

Г.31 6
**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

И Я Ф 40 - 71

Ю.И.Геллер, Г.И.Димов, Г.В.Росляков

**СЕЧЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ПЕРЕЗАРЯДКИ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ГАЛОГЕНОВ**

Новосибирск

1971

Ю.И.Геллер, Г.И.Димов, Г.В.Росляков

СЕЧЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ПЕРЕЗАРЯДКИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ГАЛОГЕНОВ

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты измерений сечений перезарядки и
разрушения отрицательных ионов галогенов в области энергий
30 - 3000 эв на мишенях. $O_2, NO_2, CO_2, J_2, Cl_2, SF_6$.

Краткое описание

На рис. 1 схематично представлено устройство для измерения сечений перезарядки и разрушения отрицательных ионов галогенов в области энергий 30 - 3000 эв. Для получения отрицательных ионов использовался термоэмиссионный источник с катодом из висмутового сплава. Катод находился в вакуумной камере рабочего давления $(O_2, Br_2, Cl_2, CCl_4, I_2)$ порядка $10^{-4} - 10^{-5}$ торр. Отрицательные ионы ускорялись в направлении мишеней от 1400 до 1600°С в зависимости от рабочего вещества. Мишень образовывалась на поверхности катоды, установленной на расстоянии 10 см от катода и ориентированной под углом 90° к направлению пучка ионов. Подбором мишеней и их длины в анализаторе можно было добиться нужной разрешающей способности. При этом был снят спектр масс ионов, образующихся на мишенях, в диапазоне от 10 до 300 а.е. Для повышения точности измерений при измерении сечений разрушения была использована более сложная схема, позволяющая измерять сечение разрушения ионов галогенов в анализаторе через диффрагму и измерительный экран. При этом отрицательные ионы из диффрагмы отражались фольгой анализатора, расположенной под отрицательным потенциалом.

В настоящее время имеется ограниченное количество данных по сечениям перезарядки отрицательных ионов при атомных столкновениях /1,2,3,4,5,6/. Процессы перезарядки удаётся рассмотреть теоретически только в отдельных случаях сравнительно простых атомных систем с малым числом электронов в оболочке и при относительных скоростях, много меньших или больших скорости внешних атомных электронов. В остальных случаях некоторые оценки поведения сечения перезарядки могут быть сделаны с помощью адиабатического критерия Мессе /7/. Хастед с сотрудниками /8/ показали, что адиабатическая теория применима к процессам типа $A^+ + B \rightarrow A + B^+$. Фогель Я.М. /1/ рассмотрел с этой точки зрения процессы с двухэлектронной перезарядкой типа $A^+ + B \rightarrow A^- + B^{++}$. Вопрос о применимости адиабатической теории в случае перезарядки отрицательных ионов остаётся открытым и должен решаться экспериментальным путем. С целью получения информации о столкновениях отрицательных ионов нами были проведены измерения сечений потери электрона и перезарядки отрицательных ионов галогенов на ряде газов в области энергий 30 - 3000 эв.

Методика измерений

На рис.1 схематически представлено устройство для измерения сечений в диапазоне энергий 300 - 3000 эв. Для получения пучка отрицательных ионов используется термоэмиссионный источник с катодом из гексаборида лантана. Катод находится в атмосфере рабочего вещества (J_2 , Br_2 , Cl_2 , CCl_4 , O_2) при давлении 10^{-4} - 10^{-5} торр. Оптимальная температура катода изменялась от 1400 до 1600°C в зависимости от рабочего вещества. Ионы, образующиеся на поверхности катода, ускорялись до необходимой энергии и пропускались через магнитный анализатор с радиусом орбиты 10 см и углом поворота 90°. Подбором входной и выходной щелей анализатора можно было довести его разрешающую силу до 50. При этом был снят спектр масс ионов, образующихся на катоде, в диапазоне от 10 до 300 ат.ед. Для повышения интенсивности пучков при измерениях сечений разрешающая сила анализатора была уменьшена до 20 за счёт увеличения щелей. Из анализатора пучок поступал через диафрагму в измерительную камеру. При этом вторичные электроны из диафрагмы отражались кольцевым электродом, находящимся под отрицательным потенциалом.

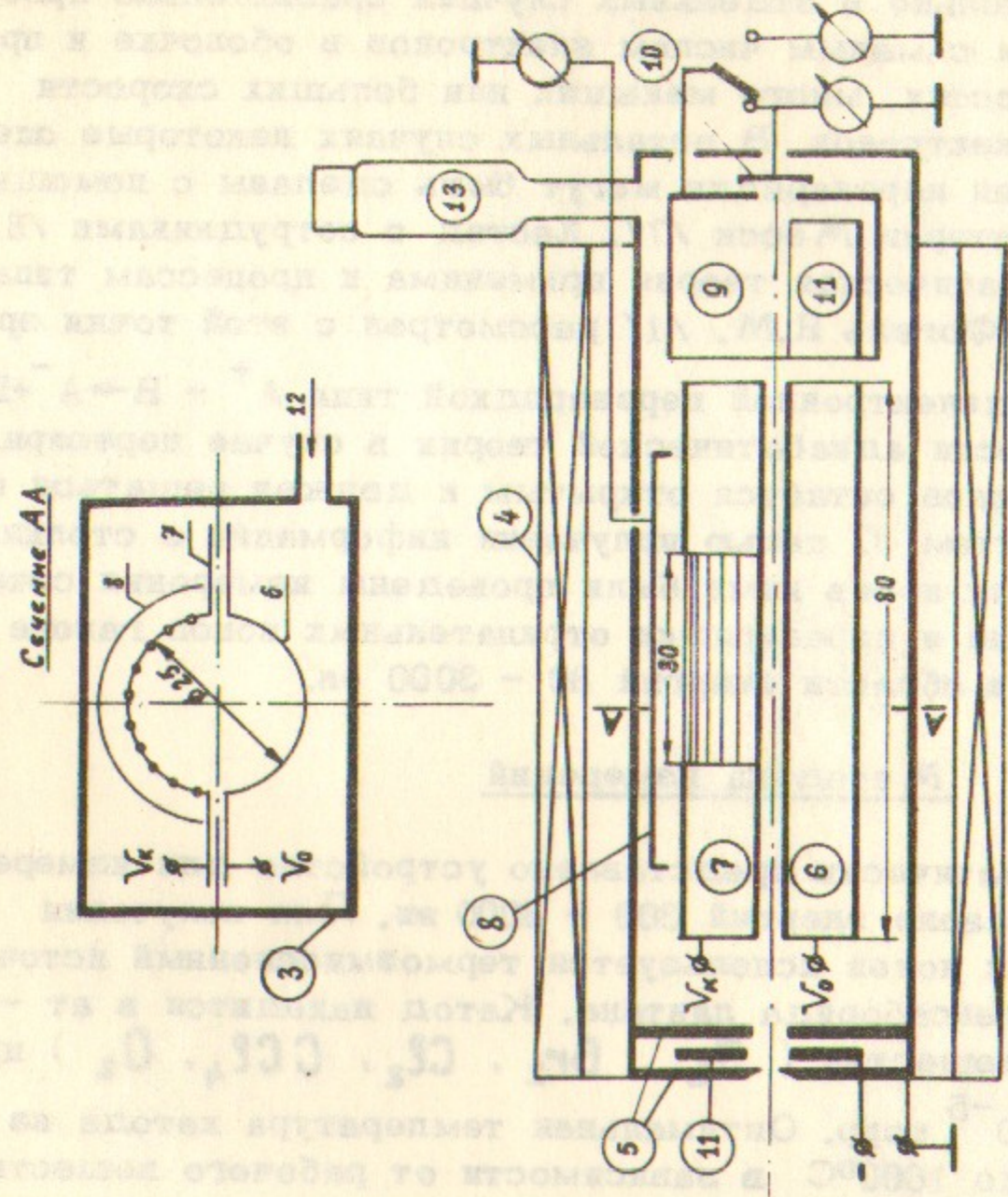
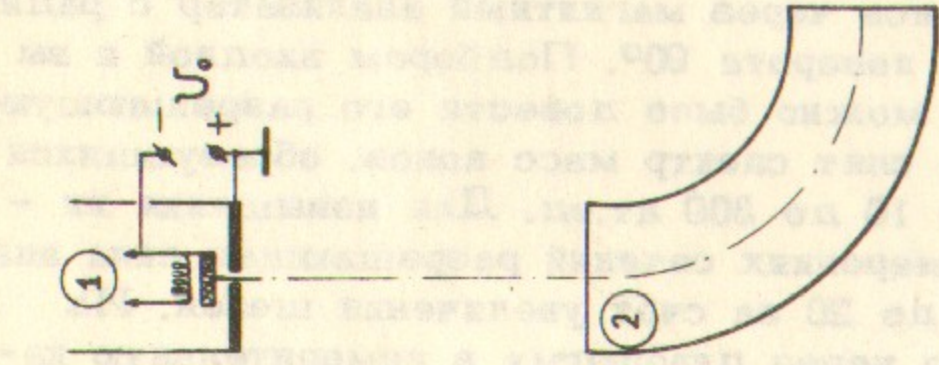


Рис.1. Схема измерений. 1 - источник отрицательных ионов; 2 - магнитный анализатор; 3 - измерительная камера; 4 - соленоид; 5 - входная диафрагма; 6 - отражающий электрод; 7 - приколлекторный электрод; 8 - коллектор; 9 - цилиндр Фарадея; 10 - осевой коллектор; 11 - электроды для подавления электронной эмиссии; 12 - напуск газа; 13 - ионизационный манометр.

