

## ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

### 25. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПИЭЛ

Конструктивные и эксплуатационные особенности ПИЭЛ делают перспективным их применение в электронно-лучевой технике, включающей плавку, сварку, размерную обработку, отжиг, нанесение покрытий и другие технологические процессы. Основное, что отличает применение электронных пушек в технологических установках по сравнению с другими применениями— это необходимость работы в тяжелых вакуумных условиях, обусловленных интенсивным газоотделением и испарением материала обрабатываемых изделий, выплесками жидкого металла, а также периодической разгерметизацией вакуумной системы для замены изделий. В связи с этим использование в технике эффективных термокатодов на основе окислов щелочноземельных металлов затруднено прежде всего из-за их быстрого химического отравления, а применение более стойких боридных катодов ограничено вследствие чувствительности их эмиссионных характеристик к запылению парами обрабатываемого материала. Чаще всего в технологических электронных пушках применяют чисто металлические катоды: вольфрамовые и танталовые, однако и они в условиях электронно-лучевой техники обладают (в основном, вследствие интенсивной ионной бомбардировки их поверхности) недостаточными надежностью и долговечностью.

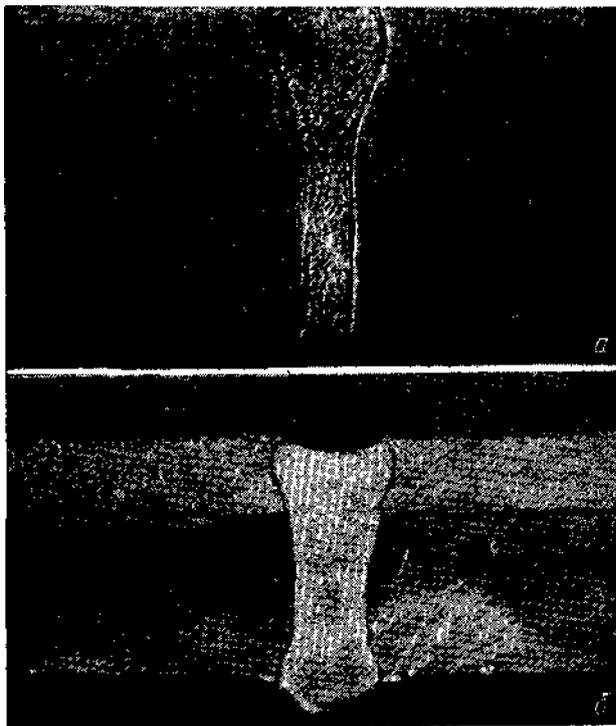
Другой существенный недостаток термокатодов, обусловленный их тепловой инерцией и непрерывным потреблением мощности независимо от режима токоотбора, состоит в трудности реализации импульсной эмиссии и связанных с этим трудностями управления током пучка пушек. Несмотря на широкое традиционное использование в технике электронных пушек с термокатодом, значительный интерес проявляется к разработке и использованию технологических ПИЭЛ.

Наибольшее развитие получили ПИЭЛ, предназначенные для электронно-лучевой сварки, где применяются электронные пучки со средней мощностью 0,1—30 кВт с плотностью мощности  $10^5$ — $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

Сварочные пушки мощностью до 10 кВт при ускоряющем напряжении 10—60 кВ разработаны на основе ПИЭЛ, в которых извлечение электронов производится из плазмы отражательного разряда с холодным полым катодом (см. гл. 3). Применение нашли пушки с извлечением электронов вдоль магнитного поля через катодное отверстие и поперек магнитного поля через отверстие в аноде разрядной камеры. Пушки первого типа обеспечивают лучшую фокусировку пучка, но работают с эффективностью извлечения, не превышающей 50%. Пушки с поперечным извлечением при использовании режима высоковольтного лучевого разряда могут работать с эффективностью  $\alpha \approx 100\%$ . Конструкции трех сварочных пушек приведены на рис. 13 и 18. Пушки не чувствительны к химическому отравлению вследствие самоочистки катодов разрядной камеры ионами. В то же время ионная бомбардировка конструктивных элементов ПИЭЛ слабо влияет на оптические свойства пушки, поскольку отбор электронов производится с плазменной поверхности. Управление током пучка осуществляется изменением тока разряда. Импульсный режим работы обеспечивается импульсным разрядом. Фотографии шлифов, полученных при сварке стальных изделий, приведены на рис. 77. Опыт промышленной эксплуатации пушек, имеющих конструкцию, показанную на рис. 13, а, в типовых установках А.306.05 позволяет сделать следующие выводы Долговечность службы ПИЭЛ в 3—4 раза превышает долговечность катодного узла типовых пушек с боридным катодом. Чтобы избежать возможности возникновения нестабильностей в горении разряда, целесообразно по истечении этого срока проводить профилактическую чистку электродов разрядной камеры. Пушки с плазменным эмиттером по сравнению с пушками с термокатодом менее критичны к вакуумным условиям. Максимальное допустимое давление в рабочей камере при их использовании ограничивается только электрической прочностью ускоряющего промежутка и составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. Отсутствие в пушке с ПИЭЛ накаливаемых до высокой температуры элементов исключает необходимое при использовании пушек с боридным

термокатодом время для охлаждения катодного узла в вакууме перед развакуумированием рабочей камеры и позволяет сократить длительность технологического цикла сварки.

Анализ микро- и макроструктур сварных соединений, полученных при использовании пушек с ПИЭЛ на основе отражательного разряда с полым катодом, показал, что качество их



**Рис. 77.** Фотографии шлифов ( $U=20$  кВ,  $I=45$  мА, скорость сварки 30 м/ч):

$a$  — нержавеющая сталь;  $б$  — нержавеющая сталь и Ст. 3; толщина 8 мм

не уступает качеству сварных швов, обеспечиваемых типовыми пушками с термокатодом. Применение пушек с ПИЭЛ полностью исключает неисправимый брак при сварке, обусловленный прожогом свариваемых деталей, возникавший при замыкании термокатода с модуляторным электродом или при выходе из строя источника питания модулятора.

Сварочные пушки, использующие ПИЭЛ на основе извлечения электронов в вакуум из плазмы низковольтного разряда, по своим параметрам и эксплуатационным характеристикам занимают промежуточное положение между пушками с термокатодом и пушками с ПИЭЛ на основе высоковольтного тлеющего разряда. Отличительной особенностью источников с высоковольтным тлеющим разрядом, рассмотренных в гл. 5, является то, что они генерируют электронный пучок при низком вакууме ( $10^{-3}$ —  $10^{-1}$  мм рт. ст.). Поэтому упрощается вакуумное оборудование сварочных установок, а также их эксплуатация и повышается производительность вследствие сокращения длительности откачки. В установках с ПИЭЛ этого типа возможна сварка не только металлов, но и керамики, поскольку зарядка диэлектрика электронами не происходит вследствие нейтрализации отрицательного заряда пучка ионами плазмы, образованной в рабочей камере электронным пучком. Газ между обрабатываемым изделием и разрядным промежутком ПИЭЛ служит своеобразным фильтром, пропускающим электронный пучок и препятствующим проникновению в промежуток паров изделия, что выгодно отличает такие установки от установок с ПИЭЛ с извлечением электронов из плазмы в вакуум. Кроме того, использование ПИЭЛ, работающих на форвакууме, облегчает решение актуальной задачи вывода технологического электронного пучка в атмосферу. В то же время качество электронно-лучевой сварки при давлении  $p=5 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. мало отличается от качества сварки при  $p=10^{-4}$  мм рт. ст.

