

04;12

Самоподдерживающиеся колебания в слаботочном разряде с полупроводником в роли катода и балластного сопротивления.

I. Эксперимент

© Е.Л. Гуревич,^{1,2} Ю.П. Райзер,³ Х.-Г. Пурвинс¹¹ Institute für Angewandte Physik,
D-48149 Münster, Germany² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия³ Институт проблем механики РАН,
119526 Москва, Россия

e-mail: Evgeny.Gurevich@mpi-sf.mpg.de

(Поступило в Редакцию 25 марта 2005 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования самоподдерживающихся колебаний тока в тонком плоском газоразрядном промежутке, где горит однородный вдоль электродных поверхностей таунсендовский разряд. Катодом для разряда, балластным сопротивлением и дополнительной емкостью в цепи, питаемой источником постоянного напряжения, служит тонкая пластина из полупроводника. Установлены область существования, частоты и форма колебаний в широком диапазоне давлений.

PACS: 52.80.Tn

Введение

При очень большом сопротивлении цепи, с газоразрядным промежутком, в газе после пробоя зажигается слаботочный таунсендовский разряд, который горит при напряжении на электродах V , весьма близком к напряжению пробоя V_T . Это обстоятельство, а также способность полупроводника менять свою проводимость σ_s под действием инфракрасного излучения, использованы в приборе, который преобразует инфракрасное излучение в видимое [1].

В этом устройстве плоский промежуток длиной $d \sim 0.03-0.05$ см заполняется азотом под давлением $p \sim 20-50$ Торр ($pd \sim 1$ см · Торр). Катодом и одновременно балластным сопротивлением служит тонкая полупроводниковая пластина из арсенида галлия. Это придает сопротивлению распределенный характер, что способствует стабилизации разряда. Изображению в инфракрасном свете на полупроводнике отвечают определенные распределения σ_s , плотности разрядного тока j и свечения разряда. Видимое изображение можно наблюдать через полупрозрачный анод.

В действительности таунсендовский разряд обладает слегка падающей вольт-амперной характеристикой (ВАХ), что, как известно, предрасполагает к неустойчивости. Если поднимать приложенные к устройству постоянное напряжение V_0 и ток, появляются незатухающие колебания тока и напряжения на разряде, потом возникают токовые шнуры, часто образующие упорядоченные на плоскости структуры, что нарушает нормальное функционирование прибора. Эти эффекты были экспериментально изучены [2]. Самоподдержива-

ющиеся, в дальнейшем автоколебания тока (и напряжения), колебания в таунсендовском разряде исследовались на установках с металлическими электродами, балластным сопротивлением обычного типа, а также постоянном приложенном напряжении [3-6]. Как правило, в таких экспериментах параллельно разрядному промежутку приходится включать большую емкость, иначе колебания подавляются. В устройстве с тонким полупроводником в качестве сопротивления его собственная емкость оказывается достаточно большой. Колебания в этом устройстве, в принципе, не отличаются от колебаний в газовых разрядах с обычными сопротивлением и емкостью. Во многих случаях колебания имеют характер релаксационных, будучи по форме далекими от гармонических.

Основной целью настоящей работы, которая состоит из двух частей, является прояснение механизмов и установление факторов, управляющих возникновением и стабилизацией автоколебаний в слаботочном разряде при различных pd и других условиях. Этому будет посвящена ее вторая, теоретическая, часть [7]. В первой части представлены результаты экспериментов в устройстве с полупроводником: новые данные о колебаниях, их частотах и области существования для диапазона $pd \approx 0.25-12.5$ см · Торр, гораздо более широкого, чем в предыдущих работах. Эти данные служат ориентиром для рассмотрения, проведенного во второй части, и в полной мере смогут быть использованы лишь в последующих исследованиях. Из-за сложности явления, теория, развитая здесь, скорее призвана дать ответы на общие вопросы физического характера, нежели обеспечить возможность количественного сопоставления с экспериментом. Надо полагать, данные новых экспе-

риментов будут полезны и для практических целей. В частности, на основе эффекта можно сделать генератор колебаний с перестраиваемой частотой с токами порядка 0.1 А.