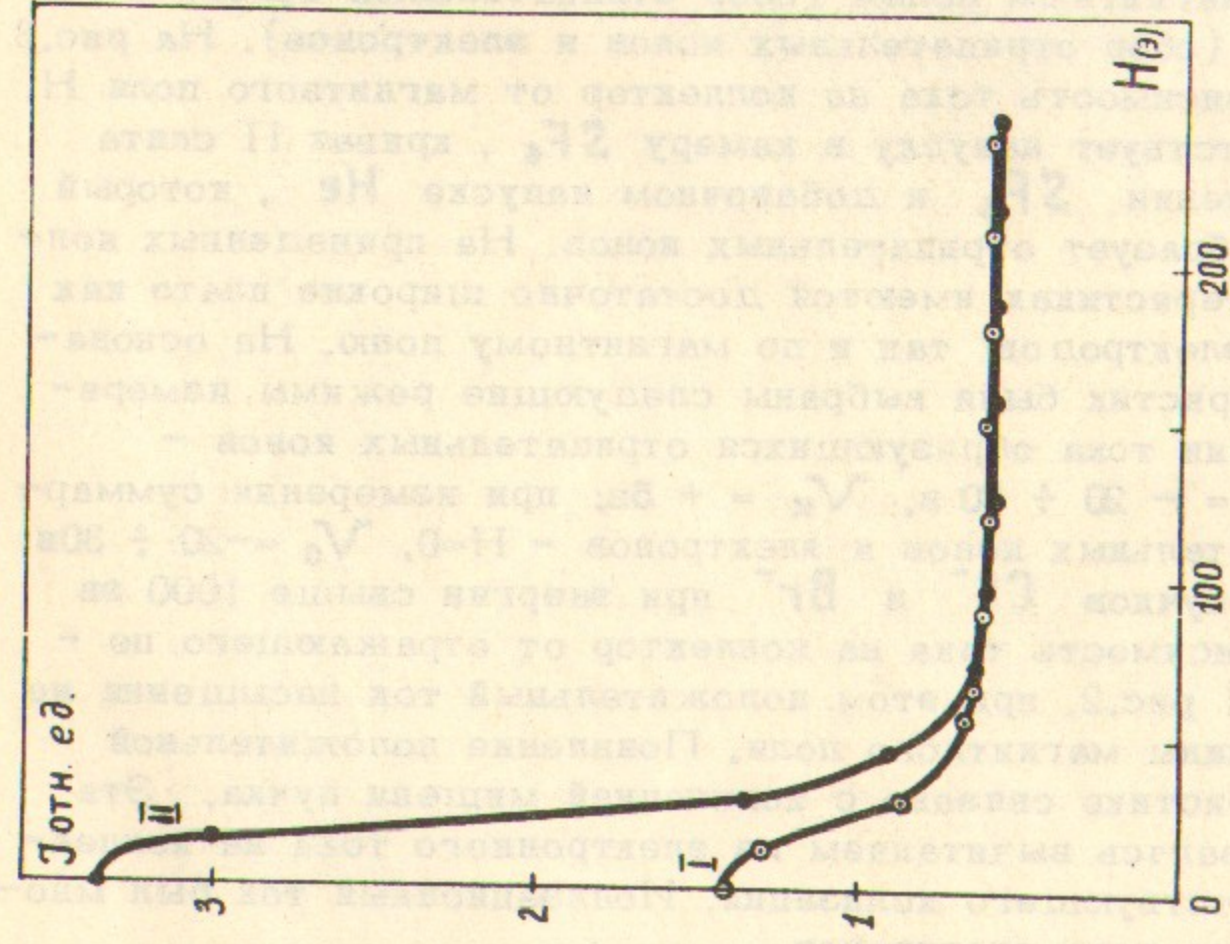


Рис.3. Зависимость тока на коллектор от магнитного поля I - $SF_6 + He$; II - $SF_6 + He$.

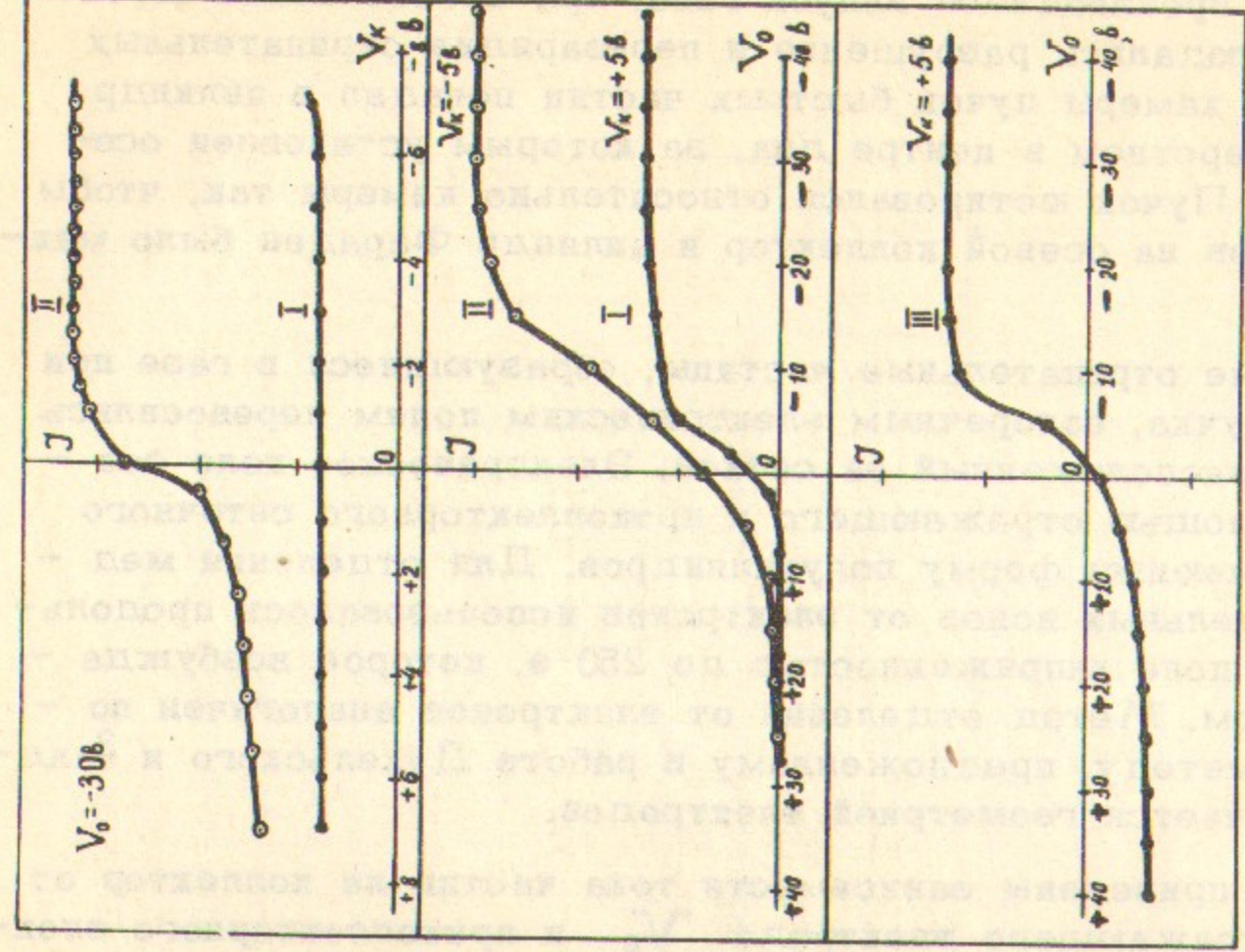
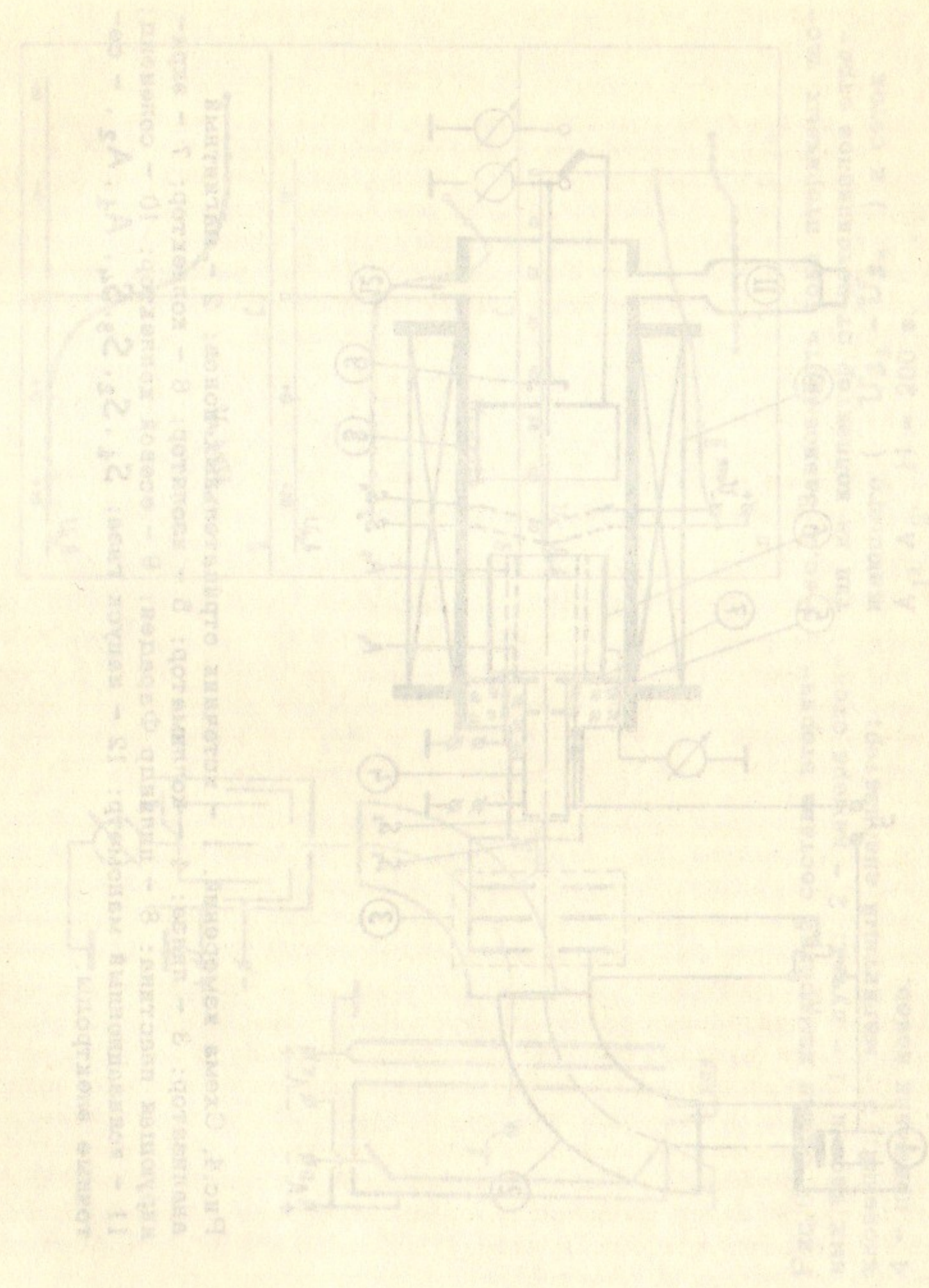


