

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАГНЕТРОНОВ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

### RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MAGNETRONS IN THE SHORT MM-WAVE RANGE

Скрипкин Н.И. / n.scripkin@pluton.msk.ru, Шмелев А.В. / av.shmelev88@gmail.ru,  
Проников А.И. / pronikovalexey@mail.ru

N.I.Scripkin, A.V.Shmelev, A.I.Pronikov

АО «Плутон», г.Москва

*Представлены результаты расчётных работ по исследованию процессов возбуждения колебаний в магнетроне с использованием компьютерного моделирования в 2-х и 3-х миллиметровом диапазоне длин волн, проводимых в АО «Плутон». Приведены экспериментальные данные линейки магнетронов, сконструированных на основании расчётных моделей.*

*The results are presented of the research processes of excitation of oscillations in the magnetrons in the short mm-wave range using modeling. The experimental results are presented of magnetrons in the short mm-wave range manufactured in JSC Pluton.*

Ключевые слова: *магнетрон, пространственная гармоника, номер вида колебаний, мм диапазон длин волн, катодно-подогревательный узел, вывод энергии, трехступенчатый трансформатор, H-образный трансформатор, ВЧ-мощность, спектр высокочастотных колебаний.*

Keywords: *magnetrons in the short mm-wave range, spatial harmonic, mode of oscillations, cathode, H-view transformer, 3-steps transformer, power extraction*

#### ВВЕДЕНИЕ

За последние, по крайней мере, 15 лет в отечественной и зарубежной литературе опубликовано немало статей и докладов, в которых обсуждаются перспективы развития коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн для построения различных радиолокационных систем [1]. Актуальны задачи построения локаторов в 2-х и 3-х миллиметровом диапазоне длин волн для:

- определения угловых координат объектов с высокой точностью при небольших размерах антенного устройства;
- создания РЛС космического базирования;
- создания ближней локации для мониторинга пространства с невысокими к ним требованиями зависимости дальности обнаружения от метеорологических условий при определении любых целей на фоне больших объектов;
- создание устройств, работающих на коротких наносекундных импульсах.

Переход от экспериментальных макетов радиолокаторов миллиметрового диапазона к их серийному производству связан с активным развитием электронной компонентной базы. В настоящее время на предприятии АО «Плутон» ведутся работы по созданию магнетронов в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн с перестройкой и стабилизацией частоты через второй (вспомогательный) вывод энергии [2-4].

В данной работе приводятся результаты компьютерного моделирования и разработки магнетронов в 2-х и 3-х миллиметровом диапазоне длин волн на пространственной гармонике не  $\pi$ -вида колебаний с двумя выводами энергии, основного и

вспомогательного, с помощью которого возможна механическая перестройка частоты, электронная перестройка частоты от импульса к импульсу с использованием ферритового фазовращателя, стабилизация частоты с помощью высокодобротного квазиоптического резонатора.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе проведения теоретических исследований разработана методика компьютерного моделирования резонаторных систем, позволяющая проводить оценку и выбор необходимой анодной замедляющей системы ЗС по: количеству резонаторов  $N$ , номеру вида колебаний  $n$ , номеру рабочей пространственной гармоники  $\gamma$ , размерам элементов ЗС, по согласованию, выбору типа и размеров вывода энергии. Получены картины ВЧ-полей видов колебаний в пространстве взаимодействия, с помощью которых возможно определение номера вида колебаний  $n$  и управление частотой вида в зависимости от геометрических размеров ЗС.

Разработана методика компьютерного моделирования процессов возбуждения колебаний в пространстве взаимодействия и передачи энергии в волноводный тракт с учётом пространственного заряда. Получены наглядные осцилляционные картины возбуждения видов колебаний, позволяющие определять и регулировать процесс возбуждения рабочей пространственной гармоники, стремясь при этом к одновидовому режиму. То есть, другими словами, управлять процессом создания предпочтительных условий возбуждения для рабочей пространственной гармоники.

На рис. 1-3 представлены: фрагмент ЗС анодного блока с трехступенчатым трансформатором и волноводом, структура высокочастотного поля в пространстве взаимодействия и резонансная кривая вида колебания.