1. Установка, условия и техника измерений

Катодом для плоского разрядного промежутка (рис. 1) служит пластина из кристалла GaAs толщиной $d_s = 0.12-0.15$ см. При комнатной температуре и без освещения кристалл обладает проводимостью $\sigma_s \approx 10^{-8} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$. В экспериментах полупроводник освещался через полупрозрачный золотой контакт лампы накаливания, отчего проводимость повышалась на порядок. Проводимость определялась интенсивностью облучения, которая изменялась вариацией напряжения на лампе и контролировалась фотодиодом. Известно, что ВАХ GaAs бывает немотонной, что само по себе может вызвать осцилляции тока [8]. Чтобы исключить этот эффект, использовался полупроводник с монотонной, почти линейной, ВАХ. Кстати сказать, частота осцилляций, связанных с немотонностью ВАХ GaAs, на порядки меньше наблюдаемой в опытах с разрядом. Анодом служила тонкая пленка $\text{In}_2\text{O}+\text{Sn}_2\text{O}$ (ИТО), нанесенная на стеклянную пластину. Пленка обладает омическим сопротивлением, не нарушающим однородного распределения потенциала вдоль поверхности анода.

Газоразрядный промежуток формировался спейсером фиксированной толщины d (0.01–0.1 см) и с фиксированным диаметром внутреннего отверстия D (1.5–4.0 см), которыми задавалась площадь разряда $S = \pi D^2/4$. Однородность разряда вдоль плоскости,

так же как и изменения тока во времени, контролировалась по излучению разряда. Излучение регистрировалось фотоумножителем 931А фирмы RCA с разрешением 1 ns, а также с помощью съемки на скоростную камеру Proxitronic 1000 FPS Camera с временем экспозиции до 5 ns и частотой выборки 3000 кадров в секунду. Разрядные токи, обычно $I \sim 0.1-1$ mA, измерялись по падению напряжения на постоянном сопротивлении 100 Ω , включенном в цепь последовательно, и на 3–4 порядка меньшем балластного сопротивления $R \sim 1$ M Ω , задаваемого полупроводником. Осциллограмма тока считывалась при помощи АЦП.

Представленные измерения сделаны с азотом при давлении от 4 до 250 Torr и $d = 0.03-0.08$ см ($pd \approx 0.2-12$ см · Torr). Внешним освещением Φ в полупроводнике при слабом токе устанавливалась проводимость $\sigma_s = (0.7-0.8)10^{-7} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$. Из-за небольшой неустраиваемой нелинейности ВАХ полупроводника к моменту начала осцилляций тока проводимость повышалась до $\sigma_s = (1.2-1.3)10^{-7} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$. Значения σ_s с точностью до 10% определялись из измеряемой ВАХ $V_0(I)$ системы полупроводник–разрядный промежуток при известном напряжении на промежутке, близком к пробивному V_T .

После начала осцилляций точно измерить проводимость полупроводника не представляется возможным, но, судя по всему, в области существования однородных колебаний тока σ_s если и изменяется, то не сильно. Относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника $\epsilon_s = 11-13$.

В ходе эксперимента постепенно поднималось напряжение V_0 , приложенное к системе. Скорость разделения зарядов в полупроводнике, даже при его слабой проводимости, неизмеримо больше скорости подъема напряжения. Поэтому пока промежуток не пробился, все напряжение V_0 оказывается приложенным к газовому промежутку. Когда V_0 достигает V_T , зажигается разряд, о чем свидетельствуют появление слабого свечения и тока в несколько $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Так измеряется V_T . При последующем повышении напряжения ток в цепи растет. При не слишком больших превышениях V_0 над V_T ток постоянен во времени. Разряд при этом однороден по всей площади S . То что это — истинная однородность, а не результат усреднения по времени, проверялось с помощью скоростной фотосъемки.

При некотором пороговом напряжении V_{0t} ток, оставаясь однородным в пространстве, начинает осциллировать около среднего значения. Это происходит при сравнительно слабых токах, далеких по плотности от предельных для таунсендовского разряда [9]. Значит, напряжение на промежутке остается близким к пробивающему V_T , что позволяет связать пороговые для начала колебаний значения тока I_t и напряжения V_{0t} соотношением $V_{0t} = V_T + I_t R$, где $R = d_s/(\sigma_s S)$ и использовать его или всю ВАХ для измерения σ_s . Пороговые значения $I_t \sim 1$ mA, $j_t = I_t/S \sim 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

