям и электромагнитным бурям, возможны не только на нашей планете, но и на других космических телах. Собственным магнитным полем обладают, например, Сатурн и Меркурий, да и само Солнце. Наиболее мощная по сравнению с другими планетами магнитосфера с магнитным полем напряженностью до 1000 А/м и рядом характерных явлений, включающих магнитные бури, обнаружена на Юпитере.

13. ЯВЛЕНИЯ НА РАЗЛОМАХ

Этот параграф уместно начать с рассказа об открытии московских ученых. Приоритетная формула такова: обнаружено свойство свежееобразованных поверхностей испускать в вакууме электроны высокой энергии. В момент раскалывания кристаллов кварца, гипса, слюды и других материалов с поверхности разлома излучались электроны, скорость которых приближалась в ряде случаев к скорости света.

Что это — странный и экзотический эффект? Совсем нет. Каждый из нас постоянно сталкивается с подобными явлениями,

часто не обращая на них внимания. Если в темной комнате разломить кусочек сахара, то можно заметить довольно яркое свечение поверхностей разлома. Аналогичные вспышки наблюдаются и при растирании в ступе сахарного песка. Опытные фотографы знают, что даже в полной темноте можно засветить фотопленку за счет свечения, возникающего при разрыве бумаги. Каждый может убедиться в возможности даже чтения при свете, возникающем при энергичном разматывании рулона липкой ленты. Медики наблюдают это явление, когда в темноте снимают пластырь с кожи пациента. Альпинисты знают, что сход ночных лавин иногда сопровождается зеленовато-белым свечением.

Список этих интересных явлений можно продолжить. Одно из простейших их объяснений состоит в том, что механические напряжения приводят к возникновению напряжений электрических, которые, в свою очередь, способствуют появлению ускоренных электронов и различных свечений. Ведь никого же не удивляют искры, проскакивающие в результате зарядки эбонитовой и стеклянной палочек трением о шерсть и шелк, а это почти аналогичный эффект.

Стоит сослаться здесь еще на одно научное исследование, опубликованное в журнале "Доклады Академии наук СССР". Эксперимент начинался с подрыва до 2 кг взрывчатого вещества. При этом в образце горной породы, располагавшемся на расстоянии 12—15 м от эпицентра, возникали, естественно, упругие волны и, что уже не столь естественно, фотоны высокой энергии и быстрые электроны. Интересно, что при этом существовало время запаздывания эффекта — до 1 с. Можно сказать, что ученые изобрели таким образом простейший преобразователь энергии взрыва в энергию излучения высокой энергии. Правда, эффективность этого преобразователя очень мала, так как поток рождающихся частиц незначительно превышает естественный фоновый поток, постоянно бомбардирующий поверхность нашей планеты из космоса. Поэтому, несмотря на очевидное достоинство — простоту конструкции, преобразователь не нашел пока должного применения.

Однако не стоит утверждать, что описанные явления не имеют никакого практического значения. Достаточно вспомнить о землетрясениях. Сегодня уже хорошо известны и даже используются для предсказания землетрясений так называемые предвестники. В частности, примерно за сутки перед землетрясением в атмосфере Земли возникают значительные электрические поля неясной природы, которые приводят к существенным возмуще-

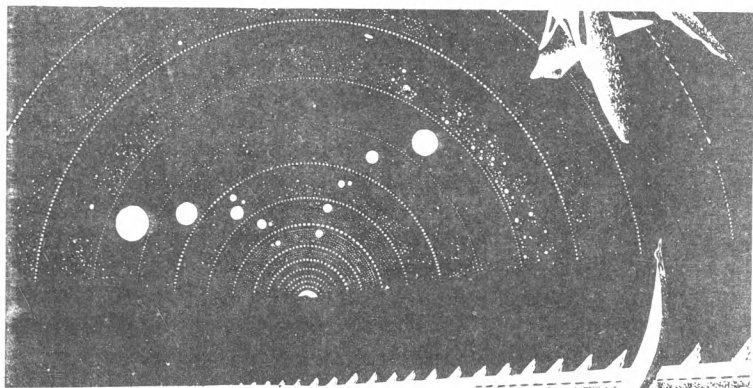
ниям верхних слоев атмосферы. По-видимому, именно эти поля и сопутствующие им явления помогают животным в ряде случаев безошибочно предчувствовать катаклизмы.

Кстати, наблюдения за землетрясениями привели к созданию так называемой геологической гипотезы происхождения аномальных явлений. Суть ее состоит в том, что в местах геологических разломов существует повышенная вероятность возникновения аномальных явлений.

Собранные статистические данные (возможно, требующие дополнительной проверки) говорят о том, что значительная часть аномальных явлений наблюдается на расстояниях в пределах нескольких сот метров от разломов.

Отметим, что японцы уже давно воспринимают обычные и шаровые молнии и некоторые оптические явления в ясном небе как признак предстоящего землетрясения. Действительно, в Японии и в других местах землетрясения, как правило, связаны с эффектами такого рода.

Интересные эксперименты проводились в связи с этим по исследованию ярких вспышек, имеющих место при разламывании твердых горных пород, например гранита. В темной камере разрушали кусок гранита и одновременно вели замедленную киносъемку. Более или менее яркое свечение, как бы обволакивающее камеру, наблюдалось в каждом опыте. В одном из экспериментов вспышка была заметна даже при дневном свете. Имеются данные, что свечение не ослабляется и под водой.



4

КАК СДЕЛАТЬ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК

14. УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

Ускорители заряженных частиц – это устройства, предназначенные для получения заряженных частиц больших энергий путем их ускорения в электрическом поле.

Еще полвека назад мало кто о них слышал. Однако в последние десятилетия ускорители приобрели известность как устройства, с помощью которых были сделаны крупнейшие научные открытия нашего века. На ускорителях получены почти все сведения об элементарных частицах и большая часть наших знаний об атомных ядрах.

В настоящее время ускорители шагнули из научных лабораторий в заводские цеха и все больше используются в прикладных целях.

Конструкции ускорителей электронов весьма разнообразны и постоянно совершенствуются. Развитие ускорительной техники идет как по пути увеличения энергии отдельных частиц и интенсивности электронных пучков, так и по пути улучшения качества пучка, уменьшения разброса его параметров. Немалую роль призвана сыграть и автоматизация систем управления промышленными ускорителями с помощью микропроцессорной техники.

Традиционно различают линейные ускорители, в которых траектории частиц близки к прямым линиям, и циклические, в которых траектории близки к окружности или спирали.

Рассмотрим сначала, как работает так называемый высоковольтный ускоритель (или ускоритель прямого действия), имеющий уже сегодня обширную область применения в промышленности. Он основан на простейшем способе ускорения электронов — подаче высокой (постоянной или почти постоянной) разности потенциалов U на пару электродов. При этом в ряде случаев возникает довольно интенсивный поток электронов, направленный от катода к аноду. В зазоре между электродами следует создать вакуум, чтобы избежать потерь энергии быстрых электронов на столкновения с атомами среды.

Тогда, очевидно, вблизи анода будет получаться готовый электронный пучок с энергией частиц, определяемой разностью потенциалов U . Например, если разность потенциалов на электродах составляет 1 МВ (10^6 В), то электроны будут иметь энергию, близкую к 1 МэВ. Ток пучка зависит от геометрии системы, используемых материалов и ряда других факторов и может составлять как микро-, так и килоамперы.

Зазор между катодом и анодом обычно имеет ширину порядка сантиметров, и работать с электронным пучком внутри этого промежутка крайне неудобно. Избежать этого неудобства помогает несложная хитрость. Если анод выполнен в виде сетки (решетки) или тонкой фольги, то электронный пучок проходит через него, как бы не замечая такой преграды и почти не меняя своих характеристик. Таким образом, пучок удастся вывести за пределы межэлектродного пространства и без помех применять по назначению. Часто используют решетку и фольгу одновременно (рис. 11). Жесткая решетка (рис. 12) позволяет механически держать перепад давлений, а фольга нужна для герметичности.

Ускорители такой конструкции весьма просты и надежны и позволяют решать многие задачи — как научные, так и технические. Главная проблема при их разработке — создание и поддержание высокого напряжения, исключение паразитных электрических пробоев, мешающих работе ускорителя.

Каждый может заметить искрение, имеющее место при включении вилки бытовых приборов в розетку. Это объясняется, в частности, тем, что еще до замыкания механических контактов электрической цепи, когда расстояние между ними становится порядка долей миллиметра, происходят пробой и досрочное замыкание цепи.

Как известно, напряжение в сети составляет всего-навсего 220 В. Какие же искры должны проскакивать тогда при напряжениях тысячи и миллионы вольт?!

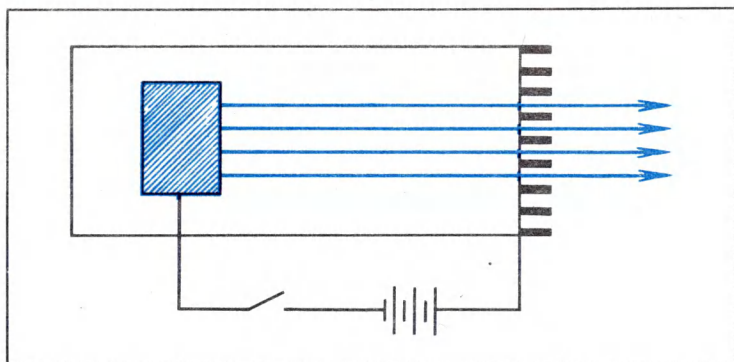


Рис. 11. Высоковольтный ускоритель. Электронный пучок на выходе ускорителя проходит через фольгу и решетку

Основной характеристикой, определяющей условия пробоя, является не напряжение, а напряженность электрического поля, которая пропорциональна разности потенциалов и обратно пропорциональна расстоянию. Это означает, что важна не только разность потенциалов, но и расстояние между точками пробоя.

Рассмотрим для примера в грубом приближении, не учитывая геометрические и прочие особенности, пробой в веществе с характерной усредненной напряженностью пробоя 1 МВ/м . Тогда для разности потенциалов 220 В пробой может произойти между точками, удаленными не более чем на $0,22 \text{ мм}$ ($220 \text{ В} : 10^6 \text{ В/м}$). А при разности потенциалов 1 МВ уже пробиваются промежутки шириной 1 м ! Это приводит к тому, что при работе ускорителя пробой может произойти не там, где надо (между катодом и анодом), а совсем в другом месте, например, между подводящими проводами, находящимися далеко друг от друга.

Все же с разностями потенциалов порядка 1 МВ еще можно работать, улучшив изоляцию и разнеся опасные в смысле пробоя точки. А вот 10 МВ удержать без пробоя уже практически невозможно. Поэтому энергия электронов в высоковольтных ускорителях обычно не превышает нескольких мегаэлектрон-вольт.

Как же быть, если все-таки требуется более высокая энергия электронов? В этом случае используют резонансный способ ускорения частиц. Суть его заключается в том, что применяются высокочастотные электромагнитные поля, вектор напряжен-

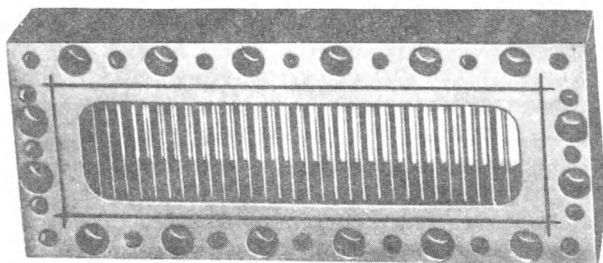


Рис. 12. Решетка выпускного окна ускорителя, позволяющая держать перепад давлений

ности которых в каждый момент времени в каждой точке траектории сгустка ускоряемых частиц подобран так, что поле постоянно подгоняет электроны. При этом в линейном ускорителе траектория частиц близка к прямой. В циклическом же она за счет применения магнитных полей искривлена в кольцо или спираль, так что электрон многократно проходит по одной и той же траектории, каждый раз приобретая новую порцию энергии.

Резонансные ускорители выгодно отличаются тем, что энергия электронов в них может достигать многих миллиардов электрон-вольт. Однако они весьма сложны и дороги. Токи, получаемые в них, сравнительно невелики. Все это ограничивает область их научных и особенно технических приложений.

Говоря об ускорителях электронов и их применении, нельзя не упомянуть о других важных способах получения потоков быстрых электронов. Речь идет о системах, которые обычно не причисляют к ускорителям, но которые в ряде случаев их успешно заменяют. В частности, это плазменные источники электронов, в которых ускоренные электроны возникают в качестве компонента при рождении плазмы.

Кроме того, иногда удобным источником потоков быстрых электронов является радиоактивный распад, сопровождающийся β -излучением. Изотопные источники быстрых электронов выполнены обычно в виде тонкой пленки излучающего вещества. Связано это с тем, что в глубине более толстого слоя вещества происходят торможение и поглощение основной части рождающихся при распаде электронов. В результате эффективность толстого слоя оказывается невысокой и определяется по-прежнему лишь приграничной областью, толщина которой по порядку величины равна длине пробега быстрых электронов в данном веществе. В качестве примера можно привести источник электронов на основе радиоактивного изотопа фосфора ^{32}P .

Необходимо отметить, что более широкое применение сегодня имеют радиоактивные источники γ -излучения в основном на основе нуклида ^{60}Co . Они служат альтернативой электронным ускорителям как источники тормозного излучения, причем имеют более длительную историю применения и до сих пор используются примерно в трети всех действующих промышленных радиационных установок.

По сравнению с ускорителями изотопные источники имеют малые размеры и устроены проще. Однако ускорители обладают более высокими мощностью и эффективностью, обеспечивают более дешевую радиационную обработку материалов и поэтому более перспективны для применения в широких промышленных масштабах. В отключенном состоянии они радиационно безопасны.

Итак, способов создания электронных потоков довольно много и параметры их весьма разнообразны. Энергия частиц варьируется от единиц до многих миллиардов электрон-вольт. Ток пучка может быть ничтожно мал и может приближаться к миллиону ампер. Пучок генерируется либо постоянно, в течение длительного времени, либо импульсами длительностью до нескольких наносекунд. Выбор источников и параметров электронных пучков зависит от предъявляемых требований, но об этом в следующих главах.

15. ИОННЫЙ ПУЧОК ИЗ ЭЛЕКТРОННОГО

По сравнению с электронными ионные пучки имеют не такое широкое применение. В основном это связано с тем, что создать их не так просто. Существенно, что пробег ионов в веществе в сотни раз меньше, чем пробег электронов той же энергии. Следовательно, чтобы получить ту же длину пробега, необходимо увеличить энергию в сотни раз. В целом перспективы использования ускоренных ионов выглядят весьма обнадеживающе, поэтому ученые постоянно работают над созданием простого и эффективного способа генерации ионных пучков. И, как это на первый взгляд ни странно, помочь здесь может электронный пучок.

Впрочем, странного ничего нет. Все проясняется, если (в который уже раз в этой книге!) вспомнить о законе Кулона. Идея основана на том, чтобы для ускорения положительно заряженных ионов использовать колоссальную электрическую силу притяжения их к электронам. Таким образом, движущийся

сгусток электронов может увлечь за собой ионы и ускорить их до высокой энергии, намного превосходящей энергию электронов.

Итак, снова коллективные эффекты. В отличие от обычных ускорителей, в которых для ускорения заряженных частиц применяются поля, создаваемые внешними источниками, в методе *коллективного ускорения* используют собственные поля интенсивного пучка электронов. А это немалые поля. Для мощного релятивистского пучка напряженность собственного электрического поля составляет порядка 100 МВ/м.

Метод обладает весьма полезной особенностью. Увлекаемый сгусток ионов как бы прилипает к электронному пучку и движется с той же скоростью, а поскольку масса иона на несколько порядков превышает электронную массу, при примерно одинаковых скоростях кинетическая энергия ускоренных ионов может во много раз превосходить энергию электронов. Для протонного пучка — в 2000 раз, а для более тяжелых частиц — в десятки и сотни тысяч раз.

Для реализации коллективного ускорения предложено множество схем и моделей. Одна из них заключается в том, что в разреженный газ попадает интенсивный релятивистский электронный пучок. При этом происходит ионизация газа. В начальный момент инжекции пучка (на переднем фронте пучка) возникают особенно высокие электрические поля и наиболее плотный сгусток отрицательного заряда. В результате часть образовавшихся ионов ускоряется до энергии, значительно превышающей энергию электронов. При этом может достигаться довольно высокая плотность ионного тока. А именно это и требуется!

Интенсивные ионные пучки нужны для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза. Протонные пучки уже нашли ряд применений в медицине. Да и во многих других сферах ионы в будущем потеснят электроны. Но при этом не стоит забывать о происхождении ионных пучков и о их в ряде случаев тесной связи с электронными пучками.

16. НЕ ТОЛЬКО ВПЕРЕД

В предыдущих параграфах рассказывалось, как получить ускоренные заряженные частицы. Однако не менее важно сфокусировать электронный пучок и заставить его распространяться в нужном направлении.

За отклонением и фокусировкой электронного луча мы имеем возможность наблюдать каждый раз, когда смотрим телевизор. Действительно, изображение на экране телевизора создается с помощью электронного луча, возбуждающего свечение внутреннего покрытия кинескопа — люминофора. И только хорошо сфокусированный, отклоняемый сложным образом луч способен воспроизвести четкую, сложную и тем более разноцветную картину.

Искривить траекторию электрона, заставив его двигаться в нужном направлении, можно с помощью воздействия постоянного магнитного или электрического поля. Магнитное поле ускоряет частицы в направлении, перпендикулярном как их скорости, так и самому полю. В электростатическом поле ускорение электронов направлено в противоположную полю сторону. В телевизионных системах для фокусировки и отклонения электронного луча обычно используют сложную пространственную конфигурацию электромагнитных полей, к тому же переменную во времени.

Таким образом, для транспортировки электронного пучка в нужном направлении могут применяться магнитное, электрическое поля или их совокупность.

Однако для отклонения релятивистских электронов все же удобнее использовать магнитное поле, чем электрическое. И дело здесь не в сразу бросающемся в глаза различии в направлении действия силы. Главное, что для придания релятивистским электронам заметного отклоняющего импульса требуются весьма большое электрическое поле и относительно умеренное магнитное. При этом поддержание нужного электрического поля осложняется многочисленными паразитными пробоями.

Рассмотрим вопрос о роли отклоняющих и фокусирующих магнитных полей на примере газового лазера, инициируемого сильнооточным релятивистским электронным пучком (рис. 13). Принцип работы такого лазера заключается в следующем. Электронный пучок, создаваемый в ускорителе электронов, возбуждает молекулы активной газовой среды лазера, которые, возвращаясь в невозбужденное состояние, испускают свет. Это излучение окончательно формируется в промежутке между зеркалами оптической системы и, пройдя через один из торцов лазера, образует выходное излучение лазера.

Приведем приближенные значения некоторых параметров такой лазерной системы: энергия электронов 1 МэВ; импульсный ток пучка 10 кА; давление газовой среды 10^5 Па (1 атм);

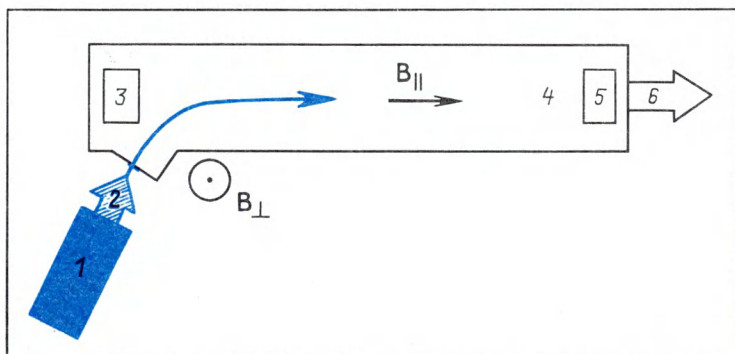


Рис. 13. Отклоняющее B_{\perp} и фокусирующее B_{\parallel} магнитные поля в газовом лазере, инициируемом мощным электронным релятивистским пучком:

1 — ускоритель электронов; 2 — электронный пучок; 3, 5 — зеркала оптической системы; 4 — активная газовая среда лазера; 6 — выходное излучение лазера

длина рабочей области, заполненной газом, 1 м; диаметр рабочей области 10 см.

Магнитное поле в описанной установке применяется дважды, причем первый раз оно ориентировано перпендикулярно направлению распространения пучка, а второй раз — параллельно.