Широкое применение нашли сварочные пушки с ПИЭЛ на основе разряда с полым анодом. Кроме перечисленных общих достоинств, присущих источникам с высоковольтным тлеющим разрядом, источники с полым анодом отличаются тем, что принцип их действия позволяет относительно просто формировать электродные системы, обеспечивающие пучки различной конфигурации, в том числе линейные, кольцевые и трубчатые (см. рис. 44 и 45). С

помощью таких пучков можно производить за один импульс сварку цилиндрических, ленточных и других деталей одновременно по всему обрабатываемому контуру, что значительно уменьшает деформацию изделия. Кроме того, при такой сварке исключается необходимость взаимного перемещения пучка и детали, что упрощает установку и повышает производительность. Необходимая для сварки плотность мощности обеспечивается во многих ПИЭЛ с полым анодом фокусировкой пучка в разрядном промежутке без дополнительных фокусирующих средств, использование которых вызывает трудности в пушках с пучком сложного профиля. Качеству фокусировки в таких системах способствует компенсация пространственного заряда пучка ионами и образование катодного падения потенциала, благодаря которому ускоряющее поле стягивается к катоду и уменьшается дефокусирующее действие анодной апертуры. Существенное преимущество ПИЭЛ с полым анодом перед другими электронными источниками заключается также в управлении током пучка с помощью дополнительного электрода, с потенциалом, отличающимся всего лишь примерно на 100 В от потенциала заземленного анода и стенок рабочей камеры.

Для электронно-лучевой сварки разработаны и используются ПИЭЛ с полым анодом, работающие при давлении  $10^{-2}$ — $10^{-1}$  мм рт. ст. на различных газах и обеспечивающие пучки с поперечным сечением различной формы с непрерывной мощностью до 30 кВт и импульсной мощностью до 200 кВт при плотности мощности до  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. К.п.д. таких электронных источников составляет 70—90%. На рис. 40, 42—45 приведены схемы электродов и конструкции нескольких сварочных пушек на основе ПИЭЛ с полым анодом. Пушка, построенная по схеме рис. 40, при мощности пучка 15 кВт обеспечивает сварные швы диаметром 2 см за время, равное 0,5 с. При мощности 4 кВт и напряжении 17 кВ одноимпульсная приварка стального стакана к трубке диаметром 1,8 и толщиной стенок 0,1 см производится в течение 1 с. Пушка с трубчатым пучком и электродной схемой, показанной на рис. 45, используется для стыковой сварки кольцевых штампованных деталей из стали толщиной 0,127 см. Кольцевой шов длиной 10 см производится за 0,5 с при токе пучка 0,8 А и ускоряющем напряжении 35 кВ. Пушки с ленточным пучком мощностью до 200 кВт применяются для одноимпульсной сварки в торец полос нержавеющей стали длиной 100 см в течение 0,5 с.

Применение сварочных пушек на основе ПИЭЛ с полым анодом продолжает расширяться. Однако этим пушкам при их многочисленных достоинствах присущи и недостатки. Один из недостатков состоит в необходимости стабилизации давления в разряде в процессе сварки, поскольку от давления зависит ток пучка. Для поддержания постоянного давления применяют дифференциальную откачку из рабочей камеры и области разряда и автоматические системы стабилизации давления. Следует также отметить, что ПИЭЛ с полым анодом имеют более низкий к. п. д. и обеспечивают пучки с несколько меньшей плотностью мощности, чем пушки с термокатодом и ПИЭЛ, использующие низковольтный разряд и высоковольтное извлечение электронов в вакуум.

Имеются сведения о применении для сварки ПИЭЛ на основе высоковольтного разряда с полым катодом. Наряду с рассмотренными выше общими особенностями, присущими ПИЭЛ с высоковольтным разрядом, источники с полым катодом при использовании их для сварки обладают рядом отличий от ПИЭЛ с полым анодом. Извлечение электронов из плазмы, образованной в полым катоде, обуславливает меньшее влияние ионной бомбардировки катода на срок его службы. Однако зависимость положения и формы эмиттирующей плазменной поверхности от напряжения затрудняет выбор оптимальной формы электродов и не позволяет ограничиться электростатической фокусировкой пучка в разрядном промежутке, как это часто имеет место в ПИЭЛ с полым анодом. В сварочных ПИЭЛ с полым катодом обычно производится дополнительная фокусировка пучка магнитными линзами. Кроме того, для устойчивой работы ПИЭЛ с полым катодом требуется более низкое давление, не всегда обеспечиваемое форвакуумными насосами, и большие ограничительные сопротивления в цепи разряда.

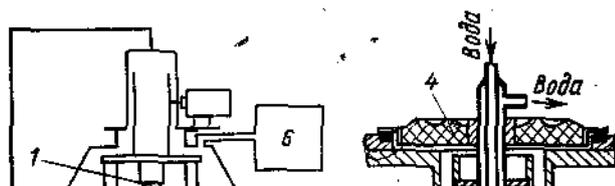


Рис. 78. Схема установки для сварки крупногабаритных деталей [111]:

а — ПИЭЛ; б — отклоняющая

Схема установки для электронно-лучевой сварки крупногабаритных деталей корпусов космических ракет с длиной шва 30—60 м приведена на рис. 78. Особенностью установки является расположение ПИЭЛ в рабочей сварочной камере и использование цилиндрического полого катода, показанного на рис. 78, б. Электронная пушка с ПИЭЛ работает на аргоне при давлении  $p=5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., гелии при  $p=(2—3)10^{-2}$  мм рт. ст. или азоте при  $p=10^{-2}$  мм рт. ст. Ток пучка составляет (0,1—0,3) А при ускоряющем напряжении 40—60 кВ.

Для сварки деталей серийного промышленного производства, когда большое значение имеют быстрая откачка и малое время подготовительных операций, создана двухкамерная электронно-лучевая установка В этой установке ПИЭЛ монтируется в отдельной камере, которая может отделяться с помощью клапана. Эксплуатация установки с ПИЭЛ показала, что медленное ухудшение характеристик пучка, обусловленное ионной бомбардировкой торцевого элемента катода, начинается после 50 ч работы. Сравнение характеристик ПИЭЛ с характеристиками сварочных пушек с термокатодом показало, что энергозатраты, требуемые для сварки металлических листов толщиной 1,3 см, в обоих случаях примерно одинаковы.

Относительно малая чувствительность ПИЭЛ к тяжелым вакуумным условиям и ионной бомбардировке обуславливают перспективность их применения в технологических процессах, требующих непрерывные электронные пучки большой мощности ( $>10$  кВт) с относительно небольшой плотностью мощности на объекте нагрева ( $10^2 \div 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>). К таким процессам относятся электронно-лучевая плавка, нанесение покрытий испарением, отжиг, обезгаживание и т. д.