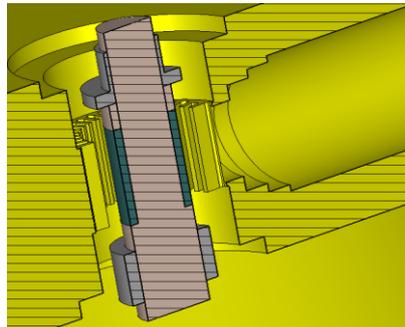


Рис. 1. ЗС с трехступенчатым трансформатором и волноводом.

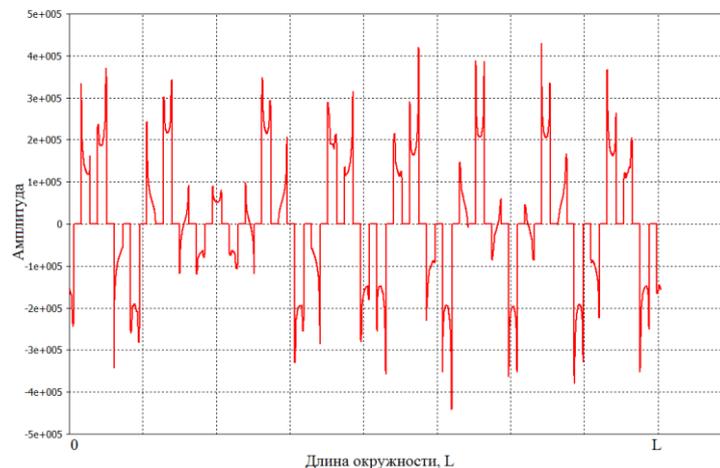


Рис. 2. Структура высокочастотного поля.

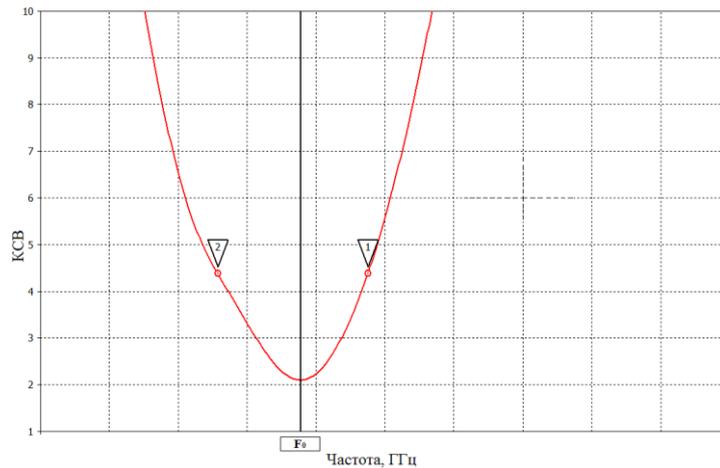


Рис. 3. Резонансная кривая.

Расчётные величины добротностей имеют следующие значения: в 2-х мм диапазоне  $Q_0 = 640$ ,  $Q_{вн} = 1350$ , в 3-х мм диапазоне  $Q_0 = 940$ ,  $Q_{вн} = 2000$ , где  $Q_0$ ,  $Q_{вн}$  – собственная и внешняя добротности, соответственно.

На рис. 4-7 показана работа магнетрона в генераторном режиме с электронным потоком.

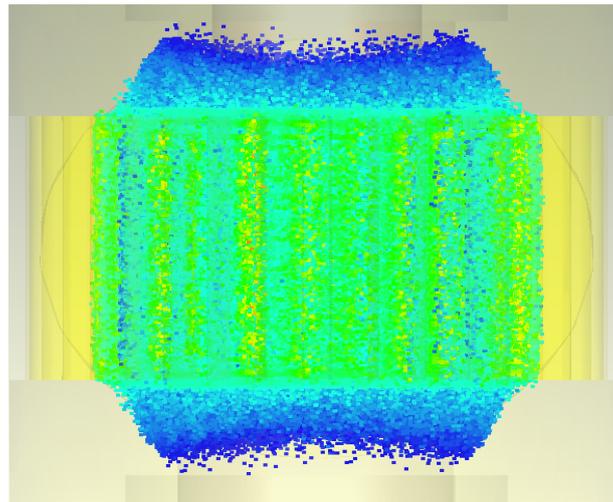


Рис. 4. Электронный поток в пространстве взаимодействия.