Перпендикулярное поле, характеризуемое магнитной индукцией B_{\perp} , призвано способствовать введению электронного пучка в газовую среду лазера. Дело в том, что прямолинейный ввод пучка через левый торец лазера, хотя и более прост, все же не всегда пригоден, поскольку может привести к механическому разрушению левого зеркала оптической системы при прохождении сквозь него мощного электронного пучка. Поэтому удобнее подавать пучок сбоку, закругляя траекторию его входа в газовую среду магнитным полем. При этом радиус закругления, очевидно, равен ларморовскому радиусу (см. подробнее § 12)

$$R_{\perp} = mv_{\perp} / (eB_{\perp})$$

где m — релятивистская масса электрона; v_{\perp} — составляющая скорости электрона, перпендикулярная направлению магнитной индукции; e — заряд электрона. Магнитную индукцию здесь подбирают так, чтобы ларморовский радиус составил порядка 10 см и электронный пучок был достаточно точно геометрически ориентирован в газовой среде.

Итак, предположим, пучок удалось ввести в газ, где он испытывает упругие и неупругие соударения с атомами среды (см. подробнее в гл. 1, 2). При этом электроны пучка направлены не строго вдоль оси камеры, а имеют разброс по направлениям своего движения. Поэтому существует опасность, что они не успеют истратить свою энергию на возбуждение атомов или молекул и будут сразу же выброшены на стенки камеры. В результате энергия излучения лазера может резко уменьшиться, а в ряде случаев он вообще перестанет работать.

Для того чтобы изолировать электронный пучок от стенок камеры, и наложено продольное, параллельное оси камеры поле с магнитной индукцией B_{\parallel} . Здесь используется свойство магнитного поля тормозить продвижение заряженных частиц поперек поля (см. в гл. 3). При этом поперечное движение перестает быть свободным, траектория электронов закручивается в спираль. Это не позволяет электронам продвинуться к стенкам на расстояние, существенно большее ларморовского радиуса:

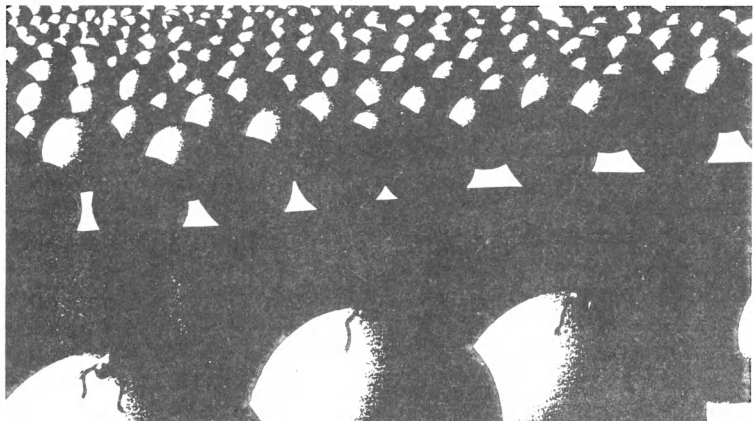
$$R_{\parallel} = mv_{\perp} / (eB_{\parallel}).$$

Для описанной системы можно допустить распыливание диаметра электронного пучка на расстояние порядка 1 см. Это означает, что достаточно выбрать $R_{\parallel} \approx 1$ см. Нетрудно заметить, что индукция параллельного, фокусирующего поля при этом должна быть на порядок большей, чем индукция перпендикулярного, отклоняющего поля.

Часто говорят не о фокусирующей роли продольного магнитного поля, направленного вдоль распространения электронного пучка, а о стабилизирующей. Это тоже правильно, поскольку продольное поле стабилизирует диаметр пучка, не давая ему не только увеличиваться, но и уменьшаться.

Уменьшение диаметра в процессе распространения — явление, характерное для весьма сильноточных электронных пучков (о магнитном сжатии см. § 10). Дело доходит до того, что релятивистский пучок с током десятки килоампер под действием собственного поля может в какой-то точке запереться и прекратить свое дальнейшее продвижение вперед. Вот тут-то и помогает более мощное продольное внешнее стабилизирующее магнитное поле, задающее электронам правильное направление движения.

Приведенными примерами далеко не исчерпывается роль магнитных и электрических полей в процессах распространения электронных пучков. О некоторых других эффектах будет рассказано ниже.



5

ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

17. ЧТО ТАКОЕ РАДИОБИОЛОГИЯ

Быстрые электроны при торможении в среде приводят, как уже говорилось, к каскаду превращений в среде: появляются ионизованные и возбужденные атомы и молекулы; разрываются и, наоборот, возникают связи между атомами и радикалами; рождаются фотоны самых различных энергий и др. Эти изменения, происходящие на атомарном уровне, вызывают изменение свойств тормозящего объекта в целом. Они представляются особенно важными и сложными, если объект, о котором идет речь, — живой организм. В зависимости от дозы облучения возможны следующие последовательные стадии реакции биологического объекта: стимуляция развития, генетические изменения, стерилизация, замедление роста, остановка жизнедеятельности, химическое разложение.

Изучением реакции живых организмов на облучение занимается специальная наука — радиобиология. Развитие этой науки, характерное для нашего динамического века, прошло несколько важных этапов. От простого накопления фактов и выявления общих закономерностей влияния ионизирующих излучений на поведение живых организмов постепенно удалось перейти к вскрытию физико-химических и биохимических механизмов процессов.

К началу 50-х годов в радиобиологии был накоплен огромный фактический материал. В первую очередь внимание уделялось основному фактору — губительному воздействию ионизирующего излучения на живой организм. Удалось исследовать радиочувствительность самых разнообразных организмов, от бактерий до млекопитающих, и установить зависимость поражающего эффекта от физиологического состояния организма и характеристик облучения.

Выяснилось, что поражение протекает для многих высокоорганизованных живых существ сходным образом и обеспечивается примерно одинаковыми дозами. Это неудивительно, поскольку, как выяснилось, многое определяется уже на клеточном уровне.

Уже в то время были созданы теории прямого и косвенного, многостадийного — с участием молекул воды — действия радиации. Казалось, что основные положения радиобиологии уже сформулированы.

В те годы только начиналось систематическое изучение радиационного разрушения основных классов биологических молекул, таких, как белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды. Эти исследования основывались на описании процессов ионизации и возбуждения молекул. Удалось показать важную биологическую роль взаимодействия ионизирующего излучения с молекулами воды. Впрочем, этот факт не вызывает удивления, если вспомнить, что каждый живой организм состоит в основном именно из воды.

На следующем этапе исследований удалось выяснить, что взаимодействие биологических макромолекул, состоящих из очень большого числа атомов, с ионизирующими излучениями характеризуется рядом принципиально новых свойств. Причем эти свойства полностью отсутствуют не только у простейших, но и у несколько более сложных органических молекул. Например, оказалось, что энергия, полученная макромолекулами в результате прямого или косвенного воздействия ионизирующего излучения, обычно не оказывает на нее действия в том участке молекулы, где она была приобретена. Как правило, она первоначально передается в другое место молекулярной структуры и, только найдя слабое место, оказывает поражающее действие.

Кроме того, пришлось отказаться от привычных представлений о физической "мгновенности" поражающего воздействия радиации. Выяснилось, что многие повреждения макромолекул могут долгое время не проявляться. При этом функциональные

свойства биомолекулы нарушаются при дополнительном действии различных нерадиационных факторов.

Очень сложно создать теорию и наблюдать механизм воздействия радиации даже в такой сравнительно небольшой системе, как живая клетка. Далеко не всегда возможно даже выделить роль отдельных факторов, существенных для поражения. Поэтому до сих пор велика роль модельных, упрощенных экспериментов. Наиболее четкие результаты в модельных исследованиях получены на ферментах и вирусах. Впрочем, они не всегда помогают описать процессы в клетке, так же как информация на клеточном уровне не всегда дает возможность понять поведение живого организма в целом.

Все же имеющиеся на сегодня данные позволяют в общих чертах представить биофизическую картину воздействия ионизирующих излучений на живые организмы. При этом можно догадаться, что это воздействие сходно при облучении различными энергичными частицами, будь то электроны, γ -кванты, α -частицы или какие-либо другие. Ведь, как следует из материала предыдущих глав, во всех случаях каскад превращений в тормозящем объекте в значительной мере однотипен и определяется рождением сначала довольно быстрых, а на следующих стадиях — все более медленных частиц.

В соответствии с теорией радиация действует на все три компонента живой клетки: воду, макромолекулы и другие, сравнительно простые молекулы. В результате взаимодействия радиации с молекулами воды и другими сравнительно простыми молекулами образуются вторичные продукты, активные в химическом отношении. Макромолекулы подвергаются прямому и косвенному воздействию радиации. Поражение белковых макромолекул идет, по-видимому, в два этапа. На первом этапе при прямом воздействии происходит ионизация или возбуждение макромолекул.

При косвенном воздействии радиации огрыв от макромолекулы электрона происходит, очевидно, вследствие взаимодействия с образованными ранее вторичными активными продуктами.

Ионизация и возбуждение большой и сложной молекулы сами по себе еще не приводят к ее поражению и изменению биологических свойств. Поражение может проявиться спустя сравнительно длительный промежуток времени в слабом звене макромолекулы. Важную роль здесь играют другие, смежные частицы, способные ускорить или предотвратить радиационное поражение.

Описанная на атомарном уровне схема позволяет дать правильную качественную картину радиационного поражения биологических объектов. Особенно важно, что такая модель помогает объяснить наличие возможностей усиления и ослабления радиационных эффектов уже после облучения. В целом же стоит подчеркнуть, что теория пока не позволяет дать окончательного ответа на вопрос о возможных последствиях возрастающей роли радиации в жизни общества. Среди специалистов существуют противоречивые мнения по этой проблеме. Многие из общих соображений рассматривают радиационные технологии как один из каналов экологического загрязнения биосферы. Однако, по-видимому, большинство считает, что повода для беспокойства пока нет.

Впрочем, в печати встречаются и другие мнения. Например, известно, что в последнее время для предохранения продуктов от порчи их все чаще облучают относительно слабыми дозами. Однако есть данные, что продолжительность жизни мышей, которых кормили такими продуктами, оказалась в ряде случаев значительно меньше нормальной, а в мозгу и сперме таких мышей были обнаружены деформированные хромосомы. Подобные научные публикации встречаются не часто, тем не менее их не следует игнорировать, тем более, что комплексных, разносторонних и в достаточной степени завершенных исследований такого рода на многих поколениях высокоорганизованных живых организмов пока не проведено.

Известно, что наше здоровье зависит от полноценности генетической программы во всех клетках, тканях, органах тела. Сегодня стало ясно, что генетическая программа человека, его молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) в зародышевых и телесных клетках, недостаточно защищена от внешних и внутренних влияний.

Биологически активные факторы окружающей среды, вызывающие изменения в организмах (мутации) называются мутагенами. Проникая в клетки человека, мутагены поражают в них молекулы ДНК. Часто последствия влияния мутагенов проявляются в первом же поколении и передаются от родителей к детям. Подавляющее число мутаций вредно для человека и приводит к появлению уродливых наследственных отклонений.

Мутагенное действие радиационного облучения живых организмов было открыто во второй половине 20-х годов нашего столетия. Позже были обнаружены мутагенные свойства самых различных по своей природе химических соединений, с которыми так или иначе может контактировать человек. В связи с

этими двумя факторами необходимо исключить при использовании ионизирующих излучений возможность возрастания как первичных мутаций, связанных с прямым облучением людей, так и вторичных, определяемых вероятностью рождения химических мутагенов. В этом смысле велики роль и ответственность людей, которые определяют, будет ли внедрена данная конкретная радиационная технология.

Частично отвлекаясь от проблем использования электронных пучков, следует подчеркнуть, что проблема мутагенов стоит в современном обществе крайне остро. Заслуживают внимания данные, приведенные академиком Н.П. Дубининым. Наличие определенного числа биологически дефектных особей в популяции людей называется генетическим грузом. В конце 50-х годов генетический груз составлял 4%, примерно столько же, сколько и 40 тыс. лет назад, когда появился на земле гомо сапиенс. Спустя четверть века, по данным Организации Объединенных Наций, уже 10,5% людей на Земле рождалось с наследственными отклонениями: тяжелыми наследственными болезнями, ведущими к гибели, физическими и умственными дефектами; больше 3% детей рождалось умственно отсталыми.

Все это связано с загрязнением биосферы, проявляющимся тем или иным образом. Определенную роль, по-видимому, играют и некоторые негативные факторы развития медицины. В результате человечество вступает в ту фазу развития, когда может возникнуть опасность неконтролируемого разрушения биологических основ существования человека.

Однако вернемся к электронным пучкам. На сегодня практически не существует свидетельств вредного мутагенного эффекта использования ионизирующих излучений в народном хозяйстве (естественно, при условии соблюдения установленных правил и норм радиационной безопасности). Зато имеются результаты получения полезных мутаций. Путем отбора после радиационной обработки γ -излучением советские ученые вывели новый сорт пшеницы "Новосибирская-67". Этот сорт, высеваемый с 1974 г. на миллионах гектаров в Западной Сибири, обладает урожайностью до 65 ц с гектара, хорошими хлебопекарными качествами, устойчив к полеганию. Аналогичным способом выведены ячмень "Обский", сорта фасоли, сои, картофеля, гречихи, карликовые формы яблонь. В Грузии получены новые сорта чая, ароматного, не похожего на своих предшественников. Его охотно покупают и зарубежные страны.

Предпосевное облучение семян может повысить урожайность зерновых и зернобобовых на 10–15%, овощных культур —

на 20–30%, картофеля — на 15–20%. Морковь, выращенная из облученных семян, богаче каротином, свекла — сахарозой. Облучение применяют также для ускорения созревания редиса и капусты.

Специально подобранные дозы ослабляют тканевую несовместимость черенков при проведении прививок в виноградниках. Радиационная стимуляция яиц позволяет дополнительно получить в инкубаторах тысячи цыплят. Облучение может применяться и для обработки эмбрионов рыб, что способствует увеличению выхода мальков.

Приведенные примеры, несмотря на предварительный в ряде случаев характер оценок, впечатляют. Они демонстрируют возможные масштабы воздействия ионизирующих излучений на биологические объекты и подтверждают необходимость проведения дальнейших радиобиологических исследований.

18. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОНОВ

Работа с электронным пучком должна проходить так, чтобы человек не подвергался губительному воздействию облучения. Иными словами, должны строго соблюдаться правила радиационной безопасности. В противном случае наступает поражение человеческого организма, которое при сильном облучении приводит к тяжелым последствиям, болезни и смерти человека. Следует помнить, что уже первооткрыватель радиоактивности А. Беккерель стал одной из первых ее жертв, получив тяжелые лучевые ожоги.

Лучевая реакция организма развивается постепенно. Вначале имеет место скрытый период, в течение которого видимых проявлений действия радиации не наблюдается. Длительность скрытого периода зависит от дозы облучения, времени воздействия и ряда других причин. В течение скрытого периода развиваются первоначальные радиобиологические изменения на молекулярном уровне, которые далее приводят к нарушению различных звеньев обмена веществ и гибели части клеток, а в конце концов — к дезорганизации жизнедеятельности организма, которая может быть уже зарегистрирована различными методами.

Мутации, возникающие в любых клетках организма, кроме половых, — так называемые соматические мутации — приводят к лучевой болезни или к возникновению злокачественных опухолей, но не вредны для потомства. Мутации же в половых клет-

ках не влияют на состояние самого организма, но могут привести к появлению у потомства врожденных дефектов.

К счастью, соблюдение сравнительно несложных правил радиационной безопасности позволяет практически полностью исключить вероятность каких-либо неприятных последствий при работе с электронными ускорителями. Чтобы понять происхождение и смысл этих правил, прежде всего надо разобраться, от чего зависит радиационное поражение человеческого организма. Вся необходимая физическая информация изложена в предыдущих параграфах.

Степень поражения организма зависит от числа элементарных дефектов, возникающих на молекулярном уровне: ионизаций, возбуждений и т.д. Как показано выше, затраты энергии быстрых электронов на каждый акт ионизации (цена ионизации) и другие элементарные процессы слабо зависят от каких-либо параметров системы и могут быть приняты за константу. Более того, при облучении вещества γ -квантами, α -частицами и другими энергичными частицами каскад превращений в среде протекает, по сути, так же, как в случае электронного пучка. Поэтому энергетическую цену элементарного дефекта, возникающего в человеческом организме под действием любого вида облучения, можно в первом приближении считать также постоянной.

С учетом этого вывода понятно, почему за основную характеристику радиационного поражения человека может быть принята энергия ионизирующего излучения, поглощенная организмом и рассчитанная на единицу его массы, — поглощенная доза излучения.

Поглощенная доза тем больше, чем больше время облучения. Иными словами, она накапливается со временем. Доза, отнесенная к единице времени, называется мощностью дозы. Единицей поглощенной дозы в СИ является 1 грэй (Гр), соответствующий поглощению в 1 кг вещества 1 Дж, а единицей мощности дозы — 1 Гр/с.

При длительном облучении необходимо учитывать возможность ослабления радиационных эффектов, о которой говорилось в предыдущем параграфе. Это, в частности, приводит к тому, что одинаковая доза, приводящая к смертельному исходу при получении человеком за короткое время, может при медленном накоплении в течение всей жизни не приводить ни к каким видимым изменениям. Таким образом, проблема радиационной безопасности при работе с электронными ускорителями сводится к защите от облучения преградой, пропускающей к человеку лишь допустимый минимум энергии облучения.

Радиационное поражение может вызывать непосредственно поток электронов, если он выводится в атмосферу. С помощью приведенных выше формул несложно оценить защитную толщину слоя воздуха. Надо лишь учесть, что формула (19) не подойдет, потому что позволяет оценить лишь среднюю длину пробега электронов. Понятно, что часть электронов будет иметь меньший, а часть — больший пробег. Но даже если небольшая часть электронов (доли процента) достигнет человека, возможны крупные неприятности. Поэтому нужно толщину защитного слоя оценивать по формуле для максимального пробега (18). Для пучка электронов энергией 1 МэВ толщина такого слоя воздуха составляет несколько метров.

Однако отходить далеко от ускорителя при работе не всегда удобно и возможно. Поэтому, чтобы защититься от быстрых электронов, проще установить тормозящий их экран. При этом нужно учитывать, что траектории электронов могут искривляться и такие частицы могут пройти даже через непрямолинейные отверстия в экране.

Впрочем, главные проблемы защиты заключаются не в этом. Дело в том, что при попадании ускоренных электронов на детали установки (особенно если эти детали состоят из атомов тяжелых элементов) создается вторичное тормозное излучение с повышенной проникающей способностью. Кроме того, при протекании фотоядерных реакций могут рождаться энергичные нейтроны. Именно такая, вторичная радиация обычно и представляет наибольшую опасность. Например, проникающая способность тормозного излучения примерно на два порядка выше, чем у электронов той же энергии.

Допустимая доза облучения при работе составляет за год 0,05 Гр. Поэтому необходимо, чтобы радиационная защита, например, сильноточных ускорителей ослабляла тормозное излучение в 10^4 — 10^7 раз.

Стоит привести характерные значения толщины ряда материалов, ослабляющих поток тормозного излучения различной энергии в 10^7 раз. При энергии 1 МэВ требуется толщина бетона 142,0 см, железа — 42,4 см, свинца — 22,5 см. При энергии 100 кэВ необходима толщина бетона 64,0 см, железа — 15 см, свинца — 1,7 см. Для ослабления потока тормозного излучения в 10^5 раз защитный слой в этих случаях должен быть в 1,5—2 раза тоньше.

Интенсивная радиация приводит к повреждению живых клеток и их гибели, поэтому, как говорилось выше, для защиты живых организмов в ряде случаев необходимы меры специальной безопасности. Однако иногда нужно именно повредить или уничтожить вредные клетки. Речь идет, в первую очередь, о клетках злокачественных опухолей.

В 1895 г. было открыто рентгеновское излучение, и в этом же году была сделана попытка использовать его в медицинских целях. Первый циклический ускоритель электронов создавался уже для исследований не только в области физики, но и медицины.

В настоящее время значительная часть больных раком проходит курс лучевой терапии (рис. 14). Применение ее в сочетании с дополнительным терапевтическим и хирургическим воздействиями помогло вылечить многие тысячи людей. Принцип лучевого воздействия на злокачественные опухоли довольно прост. Необходимо разрушить или повредить, лишив способности к размножению, как можно больше злокачественных клеток. При этом крайне желательно по возможности не повредить здоровые клетки организма человека, расположенные рядом с опухолью.