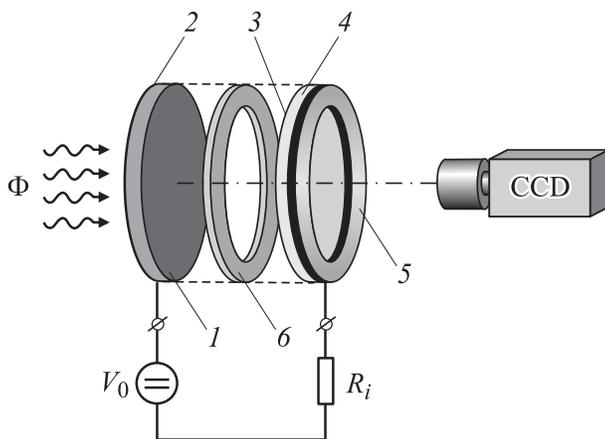


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 — полупроводниковый катод (полуизолирующий арсенид галлия), 2 — полупрозрачный золотой контакт, 3 — ИТО, 4 — стеклянная пластина, 5 — контактное кольцо, 6 — спейсер, R_i — измерительное сопротивление, V_0 — источник постоянного напряжения (Stanford PS 325).

2. Результаты экспериментов

Из табл. 1 видно, как меняются пороговые значения V_{0r} и j_t и частота колебаний при изменении проводимости полупроводника σ_s , но фиксированных условиях разряда (p и d). Данные приведены для различных давлений. Частота колебаний возрастает с ростом тока при $p = \text{const}$, она немного уменьшается с ростом давления при неизменной плотности тока. Последнюю в эксперименте удобно менять, изменяя освещенность полупроводника, т.е. его проводимость. От площади разряда частота, так же как и пороговая плотность тока j_t , не зависят, что естественно, поскольку $D \gg d$. С частотой тока осциллирует и интенсивность свечения разряда, повторяя форму колебаний тока. Данные о

Таблица 1. Напряжения и токи, пороговые для возникновения колебаний (азот, GaAs, $d = 0.05$ cm, $d_s = 0.12$ cm, $D = 1.5$ cm)

p , Torr	pd , cm · Torr	V_T , V	V_{0r} , V	R_s , MΩ	$\sigma_s, \times 10^{-7}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) ⁻¹	j_t , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	f , kHz
25	1.25	400	1100	1.25	0.544	318	645
25	1.25	400	770	0.851	0.799	246	615
25	1.25	400	680	0.691	0.984	229	595
25	1.25	400	640	0.587	1.16	231	530
44	2.2	500	1050	1.11	0.613	280	547
44	2.2	500	820	0.825	0.824	219	527
44	2.2	500	760	0.703	0.967	209	517
44	2.2	500	710	0.561	1.21	211	470
75	3.75	600	1020	1.26	0.540	188	380
75	3.75	600	920	1.00	0.680	180	380
75	3.75	600	860	0.833	0.816	176	380
75	3.75	600	820	0.710	0.958	175	380
100	5.0	740	980	0.811	0.838	167	400
150	7.5	1050	1170	0.418	1.63	162	370
188	9.4	1170	1230	0.255	2.67	133	330
250	12.5	1350	1390	0.199	3.42	113	315

Таблица 2. Область существования однородных колебаний (азот, GaAs, $d = 0.05$ cm, $d_s = 0.15$ cm, $\sigma_s = 1.0 \cdot 10^{-7}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹, $D = 1.5$ cm)

p , Torr	pd , cm · Torr	V_T , V	V_{0r} , V	V_{0m} , V	j_t , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
5	0.25	270	404		89
6	0.3	245	328		55.4
8	0.4	206	275	280	46
12	0.6	199	269	274	46.7
20	1.0	213	289	294	50.7
30	1.5	235	309	313	49
40	2.0	256	322	327	44
64	3.2	312	353	357	27.3
90	4.5	358	380	386	14.7
121	6.05	394	406	414	8.0
150	7.5	416	430	436	9.3
218	10.9	487	501	505	9.3
240	12.0	498	513	517	10.0