Наиболее мощными ПИЭЛ непрерывного действия в настоящее время являются дуоплазматроны с накаливаемым катодом. Конструкция одного из электронных источников показана на рис. 22. Преимущества ПИЭЛ этого типа перед вакуумными пушками с термокатодом рассмотрены в гл. 4. Несмотря на присутствие термокатодов, дуоплазматроны обладают большим сроком службы, чем обычные пушки с такой же мощностью пучка, постольку катод в дуоплазматроне защищен от высокоэнергетичных ионов и паров арматурой разрядной камеры и наполняющим ее газом.

Поскольку при больших мощностях утечки тока пучка на электроды должны быть очень, малыми, чтобы избежать их расплавления, мощные пушки обычно делают двухэлектродными, что затрудняет управление пучком. Серьезным преимуществом дуоплазматронов перед обычными пушками является возможность управления током мощного пучка изменением тока разряда или напряжения маломощного источника питания электромагнита, обеспечивающего магнитное поле в разряде. ПИЭЛ на основе высоковольтного разряда с полым анодом, генерирующие широкие пучки, находят применение для термической обработки металлических лент, спекания лаковых покрытий на листовом металле, спекания металлических порошков, пайки и других целей. В этих же работах описывается применение ПИЭЛ, обеспечивающих сфокусированные пучки, для выращивания кристаллов, нанесения керамических и металлических покрытий, плавки.

Созданы технологические ПИЭЛ с полым анодом и одним катодом с мощностью непрерывного лучка до 50 кВт и сообщается о разработке пушки с двадцатью отдельными катодами для получения широкого пучка мощностью 1 МВт. Примером использования ПИЭЛ с высоковольтным тлеющим разрядом для нагрева диэлектриков может служить установка выращивания кристаллов сапфира из гранулированного глинозема (рис. 79). В установке используется основной сферически вогнутый катод 1 и дополнительный конический катод 2. Основной катод снабжен подогревателем, который до зажигания разряда повышает его температуру до 570 К. Благодаря предварительному нагреву катода исключается возникновение дуговых разрядов при включении высокого напряжения и быстрый износ катода. Во время выращивания кристалла подогреватель катода отключается, так как необходимая для предотвращения загрязнений повышенная температура катода обеспечивается излучением из расплава. С помощью дополнительного катода производится электронный нагрев боковой поверхности кристалла для уменьшения в нем термических напряжений. Разряды с основным и дополнительным катодами горят при напряжении 5 кВ и обеспечивают токи 0,5 А каждый. Рабочим газом служит воздух при давлении 0,1 мм рт. ст.

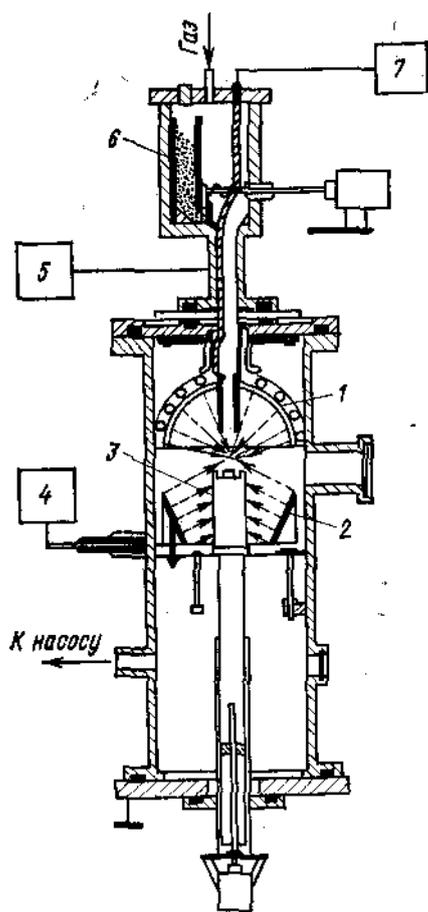


Рис. 79. Установка для выращивания кристаллов:

- 1— сферический катод; 2— дополнительный конический катод;
- 3— анод; 4, 5, 7— источники питания;
- 6— шихта

Чтобы осуществить некоторые технологические процессы (размерная обработка, запись информации и т. д.), необходимы острогофокусированные электронные пучки с большой плотностью мощности при относительно малой средней мощности пучка. Возможности ПИЭЛ во многих случаях соответствуют требованиям таких процессов. Трудности фокусировки, обусловленные высокой электронной температурой плазмы, в значительной степени компенсируются большой плотностью тока эмиссии из плазмы. Кроме того, из-за использования специальных плазменных линз или стягивания поля к катоду в высоковольтном тлеющем разряде в ПИЭЛ можно значительно уменьшить дефокусирующее действие отверстия в ускоряющем электроде.

В работе показано применение ПИЭЛ, основанного на извлечении электронов из прианодной плазмы отражательного разряда с полым катодом, для размерной обработки

алмазов. Для питания разрядной камеры ПИЭЛ используется импульсный генератор, который формирует синхронные с ускоряющим напряжением импульсы напряжения с амплитудой до 2 кВ при длительности  $10^{-4}$  с и частоте следования 50 и 100 Гц. Длительность импульсов ускоряющего напряжения составляет  $6 \cdot 10^{-5}$  с.

Опыт использования ПИЭЛ в установке для обработки алмазов позволяет сделать следующие выводы: несмотря на относительно большой по сравнению с термокатодом разброс электронов по скоростям, ПИЭЛ обеспечивает плотность мощности пучка ( $>10^7$  Вт/см<sup>2</sup>), достаточную для высокопроизводительной размерной обработки алмазов; по сравнению с ранее применявшимся на той же установке прямонакальным ленточным термокатодом ПИЭЛ обеспечивает лучшую форму поперечного сечения пучка, которая определяется формой эмиссионного отверстия разрядной камеры; независимость извлеченного тока ПИЭЛ при высоком ускоряющем напряжении от величины напряжения, что обусловлено стабилизацией плазменной эмиссионной поверхности, способствует уменьшению зависимости мощности пучка от колебаний этого напряжения и снижает требования к его стабильности; безынерционное с точки зрения требований к установкам размерной обработки управление мощностью пучка без нарушения фокусировки возможно путем модуляции разрядного напряжения.

Выявленным недостатком ПИЭЛ для размерной обработки является присутствующий «электронный фон», вызывающий в отсутствие предохранительных мер несколько больший разогрев обрабатываемых объектов по сравнению с пушкой с термокатодом.

## 26. ПРИМЕНЕНИЕ ПИЭЛ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

В настоящее время электронные ускорители на малые и средние энергии ( $\sim 1$ —100 МэВ) перестали быть только инструментом для исследований и широко применяются для различных практических целей. К областям использования ускорителей относятся неразрушающий контроль изделий с помощью тормозного излучения и электронных пучков, лучевая терапия, биологическая стерилизация сельскохозяйственных продуктов, радиационная химия и т. д. Эти применения повышают требования к надежности и долговечности ускорителей и стимулируют пересмотр принципов их конструирования. Наименее надежным элементом ускорителя обычно является электронный эмиттер, в качестве которого часто служат термокатоды. Замена термокатада ПИЭЛ может значительно повысить надежность всего устройства.