Рис.2. Зависимость тока вторичных частиц на коллектор (V_0) и приколлекторного (V_k) электродов. Кривые: I, II - $H = 250$ э; II - $H = 0$.

В камеру производился напуск газа, при прохождении через который и наблюдались разрушение и перезарядка отрицательных ионов. В конце камеры пучок быстрых частиц попадал в цилиндр Фарадея с отверстием в центре дна, за которым установлен осевой коллектор. Пучок юстировался относительно камеры так, чтобы отношение токов на осевой коллектор и цилиндр Фарадея было максимальным.

Медленные отрицательные частицы, образующиеся в газе при прохождении пучка, поперечным электрическим полем переносились на коллектор, расположенный за сеткой. Электрическое поле создавалось с помощью отражающего и приколлекторного сеточного электродов, имеющих форму полуцилиндров. Для отделения медленных отрицательных ионов от электронов использовалось продольное магнитное поле напряженностью до 250 э, которое возбуждалось соленоидом. Метод отделения от электронов аналогичен потенциальному методу, предложенному в работе Дукельского и Зандберг [3], отличается геометрией электродов.

На рис.2 приведены зависимости тока частиц на коллектор от потенциалов отражающего электрода V_0 и приколлекторного электрода V_k с магнитным полем (сбор отрицательных ионов) и без магнитного поля (сбор отрицательных ионов и электронов). На рис.3 представлена зависимость тока на коллектор от магнитного поля H . Кривая I соответствует напуску в камеру SF_6 , кривая II снята при том же давлении SF_6 и добавочном напуске He , который практически не образует отрицательных ионов. На приведенных коллекторных характеристиках имеются достаточно широкие плато как по потенциалам электродов, так и по магнитному полю. На основании этих характеристик были выбраны следующие режимы измерения: при измерении тока образующихся отрицательных ионов - $H = 150$ э, $V_0 = -20 \div 30$ в, $V_k = +5$ в; при измерении суммарного тока отрицательных ионов и электронов - $H=0$, $V_0 = -20 \div 30$ в, $V_k = -5$ в. Для пучков Cl^- и Br^- при энергии свыше 1000 эв наблюдалась зависимость тока на коллектор от отражающего потенциала вида III рис.2, при этом положительный ток насыщения не зависел от величины магнитного поля. Появление положительной ветви в характеристике связано с ионизацией мишени пучка. Эта ионизация учитывалась вычитанием из электронного тока на коллектор тока, соответствующего ионизации. Ионизационный ток был много меньше общего тока электронов.



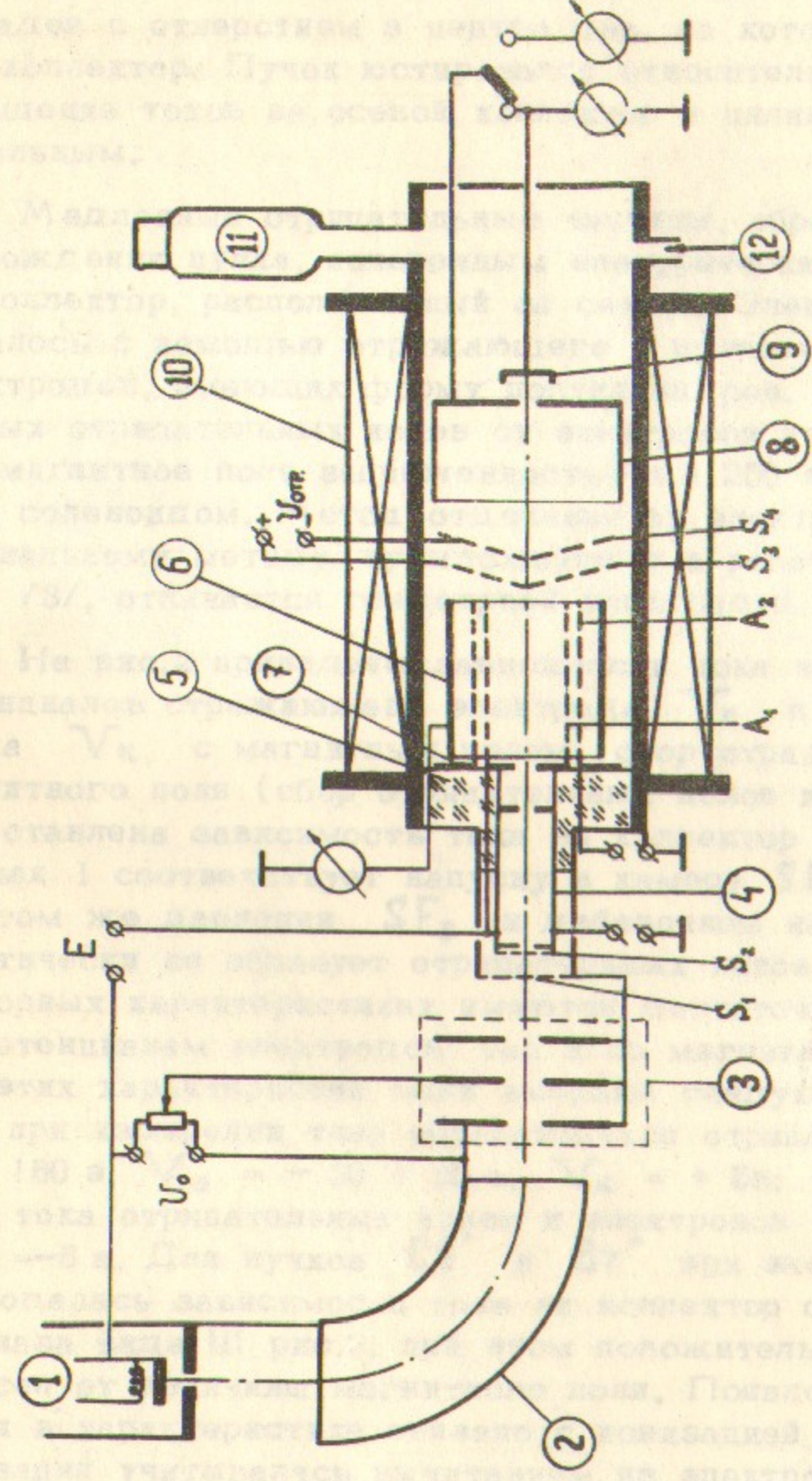


Рис.4. Схема измерений. 1 - источник отрицательных ионов; 2 - магнитный анализатор; 3 - линза; 4 - коллиматор; 5 - изолятор; 6 - коллектор; 7 - экран-ирующая пластина; 8 - цилиндр Фарадея; 9 - осевой коллектор; 10 - соленоид; 11 - ионизационный манометр; 12 - напуск газа; $S_1, S_2, S_3, S_4, A_1, A_2$ - секционные электроды.