Однако на деле все не так просто. Например, часто нельзя пытаться одновременно уничтожить все раковые клетки уже хотя бы потому, что при этом слишком большое количество продуктов распада попадет в кровь и ухудшит состояние здоровья больного человека. Поэтому облучение обычно проводят в несколько приемов в течение ряда недель. Такой оптимальный режим лечения способствует частичному восстановлению здоровых тканей, подвергшихся облучению. Это связано с различиями в реакции на радиацию злокачественных и здоровых клеток: последние быстрее поражаются, но в то же время легче восстанавливаются.

Разные органы и ткани человека обладают разной чувствительностью к облучению. Весьма ощутимо воздействие радиации на кожу, слизистые оболочки, кишечник, хрусталик глаза, сердце и крупные сосуды. В некоторых случаях опухоли оказываются относительно устойчивыми к облучению. Это создает дополнительные трудности, способ преодоления которых состоит в одновременном использовании хирургических, химиотерапевтических и радиационных методов лечения.

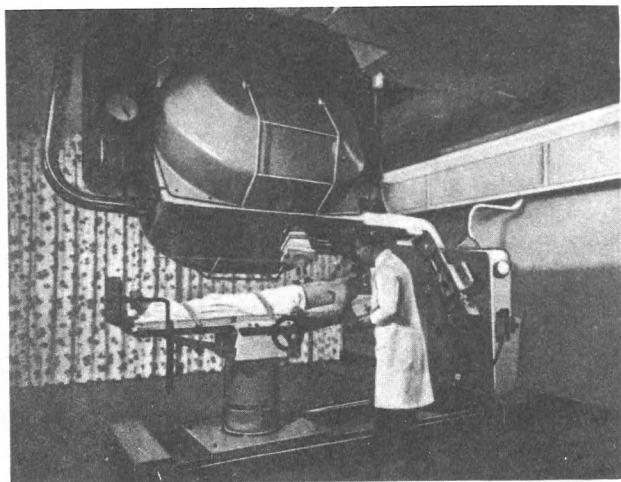
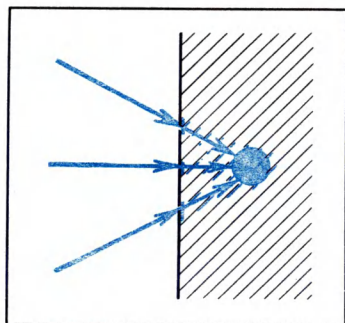


Рис. 14. Применение электронного пучка для лучевой терапии. Установка выполнена на базе бетатрона фирмы Brown Boveri

Положительный эффект химиотерапии (лечения с помощью лекарств) основан на рассмотренном выше эффекте. Это эффект усиления или ослабления поражения молекул при воздействии на них различных химических веществ. В результате специальные лекарства помогают повысить устойчивость к радиации здоровых тканей и понизить устойчивость опухолевых клеток.

Суммарная доза облучения при терапевтических воздействиях на отдельные органы человека обычно не превышает 10 Гр и набирается в течение трех-четырех недель. Эта доза обеспечивает физический нагрев тела лишь не более чем на несколько тысячных долей градуса, однако ее биологический эффект воздействия как на больные, так и на здоровые органы колоссален. Поэтому одним из наиболее важных понятий лучевой терапии является дозное поле, характеризующее пространственную картину распределения поглощенной энергии в облучаемом теле. Вид такой пространственной картины определяется возможностями используемого источника облучения. Основная задача при этом сводится к тому, чтобы с учетом анатомии облучаемой части тела подобрать оптимальный вариант дозного поля, который должен обеспечивать максимальное поражение очага болезни и минимальное повреждение окружающих тканей.

Рис. 15. Создание дозного поля с помощью разнонаправленных электронных пучков при облучении опухоли в глубине тела



Одно из простейших оптимальных дозных полей создается при использовании электронных пучков, имеющих разные направления при входе в живую ткань и сфокусированных в глубине тела на опухоли (рис. 15). Такая схема позволяет за счет рассредоточения избежать переоблучения весьма чувствительного кожного покрова, сконцентрировав при этом значительную дозу непосредственно на опухоли. Правда, достаточно хорошо сфокусировать электронный пучок не всегда возможно, поскольку, как уже отмечалось, в процессе торможения электронов их траектории случайным образом искривляются и система как бы несколько расфокусируется. Поэтому в случаях, когда требуется особая точность распределения дозного поля, лучше использовать не электронные, а протонные пучки. Выкладки, аналогичные выполненным для электронов в предыдущих главах, показывают, что пучок из тяжелых протонов легче фокусируется и меньше размывается при торможении в тканях. Например, на пути 10 см протонный пучок рассеивается лишь на несколько миллиметров — во много раз меньше, чем электронный пучок. В ряде случаев дозное поле удобнее создавать с помощью облучения энергичными фотонами, нейтронами и другими частицами.

Решением проблемы создания оптимального дозного поля занимаются теперь не только физики и медики, но и математики. Немалую помощь оказывают электронно-вычислительные машины. Задача настолько сложна и ответственна, что иногда только машина способна указать оптимальное положение больного, перебрать и проанализировать все варианты формирования дозного поля.

В этом параграфе будет продолжен разговор о применении электронных пучков для воздействия на живые организмы. Речь теперь пойдет о стерилизации.

Как уже говорилось, в результате действия электронного пучка в какой-либо из молекул живой клетки может произойти разрыв химической связи. Далее эта связь может восстановиться и клетка вернется в свое начальное состояние. А может случиться и так, что появятся какие-либо новые, другие связи, и в результате в клетке возникнут необратимые изменения. Такого рода изменения играют особую роль, если они происходят в ядре клетки, в ее генетическом аппарате. В этом случае клетка, даже оставшись живой, может потерять способность к размножению. Такой процесс и называется стерилизацией.

Явление стерилизации знакомо каждому человеку. Питьевую воду принято хлорировать, а перед употреблением кипятить. При этом обычно даже не требуется, чтобы болезнетворные бактерии погибли. Достаточно, чтобы они не имели возможности размножиться в человеческом организме. Нам приходится употреблять стерилизованное молоко, консервы и другие продукты. Особую роль играет стерилизация в медицине: без нее не обойтись при использовании медицинских инструментов, лекарств, бинтов и ваты.

Традиционные методы стерилизации основаны на нагревании и химической обработке. Однако эти методы обладают существенными недостатками: одни приводят к серьезному ухудшению вкуса продуктов, другие — к разрушению витаминов, появлению побочных вредных эффектов. Кроме того, они дороги и характеризуются невысокой производительностью труда.

Радиационная стерилизация обладает рядом несомненных преимуществ по сравнению с традиционными методами. Одно из основных ее достоинств — малые энергетические затраты. Предполагается, что достаточную эффективность и безопасность стерилизации обеспечивают дозы от сотен до десятков тысяч грэй.

Нетрудно подсчитать, что даже при использовании сравнительно большой дозы 25 000 Гр (вспомним, что 1 Гр соответствует 1 Дж вложенной радиацией энергии на 1 кг) на 1 г вещества поглощается тепловая энергия 6 кал (25 Дж). Это соответ-

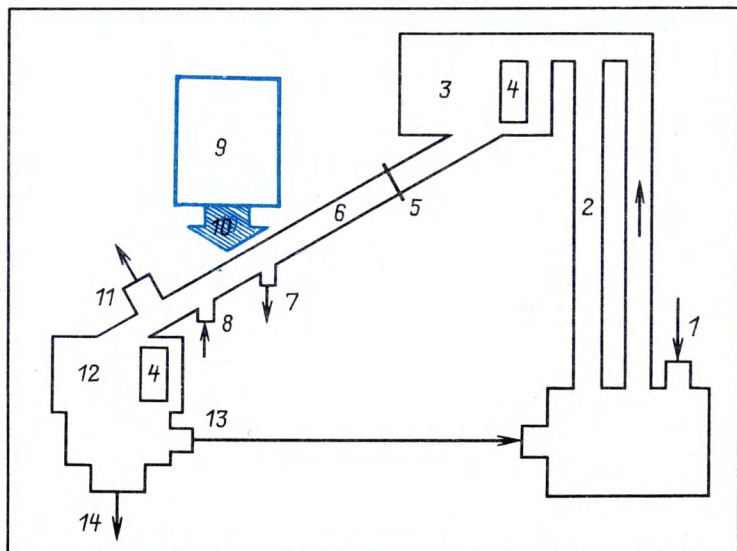


Рис. 16. Технологическая линия дезинсекции зерна с помощью релятивистского электронного пучка:

1 – зерно, поступающее на обработку; 2 – подъемник; 3 – приемный бункер; 4 – датчики уровня зерна; 5 – задвижка; 6 – канал разгонки зерна; 7 – слив воды; 8 – холодная вода; 9 – ускоритель ЭЛВ-2; 10 – релятивистский электронный пучок; 11 – аспирационная камера; 12 – демпфирующий бункер; 13 – зерно, поступающее на рециркуляцию; 14 – обработанное зерно

ствует нагреванию воды всего лишь на 6 градусов – энергетический выигрыш по сравнению с кипячением очевиден.

Быть может, наиболее впечатляющий пример стерилизации с помощью электронных пучков – облучение зерна, хранящегося и поступающего на элеватор. В последнем случае, когда зерно ввозится из другого региона или из другой страны, проблема стоит особенно остро. Ведь при этом существует риск завести издалека новых сельскохозяйственных вредителей, которые в данном регионе отсутствуют.

В 1980 г. на одесском портовом элеваторе начала работать первая в мире опытно-промышленная установка для радиационной дезинсекции зерна (рис. 16). Установка состоит из двух одинаковых технологических линий, которые могут работать вместе или отдельно. Пропускная способность каждой из линий – 200 т зерна в час.

Прямо из корабельного трюма транспортер подает зараженное вредителями зерно на черпаковый подъемник, который доставляет его в приемный бункер вместимостью около 10 м³. В бункере специальное устройство отделяет крупные механические примеси. Вытекающий из бункера поток зерна разгоняется и проходит камеру облучения со скоростью 6 м/с. При этом для зерна обеспечивается доза от 200 до 400 Гр. В качестве источников облучения используются электронные ускорители ЭЛВ-2 с мощностью пучка 20 кВт и энергией электронов 1,4 МэВ.

Пройдя аспирационную камеру, в которой отсасывается пыль и мелкие примеси, поток облученного зерна попадает в дефирующий бункер. А уже оттуда транспортеры отправляют его на элеватор. Для того чтобы необлученное зерно случайно не попало на элеватор, установлена автоматика: при отключении ускорителя поток зерна перекрывается.

Установка смонтирована в башне высотой 26 м. Для радиационной защиты предусмотрены массивные бетонные стены и свинцовые плиты, надежно перекрывающие вторичному тормозному излучению путь наружу. Управляется установка с дистанционного пульта управления, вынесенного в отдельное здание.

Стоимость радиационной стерилизации зерна оказывается вдвое ниже, чем стоимость химической обработки с помощью бромистого метила. Подведены предварительные итоги работы электронных пучков в Одессе; опыт распространяется на другие крупные элеваторы. Экспериментально доказано, что облучение может полностью подавить жизнедеятельность амбарного долгоносика и других вредителей.

Нельзя не упомянуть еще об одном оригинальном методе борьбы с насекомыми-вредителями. Его особенность состоит в том, что ученые не уничтожают, а, наоборот, на первом этапе даже разводят вредителей. Нужно это для того, чтобы, накопив требуемое число особей, подвергнуть их стерилизации и выпустить на волю. Как оказалось, появление таких самцов-мутантов приводит к тому, что уже через три поколения удается уничтожить в данном районе всю популяцию вредителей. Этот способ может быть применен, например, в борьбе с фасольной зерновкой, капустной совкой, яблоневой плодовой.

Радиационная обработка картофеля, лука, различных плодов, ягод и овощей позволяет увеличить сроки их хранения. Этот путь сокращения потерь пищевой продукции уже приме-

няют в крупных масштабах во многих странах. Например, облученная малина сохраняется свежей при комнатной температуре пять суток — в пять раз дольше, чем необлученная. При этом радиационная стерилизация позволяет уничтожить многие виды микроорганизмов, а другие, оставшиеся в живых, некоторое время находятся как бы в шоковом состоянии.

Считается удобным подвергать облучению уже готовые кулинарные изделия — бифштексы и другие мясные блюда с гарнирами. В результате они могут храниться готовыми к употреблению несколько месяцев. После облучения быстрее развариваются и, по мнению многих, становятся вкуснее фасоль, горох, сушеный картофель.

Американские космонавты брали на борт космического корабля хлеб из облученной муки, облученные пирог и ветчину, которые долго сохранялись свежими. Во многих странах, например в Индии, на Филиппинах, применяют облучение скоропортящихся фруктов. В Болгарии, Венгрии, Вельгии, ФРГ, Франции облучают картофель, лук, чеснок, чтобы предотвратить прорастание. Радиационная обработка свежепойманной рыбы на рыболовецких судах ФРГ позволяет увеличить время ее хранения в холодильниках от 15 до 26 (а в ряде случаев и до 30) суток.

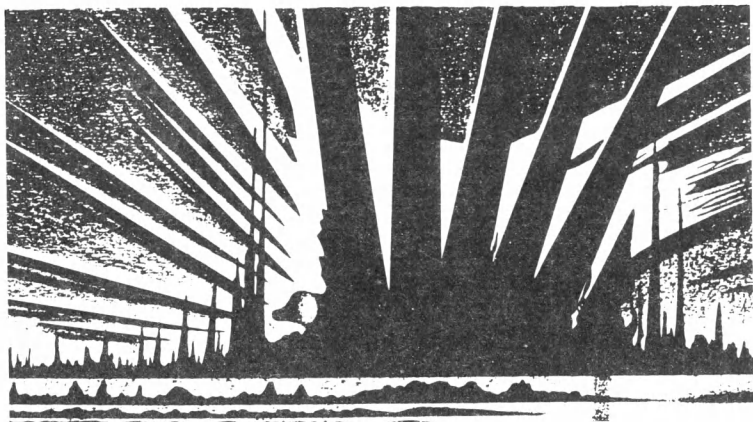
Воздействие электронных пучков и фотонного излучения на промышленные отходы и коммунальные стоки способствует уменьшению загрязнения окружающей среды. Стерилизация навоза и сточных вод на крупных животноводческих фермах позволяет избежать гниения, отравляющего воздух на многие километры. Выдвигаются предложения о способах радиационной стерилизации канализационного ила с целью дальнейшего использования в качестве удобрения и даже кормовой добавки.

Список примеров подобных биотехнологий можно продолжить. Достаточно сказать, что предложены десятки их вариантов и число этих вариантов постоянно растет. Уже сегодня они вышли за пределы научных лабораторий и приобрели большое промышленное значение.

Тем временем продолжают все более тонкие исследования возможных последствий использования радиобиотехнологий. Не секрет, что у многих существует психологический барьер и предубеждение по этому вопросу. Связано это в основном с неосведомленностью. Действительно, дозы, используемые для стерилизации, на несколько порядков выше доз, применяемых, например, в онкологии. Но необходимо учитывать, что в первом случае облучение действует на человека косвенно, а во

втором — прямым образом. Ученые неоднократно экспериментально доказывали и подтверждали, что остаточная радиация от стерилизованных продуктов и материалов практически равна нулю, и это понятно из общетеоретических соображений. Поэтому внимание исследователей сегодня сосредоточено на всесторонней проверке возможных вторичных, химических изменений продуктов, способных привести, например, к химическим мутациям.

Необходимо отметить, что стерилизация пищевых продуктов с помощью облучения не всегда возможна. Иногда продукты приобретают в результате неприятный вкус. Полная стерилизация в разных случаях требует больших или меньших доз. Использование пищевых продуктов, облученных дозой до 1000 Гр, разрешено во многих странах. На применение более высоких доз решаются не всегда, часто ограничиваясь не полной, а частичной стерилизацией.



6

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ В ЦЕХУ

21. ПРОЧНОСТЬ И ПРОЧЕЕ

Эта глава посвящена использованию электронных пучков в народном хозяйстве. Впрочем, о многом уже упоминалось в предыдущих главах, а некоторым интересным и перспективным применениям посвящена и следующая глава.

Воздействие электронных пучков приводит к многообразному изменению физико-химических свойств веществ. Это явление все шире используется человеком. Мощность электронных пучков, применяемых в радиационных технологиях, составляет от 5 до 150 кВт, время облучения обычно не превышает десятых долей секунды. Это обеспечивает требуемые дозы — от сотен до сотен тысяч грэй. Нетрудно убедиться, что в таких условиях, когда плотность потока энергии облучения не превышает сотен ватт на квадратный сантиметр, тепловой нагрев вещества незначителен и радиация приводит только к изменениям на молекулярном уровне.

Необходимо учитывать, что электроны, даже релятивистские, обладают ограниченной проникающей способностью. При этом в подавляющем большинстве органических веществ электроны энергией 1 МэВ способны обеспечить требуемую равномерность облучения (неравномерность примерно 20–30%) для слоя толщиной несколько миллиметров. Для обеспечения большей

однородности в ряде случаев применяют двустороннее облучение — с обеих сторон слоя. Для различных мишеней используют релятивистские пучки с энергией электронов от долей до нескольких единиц мегаэлектрон-вольт. Для облучения очень толстых слоев применяют тормозное излучение, создаваемое при торможении релятивистских электронов на внутренней мишени ускорителя, сделанной из тяжелого металла. Такое излучение при меньшей интенсивности обладает проникающей способностью в 50—100 раз большей, чем электроны. Воздействие радиации на свойства материалов изучает специальная наука — радиационное материаловедение.

Радиационные дефекты изменяют поверхностные и объемные свойства многих материалов. В металлах могут измениться удельное электрическое сопротивление и пластичность, повыситься прочность и хрупкость. Высокую чувствительность к облучению, проявляющуюся в резком изменении электрических и оптических свойств, имеют полупроводники. Воздействие радиации позволяет получать высококачественные сверхпроводники для применения их при сравнительно высоких температурах.

Наиболее известные радиационные технологии основаны на облучении полимеров. Быстрые электроны, сталкиваясь со сложными молекулами, разрывают связи между атомами в цепи молекулы и приводят к образованию новых, поперечных связей между соседними молекулами. Соотношение этих процессов определяется химической структурой вещества и условиями облучения. Во втором случае увеличивается молекулярная масса и образуется более сложная пространственная структура, в первом — уменьшается масса молекулы. В обоих случаях изменяются физические свойства полимера.

Энергетически выгодны цепные реакции, когда в результате одного столкновения быстрого электрона последовательно изменяются многие химические связи. Это имеет место, например, при радиационной полимеризации мономеров.

Одно из первых промышленных приложений электронных пучков связано с производством полиэтилена. Многие практические и прочные полимерные пленки, с которыми мы имеем дело в быту и на работе, — продукт облучения. Качество полиэтилена заметно совершенствуется с каждым годом вот уже много лет. Суть обработки проста. Молекулы полиэтилена представляют собой гигантские цепи углеводородных радикалов. При облучении эти цепи кое-где рвутся, но зато появляются новые связи между соседними цепями. В результате в несколько

раз повышаются прочность и стойкость к растрескиванию, увеличиваются теплостойкость и морозостойкость. Уменьшаются текучесть, растворимость и влагопроницаемость. Каждый, отобрав в хозяйственном шкафу разные полиэтиленовые пакеты, может убедиться в том, насколько разнообразны свойства этого полимера.

Нельзя не упомянуть и еще об одном любопытном свойстве — эффекте "памяти", особенно сильно проявляющемся в облученном полимере. Эффект наблюдается для последовательно нагретого, деформированного и охлажденного вещества. Оказывается, что после такой процедуры полиэтиленовое изделие долгое время "помнит" свою первоначальную форму и при повторном нагревании стремится к ней вернуться. При этом размер изделия может измениться вдвое. Это свойство широко используется для плотной, в ряде случаев герметичной упаковки изделий, например таких громоздких и неудобных, как кабели и трубопроводы.