В гл. 3 рассмотрен ПИЭЛ (см. рис. 11) на основе отражательного разряда с холодным катодом, который используется в качестве инжектора электростатического генератора ЭГ-2,5. Специфика конструкции ускорителя определяет требования к ПИЭЛ, основными из которых являются высокая надежность, большой срок службы, малые расход газа и потребляемая мощность. Источник работает на ускорителе Томского политехнического института  $7 \cdot 10^3$  ч без замены деталей и ухудшения характеристик. На основе этого ПИЭЛ разработан и испытан универсальный электронно-ионный источник, который в зависимости от полярности извлекающего напряжения обеспечивает работу ускорителя в режиме ускорения электронов или ионов.

Искровой источник электронов для бетатрона обладает значительно большей долговечностью, чем инжекторы с термокатодом при импульсном или непрерывном накале. Конструкция источника показана на рис. 80. В результате вакуумного пробоя между молибденовым катодом 1 и поджигающим электродом 2 из нержавеющей стали образуется плазма, из которой извлекаются электроны с помощью ускоряющего электрода 3. Стекланный цилиндр 4 улучшает фокусировку лучка за выходным отверстием в ускоряющем электроде. При напряжении 20—25 кВ инжектор обеспечивает импульсный электронный пучок длительностью  $3 \cdot 10^{-7}$  с с током  $\sim 1$  А.

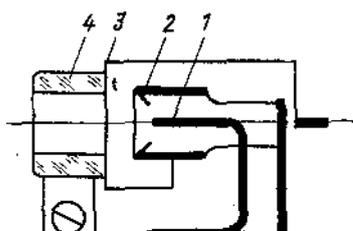


Рис. 80. Искровой ПИЭЛ для

Инжектор малогабаритного бетатрона разработан на основе диода со взрывной эмиссией электронов. В двухэлектродном инжекторе Керста в качестве катода используется цилиндр диаметром 1,8 мм из вольфрамовой фольги толщиной 20—30 мкм. Инжектор обеспечивает пучок с током до 1 кА при энергии электронов 200 кэВ и длительности импульса  $2 \cdot 10^{-9}$  с. Исследование энергетического распределения электронов в пучке показывает, что энергия большинства электронов лежит в пределах 50—180 кэВ.

На основе результатов экспериментов по извлечению электронов из отражательного разряда СВЧ-полем, провисающим через инжекционное отверстие резонатора, запущен микротрон с плазменным инжектором электронов, основанным на этом принципе. Вместо термо катода в инжекторе используется плазма отражательного разряда, горящего в магнитном поле микротрона. При расходе газа  $60 \text{ см}^3/\text{ч}$  и напряжении разряда 2 кВ разрядный ток составляет 4 А в импульсе длительностью  $3 \cdot 10^{-5}$  с. Давление в вакуумной камере микротрона при этом равно  $3 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Ускоренный ток электронов с энергией 6 МэВ составляет 15 мА.

Плазменные источники электронов, как показано в гл. 6, обеспечивают в импульсном режиме наибольшие, по сравнению с другими эмиттерами, электронные токи. Поэтому они практически монополюсно используются в сильноточных электронных ускорителях с токами  $I/10^3$  А. Искровой источник с рабочим веществом— органическим стеклом применяется в сильноточном ускорителе с одиночным резонатором на укороченной четвертьволновой коаксиальной линии. Отбор электронов из плазмы, образованной в шести разрядных промежутках, и ускорение производятся ВЧ-напряжением в зазоре резонатора длиной 70 мм. Длительность одиночных импульсов тока по основанию составляет  $7 \cdot 10^{-8}$  с. При максимальном напряжении 1,2 МВ электронный ток достигает  $10^3$  А. Диаметр сечения пучка на выходе ускорителя составляет 1,5 см. Ускоритель применяется для получения тормозного  $\gamma$ -излучения при исследовании радиационных характеристик полупроводников.

Широкое применение нашли ПИЭЛ со взрывной эмиссией электронов в наносекундных сильноточных ускорителях прямого действия (НСУ). В отличие от тех ускорителей, где ПИЭЛ используются в качестве инжектора электронов в ускоряющую систему, в НСУ образование плазмы, отбор из нее электронов и их ускорение обычно осуществляются в одном и том же промежутке между холодным катодом и анодом. По существу НСУ обычно состоит из ПИЭЛ в виде диода и схемы его электрического питания. ПИЭЛ, преобразующее, накопительное и коммутирующее устройства объединяются конструктивно в одном баке. Электронный пучок НСУ используется непосредственно на аноде, выводится в вакуумную рабочую камеру через анодное отверстие или в газовую среду через тонкую фольгу, установленную в плоскости анода.

Параметры некоторых наносекундных сильноточных ускорителей со взрывной эмиссией электронов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Ускоритель	$U, 10^5 \text{ В}$	$I, 10^3 \text{ А}$	$\tau_{\text{и}}, 10^{-7} \text{ с}$	Вид катода
«Синус»	7	30	0,4	Многоострый металлический
«Тонус»	12	50	0,02	То же
«Водяной»	10	ПО	0,4	Плоский дисковый металлический
«Гермес II»	120	700	0,4	—
«Аврора»	150	(4x400)	1	—

Конструктивная схема ускорителя «Синус», который при ускоряющем напряжении  $10^6 \text{ В}$  обеспечивает электронный пучок с током  $3 \cdot 10^4 \text{ А}$  длительностью  $4 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , приведена на рис. 81. Основными узлами ускорителя являются вакуумный диод с катодом 1, источник высокого напряжения 2, которым служит импульсный трансформатор, коммутатор 3 в виде двойной формирующей линии, заполненной касторовым маслом, и коммутатор 4, представляющий двухэлектродный разрядник с азотом при давлении 1—3 атм. На рис. 81, б показаны типы используемых в ПИЭЛ холодных катодов. В диоде применены конический изолятор 5 из органического стекла и анод в виде титановой фольги, через которую электронный пучок проходит в трубку дрейфа. Расстояние между катодом ПИЭЛ и анодом составляет 7—9 мм. Одна из особенностей ускорителя состоит в том, что управление коммутатором 4 осуществляется инжекцией электронного пучка через фольгу, причем пучок обеспечивается вспомогательным ПИЭЛ со взрывной эмиссией электронов. В качестве вспомогательного ПИЭЛ для запуска коммутатора в режиме искрового разряда используется источник с током 10 А при ускоряющем напряжении  $2 \cdot 10^5 \text{ В}$  и длительности импульса  $10^{-8} \text{ с}$ , а для запуска в режиме объемного разряда — сильноточный ускоритель с током пучка  $4 \cdot 10^3 \text{ А}$  при напряжении  $5 \cdot 10^5 \text{ В}$  и длительности  $2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ .

