

04;12

Электрический аналог магнитного резонанса

© Б.А. Андрианов

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

Поступило в Редакцию 26 июля 1999 г.

При подключении к межэлектродному промежутку "острие–плоскость" радиочастотного напряжения малой амплитуды и высокого постоянного напряжения при отрицательной полярности острия обнаружено резонансное поглощение радиочастотной энергии, максимум которого наступает на частоте, равной или кратной частоте импульсов Тричеля. Посредством развертки высокого напряжения при фиксированном значении частоты записаны резонансные линии. Установлено, что начальный участок зависимости между резонансными значениями частоты и напряженности электростатического поля в большей части промежутка является линейным и имеет одинаковый коэффициент пропорциональности для различных межэлектродных расстояний, оцениваемый как $1.0 \pm 0.2 \text{ Hz} \cdot \text{m/V}$.

Наиболее замечательным свойством отрицательной короны является ее способность к самоупорядочению происходящих в ней электрических процессов — так называемые импульсы Тричеля [1], для которых характерна линейная зависимость частоты повторения от среднего тока разряда в обширном частотном диапазоне. Вместе с тем еще в ранних экспериментах было установлено [2], что вольт-амперная характеристика коронного разряда на своем начальном участке, вопреки теоретическому описанию [3], тоже линейна. Отсюда нетрудно предсказать линейную зависимость частоты импульсов Тричеля от напряженности электрического поля короны, что сразу же внушает формальную аналогию с магнитным резонансом.

С этих позиций представляет большой интерес выяснение возможности избирательного поглощения энергии слабого гармонического электрического поля, приложенного к отрицательной короне. В настоящей работе изучалось именно такое воздействие, и его частота могла регулироваться от нескольких десятков килогерц до единиц мегагерц. Для этого был использован классический метод куметра [4] в его

прямом воплощении на стандартной радиотехнической аппаратуре, модифицированный, конечно, так, чтобы энергопоглощающим элементом служила емкостная цепь колебательного контура, куда включен исследуемый межэлектродный промежуток; он соединен последовательно с разделительным конденсатором и вместе с параллельно подключенным к этой цепочке измерительным конденсатором куметра все они служат в качестве составного конденсатора в указанном контуре. Выбор емкости разделительного конденсатора позволяет задавать амплитуду прилагаемого радиочастотного электрического поля. Постоянное выходное напряжение куметра, пропорциональное измеряемой добротности Q , и высокое напряжение U , уменьшенное делителем, подаются на входы двухкоординатного самописца. Резонансное поглощение энергии в описанной схеме должно регистрироваться по уменьшению амплитуды радиочастотного напряжения на контуре, которое вызвано снижением полного сопротивления контура в параллельной схеме замещения, т. е. падением его добротности, которая служит индикатором диссипативных процессов.

Все эксперименты выполнялись в атмосферном воздухе при комнатной температуре. Куметр настраивают на выбранную частоту f , затем к промежутку прикладывают регулируемое высокое постоянное напряжение. При этом сразу же появляются импульсы Тричеля, частота f_{Tr} которых определяется этим напряжением. Пока эта частота f_{Tr} находится далеко от радиочастоты f и последняя не кратна ей, выходное напряжение куметра остается почти неизменным.

В окрестности определенных значений высокого напряжения наблюдается резонансное уменьшение добротности, показанное на рис. 1. При этом средний разрядный ток меняется монотонно, так что наблюдаемое уменьшение добротности не вызвано увеличением активной проводимости промежутка. Измерение частоты f_{Tr} импульсов Тричеля показывает, что резонансные значения напряжения U_r соответствуют прямому или кратному равенству частоты f_r приложенного переменного напряжения (индекс r введен для обозначения резонансных условий) частоте импульсов Тричеля:

$$f_r = N f_{Tr} (N = 1, 2, 3, \dots). \quad (1)$$

На рис. 1 крайняя правая резонансная кривая записана при равенстве $f_r = f_{Tr} (N = 1)$, соседняя кривая соответствует $N = 2$ и т. д. В области превышения частоты импульсов Тричеля над частотой переменного поля никаких резонансов не наблюдается.