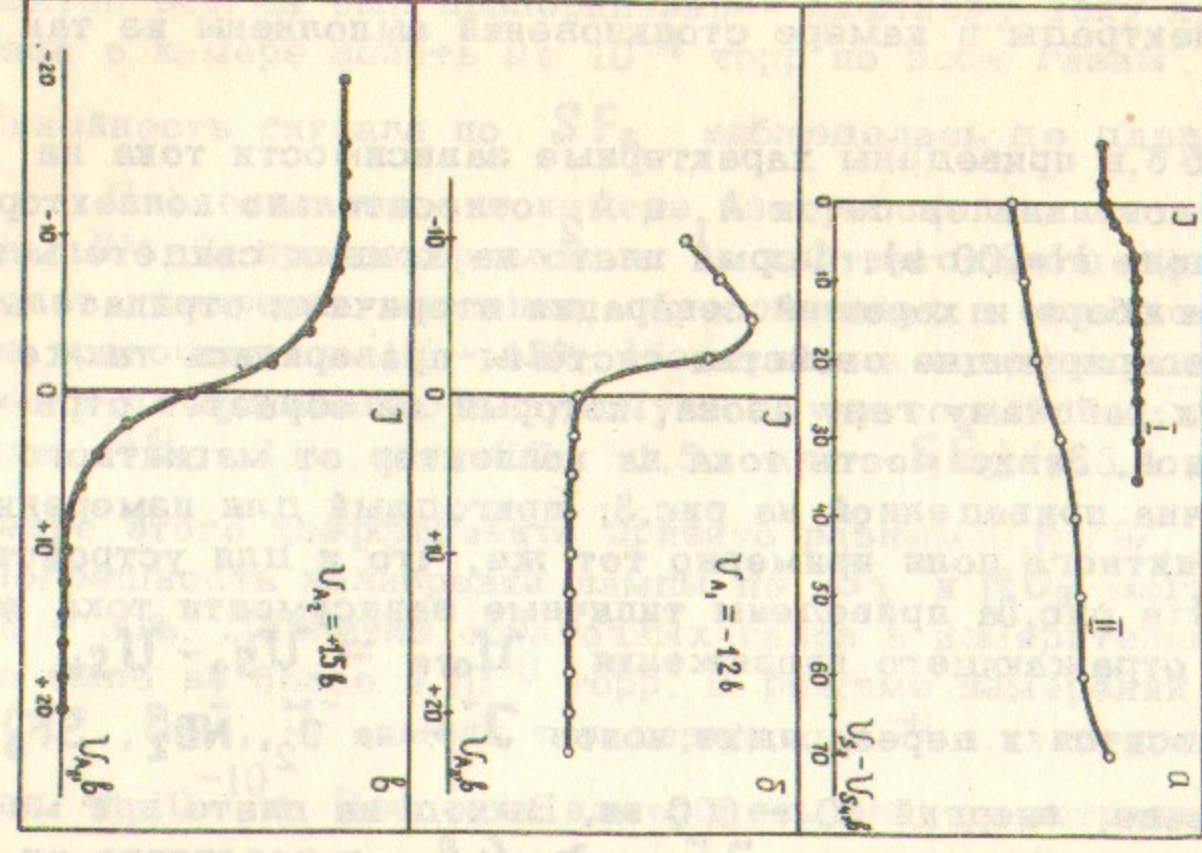


Рис.5. Зависимость тока вторичных частиц на коллектор от потенциалов отражающего ($U_{S_3} - U_{S_4}$) и сеток A_1, A_2 . $H = 200$ э.

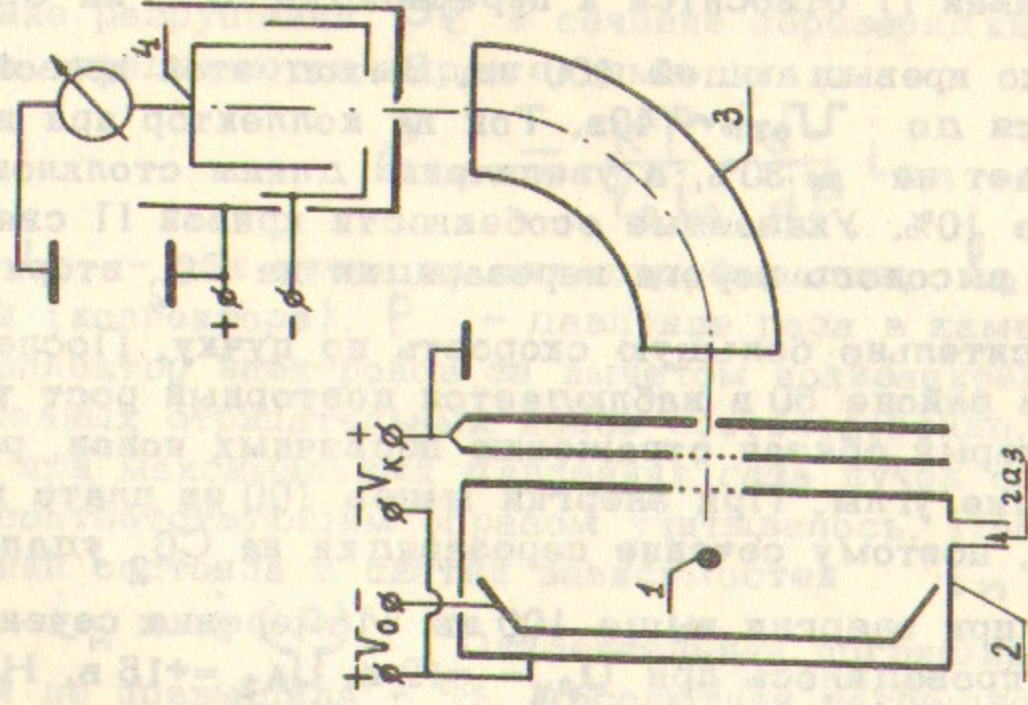


Рис.6. Схема измерений состава вторичных частиц. 1 - пучок; 2 - камера столкновения; 3 - магнитный анализатор; 4 - приёмник ионов.

ром 0,02 мм. Зазор $S_3 - S_4$ составляет 10% от длины столкновений. Все электроды в камере столкновений выполнены из тантала.

На рис.5 б, в приведены характерные зависимости тока на коллектор от потенциалов сеток A_1 и A_2 относительно коллектора. (Магнитное поле $H=200$ э). Форма плато на кривых свидетельствует о полном сборе и хорошей сепарации вторичных отрицательных ионов. Сепарирующие свойства системы проверялись также добавлением к рабочему газу азота, который не образует отрицательных ионов. Зависимость тока на коллектор от магнитного поля аналогична приведенной на рис.3; пригодный для измерений диапазон магнитного поля примерно тот же, что и для устройства на рис.1. На рис.5а приведены типичные зависимости тока на коллектор от отражающего напряжения $U_{отр} = U_{S_3} - U_{S_4}$. Кривая I относится к перезарядке ионов J^- на O_2, NO_2, SF_6, Cl_2 в диапазоне энергий 30 - 600 эв. Выход на плато при малом отражающем напряжении $U_{отр} \geq 48$ и равенство отношения токов на коллектор при $U_{отр} \leq 0$ и при $U_{отр} \geq 48$ (на плато) отношению длин столкновений до сеток S_3 и S_4 свидетельствует о том, что в этих столкновениях преобладает вылет вторичных ионов под углом, близким к $\pi/2$ к направлению движения пучка. Кривая II относится к перезарядке J^- на CO_2 при энергии, несколько превышающей 100 эв. Выход этой кривой на плато затягивается до $U_{отр} \sim 40$ в. Ток на коллектор при выходе на плато возрастает на $\approx 30\%$, а увеличение длины столкновений составляет только 10%. Указанные особенности кривой II связаны с тем, что из-за высокого порога перезарядки на CO_2 вторичные ионы имеют относительно большую скорость по пучку. После небольшого плато в районе 50 в наблюдается повторный рост тока на коллектор, который обязан отражению первичных ионов, рассеянных на большие углы. При энергии менее 100 эв плато практически исчезает, поэтому сечение перезарядки на CO_2 удалось измерить только при энергии выше 100 эв. Измерение сечений перезарядки ионов проводилось при $U_{A_1} = -12$ в, $U_{A_2} = +15$ в, $H=200$ э. отражающее напряжение устанавливалось в зависимости от рода мишени и энергии пучка (в начале плато).

Во всем энергетическом диапазоне 30 - 3000 эв ток на коллектор всегда был пропорционален входному току пучка и давлению газа в камере вплоть до 10^{-4} торр по всем газам, кроме SF_6 . Линейность сигнала по SF_6 наблюдалась до давления $3 \cdot 10^{-5}$ тор.

Давление газов в камере измерялось ионизационным манометром ЛМ-2, прокалиброванным по соответствующему газу. Погрешность измерения давления, обусловленная в основном калибровкой, не превосходила 10 - 15%. Измеренные коэффициенты чувствительности по отношению к сухому воздуху составляли: для $J_2 - 4,5$, для $NO_2 - 1,8$, для $CO_2 - 1,5$, для $SF_6 - 3,4$, для Cl_2 значение этого коэффициента принято равным 0,8 /9/, для $CCl_4 - 0,7$. Погрешность калибровки лампы по J_2 и NO_2 могла составить 25 - 30%. Давление остаточных газов в измерительной камере обычно было не более $4 \cdot 10^{-6}$ торр. В режиме измерений пучки ионов Cl^-, Br^-, J^- имели ток порядка 10^{-8} а, а пучок ионов O^- имел ток $\sim 10^{-10}$ а. Все токи измерялись электрометрическим усилителем УИ-2 с высшей чувствительностью 10^{-14} а/дел.