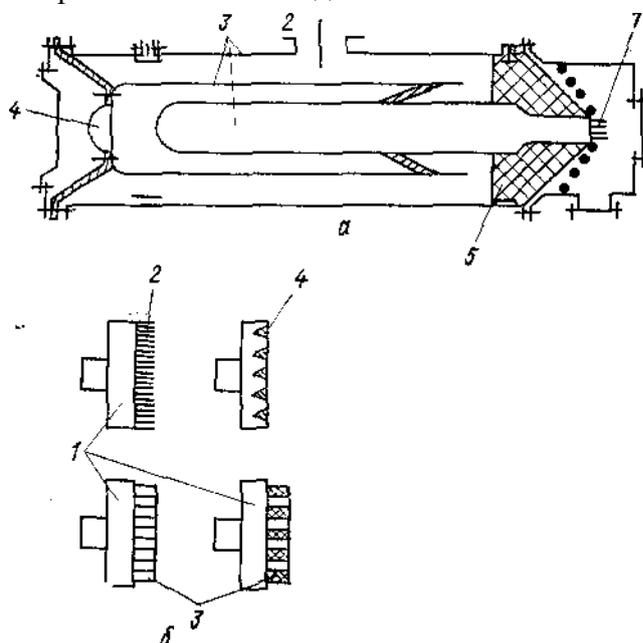


Рис. 81. Схема ускорителя «Синус» :

а — 1 — катод; 2 — источник высокого напряжения; 3 — формирующая линия; 4 — коммутатор; 5 — изолятор;  
 б — типы катодов; 1 — латунный диск; 2 — стальная игла  
 $R = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ; 3, 4 — лезвия

В настоящее время сильноточные релятивистские пучки электронов, получаемые ПИЭЛ

со взрывной эмиссией электронов, применяются для генерации мощных импульсов электромагнитного излучения, в исследованиях по коллективному ускорению ионов и иницированию термоядерных реакций, а также в некоторых других случаях.

## 27. ПРИМЕНЕНИЕ ПИЭЛ В КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Одним из интенсивно развивающихся применений ПИЭЛ является использование их для возбуждения объемных газовых разрядов высокого давления в электроионизационных лазерах, которые перспективны с точки зрения получения больших энергий излучения. Основными особенностями электронных источников для этих целей являются большая площадь сечения пучка ( $10\text{--}10^4\text{ см}^2$ ) с однородным распределением плотности тока по сечению и вывод пучка из вакуума или газа низкого давления в газ высокого давления.

К этим преимуществам относятся: простота конструкции, обусловленная, в частности, отсутствием накаливаемых тонкостенных элементов; нечувствительность эмиттера к загрязнениям и прорывам атмосферы при неизбежных периодических разрушениях фольги, через которую электронный пучок проходит в лазерную кювету; малое время готовности ПИЭЛ, определяемое временем зажигания разряда, обычно не превышающим  $10^{-6}$  с; высокая энергетическая эффективность и обеспечение импульсной эмиссии, благодаря использованию импульсного разряда; низкая стоимость.

Необходимость прохождения электронного пучка через фольгу ограничивает нижний предел ускоряющего напряжения ПИЭЛ примерно 100 кВ. Необходимый ток пучка при требуемой энергии излучения в импульсе зависит от его длительности.

Чтобы обеспечить высокие импульсные мощности излучения, необходимо использовать пучки с большими токами, которые в настоящее время проще всего получить с помощью ПИЭЛ на основе взрывной эмиссии электронов (см. гл. 6). Обычно в этих случаях требуются пучки с током  $10^3\text{--}10^4$  А, плотностью тока  $1\text{--}10$  А/см<sup>2</sup> и энергией электронов  $(2\text{--}5)\cdot 10^5$  эВ при длительности импульса  $10^{-9}\text{--}10^{-6}$  с. В качестве катодов ПИЭЛ со взрывной эмиссией для возбуждения объемных разрядов используются острия из проволоки, лезвия или полосы из тонкой фольги, а также пилообразные эмиттеры из фольги, изготовленные методом фотолитографии или штамповки.

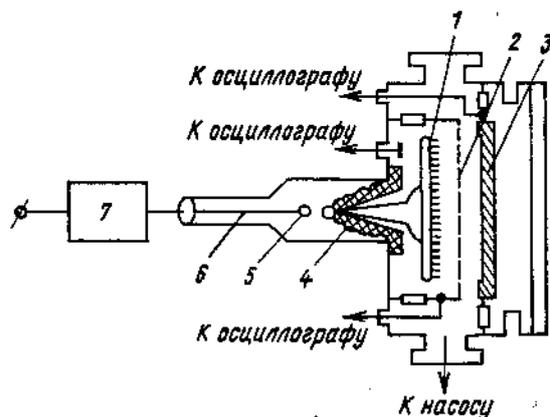


Рис. 82. ПИЭЛ для инжекции электронного пучка в газовый лазер:

- 1 — катод; 2 — ускоряющий электрод; 3 — коллектор; 4 — изолятор; 5 — коммутатор; 6 — формирующая линия; 7 — импульсный трансформатор

Схема ПИЭЛ для инжекции электронного пучка в газовый лазер дана на рис. 82. Катод 1 включает 800 эмиттеров из медной фольги толщиной 25 мкм. Эмиттеры имеют радиусы закруглений вершин 5—30 мкм и располагаются на площади 4035 см<sup>2</sup> с шагом 5 мм. Ускоряющим электродом служит молибденовая сетка 2 с прозрачностью 90% или фольга из Al или Ti толщиной 50 мкм. Пучок электронов, извлеченных из плазмы катодных факелов, проходит через сетку или фольгу на графитовый коллектор 3. Ток пучка за фольгой достигает 1 кА при амплитуде ускоряющего напряжения до 500 кВ и длительности импульса  $3\cdot 10^{-8}$  с. Стабильность амплитуды тока не хуже 5%, расходимость пучка составляет 16°. Исследование структуры пучка с помощью фотографирования свечения органической пленки, помещенной на фольге 2, показывает, что пучок состоит из множества колец, обусловленных эмиссией из отдельных острий. Ток пучка в два раза меньше, чем следует из

закона «степени  $3/2$ » для плоского диода, что может быть вызвано тем, что работает не вся поверхность катода.

Импульсный электроионизационный  $\text{CO}_2$ -лазер с рабочим объемом 10 л и энергией в импульсе 500 Дж. Независимый объемный разряд при атмосферном давлении в этом лазере возбуждается электронным пучком ПИЭЛ со взрывной эмиссией электронов.

Схема лазера, основными узлами которого являются ПИЭЛ и газовая лазерная кювета, приведена на рис. 83. ПИЭЛ имеет многоострый катод 1 с остриями высотой 5 мм, расположенными с шагом 4 мм равномерно на площади  $9838 \text{ см}^2$ . Пучок с амплитудой тока 1,5 кА и длительностью импульса  $(0,5 \div 1,5) \cdot 10^6 \text{ с}$  ускоряется в промежутке длиной 8 см напряжением 200 кВ и инжектируется в газ через окно площадью  $100 \times 12 \text{ см}^2$ , закрытое титановой фольгой 2 толщиной 50 мкм. Отклонение плотности тока от среднего значения по всему сечению не превышает 10%.

