

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДОВ

### 13. ОБЩИЕ СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДОВ

Рассмотренные выше ПИЭЛ по существу являются обращенными ионными источниками, в конструкции которых внесены усовершенствования, обеспечивающие эффективное извлечение электронов из низковольтного разряда и электрическую прочность ускоряющего промежутка при прохождении в нем электронного пучка. При изменении полярности ускоряющего напряжения такие источники генерируют ионные пучки. Однако существуют ПИЭЛ, которые по принципу действия предназначены в основном для получения электронных пучков. К ним относятся, в частности, источники на основе высоковольтных тлеющих разрядов (см. рис. 1, *г* и *д*). В таких ПИЭЛ электроны самостоятельного газового разряда ускоряются и формируются в пучок в области пространственного заряда того же разряда.

Ограничение разрядного промежутка в осевом или радиальном направлениях при низких давлениях ( $10^3$ — $10^{-1}$  мм рт. ст.) затрудняет достижение на катоде ионного тока, необходимого для поддержания самостоятельного разряда. Условия поддержания такого разряда  $\gamma Q_0 pd = 1$ , совпадающие с условиями зажигания, соответствуют левой ветви кривой Пашена и обеспечиваются при высоких напряжениях горения разряда благодаря увеличению эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии  $\gamma$  с ростом энергии ионов, бомбардирующих катод. Напряжение горения разряда при этом может составлять  $10^4$ — $10^5$  В. Основная часть напряжения обычно сосредоточивается в относительно узкой области, напряженность поля в которой превышает критическое поле Драйзера.

Электроны, попадающие в область с таким полем, переходят от дрейфового движения в режим свободного ускорения и приобретают энергию, практически соответствующую пройденной разности потенциалов. В результате средняя длина их свободного пробега в газе значительно возрастает. Такой газовый разряд можно использовать для получения высокоэнергетичных электронных потоков.

Область сильного поля примыкает в высоковольтном разряде к поверхности, эмиттирующей электроны. В зависимости от того, является ли эмиттером поверхность катода или плазменная граница, различают разряд с плазменным анодом и разряд с плазменным катодом. Плазма в высоковольтном разряде образуется преимущественно в той области разрядного промежутка, куда затруднено проникновение сильного поля, поэтому первый и второй типы разрядов обычно реализуются использованием полых электродов подходящей геометрии. В связи с этим высоковольтный тлеющий разряд с плазменным анодом часто называют высоковольтным разрядом с полым анодом, а высоковольтный тлеющий разряд с плазменным катодом — высоковольтным разрядом с полым катодом.

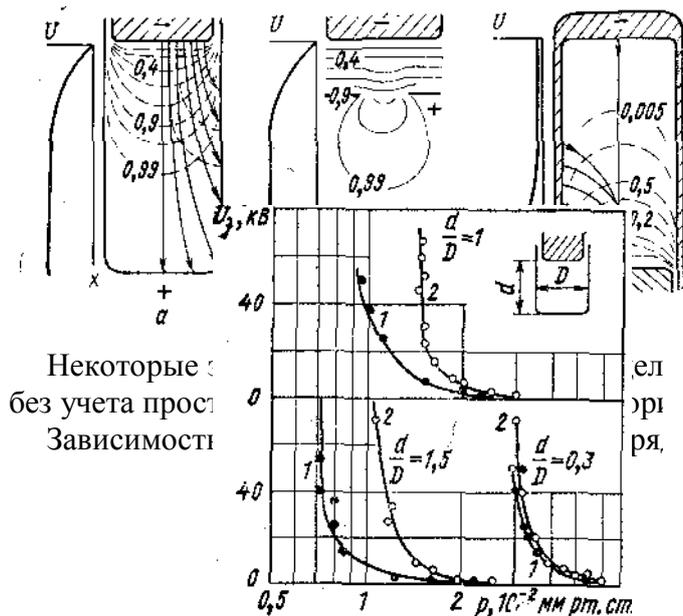


Рис. 35. Электродные системы с неоднородным электрическим полем:

*a* — с полым анодом; *b* — с плоским анодом, имеющим отверстие; *v* — с полым катодом

Некоторые характеристики без учета просвета. Зависимости

Рис. 36. Характеристики зажигания разряда для Cu—воздух: 1 — с полым анодом; 2 — с полым катодом

и потенциала разряда для Cu—воздух: 1 — с полым анодом; 2 — с полым катодом

давления газа (воздуха) дана на рис. 36. С увеличением неравномерности поля, определяемой отношением  $d/D$ , разница между напряжениями зажигания разряда в обеих системах возрастает.

Высоковольтный тлеющий разряд поддерживается за счет ионно-электронной эмиссии катода, а также электронной эмиссии под действием бомбардировки катода быстрыми нейтралами, образовавшимися в результате перезарядки ионов. Кроме того, эмиссия, которая вызвана рентгеновским излучением, возникающим при торможении быстрых электронов на аноде, может иметь определенное значение. Относительный вклад этих процессов и поддержание разряда до настоящего времени исследован недостаточно. В ионизации газа в разряде существенную роль играют электроны, отраженные от анода. Однако в ПИЭЛ, использующих высоковольтный разряд, значительная часть электронного пучка обычно выводится через анодную апертуру за пределы разрядного промежутка, что уменьшает количество отраженных электронов и интенсивность рентгеновского излучения разряда.

Вольт-амперные характеристики систем с полыми катодом и анодом, а также плоскопараллельной системы приведены на рис. 37. Независимость напряжения горения разряда от тока при малых его значениях свидетельствует о том, что в этих условиях искажений электрического поля объемным зарядом незначительно и разряд можно отнести к простейшему тлеющему разряду. При значительных токах положительный объемный заряд усиливает неоднородность поля, что вызывает переход к плотному тлеющему разряду с положительной вольт-амперной характеристикой.