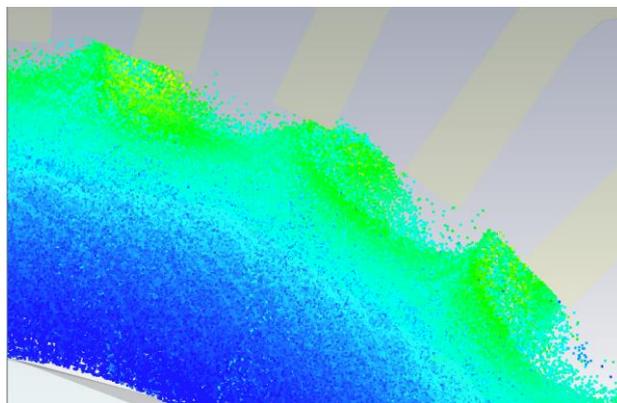


Рис. 5. Электронные «спицы».

Спектр колебаний одновидового режима на рабочей частоте представлен на рис.6.

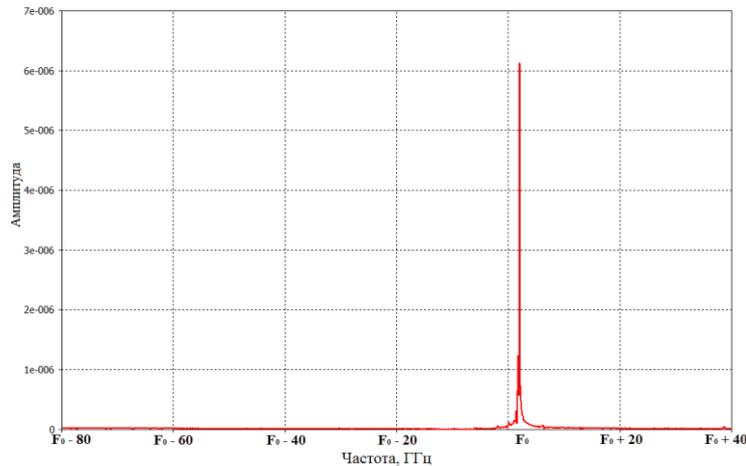


Рис. 6. Спектр ВЧ-колебаний.

Осцилляционная картина переходного процесса возбуждения высокочастотных колебаний рабочей пространственной гармоники, по которой возможно определить величину выходной импульсной мощности, представлена на рис. 7.

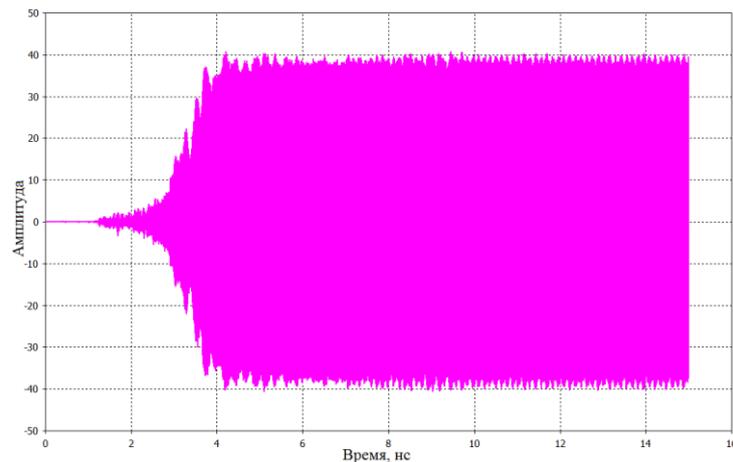


Рис. 7. Осцилляционная картина.

