

## РЕЗОНАНСНЫЙ ЗОНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ФЛУКТУАЦИЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА МИКРО- И НАНОСПУТНИКАХ

<sup>1</sup>А.Г. Галка, <sup>1</sup>Д.В. Янин, <sup>1</sup>А.В. Костров, <sup>2</sup>С.И. Климов, <sup>2</sup>Д.И. Новиков

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

galasn@appl.sci-nnov.ru

## RESONANT PROBE FOR MEASURING DENSITY AND FLUCTUATIONS OF IONOSPHERIC PLASMA ON MICRO- AND NANOSATELLITES

<sup>1</sup>A.G. Galka, <sup>1</sup>D.V. Yanin, <sup>1</sup>A.V. Kostrov, <sup>2</sup>S.I. Klimov, <sup>2</sup>D.I. Novikov

<sup>1</sup>The Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

---

**Аннотация.** Разработан резонансный датчик для измерения концентрации ионосферной плазмы и ее флуктуаций на микро- и наноспутниках. Диагностика основана на измерении диэлектрической проницаемости плазмы с помощью резонатора на базе четвертьволнового отрезка двухпроводной линии. Проведена экспериментальная апробация датчика на плазменном стенде КРОТ в масштабе 1:1. Показано, что диапазон измеряемых концентраций составляет  $10^3$ – $10^6$  см<sup>-3</sup>, что характерно для ионосферной плазмы на высотах 400–500 км.

**Ключевые слова:** зондовая методика, разработка, комплект научной аппаратуры, спутниковые измерения, микро- и наноспутники, ионосферная плазма, концентрация плазмы, флуктуации концентрации плазмы.

**Abstract.** The resonant probe for measuring ionospheric plasma density and its fluctuations on micro- and nanosatellites has been developed. The method is based on measuring of plasma dielectric permeability by means of the quarter wave resonator on a two-wire line section. Experimental approbation of the sensor was performed on KROT plasma device in 1:1 scale. It was shown that the range of the measuring density is  $10^3$ – $10^6$  cm<sup>-3</sup> that is typical for ionospheric plasma at the altitude of 400–500 km.

**Keywords:** probe methodology, development, scientific equipment kit, satellite measurements, micro- and nanosatellites, ionospheric plasma, plasma density, plasma density fluctuations.

---

### Введение

Спутниковые зондовые измерения концентрации плазмы являются мощным инструментом диагностики ионосферы с возможностями недоступными для дистанционных методов радиолокации. Несмотря на большое количество методик измерения концентрации лабораторной плазмы, соответствующих спутниковых локальных диагностик не так много. В первую очередь это связано со спецификой ионосферных условий, низкими значениями концентрации плазмы, стоимостью и массогабаритными параметрами научной аппаратуры. Кратко опишем основные методики для измерения концентрации ионосферной плазмы.

Метод зонда Ленгмюра позволяет одновременно измерять концентрацию и температуру электронов ионосферной плазмы [Каган и др., 1963]. Несмотря на простоту изготовления зонда, данная методика отягощена сложностью теоретического описания, обусловленной наличием целого ряда факторов, влияющих на вольтамперную характеристику (ВАХ) зонда. Для интерпретации зондовых измерений необходимо учитывать скорость образования области нарушения квазинейтральности вблизи поверхности зонда, структура которой зависит от геометрических размера зонда,

потенциала спутника, материала поверхности, скорости движения спутника, энергии заряженных частиц. Так же, методика зонда Ленгмюра не применима на микро- и нано- спутниках в силу их малых габаритов и соответственно недостаточной площади собирающей поверхности.

Среди традиционных методов измерения плотности и температуры околоземной плазмы стоит отметить метод измерения взаимного импеданса между двумя антеннами (MIP) [Decreau et al., 1978]. По форме кривой зависимости импеданса от частоты можно восстановить плазменную частоту и емкость двойного слоя вблизи антенны, которые определяют концентрацию и температуру электронной компоненты плазмы.

Метод активного зондирования параметров плазмы по резонансному отклику успешно реализован французскими учеными на приборе Whisper в составе научной аппаратуры [Decreau et al., 1997]. Измеряемые значения концентрации лежат в диапазоне 0.2–80 см<sup>-3</sup>. Как и все активные методы, данный метод непригоден для совместного использования с другими диагностиками при мониторинге параметров плазмы, поскольку вносит существенные помехи в работу спутниковой аппаратуры.

Много работ посвящено измерениям ионного состава космической плазмы. Для выполнения этих целей современные спутники оснащены анализатором частиц [Berthelier et al., 2006]. Однако данное оборудование непригодно для использования на микро- и нано- спутниках из-за высокой стоимости, большого энергопотребления и массогабаритных характеристик.

Данная работа посвящена разработке и апробации новой зондовой методики для локального измерения концентрации ионосферной плазмы в диапазоне  $10^3$ – $10^6$  см<sup>-3</sup> и ее флуктуаций на борту микро- и нано- спутников с высотой орбиты порядка 500 км. Метод основан на измерении диэлектрической проницаемости плазмы, величина которой определяется концентрацией электронной компоненты.