#### 14. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ РАЗРЯД С ПОЛЫМ АНОДОМ

В системе с полым анодом (см. рис. 35, а) область сильного поля находится вблизи катода. Аналогичное распределение поля возникает в приосевой области плоскопараллельного промежутка с отверстием в аноде (см. рис. 35, б). Электроны, эмиттированные катодом,

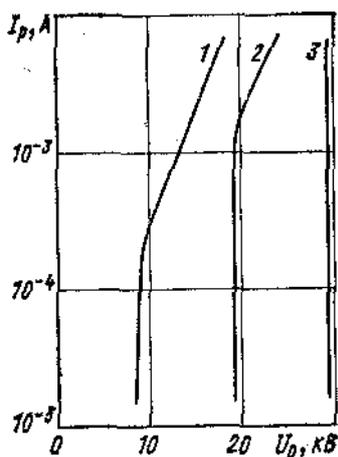


Рис. 37. Вольт-амперные характеристики высоковольтного тлеющего разряда:

1 — с полым анодом; 2 — с полым катодом;  
3 — с плоскими электродами

приобретают в прикатодном пространстве значительную скорость вдоль оси системы, в результате чего траектории большинства из них почти прямолинейны, несмотря на дефокусирующее действие анодной апертуры. Ионы не могут приобрести больших скоростей вследствие большого сечения перезарядки и двигаются вблизи силовых линий. При низких давлениях условия зажигания и поддержания разряда выполняются лишь вдоль длинных электронных путей, совпадающих с наибольшим расстоянием между электродами. Это приводит к локализации разряда в приосевой области и образованию слабо расходящегося электронного пучка. Расчетные оценки показывают, что в типичных для ПИЭЛ условиях ослабление электронного пучка на пути от катода к аноду составляет 1—4%. Исследование энергетического распределения электронов в пучке разряда с полым анодом показало, что максимум кривой распределения практически соответствует приложенному напряжению и при 20 кВ отстает от него не более чем на 30 эВ. В некоторых случаях наблюдается небольшой второй пик, отстоящий от первого на потенциал ионизации рабочего газа. Для напряжений выше 10 кВ разброс электронов пучка по

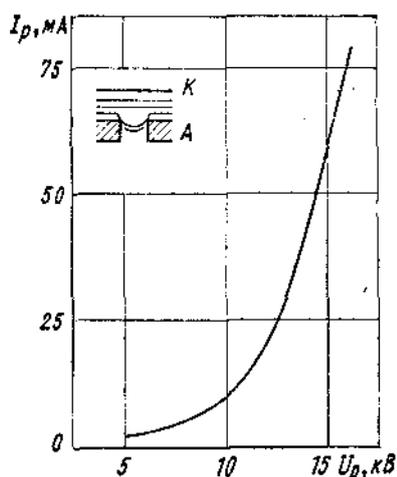
энергиям составляет менее 1% максимальной энергии.

В системе с полым анодом с ростом тока (кривая 1, рис. 37) поле вследствие увеличения пространственного заряда еще сильнее стягивается к катоду. В результате прикатодная область с плоским полем расширяется в радиальном направлении и уменьшается провисание поля в анодную полость. Влияние пространственного заряда на электронный пучок определяется совокупным действием этих двух факторов: уменьшением дефокусирующего действия провисающего поля и расширением пучка за счет увеличения рабочей области катода. При этом в анодной полости образуется плазма, которая является эмиттером ионов. Эти ионы поддерживают разряд и определяют ток и рабочую область катода. Ток электронного пучка в общем случае определяется эмпирическим соотношением

$$I = BU^m p^n, \quad (41)$$

где  $B$ ,  $m$  и  $n$  — постоянные, зависящие от материала катода, типа газа и геометрии.

На рис. 38 представлена типичная вольт-амперная характеристика разряда с полым анодом. Эта характеристика получена при условиях, когда на горение разряда оказывает существенное влияние искажение поля пространственным зарядом.



**Рис. 38.** Вольт-амперная характеристика разряда с полым анодом для Al — воздух,  $r = 4,4 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.

Если разрядный промежуток в радиальном направлении ограничен диэлектрическими стенками, это оказывает влияние на высоковольтный разряд аналогично металлическим стенкам полого анода, т. е. приводит к стягиванию разряда к оси за счет неоднородного поля. Если при этом диэлектрический канал будет достаточно узким, т. е. его диаметр соизмерим с длиной свободного пробега частиц, увеличение потерь частиц в результате их ухода на стенки канала приведет к дополнительному стягиванию разряда и повышению напряжения его горения. Расположение канала в начале области отрицательного свечения также вызывает увеличение сопротивления разряда. При этом стянутый затрудненный разряд может существовать и генерировать высокоэнергетичный электронный пучок при более высоком давлении, чем высоковольтный тлеющий разряд без диэлектрического сужения.

## 15. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ РАЗРЯД С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Высоковольтный тлеющий разряд с полым катодом реализуется в системе, изображенной на рис. 35, в, в которой большинство ионов, двигаясь по силовым линиям поля, попадает на боковую поверхность катода, а электроны, эмиттированные этой частью катода, образуют вблизи анода сходящийся электронный пучок. Электроны проходят путь, меньший наибольшего расстояния между электродами, в результате чего разряд не может развиваться вдоль оси. Это приводит к росту напряжения зажигания разряда в системе с полым катодом по сравнению с системой с полым анодом (см. рис. 36). Кроме того, высоковольтный разряд с плазменным катодом обладает большей склонностью к переходу в низковольтный режим, чем разряд с плазменным анодом. Однако, несмотря на указанные недостатки, специфические формы высоковольтного разряда с полым катодом, имеющим малую

выходную апертуру, нашли применение в ПИЭЛ.

Выше были рассмотрены случаи использования в ПИЭЛ низковольтных разрядов с полыми катодами, которые обеспечивали плотность тока в апертуре катодной полости, значительно превышающую плотность тока эмиссии ее стенок. Возбуждение разрядов с полым катодом, имеющим малую выходную апертуру, обычно осуществляется предварительным созданием в катодной полости плазмы с помощью вспомогательного электронного пучка, внешнего ВЧ-поля или вспомогательного разряда между внешней стенкой полости и анодом. Во всех случаях самоподдерживающийся разряд с полым катодом может существовать лишь с током, при котором выполняется соотношение (31). Условия зажигания разряда облегчаются, а ток разряда возрастает, если вместо сплошной металлической полости с одним отверстием использовать сетчатую полость с ячейками, меньшими выходной катодной апертуры. Установлено, что тлеющий разряд с сетчатым полым катодом может существовать в высоковольтной форме, когда катодная полость заполнена плазмой. Сфокусированный электронный пучок с мощностью, составляющей существенную часть мощности разряда, образуется вдоль оси катодной апертуры, площадь которой значительно превосходит площадь ячеек сетки. Схема установки с таким разрядом и фотография свечения разряда приведены на рис. 39. Анодом разряда служат стенки камеры и обрабатываемая деталь.

