

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В УЗКОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Г.М.САДЫХ-ЗАДЕ, Н.Н.ЛЕБЕДЕВА,
Э.А.СУЛТАНОВ, Л.С.ГАСАНОВ*Бакинский Государственный Университет*

В работе исследовалось влияние полупроводникового электрода и межэлектродного расстояния на начало процесса ионизации газа. Из вольт-амперных характеристик газоразрядной ячейки с узким ($d \approx 60$ мкм) зазором и двумя типами электродов (оба электрода металлические и один из электродов – полупроводник из высокоомного ($\rho \sim 10^8$ Ом·см) GaAs), измеренных при разных давлениях ($p = 15 \div 760$ тор), построены кривые Пауэна. Показано, что узкий зазор с металлическими электродами имеет резкую, зависимость напряжения зажигания (U_z) в области $pd = (2 \div 30)$ мм·мм.рт.ст., тогда как в протяженных газовых зазорах в этой области pd U_z слабо меняется.

На ВАХ зазора с полупроводниковым электродом ток $I \geq 8 \cdot 10^{-10}$ А регистрируется уже при напряжениях, предшествующих U_z , и с дальнейшим ростом U плавно возрастает, тогда как в зазоре с металлическими электродами ток до пробоя не регистрируется, а после пробоя резко возрастает. Это позволило провести измерения зависимости тока от давления. Зависимость эта немонотонная с максимумом при $p = 60$ тор., соответствующим зависимости α/p от E/p .

Введение

Газоразрядная ячейка с полупроводниковым электродом является главным рабочим элементом в фотоионизационной системе [1-3], которая нашла широкое техническое применение как преобразователь ИК-изображения в видимое [4], как визуализатор электрических и структурных неоднородностей в полупроводниковых пластинах больших диаметров [5], как фотографическая система с несеребряной средой для фиксации изображений [6], как источник равномерного по большой площади УФ излучения [7]. В этой системе впервые в физике и в технике контакт полупроводника с газовым разрядом работает в качестве электрического контакта. Использование полупроводникового электрода с распределенным сопротивлением существенно меняет распределение тока. В противоположность газоразрядной ячейке с двумя металлическими электродами ток после пробоя не шнурится, а равномерно распределяется по всему объему

газоразрядного зазора. Другой особенностью газоразрядной ячейки, используемой в фотоионизационной системе, является малый зазор между электродами. Полная картина процессов в газоразрядной ячейке с малым зазором может быть удовлетворительно интерпретирована на базе классической теории газового разряда [8], но требует учета факторов, которые связаны с заменой металлического электрода высокоомным фоточувствительным полупроводником. Уменьшение газового зазора в системе, образованной полупроводником и газом, приводит к значительному уширению области пространственно-стабилизированного тока по отношению к давлению и допустимому приложенному напряжению. [8]. Предложенный механизм для объяснения этого эффекта сводится к погашению нарастающих флуктуаций распределенным сопротивлением полупроводника. Отметим, что отсутствие шнурования тока разряда, обусловленное наличием полупроводникового электрода, изучено после пробоя газа.

Целью настоящей работы было исследование начального этапа токопрохождения и области перехода к низкоомному состоянию газа в газоразрядной ячейке с узким зазором между двумя металлическими и между металлическим и полупроводниковым электродами.

Эксперимент

Измерения проводились на газоразрядных ячейках двух типов: тип I (оба электрода металлические); тип II (один из электродов – полупроводниковая пластина). Оба типа ячейки представлены на рис. 1 (а, б). В качестве полупроводникового электрода использовался компенсированный хромом (Cr) полуизолирующий арсенид галлия (GaAs). Высокоомные ($\rho \approx 10^8$ Ом·см) пластины GaAs *n*-типа, ориентированные в (100) плоскости роста кристалла, имели толщину ~ 1 мм и диаметр 20 мм. На одну сторону такой отполированной пластины GaAs вакуумным напылением наносился тонкий слой Ni (70% пропускания) или проводящий слой SnO₂, которые служили прозрачными для света электрическими контактами к полупроводнику. Контрэлектродом был стеклянный диск, покрытый прозрачным слоем SnO₂. В ячейке типа I полупроводник заменялся полированным алюминиевым диском. Зазор между электродами создавался слюдяной прокладкой ($d \approx 60$ мкм), внутренний диаметр которой определял рабочую поверхность газоразрядного зазора. Ячейка монтировалась внутри кассеты, которая помещалась в металлическую камеру с двумя стеклянными окнами для освещения полупроводника и наблюдения свечения разряда, двумя электрическими вводами для подачи на ячейку напряжения и отводом для откачки газа из камеры. Постоянное напряжение от источника подавалось на вход блока управления, в котором была собрана электрическая цепь, содержащая делитель входного напряжения и нагрузочное сопротивление, включенное последовательно с газоразрядной ячейкой. С блока управления часть подаваемого на ячейку напряжения (0,001) пода-