### Основная часть

Датчик для измерения концентрации ионосферной плазмы представляет собой распределенную резонансную систему в виде четвертьволнового отрезка двухпроводной линии, закороченной на одном конце. Собственная резонансная частота системы  $\omega_{0res}/2\pi=180$  МГц, добротность около 350. Длина проводников резонатора — 400 мм, диаметр — 5 мм, проводники разнесены друг относительно друга на расстояние 40 мм. Возбуждение резонатора и прием его отклика осуществляется с помощью петель магнитной связи, расположенных вблизи закороченного конца (рис. 1).

При нахождении резонатора в плазме изменяется его резонансная частота  $\omega_{res}$ , по величине которой определяется плазменная частота  $\omega_{pe}$  и концентрация плазмы  $N$ :

$$\omega_{res}^2 = \omega_{0res}^2 + \omega_{pe}^2(N), N = \frac{m\omega_{pe}^2}{4\pi e^2}.$$

Экспериментальные тестирования датчика проводились в режиме распадающейся плазмы на крупномасштабном плазменном стенде КРОТ [Костров и др., 1999]. В зависимости от диапазона измеряемых концентраций отработано две методики диагностики электронной концентрации. В рамках первой методики, для концентраций  $N > 10^6$  см<sup>-3</sup> измерения проводились следующим образом. К возбуждающей петле связи резонатора подводится сигнал на постоянной частоте  $\omega > \omega_{0res}$  и снимается резонансная кривая как функция времени. С помощью представленного уравнения определяется концентрация плазмы для момента наступления резонанса. Варьируя частоту, можно снимать ход кривой концентрации от времени [Stenzel et al., 1976].

Вторая методика соответствует диапазону концентраций  $N < 10^6$  см<sup>-3</sup>, характерному для ионосферной плазмы на высотах порядка 500–600 км. Плазма столь низкой концентрации вызывает малые изменения резонансной частоты системы относительно  $\omega_{0res}$ , отследить которые по положению максимума резонансной кривой затруднительно. Для их регистрации был использован метод измерения фазового сдвига [Янин и др., 2017]. Сигнал с генератора  $U_T$  на собственной резонансной частоте датчика в вакууме, с помощью резистивного делителя мощности делится на два равных сигнала  $U_T/2$ , один из которых с помощью коаксиального кабеля подводится к возбуждающей петле резонатора, второй к фазовому детектору в качестве опорного сигнала (рис. 1). Высокочастотный сигнал  $U_{res}$  с приемной петли связи посредством коаксиального кабеля через фазовращатель поступал на вход фазового детектора, формирующего сигнал, зависящий от амплитуды сигнала  $U_{res}$  и разности фаз  $\Delta\varphi$  между  $U_{res}$  и опорным сигналом  $U_T/2$ . Результирующий сигнал  $U_{out}$  оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя и записывался в память компьютера для дальнейшей обработки. При отсутствии плазмы с помощью фазовращателя между сигналами  $U_{res}$  и опорным  $U_T/2$  устанавливалась разность фаз  $90^\circ$ . Наличие плазмы приводило к смещению резонансной частоты датчика и появлению дополнительного набега фазы  $\Delta\varphi$  прошедшего через него сигнала, причем  $U_{out} \sim U_{res} \sin(\Delta\varphi)$ . Величина  $\omega_{res} - \omega_{0res}$  определялась из фазочастотной характеристики экспериментальной установки по осциллограмме сигнала с диагностической системы регистрировался временной ход концентрации плазмы со значениями  $N < 10^6$  см<sup>-3</sup>.

На рис. 2 представлены результаты измерений концентрации плазмы. Независимая оценка концентрации плазмы в процессе распада проводилась на основе измерений  $N$  в диапазоне  $10^{12}$ – $10^{10}$  см<sup>-3</sup> (рис. 2, участок 1), выполненных с помощью резонансного СВЧ-зонда [Янин и др., 2008]. В предположении неизменности характера диффузионного распада плазмы линейная зависимость  $\ln N(t)$  на временах 2–18 мс (участок 1) продолжена в виде пунктирной линии до значений  $N \sim 10^4$  см<sup>-3</sup>. Участок 2 на рис. 2 соответствует результатам, полученных датчиком параметров плазмы с использованием первой методики, значения концентрации на участке 3 — посредством второй методики. Как видно из результатов экспериментов, данные с резонансного датчика хорошо согласуются с временной зависимости  $N(t)$ .