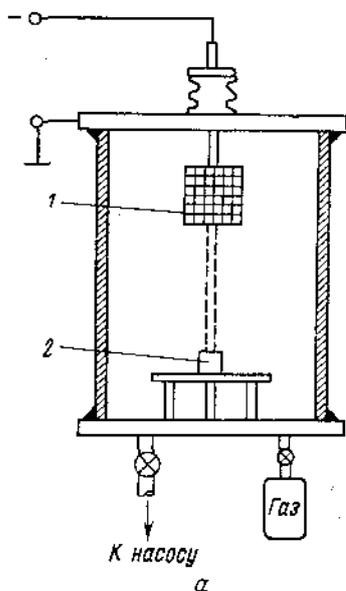
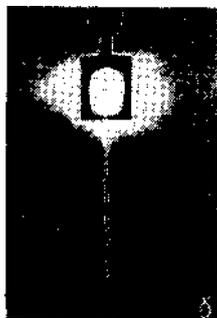


Рис. 39. Схема установки с полым катодом (а) и фотография разряда в нем (б):

1 — катод; 2 — мишень (анод)



Высоковольтный разряд с электронным пучком существует при тех же давлениях ( $10^{-3}$ —1 мм рт. ст.), что и обычный тлеющий разряд. Возникновение конкретной формы разряда зависит от начальных условий. Повышение в определенных пределах давления приводит к возрастанию тока пучка высоковольтного разряда. Однако при слишком высоких давлениях пучок начинает рассеиваться на газе, и разряд переходит в низковольтную форму. Высоковольтный лучевой разряд реализуется со сферическими сетчатыми катодами, с катодами в виде сетчатых цилиндров с осью, параллельной и перпендикулярной оси пучка, с катодами в виде полых цилиндров, имеющих сплошную цилиндрическую поверхность и сетчатые торцы, и т. д.

Зондовые измерения параметров плазмы внутри полости показали, что плазма имеет положительный потенциал  $U_{\text{п}}=(100\text{—}400)$  В относительно стенок катода. Плазма в полости поддерживается в основном за счет ионизации газа электронами, которые эмиттируются внутренней поверхностью холодных витков сетки и ускоряются в прикатодной области разностью потенциалов  $U_{\text{п}}$ . Выход электронов через малые ячейки сетки за пределы полости затруднен тем, что прикатодные оболочки объемного заряда смыкаются перед ячейками и отражают поступающие из плазмы электроны. Это приводит к значительному повышению плотности плазмы в катодной полости по сравнению с плотностью в промежутке между

катодом и анодом.

Суммарная площадь ячеек сетки значительно превышает площадь апертуры катодной полости. Тем не менее, электронный пучок, выходящий через апертуру, переносит существенную часть тока разряда. Это объясняется тем, что радиус апертуры превышает протяженность прикатодного пространства в ней. Электроны, покидающие полость через ячейки сетки и выбитые ионами с ее внешней поверхности, ускоряются высоким напряжением и ионизируют газ в промежутке между катодом и камерой. Бомбардировка электронами стенок камеры вызывает ее нагрев и рентгеновское излучение. Образовавшиеся за катодом ионы ускоряются в направлении катодной полости и, проходя через ее ячейки, играют существенную роль в эмиссионном механизме полого катода. Определенный вклад в эмиссию катода вносит рентгеновское излучение со стенок камеры. Значительная плотность тока электронного пучка, выходящего через апертуру катодной полости, приводит к стягиванию поля к апертуре, что увеличивает длину свободного пробега электронов и повышает фокусирующую роль сетчатой поверхности вблизи апертуры.

Влияние проницаемости сетки полого катода на характеристики разряда исследовалось в работах. Выявлено, что с увеличением проницаемости разряд обеспечивает больший ток, но при меньшем давлении переходит в низковольтный режим. Вольт-амперные характеристики разряда со сферическим сетчатым катодом диаметром 5 см в отсутствие выходного отверстия описываются эмпирическим уравнением

$$I = 7200(U / 120)^{4,8 p^{-b}} \text{ мА}, \quad (42)$$

где  $U$ — напряжение, кВ;  $p$ — давление, мкм рт. ст.;  $b$ — коэффициент, зависящий от проницаемости сетки  $D$ . Значения  $b$  при разных проницаемостях представлены в табл. 5.

Таблица 5

$D$	0,000	0,302	0,379	0,474	0,508
$b$	0,282	0,312	0,330	0,344	0,345

Ток разряда с сетчатым катодом увеличивается по сравнению с током разряда со сплошным сферическим катодом, несмотря на тормозящее действие прикатодных областей, за счет того, что электронная эмиссия из полости через ячейки сетки более интенсивна, чем ионно-электронная эмиссия с наружной поверхности витков сетки. Другими словами, коэффициент ионно-электронной эмиссии плазмы  $\gamma_p$  (количество эмиттированных плазмой электронов, приходящихся на один ион, поступающий в полость) превышает коэффициент ионно-электронной эмиссии материала сетки  $\gamma$ . Это можно объяснить большой ионизирующей способностью электронов, выбитых быстрыми ионами из сетки внутри полости. Кроме того, в результате роста электронного тока в промежутке между катодом и анодом плотность ионного тока увеличивается на величину  $\Delta j_i$  по сравнению с плотностью  $j_i$  в разряде со сплошным катодом, что также приводит к росту тока разряда с сетчатым катодом. Учет этих двух факторов приводит к следующему выражению для относительного увеличения тока разряда с сетчатым катодом:

$$(I_{cem} / I_{cпл}) = [1 + (\Delta j_i / j_i)] \{1 - D + D[(1 + \gamma_p) / (1 + \gamma)]\}. \quad (43)$$