Сечение потери отрицательными ионами одновременно двух электронов много меньше сечения потери одного электрона /10/. Поэтому при очень малом ослаблении пучка отрицательных ионов при прохождении его от начала коллектора до цилиндра Фарадея сечение разрушения σ_e и сечение перезарядки σ_n достаточно точно определяются выражениями

$$\sigma_{e,n} = \frac{kT}{l_0 i_0} \frac{d}{dP} i_{e,n}$$

где i_0 - ток пучка на цилиндр Фарадея, l_0 - длина столкновений (коллектора), P - давление газа в камере, i_e, i_n - ток на коллектор электронов за вычетом ионизационного тока и ток медленных отрицательных ионов соответственно. В наших измерениях при максимальных давлениях газа пучок ослаблялся на 2-3%, что соответствующим образом учитывалось. Процедура измерения сечений состояла в снятии зависимостей $i_n = L(P)$ и $i_e + i_n = I(P)$. Относительная погрешность измерений сечений не превышала $\pm 5\%$. Абсолютная погрешность измерений сечений обусловлена в основном погрешностями в измерении давления газов и для O_2, CO_2, SF_6 находится в пределах 20%.

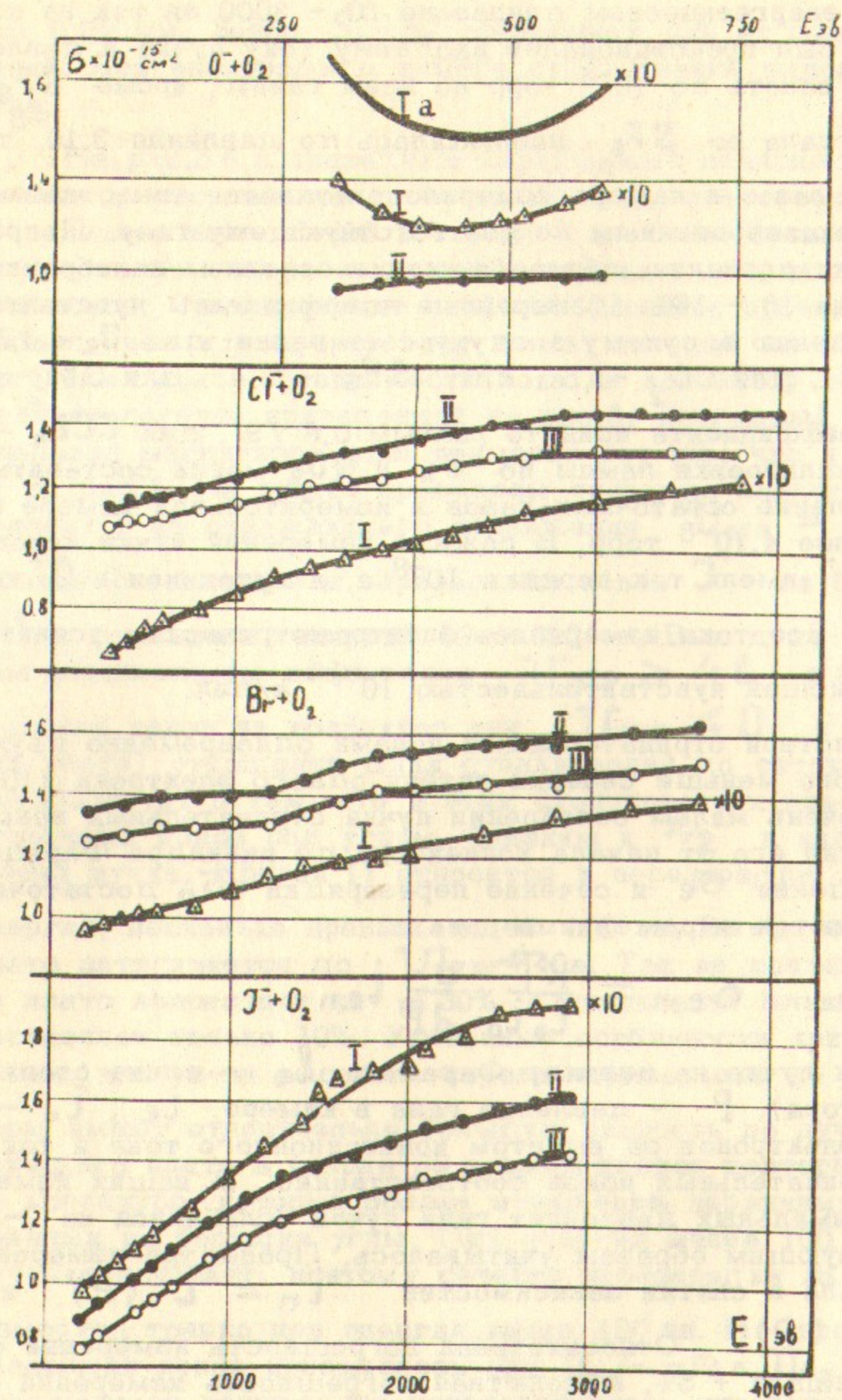


Рис.7. Сечения перезарядки (I), потери электрона (II) и сечения разрушения (III); σ_a - сечение перезарядки из (5,6).

При работе с пучками J^- и Br^- в газах $O_2, J_2, Cl_2, CO_2, NO_2, SF_6, C_6F_6, CCl_4$ был определен состав вторичных отрицательных ионов в диапазоне энергий 200 - 3000 эв. Для этого был использован боковой масспектрометр, присоединенный к камере столкновений с плоской геометрией (рис.6). Относительное содержание ионов определялось по формуле $\alpha_i = \frac{h_i}{\sum h_i}$, где h_i - высота линии, соответствующей i -му сорту ионов. Как показано в [11], величина α_i не должна зависеть от ширины выходной щели и от ускоряющего (V_k) и вытягивающего (V_0) напряжений. В наших измерениях эти условия выполнялись для каждой пары пучок-мишень при выходной щели шириной 8 мм. Напряжения изменялись в пределах $V_k = 600 - 1000$ в, $V_0 = -25 - 50$ в. Разрешающая сила масспектрометра была равной 10.

Качественный состав образующихся в газе отрицательных ионов оказался зависящим только от рода газа. Количественный состав зависел от сорта и энергии налетающих ионов. Все токи вторичных частиц, кроме ионов SF_6^- , изменяются линейно с плотностью мишени. Зависимость тока ионов SF_6^- от давления газа оказалась квадратичной. Анализ вторичных отрицательных ионов позволил определить парциальные сечения перезарядки ионов J^- и Br^- в различных газах.

Результаты измерений

В табл.1 приведен перечень исследованных столкновений с перезарядкой с указанием дефекта энергии. Под дефектом энергии понимается минимальная величина энергии, необходимая для реакции перезарядки. При его вычислении величины энергий сродства к электрону и энергий диссоциации взяты из (4,12,13,14,15).

На рис.7 представлены зависимости от энергии E сечений перезарядки σ_n , разрушения σ_e и потери электрона $\sigma_n + \sigma_e$ отрицательных ионов O^-, Cl^-, Br^-, J^- в кислороде. Для ионов галогенов все сечения возрастают с увеличением энергии; при равных относительных скоростях сечение перезарядки возрастает с уменьшением дефекта энергии. Такая же тенденция наблюдается и в поведении сечения разрушения. Для ионов O^- сечения меньше, чем для галогенов, хотя дефект энергии реакции для них наименьший. Для сравнения на рис.7 приведено также сечение перезарядки ионов

O^- - в кислороде из работ /5,6/. Анализ состава образующихся частиц показал, что в этих столкновениях в кислороде образуются в основном ионы O_2^- (95 - 99%), количество ионов O^- незначительно (1 - 5%).