ввалась на горизонтальный X-вход двухкоординатного самописца «Эндим», а с сопротивления нагрузки 10^3 и 10^4 Ом, напряжение подавалось на Y-вход самописца. Наименьший ток, который регистрировал усилитель самописца (потенциометрический вход с сопротивлением 50 Мом), был $0,8 \cdot 10^{-10}$ А. Давление воздуха в камере контролировалось манометром с точностью до 3 тор. Давление изменялось в интервале $P=15 \div 760$ Тор.

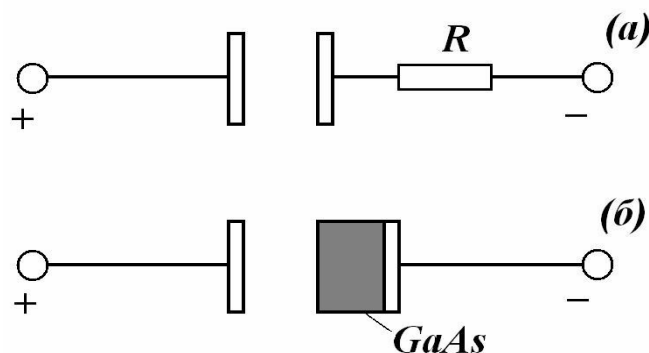


Рис. 1. Схема ГРЗ двух типов: а - тип I (два металлических электрода); б - тип II (один из электродов - полупроводник).

Результаты и обсуждение

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) для зазоров обоих типов при одинаковом давлении ($p=60$ тор) и одинаковом газовом зазоре ($d=60$ мкм) приведены на рис. 2, где 1- это ВАХ для зазора с 2-мя металлическими электродами и 2 – для зазора, где один из электродов полупроводник. Видно, что при двух металлических электродах ток до пробоя не регистрируется, т.е. он меньше минимального регистрируемого тока ($I_{\min}=8 \cdot 10^{-10}$ А). При напряжении $U \geq 380$ В ток резко возрастает. Это напряжение мы принимаем за напряжение зажигания U_3 . В зазоре, где один из электродов – полупроводник, токи на ВАХ регистрируются уже при $U \geq 200$ В. После насыщения тока в области $300 \div 340$ В ток начинает плавно возрастать при $U \geq 350$ В. При этом напряжении начинается процесс ионизации газа. Это значение напряжения мы принимаем за напряжение зажигания (U_3).

Такое различие в ВАХ для двух типов газоразрядных зазоров мы объясняем следующим образом. В случае полупроводникового электрода, (которое представляет собой распределенное по сечению сопротивление) переход из устойчивого состояния с малым током в устойчивое состояние с большим током происходит локально в различных участках независимо друг от друга, что и приводит к плавному нарастанию тока. В случае металлических электродов, из-за постоянного потенциала на поверхности металла, поле в зазоре постоянно, т.е. локальные переходы невозможны, поэтому ток возникает скачком одновременно во всем объеме.

