

молекулы. Поэтому при неизменной интенсивности ионизации не происходит дальнейшего возрастания тока.

Максимальная сила тока  $I_{\text{н}}$ , возможная при данной интенсивности ионизации, называется **током насыщения**. При токе насыщения к электродам ежесекундно прибывает электрический заряд  $eN_0$ , где  $N_0$  — число пар одновалентных ионов, образующихся в объеме газа под действием ионизатора за одну секунду. Очевидно, что ток насыщения

$$I_{\text{н}} = eN_0. \quad (12.6)$$

Из уравнения (12.6) видно, что если увеличить в несколько раз интенсивность ионизации, т.е. число  $N_0$  пар ионов, образующихся за одну секунду, то во столько же раз увеличится и ток насыщения  $I_{\text{н}}$ . Существование тока насыщения подтверждает ионную природу проводимости газов.

При дальнейшем увеличении напряжения между электродами сила тока снова начинает резко возрастать (4-я область напряжений). Это явление, обусловленное возникновением ударной ионизации и резким возрастанием числа носителей заряда в газе, будет подробнее рассмотрено в следующем параграфе.

### § 12.3. Самостоятельный газовый разряд

1. Электрический разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора, называется **самостоятельным газовым разрядом**. Для его осуществления необходимо, чтобы в результате самого разряда в газе непрерывно образовывались свободные заряды. Основным источником их возникновения является ударная ионизация молекул газа.

2. Рассмотрим влияние напряжения  $U$  между электродами газоразрядной трубки, изображенной на рис. 12.2, на проводимость газа и процессы, происходящие в нем при прохождении электрического тока. При некотором достаточно большом значении напряжения электроны, возникающие в газе под действием внешнего ионизатора  $R$ , настолько сильно ускоряются электрическим полем, что, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их: При этом образуются вторичные электроны и ионы. Вторичные электроны тоже ускоряются электрическим полем и в свою очередь ионизируют новые молекулы газа. Таким образом, число носителей тока в газе и его проводимость сильно возрастают. В этом и состоит причина резкого увеличения тока в начале 4-й области напряжений на рис. 12.3. Однако ударная ионизация, производимая одними электронами, недостаточна для поддержания разряда при удалении внешнего ионизатора, т.е. для осуществления самостоятельного разряда. В самом деле, каждый электрон движется в электрическом поле газоразрядной трубки в направлении от катода к аноду. Поэтому он может ионизировать только те молекулы газа, которые лежат близ анода по сравнению с местом его собственного возникновения. Иными словами, если энергия положительных ионов недостаточна для ударной ионизации молекул газа

или для выбивания электронов из металлического катода газоразрядной трубки, то вблизи последнего электроны могут возникать только благодаря действию в нем ионоизатора. Если его действие внезапно прекратится, то область ударной ионизации газа электронами постепенно будет сокращаться, стягиваясь к аноду по мере движения к нему электронов. В конце концов ударная ионизация и электрический ток в газе прекратятся совсем.

Совершенно иная картина будет наблюдаться, если напряжение  $U$  столь велико, что положительные ионы также приобретают способность порождать вторичные электроны<sup>1</sup>. В этом случае образуется двусторонняя лавина электронов и положительных ионов, возникающих во всех частях объема газа. Теперь внешний ионизатор уже не играет практически никакой роли в осуществлении газового разряда, так как число создаваемых им первичных электронов и ионов ничтожно по сравнению с числом вторичных электронов и ионов, образующихся благодаря указанным выше процессам. Поэтому прекращение действия внешнего ионизатора никак не отражается на дальнейшем протекании газового разряда. Таким образом, при достаточно большом повышении напряжения между электродами газоразрядной трубки самостоятельный газовый разряд может перейти в самостоятельный. Этот переход называется **электрическим пробоем газа**, а соответствующее ему напряжение  $U_3$  — **напряжением зажигания** или **напряжением пробоя**.

Из сказанного ясно, что для возникновения электрического пробоя газа необходимо, чтобы в нем имелось хотя бы небольшое начальное число свободных зарядов, способных сыграть роль «запала». Однако для этого не требуется применение специальных внешних ионизаторов (например, рентгеновских лучей), так как в естественных условиях газ всегда подвергается действию космических лучей и радиоактивного излучения Земли, ионизирующих небольшую часть его молекул.

3. Мы рассмотрели упрощенную картину возникновения и протекания газового разряда, в которой не учитывается ряд процессов, играющих в разряде более или менее существенную роль. Укажем на некоторые из них. Сталкиваясь с молекулами газа, электроны и ионы, обладающие недостаточной энергией для ионизации молекул, могут переводить их в возбужденные состояния. Возвращаясь в нормальное состояние, возбужденные молекулы излучают свет. Испускание света происходит также при рекомбинации положительных ионов с электронами (так называемое **рекомбинационное свечение**). Свет, падая на катод, может вызывать на его поверхности фотоэффект, т.е. выбивать из катода фотоэлектроны, участвующие в образовании двусторонней лавины.

Вырывание электронов из катода происходит в результате его

---

<sup>1</sup> Опыты показывают, что в большинстве случаев для выбивания электрона из катода положительный ион должен совершать меньшую работу, чем для ударной ионизации молекулы газа. Поэтому основной причиной появления вторичных электронов под действием положительных ионов является процесс выбивания электронов из катода газоразрядной трубки.