Обработка кабельных изделий с помощью пучков ускоренных электронов проводится уже сравнительно давно, с 60-х годов. В нашей стране первая промышленная установка введена в строй в 1968 г. во ВНИИ кабельной промышленности. В качестве облучателя применен ускоритель ЭЛТ-1,5 с максимальной энергией электронов 1,5 МэВ и мощностью 25 кВт. Максимальная толщина облучаемой изоляции составляла 2 мм. Доза 100 кГр обеспечивалась при многократном прохождении кабеля вблизи выпускного окна ускорителя. Скорость перемещения составляла порядка 1 м/с, что примерно соответствует скорости изготовления кабеля на конвейере. Прямой нагрев кабеля за проход вызывает допустимое изменение температуры на несколько градусов. Стоимость облучения — примерно 0,5 руб. за 1 кг, что не превышает 10% полной стоимости изделия. Первая установка работала в течение почти 10 лет, в среднем по 3 500 ч в год. С середины 70-х годов в кабельной промышленности применяют ускорители второго поколения — ЭЛВ и ИЛУ-6. Современные системы отличаются высокой эффективностью использования пучка, приближающейся к 100%.

С 1975 г. в НПО "Пластик" налажено производство термоусаживаемой рукавной полиэтиленовой пленки термоплен. При этом использован ускоритель "Электрон-3М" с энергией электронов пучка 0,7 МэВ и мощностью около 7 кВт. Доза облучения составляет 100—200 кГр. Толщина пленки — до 1 мм. Такая пленка широко используется в мире для упаковки охлажденных продуктов под вакуумом.

Каждый знает выражение "тянуть резину", но не каждый понимает, почему она так хорошо тянется. Дело в том, что молекулы этого материала, представляющие собой длинные цепи связанных радикалов, закручены в клубки и переплетены между собой. При растяжении эти клубки долгое время не рвутся, а лишь вытягиваются. Понятно, что облучение позволяет увеличить число поперечных связей между цепочками и в результате повысить прочность, жесткость и теплостойкость резиновых изделий.

Большой интерес вызывают работы по радиационному отверждению покрытий на дереве и металле потоком ускоренных электронов. В процесс входят как полимеризация покрытия, так и сшивание образовавшихся молекул полимеров между собой и с поверхностью. Достоинствами метода являются высокие тепловая, механическая и химическая стойкость покрытия, ускорение и упрощение производственного процесса.

В опытно-промышленных установках, предназначенных для отверждения покрытий на бумаге, дереве, металле, текстиле, с середины 60-х годов используются ускорители с энергией электронов 150–500 кэВ и мощностью пучка 1–10 кВт. Относительно невысокая энергия электронов определяется небольшой толщиной покрытия. Это обеспечивает возможность во многих случаях ограничиться местной радиационной защитой, делает установку более удобной в работе, позволяет снизить размеры системы и стоимость обработки. Уже на одной из первых отечественных установок для радиационного отверждения покрытий, выполненной на базе ускорителя "Электрон-3", достигнута производительность до 10^5 м² в год при общих габаритах установки 4,5 × 7,5 × 7 м. Для отверждения лакокрасочных покрытий на футлярах телевизоров успешно используется ускоритель "Аврора", обеспечивающий производительность до $3 \cdot 10^5$ м² в год. Установка, в которой использованы два ускорителя ЭОЛ, обрабатывает до $9,5 \cdot 10^5$ м² в год лакокрасочных покрытий на щитах мебели. Линии по радиационному отверждению лаковых покрытий установлены на Львовском, Симферопольском телевизионных заводах и на других предприятиях. В США около 10% промышленно производимых лаковых покрытий проходит радиационную обработку.

Обработка хлопчатобумажных тканей пучком электронов позволяет уменьшить их сминаемость и усадку. Ткани из синтетических волокон после дозированного облучения становятся более гигроскопичными, сохраняя при этом высокую

прочность. Большими перспективами обладает способ радиационно-химического повышения прочности тканей, который позволяет, например, "привить" к полшерстяному материалу молекулы полистирола. Облучение позволяет также в ряде случаев придать текстильным изделиям антистатические свойства, повысить химическую, противогнилостную стойкость, снизить загрязняемость.

Установка для радиационной обработки тканей, выполненная на базе ускорителя "Электрон-3М", пущена на Глуховском хлопчатобумажном комбинате им. В.И. Ленина в 1976 г. Ширина облучаемого материала 1 м, скорость движения порядка 1 м/с. При облучении девяти слоев потери энергии пучка, включая потери в фольге ускорителя, составляют всего 35%. В проектируемой на базе ускорителя "Аврора-3" промышленной линии энергия электронов составляет 250—500 кэВ, средняя мощность пучка 50—70 кВт, скорость движения ткани 1 м/с. Подобные системы, широко применяемые у нас в стране и за рубежом, обеспечивают обработку многих миллионов метров тканей в год.

Перечень подобных примеров использования электронных пучков можно было бы и продолжить. Стоит отметить, что экономический эффект от внедрения процессов, о которых рассказано в этом параграфе, оценивается в масштабах страны сотнями миллионов рублей.

В заключение расскажем еще об одном очень красивом и, на первый взгляд, неожиданном эффекте. Речь идет об облагораживании драгоценных камней при облучении. В нашей стране имеются значительные запасы некондиционных или малоценных (по окраске) сортов топаза, агата, нефрита, бирюзы, горного хрусталя, халцедона и др. Облучение, дополненное в ряде случаев отжигом, позволяет изменить и улучшить цвет камней, повысить их стоимость. Таким образом удастся получать цитрин из дымчатого горного хрусталя и аметиста, аквамарин из зеленого берилла, розовый топаз из желтого, розовый сапфир из фиолетового, красный халцедон из серого, синий циркон из красного и коричневого, осветлить густо-зеленые турмалины.

22. ПИСЬМО ПО КАМНЮ

В продолжение темы предыдущего параграфа речь здесь пойдет об электронолитографии. Слово "литография" в переводе с греческого означает "пишу по

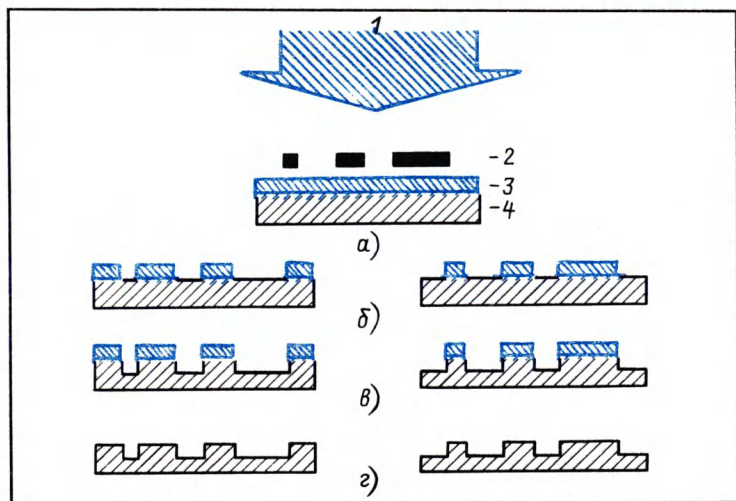


Рис. 17. Принципиальная схема электролитографии (слева – для негативного резиста, справа – для позитивного) :

а – экспонирование; *б* – проявление; *в* – травление; *г* – удаление защитной маски; *1* – электронный пучок; *2* – шаблон; *3* – резист; *4* – пластина

камню''. Говоря об электролитографии, мы имеем в виду создание определенного профиля на твердом веществе с помощью потока ускоренных электронов.

Этот процесс во многом определяет прогресс развития современной электронной техники. Ведь одним из важнейших приемов, обуславливающим этот прогресс, является воспроизведение изображений интегральных микросхем. В настоящее время такие изображения с минимальным разрешимым размером элемента порядка долей микрометра получаются за счет использования природных свойств полимеров реагировать на воздействие облучения.

Принцип электролитографии иллюстрируется рис. 17. В процессе дозированного экспонирования электронный пучок воздействует на полимерный резист, изменяя его растворимость. При этом воздействие происходит только в местах, определяемых шаблоном.

На стадии проявления происходит удаление отдельных участков резиста при обработке его растворителем. При этом различают два типа резистов: негативные и позитивные. Негативный резист характеризуется ухудшением растворимости при

облучении, позитивный — улучшением. Полученная маска при последующих операциях травления основной пластины позволяет предохранить защищаемые участки от воздействия агрессивных сред. После этого защитная маска резиста, выполнившая свою роль, удаляется. Остается рабочая пластина с нанесенным на нее рисунком, повторяющим шаблон.

Облучение полимерного резиста обеспечивает два интересующих нас процесса: во-первых, сшивание полимерных макромолекул, которое приводит к созданию сетки макромолекул, теряющих способность растворяться; во-вторых, деструкцию макромолекул — разрыв молекулярных цепей, приводящий к уменьшению средней молекулярной массы. Эти процессы идут параллельно, но часто один из них заметно преобладает и определяет тип резиста.

По конечному результату воздействия радиации на полимеры их подразделяют на два класса: сшивающиеся и деструктурирующиеся полимеры. К сшивающимся относятся полиакриловые эфиры, полиакриловая кислота, полиакриламид, поливинилалкильные эфиры, поливинилметилкетон, полистирол, полиэфиры, полиамиды, полиэтилен, полипропилен, каучуки. К деструктурирующимся полимерам принадлежат полиметилметакрилат, полиметакриловая кислота, полиметакриламид, поливинилхлорид, политетрафторэтилен, целлюлоза, поливинилметилкетон, полиизобутилен, поли- α -метилстирол.

Такое деление нельзя считать строгим. Многое зависит от условий облучения. Значительную роль играют небольшие добавки, часто вводимые в основное вещество. Один и тот же полимер в одних условиях относится к сшивающимся, а в других — к деструктурирующимся. Такое явление можно понять в рамках теоретических представлений, развитых в начале книги.

Эффективность использования в резисте энергии электронного пучка определяется общим радиационно-химическим выходом G , равным числу созданных или разрушенных связей на 100 эВ вложенной пучком энергии. При этом удобно ввести также понятия радиационно-химического выхода сшивания G_c (числа образовавшихся связей, рассчитанного на энергию пучка 100 эВ) и радиационно-химического выхода деструкции G_d (числа разрушенных связей, рассчитанное на энергию пучка 100 эВ). В результате, например, для негативных резистов общий радиационно-химический выход можно выразить как

$$G = G_c - G_d,$$

причем желательно, чтобы скорость сшивания существенно преобладала над скоростью деструкции и выполнялось условие $G_c \gg G_d$.

Полимеры с более высокой молекулярной массой требуют для своего сшивания меньшего числа поперечных связей и, следовательно, меньших доз облучения и проявляют более высокую чувствительность. Однако они обладают сравнительно небольшой контрастностью. Кроме того, для них характерны дефекты, связанные с наличием низкомолекулярных фракций. В общем, выбор оптимального резиста — дело не простое, и далеко не каждый полимер, даже с подходящим радиационно-химическим выходом может служить резистом.

Для позитивных резистов общий радиационно-химический выход

$$G = G_d - G_c,$$

причем желательно, чтобы скорость деструкции существенно превышала скорость сшивания и выполнялось условие $G_d \gg G_c$. Основные требования к позитивным резистам примерно те же, что и к негативным.

В заключение поговорим о некоторых параметрах электронолитографии. Толщина резиста выбирается обычно равной по порядку величины размеру наименьшего разрешимого элемента и составляет доли микрометра. Требование однородности облучения по толщине предполагает, что средняя длина пробега электронов пучка должна несколько превышать толщину резиста. Отсюда можно оценить характерную энергию быстрых электронов — она составляет 10–30 кэВ.

Плотность заряда, который должен пройти через резист для сшивания или деструкции полимерного слоя на всю исходную толщину, обычно варьируется в пределах $10^{-7} - 10^{-5}$ Кл/см².

Наконец, характерные значения общего радиационно-химического выхода изменяются от десятых долей единицы до значений порядка 10. Учитывая, что общий радиационно-химический выход рассчитывают на 100 эВ энергии электронного пучка, можно вычислить энергетическую цену обрыва или образования молекулярной связи. Она составляет от десятка до сотен электрон-вольт. Такие значения могут быть объяснены (и даже довольно точно в каждом конкретном случае вычислены!) в рамках теории каскада превращений, изложенной в гл. 2.

Поговорим о перспективах развития литографии. В основе сегодняшнего и будущего развития всевозможных средств автоматизации по-прежнему лежит интегральная микросхема.

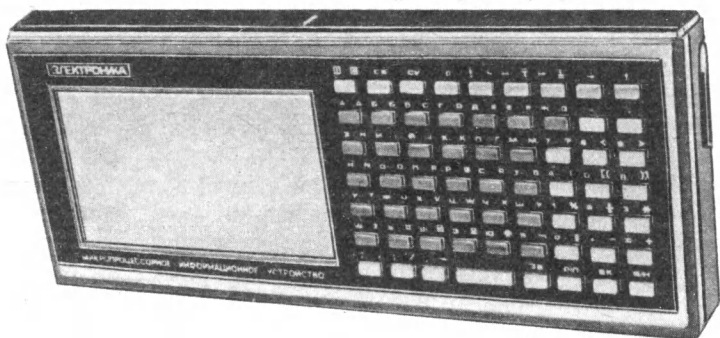


Рис. 18. Портативная информационная персональная ЭВМ

Благодаря миниатюрным размерам этого совместного творения физиков, химиков и математиков становятся возможными разноплановые разработки: от новых поколений ЭВМ и искусственного интеллекта до бытовой электронной техники — калькуляторов, часов, игрушек и даже кроссовок со встроенными микропроцессорами. Современная портативная ЭВМ, свободно помещающаяся в дамской сумочке, обладает такими же параметрами, как просторный вычислительный центр начала 60-х годов (рис. 18).

Возможности совершенствования интегральных микросхем далеко не исчерпаны. На очереди переход от микроэлектроники к нанозлектронике, в которой размер отдельного элемента исчисляется уже не микрометрами, а нанометрами. В более отдаленной перспективе ожидается переход к молекулярной электронике, когда размер элемента станет сравним с размером молекулы. Уже в начале 90-х годов предполагается, что наша промышленность освоит интегральные микросхемы с минимальным размером отдельных деталей 200–500 нм. Число их в микросхеме — кремниевой пластинке площадью несколько квадратных миллиметров — достигнет десятков миллионов и увеличится, таким образом, на несколько порядков. Возможности электроники возрастут еще сильнее, поскольку это приведет не только к количественным, но и к принципиальным, качественным изменениям.

Минимальный размер элемента интегральной микросхемы при традиционной фотолитографии в лучах видимого света составляет 0,5–1 мкм. Такое ограничение вытекает из того, что при этом размер элемента становится сравнимым с длиной волны

используемого света. В результате в соответствии с теорией дифракции изображение перестает быть четким, становится размытым, расфокусированным и уже не обеспечивает должного качества картины.

Поэтому если необходимо получить более мелкое изображение, то фотолитография не подходит. Проблему можно решить использованием излучения с меньшей длиной волны, например рентгеновских, электронных и ионных пучков. Наибольшие успехи в этом плане достигнуты сегодня в электронолитографии. Современные установки обеспечивают диаметр сфокусированного электронного луча 10 нм. Это уже сравнимо с размерами многих молекул. Однако такой луч обладает недостаточно высокой производительностью и требует слишком длительного экспонирования. Поэтому предполагается, что он должен использоваться только для самых мелких деталей, а для более крупных можно параллельно применять рентгенолитографию. В качестве источника интенсивного рентгеновского излучения удобно использовать все тот же электронный пучок, только мощный. Весьма перспективным представляется также применение ионных пучков. Не вызывает сомнений, что мы стоим на пороге бурного развития нанoeлектроники, которая способна коренным образом изменить нашу жизнь.

23. ЭЛЕКТРОННЫЙ ГИПЕРБОЛОИД

Сильноточный электронный пучок уже не первое десятилетие применяют для технологической обработки металлов, в основном сваркой и плавкой. Электронная пушка обеспечивает высокое качество изделий, увеличивает производительность труда, повышает культуру производства.

Возможности электронного луча уникальны. Он пригоден для конструкций из тугоплавких металлов, не поддающихся традиционным методам сварки. Пучок способен обеспечить сварку в ситуации, когда требуемая глубина шва намного больше его ширины. При этом благодаря высокой удельной мощности, обеспечиваемой энергетическим вкладом быстрых электронов, зона прогрева соединяемых деталей невелика. Значит, малы и сопутствующие деформации конструкции.

Электронная сварка наряду с лазерной успешно вытесняет традиционные методы во многих промышленных технологиях. При этом достоинством электронного луча по сравнению с ла-

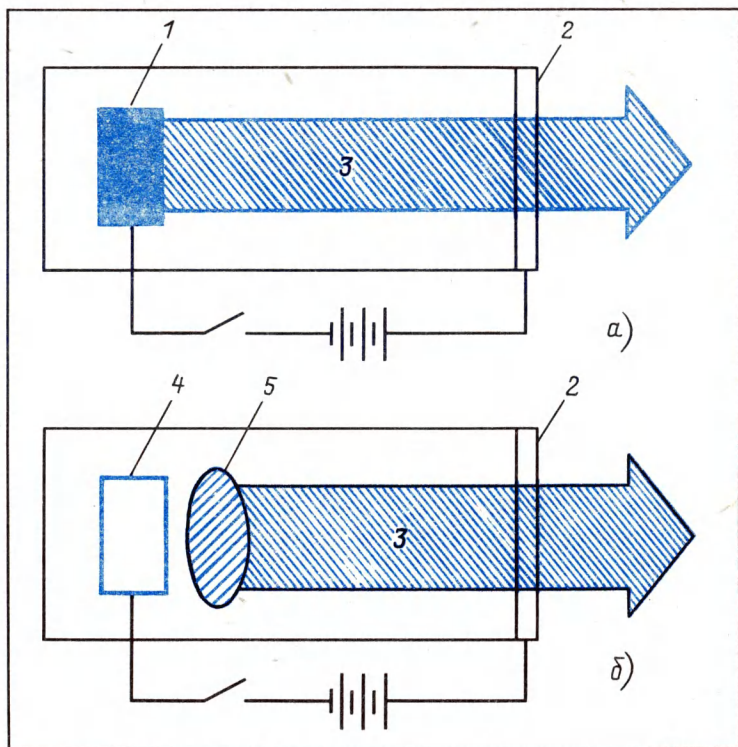


Рис. 19. Электронный ускоритель с горячим (а) и холодным (б) катодами, предназначенный для сварки:

1 – горячий катод; 2 – анод; 3 – электронный пучок; 4 – холодный катод; 5 – плазменный сгусток

зерным является его более высокая энергетическая эффективность. Ведь эффективность электронного ускорителя исчисляется обычно десятками процентов, а не процентами, как у лазера. Выигрыш – на порядок, и он особенно существен для больших промышленных установок мощностью сотни и тысячи киловатт.

Электронным сварочным агрегатом управляет оператор – фокусирует, отклоняет, развертывает луч.

Параметры электронной пушки во многом определяются источником электронов – накаливаемым катодом. Катоды невелики: одни размером с копейку, другие – с пятак. Изготовлены они из тантала и вольфрама, отличающихся своей тугоплавко-

стью. При нагреве до очень высоких температур они светятся подобно ярким звездочкам и в электрическом поле излучают мощные потоки электронов, способные не только расплавить любой металл, но и перевести его в парообразное состояние.

Такой термокатод испытывает очень большие нагрузки и является слабым звеном в промышленных системах. Поэтому иногда предпочитают обходиться вообще без него. В качестве источника электронов при этом используют плазменный сгусток, состоящий из заряженных частиц двух или нескольких видов (рис. 19). Без катода и анода в такой системе по-прежнему, естественно, не обойтись, и располагаются они по разные стороны от плазмы. Но теперь электроды холодные, и поэтому такая промышленная система обладает большей надежностью и долговечностью.

Как правило, для электронной сварки используют пучки с энергией частиц порядка десятков, реже — сотен килоэлектрон-вольт. Увеличение энергии электронов сопряжено с резким падением мощности установки, что далеко не всегда допустимо. Большие перспективы в области скоростного резания и сверления металлов открывают разработки ускорителей с токами до 1 А и напряжением 1—2 МВ. Однако эти разработки сталкиваются с большими трудностями и требуют решения сложнейших инженерных задач.

Пока же мощные промышленные системы характеризуются существенно меньшими напряжениями и, следовательно, меньшими энергиями электронов. Возникающие при работе с этими системами трудности связаны с необходимостью транспортировки электронного пучка в воздухе. Ведь при энергии частиц десятки килоэлектрон-вольт даже небольшой слой атмосферного воздуха является непреодолимой преградой для пучка.