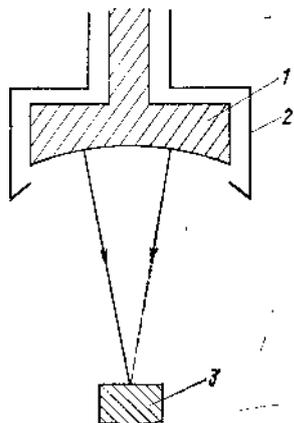
Анализ экспериментальных данных, которые относятся к разряду с полым цилиндрическим катодом, закрытым с торца сеткой, показал, что при малых проницаемостях сетки ( $D \leq 30\%$ )  $\Delta j_i / j_i \ll 1$  и увеличение тока с ростом проницаемости происходит в основном за счет роста величины  $\gamma_p$ . Для медного катода при работе с He, Ne, Ar значения  $\gamma_p$  в 5—20 раз превышают значения  $\gamma$  для меди. При этом увеличение ионного тока составляет  $\Delta j_i / j_i = 10—20\%$  при  $D = 30\%$ . Установлено, что плотность плазмы в катодной полости возрастает с увеличением проницаемости сетки при постоянных значениях напряжения и давления газа. Рост степени ионизации и коэффициента ионно-электронной эмиссии плазмы

происходит значительно быстрее, чем увеличение проницаемости сетки. Изменение проницаемости с 38 до 47% вызывает увеличение плотности плазмы на 70%.

## 16. ПИЭЛ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА С АНОДНОЙ ПЛАЗМОЙ

Среди ПИЭЛ с высоковольтным тлеющим разрядом наибольшее распространение получили источники, в которых электроны, образующие пучок, эмитируются холодным катодом, ускоряются и фокусируются в области катодного падения, а ионы, вызывающие ионно-электронную эмиссию катода, поступают в область катодного падения из прианодной плазмы. Поскольку зажигание и локализация разряда во многих ПИЭЛ с анодной плазмой происходит благодаря провисанию электрического поля в апертуру плоского анода или в анодную полость, их часто называют электронными источниками с полым анодом.

ПИЭЛ с анодной плазмой служили первыми источниками электронов в катодно-лучевых трубках, широко применявшихся в экспериментальной физике со второй половины прошлого века. Значительно усовершенствованные ПИЭЛ с высоковольтным разрядом использовались до 30-х годов в рентгеновских и осциллографических трубках. С 60-х годов источники этого типа разрабатываются в основном применительно к задачам электронно-лучевой технологии.



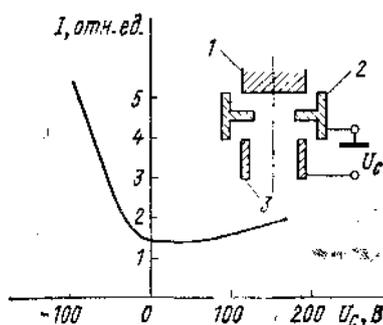
**Рис. 40.** Схема электродов импульсного источника электронов:

1 — катод; 2 — анод; 3 — мишень

Схема электродов ПИЭЛ для получения импульсного электронного пучка большой мощности приведена на рис. 40. В источнике использован неохлаждаемый дисковый катод диаметром 50 мм с вогнутой сферической поверхностью, имеющей радиус кривизны 75 мм. Анод охватывает катод и имеет апертуру диаметром 33 мм. Внешние зазоры длиной 5 мм между электродами достаточно малы, чтобы избежать зажигания в них разряда, но достаточно велики, чтобы предотвратить вакуумный пробой. В качестве рабочего газа использовался водород при давлении 0,1 мм рт. ст. Источник испытывался на импульсах длительностью  $(1\div 3)10^{-4}$  с с частотой повторения 5 Гц. При напряжении 20 кВ ток пучка составлял 2 А.

Вогнутый катод обеспечивает необходимую сходимость электронного пучка. Поскольку протяженность области катодного падения значительно меньше радиуса кривизны катода, большинство ускоренных электронов проходит вблизи центра кривизны, образуя сфокусированное пятно диаметром около 1 мм. Положение фокального пятна не зависит от напряжения в диапазоне 5—27 кВ и тока в пределах 0,2—2 А. Доля потребляемой разрядом мощности, которая переносится на мишень электронным пучком, зависит от эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода  $\gamma$ . При алюминиевом катоде ( $\gamma \approx 10$ ) мощность пучка составляет 75% мощности разряда, а при медном ( $\gamma \approx 2,5$ )—50%.

Управление током пучка в ПИЭЛ с высоковольтным тлеющим разрядом при постоянном



**Рис. 41.** Зависимость тока высоковольтного разряда от потенциала управляющего электрода:

1 — катод; 2 — анод; 3 — управляющий

разрядном напряжении осуществляется воздействием на плотность анодной плазмы с помощью изменения давления газа или потенциала управляющего электрода, помещенного в плазму. Вследствие инерционности первого способа часто используются источники с управляющим электродом. Типичная зависимость тока высоковольтного разряда от потенциала управляющего электрода относительно анода дана на рис. 41. При положительном потенциале между анодом и управляющим электродом может зажегаться несамостоятельный разряд, который увеличивает плотность плазмы, а, следовательно, и поток ионов к катоду. При отрицательной полярности, которая обеспечивает обычно более эффективное управление, плотность плазмы растет за счет ионизации газа электронами, выбитыми ионами из управляющего электрода и колеблющимися вдоль оси относительно анода. Крутизна управляющей характеристики ПИЭЛ увеличивается при уменьшении апертуры управляющего электрода, приближении его к аноду и изготовлении из материалов, которые эффективны в качестве катодов отражательного разряда, например алюминия. Мощность, затрачиваемая на управление, составляет 1% полной мощности.