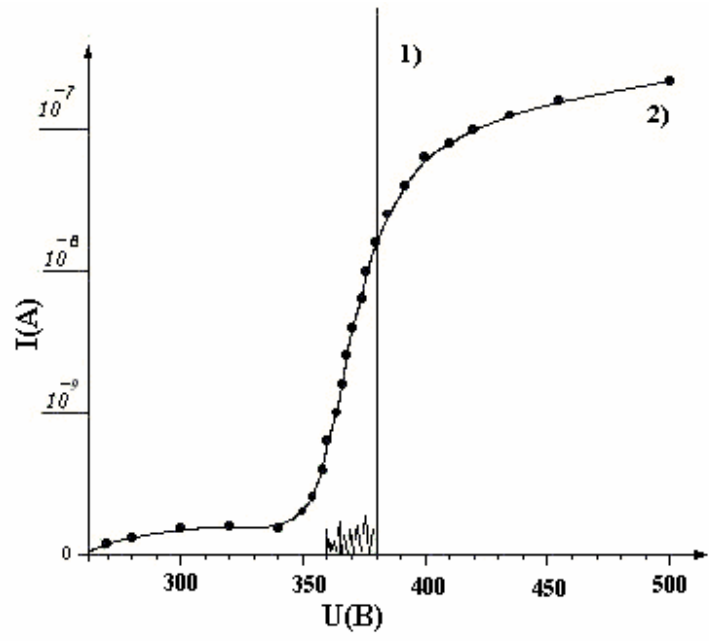


Рис. 2. ВАХ для двух типов ячеек: 1 - ячейка типа I, 2 - ячейка типа II.

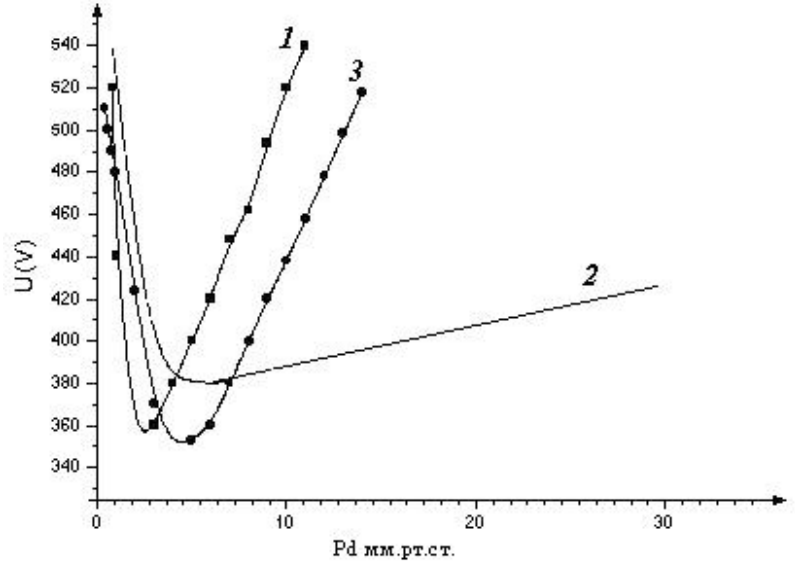


Рис. 3. Кривые Пашена для ГРЗ типа I (кривая 1), для протяженного зазора, согласно [9] (кривая 2) и для ГРЗ типа II (кривая 3).

При измерении ВАХ для обоих типов зазоров при разных давлениях были построены зависимости $U_3(pd)$, так называемые кривые Пашена, (рис. 3, кривые 1 и 3 для зазора типа I и II соответственно). Кривая 2 на рис. 3 – это кривая Пашена для воздушного протяженного (порядка нескольких сантиметров) зазора с металлическими электродами, приведенная в литературе [10].

Как видно из рис.3 минимальное напряжение зажигания как для узкого, так и для классического протяженного зазоров достигается при одинаковых значениях $pd \approx 2$ мм. рт. ст. Однако, при pd в области $2 \div 3$ мм. рт. ст. (что соответствует при заданном $d=60$ мкм области $p=60 \div 760$ тор), наблюдается существенная разница: для протяженного зазора U_3 слабо зависит от pd (кривая 2), а в узком зазоре U_3 в этой области pd резко возрастает (кривая 1). Прежде чем давать объяснение наблюдаемому различию, следует сопоставить размеры катодной области, в интервале $pd=2 \div 30$ мм.рт.ст. мм. с размерами нашего зазора ($d=60$ мкм). Проведенные, согласно [10], оценки катодной области для условий настоящего эксперимента в интервале значений $p=760 \div 8$ тор показали, что протяженность катодного пространства в области давлений $760 \div 60$ тор составляет от 4 до 50 мкм, т.е. полностью перекрывается исследуемым газовым зазором. Следовательно, газоразрядные процессы в используемом нами узком зазоре аналогичны тем, что характерны для классических протяженных зазоров. Поэтому качественную интерпретацию зависимости $U_3(pd)$ для узкого зазора можно привести на основе соответствующих представлений. Если при постоянном d увеличивать p , то будет существенно уменьшаться длина свободного пробега, т.е. то расстояние, на котором электроны набирают энергию под действием электрического поля для ионизации молекул. Поэтому, чтобы приобрести на малых расстояниях энергию, достаточную для ионизации газа, необходимо приложить большее напряжение. Следовательно, процесс ионизации газа в узком газовом зазоре будет начинаться при больших U_3 , чем для обычного газового разряда, и с ростом давления U_3 будет расти гораздо сильнее, что и наблюдается на опыте (рис.3).