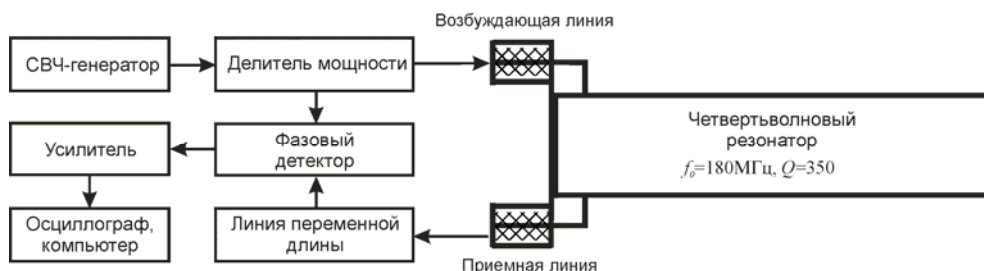


Рис. 1. Блок-схема измерительной системы с четвертьволновым резонатором

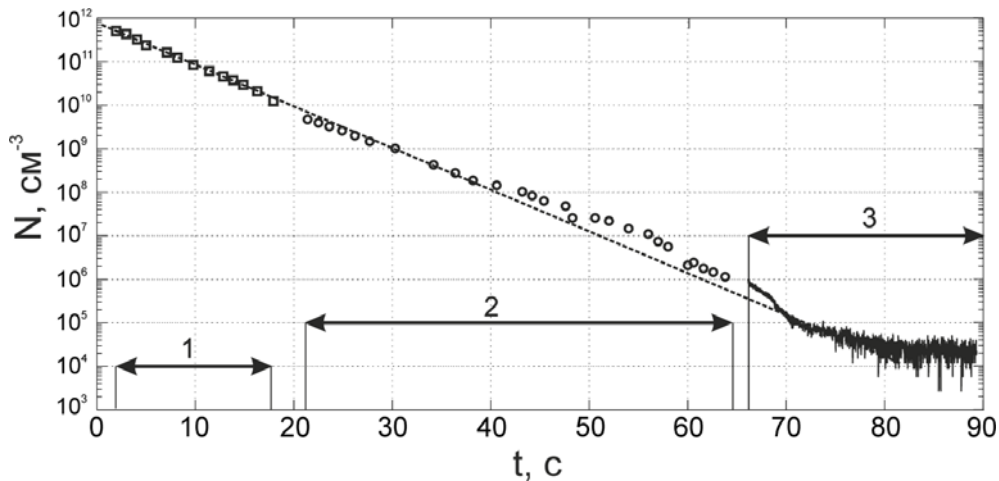


Рис. 2. Зависимость концентрации плазмы от времени после выключения плазмозоудующего генератора: участок 1 — измерения выполнены с помощью резонансного СВЧ-зонда; участок 2 — измерения выполнены датчиком параметров плазмы с использованием первой методики; участок 3 — измерения выполнены датчиком параметров плазмы с использованием второй методики

Важно отметить, что в ионосферных условиях необходимо учитывать температуру резонатора, вариации которой из-за солнечного излучения приводят к изменению собственной его резонансной частоты вследствие температурного расширения материала резонатора. Поэтому в состав измерительной системы будет входить температурный датчик, с помощью которого будет вводиться температурная коррекция собственной резонансной частоты системы для повышения точности измерений.

### Заключение

Разработан и апробирован резонансный датчик для измерения концентрации ионосферной плазмы и ее флуктуаций. Диапазон измеряемых значений концентрации составляет  $10^3$ – $10^6$  см<sup>-3</sup>, что соответствует плотности плазмы на высотах порядка 500 км. Тестирование датчика осуществлялось на крупномасштабном плазменном стенде КРОТ, в условиях, максимально приближенных к ионосферным. Данные с датчика параметров плазмы хорошо согласуются с кривой распада плазмы.

### Список литературы

- Каган Ю.М., Перель В.И. Зондовые методы исследования плазмы // Успехи физических наук. 1963. Т. 81. С. 409–452.
- Костров А.В., Стриковский А.В., Чугунов Ю.В., Шашурин А.В., и др. Экспериментальный стенд КРОТ для лабораторного моделирования космических явлений: Препринт ИПФ РАН № 510. Н. Новгород, 1999. 30 с.
- Янин Д.В., Галка А.Г., Костров А.В., Привер С.Э., Смирнов А.И. Резонансный датчик давления газа на отрезке коаксиальной линии // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 74–80.
- Янин Д.В., Костров А.В., Смирнов А.И., Стриковский А.В. Диагностика нестационарных возмущений плотности плазмы // Журнал технической физики. 2008. Т. 78, вып. 1. С. 133–136.
- Decreau P.M.E., Etcheto J., Knott K., et al. Multi-Experiment Determination of Plasma Density and Temperature // Space Sci. Rev. 1978. V. 22. P. 633–645.
- Decreau P.M.E., Ferreau P., Krannoselskikh V., et al. WHISPER, a resonance sounder and wave analyser: Performances and perspectives for the Cluster mission // Space Sci. Rev. 1997. V. 79, N 1–2. P. 157–193.
- Berthelier J.J., Godefroy M., Leblanc F., et al. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER // Planetary and Space Sci. 2006. V. 54, iss. 5. P. 487–501.
- Stenzel R.L. Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasma // Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47, N 5. P. 603–607.