Расчётная величина импульсной мощности может быть найдена из следующего соотношения:

$P_{рас} = \frac{A^2}{2}$ , где  $A$  – амплитуда ВЧ-колебаний. Получившаяся расчётная мощность имеет значение:

$$P_{рас} = \frac{40^2}{2} = 800 \text{ Вт.}$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 8 показан общий вид магнетрона частично магнитно-экранированной конструкции с двумя выводами и радиатором охлаждения. Данная конструкция идентична для всех разработанных магнетронов с воздушным принудительным охлаждением. В магнетронах используются самарий-кобальтовые цилиндрические магниты с радиальным намагничиванием с термокомпенсатором, позволяющим получать в интервале температур

от минус 60 °С до плюс 100 °С изменение напряжения анода  $U_a$  при постоянном номинальном токе анода  $I_a$  примерно 200 В.



Рис. 8. Общий вид магнетрона.

Анодный блок магнетрона выполнен из меди, либо с молибденовой защитой кончиков ламелей (для магнетронов с анодным напряжением  $U_a$  свыше 13 кВ).

Активная часть катодно-подогревательного узла (КПУ), имитирующая электроны, выполнена из иридий-лантана методом порошковой металлургии (метало-сплавной иридий-лантановый эмиттер на керне), конструкция которого изображена на рис. 9. КПУ смонтирован аксиально с анодным блоком магнетрона.

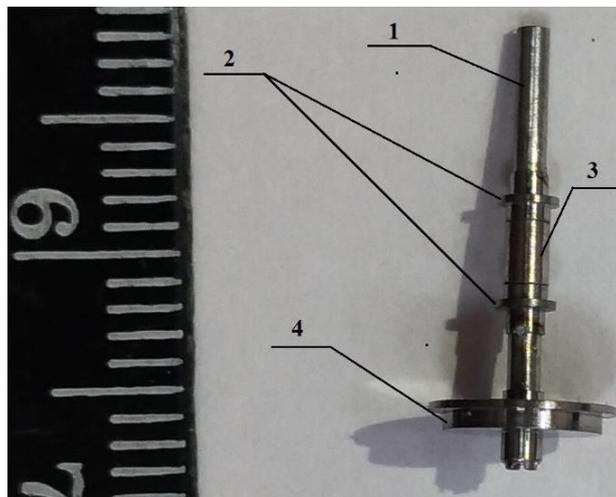


Рис. 9. Конструкция катодного узла (1 – керн, 2 – экраны, 3 – эмиттер, 4 – держатель).

Вакуумное уплотнение выводов энергии осуществляется с помощью искусственной слюды фторфлогопит.

С помощью измерений на установках низкого уровня мощности резонансных кривых в 2-х и 3-х миллиметровом диапазоне длин волн определён уровень добротностей

резонансных систем, который составляет в 2-х мм диапазоне  $Q_0 = 520, Q_{ВН} = 820$ , в 3-х мм диапазоне  $Q_0 = 700, Q_{ВН} = 1300$ .

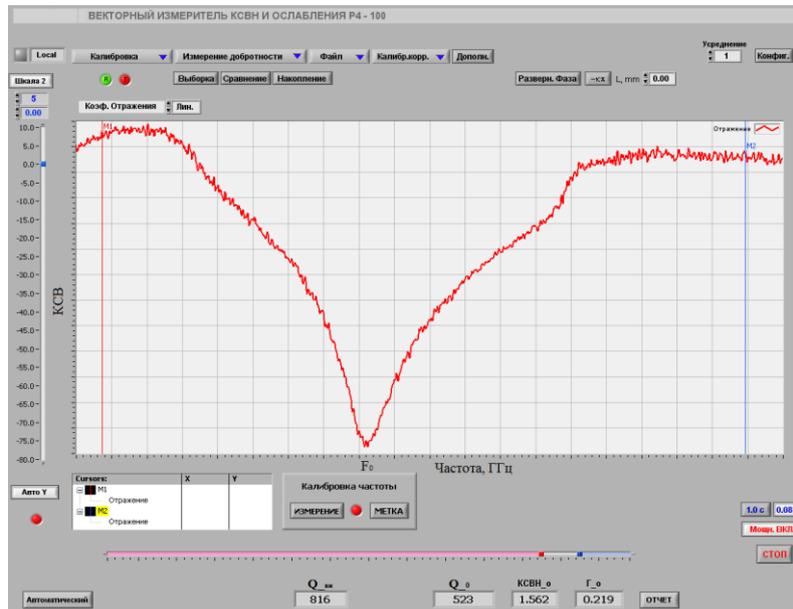


Рис. 10. Резонансная кривая.