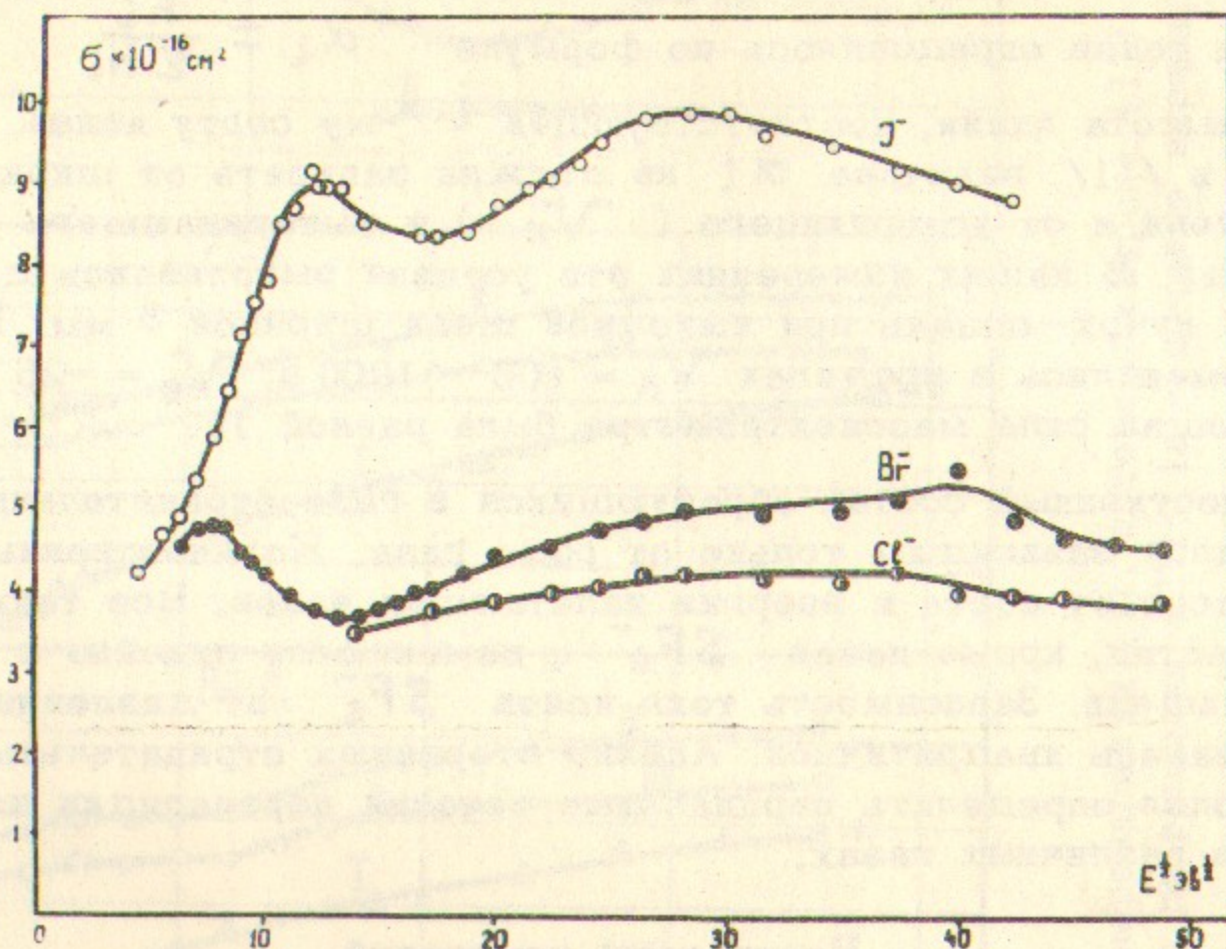


Рис.8. Сечения перезарядки Cl^- , Br^- , J^- в NO_2

На рис.8 приведены сечения перезарядки ионов Cl^- , Br^- , J^- на NO_2 в широком диапазоне энергий. Кривые $\sigma_n(E)$ имеют максимумы в низковольтной области (для Br^- и J^-) и в высоковольтной области. Скорости первичных ионов в высоковольтных максимумах равны: $9,3 \cdot 10^6 \frac{cm}{сек}$ (Cl^-), $6,7 \cdot 10^6 \frac{cm}{сек}$ (Br^-) и $3,7 \cdot 10^6 \frac{cm}{сек}$ (J^-). В диапазоне энергий 200 - 2000 эв в основном образуются ионы NO_2^- ($\sim 90\%$) и O^- ; доля ионов O^- в случае перезарядки Br^- в NO_2 изменяется от 14% при $E = 200$ эв до 6% при $E = 2000$ эв.

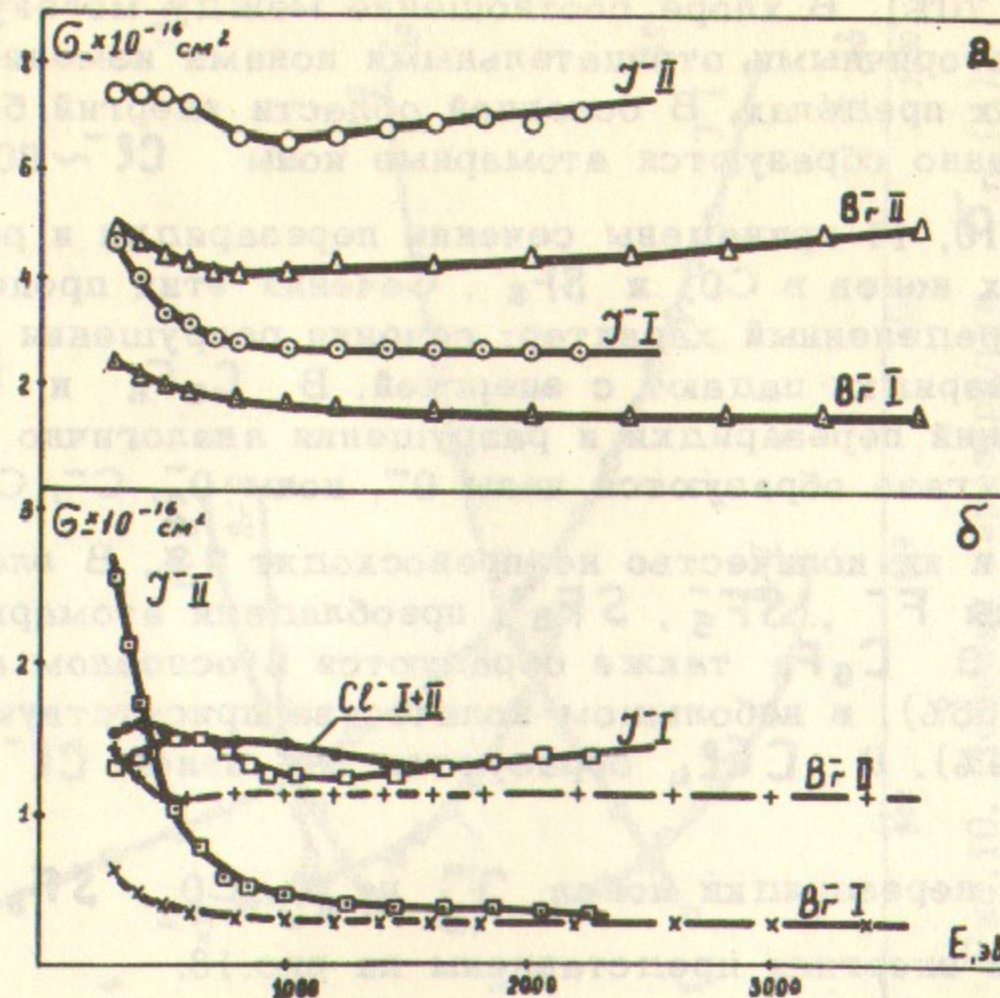


Рис.9. Сечения перезарядки в атомарные (I) и молекулярные ионы (II) в J_2 - (а) и Cl_2 - (б):

На рис.9 приведены зависимости парциальных сечений перезарядки ионов Cl^- , Br^- , J^- на J_2 и Cl_2 от энергии. Сечения процессов №№ 13 и 16 + 17 по табл.1 имеют максимум при относительных скоростях $3,4 \cdot 10^6$ и $4,7 \cdot 10^6$ см/сек, соответственно. Для процессов 8, 10 в основной области энергий зависимость $\sigma_n = \sigma_n(E)$ возрастающая, однако при малых энергиях эта зависимость немонотонная. Здесь имеются по крайней мере два максимума: один при энергии меньше 300 эв, другой при энергии больше 2000 эв.

При одинаковых скоростях движения в парах иода сечение больше там, где меньше дефект энергии. Как видно из рис.9, в парах иода наряду с молекулярными ионами J_2^- образуется большее количество атомарных J^- (30 - 40%). В основной области энергий больше 1 кэв преобладают молекулярные вторичные ионы

J_2^- (свыше 70%). В хлоре соотношение между молекулярными и атомарными вторичными отрицательными ионами изменяется в еще более широких пределах. В основной области энергий больше 1кэв преимущественно образуются атомарные ионы $\text{Cl}^- \sim 80\%$.

На рис.10, 11 приведены сечения перезарядки и разрушения отрицательных ионов в CO_2 и SF_6 . Сечения этих процессов имеют вполне определенный характер: сечения разрушения растут, а сечения перезарядки падают с энергией. В C_6F_6 и CCl_4 поведение сечений перезарядки и разрушения аналогично (рис.12). В углекислом газе образуются ионы O^- , ионы O_2^- , C^- , CO^- , CO_2^- не наблюдались и их количество не превосходит 1%. В элегазе наблюдались ионы F^- , SF_5^- , SF_6^- , преобладали атомарные ионы $\text{F}^- \sim (90\%)$. В C_6F_6 также образуются в основном атомарные ионы $\text{F}^- \sim (95\%)$, в небольшом количестве присутствуют ионы C_2F^- (3 - 4%). В CCl_4 образуются 98% ионов Cl^- и 2% ионов Cl_2^- .

Сечения перезарядки ионов J^- на O_2 , CO_2 , SF_6 и Br^- на O_2 при низких энергиях представлены на рис.13.