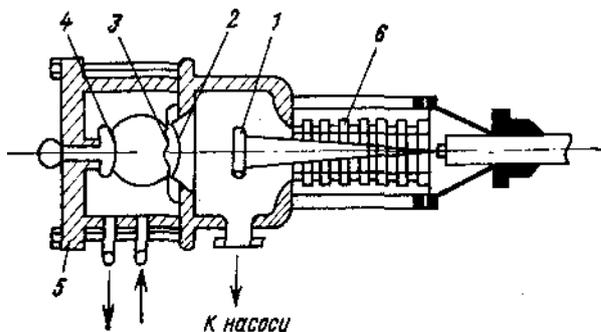


Рис. 83. Схема  $\text{CO}_2$ -лазера:

1 — катод; 2 — фольга; 3 — антидуговая решетка;  
4 — анод; 5 — лазерная камера; 6 —  
секционированный изолятор

В электроионизационных лазерах, предназначенных для работы на длинных импульсах и в непрерывном режиме, для получения пучков с большим поперечным сечением могут использоваться ПИЭЛ с извлечением электронов из низковольтных разрядов с холодным катодом, а также ПИЭЛ с высоковольтным тлеющим разрядом.

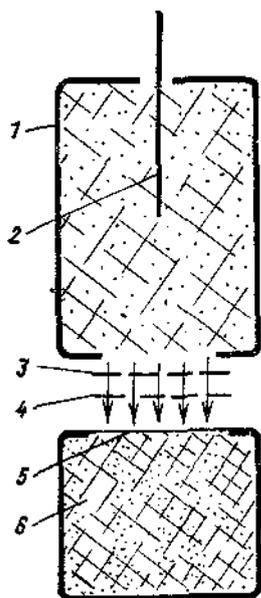
В гл. 1 рассмотрены три способа получения пучков с большим поперечным сечением при помощи плазмы. Все эти способы находят в настоящее время применение. Для возбуждения объемного разряда высокого давления использована ускорительная трубка с ПИЭЛ, в которой формирование пучка, полученного при отборе электронов с малой эмиссионной поверхности, до требуемых размеров осуществляется с помощью электростатических линз. ПИЭЛ основан на извлечении электронов из прианодной плазмы отражательного разряда с холодным полым катодом (см. гл. 3) и обеспечивает инжекцию электронов с энергией 20 кэВ в тракт ускорения и формирования пучка. Изменение размеров сечения пучка на выходе ускорителя осуществляется регулировкой напряжения инжекции. Узел вывода, состоящий из титановой фольги толщиной 30 мкм и решетки с коэффициентом прозрачности 0,8 из охлаждаемых водой медных трубок, позволяет вывести при ускоряющем напряжении 250 кВ в атмосферу около 50% тока пучка. Ток пучка, который связан с током разряда линейной зависимостью, регулируется включением последовательно с разрядной камерой, резистора. При ускоряющем напряжении 250 кВ ускоритель обеспечивает в непрерывном режиме в атмосфере пучок с поперечным сечением  $100 \text{ см}^2$  и током до 10 мА, величина которого ограничивается прочностью титановой фольги в условиях одновременного воздействия на нее перепада давления и электронного пучка.

Подобный способ формирования пучка с большим поперечным сечением использован также в установке для исследования объемного разряда длительностью  $10^{-5} - 10^4 \text{ с}$  в качестве активной лазерной среды. Электронный пучок получается с помощью секционированного высоковольтного ускорителя с ПИЭЛ на основе дугового контрагированного разряда с холодным катодом в магнитном поле. Извлечение электронов в ПИЭЛ производится из плазмы, проникающей через отверстие диаметром 1 мм в закрытый сеткой цилиндрический экспандер диаметром и глубиной 7 мм. ПИЭЛ не требует отдельной цепи питания, находящейся под высоким напряжением, и может питаться от общего активного делителя, распределяющего напряжение по длине ускорительной колонки. Ускоряющее напряжение с амплитудой 250 кВ подается на делитель напряжения от генератора импульсных напряжений

Аркадьева— Маркса. Пучок электронов плотностью до  $30 \text{ мА/см}^2$  вводится в газовый зазор через окно площадью  $8 \times 4 \text{ см}^2$  из лавсановой пленки толщиной 125 мкм, армированной сеткой.

В гл. 5 рассматривается ПИЭЛ, в котором импульсный электронный пучок с большим поперечным сечением генерируется высоковольтным тлеющим разрядом с плоскопараллельными электродами, имеющими размеры, соответствующие требуемому сечению пучка (см. рис. 47). ПИЭЛ обеспечивает пучок длительностью импульса  $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$  и сечением  $15 \times 15 \text{ см}^2$  и плотностью тока  $1 \text{ А/см}^2$  при напряжении между электродами 150 кВ.

Объемный разряд высокого давления возбуждают электронным пучком из высоковольтного разряда низкого давления между коаксиальными цилиндрами. Разряд длительностью  $10^{-6} \text{ с}$  горит при напряжении между цилиндрическими электродами 120 кВ в гелии при давлении  $10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$  и обеспечивает электронный ток 16 А при плотности электронного тока на катоде  $4,25 \text{ мА/см}^2$ .



**Рис. 84.** Схема ПИЭЛ для возбуждения электроионизационного лазера:

1— катод; 2— поджигающий электрод; 3— сетчатый анод; 4— управляющая сетка; 5— фольга; 6— лазерная камера

Преимуществом ПИЭЛ с высоковольтным разрядом по сравнению с другими электронными источниками, применяющимися в лазерной технике, является чрезвычайная простота конструкции и схемы электрического питания. Однако эти источники обладают недостаточным инерционным управлением током пучка (с помощью давления), относительно широким энергетическим спектром электронов и работают при напряжениях  $U/150 \text{ кВ}$  лишь на относительно коротких импульсах вследствие перехода при больших длительностях высоковольтного тлеющего разряда в низковольтную дугу. Безынерционного управления током в широких пределах и сужения энергетического спектра электронов пучка можно достигнуть при использовании ПИЭЛ с извлечением электронов из низковольтных разрядов. Схема электронной пушки с плазменным катодом, предназначенной для возбуждения электроионизационных лазеров и обеспечивающей пучок с прямоугольным сечением  $1033 \text{ см}^2$ , приведена на рис. 84. Низковольтный тлеющий разряд возбуждается между полым катодом 1 глубиной 5,9 см и сечением  $13,733,6 \text{ см}^2$  и сетчатым анодом 3. Для улучшения условий зажигания низковольтного разряда низкого давления используется подготовительный разряд, который возбуждается в результате приложения в течение  $10^{-6} \text{ с}$  напряжения 800 В между полостью и поджигающим электродом 2 в виде тонкого стержня. В качестве рабочего газа применяют гелий, обеспечивающий малое распыление электродов и достаточную электрическую прочность ускоряющего промежутка. Напряжение горения разряда при давлении  $(1 \div 3) \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$  и токе 0,2—3 А составляет 400—800 В. Ускорение электронов до энергии 150 кэВ происходит в промежутке длиной 2,5 см между сеткой 4 и фольгой 5, через которую электроны поступают в лазерную камеру. Сетка 4 служит для управления током пучка при постоянном токе разряда и ускоряющем напряжении. Кроме того, промежуток между сетками 3 и 4 длиной 0,8 см отделяет область разряда от

пространства ускорения, благодаря чему уменьшается влияние ускоряющего напряжения на разряд. Увеличение ускоряющего напряжения требует снижения потенциала управляющей сетки для сохранения постоянного тока лучка. При потенциале сетки 4 относительно анода—90 В происходит практически полная отсечка тока.