Конструкция ПИЭЛ с полым анодом, управляющим электродом и магнитной линзой приведена на рис. 42. Разрядная система источника образована алюминиевым катодом со сферическим углублением в центре и полым медным анодом, охватывающим катод. За анодом помещен цилиндрический управляющий электрод, который при постоянных напряжении разряда и давлении газа позволяет изменять ток пучка в 3-5 раз. Рабочее давление при заданных токе и напряжении зависит от вида рабочего газа, в качестве которого использовали воздух, азот, аргон, водород, гелий. При напряжении 20—30 кВ вид газа оказывает слабое влияние на к. п. д. ПИЭЛ, который достигает 85—90%. Катод источника, на котором выделяется 8—10% подводимой мощности, имеет принудительное воздушное охлаждение. ПИЭЛ обеспечивает пучок с током до 0,1 А при напряжении 30 кВ с удельной мощностью в фокальном пятне  $5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

Так как в ПИЭЛ с высоковольтным разрядом ускоренные электроны имеют относительно малый разброс по скоростям, эти источники можно использовать для получения пучков с большой яркостью и высокой плотностью мощности. Схема ПИЭЛ, в которой реализована эта возможность, приведена на рис. 43. Основными особенностями источника являются:

1) применение катода с малой эмигрирующей поверхностью, которая обеспечивается малой анодной апертурой диаметром 3,2 мм;

2) использование вблизи катода сетчатого электрода, имеющего потенциал катода.

Изменяя расстояние между катодом и этим электродом, можно управлять конфигурацией электрического поля в прикатодной области, от которой зависит расходимость электронного пучка;

3) снабжение катода вращающим устройством;

4) питание разряда выпрямленным напряжением с малыми пульсациями (0,3%), что уменьшает aberrации при фокусировке пучка магнитной линзой.

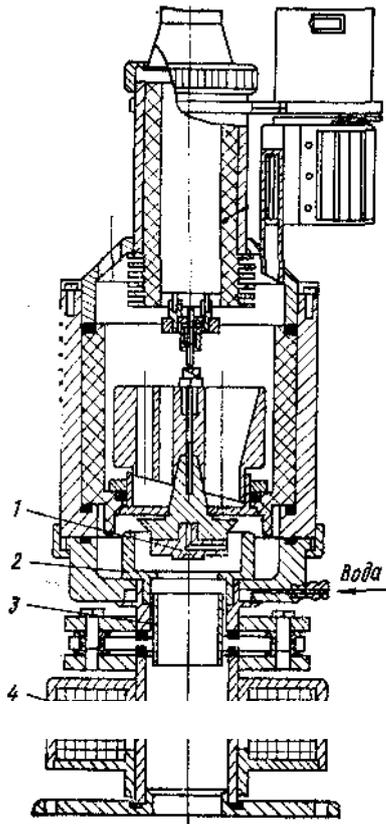


Рис. 42. ПИЭЛ с полым анодом:

1— катод; 2— анод; 3— управляющий электрод; 4— линза

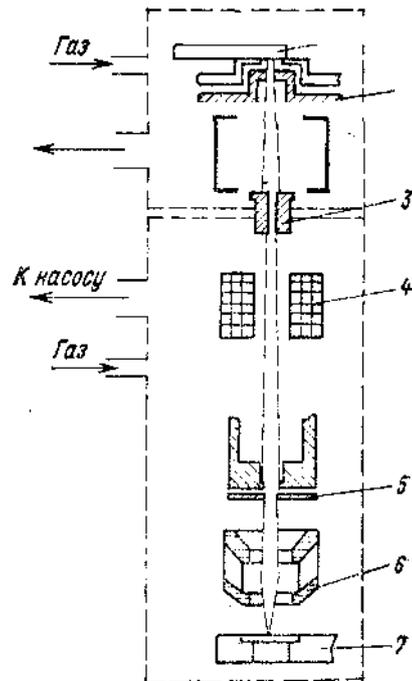
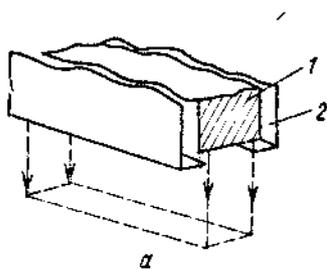


Рис. 43. Схема ПИЭЛ для получения тонкого электронного пучка:

1— катод; 2— анод; 3— диафрагма; 4— отклоняющая линза; 5— диафрагма; 6— фокусирующая линза; 7— мишень

В источнике использована дифференциальная откачка газа из разрядной камеры и электронно-оптического тракта, которые разделены диафрагмой диаметром 2 мм и длиной 20 мм. Для уменьшения рабочего давления при малой анодной апертуре плотность анодной плазмы повышается с помощью полого вспомогательного электрода, который служит также для управления током пучка. Давление в разряде составляет  $3 \times 10^{-2}$  мм рт. ст. на воздухе и  $1 \times 10^{-3}$  мм рт. ст. в вакууме.

С  
С  
Г  
И  
И  
Г  
И  
Я



Г  
К<sup>2</sup>

Рис. 44. Схемы электродных систем [88]:

а— для формирования ленточного пучка; б— для формирования кольцевого пучка; 1— катод; 2— анод; 3— мишень

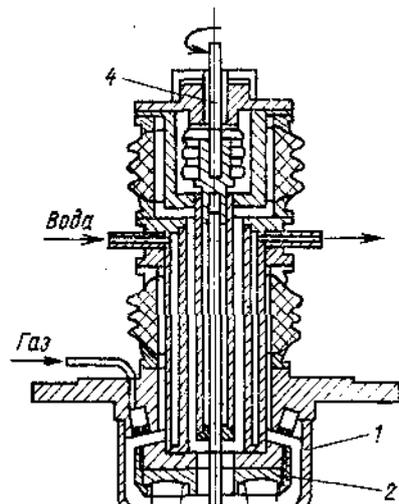


Рис. 45. ПИЭЛ с трубчатым пучком [102]:

1— анод; 2— катод; 3— анодный диск; 4— регулировочный винт

при напряжении 30 кВ около 120 мкА (5 мкм, остальные 200 мкА в апертуре пучка 40 мкм диаметр). Плотность тока при этом 1 мА/см<sup>2</sup>. Мощность и яркость связаны с плотностью ионов в миллиарды раз. Возможность создания ПИЭЛ с мощностью 7 Вт/см<sup>2</sup>.

в вакууме разряда— возможность выбора конфигурации, в том числе

Рис. 46. ПИЭЛ с затрудненным стяннутым разрядом [89]:

Вс

1— катод; 2— анод; 3— кварцевый изолятор

35, б) можно сформировать более сложные системы, электрическое поле в которых поддерживает разряд в области, определяющей форму поперечного сечения и сходимости пучка. Схемы электродных систем для формирования ленточного и кольцевого пучков даны на рис. 44, а конструкция газоразрядной электронной пушки с трубчатым пучком — на рис. 45.