Для всех исследованных столкновений имеет место корреляция между поведением сечения перезарядки и составом вторичных отрицательных ионов. В кислороде образуются в основном молекулярные отрицательные ионы. Сечение перезарядки ионов галогенов в кислороде монотонно растет с энергией во всем диапазоне 200 - 3500 эв (рис.7,13). Для ионов O^- в кислороде сечение перезарядки растет с энергией при $E > 400$ эв. В парах иода молекулярные ионы также преобладают и зависимость $\sigma_n = \sigma_n(E)$ возрастает при $E > 1$ кэв (рис.9). При перезарядке в NO_2 также образуются в основном молекулярные ионы. Зависимость

$\sigma_n = \sigma_n(E)$ возрастает при $E > 200 \div 400$ эв и достигает максимума (рис.8). В CO_2 , SF_6 , C_6F_6 , CCl_4 , образуются в основном атомарные отрицательные ионы. В этих случаях поведение сечения перезарядки совершенно другое. Зависимость

$\sigma_n = \sigma_n(E)$ имеет характерный падающий вид (рис.10,11, 12, 13). В хлоре соотношение между образующимися молекулярными ионами изменяется в широких пределах и соответственно поведение перезарядного сечения является промежуточным.

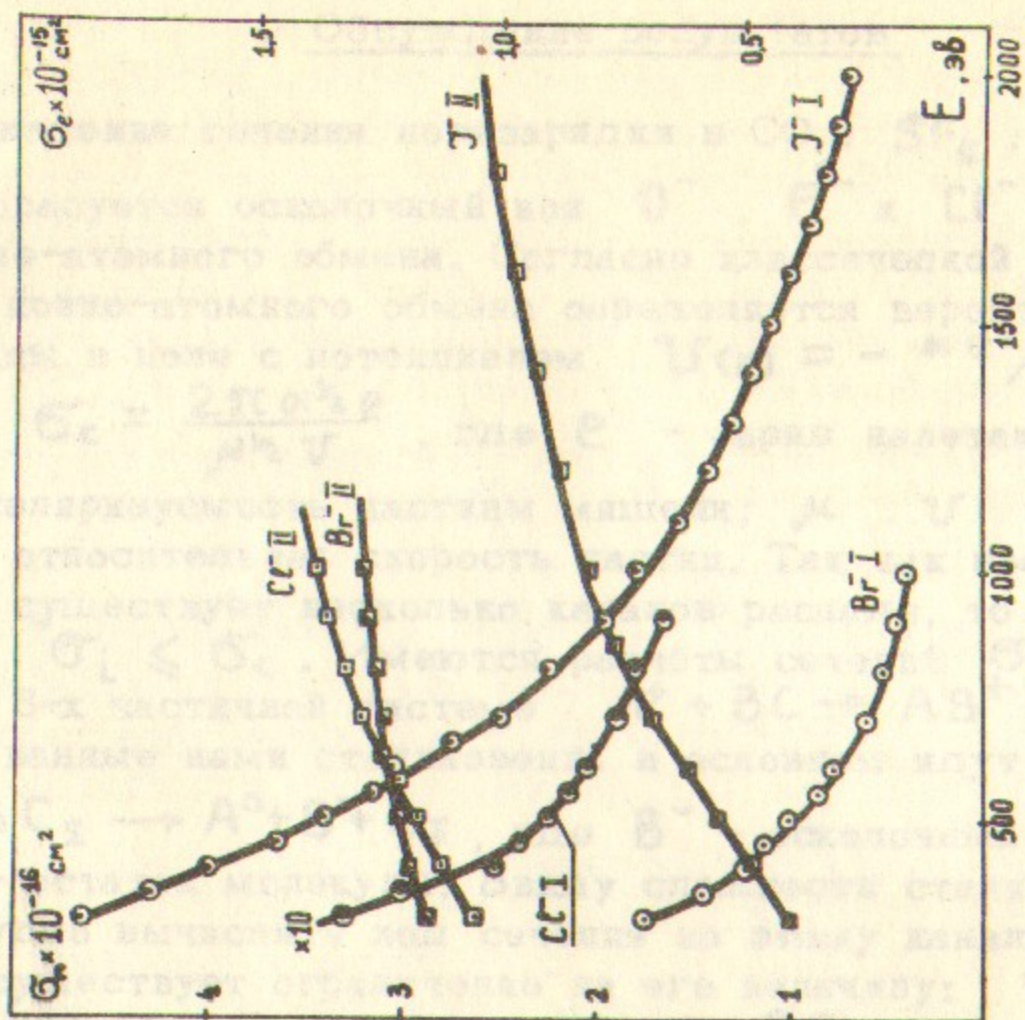


Рис.10. Сечения перезарядки σ_n (I) и разрушения σ_n (II) отрицательных ионов в CO_2 .

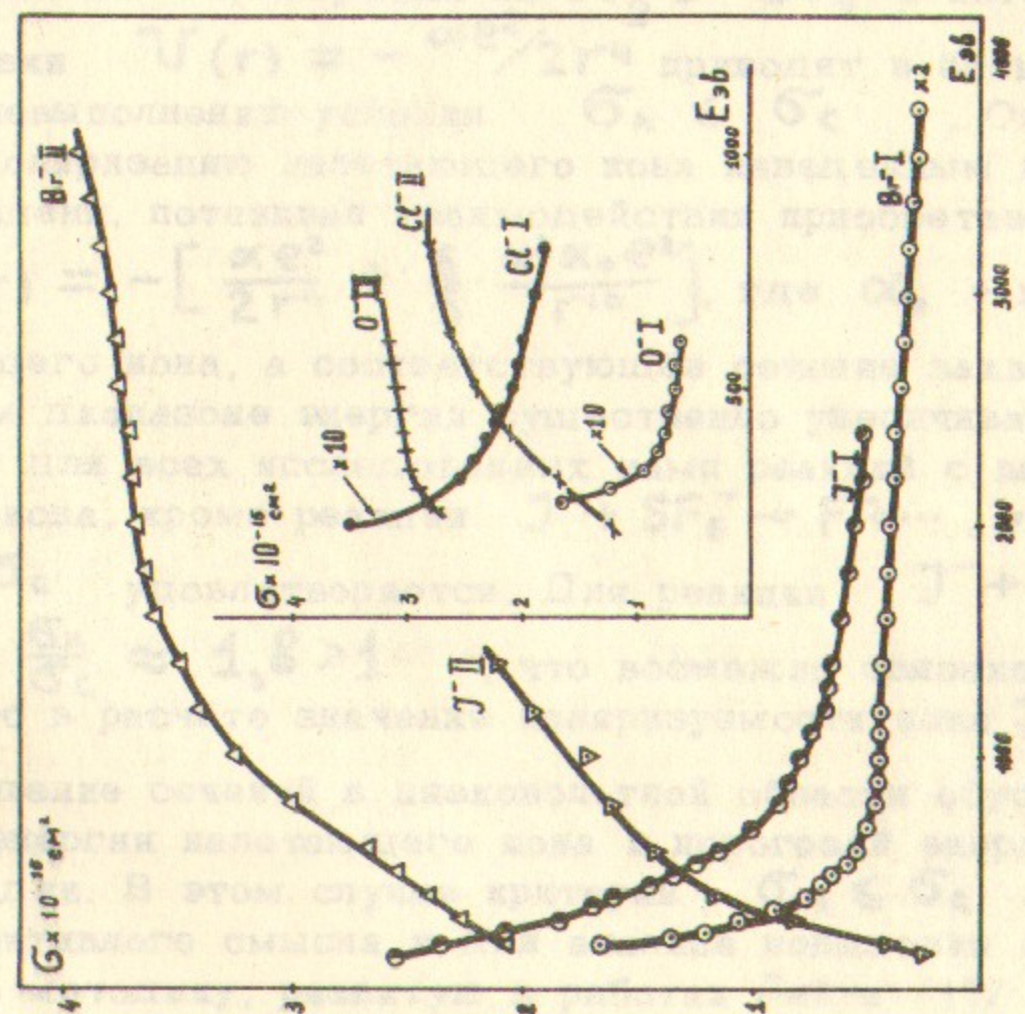


Рис.11. Сечения перезарядки (I) и разрушения (II) отрицательных ионов в SF_6 .

Обсуждение результатов

Поведение сечения перезарядки в CO_2 , SF_6 , C_6F_6 и CCl_4 , когда образуется осколочный ион O^- , F^- и Cl^- , характерно для ионно-атомного обмена. Согласно классической теории /16/ сечение ионно-атомного обмена определяется вероятностью захвата частицы в поле с потенциалом $U(r) = -\alpha e^2 / 2r^4$ и равно $\sigma_c = \frac{2\pi\alpha^2 e}{\mu^2 v}$, где e - заряд налетающего иона;

α - поляризуемость частицы мишени; μ , v - приведенная масса и относительная скорость частиц. Так как после захвата частицы существует несколько каналов распада, то сечение i -той реакции $\sigma_i \leq \sigma_c$. Имеются расчёты сечений σ_i для перезарядки в 3-х частичной системе $A^+ + BC \rightarrow AB^+ + C$ /17,18/. Исследованные нами столкновения в основном идут по каналу

$A^- + BC_x \rightarrow A^0 + B^- + C_x$, где B^- - осколочный атомарный ион, а C_x - остаток молекулы. Ввиду сложности сталкивающихся систем трудно вычислить ход сечения по этому каналу $\sigma_n(E)$, однако существует ограничение на его величину: $\sigma_n \leq \sigma_c$. Анализ сечений перезарядки на CO_2 и SF_6 с потенциалом взаимодействия $U(r) = -\alpha e^2 / 2r^4$ приводит в большинстве случаев к невыполнению условия $\sigma_n \leq \sigma_c$. Однако, если учесть поляризацию налетающего иона наведенным диполем частицы мишени, потенциал взаимодействия приобретает вид

$$U(r) = -\left[\frac{\alpha e^2}{2r^4} + \frac{6}{5} \frac{\alpha^2 \alpha_0 e^2}{r^{10}} \right], \text{ где } \alpha_0 - \text{поляризуемость}$$

налетающего иона, а соответствующее сечение захвата в исследованном диапазоне энергий существенно увеличивается. В результате для всех исследованных нами реакций с выходом осколочного иона, кроме реакции $J^- + \text{SF}_6 \rightarrow \text{F}^- + \dots$, условие

$\sigma_n \leq \sigma_c$ удовлетворяется. Для реакции $J^- + \text{SF}_6$ $\max \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \approx 1,8 > 1$, что возможно связано с неточностью принятого в расчёте значения поляризуемости иона J^- , $\alpha_0 = 7\text{A}^3$.