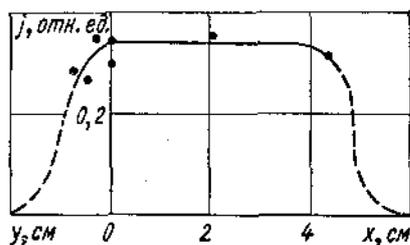


Рис. 85. Распределение плотности тока в сечении пучка ( $U=60\text{кВ}$ )

ПИЭЛ обеспечивает пучок с плотностью тока до  $1\text{ А/см}^2$  при длительности импульса  $10^{-4}$  с и  $0,7\text{ мА/см}^2$  в непрерывном режиме. Распределение плотности тока в сечении пучка в плоскости фольги при ускоряющем напряжении 60 кВ дано на рис. 85. Измерение энергетического распределения электронов в центре пучка при напряжении 50 кВ и плотности тока  $146\text{ мА/см}^2$  показывает, что пик в распределении, к которому относится 90% электронов, имеет ширину 1,4 кэВ на полувысоте. При ускоряющем напряжении 100 кВ через титановую фольгу толщиной 13,8 мкм проходит  $(50\pm 6)\%$  пучка.

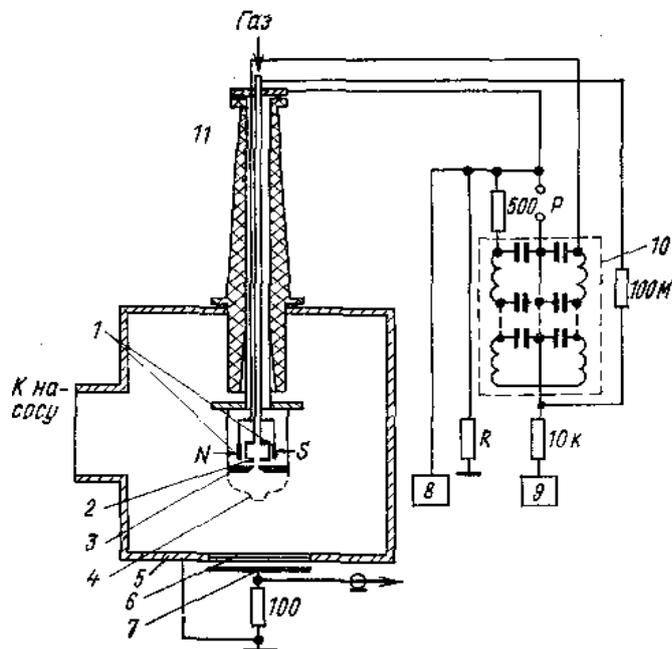


Рис. 86. Конструкция и схема питания ПИЭЛ с широким пучком:

- 1— катоды; 2— анод; 3— главный анод; 4— экспандер; 5— камера; 6— окно; 7— коллектор; 8— ГИН; 9— источник питания линии; 10— формирующая линия; 11— изолятор

Отбор электронов из разряда с поперечным сечением, соответствующим необходимому большому сечению пучка, требует возбуждения разряда в значительном объеме и затрудняет создание высокого вакуума в ускоряющем промежутке. Это ограничивает ускоряющее напряжение и длительность импульса электронного пучка. В некоторых случаях, задачу получения широких пучков можно решить более рационально при создании необходимой эмигрирующей поверхности в результате расширения первоначально плотной плазмы, проникающей через малое отверстие в специальный расширитель (экспандер). На этом принципе основаны применяемые для возбуждения объемных разрядов ПИЭЛ, в которых использован дуговой контрагированный разряд с холодным катодом в магнитном поле. Особенности электронных источников такого типа (см. рис. 30) рассмотрены в гл. 4. Конструкция и схема питания ПИЭЛ, обеспечивающего электронный пучок с поперечным сечением  $35\times 35\text{ см}^2$ , током 1 А, длительностью  $10^{-4}$  с при энергии электронов 270 кэВ, приведена на рис. 86. Разрядная камера ПИЭЛ аналогична приведенной на рис. 30. Питание разряда осуществляется импульсами напряжения прямоугольной формы с амплитудой до 5

кВ и длительностью  $10^{-4}$  с, которые формируются длинной линией 10, заряжаемой от источника 9. Рабочим газом служит воздух, напускаемый в разрядную камеру. Расход газа не превышает  $50 \text{ см}^3/\text{ч}$ . Чтобы уменьшить запаздывание разряда, в разрядной камере непрерывно поддерживается разряд с током 10 мкА, для чего на анод 2 подается положительный потенциал через сопротивление 100 МОм. Ускоряющее напряжение от генератора импульсных напряжений (ГИН) 8 прикладывается между экспандером 4 и корпусом вакуумной камеры. Отбор электронов производится с плазменной поверхности, которая формируется выпуклым сетчатым экспандером, имеющим диаметр основания 20 см и обеспечивающим пучок с требуемым распределением плотности тока по сечению пучка. Окно для вывода пучка размерами  $35 \times 35 \text{ см}^2$  закрывается лавсановой пленкой или фольгой из алюминиевого сплава. Ток пучка регулируется изменением зарядного напряжения линии при постоянном ускоряющем напряжении.

## 28. ПРИМЕНЕНИЕ ПИЭЛ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Кроме ускорителей с плазменными инжекторами и катодами в современной экспериментальной технике используются ПИЭЛ с относительно невысокой энергией электронов. Присущие этим электронным источникам особенности, такие, как получение очень больших токов с высокой плотностью, способность работать в газе, реализация режимов со значительными пульсациями тока и т. д. делают ПИЭЛ в некоторых случаях уникальным инструментом для проведения различных исследований.