Возможность использования для получения электронного пучка разряда, высокое сопротивление которого обусловлено не только малой протяженностью межэлектродного промежутка, но и ограничением канала разряда диэлектрическим сужением, реализована в ПИЭЛ, конструкция которого показана на рис. 46. Основными элементами источника являются плоский катод 1 из нержавеющей стали, армированный кварцевой трубкой, охлаждаемый анод 2 с выходным отверстием диаметром 1,8 мм и кварцевый изолятор 3, имеющий на конце сужение, за счет которого происходит стягивание разряда. Источник обеспечивает пучок с током до 30 мкА при разрядном токе 20 мА, напряжении 20 кВ и давлении воздуха  $5,7 \cdot 10^{-2}$ — $2,6 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст. Расходимость пучка на выходе из источника — менее  $1^\circ$ .

При использовании электродов, не вызывающих стягивания разряда, высоковольтный тлеющий разряд с анодной плазмой может служить для получения электронных пучков с большим поперечным сечением и относительно равномерным распределением плотности тока по сечению [106, 107]. Области применения таких пучков, выявившиеся в последние годы, рассмотрены в гл. 8.

Схемы электродов и источника питания ПИЭЛ с плоскими алюминиевыми электродами, расположенными на расстоянии 5—15 см в стеклянном цилиндре диаметром 250 мм, приведены на рис. 47. При пробое искрового разрядника *P* между электродами ПИЭЛ зажигается высоковольтный тлеющий разряд, переходящий в дугу. Длительность стадии высоковольтного разряда зависит от напряжения и тока, определяемого давлением и видом газа. При давлении  $10^{-2}$  мм рт. ст., напряжении 150 кВ и плотности тока более  $1 \text{ А/см}^2$  высоковольтный разряд существует не более 20 мкс, а при напряжении 120 кВ переходит в дугу через 100 мкс. При этом ток разряда достигает 200 А. Время нарастания тока не превышает 1 мкс. Вольт-амперные характеристики разряда для разных газов и давлений даны на рис. 48. Измерения с помощью зондов, установленных за фольгой, через которую электронный пучок выпускался из разрядного промежутка, показали, что электроны пучка имеют энергию, приблизительно соответствующую разрядному напряжению.

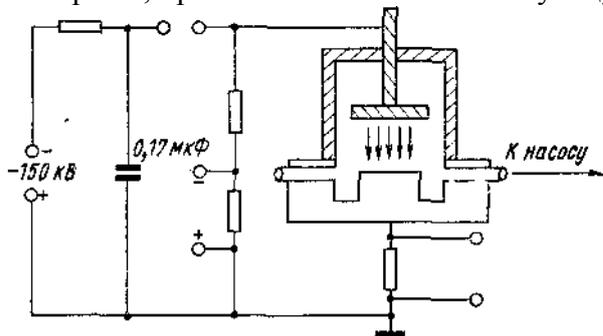


Рис. 47. Схема ПИЭЛ с плоскими электродами для получения широкого пучка [107]

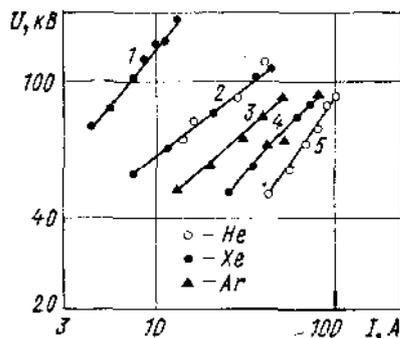


Рис. 48. Вольт-амперные характеристики разряда [107]:

1— Xe,  $p=10^{-3}$  мм рт. ст.; 2— Xe,  $p=1,4 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; He,  $p=4,6 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; 3— Ar,  $p=6,6 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; 4— Xe,  $p=1,8 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; Ar,  $p=1,1 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.; 5— He,  $p=7 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.

Основными причинами, ограничивающими ресурс ПИЭЛ на основе высоковольтного

тлеющего разряда с анодной плазмой, являются катодное распыление и возникновение пробоев. Эрозия катода в результате распыления приводит к расширению сфокусированного электронного пучка, которое происходит вследствие образования катодного кратера, вызывающего изменение конфигурации электрического поля так же, как это происходит в мощных пушках с термокатодом. Кроме того, в отличие от пушек с термокатодом, работающих в режиме ограничения тока пространственным зарядом, пучок ПИЭЛ расширяется за счет изменения рельефа вначале гладкой катодной поверхности, которая под действием ионной бомбардировки становится шероховатой. Уменьшение плотности мощности в пучке с точечным фокусом в некоторых случаях может ограничить ресурс ПИЭЛ до 10 мА·ч. Эти ограничения уменьшаются с помощью катодов из материалов с малым коэффициентом катодного распыления, например, алюминия и легких рабочих газов. Вращение катодов применяют для замены сработавшего участка новым. Скорость расширения пучка уменьшается во время работы пушки. Это позволяет стабилизировать его диаметр путем использования катодов, имеющих форму, близкую к той, которая образуется при длительной работе. Применение сферического катода с небольшим центральным углублением в 5 раз увеличивает ресурс ПИЭЛ, оцениваемый по времени, в течение которого диаметр пучка возрос на 10%.

Пробой в ПИЭЛ обусловлен переходом высоковольтного тлеющего разряда в низковольтную дугу с большим током. Дугообразование вызывается загрязнением катода парами рабочей жидкости насосов, диэлектрическими включениями в материал катода и образованием микронеровностей в результате катодного распыления. Дуги возникают там, где имеются диэлектрические включения, которые подвергаются действию плазмы. Загрязнение поверхности катодов происходит в результате поверхностной миграции органических веществ. Скорость миграции значительно увеличивается при слабой ионной бомбардировке. Это вызывает наблюдавшееся в ряде работ преимущественное возникновение дуг на периферийных частях катодов, где интенсивность катодного распыления недостаточна для очистки катодов. Использование катодов, нагретых до 200—300° С, уменьшает вероятность перехода тлеющего разряда в дугу. Дугообразованию препятствует также включение последовательно с ПИЭЛ ограничительного сопротивления.