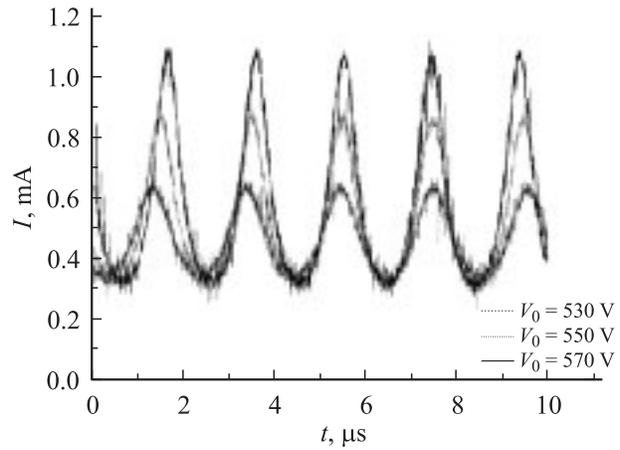


Рис. 2. Оциллограмма колебаний тока в разряде в азоте. $p = 10$ Torr, $d = 0.08$ cm, $V_{0r} = 510$ V. Амплитуда осцилляций растет с напряжением.

частоте могут представлять интерес для практики при использовании эффекта в генераторах колебаний тока с перестраиваемой частотой.

Как видно из рис. 2, уже при сравнительно небольшом превышении V_0 над V_{0r} амплитуда колебаний тока становится большой, сравнимой со средним током. При дальнейшем повышении напряжения колебания становятся неустойчивыми, на фоне периодических изменений тока в произвольные моменты времени появляются пики (рис. 3), при еще больших напряжениях нарушаются пространственная однородность разряда.

В табл. 2 представлены данные о порогах пробоя V_T , возникновения колебаний V_{0r} и пределов существования устойчивых пространственно однородных колебаний тока V_{0m} для широкого диапазона p или pd и при неизменном сопротивлении полупроводника R_s (его проводимости σ_s), что удобно для сопоставления с теорией. Более наглядное представление о том же дает рис. 4, соответствующий несколько другим условиям. Колебания существуют при pd , лежащих по обе стороны от минимума кривой Пашена.

Не следует сильно удивляться расхождению измеренных порогов пробоя V_T при одинаковых pd , но разных d или в разных экспериментах, как в табл. 1 и 2. Закон подобия для кривой Пашена $V_T(pd)$ в действительности нарушается, особенно в области минимума, — это известный факт. Кроме того, на напряжения пробоя даже при одинаковых p и d влияет много других факторов (не всегда предсказуемых). Например, V_T зависит от количества и частоты пробоев, в которых участвовал данный образец полупроводникового катода (эффект „тренировки“), чистота его поверхности и газа, и т.д., это отмечалось в [4–6]. То же относится и к порогам для возбуждения колебаний, различие которых также бросается в глаза при сопоставлении данных табл. 1 и 2.

Следует отметить, что в эксперименте проявилась прямая зависимость тока, порогового для возбуждения

колебаний от балластного сопротивления цепи при неизменных (p и d) (см. табл. 1). Это не совпадает с тем, что наблюдается в опытах с металлическими электродами [3,6], где пороговый ток падает при росте сопротивления цепи, и с тем, что следовало бы ожидать из физических соображений. Этот результат остается не объясненным. Причиной его может являться то, что в эксперименте пороговый ток определялся как ток, при котором амплитуда колебаний превосходит амплитуду шума. При увеличении сопротивления шум, возможно, возрастал, затрудняя определение истинного порога. При низких значениях балластного сопротивления ($R_s < 0.7 \text{ M}\Omega$ в табл. 1), пороговый ток немного возрастает при уменьшении балластного сопротивления, что ближе к теории и ранним работам. Заметим, что подсветка полупроводника вряд ли существенно влияет на процессы катодной эмиссии с его поверхности, обращенной к разряду. Все явления в разряде и их параметры остаются теми же, если подобрать те же

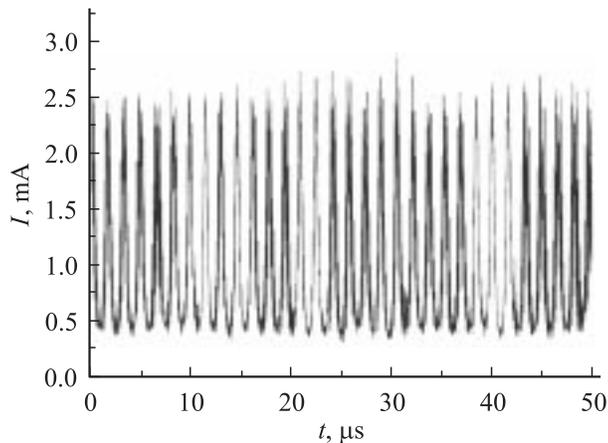


Рис. 3. Осциллограмма колебаний тока в разряде в азоте. $p = 10 \text{ Torr}$, $d = 0.08 \text{ cm}$, $V_0 = 750 \text{ V}$.