На рис. 10 представлена резонансная кривая магнетрона 2-х мм диапазона длин волн.

Следующие иллюстрации, представленные на рис. 11-12, характеризуют режимы работы магнетрона 2-х мм диапазона длин волн и качество спектра, зафиксированные на стенде динамических испытаний (на установке высокого уровня мощности).

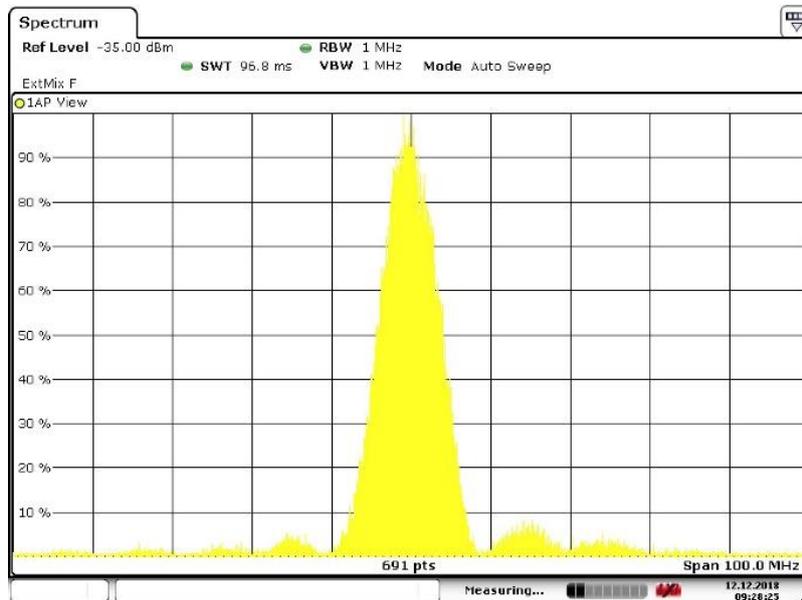


Рис. 11. Спектр ВЧ-сигнала.

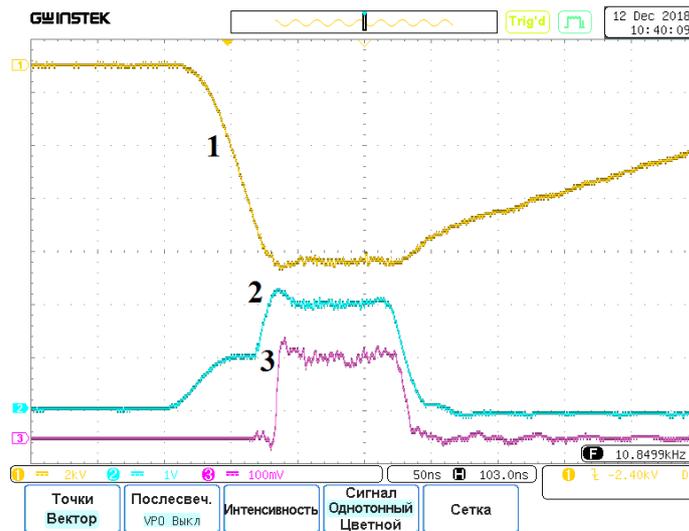


Рис. 12. Режимы работы (1 – модулирующий импульс, 2 – импульс тока, 3 – высокочастотная огибающая).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных теоретических и экспериментальных работ получена линейка магнетронов в 2-х и 3-х миллиметровом диапазоне длин волн, параметры которых представлены в таблице 1. Компьютерное моделирование позволило получать действующий макет магнетрона с наперед заданным рабочим видом колебаний с первого изготовленного образца, позволило сократить до минимума количество комплектов деталей, необходимых для выполнения ОКР.

Таблица 1.