Поэтому часто приходится технологические операции проводить в более или менее глубоком вакууме (давлении порядка 10^{-2} Па), обеспечивающем удовлетворительную транспортировку пучка. Процесс создания вакуума для каждого шва длительный и трудоемкий. В некоторых случаях, особенно когда речь идет о больших и сложных конструкциях, вакуум создать принципиально невозможно. Поэтому идут на всяческие ухищрения.

Например, существует такой способ (рис. 20). В камере, где создается электронный пучок, поддерживается требуемый глубокий вакуум. Для выхода пучка наружу в камере предусмотрено крошечное отверстие. В это отверстие снаружи, естественно, постоянно просачивается воздух. Однако количество его

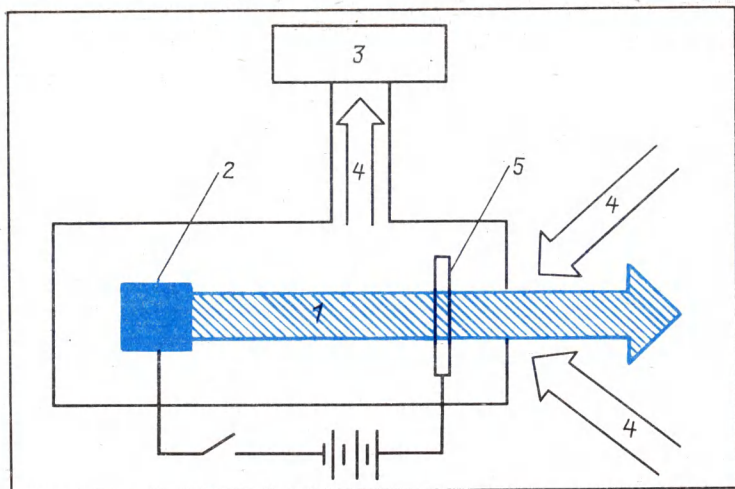


Рис. 20. Вывод низкоэнергетического сильноточного электронного пучка в атмосферу:

1 – электронный пучок; 2 – катод; 3 – вакуумный насос; 4 – воздух; 5 – анод

невелико, и постоянно работающие вакуумные насосы успевают удалять его из камеры. Таким образом, оптимизация размера отверстия позволяет сделать его достаточно большим для выхода в атмосферу электронного пучка и достаточно маленьким для поддержания вакуума в камере.

Эффект самопросветления среды

Можно предложить и другой, очень красивый и несколько экзотический путь решения проблемы. Идея основана на увеличении длины пробега мощного электронного пучка за счет его взаимодействия со средой, в которой он распространяется. В жидкой или твердой среде этому может способствовать ее испарение и возникновение канала (отверстия), в котором обеспечена эффективная транспортировка. В газовой среде также помогают разогрев канала и уменьшение внутри него плотности частиц, тормозящих быстрые электроны.

Рассмотрим для примера транспортировку сильноточного релятивистского электронного пучка в атмосферном воздухе.

Как следует из приведенных выше оценок, для широкого интервала энергий релятивистские электроны теряют в воздухе, взятом при нормальных условиях, энергию порядка 1 МэВ на 1 м пробега. Однако если пучок сильнотоочный, то условия перестают быть нормальными и происходит разогрев канала транспортировки. Такое повышение температуры на один или несколько порядков в условиях, близких к стационарным, происходит при постоянном давлении и приводит к уменьшению концентрации тормозящих частиц в канале. Длину пробега в первом приближении примем обратно пропорциональной концентрации атомов среды (см. гл. 2). Поэтому можно ожидать, что для сильнотоочного электронного пучка по мере прогрева канала (а это произойдет быстро) длина пробега в атмосферном воздухе возрастет тоже на один или несколько порядков. С таким эффектом *самопросветления среды* связывают надежды на возможность транспортировки мощных релятивистских электронных пучков в воздухе на многие километры.

Интересно проследить, как меняется характер взаимодействия электронного пучка с металлом в зависимости от удельной мощности, привносимой пучком на единицу площади поверхности. Если эта удельная мощность невелика и не превосходит 10^3 Вт/см², то происходит простой разогрев металла и теплота от нагреваемой зоны отводится в основном в результате теплопроводности. При большей мощности электронного пучка начинается плавление металла. Если удельная мощность не превышает 10^4 Вт/см², то зона проплавления имеет форму, близкую к полусфере. При достижении удельной мощности $10^5 - 10^6$ Вт/см² имеют место интенсивное парообразование и испарение металла. Наконец, начиная с удельной мощности $10^6 - 10^7$ Вт/см², происходит выброс металла за счет объемного вскипания и других эффектов. При этом начинается так называемое кинжальное проплавление с характерным удлиненным каналом проплавления.

В случае "кинжального" проплавления также имеет место своеобразное самопросветление среды, приводящее к увеличению (в ряде случаев, на несколько порядков) длины пробега мощного электронного пучка в металле. Максимальная глубина проникновения пучка начинает сильно зависеть от удельной мощности, привносимой пучком на единицу площади поверхности металла, и от времени обработки. В зоне проплавления происходит весьма эффективное перемешивание материала, что существенно при технологической обработке неоднородных по толщине образцов.

Мощность пучков в электронно-сварочных установках достигает 100 кВт, в электронно-плавильных — 1 МВт и более. Таким образом, удельная мощность, привносимая на единицу площади поверхности, доходит до 10^7 Вт/см². Мощный, энергичный электронный пучок способен обеспечить очень быструю скорость разрушения металла. Так, для пучка током 5 А и энергией частиц 300 кэВ при удельной мощности в облучаемом пятне $2 \cdot 10^7$ Вт/см² скорость углубления канала разрушения достигает 20 м/с! При этом испарение металла в пятне носит нестационарный, взрывной характер. Следует отметить, что мощный электронный пучок — неплохой инструмент для моделирования экстремальных ситуаций и исследования свойств вещества при очень высоких температурах и давлениях.

Основные промышленные задачи

В народном хозяйстве чаще применяются более умеренные режимы работы. Электронно-лучевая плавка используется помимо получения тугоплавких металлов и сплавов на их основе также для повышения качества специальных сталей и сплавов на основе никеля и железа.

Электронный пучок очень удобен для закалки поверхностного слоя стали. В этом случае обрабатываемый слой на первом этапе импульсно нагревается потоком электронов. Далее происходит быстрое охлаждение за счет теплопроводности в глубь металла. В результате поверхность детали, обычно наиболее подверженная разрушению, приобретает повышенную твердость, а сама деталь даже не успевает деформироваться и нисколько не меняет своего физического состояния. Такая закалка, очевидно, требует минимальных энергетических затрат.

Электронный луч помимо закалки применяется и для осуществления других локальных изменений состояния и свойств материалов при нагреве. Это может быть локальный переплав, изменение кристаллической структуры металла, напыление порошковых покрытий. Например, создание с помощью электронного пучка защитного покрытия на лопатках газовых турбин позволяет увеличить ресурс их работы, повысить температуру рабочего газа, а следовательно, КПД двигателя.

Экономический эффект от использования таких электронно-лучевых технологий исчисляется десятками миллионов рублей.

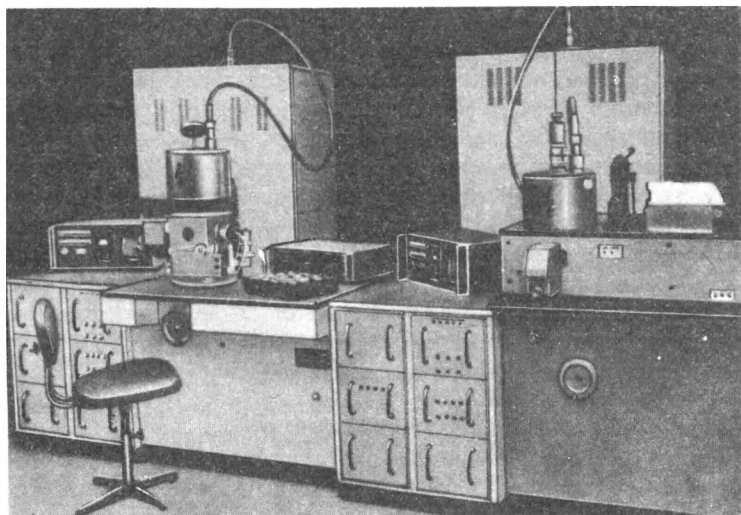


Рис. 21. Комплект автоматизированного оборудования для электронно-лучевой сварки, применяемый в электронной промышленности

Следует особо выделить успешное применение электронно-лучевой сварки в технологии производства изделий электронной техники. Использование нагрева электронным пучком вместо традиционной пайки позволяет получить высокопроизводительную и качественную сварку разнотипных соединений. Локальный одновременный нагрев кромок соединяемых деталей обеспечивает сохранность паяных швов и спаев металла с изолятором, расположенных вблизи места сварки. Кроме того, электронно-лучевая сварка не требует каких-либо припоев (в том числе содержащих драгоценные и дефицитные материалы), защитных сред и значительно сокращает расход электроэнергии.

Комплект автоматизированного оборудования для электронно-лучевой сварки изделий электронной техники, изображенный на рис. 21, обеспечивает производительность 80 сварок в час. Напряжение ускорителя — до 25 кВ, ток разряда — до 2 А. Вакуум в зоне сварки обеспечивается откачкой до давления 2—5 Па. Диаметры свариваемых стыков при сварке дисковым пучком — от 2 до 40 мм, при сварке коническим трубчатым пучком — от 2 до 20 мм. Высокая производительность оборудования достигается за счет автоматизации транспортировки

изделий, кратковременности процесса сварки, а также одновременно процессов откачки камеры, сварки и транспортировки изделий.

Космические применения

Выше говорилось о проблемах электронно-лучевых технологий, связанных со сложностью транспортировки быстрых электронов в атмосферном воздухе. Однако есть важнейшая народнохозяйственная задача, при решении которой этих проблем вообще не существует. Речь идет о космической сварке и других операциях, для которых электронный пучок прямо-таки предназначен природой. Ведь в космосе вакуум не требуется создавать: он там имеется в избытке.

Еще в начале 60-х годов С.П. Королев предвидел неизбежность скорого возникновения нового направления прикладной науки — космической технологии и всемерно поддерживал начавшиеся в те годы исследования по сварке, пайке и резке в космосе. В будущем неизбежно потребуются создание сложных орбитальных станций с многочисленными экипажами, крупными радиотелескопами, отражающими экранами, системами солнечной энергетики. По мере возрастания сроков работы аппаратов увеличивается и необходимость их ремонта, восстановления отдельных элементов в ходе полета. С увеличением массы и габаритов космических станций появляются проблемы сборки и монтажа. Для решения возникающей на наших глазах масштабной задачи и предназначен в качестве инструмента электронный луч.

Советскими учеными, конструкторами и специалистами создан универсальный ручной инструмент, с помощью которого можно осуществлять сварку, резку, пайку и напыление металлов в открытом космосе. Задача была сложной. Ведь необходимо, чтобы инструмент не только надежно работал на орбите, но и чтобы им было удобно пользоваться. Универсальный инструмент действительно получился легкий, компактный. Космонавты с любовью называют его "корзиной": его можно переносить одной рукой. А ведь это сложнейшее устройство. В нем использованы самые последние достижения электроники, ряд оригинальных технических решений. Пришлось преодолеть ряд трудностей, с которыми до этого, пожалуй, никто еще не сталкивался. Например, на Земле нет проблем с отводом теплоты от работающего сварочного агрегата. А в космосе, в условиях вакуума, когда приходится экономить каждый грамм по-

клажи и нет возможности везти с собой громоздкую систему принудительного охлаждения, к проблеме теплоотвода требуется нестандартный подход. Другая сложность — необходимость работы с высоким напряжением порядка 10 кВ, обеспечивающим должные параметры электронного луча. Нужно не только полностью обезопасить космонавта при контакте с высоковольтной аппаратурой, но и предпринять определенные меры радиационной защиты человека от вторичного тормозного излучения. Кроме того, в космосе особо необходимо исключить возможность попадания на скафандр капель расплавленного металла, образующихся при работе.

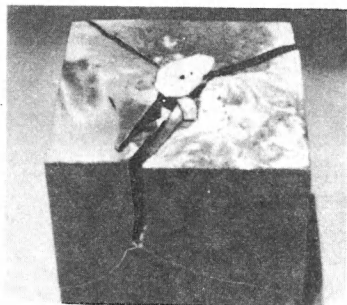
И все же внешне универсальный режущий инструмент прост. Все узлы его находятся в контейнере размером 400 x 450 x x 500 мм, сваренном из трубчатых элементов. К этому контейнеру крепится планшет с образцами материалов для сварки, резки, пайки и напыления покрытий. Масса инструмента составляет немногим более 30 кг, а масса блока, которым оперирует космонавт, 2,5 кг. Потребляемая мощность равна всего лишь примерно 750 Вт, причем мощность можно варьировать в зависимости от режима работы и обрабатываемого материала. Берешь в руки "пистолет", в котором смонтированы две электронные пушки, включаешь на пульте управления нужный режим работы. Действует левый объектив — идет сварка, резка, пайка. Работает правый объектив — можно напылять металл.

Под землей

Теперь, поговорив о космосе, спустимся опять на нашу Землю, а точнее — в глубь Земли. Температура в зоне обработки мощным электронным пучком может достигать многих тысяч градусов. Это позволяет резать и разрушать любые материалы — металлы, кварц, керамику и др. (рис. 22).

Сильноточные пучки электронов могут быть использованы в камнеобрабатывающей промышленности и для проходки тоннелей и шахт. Резка и разрушение горной породы осуществляются в результате ее плавления и испарения. Кроме того, свой вклад вносит и растрескивание породы вследствие температурных деформаций при быстром нагреве и за счет электрических пробоев, наведенных избыточным отрицательным зарядом электронного пучка. Удельная энергия, необходимая для разрушения горных пород, составляет от 100 до 250 Дж/см³, что на порядок меньше, чем при многих обычных методах проходки.

Рис. 22. Кварцит (10 x 10 x 10 см), разрушенный стационарным электронным пучком. Энергия электронов 150 кэВ, мощность пучка 9 кВт, время



К недостаткам метода следует отнести наличие радиации, а также инженерную сложность осуществления проекта.

Тем не менее можно предложить и более смелый проект. Как известно, человек уже непосредственно исследовал космическое пространство, удаленное от нас на многие миллионы километров. А вот то, что у нас под ногами, удалось напрямую увидеть лишь до глубины чуть более 10 км. Этот парадокс по размышлению несложно объяснить: ведь исследование недр планеты проводится путем бурения глубоких шахт, а космос исследуют, проводя аналогию, не с помощью построения "высоких башен", а запуская автономные космические корабли.

Уже не раз высказывалась идея направить в глубь Земли автономное устройство, в принципе похожее на космический корабль или батискаф. Однако на пути создания такого устройства, способного свободно перемещаться внутри Земли, стоят практически непреодолимые трудности. Главная из них заключается в том, что передвигаться внутри скальных пород гораздо тяжелее, чем в вакууме, воздухе или воде. И здесь может помочь мощный электронный пучок, отличающийся уникально высокой скоростью разрушения горных пород и большой энергетической эффективностью. Пока высказываются лишь догадки о том, как будет выглядеть такой "недророход". Можно предполагать, что он будет обладать компактным ядерным двигателем.

24. ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ ПРОСВЕЧИВАЕТ

Неразрушающий контроль

Часто возникает такая проблема. Изготовлено изделие массивное, монолитное, и нужна гарантия его высокого качества. Как убедиться в том, что внутри, в глу-

бине, нет дефекта — трещины, неоднородности? Самый простой способ заглянуть внутрь — распилить изделие пополам и осмотреть срез. Иногда так и поступают, проводя выборочно проверку. Недостаток этого метода очевиден: распилив изделие, мы его разрушаем и делаем непригодным к использованию. Поэтому такой разрушительный контроль качества стараются не применять.

Удобнее так называемые методы неразрушающего контроля. Действительно, покупая в магазине фарфоровый сервиз, мы не требуем, чтобы продавец для контроля качества разбил какой-либо из предметов. Проверка обычно ограничивается тем, что по каждому из предметов сервиза слегка ударяют палочкой и по чистоте издаваемого звука (а дефекты обычно приводят к затуханию собственных колебаний и появлению посторонних шумов) судят о качестве изделия.

Подобный контроль в ряде случаев вполне применим и в промышленности. Часто пользуются не звуком, а ультразвуком, который обладает меньшей длиной волны и позволяет получить более точную информацию. Однако этот метод пригоден далеко не всегда. Например, для поиска дефектов внутри человека его обычно просвечивают рентгеновским излучением, короче, делают рентген. Один из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля основан на использовании электронных пучков. Стоит отметить, что исторически это одно из первых полезных приложений электронных ускорителей. Принцип применения прост. Массивная мишень, облучаемая быстрыми электронами, служит источником тормозного излучения, способного проникать в глубину непрозрачных тел и давать информацию о том, что внутри.

Такой метод используется в промышленности для обнаружения дефектов в литых и сварных (металлических, пластмассовых и других) изделиях: трещин, пустот, вкраплений инородных материалов, а также деформаций недоступных визуальному осмотру элементов сборных конструкций, ошибок при монтаже и т.д. При этом тормозное излучение по-разному ослабляется разнородными участками изделия. Излучение на выходе из образца фиксируется, например, на рентгеновской пленке. Анализ теневой картины, проводимый в ряде случаев с помощью ЭВМ, позволяет определить наличие, размеры и глубину залегания возможного дефекта.

Для неразрушающего контроля применяют в основном линейные высокочастотные ускорители и бетатроны. Эти ускорители успешно заменяют рентгеновские установки, поскольку

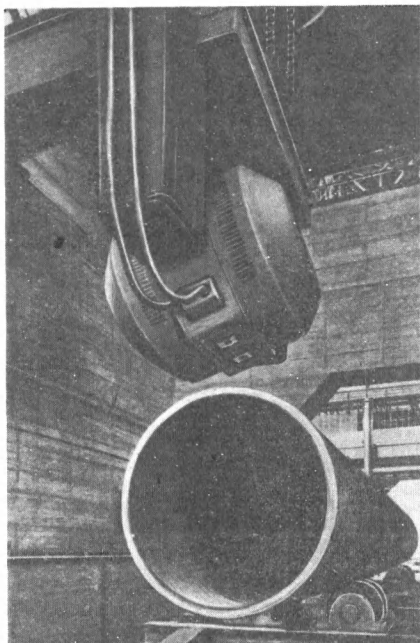


Рис. 23. Дефектоскоп на основе бетатрона фирмы Brown Boveri

обычное рентгеновское излучение обладает ограниченной проникающей способностью и не может просветить насквозь массивные конструкции.

Например, в одной из систем контроля (рис. 23) применяется бетатрон с энергией электронов 31 МэВ. Он позволяет генерировать 100 импульсов в секунду тормозного излучения, обладающего высокой проникающей способностью. На оптимальную толщину проверяемого металла, соответствующую 5 см стали, рассчитана переносная установка, изображенная на рис. 24. В этом случае оказалось достаточно ограничиться ускорительной трубкой с напряжением, регулируемым в пределах от 90 до 300 кВ. Ток пучка от 1 до 5 мА. Высота излучающего устройства 1 м, диаметр 0,4 м, масса 97 кг. Масса пульта управления 29 кг.

На некоторых предприятиях тяжелого и энергетического машиностроения привычным инструментом, смонтированным прямо на подъемном кране, стал линейный ускорительный дефектоскоп. Он создает мощное высокоэнергичное (с энергией

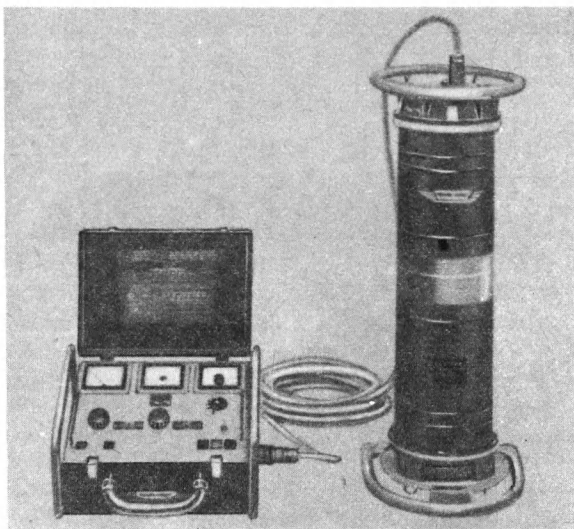


Рис. 24. Переносная установка для дефектоскопии фирмы Andrex

квантов до десятков мегаэлектрон-вольт) тормозное излучение, применяемое для просвечивания толстостенных корпусных конструкций ядерных реакторов, при изготовлении которых абсолютно недопустимы даже небольшие дефекты. При этом выявляются, например, скрытые дефекты сварных швов, недоступные обнаружению другими способами. За считанные минуты проверяется качество заготовки для корпуса реактора со стенкой почти метровой толщины.