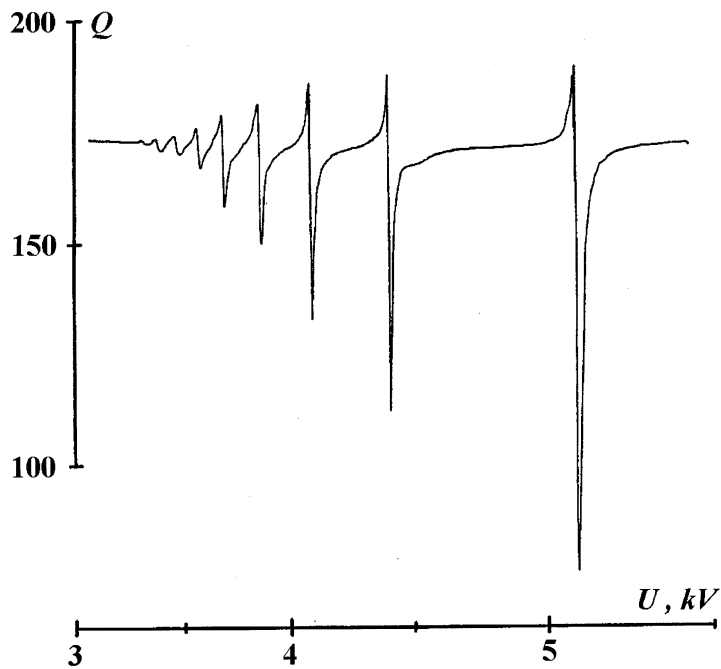


Рис. 1. Добротность Q колебательного контура в зависимости от высокого постоянного напряжения U между электродами при фиксированных значениях частоты $f = 1$ MHz и межэлектродного расстояния $h = 5$ mm.

Заметим, что наличие целого семейства резонансных линий не противоречит общей картине подобия с магнитным резонансом, если вспомнить о параметрических резонансах в радиочастной области, наблюдаемых, например, при оптической накачке паров нечетных изотопов щелочных металлов [6,7]. Это, кстати, делает более понятным и объяснимым ряд особенностей импульсов Тричеля, отмеченных в [2]: внезапное скачкообразное изменение частоты импульсов между различными колебательными модами, существование двухмодового режима генерации и в особенности почти одинаковый наклон вольт-амперных характеристик для различных мод, как это видно на рис. 4 и 5 в [2].

При более медленной развертке ясно видно, что форма резонансной линии представляет собой хорошо известную в магнитном резонансе кривую поглощения с незначительной примесью сигнала дисперсии. Вклад последнего, впрочем, в различных экспериментах не постоянен и зависит, по-видимому, от точности настройки контура на рабочую частоту и неконтролируемых фазовых сдвигов в измерительной системе.

Еще одной чертой описываемого явления, общей с магнитным резонансом, является радиочастотное уширение: замечено, что ширина резонансной линии удваивается при увеличении амплитуды радиочастотного напряжения приблизительно вдвое.

Ввиду фиксированной настройки колебательного контура частотное сканирование в данной установке не выполнимо, однако частотная зависимость резонанса была построена по значениям добротности Q , измеренным на различных частотах при фиксированном постоянном напряжении. Она имеет четкую форму кривой поглощения с шириной около 10 кГц.

Тщательная теоретическая и экспериментальная оценка возможного влияния различных аппаратурных факторов (изменение собственной частоты контура, взаимная синхронизация частоты импульсов Тричеля и встроенного генератора куметра, взаимодействие настроенного контура с гармониками импульсов Тричеля) показывает, что все они играют ничтожную роль в наблюдаемом явлении и оно вызвано вполне самостоятельной причиной.

Измерение различных пар резонансных значений U_r и радиочастоты f_r , соответствующих минимуму резонанской кривой при фиксированном межэлектродном расстоянии h и обеспечивающих значение $N = 1$ в (1), показывает, что начальный участок графика зависимости между этими величинами является линейным. Наклон прямых $f_r(U_r)$, конечно, различен для различных значений h . Тем не менее оказалось, что можно получить приблизительно одинаковый наклон для всех прямых при замене напряжения U_r напряженностью электрического поля E_r на плоскости напротив острия.