Параметры магнетронов						
$\lambda$ , мм	$U_a$ , кВ	$I_a$ , А	$P_{in}$ , кВт	$P_{нак}$ , Вт	$\tau_{вч}$ , нс	Q
2	15,4	15,0	5,5 – 10,0	не более 34	70 – 80	1100 – 1200
2	10,7	9,2	2,1	не более 12	100	840
2	8,0	7,0	0,9 – 1,1	не более 12	100	840
2	6,2	7,0	0,2	не более 12	100	840
3	12,5	10,0	8,0 – 12,0	не более 25	200	2000
3	9,3	8,0	2,5	не более 12	200	2000
3	7,3	9,0	1,3	не более 12	200	2000
3	5,8	9,0	0,7	не более 12	200	2000
3	4,5	9,0	0,4	не более 12	200	2000

где Q – скважность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С.И. Нефедов, М.И. Нониашвили, А.А. Лаговиер, М.Е. Голубцов «Перспективы применения миллиметровой радиолокации для обнаружения и распознавания неподвижных и движущихся объектов на фоне подстилающей поверхности», IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» ИРЭ РАН, 29 ноября – 3 декабря 2010 г., стр. 237-242;
2. Н.И. Скрипкин, С.Л. Моругин «Магнетроны 3-миллиметрового диапазона длин волн на пространственной гармонике не  $\pi$ -вида колебаний», «Электромагнитные волны и электронные системы», № 9, т. 21, стр. 25-31, 2016 г.;

3. И.М. Иванов, Н.И. Скрипкин, А.В. Шмелев «Магнетроны 3-миллиметрового диапазона длин волн с возможностью перестройки и стабилизации частоты», «Электромагнитные волны и электронные системы», № 10, т. 21, стр. 68-72, 2016 г.;

4. Н.И. Скрипкин, С.Л. Моругин «Перестройка частоты магнетрона 3 мм диапазона длин волн с помощью дополнительного вывода», «Приборы и техника эксперимента», № 4, стр. 47-52, 2018 г.

## ВЛИЯНИЕ АБСОРБЦИИ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА НА ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

## INFLUENCE OF HELIUM AND HYDROGEN ABSORPTION ON THE EMISSION PROPERTIES OF CARBON NANOTUBES

С.М. Умаев<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0000-0000-0000) / sirazd@mail.ru,

Д.Н. Борисенко<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-6948-7975) / borisenko@issp.ac.ru

Н.Н. Колесников<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0000-0000-0001) / nkoles@issp.ac.ru

А.А. Левченко<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-4161-9083) / levch@issp.ac.ru

И.А. Ремизов<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0000-0000-0001) / remizov@issp.ac.ru

**S.M. Umaev<sup>1</sup>, D.N. Borisenko<sup>2</sup>, N.N. Kolesnikov<sup>2</sup>, A.A. Levchenko<sup>2</sup>, I.A. Remizov,**

<sup>1</sup>Чеченский государственный университет, г.Грозный

<sup>2</sup>Институт физики твердого тела РАН, г.Москва

*Экспериментально установлено, что эмиссионные свойства источников на основе углеродных нанотрубок деградируют после 20 часов выдержки в жидком гелии и улучшаются после двухчасовой выдержки в атмосфере водорода при давлении в 100 атм и температуре 300°С.*

*It is experimentally determined that the emission properties of the carbon nanotube source degrade after exposure in helium liquid for 15 hours and improve after exposure in hydrogen atmosphere at pressure of 100 atm and temperature of 300°С for 2 hours.*

*Ключевые слова: углеродные нанотрубки эмиссия зарядов, поглощение газа*

*Key words: carbon nanotubes, charge emission, gas absorption*

### ВВЕДЕНИЕ

Ранее в работе [1] мы показали, что источники зарядов на основе углеродных нанотрубок, которые готовили осаждением нанотрубок из дугового разряда в атмосфере газообразного аргона, обладают замечательными вольт-амперными характеристиками в сверхтекучем гелии: ток отрицательных и положительных зарядов в жидкости удавалось наблюдать при напряжениях  $U=100-200$ В. Более того, в экспериментах [2] было показано, что эти источники заряда могут быть успешно использованы при изучении особенностей движения заряда в образцах твердого гелия при температурах ниже 75 мК. Электроны, которые туннелируют из трубок в жидкий гелий, образуют в жидкости пузырьки диаметром около 2 нм с электроном в центре пузырька, а вокруг положительно заряженного иона гелия образуется заряженный кластер (ион