Исследование быстропротекающих процессов

Электронные пучки применяются для исследования быстропротекающих процессов, например таких, как взрыв или удар. Решение этой задачи в свое время привело к созданию импульсных релятивистских электронных пучков током сотни и тысячи ампер, широко используемых в настоящее время в народном хозяйстве. Кратковременная вспышка тормозного излучения, рожденная импульсным электронным пучком длительностью порядка 10^{-6} с, способна зарегистрировать процессы, происходящие в эпицентре в любое мгновение развития взрыва.

Проблемы, возникающие при этом, понятны каждому, кто знаком с фотографией. Контуры быстро перемещающегося объекта получаются на фото размытыми, если слишком велика длительность выдержки. Например, если объект движется со скоростью 1 км/с (скорость разлета вещества при не очень мощном взрыве), то для регистрации элементов размером 1 мм требуется выдержка длительностью менее 10^{-6} с. При этом чем меньше выдержка, тем лучше должен быть освещен объект и тем больше должна быть мощность электронного пучка.

Часто требуется получить не один, а ряд последовательных снимков, дающих более полное представление о развитии быстропротекающего процесса во времени. Для этого можно воспользоваться несколькими источниками тормозного излучения, позволяющими снимать каждый последующий кадр с нового положения на новую пленку. Но обычно удобнее другой способ, основанный на возможности работы ускорителя в так называемом частотном режиме. В этом случае ускоритель выдает в строго определенные моменты времени серию коротких импульсов тормозного излучения. В результате на пленке получается несколько смещенных относительно друг друга изображений одного движущегося объекта, каждое из которых соответствует своему моменту времени. Если таких изображений не очень много и регистрируемый объект не слишком сложен, то результирующая картина получается весьма наглядной и легко поддается анализу и обработке.

Как искать золото

Электронные линейные ускорители помогли решить сложную и трудоемкую задачу экспрессного (быстрого) анализа рудных проб на золото и другие редкие металлы. Делается это так. Золотоносная порода проходит по транспортеру мимо источника облучения. При этом она сама становится источником характеристического излучения, анализ которого позволяет судить о содержании золота в породе. В результате удастся обнаружить малые количества драгоценного металла в руде сложного состава. Поскольку анализ производится практически в непрерывном режиме, он характеризуется весьма высокой производительностью труда.

Это очень важный фактор, поскольку наиболее богатые месторождения полезных ископаемых к настоящему времени почти исчерпаны и часто приходится работать с обедненными руда-

ми, которые когда-то зачислялись в категорию отходов. Проблема извлечения малых количеств полезных веществ из породы стоит очень остро.

Можно привести пример с тем же золотом. Нас окружают колоссальные количества этого драгоценного металла, содержащиеся и в твердой породе, и в воде. Даже в ведре подмосковного песка можно найти до трех—пяти чешуек золота размером до 0,1 мм в поперечнике. Вся проблема в том, как их отыскать и извлечь в достаточно больших количествах.

Идея использования вторичных излучений для анализа состава и свойств различных веществ и смесей все шире используется на практике. Например, качество угля на теплоэлектростанциях проверяют непрерывной бомбардировкой нейтронами. При этом по характеру вторичного излучения удастся сделать выводы о содержании в топливе серы, азота, железа, кремния, кальция и некоторых других элементов.

* *

*

Методы, о которых рассказано выше, приобретают особую актуальность и ценность в современных условиях в связи с обострением экологических, сырьевых проблем, необходимостью создания безотходных и малоотходных технологий. И заметную роль в решении этих проблем играют электронно-пучковые технологии.



7

ПОИСК ПРОДОЛЖАЕТСЯ

25. ТРАНСПОРТИРОВКА ЭНЕРГИИ БЕЗ ПРОВОДОВ

Эта глава посвящена возможным перспективным применениям электронных пучков. Результаты этих исследований еще не внедрены в полной мере в народное хозяйство, а некоторые из них представляются пока смелыми гипотезами, способными лишь в будущем заметно повлиять на нашу жизнь.

Одна из таких идей касается транспортировки электроэнергии на большие расстояния. Эта проблема особенно остро стоит в нашей, крупнейшей по размерам державе. В силу специфических условий в одних регионах электроэнергии больше производят, чем расходуют, в других — наоборот. Более того. Энергопотребление по естественным причинам сильно изменяется на протяжении суток: днем оно больше, чем ночью. Существуют и энергетические часы пик, когда на короткое время потребление электроэнергии резко возрастает, а затем не менее резко падает. А в это время на расстоянии всего лишь (с учетом масштабов нашей страны) несколько тысяч километров, в другом часовом поясе, динамика энергопотребления может носить обратный характер. В результате оказываются экономически оправданными перекачка электроэнергии из одного региона в другой, а также обмен энергией между регионами с учетом сиюминутных потребностей.

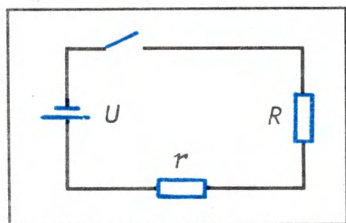


Рис. 25. Электрическая схема передачи электроэнергии по проводам на большие расстояния

Передача энергии по проводам на большие расстояния

Традиционный способ транспортировки электроэнергии — передачи ее по проводам. Однако передаваемые мощности в этом случае по современным масштабам не слишком велики и не превышают нескольких гигаватт. При этом даже если провода сделаны из металла с высокой электрической проводимостью, неизбежны потери энергии. Потери могут быть зарегистрированы даже при транспортировке сравнительно небольшого количества электричества, в квартирной проводке. Что же тогда говорить о линиях электропередач, питающих целые города!

К счастью, ситуация может быть улучшена, если передавать энергию по проводам, находящимся под высоким напряжением. Высоковольтная линия электропередач позволяет для транспортировки требуемой мощности использовать сравнительно небольшой ток. Это означает, что при повышении напряжения удастся снизить потери энергии на разогрев проводов.

Эффект можно оценить с помощью простейшей схемы транспортировки электроэнергии, изображенной на рис. 25. Проблема сводится к тому, чтобы сделать малыми относительные потери ξ мощности на проводах с электрическим сопротивлением r при фиксированной мощности P , выделяющейся на полезной нагрузке с сопротивлением R , за счет увеличения разности потенциалов U удаленного источника электроэнергии и уменьшения тока I в цепи. Как следует из законов Ома и Джоуля—Ленца, при достаточно высокой разности потенциалов и $r \ll R$

$$U = I(R + r) \approx IR, \quad P = I^2(R + r) \approx I^2R.$$

Отсюда можно выразить

$$R \approx U^2/P$$

и

$$\xi = I^2 r / [I^2 (R + r)] \approx r/R \approx rP/U^2.$$

Таким образом, доля потерь энергии и мощности на разогрев проводов убывает (при фиксированных выделяющейся на полезной нагрузке мощности и электрическом сопротивлении проводов) пропорционально квадрату разности потенциалов источника электроэнергии. Этим обусловлена необходимость повышения напряжения на протяженных линиях электропередач до сотен тысяч и даже миллионов вольт.

Однако напряжения в миллионы вольт уже пригодны для транспортировки энергии не только по металлическим проводам. Такие высокие напряжения позволяют создать мощный релятивистский электронный пучок, также пригодный для передачи энергии на расстояние.

Можно ли обойтись без проводов?

Один из вариантов решения проблемы описан в предыдущей главе. В его основе лежит тот факт, что значительная часть энергии, теряемой быстрыми электронами при торможении в среде, в конечном счете идет на тепловой разогрев среды. В результате при распространении ультрарелятивистского электронного пучка в атмосфере происходит сильный разогрев воздуха, приводящий через короткий промежуток времени к падению концентрации молекул в канале распространения. При этом пробег высокоэнергичных электронов, в первом приближении обратно пропорциональный концентрации молекул, может возрасти на несколько порядков. Такой способ пригоден для транспортировки энергии прямо по воздуху на многие километры. Он обладает очевидным достоинством: энергия может передаваться в любом направлении (в том числе и вверх!), причем не требуется создания громоздких и дорогих линий электропередач. Однако потери при этом могут оказаться немалыми.

Для снижения этих потерь предлагаются более сложные системы транспортировки энергии с помощью релятивистских электронных пучков. В таких системах электроны распространяются по специальному электропроводу, в котором вдоль всего пути поддерживается довольно высокий вакуум, а также применяется магнитная стабилизация. Принудительное разрежение в канале транспортировки позволяет еще больше увеличить пробег релятивистского электронного пучка и уменьшить потери энергии, а продольное стабилизирующее магнитное

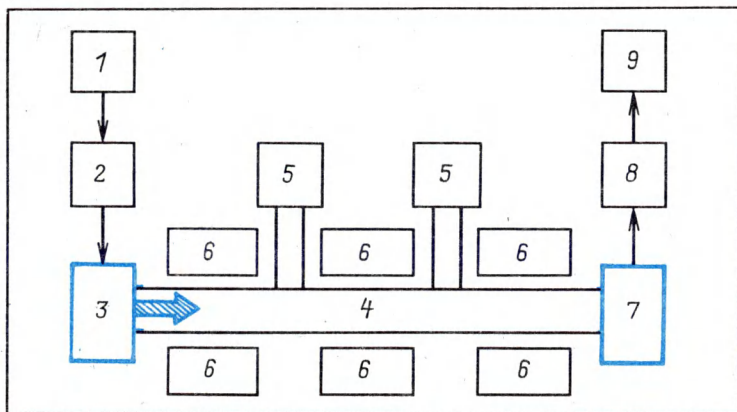


Рис. 26. Линия электропередачи релятивистским электронным пучком:

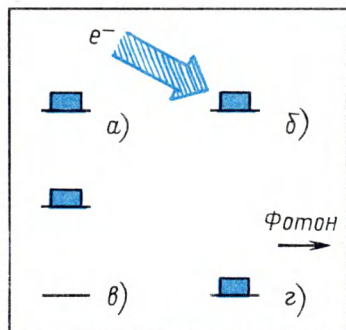
1 – электростанция; 2 – подстанция для повышения напряжения; 3 – электронный ускоритель; 4 – электропровод; 5 – вакуумные насосы; 6 – магниты; 7 – тормозящее устройство; 8 – подстанция для понижения напряжения; 9 – потребитель электроэнергии

поле, способствует тому, чтобы электроны распространялись в нужном направлении, без отклонений в стороны.

В целом система может быть выполнена следующим образом (рис. 26). Электрическая энергия, вырабатываемая на электростанции, поступает на подстанцию, где производится повышение и выпрямление напряжения. Полученное высокое напряжение способно обеспечивать работу электронного ускорителя, генерирующего релятивистский электронный пучок. Транспортировка этого пучка по электропроводу осуществляется при наличии продольного магнитного поля, обеспечиваемого системой магнитов, в условиях сильного разрежения, поддерживаемого системой вакуумных насосов. На выходе электропровода релятивистский электронный пучок в специальном тормозящем устройстве (по своему принципу напоминающем ускоритель наоборот) вновь преобразуется в электрический ток. После приведения параметров этого тока на подстанции к стандартным электрическая энергия подается к потребителю.

К примеру, линия электропередачи электронным пучком с током 10 кА и энергией частиц 10 МэВ способна обеспечить

Рис. 27. Возбуждение атома и спонтанное излучение в двухуровневой модели. Пояснения в тексте



транспортировку колоссальной мощности – порядка 100 ГВт! При этом некоторые специалисты считают, что потери энергии не будут превышать долей процента на 1000 км пути.

Создание подобной линии электропередач электронным пучком – дело непростое и требует решения сложнейших инженерных проблем.

Основные трудности заключаются в поддержании высокого разрежения в многокилометровом электронопроводе и создании надежного и мощного ускорителя электронов на релятивистские энергии. Серьезные проблемы связаны с обеспечением устойчивости распространения электронов в тракте: предотвращением выброса частиц на стенки электропровода и подавлением всех возможных неустойчивостей, приводящих к рассеянию энергии.

Необходимо также создать простые и эффективные устройства для управления мощным релятивистским электронным пучком, научиться его поворачивать и останавливать. Поворот быстрых электронов, как уже отмечалось, проще всего осуществить воздействием на пучок магнитного поля. В качестве затворов, позволяющих открывать и закрывать путь мощным потокам электроэнергии, могут быть использованы электронно-лучевые вентили. Эти вентили в чем-то схожи с электронной лампой радиоприемника, но обладают в миллионы раз большей мощностью.

Пока еще трудно объективно судить о возможностях и перспективах подобной транспортировки энергии с помощью релятивистских электронных пучков. Тем не менее уже сегодня ясно, что в ряде случаев этот метод обладает неоспоримыми достоинствами, позволяющими рассчитывать на его воплощение в жизнь.

Возможности передачи энергии на большие расстояния с помощью релятивистских электронных пучков заинтересовали сегодня широкие круги общественности. Причем, пожалуй, не столько заинтересовали, сколько встревожили, потому что речь идет о проектах создания оружия нового поколения — так называемого оружия направленной энергии (ОНЭ)

Создание оружия направленной энергии — грозная перспектива конца двадцатого века.

Еще в семидесятых годах подобные проекты представлялись полуфантастическими, а сегодня уже закладываются технологические и технические основы ОНЭ, проводятся испытания различных видов этого оружия.

Что же такое ОНЭ и почему ему сегодня уделяется такое внимание и в первую очередь милитаристскими кругами США? Чтобы понять это, стоит сделать небольшой исторический экскурс. В широком смысле к оружию направленной энергии можно было бы причислить почти любой вид оружия. Это и стрела, пущенная дикарем из лука, и легко пробивающая толстую броню кумулятивная противотанковая граната, и способная поразить цель в любой точке планеты современная стратегическая ракета. Однако сегодня даже мощный реактивный снаряд, движущийся с довольно внушительной, вполне космической скоростью порядка 10 км/с, эффективен далеко не всегда.

Действительно, характерное расстояние в 10 тыс. км этот снаряд, имеющий скорость космического корабля, преодолевает за 17 мин. А за такое большое по сегодняшним меркам время другая сторона может предпринять экстренные меры защиты (например, закрыть или сместить уязвимую цель), а может и нанести контрудар.

И в такой ситуации оказалось, что может быть проиницирован новый виток гонки вооружений, если удастся резко поднять скорость транспортировки разрушительной энергии. При этом наибольший эффект достигается, если эта скорость равна или близка к максимальной скорости перемещения материального объекта — скорости света в вакууме. И весьма существенно, что тогда предпочтительнее транспортировать непосредственно носитель разрушительной энергии без традиционной инерционной оболочки. Так и возникла идея современного

оружия направленной энергии, в котором носителем энергии является поток высокоэнергичных излучений, а также заряженных или нейтральных частиц.

В частности, это может быть и релятивистский электронный пучок.

Впрочем, еще в древности в принципе возможно было создание ОНЭ с высокой скоростью транспортировки разрушительной энергии. Достаточно вспомнить легенду об Архимеде, которому удалось поджечь и потопить неприятельский флот, сконцентрировав на деревянных кораблях солнечные зайчики от большого количества зеркал. Согласно преданию для этого во время нападения римского флота на Сиракузы около 214 года до н.э. на берегу выстроилось множество солдат, которые одновременно направляли солнечные зайчики поочередно на каждый из кораблей.

Расчеты показывают, что уже в те времена подобный факт теоретически мог иметь место. И каждый имеет возможность в этом убедиться и сделать количественную оценку, сфокусировав с помощью обыкновенного увеличительного стекла (линзы) солнечный свет на темной (не слишком сильно отражающей) бумаге или древесине. Такой несложный эксперимент демонстрирует, что в солнечный день даже в северных краях фокусировка солнечного излучения приводит к почти мгновенному возгоранию материала.

Интересно, что в 1973 году один греческий инженер повторил опыт Архимеда: 70 плоских зеркал размером примерно $1 \times 1,5$ м точно были направлены на шлюпку, которая находилась в 50 м от берега, она почти немедленно загорелась и вскоре целиком была охвачена пламенем.

Столь экстравагантный способ борьбы с врагом в целом, пожалуй, требует больших усилий, чем традиционные способы. Да и защищаться от солнечных зайчиков все же не так уж и сложно, например с помощью тех же зеркал или хотя бы негорючей отражающей обшивки мишени.

Тем не менее сегодня идея быстродействующего и высокоэффективного оружия направленной энергии, казалось бы, возродилась вследствие технологического рывка, предпринятого человечеством в последние десятилетия. И естественно, в одном из вариантов в основу ОНЭ положены обширные возможности транспортировки релятивистских электронных пучков на большие расстояния. Однако сразу же выявился ряд трудностей самого различного плана.

Создание электронно-пучкового оружия направленной энергии потребовало бы по отношению к существующим ускорительным системам увеличения ускоряющего напряжения — по крайней мере на порядок, длительности импульса — на два порядка, средней мощности — на три порядка. Достижение таких параметров с инженерной точки зрения представляется почти невозможным.

Однако этим проблемы не исчерпываются. Применение пучков заряженных частиц затрудняется тем, что они отклоняются магнитным полем Земли. Хотя поле не так уж и велико, но даже для весьма высокоэнергетических релятивистских электронных пучков траектории отдельных электронов заметно искривляются (например, для электронов с энергией 100 МэВ радиус закругления траектории составляет около 10 км). Таким образом, заведомо не удастся достичь требуемых длин транспортировки до 1 тыс. км. Для преодоления этих трудностей предполагается предварительное использование лазерных пучков, которые позволяют сформировать в воздухе прямолинейный канал для последующей транспортировки электронного пучка. Лазерное излучение частично ионизирует молекулы в канале, и в образовавшейся плазме самопроизвольно формируются токи, обратные току электронного пучка. Такая компенсация приводит к заметному уменьшению суммарного электрического тока в канале и уменьшению его взаимодействия с магнитным полем Земли. Образование плазмы с помощью лазерных пучков способствует также компенсации заряда электронного пучка, весьма значительного в головной части мощного электронного пучка, что способствует рассыпанию и разлету в стороны.

Для каждого конкретного релятивистского электронного пучка существует довольно узкий диапазон высот над поверхностью Земли (обычно несколько сотен километров), на которых возможна достаточно эффективная транспортировка энергии. При больших высотах не удастся создать плазменный канал, поскольку мала концентрация воздуха и соответственно мала его ионизация лазерным лучом.

При меньших высотах пучок быстро рассыпается и тормозится из-за плазменных неустойчивостей, а также из-за обычных столкновений с молекулами воздуха.

Эти и другие трудности ставят под сомнение возможность реализации ОНЭ как на основе релятивистских электронных пучков, так и других видов.

Тем не менее политические деятели и ученые по-прежне-

му активно обсуждают возможные варианты реализации выдвинутой в 1983 г. президентом США стратегической оборонной инициативы, суть которой состоит в создании подобного оружия.

Все же, возвращаясь к легенде о лучах смерти Архимеда, можно отметить, что за прошедшие столетия ситуация мало изменилась, и оружие направленной энергии, почти так же, как и тогда, обладает двумя существенными особенностями. Во-первых, оно очень громоздко в реализации и работе; во-вторых, в каждом конкретном случае возможны весьма эффективные пути защиты.

Но сегодня возникли и новые обстоятельства, связанные с быстрым развитием научно-технического прогресса. Дело в том, что решение столь сложной задачи, как создание ОНЭ, сопряжено с практически непредсказуемыми последствиями и может привести к самым неожиданным результатам. Сегодня уже стало для всех очевидным, что научно-технические новшества сами по себе могут в некоторых случаях представлять опасность для человечества, привести к заметным нарушениям экологического равновесия на планете и даже к глобальным катастрофам и эта опасность значительно возрастает, когда речь идет о военных аспектах таких новшеств.