## 17. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Высоковольтный тлеющий разряд с полым катодом также используется в ПИЭЛ. Схема установки с таким источником показана на рис. 49. ПИЭЛ этого типа отличаются между собой в основном конструкцией и размерами полого катода. Конструкции катодов показаны на рис. 49, а параметры пучков, обеспечиваемых ими, приведены в табл. 6.

Для фокусировки пучка участок сетчатой поверхности вблизи выходного отверстия делают вогнутым. Кроме того, может использоваться электростатическая линза, образуемая

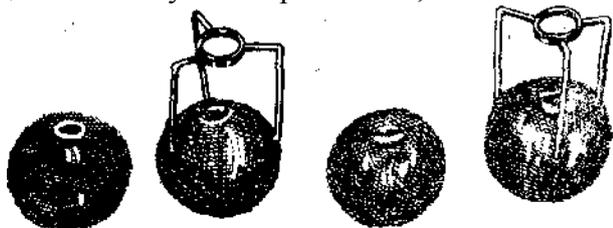


Рис. 49. Конструкции полых сферических катодов

между полостью и специальным кольцом (см. рис. 49). Дальнейшего улучшения фокусировки и стабилизации электронно-оптических свойств ПИЭЛ можно достигнуть при использовании вместо выходного отверстия дополнительной вогнутой сетки с большей проницаемостью, чем остальная часть полости. Действие вогнутой поверхности в этом случае подобно действию вогнутого катода в источниках с анодной плазмой (см. рис. 40).

Таблица 6

Форма катодов	Диапазон давления газа, мм рт. ст.	Мощность пучка, Вт	Характеристика пучка	Примечание
Простая сфера	$(5—300) \cdot 10^{-3}$	75	Пучок с переменным фокусным расстоянием	Сильная чувствительность к давлению и напряжению
Сфера с кольцом	$(20—50) \cdot 10^{-3}$	2000	Фокусировка изменением потенциала кольца	Меньшая чувствительность к давлению и напряжению
Сфера с вогнутым участком	$(2—50) \cdot 10^{-3}$	2000	Фокусировка изменением давления	Сильная чувствительность к давлению и напряжению
Сфера с вогнутым участком и кольцом	$(2—50) \cdot 10^{-3}$	5000	Регулируемое фокусное расстояние обычно малое	Сравнительно малая чувствительность к малым изменениям давления и напряжения

Мощность ПИЭЛ ограничивается нагревом и распылением сетчатой полости. Для более равномерного распределения ионного потока по поверхности катода вблизи катодной апертуры может использоваться электростатическая рассеивающая линза.

В ПИЭЛ с полым катодом пучок образуется из электронов, эмиттированных плазмой вблизи катодного отверстия. Положение и форма эмиттирующей плазменной поверхности определяются геометрией отверстия, плотностью плазмы и катодной полости, толщиной прикатодного слоя внутри полости, а также приложенным напряжением и в некоторой степени не зависят от размеров полого катода и поверхности, подвергающейся ионной бомбардировке. Это выгодно отличает ПИЭЛ такого типа от источников с полым анодом, в которых рост плотности тока связан с увеличением интенсивности ионной бомбардировки, а следовательно, и эрозии катода, что оказывает влияние на электронно-оптические свойства ПИЭЛ.

В работе исследовался ПИЭЛ с катодом, выполненным в виде сетчатого цилиндра, закрытого с торцов пластинами, в одной из которых имелось выходное отверстие. Проницаемость сетки такого катода не оказывает большого влияния на параметры пучка, но облегчает возбуждение высоковольтной формы разряда. Напряжение горения разряда составляет 15—20 кВ при давлении газа  $(5—10) \cdot 10^{-3}$  для аргона и  $(5—10) \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. для гелия и водорода. Ток пучка зависит от размеров катода и ограничивается разогревом кромок выходного отверстия при ионной бомбардировке. Наибольший из испытывавшихся катодов имеет диаметр 76, длину 10,2 мм, выходное отверстие диаметром 8 мм и обеспечивает в аргоне ток более 1 А. Для управления током пучка используется дополнительный сетчатый цилиндр с открытыми торцами, установленный внутри катодного цилиндра. Катод и управляющий электрод длиной 37 и 29 мм соответственно имеют диаметры 29 и 22 мм. Диаметр выходного отверстия составляет 6,4 мм. Проницаемость сетки— 30%. Зависимости тока пучка и тока управляющего электрода от разности потенциалов между управляющим электродом и катодом при напряжении горения разряда 10 кВ и давлении аргона  $7 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. приведены на рис. 50. Как следует из характеристик, мощность управления не превышает 1 Вт. При отрицательном смещении более 10 В ток пучка становится минимальным, что можно объяснить отсечкой электронов, эмиттируемых внутренней поверхностью катода. Ток

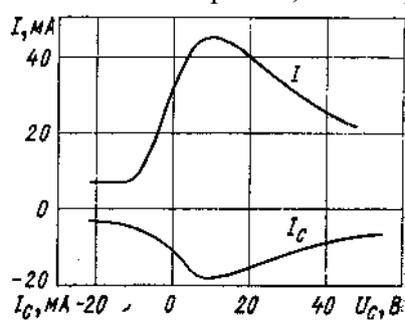
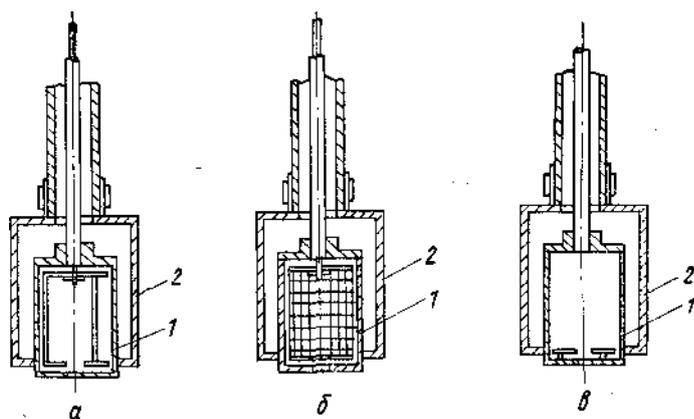