Падение сечений в низковольтной области обусловлено близостью энергии налетающего иона к пороговой энергии процесса перезарядки. В этом случае критерий $\sigma_n \leq \sigma_c$ не несет особого позитивного смысла и для анализа поведения сечений нужно привлечь методику, развитую в работах Лайта /17/ и Вольфа /18/.

Рост сечений перезарядки с увеличением энергии в кислороде, иоде и двуокиси азота с преимущественным выходом молекулярных ионов, по-видимому, может быть объяснен на основе адiabатического критерия Мессе и описан в рамках работы /19/. Это подтверждается ростом сечения перезарядки с уменьшением дефекта энергии при одинаковых относительных скоростях частиц в этих процессах. Если допустить, что положение высоковольтных максимумов сечений перезарядки соответствует оценке $\frac{\Delta E \cdot a}{h v} \approx 1$ /7,8/, то для средства молекулы NO_2 к электрону получается величина, лежащая в пределах 3,1 - 3,23 эв (a принято равным 7А).

Низковольтные максимумы в NO_2 и поведение сечений перезарядки в хлоре и в иоде при низких энергиях, по-видимому, могут быть объяснены "непрямолинейностью орбит" при малых относительных скоростях, что было рассмотрено в работе /20/.

Сечения разрушения отрицательных ионов галогенов в использованных газах находятся в пределах $0,5 - 3,10^{-15}$ см². Поведение этих сечений в зависимости от относительной скорости аналогично поведению сечений разрушения отрицательных ионов в инертных газах /21,22/.

ТАБЛИЦА 1

№№	Реакции	Дефект энергии эв
1	$\text{J}^- \rightarrow \text{J}^0$	3,15
2	$\text{Br}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{O}_2^-$	3,40
3	$\text{Cl}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{Cl}^0 + \text{O}_2^-$	3,67
4	$\text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}^0 + \text{O}_2^-$	1,3
5	$\text{J}^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{J}^0 + \text{NO}_2^-$	
6	$\text{Br}^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{O}^- + \text{NO}$	
7	$\text{Cl}^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{Cl}^0 + \text{O}^- + \text{NO}$	
8	$\text{J}^- + \text{J}_2 \rightarrow \text{J}^0 + \text{J}_2^- + \text{J}^0$	0,89
9	$\text{Br}^- + \text{J}_2 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{J}_2^- + \text{J}^0$	1,54
10	$\text{Br}^- + \text{J}_2 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{J}_2^- + \text{J}^0$	1,16
11	$\text{Br}^- + \text{J}_2 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{J}_2^- + \text{J}^0$	1,81
12	$\text{J}^- + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{J}^0 + \text{Cl}_2^- + \text{Cl}^0$	1,59
13	$\text{J}^- + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{J}^0 + \text{Cl}_2^- + \text{Cl}^0$	1,94
14	$\text{Br}^- + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{Cl}_2^- + \text{Cl}^0$	1,84
15	$\text{Br}^- + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{Cl}_2^- + \text{Cl}^0$	2,21
16	$\text{Cl}^- + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{Cl}^0 + \text{Cl}_2^- + \text{Cl}^0$	2,12
17	$\text{Cl}^- + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{Cl}^0 + \text{Cl}_2^- + \text{Cl}^0$	2,47
18	$\text{J}^- + \text{CO}_2 \rightarrow \text{J}^0 + \text{CO} + \text{O}^-$	8,28
19	$\text{Br}^- + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{CO} + \text{O}^-$	8,55
20	$\text{Cl}^- + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Cl}^0 + \text{CO} + \text{O}^-$	8,80
21	$\text{J}^- + \text{SF}_6 \rightarrow \text{J}^0 + \text{SF}_6^-$	
22	$\text{Br}^- + \text{SF}_6 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{SF}_5^- + \text{F}^0$	
23	$\text{Cl}^- + \text{SF}_6 \rightarrow \text{Cl}^0 + \text{F}^- + (\text{SF}_5)$	
24	$\text{J}^- + \text{C}_6\text{F}_6 \rightarrow \text{J}^0 + \text{C}_2\text{F}^- + (\text{C}_4\text{F}_5)$	
25	$\text{Br}^- + \text{C}_6\text{F}_6 \rightarrow \text{Br}^0 + \text{F}^- + (\text{C}_5\text{F}_5)$	
26	$\text{Cl}^- + \text{C}_6\text{F}_6 \rightarrow \text{Cl}^0 + \text{F}^- + (\text{C}_5\text{F}_5)$	
27	$\text{J}^- + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{J}^0 + \text{Cl}_2^- + (\text{CCl}_2)$	
28	$\text{J}^- + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{J}^0 + \text{Cl}^- + (\text{CCl}_3)$	2,78

Л и т е р а т у р а

1. Фогель Я.М., 71, 243 (1960).
2. Фогель Я.М., Коваль А.Г. и Левченко Ю.З. ЖЭТФ 40, 13 (1961).
3. Дукельский В.М., Зандберг Э.Я. ДАН СССР, 82, 33 (1952).
4. J.A. Rutherford and B.R. Turner, J. Geophys. Res. 72, 3795, (1967).
5. Bailey T.L. and P. Mahadevan, J. Chem. Phys. 52, 179, (1970).
6. W.R. Snow, R.P. Rundel, R. Geballe, Phys. Rev. 178, 228, (1969).
7. Massey H. S.W., Rep. Progr. Phys. 12, 248, (1949).
8. Hasted J.B., Adv. in Electronics and Electron Phys. 13, 1, (1960).
9. А.М.Бухтеев, Ю.Ф.Быдин, В.М.Дукельский, ЖТФ, 31, 688 (1961).
10. Дукельский В.М., Федоренко И.В., ЖЭТФ, 29, 473 (1955).
11. Федоренко И.В., Афросимов В.В. ЖТФ, 26, 1941 (1956).
12. Branskomb L.M. Adv. in Electronics and Electron Phys. 9, 43, (1957).
13. И.И.Бакулина, Н.И.Ионов. Ж.Ф.Х., 33, 2063 (1959).
14. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и средство к электрону. Справочник, Москва, 1962г., изд. АН СССР.
15. Бучельникова Н.С. УФН, 65, 351 (1958).
16. G. Giomousis, D.P. Stevenson, J. Chem. Phys. 29, 294 (1958).

17. J.C. Light, J. Chem. Phys. 40, 3221, (1964).
18. F.A. Wolf, J. Chem. Phys. 44, 1619, (1966).
19. D. Rapp and W.E. Francis, J. Chem. Phys. 37, 2631 (1962).
20. F.A. Wolf and B.R. Turner, Abstr. of papers of V ICPEAC 191 Ленинград (1967).
21. Hasted J.B., Smith R.A., Proc Roy. Soc. A-235 349, (1956).
22. Быдин Ю.Ф., Дукельский В.М., ЖЭТФ, 31, 569 (1956).

17. J.C. Light, J. Chem. Phys. **40**, 1222 (1964).

18. F.A. Wolf, J. Chem. Phys. **44**, 1222 (1966).

19. D. Rapp and W.E. Franke, J. Chem. Phys. **40**, 1222 (1964).

20. F.A. Wolf and B.R. Turner, J. Chem. Phys. **44**, 1222 (1966).

21. Hester J.B., Smith R.A., Proc. Roy. Soc. **205**, 1222 (1951).

22. Buzan K.O., Dokl. Akad. Nauk SSSR, **151**, 1222 (1963).

23. W.R. Snow, R.R. Kandel, R. Schalle, Phys. Rev. **173**, 1222 (1968).

24. Massie H.S.W., Rep. Progr. Phys. **12**, 1222 (1949).

25. Hester J.B., Adv. in Electronics and Electron Phys. **13**, 1, (1966).

26. А.М. Бухарин, К.В. Билик, В.М. Дуванский, ЖТФ, **31**, 1222 (1961).

27. Суховский В.М., Фадеева И.В., ЖТФ, **30**, 473 (1960).

28. Федоренко И.В., Арсеньев В.В., ЖТФ, **26**, 1041 (1956).

29. Branscomb L.M. Adv. in Electronics and Electron Phys. **9**, 45, (1957).

30. И.И. Бухарин, И.И. Ионин, Ж.Ф.Х., **33**, 2003 (1960).

31. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник. Москва, 1963, изд. АН СССР.

Ответственный за выпуск Г.В. Росляков
 Подписано к печати 30.06.71. МН 01240.
 Усл. 1,1 печ.л., тираж 300 экз. Бесплатно.
 Заказ № 40 . ПРЕПРИНТ.

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.