При давлениях $p \leq 60$ тор зазор охватывает катодную область разряда лишь частично, что, по-видимому, делает разряд затрудненным и приводит к росту U_3 .

Сравнивая кривые Пашена для зазоров типа I и II (кривые 1 и 3 на рис.3), мы видим, что характер изменения $U_3(pd)$ и минимальные значения U_3 для них совпадают, однако есть смещение кривой Пашена для зазора типа II вдоль оси pd в сторону роста pd . Следовательно, при фиксированном давлении U_3 для этих двух типов зазоров могут и не совпадать, что и демонстрирует рис.2.

ВАХ в зазоре с полупроводниковым электродом, которая характеризуется плавным изменением тока до начала и в процессе ионизации, позволяет измерить зависимость тока через такой зазор от давления газа, что невозможно было сделать для зазора с двумя металлическими электрода-

ми. На рис.4 приведены эти зависимости при разных приложенных к зазору, напряжениях. Из рис.4 видно, что до начала ионизации, когда $U < 350$ В, ток от давления не зависит (кривые 1 и 2 на рис.4). При $U \geq 350$ В наблюдается немонотонная зависимость $I(p)$ с максимумом при $p \approx 60$ тор. Чем больше напряжение, тем больше ток в максимуме, а минимальное значение регистрируемых токов смещается в область больших давлений.

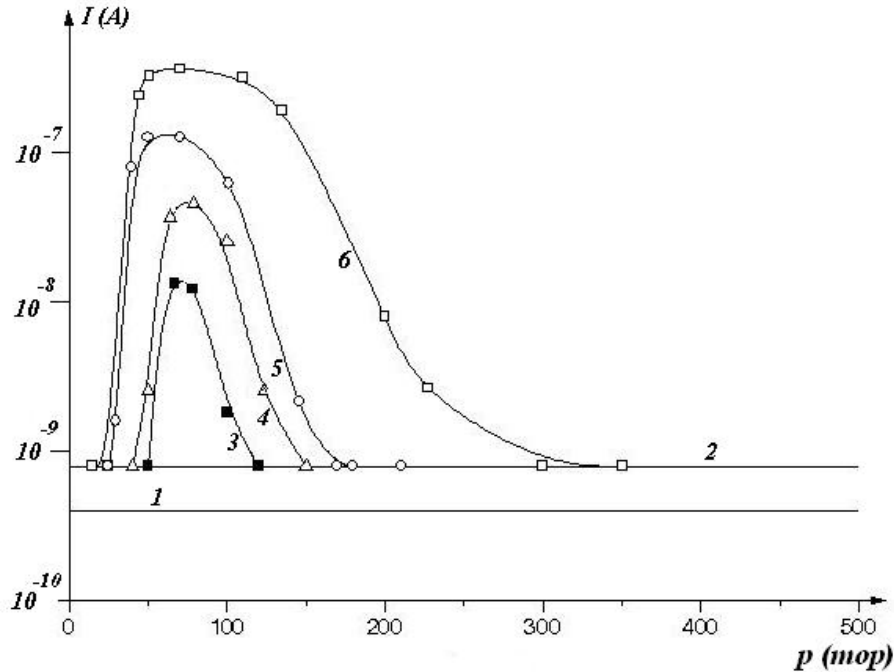


Рис. 4. Зависимость тока в газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом при разных напряжениях (1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют $U=200, 340, 350, 360, 400, 450$ В).

Наблюдаемая при $U \geq 350$ В зависимость $I(p)$ говорит о том, что она связана именно с возникновением разряда в промежутке, и подтверждает правильность выбранного для напряжения зажигания ($U_3 = 350$ В) значения.