Рис. 50. Характеристики сеточного управления током [95]:

$I$  — ток пучка;  $I_c$  — ток управляющего электрода

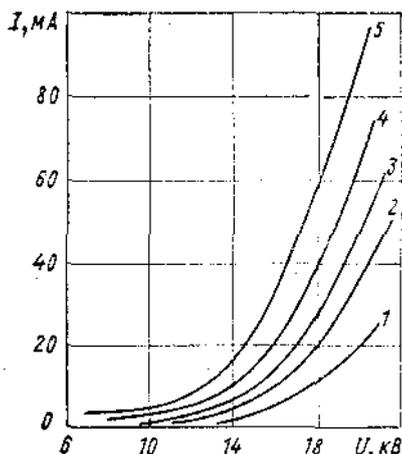
пучка при положительном потенциале управляющего электрода уменьшается в результате перехвата электронов плазмы этим электродом. Одним из недостатков такого метода управления является зависимость формы пучка от управляющего напряжения при больших токах. Для поддержания требуемой формы пучка в широком диапазоне токов было предложено использовать катод, состоящий из двух concentричных цилиндров со сплошными стенками и соосными выходными отверстиями.

Утечка электронов из разряда через ячейки обычного сетчатого катода вызывает значительные потери мощности и приводит к нагреву стенок камеры. Этот недостаток можно устранить, если полый катод делать со сплошными стенками с выходной апертурой и окружить заземленным металлическим экраном для подавления разряда на внешнюю часть катода (рис. 51, а). Вольт-амперные характеристики ПИЭЛ с экранированным катодом показаны на рис. 52. Увеличение сопротивления разряда с таким катодом достигается с помощью вспомогательных электродов, установленных внутри полого катода. Конструкции трех экранированных катодов со вспомогательными электродами показаны на рис. 51. При включении между катодом и вспомогательным электродом переменного сопротивления



**Рис. 51.** Конструкции экранированных полых катодов:

1 — катод; 2 — экран



возможно плавное управление током пучка. Добавление к кольцевому управляющему электроду внутреннего сетчатого цилиндра (см. рис. 51, б) позволяет уменьшить управляющее напряжение, но повышает нелинейность характеристики управления, которая качественно подобна показанной на рис. 50. Поскольку максимальный ток пучка экранированного катода соответствует потенциалу управляющего электрода, близкому к катодному, для повышения стабильности высоковольтного разряда можно использовать вспомогательный электрод, соединенный электрически с катодом (см. рис. 51, в).

Того же эффекта можно достигнуть с помощью эмиссионного капала длиной, равной расстоянию между выходным отверстием и вспомогательным кольцевым электродом. Кроме того, стабилизации разряда способствует включение последовательно с ПИЭЛ большого балластного сопротивления. Мощность пучка в источнике с сетчатым катодом диаметром 22 мм составляет 30—50% затрачиваемой мощности, а в источнике с экранированным катодом — 60—70%. Эффективность катодов возрастает с увеличением их диаметра. На характеристики ПИЭЛ влияет расстояние от катода до стенок вакуумной камеры. Когда это расстояние становится меньше протяженности катодного падения потенциала, ток резко возрастает с увеличением напряжения и пучок становится нестабильным. Минимальные радиальное и осевое расстояния от стенок до выходного катодного отверстия возрастают с увеличением массы атомов рабочего газа. При работе в водороде и гелии диаметр стеклянной вакуумной камеры не превышает 10 см, тогда как для аргона требуется камера диаметром 25 см. То же относится и к осевым размерам. Диэлектрические камеры позволяют использовать меньшие промежутки, чем металлические.

На основе экранированного полого катода разработан ПИЭЛ с напряжением горения разряда до 170 кВ. Его конструкция дана на рис. 53. В качестве изолятора используется секционированная колонка из восьми стеклянных колец диаметром 200 и высотой 38 мм.

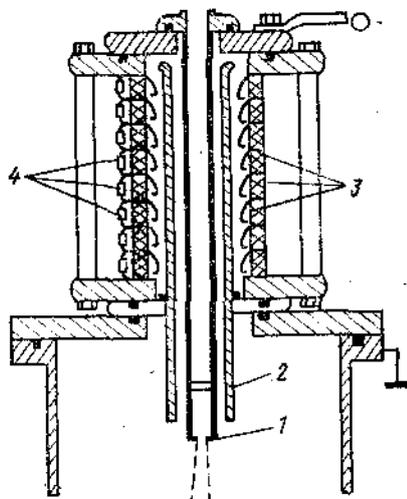


Рис. 52. Вольт-амперные характеристики для газа—  
Ar

Рис. 53. ПИЭЛ с экранированным полым катодом:

1— полый катод; 2— экран; 3— изолирующие кольца; 4— ограничительные резисторы

Для выравнивания поля служит активный делитель напряжения, сопротивления которого подключаются между секциями изолятора. Внутренние высоковольтные промежутки не превышают 13 мм, что исключает длинные пути заряженных частиц и препятствует зажиганию в этих промежутках разряда. Рабочее давление аргона составляет  $(2—5) \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. Последовательно с источником подключается сопротивление  $5 \cdot 10^5$  Ом. В табл. 7 приведена зависимость тока разряда и тока пучка от напряжения.

ПИЭЛ с полым катодом могут работать на различных газах, однако от вида газа зависит рабочий диапазон давлений и характеристики источника. В инертных газах диапазон более узкий, чем в воздухе. ПИЭЛ с сетчатым цилиндрическим катодом не мог удовлетворительно работать на аргоне и обеспечивал требуемый пучок только на гелии. В аргоне происходит значительный нагрев стенок камеры. Это, возможно, объясняется тем, что при использовании более тяжелого газа толщина прикатодного слоя внутри полости становится соизмеримой с размерами ячеек, что вызывает значительную утечку электронов из полости через ячейки.

Для устойчивого горения высоковольтного разряда с полым катодом необходима стабилизация давления и использование значительных ограничительных сопротивлений. Чистота катода не влияет на характеристики разряда при длительном его горении вследствие самоочистки катода в разряде.

**Таблица 7**

Напряжение, кВ	Общий ток, мА	Ток луча, мА
110	21	14
150	38	24
155	36	24
169	12	5