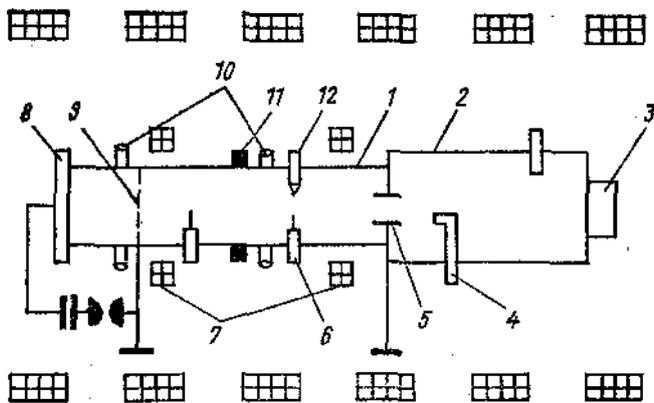


Рис. 87. Схема экспериментальной установки

1— стеклянная камера; 2— металлическая камера; 3— плазменный инжектор; 4— электростатический анализатор; 5— диафрагма; 6— двойной электростатический зонд; 7— магнитная ловушка; 8— катод; 9— анод; 10— пояс Роговского; 11— диамагнитные нитки; 12— термозонды

В гл. 6 рассмотрено образование мощных электронных пучков в прямых разрядах, которые возникают в промежутках, заполненных плотной плазмой, при наложении сильного электрического поля. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 87. Вакуумная камера, состоящая из стеклянной 1 и металлической 2 частей, помещена в магнитное поле с индукцией до 0,25 Тл. В торце металлической части расположен коаксиальный плазменный инжектор 3, из которого водородная плазма с концентрацией  $7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и электронной температурой  $\sim 2$  эВ поступает вдоль оси установки в стеклянную секцию длиной 1,5 м через металлическую диафрагму 5 диаметром 12 см. Катушки 7 образуют магнитную ловушку с пробочным отношением 2,5. После заполнения камеры плазмой между сплошным катодом 8 и сетчатым анодом 9 возбуждается прямой разряд в результате разряда конденсатора емкостью 0,2 мкФ, заряженного до 30 кВ. Электронный пучок, который образуется в прямом разряде, через сетчатый анод поступает в пробочную ловушку и производит сильный нагрев плазмы. Ток пучка равен току прямого разряда (15 кА). Энергия направленного движения электронов пучка составляет 2—30 кэВ. Давление нагретой плазмы в ловушке, измеренное по сигналу диамагнитных витков 11, достигает  $6 \cdot 10^{21} \text{ эВ} \cdot \text{м}^{-3}$  с временем удержания  $2 \cdot 10^{-5}$  с. На расстоянии 1 м от анода прямого разряда энергия пучка составляет 80% энергии, запасенной в конденсаторе, а на расстоянии 2,5 м—25%. При смене полярности напряжения между электродами прямого разряда нагрева плазмы не происходит.

Технические преимущества такого метода нагрева плазмы перед методом непосредственного протекания тока через ловушку состоят в том, что отпадает необходимость ввода в ловушку электродов и появляется возможность широкого и

независимого изменения параметров электронного пучка и нагреваемой плазмы.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 88. Между цилиндрическим магниевым катодом 1 и кольцевым анодом 2 зажигается стационарная вакуумная дуга. Плазма дуги через эмиссионное отверстие 3 проникает в промежуток между стенкой разрядной камеры и электродом 4. При токе дуги 100 А концентрация плазмы составляет  $3 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ .

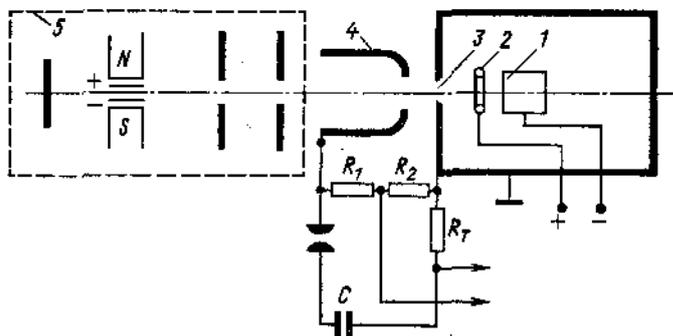


Рис. 88. Схема экспериментальной установки:

1— катод; 2— анод; 3— эмиссионное отверстие; 4— электрод; 5— масс-спектрограф

Электронный пучок с током 1—75 А возникает при подаче на заполненный плазмой промежуток напряжения 0,3—30 кВ положительной полярности относительно разрядной камеры. В зависимости от параметров источника питания наблюдаются устойчивый и неустойчивый (рис. 89) режимы протекания электронного тока. Исследования с помощью масс-спектрографа 5 показали, что в режиме колебаний при достижении некоторого предельного тока пульсаций происходит захват и ускорение ионов плазмы в направлении движения электронов. Энергия ускоренных ионов магния возрастает с увеличением ускоряющего напряжения, концентрации плазмы и диаметра эмиссионного отверстия, достигая 400 кэВ при ускоряющем напряжении 20 кВ. При устойчивом протекании тока ускорение ионов не наблюдается.

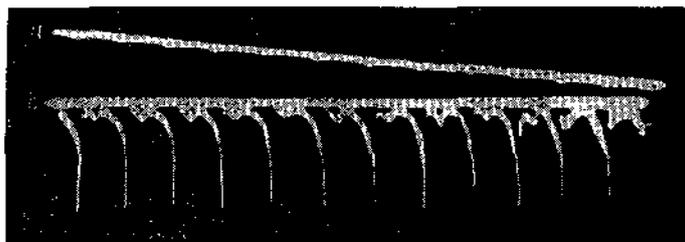


Рис. 89. Оциллограммы напряжения (а) и релаксационных колебаний электронного тока (б)

Сильноточные электронные пучки, которые в настоящее время могут быть обеспечены только ПИЭЛ, рассмотренными в гл. 6, используются для исследования свойств твердых тел. Импульсное облучение тел такими пучками позволяет наблюдать ряд качественно новых эффектов, которые не могут возникнуть при малых мощностях возбуждения. В частности, при использовании ПИЭЛ со взрывной эмиссией, который обеспечивает пучок с плотностью тока до  $2 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ , энергией 350 кэВ и длительностью  $(4 \div 30) \cdot 10^{-9} \text{ с}$ , обнаружено хрупкое разрушение тел за один импульс. Такое разрушение не связано ни с электрическим пробоем, ни с нагревом твердых тел и вызывается неустойчивостью их исходной фазовой структуры при возникновении сверхплотных кооперативных возбуждений в результате облучения мощным электронным пучком.

Способность ПИЭЛ работать при более высоких давлениях газа, чем пушки с термокатодом, обеспечивает простую возможность проведения в газе экспериментов с электронными пучками, у которых требуемая энергия электронов недостаточна для их вывода в газ через фольгу. В гл. 5 описан предназначенный для исследования течений газа ПИЭЛ на основе затрудненного стянутого разряда (см. рис. 46), генерирующий электронный пучок при давлениях до  $2,6 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$ . Использование сравнительно низкого вакуума  $10^{-4} \text{—} 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$  в этом случае облегчает визуализацию траекторий электронов.

В гл. 6 описан ПИЭЛ с плазменным катодом и плазменным анодом (плазменной линзой),

в котором благодаря эмиссии ионов из анодной плазмы и заполнению плазмой анодного отверстия значительно увеличен первеанс и улучшено токопрохождение. Применение такого ПИЭЛ позволяет создать источник мощных импульсов длинноволнового рентгеновского излучения. ПИЭЛ рентгеновской трубки обеспечивает на антикатоде электронный пучок с током 50 кА при ускоряющем напряжении 80 кВ и длительности импульса по основанию  $2 \cdot 10^{-7}$  с при токопрохождении 90%. Источник позволяет получать импульсы тормозного излучения с эффективной энергией 15—20 кэВ и экспозиционной дозой 80 р при мощности доз  $10^9$  р/с.