Таким образом, можно сделать вывод, что идею оружия направленной энергии на основе электронных пучков с учетом научных, инженерных, военных, политических, философских аспектов проблемы едва ли можно признать состоятельной. Тем не менее отдельные экологически грамотные идеи и исследования в области транспортировки энергии на большие расстояния в ближнем космосе с помощью релятивистских электронных пучков, по-видимому, могли бы принести пользу человечеству.

26. ЛАЗЕРЫ НА ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

Электронный пучок — весьма эффективное средство для инициирования лазеров. При этом энергия ускоренных электронов преобразуется в энергию когерентного излучения. Начнем разговор с описания принципа

работы лазера — устройства, генерирующего когерентные электромагнитные волны за счет вынужденного излучения или рассеяния света активной средой.

Двухуровневая модель лазера

В простейшем случае активная среда представляет собой возбужденные с помощью внешнего инициатора атомы (или молекулы). Таким инициатором может быть любое средство возбуждения атомов, например электронный пучок, электрический разряд, вспышка света и даже химическая или ядерная реакция. В обычной, неактивированной среде большая часть атомов находится в невозбужденном, основном состоянии (рис. 27, а). При воздействии инициатора (рис. 27, б) атом может приобрести дополнительную энергию и возбудиться (рис. 27, в). Возбуждение сохраняется в течение некоторого отрезка времени. Далее может произойти обратный процесс — тушение возбуждения. При этом атом самопроизвольно возвращается в основное состояние, а избыточная энергия выделяется в виде кванта света и уносится фотоном (рис. 27, г). Такой процесс называют спонтанным (самопроизвольным) излучением. Это еще не лазер.

Для того чтобы получился лазер, необходимо добиться вынужденного излучения, возникающего не при самопроизвольном тушении возбуждения, а при тушении под действием имеющихся в активной среде фотонов. Такой процесс в соответствии с физическими законами протекает весьма эффективно, причем под действием одного фотона рождается лавина резонансных, абсолютно подобных ему когерентных фотонов. Это и есть настоящий лазерный импульс когерентного излучения. Таким образом, для генерации лазерного излучения необходимо, чтобы в активной среде было много возбужденных атомов и много когерентных фотонов. При этом для дополнительного увеличения числа фотонов на краях активной среды обычно устанавливают зеркала, не позволяющие фотону преждевременно покинуть активную среду.

Условия работы лазера

Рассмотрим подробнее условия, необходимые для развития импульса вынужденного излучения (рис. 28, а–в). Оказывается, что лавина когерентных фотонов

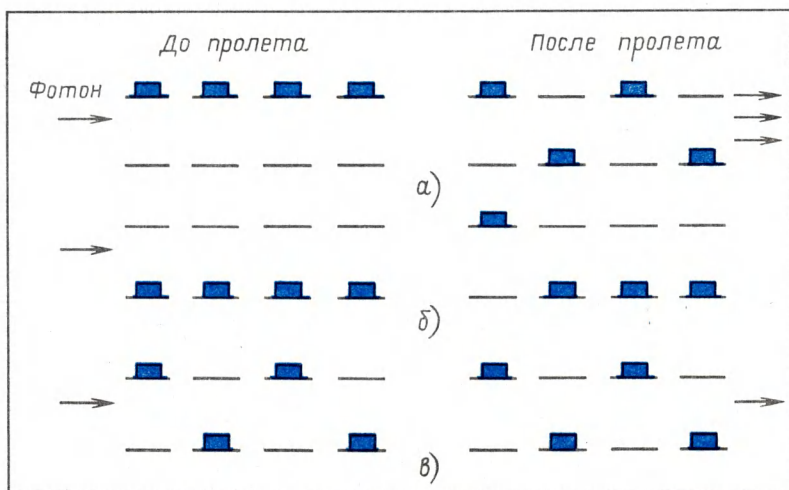


Рис. 28. К возможности вынужденного излучения. Фотон в активной среде (а), в пассивной (б) и в нейтральной (в)

развивается только в том случае, когда число возбужденных атомов превышает число атомов, находящихся в основном состоянии. В противном случае, наоборот, имеет место затухание: возникшие каким-либо путем фотоны поглощаются невозбужденными атомами. В ситуации же, когда числа возбужденных и невозбужденных атомов равны, интенсивность проходящей через среду фотонной лавины не уменьшается и не увеличивается, а остается приблизительно постоянной.

Итак, для работы лазера необходимо, чтобы в активной среде было поменьше атомов в основном состоянии и побольше возбужденных атомов. Такая ситуация достигается с помощью инициатора. Чаще всего это уже упоминавшиеся вспышка света, электрический разряд или электронный пучок. Сравнение способов инициирования показывает, что электронный пучок обладает очевидными преимуществами. Световая вспышка имеет присущие любой лампе недостатки — относительно низкие КПД и интенсивность излучения. Электрический разряд по своим свойствам, очевидно, более близок к электронному пучку. Однако не всегда удастся его зажечь с достаточно хорошей степенью однородности в камере большого объема. В результате оказывается, что электронный пучок, в том числе релятивистский, — это наиболее перспективный, эффективный

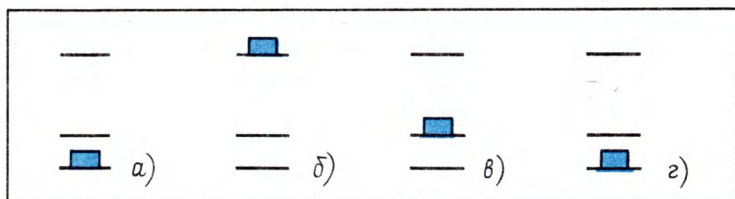


Рис. 29. Трехуровневая модель работы лазера. Пояснения в тексте

и относительно недорогой инициатор многих лазерных систем. Особенно удобен он при иницировании газовых лазеров, в которых активная среда — газ. Рассмотрим их работу.

Выше говорилось о простейшей, так называемой двухуровневой модели (один уровень — основное состояние атома, второй — возбужденное). Двухуровневые лазеры просто описывать, но сложно создавать на практике. Дело в том, что с помощью любого, даже самого мощного инициатора очень трудно перевести больше половины атомов в возбужденное состояние. Кроме того, в соответствии с рис. 30, *а* эффективность такого лазера невелика и даже в идеальном случае не может превышать 50%, поскольку не более половины возбужденных атомов могут излучить фотоны.

Трёхуровневая модель лазера

Самые эффективные лазеры работают по другим, более хитрым схемам, например в соответствии с трехуровневой моделью (рис. 29, *а–г*). При этом задействованы один основной уровень и два возбужденных состояния атома. Принцип работы лазера таков. На первом этапе происходит возбуждение атомов из основного состояния (рис. 29, *а*) с помощью электронного пучка и переход их в верхнее (по энергии) возбужденное состояние (рис. 29, *б*). На втором этапе в процессе генерации вынужденного излучения происходит переход атомов в другое, ниже расположенное возбужденное энергетическое состояние (рис. 29, *в*). Наконец, на третьем этапе за счет специально подобранных дополнительных процессов происходит очистка нижнего возбужденного состояния и возвращение атомов на основной энергетический уровень (рис. 29, *г*). Трёхуровневая модель лазера хороша именно тем, что при ее реализации дополнительно освобождается нижний

уровень генерации, что приводит к повышению эффективности генерации и улучшению других характеристик лазера.

Эксимерные лазеры

Существуют и другие способы очистки нижнего уровня. Речь идет об эксимерных лазерах, генерацию в которых определяют так называемые разлетные молекулы. В этом случае роль электронного пучка более сложна (и ответственна). Он предназначен не только для возбуждения, но и для самого создания активных молекул.

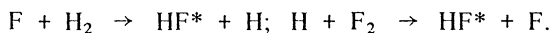
Возьмем, к примеру, разлетную молекулу, состоящую из двух атомов гелия. Известно, что такой молекулы, в общем-то, не существует. Действительно, если сблизить между собой два атома азота (или кислорода), то они притянутся друг к другу и при этом образуется устойчивое соединение — молекула азота (или кислорода). Если же сблизить атомы гелия, то ничего не выйдет — они вскоре разлетятся. Поэтому в природе молекула гелия состоит из одного атома, а искусственно созданная двухатомная молекула потому и называется разлетной. И все же некоторое, довольно значительное время она может существовать, но не в основном состоянии, а в возбужденном, когда атомы, как оказалось, достаточно сильно притягиваются друг к другу.

В активной среде под воздействием электронного пучка имеют место ионизация, возбуждение и другие элементарные процессы. В частности, они приводят и к образованию довольно устойчивой двухатомной возбужденной молекулы гелия. Эта молекула чрезвычайно выгодна для генерации лазерного излучения: ведь, отдав избыточную энергию в виде фотона, она практически мгновенно прекращает свое существование и превращается в два атома гелия. В результате концентрация молекул на нижнем уровне всегда поддерживается на нуле. Это обеспечивает высокую эффективность эксимерных лазеров, инициируемых электронным пучком.

Химические лазеры

Еще более своеобразную роль играют электронные пучки в химических лазерах. Их назначение в этом случае — не прямое возбуждение молекул, а инициирование химической реакции, в которой рождаются возбужденные

молекулы. Рассмотрим работу фторводородного лазера, о котором уже говорилось в § 9 и 16 и схема которого может быть такой, как представлено на рис. 13. Рабочая среда этого лазера состоит из смеси молекулярного фтора, молекулярного водорода и некоторых других газов. Такая смесь взрывоопасна и содержит в себе немалую химическую энергию. Взрыв идет по цепному механизму, и энергия выделяется в основном за счет протекания двух химических реакций:



В обеих реакциях рождаются возбужденные молекулы фтористого водорода. При этом получаются десятки и даже сотни различных возбужденных уровней, с которых возможна лазерная генерация.

Такое обилие уровней в молекулярных лазерах объясняется тем, что они соответствуют колебательному и вращательному возбуждениям молекул. По сути, каждое такое состояние отвечает своему, строго определенному сочетанию интенсивностей колебаний атомов молекулы и вращения молекулы как целого. В соответствии с законами квантовой механики число допустимых интенсивностей как колебаний, так и вращений обычно превышает десяток. Таким образом, результирующее число колебательно-вращательных возбужденных состояний молекулы, которое дается сочетанием всех возможных вариантов, существенно превосходит сотню. Среди огромного количества возбужденных состояний очень часто есть такие, из которых возможен переход с излучением фотона в менее населенное состояние. В результате создаются условия для вынужденного излучения и лазерной генерации ряда различных фотонов разной энергии.

Итак, источником энергии химического лазера является не электронный пучок, а химическая реакция. Возникает вопрос: нельзя ли тогда вообще обойтись без электронного пучка, тем более что, как уже говорилось, рабочая смесь может взорваться и прореагировать сама по себе, без всякого инициатора? Вопрос это не праздный, и его задают себе многие исследователи. Тем не менее в мощном химическом лазере без инициирования обойтись пока не удастся.

Действительно, смесь, взрывающаяся сама по себе, мало пригодна для генерации лазерного излучения. Ведь возможность самопроизвольного взрыва возникает обычно в какой-то небольшой области рабочей смеси, где по какой-либо причине об-

разовалось сравнительно много активных атомов фтора или водорода и пошла цепная реакция. Только после этого взрывная волна идет по рабочей смеси, захватывая новые области. Так что самопроизвольный взрыв по своей сути неоднороден. В одной области он может уже кончиться, а в другой — еще не начаться. Это создает трудности для генерации вынужденного излучения, которая требует одновременного рождения большого числа фотонов и возбужденных молекул по всей рабочей смеси для образования достаточно мощной когерентной световой волны.

Вот тут-то и нужен электронный пучок, способный обеспечить равномерное и одновременное образование атомов фтора (подробнее об этом говорится в § 9). Если этот пучок мощный, то сразу возникает много активных атомов, в цепных реакциях быстро рождается большое число возбужденных молекул фтористого водорода и получается мощный импульс когерентного излучения. Например, импульсный релятивистский электронный пучок энергией 1 кДж, инициирующий химическую реакцию в 10 л взятой при атмосферном давлении рабочей смеси, обеспечивает световую энергию также порядка 1 кДж. Это немало, особенно если учесть, что взрыв происходит быстро и энергия выделяется за очень короткое время (порядка 10 нс).

Лазеры на свободных электронах

До сих пор говорилось о лазерах, в которых электронный пучок приводил рабочую среду в активное, пригодное для генерации излучения состояние. Однако и сам электронный пучок вполне способен служить такой активной средой. Это не удивительно, если вспомнить, что поток замедляющихся электронов — сам по себе неплохой источник тормозного излучения.

Для лазера на свободных электронах используют релятивистский электронный пучок, который при создании подходящих условий способен отдавать заметную часть своей энергии когерентной электромагнитной волне тормозного излучения, распространяющейся по ходу пучка. При этом для придания необходимого ускорения быстрым электронам систему помещают во внешнее электрическое, магнитное или электромагнитное поле, так чтобы на поступательное движение вперед наложилось колебание частиц в поле. По сути дела, в процессе лазерной ге-

нерации сгустки колеблющихся электронов рожают электромагнитные колебания, резонансные по отношению к когерентному излучению лазера и способствующие его лавинообразному нарастанию.

Существует несколько разновидностей лазера на свободных электронах, различающихся, в первую очередь, способом ускорения электронов пучка. Возможности их исследуются в настоящее время как теоретически, так и в экспериментах, проводимых на ускорителях. Достоинством лазеров на свободных электронах является то, что они в отличие от большинства других лазерных систем не привязаны к конкретным возбужденным состояниям атомов и молекул и поэтому допускают возможность плавной перестройки частоты излучения в широких пределах.

В этом параграфе рассказано лишь о нескольких типах лазеров на электронных пучках. Тем не менее из рассмотренных примеров видно, насколько разнообразна связь между электронными пучками и лазерами и как много существует способов преобразования энергии быстрых электронов в энергию когерентного электромагнитного излучения. Одни лазерные системы уже продемонстрировали свои возможности, другие, особо эффективные и перспективные, еще только создаются в научных лабораториях.

27. НА ПУТИ К ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Одна из наиболее важных и сложных научно-технических проблем современности — управляемый термоядерный синтез. Решение ее сулит человечеству, которое сегодня находится на довольно скудном энергетическом пайке, практически неисчерпаемый источник энергии. Действительно, к примеру, работа электростанции мощностью 1 ГВт требует ежедневно либо 750 т угля, либо 400 т нефти, либо 250 г урана, либо (всего!) 34 г изотопа водорода. При этом термоядерный реактор безопаснее ядерного, особенно в том, что касается радиоактивных отходов. Его можно считать экологически более чистым. Каждый из нас имеет возможность и днем, и ночью наблюдать за протеканием термоядерных реакций. Ведь, как предполагают, именно реакции такого рода являются источником энергии звезд, в том числе световой. Внутри нашего Солнца при температуре десятки миллионов градусов из ядер

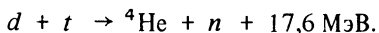
водорода рождаются ядра гелия. Что касается солнечных термоядерных реакций, то мы имеем возможность не только наблюдать их результаты, но и пользоваться выделившейся при их протекании энергией. Ведь основные источники энергии на нашей планете в конечном счете берут свое начало на Солнце.

Вот уже несколько десятилетий ученые исследуют возможность укрощения термоядерных процессов с целью прямого использования огромной выделяющейся энергии на благо человечества. Задача весьма привлекательна в свете того, что на планете имеются гигантские количества необходимых для термоядерного синтеза изотопов водорода. Усилия особо активизировались в 50-е и 70-е годы. Сначала это было связано с тем, что удалось создать водородную бомбу. Процессы, протекающие при ее взрыве, можно назвать неуправляемым термоядерным синтезом, поскольку выделяющуюся энергию почти невозможно в должной мере использовать. Тогда, в 50-е годы, ошибочно считалось, что проблема в основном решена и остались лишь незначительные инженерные трудности. Интерес к получению термоядерной энергии оживился, когда возник серьезный энергетический кризис в 70-х годах.

Что же это за проблема, над решением которой бьются многие лучшие умы нашего времени, которая требует колоссальных денежных вложений, сравнимых с годовым доходом всего человечества, и которая привела к созданию новой науки — физики плазмы? Итак, сначала о том, что такое управляемый термоядерный синтез и что нужно для его осуществления.

Управляемый термоядерный синтез — это процесс слияния легких атомных ядер, проходящий с выделением энергии при высоких температурах в регулируемых, управляемых условиях. Известен ряд термоядерных реакций, протекающих в звездах и в принципе пригодных для осуществления в контролируемом варианте. Однако необходимо учитывать, что каждая ядерная реакция, так же как и химическая, для эффективного протекания требует создания предварительных условий. Выполнить эти условия очень непросто, и именно в этом вся сложность проблемы.

Ученые считают наиболее пригодной для управляемого термоядерного синтеза реакцию между изотопами водорода — дейтерием, ядро атома d которого состоит из протона и нейтрона, и тритием, ядро атома t которого состоит из протона и двух нейтронов:



В результате этой реакции рождается ядро атома гелия ${}^4\text{He}$, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, и свободный нейтрон n . Кроме того, в каждом элементарном акте выделяется немалая энергия — 17,6 МэВ. (Для сравнения отметим, что в химических реакциях — даже столь экзотермических, как рассмотренные в предыдущем параграфе реакции взрыва водорода со фтором, выделяется энергия порядка 1 эВ, т.е. на семь (!) порядков меньше.)

Такой высокий энергетический эффект связан с тем, что масса реагентов несколько превосходит массу получающихся в результате реакции продуктов. Исчезнувшая масса не так уж мала и равна массе примерно 30 электронов. Исчезает она, естественно, небесследно, а как раз превращается в энергию.

Термоядерные реакции являются пороговыми. Это означает, что взаимодействие дейтерия и трития наступает лишь при высокой энергии реагентов. Действительно, например, при комнатной температуре слияния этих ядер не происходит, поскольку они оба имеют положительный заряд и сильно отталкиваются друг от друга. Слияние наступает лишь в том случае, когда их удастся в достаточной мере сблизить. Этого можно добиться, разогнав одно из ядер до большой энергии и ударив им по другому. Для того чтобы пороговая реакция в термоядерной мишени протекала интенсивно, необходимо разогреть смесь реагентов до 100 млн. градусов. Это очень высокая температура. В повседневной жизни люди сталкиваются с температурой лишь порядка 1 тыс. градусов. Например, такова температура вольфрамового светящегося волоска в электрической лампочке. При дальнейшем нагревании любое, даже самое тугоплавкое вещество плавится, превращается в газ, а при температуре 10 тыс. градусов — в плазму, состоящую из электронов и ионов.

Правда, можно провести и другое сравнение. Нетрудно подсчитать, что средняя энергия частиц при температуре 100 млн. градусов составляет 10 кэВ — довольно скромное значение по сравнению с энергиями частиц, рождающихся в ускорителях. Поэтому уже одно такое сопоставление наводит на мысль о целесообразности применения электронных и ионных пучков для разогрева термоядерной мишени. Так и поступают в самых различных схемах управляемого термоядерного синтеза.

Однако нагреть дейтериево-тритиевую смесь до 100 млн. градусов — это еще полдела. Ведь при такой высокой температуре смесь мгновенно превратится в сгусток разлетающейся плазмы, и тех мгновений, пока сгусток существует как единое целое, может не хватить даже для компенсации выделившейся тер-

моядерной энергией затрат на первоначальный разогрев мишени. Поэтому естественным образом возникает еще одно условие: необходимо удержать нагретую термоядерную мишень в плотном состоянии в течение достаточно продолжительного отрезка времени. Математически это условие может быть выражено с помощью критерия Лоусона:

$$N\tau \geq 10^{14},$$

где N — число частиц в 1 см^3 термоядерной плазмы; τ — время удержания плазмы, с.

Как же удержать от разлета вещество, нагретое до 100 млн. градусов? Никакие особо прочные стенки здесь не помогут, поскольку, как говорилось выше, они испарятся уже при нескольких тысячах градусов. В таких условиях возможна практически единственная преграда для плазмы, благо что эта плазма состоит из заряженных частиц. Преграда та же, что позволяет поворачивать и даже останавливать пучки заряженных частиц, — магнитное поле. Действительно, как показано выше, в достаточно мощном магнитном поле заряженная частица как бы прилипает к силовой линии и становится способной перемещаться в пространстве только вдоль этой линии, не отклоняясь в стороны. А для того чтобы не было утечки частиц на концах силовых линий, нужно создавать магнитное поле с замкнутыми внутри рабочей камеры силовыми линиями.