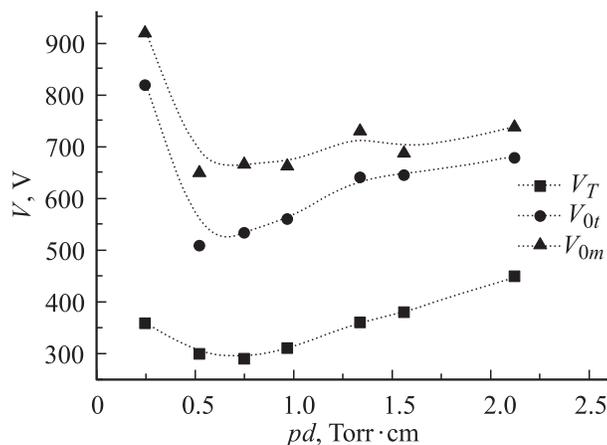


Рис. 4. Пороговые напряжения для возникновения и распада колебаний тока в разряде в азоте при $d = 0.03 \text{ cm}$, $d_s = 0.125 \text{ cm}$, $\sigma_s = 10^{-7} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$.

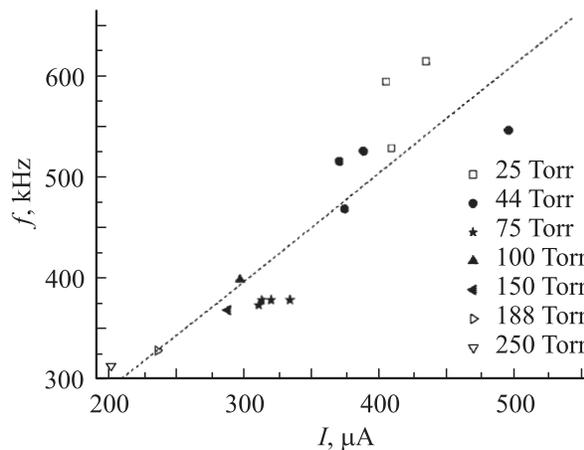


Рис. 5. Зависимость частоты осцилляций от среднего тока в азоте при $d = 0.05 \text{ cm}$, $d_s = 0.125 \text{ cm}$ при различных давлениях. Пунктир на графике — линейная аппроксимация экспериментальных данных.

значения проводимости полупроводника, не пользуясь подсветкой.

Частота колебаний в устройстве с неизменными геометрическими параметрами определяется в основном плотностью тока, монотонно нарастая с ее увеличением (рис. 5). Она несколько падает с ростом давления при неизменном среднем токе и при увеличении расстояния между электродами. Ток и частоту в эксперименте удобно менять, изменяя освещенность полупроводника, это может оказаться полезным при создании генератора колебаний с перестраиваемой частотой.

Список литературы

- [1] *Astrov Yu.A., Portsel L.M., Teperick S.P., Willebrand H., Purwins H.-G.* // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. P. 2159–2166.
- [2] *Strümpel C., Astrov Yu.A., Purwins H.-G.* // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 62. N 4. P. 4889–4897.
- [3] *Мелехин В.Н., Наумов Н.Ю.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 8. С. 1521–1529.
- [4] *Мелехин В.Н., Наумов Н.Ю., Ткаченко Н.П.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. С. 454.
- [5] *Petrović Z.L., Phelps A.V.* // Phys. Rev. E. 1993. Vol. 47. N 4. P. 2806–2815.
- [6] *Phelps A.V., Petrović Z.L., Jelenović B.M.* // Phys. Rev. E. 1993. Vol. 47. N 4. P. 2825–2838.
- [7] *Райзер Ю.П., Гуревич Е.Л., Мокров М.С.* // ЖТФ. 2005. Т. 76. Вып. 2. С. 40–51.
- [8] *Willing B., Maan J.C.* // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49. N 19. P. 13995–13998.
- [9] *Райзер Ю.П.* // Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.