Качественно ход этих характеристик можно объяснить с точки зрения электронных лавин [9], предложенных Таунсендом. При изменении давления газа от больших ($p=760$ тор) к малым ($p=60$ тор) увеличивается длина свободного пробега электрона в газе, а поэтому на расстоянии каждого свободного пробега электрон проходит большую разность потенциалов и вероятность ионизации при столкновении с атомами увеличивается, что приводит к увеличению коэффициента ионизации (α) и росту тока (I) в системе. При дальнейшем уменьшении давления (от $p=60$ тор до $p=15$ тор), уменьшается число столкновений электрона с атомами газа, что приводит к уменьшению α и спаду тока.

На основе графика зависимости $\frac{\alpha}{p}$ от $\frac{E}{p}$, приведенной в литературе [8] для протяженного воздушного зазора, построена подобная зависимость для исследуемого зазора при $E = 350$ В (рис.5).

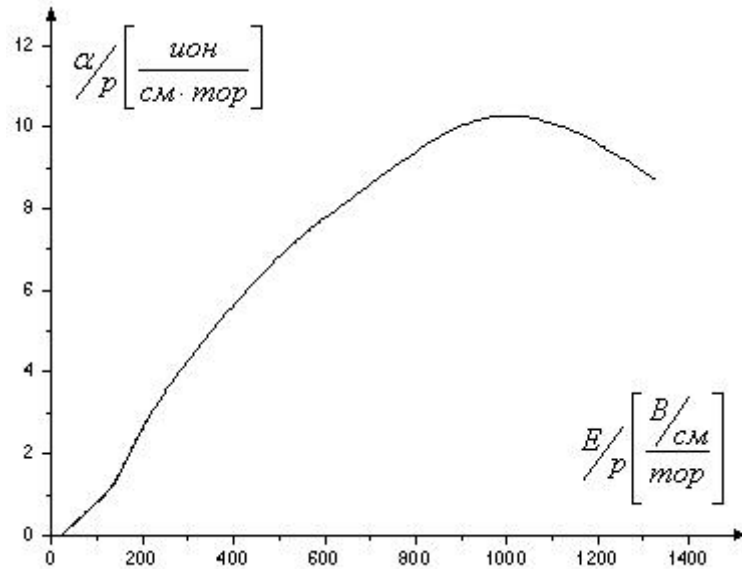


Рис. 5. Ионизационный коэффициент в широком диапазоне E/p в узкой газоразрядной ячейке.

Из рис.5. следует, что эта зависимость имеет такой же немонотонный характер, как и зависимость тока от давления (рис.4). Вычисленная величина давления, при котором наблюдается максимум на рис. 5, также соответствует $p=60$ тор. Следовательно, приведенное выше качественное объяснение зависимости тока от α находит свое подтверждение в рамках классической лавинной теории Таунсенда, что говорит о правомерности подхода к разряду в узком газовом зазоре, как к обычному газовому разряду.

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1 – используемый нами узкий газовый зазор в области $60 \div 760$ тор содержит катодную область, что позволяет применять к нему классическую теорию газового разряда.

2 – замена одного из металлических электродов на полупроводниковый изменяет процесс токопрохождения: ток регистрируется до пробоя и с началом ионизации возрастает не скачком, а плавно.

3 – монотонный рост тока в зазоре с полупроводниковым электродом позволил измерить зависимость тока от давления и полученный результат объяснить зависимостью от давления коэффициента ионизации α .