Эта идея успешно воплощается в экспериментальных системах, называемых токамаками (рис. 30). Такая система выполняется в виде тороида (по-простому — бублика), внутри которого в магнитном поле, созданном с помощью намотанных вокруг тороида катушек, циркулирует высокотемпературная плазма. Загадочное, на первый взгляд, название "токамак" расшифровывается просто, через сокращения ключевых слов: тороидальная камера, магнитные катушки. Пока на токамаках идут предварительные научные исследования, но ученые полагают, что в будущем удастся создать большие токамаки, пригодные для промышленного управляемого термоядерного синтеза. При этом будет достигнута температура плазмы 100 млн. градусов. Концентрация частиц предполагается порядка 10^{14} см^{-3} , время удержания — порядка 1 с.

Есть и другая идея осуществления управляемого термоядерного синтеза, которая не требует создания мощных полей, да и вообще упрощает проблему удержания плазмы. Собственно, именно эта идея лежит в основе водородной бомбы. Термо-

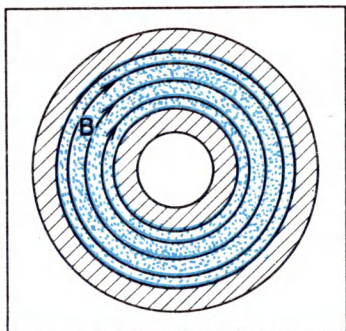


Рис. 30. Схема токамака. Штриховкой обозначены стенки токамака, между которыми заключена термоядерная плазма

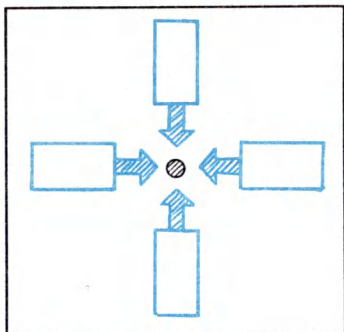


Рис. 31. Система для поджига сферической термоядерной дейтериево-тритиевой мишени с помощью нескольких сильноточных электронных ускорителей

ядерная мишень разогревается до требуемой температуры за счет предварительного ядерного взрыва, например уранового запала. Далее вся смесь, естественно, быстро разлетается в стороны. Быстро, но не мгновенно. За те миллионные доли секунды, когда вследствие инерции термоядерная смесь еще не успела разлететься, благодаря высокой плотности достигается условие выполнения критерия Лоусона и происходит самая настоящая термоядерная реакция. Такая реакция не получается управляемой из-за катастрофических разрушений, сопутствующих взрыву водородной бомбы. Тем не менее сама идея инерциального удержания плазмы вполне жизнеспособна.

Работа термоядерного реактора с инерциальным удержанием предполагает серию последовательных термоядерных взрывов пониженной мощности, энергия которых доступна для практического использования. Размеры мишени при этом, естественно, должны быть меньше, чем в водородной бомбе. Вместо разрушительного уранового запала необходимо использовать другой метод поджига. Такой поджиг возможен с помощью сильноточных релятивистских электронных пучков или мощных лазеров.

В системах с иницированием релятивистскими электронными пучками предполагается использовать сферические дейтериево-тритиевые мишени с начальным диаметром несколько миллиметров и энерговыделением $10^8 - 10^{10}$ Дж. При этом энергия электронных пучков должна составлять 1–10 МДж, мощность $10^{14} - 10^{15}$ Вт, длительность импульса — 10–100 нс,

энергия самих электронов — 1–5 МэВ. Для повышения суммарной мощности инициирования и увеличения однородности поджига мишени считается целесообразным одновременное применение не одного, а нескольких и даже нескольких десятков электронных ускорителей (рис. 31). Для достижения средней мощности 1 ГВт при энерговыделении 1 ГДж на импульс термоядерный реактор должен работать с частотой 1 Гц и каждую секунду выдерживать новый термоядерный взрыв. При этом требуется преодолеть ряд инженерных трудностей.

Необходимо отметить, что число прорабатываемых во всем мире проектов решения проблемы управляемого термоядерного синтеза велико. Стоит упомянуть, например, о программах использования для поджига мишени интенсивных ионных пучков, а также все тех же химических фторводородных лазеров с иницированием релятивистским электронным пучком. На современном этапе еще не понятно, какой из проектов будет реализован первым и какой окажется наиболее жизнеспособным и экономически выгодным. Практически все существующие сегодня программы требуют проведения значительного объема научно-технических исследований и рассчитаны на длительную перспективу. Человечество последовательно продвигается к намеченной цели — созданию термоядерной энергетики.

28. ПЛАЗМА ПЛЮС ХИМИЯ

Плазма — четвертое состояние вещества. Пока ее свойства исследованы не так хорошо, как свойства первых трех состояний — твердого, жидкого и газообразного. А ведь значительная часть материи во Вселенной, в том числе наше Солнце, представляет собой именно плазму. Плазма (в отличие от газа, состоящего из электрически нейтральных атомов и молекул) характеризуется наличием большого числа заряженных частиц — ионов и электронов.

Плазму можно создать нагревом вещества до высокой температуры, несколько тысяч градусов и выше. При этом атомы и молекулы приобретают высокую кинетическую энергию, такую, что при столкновениях между собой рождают ионы и свободные электроны. Однако есть и другой способ, не требующий нагрева всех атомов и молекул. Ведь заряженные частицы с высокой степенью эффективности рождаются в неравновесных условиях, например при воздействии электронного пучка или электрического разряда. Преимущества этого способа очевидны. Ионизация быстрыми электронами экономична

и сопровождается лишь небольшим разогревом среды. Таким образом, энергетический выигрыш налицо.

Плазма – активное состояние вещества. При этом очень важно, что активизируются и химические свойства. В плазменном состоянии возрастают скорость и эффективность многих процессов, замедленных в обычных условиях. Более того, в плазме может протекать ряд химических реакций, которые попросту невозможны для других состояний вещества. Все это представляется весьма важным и актуальным.

Действительно, научно-техническая революция, которая привела к бурному прогрессу, например, электроники и вычислительной техники, лишь в относительно малой степени затронула химические производства ряда важнейших продуктов. Технологии, применяемые в настоящее время в химии, металлургии, отчасти в энергетике, сформировались многие десятилетия назад, а в ряде случаев – даже в прошлое столетие. Традиционные подходы себя практически исчерпали.

Основным признаком устоявшихся химических технологий можно считать то, что они осуществляются в относительно равновесных условиях. При этом температуры всех компонентов реагирующей смеси одинаковы и исчисляются сотнями (реже – тысячами) градусов. В такой смеси упругие соударения преобладают над неупругими и поэтому сравнительно мало возбужденных и ионизованных атомов и молекул.

Принципиальным качеством многих перспективных новых технологий является то, что они осуществляются в условиях полного или частичного отсутствия равновесия. При этом протекающие процессы носят настолько нестационарный характер, что часто теряет смысл даже само понятие температуры вещества. В такой ситуации система характеризуется средней энергией компонентов, измеряемой в электрон-вольтах. (Стоит напомнить, что 1 эВ соответствует 11 600 К, и обычная комнатная температура соответствует 1/30 эВ.) В системе, в которой температура рабочей смеси как целого равна комнатной или лишь немного превышает ее, могут иметься активные составляющие со средней энергией (и эффективной температурой) около 1 эВ. Более того, для одного сорта молекул средняя энергия колебаний может на несколько порядков превышать среднюю вращательную энергию, которая, в свою очередь, может существенно превосходить среднюю энергию поступательного движения (поступательную энергию). Бывают и другие ситуации. В условиях сильной неравновесности обычно велика роль неупругих соударений частиц.

В результате образуется довольно большое число возбужденных и ионизованных молекул.

Все это обеспечивает ряд очевидных достоинств неравновесных систем, способных ускорить ход химических процессов и уменьшить при этом энергетические затраты. К числу перспективных с этой точки зрения процессов можно отнести синтез азотных соединений, получение энергоносителей, восстановление металлов из их оксидов и галогенидов и др. В каждом конкретном случае выигрыш проявляется по-своему.

Возьмем, к примеру, одну из важных химических задач. Многие полезные реакции являются обратимыми и могут идти как в прямом, так и в обратном направлении. На какие только ухищрения не идут, чтобы сдвинуть равновесие в нужную сторону, ускорить ход прямой реакции и подавить протекание обратного процесса. Вот тут-то и может помочь неравновесная система. Принцип воздействия несложен. Дело в том, что, как считают, поступательная энергия реагентов особенно эффективна для ускорения экзоэргических реакций, а колебательная — эндоэргических. (Экзоэргической называют реакцию, проходящую с выделением энергии, эндоэргической — проходящую с поглощением энергии.) Если прямая реакция экзоэргична, то обратная, очевидно, эндоэргична, и наоборот. Поэтому для смещения равновесия в сторону протекания экзоэргической реакции необходимо по возможности увеличить поступательную и уменьшить колебательную энергию реагентов. В свою очередь, для смещения равновесия в обратную сторону следует увеличить колебательную и уменьшить поступательную энергию реагентов. Выполнить требуемые условия можно с помощью варьирования параметров инициирования и изменения состава рабочей смеси.

Рассмотрим подробнее систему, в которой сильная неравновесность создается за счет воздействия электронного пучка. Развитие ионизационного каскада приводит к возникновению самых разных возбужденных и ионизованных молекул. При этом значительная часть энергии пучка тратится на ионизацию, электронное и колебательно-вращательное возбуждение. Средняя энергия электронов в процессе развития каскада составляет несколько электрон-вольт, причем имеется довольно много и более быстрых электронов с энергиями вплоть до сравнимых с начальной. Существенно, что могут быть созданы такие условия, когда в системе заметно увеличивается колебательная энергия молекул при почти неизменной поступательной энергии.

Большой интерес плазмохимиков вызывают несамостоятельные разряды, поддерживаемые электронными пучками. В таких

системах в ряде случаев удается соединить достоинства разряда и пучка. Первый обеспечивает высокую эффективность энергетического вклада в плазмохимические процессы, второй позволяет зажечь однородный разряд в условиях повышенного давления (в несколько раз превышающего атмосферное). Предполагается, что в разрядах такого типа можно осуществлять диссоциацию углекислого газа, синтез оксидов азота, цианистого водорода, нитридов фосфора и другие процессы.

Одно из современных направлений плазмохимии основано на применении плазменно-пучкового разряда. Такой разряд поддерживается мощным пучком электронов, инжектируемым в газ, причем параметры системы подбираются такими, что пучок взаимодействует с образованной им самой плазмой, раскачивая в ней колебания и создавая неустойчивости. Такое взаимодействие приводит к дополнительной ионизации и возбуждению нейтральных частиц и стимулирует химические превращения. В плазменно-пучковом разряде достигается довольно высокая энергетическая эффективность, например, диссоциации углекислого газа и синтеза оксидов азота.

Предложен и ряд других перспективных плазмохимических систем на основе электронных пучков. Теоретические модели, предназначенные для их описания, крайне сложны и в ряде случаев включают в себя сотни процессов, протекающих с участием десятков частиц различного типа. Проводимые для обоснования и отработки технологических схем эксперименты дают в ряде случаев противоречивые результаты и требуют многократной перепроверки для разных условий. Тем не менее большие потенциальные возможности плазмохимии неоспоримы и позволяют рассчитывать на создание в ближайшем будущем новых высокоэффективных плазмохимических технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одна из задач этой книги состоит в том, чтобы сориентировать читателя в сегодняшних применениях электронных пучков и показать, насколько большую роль играют потоки быстрых электронов в нашей жизни. Пучок электронов — эффективное и, по сути, простое средство для решения многих научных и инженерных задач.

Для того чтобы понять, на чем основано использование электронных пучков, необходимо разобраться в физике их взаимодействия с различными средами. Быстрые электроны ионизуют атомы и молекулы среды, теряя при этом энергию и хаотически меняя направление своего движения. Происходят и многие другие процессы, например могут излучаться фотоны высокой энергии. Торможение быстрых электронов приводит к каскадным процессам, в ходе которых по разветвленной цепочке одни частицы передают свою энергию другим, причем попутно происходят различные превращения частиц. Взаимодействие электронного пучка со средой может быть описано с помощью простых моделей, сформулированных из общих соображений и здравого смысла, но иногда требуется и привлечение сложных современных теорий, например теории относительности.

Потоки быстрых электронов весьма распространены в природе. Это и космические лучи, и полярные сияния, и молнии, и явления на разломах твердых тел, и многие другие природные явления. Пучки электронов как в естественных, так и в искусственных источниках создаются обычно путем ускорения частиц в электрическом поле. Однако иногда представляют интерес и электроны, рождающиеся в ядерных реакциях. Создание ускорителей с самыми различными характеристиками — одно из главных достижений современной науки и техники. Существенно, что электронные ускорители позволяют получать не только быстрые электроны, но и (с помощью дополнительных ухищрений) высокоэнергичные ионы, атомы и фотоны. Отклонение и фокусировку электронных пучков удобно осуществлять с помощью управляющих магнитных полей.

Традиционно большое значение имеют биологические применения ускоренных электронов. Они основаны на том, что

при малых дозах радиация может улучшить свойства некоторых клеток, а при несколько больших дозах — повредить или уничтожить живые клетки. Облучение позволило вывести новые сорта многих сельскохозяйственных культур, отличающиеся повышенной урожайностью и вкусовыми достоинствами. Весьма перспективной представляется радиационная стерилизация продуктов, медицинских принадлежностей, промышленных и бытовых отходов. Уже много лет электронные пучки успешно применяются для лечения онкологических заболеваний. Однако необходимо учитывать, что пучки ускоренных электронов являются мощным инструментом, и если не соблюдать должных мер предосторожности, то в самых различных ситуациях они могут прямым или косвенным образом повредить человеку.

Электронные пучки — основа многих широкомасштабных радиационных технологий. Они позволяют существенно улучшить качество полиэтиленовых и резиновых изделий, лакокрасочных покрытий, хлопчатобумажных и смесовых тканей. Получение изображений интегральных микросхем с помощью потоков электронов и тормозного излучения дает возможность многократно уменьшить размеры и энергопотребление полупроводниковых приборов, повысить их быстродействие и надежность. Электронные ускорители позволяют за считанные минуты выявить скрытые дефекты массивных металлических конструкций с почти метровой толщиной стенки. Пучки электронов обеспечивают высококачественную сварку и резку металлов, а также напыление на них покрытий, причем особенно удобно работать с их помощью в условиях космического пространства. Электроны и фотоны высокой энергии, обладающие хорошей проникающей способностью, позволяют с большой эффективностью передавать энергию на расстояние. Электронные потоки в плазме — это и космические исследования, и термоядерная энергетика, и новые высокоэффективные плазмохимические технологии, и мощные лазерные системы.

Этот перечень можно было бы и продолжить. Несомненно, что область применения электронных пучков существенно расширится уже в ближайшем будущем. Однако необходимо учитывать, что освоение новшеств всегда сопряжено с некоторыми трудностями и неожиданными проблемами. И здесь нельзя уподобляться тем генералам, которые, как гласит известная поговорка, обычно готовятся к прошедшей войне. Одна из проблем связана с увеличением скорости индустриального преобразования общества. Действительно, на протяжении столетий перемены происходили достаточно медленно за время жизни

многих поколений. Это гарантировало довольно качественную проверку и позволяло производить естественный отбор удачных и отбраковку нежизнеспособных нововведений. Сегодняшние темпы перемен настолько велики, что такой естественный отбор затруднен. Поэтому повышенную роль начинает играть способность самих людей управлять ходом научно-технического прогресса.

Подобные проблемы надо будет решать и для применений электронных пучков. Поэтому задача книги не только рассказать о сегодняшних применениях, но и в чем-то подготовить читателя к завтрашнему дню, к завтрашним потребностям и проблемам.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Абрамян Е.А., Альтеркоп Б.А., Кулешов Г.Д. Интенсивные электронные пучки: Физика. Техника. Применение. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высшая школа, 1984.

Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Шанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Гольдин Л.Л. Физика ускорителей. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983.

Дорман Л.И., Козин И.Д. Космическое излучение в верхней атмосфере. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.

Захаров И.А. Экологическая генетика и проблемы биосферы. Л.: Знание, 1984.

Никеров В.А., Шолин Г.В. Кинетика деградационных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.

Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Уокер Дж. Физический фейерверк: Пер. с англ. А.С. Доброславского/ Под ред. и с предисл. И.Ш. Слободецкого. М.: Мир, 1979.

Эйдус Л.Х. Физико-химические основы радиобиологических процессов и защита от излучений. М.: Атомиздат, 1979.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Предисловие | 3 |
| Глава 1. ЭЛЕКТРОНЫ И ЗАКОН КУЛОНА | 5 |
| 1. Начнем с одного электрона | 5 |
| 2. Кулоновские столкновения | 11 |
| 3. Ионизация и возбуждение атомов и молекул | 14 |
| 4. Разворот электронов при соударениях | 18 |
| Глава 2. ТЕОРИЯ ЛЕСНОЙ ПРОГУЛКИ | 20 |
| 5. Длина пробега быстрых электронов | 20 |
| 6. Учет теории относительности | 24 |
| 7. О роли тормозного излучения | 27 |
| 8. Каскад превращений | 29 |
| 9. Примеры каскада | 33 |
| 10. Когда в лесу многолюдно | 36 |
| Глава 3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ В ПРИРОДЕ | 39 |
| 11. Кое-что об аномальных явлениях | 39 |
| 12. Электроны, магнитное поле и полярные сияния | 42 |
| 13. Явления на разломах | 47 |
| Глава 4. КАК СДЕЛАТЬ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК | 50 |
| 14. Ускорители электронов | 50 |
| 15. Ионный пучок из электронного | 54 |
| 16. Не только вперед | 55 |
| Глава 5. ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ | 59 |
| 17. Что такое радиобиология | 59 |
| 18. Защита от электронов | 64 |
| 19. Защита электронами | 67 |
| 20. Электронный луч стерилизует | 70 |
| Глава 6. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ В ЦЕХУ | 75 |
| 21. Прочность и прочее | 75 |
| 22. Письмо по камню | 79 |
| 23. Электронный гиперболоид | 84 |
| 24. Электронный луч просвечивает | 93 |
| Глава 7. ПОИСК ПРОДОЛЖАЕТСЯ | 99 |
| 25. Транспортировка энергий без проводов | 99 |
| 26. Лазеры на электронных пучках | 107 |
| 27. На пути к термоядерной энергетике | 114 |
| 28. Плазма плюс химия | 119 |
| Заключение | 123 |
| Рекомендуемая литература | 126 |

Научно-популярное издание

НИКЕРОВ ВИКТОР АЛЕКСЕЕВИЧ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ ЗА РАБОТОЙ

Редактор *Е.В. Сатарова*
Художник обложки *В.Н. Забайров*
Заставки *А.Т. Фоменко*
Художественные редакторы *А.Т. Кирьянов, А.А. Белоус*
Технический редактор *О.Д. Кузнецова*
Корректор *З.Б. Драновская*

ИБ № 2018

Сдано в набор 24.09.87. (Набор выполнен на Композере ИБМ-82).
Подписано в печать 31.05.88. Т-10196. Формат 84х108 1/32. Бумага офсетная № 1. Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,72. Усл. кр-отт. 13,86. Уч.-изд. л. 6,93. Тираж 50 000 экз.
Заказ 3665. Цена 40 к.

Энергоатомиздат 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Предприятие малообъемной книги дважды ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского производственного объединения "Типография имени Ивана Федорова" Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

192007, Ленинград, ул. Боровая, 51.

Электронные пучки за работой

Книга посвящена многообразным применениям пучков ускоренных электронов. Эти применения незаметно, но прочно вошли в нашу повседневную жизнь, придав ей новые качества и открыв широкие перспективы для дальнейших преобразований. Проблемы использования электронных пучков характерны для современного этапа научно-технического прогресса с присущими ему достоинствами, возможными опасностями, неоднозначностью. В книге уделено большое внимание научным, инженерным, потребительским, экологическим, медицинским аспектам бурного развития ускорительной техники и радиационных технологий.

Автор книги Виктор Алексеевич Никеров окончил Московский физико-технический институт в 1977 г. и аспирантуру МФТИ. Кандидат физико-математических наук, работает начальником сектора научно-исследовательского института, преподавал математику и физику в московских вузах. Он написал ряд научных статей в области теоретической физики и несколько популярных — по различным проблемам науки и общества, а также в соавторстве с Г. В. Шолиным книгу "Кинетика деградационных процессов" (М.: Энергоатомиздат, 1985).



ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