Для определения величины E_r используем независимую от радиуса кривизны острия приближенную формулу (2.53) из [5], которая в данном случае принимает вид

$$E_r = (3/2)U_r/h. \quad (2)$$

Эта формула удовлетворительно описывает поле не только для единственной точки на плоскости напротив острия. В действительности она

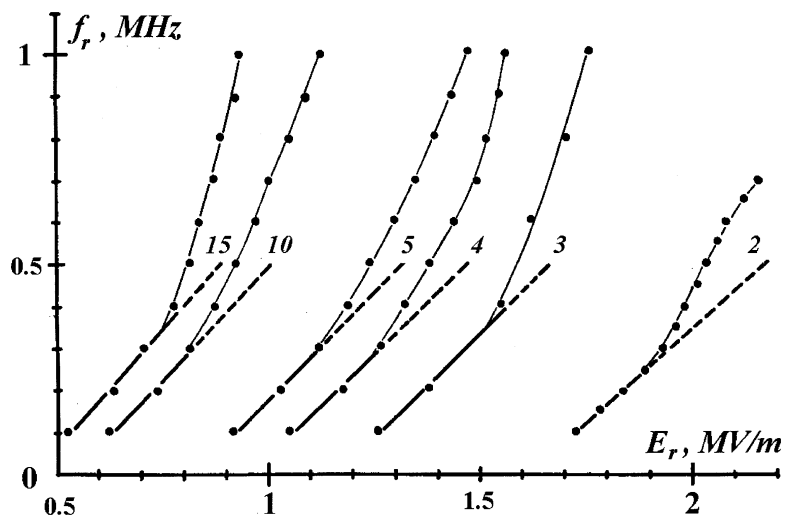


Рис. 2. Зависимость между резонансными значениями частоты f_r и напряженности E_r электростатического поля на плоскости напротив острия для различных значений h , указанных в мм возле каждой кривой.

применима к более обширной области, поскольку экспериментальная проверка показала [5], что на расстояниях вплоть до $0.7h$ от плоскости в направлении к острию напряженность электрического поля отличается от ее значения на плоскости не более чем на $10 \div 15\%$. Это позволяет грубо оценить значение напряженности электрического поля E_r в большей части промежутка как значение этой напряженности на плоскости.

Графики зависимости f_r от E_r , представленные на рис. 2, действительно демонстрируют одинаковый наклон их начального участка, который может быть описан линейным соотношением

$$f_r = \gamma_E(E_r - E_0), \quad (3)$$

где E_0 — некоторое значение напряженности, пропорциональное начальному напряжению короны и тоже удовлетворяющее соотношению (2), а γ_E — единый коэффициент пропорциональности.

Из результатов, представленных на рис. 2, следует, что

$$\gamma_E = (1.0 \pm 0.2) \text{ Hz} \cdot \text{m/V}. \quad (4)$$

(Погрешность включает в себя систематическую и случайную составляющие).

Таким образом, описанное явление резонансного поглощения радиочастотной энергии в электростатическом поле в своих общих чертах может рассматриваться как электрический аналог известного явления магнитного резонанса, поэтому величина γ_E внушает догадку о своеобразном гироэлектрическом отношении. Данная аналогия, безусловно, порождает много вопросов, которые пока остаются открытыми, поэтому дальнейшие всесторонние исследования представляют несомненный интерес.

Автор выражает глубокую благодарность миссис Джин Добер и мисс Мэган Бик за их помощь в подготовке англоязычной версии этой статьи.

Список литературы

- [1] *Trichel G.W.* // Phys. Rev. 1938. V. 54. P. 1078.
- [2] *English W.N.* // Phys. Rev. 1948. V. 74. N 2. P. 170–178.
- [3] *Loeb L.B.* // Electrical Coronas. Their Basic Physical Mechanism. University of California Press, 1965.
- [4] *Абрагам А.* Ядерный магнетизм / Пер. с англ. Под ред. Г.В. Скродского. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 551 с.
- [5] *Верещагин И.П.* Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- [6] *Cohen-Tannoudji C., Dupont-Roc J., Haroche S., Laloë F.* // Revue de Physique Appliquée. 1970. T. 5. N 1. P. 95–101.
- [7] *Андреанов Б.А., Овчаренко П.С., Студенцов Н.В.* Авт. св. СССР № 847237. Оpubл. 15 июля 1981 г. Бюлл. № 26.