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.Г.Парицкий, С.М.Рывкин. Использование полупроводников для осуществления фотографического процесса в длинноволновой области спектра. ФТП, 1970, т.4, с.764-771.
2. L.G.Paritskii and Sh.S.Kasymov. USSR Patents 19460/18-10 and 197820-18-10 (1973).
3. B.S.Agaronov, A.Kh.Zeinally, N.N.Lebedeva, L.G.Paritskii. USSR, Patent 535451 (1978)
4. Е.И.Иванова, Л.Г.Парицкий, С.М.Рывкин. Получение фотографических изображений с использованием высокоомного GaAs – ФТП, 1970, т. 4. в. 9, с. 1819-1823.
5. N.N.Lebedeva, B.G.Salamov, V.J.Orbukh, V.M.Nagiev. Gas-discharge visualizer of in homogeneities in high-resistance semiconductors. Instrum. And Experim. Techniques, v. 37, N 5, par. 2, 1994.
6. A.Kh.Zeinally, N.N.Lebedeva, L.G.Paritskii, D.G.Salamov. Image recording on bismuth film in ionization type photographic system. I.Photogr. Sci., 39,114, 1991.
7. Н.Н.Лебедева, Б.Г.Саламов, Е.Ю.Боброва. Фотоионизационный преобразователь ИК-света в ближний УФ-свет. Вакı Univer. xəbərləri. Fiz.-riy. elm. seriyasi, 2002, N 3, 67-72.
8. B.G.Salamov, S.Elliatoglu, B.G.Akinoglu, N.N.Lebedeva, L.G.Paritskii. Spatial stabilization of Townsend and glow discharges with a semiconducting cathode, I.Phys. D, Appl.Phys. 29 (1996) 1-6.
9. Ю.П.Райзер. Физика газового разряда. Москва, «Наука» 1987 г.
10. Н.А.Капцов. Электроника. Москва, Техничко-теорет. литература. 1956 г.

YARIMKEÇİRİCİ ELEKTRODLU ENSİZ İONLAŞMA SİSTEMİNDƏ QAZBOŞALMA PROSESLƏRİ

Q.M.SADIXZADƏ, N.N.LEBEDEVA,
E.A.SULTANOV, L.S.HƏSƏNOV

ANNOTASIYA

İşdə yarımkeçirici elektrodun və elektrodlararası məsafənin qazın ionlaşması prosesinin başlanmasına təsiri tədqiq olunur.

Dar ($d=60\text{ mkm}$) hava aralığında və iki tiptən olan elektrodlarla bolt-amper xarakteristikaları (VAX) hesablanmışdır: 1) hər iki elektrod metaldandır; 2) elektrodlardan biri yüksək omu ($\rho\approx 10^8\text{ Om}\cdot\text{sm}$) GaAs yarımkeçiricisidir. VAX sabit cərəyanda ($U=50\div 700\text{ V}$) və qaz təzyiqlərində ($p=15\div 760\text{ tor}$) hesablanmışdır. Metal elektrodlu dar aralıqda, uzun aralıqlardan fərqli olaraq boşalmanın çətinləşdiyini (alışma gərginliyinin (U_a) $pd=2\div 30\text{ mm}\cdot\text{c.s.}$ sahəsində pd -dən kəskin asılılığı mövcuddur) göstərən Paşen əyriləri qurulmuşdur.

Yarımkəçirici elektrodlu aralıqda cərəyanın qazın təzyiqindən asılılığı ölçülmüşdür. Göstərilmişdir ki, qazın ionlaşmağa başlaması ilə \dot{I} -nin R -dən asılılığı yaranır. Həmin asılılıq $p=60$ tor-a bərabər olanda maksimuma çatır ki, bu da hesablanmış ionlaşma əmsalı α (α/p -nin E/p -dən asılılığı) asılılığı ilə uzlaşır.

THE GAS DISCHARGE PROCESSES IN THE NARROW IONIZATION SYSTEM WITH THE SEMICONDUCTING ELECTRODE

Q.M.SADIX-ZADE, N.N.LEBEDEVA,
E.A.SULTANOV, L.C.QASANOV

ABSTRACT

In the present paper the influence of the semiconducting cathode and inter-electrode distance on the beginning of the gas ionization process has been investigated.

The current-voltage characteristics (CVC) of the narrow ($d=60$ mm) gas discharge gap with two kinds of electrodes (1) two metal electrodes; 2) gallium arsenide ($\rho \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$) has been used as the high-resistivity semiconducting cathode) are studied. The CVC are determined in a wide range of the gas pressures $p=15 \div 760$ Torr and constant voltages $U=50 \div 700$ V. Pashen's curves demonstrating, that the gas discharge occurs with difficulties in the narrow gap with metal electrodes, in contrast of the wide gap, have been drawn. There is the sharp dependence of the striking voltage (U_s) on pd in the range of $pd=2 \div 30$ mm Hg.

The dependence of the current on the gas pressure is studied in the discharge gap with a semiconducting cathode. The dependence $I(p)$ was shown to appear simultaneously with the beginning of the gas ionization process. This dependence has maximum at $p=60$ Torr, that is in the satisfactory agreement to the calculated quantity of the dependence α/p (E/p), where α – ionization coefficient.