нагрева при бомбардировке положительными ионами (термоэлектронная эмиссия), а также под действием сильного электрического поля (холодная эмиссия). Наконец, электроны, ударяясь об анод, могут выбивать из него положительные ионы.

4. Опыты показывают, что напряжение зажигания  $U_3$  в газоразрядной трубке с плоскими электродами, параллельными друг другу, зависит от химической природы газа, материала катода и произведе-

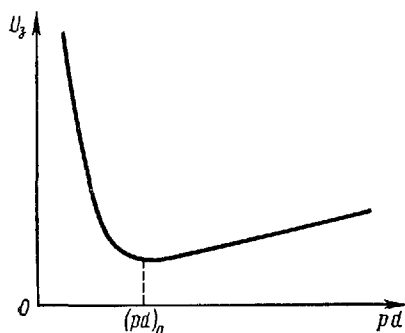


Рис. 12.4

ния давления  $p$  газа на расстояние  $d$  между электродами трубки. Чем меньше потенциал ионизации молекул газа и чем меньше работа выхода электронов из металла, тем при прочих равных условиях меньше напряжение зажигания. Более сложный вид имеет зависимость  $U_3$  от произведения  $pd$ , представленная на рис. 12.4. Ее можно пояснить следующим образом. Зависимость напряжения зажигания от давления газа и расстояния  $d$  между электродами определяется двумя условиями возникновения самостоятельного газового разряда: во-первых, необходимо, чтобы

энергия, приобретаемая электронами под действием электрического поля, была достаточна для ударной ионизации молекул газа, а энергия, приобретаемая положительными ионами, была достаточна для выбивания электронов из катода; во-вторых, необходимо, чтобы вероятность неупругих соударений электронов с молекулами газа была сравнительно велика, так как в противном случае число носителей заряда в газе и его проводимость будут малы. Электроны и положительные ионы ускоряются электрическим полем в процессе их свободного пробега между двумя последовательными соударениями с молекулами газа. С увеличением давления газа средние длины свободного пробега электронов и ионов уменьшаются. Поэтому для сообщения им необходимой энергии нужно увеличивать напряженность электрического поля, т.е. при постоянном  $d$  увеличивать напряжение между электродами газоразрядной трубки. Этим объясняется возрастание напряжения зажигания с увеличением произведения  $pd$  при  $pd > (pd)_0$  (рис. 12.4). В области малых значений  $pd < (pd)_0$  решающую роль играет второе условие. При малых значениях давления  $p$  или расстояния  $d$  вероятность соударения электронов с молекулами газа значительно меньше, чем при большом значении произведения  $pd$ . Поэтому для выполнения второго условия нужно, чтобы возможно большее число этих соударений носило неупругий характер. Иными словами, в области малых значений  $pd$  с уменьшением давления газа нужно увеличивать напряженность электрического поля. Этим объясняется возрастание  $U_3$  с уменьшением произведения  $pd$  при  $pd < (pd)_0$ .

Напряжение зажигания в значительной степени зависит от наличия в газе примесей.

5. В следующих параграфах будут рассмотрены некоторые типы самостоятельных газовых разрядов, отличающихся друг от друга как по внешнему виду, так и по характеру физических процессов, обуславливающих их возникновение и протекание.

## § 12.4. Тлеющий разряд

1. **Тлеющий разряд** наблюдается в газах при низких давлениях порядка нескольких десятков миллиметров ртутного столба и меньше. На рис. 12.5 изображена трубка с тлеющим разрядом и показано распределение потенциала  $\varphi$  вдоль ее оси. Основными частями тлеющего разряда являются **катодное темное пространство (I)**, резко отделенное от него **отрицательное, или тлеющее, свечение (II)**, которое постепенно переходит в область **фардеева темного пространства (III)**. Эти три области образуют катодную часть разряда, за которой следует основная светящаяся часть разряда, определяющая его оптические свойства и называемая **положительным столбом (IV)**.

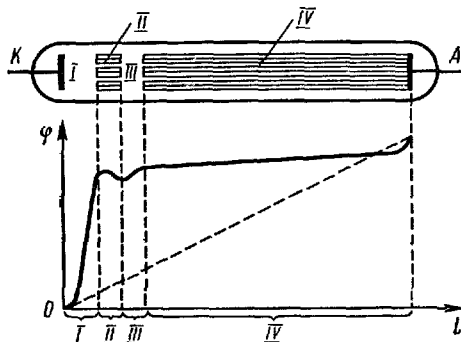


Рис. 12.5

2. Основную роль в поддержании тлеющего разряда играют первые две области его катодной части. Характерной особенностью этого типа разряда является резкое падение потенциала вблизи катода, которое связано с большой концентрацией положительных ионов на границе I и II областей, обусловленной сравнительно малой скоростью движения ионов к катоду. В катодном темном пространстве происходит сильное ускорение электронов и положительных ионов, выбивающих электроны из катода. В области тлеющего свечения электроны производят интенсивную ударную ионизацию молекул газа и теряют свою энергию. Здесь образуются положительные ионы, необходимые для поддержания разряда. Напряженность электрического поля в этой области мала. Тлеющее свечение в основном вызывается рекомбинацией электронов и ионов. Протяженность катодного темного пространства определяется свойствами газа и материала катода.

В области положительного столба концентрация электронов и ионов приблизительно одинакова и очень велика, что обуславливает большую электропроводность положительного столба и незначительное падение в нем потенциала. Свечение положительного столба определяется свечением возбужденных молекул газа. Вблизи анода