

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЙ МАГНЕТРОН С УДЛИНЕННЫМ АНОДОМ: ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ*

В. Д. Ерёмка¹, О. П. Кулагин¹, Ю. И. Ким²

¹Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

²Korea Electrotechnology Research Institute

С применением аналитической модели, учитывающей нелинейную динамику движения электронов, проведена оценка оптимальных параметров субмиллиметрового генератора М-типа для генерирования электромагнитного излучения на частоте около 0.33 ТГц при анодном напряжении 13 кВ и магнитном поле 0.7 Тл. Определена геометрия пространства колебательной системы магнетрона, в котором обеспечивается эффективное взаимодействие электронов с высокочастотным полем (+1)-й пространственной гармоники электромагнитных колебаний π -вида в режиме дрейфово-орбитального резонанса.

С помощью вычислительного эксперимента на основе трехмерной модели, осуществлено тестирование геометрии колебательного контура магнетрона и подтверждена работоспособность предложенной системы на заданной частоте, а также указаны направления её оптимизации. Показана возможность создания магнетрона субмиллиметрового диапазона с холодным катодом, со сравнительно невысокими рабочими напряжением, магнитным полем при увеличенном сроке службы.

Ключевые слова: Субмиллиметровый диапазон волн, колебательный контур магнетрона с удлинённым анодом, дрейфово-орбитальный резонанс, нелинейная аналитическая модель, трёхмерная численная модель.

Введение

Среди источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона генераторы М-типа выделяются величиной отношения уровня мощности выходного сигнала и КПД к единице массы. При этом реализация конструкций традиционных («классических») М-приборов, функционирующих в существенно закритической области (вдали от Халловской параболы), достигла своего технологического предела

*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на 24-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Россия, 7–13 сентября 2014.

на частоте 0.1 ТГц. В середине 1950-х годов в ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины (ИРЭ НАНУ, Харьков) предложены, исследованы и разработаны магнетроны с «харьковским режимом работы» на пространственных гармониках, конструкции которых созданы и без особых технологических затруднений реализованы в субтерагерцовом (суб-ТГц) диапазоне [1]. Рабочие точки таких магнетронных генераторов находятся вблизи параболы отсечки, то есть в зоне сравнительно невысоких значений рабочих напряжения и магнитного поля [1,2]. Импульсные магнетроны с «харьковским режимом работы» имеют компактную магнитную систему. Конструкция пакетированных с магнитной системой магнетронов суб-ТГц диапазона имеет сравнительно небольшую массу. Трудности укорочения рабочей длины волны суб-ТГц импульсных магнетронов обусловлены несоответствием представлений о физике процессов в пространстве взаимодействия электронов и электромагнитных волн таких генераторов методам решения задачи. Проект, в котором решение задачи о создании многорезонаторного импульсного магнетрона субмиллиметрового диапазона базировалось на применении современных нанотехнологий при изготовлении определяющих элементов и узлов генератора, а также на устоявшихся представлениях о физике процессов в «классических» многорезонаторных магнетронах, завершился созданием миниатюрного магнетрона, но генерирующего электромагнитное излучение в трёхмиллиметровом диапазоне [3].

Осевую длину анодного блока классических магнетронов разработчики выбирают, как правило, незначительно превышающей половину длины волны генерируемых колебаний: $l_a \leq (0.6 \div 0,8)\lambda$ [4]. Создатели магнетронов миллиметрового диапазона «с харьковским режимом работы» (специалисты из саратовских НИИ и ОКБ, творчески способствовавшие внедрению разработок ИРЭ НАНУ в серийное производство, называют их «магнетронами поверхностной волны») отдали предпочтение осевой длине анодного блока не меньшей рабочей длины волны $l_a \approx \lambda$. Это обусловлено тем, что катод магнетрона с коротким эмиттером не обеспечивает получение требуемой величины рабочего тока. В работах [1,2,5] описаны результаты разработки в ИРЭ НАНУ экспериментальных образцов эффективных импульсных магнетронов с удлиненным анодом для создания источников миллиметровых волн с высокой импульсной и средней мощностью. Испытанные в лабораторных условиях экспериментальные образцы магнетронных генераторов имели длину анодных блоков равную сумме длин анодных блоков трех единичных магнетронов с «харьковским режимом работы». При этом каждый из трех анодных блоков имел свою щель связи с волноводом вывода энергии, поступающей в нагрузку. Размер широкой стенки прямоугольного выходного волновода, связывающего с нагрузкой удлиненный анод магнетрона, равен сумме длин трех анодов $l_a \approx 3\lambda$. Результаты лабораторных исследований экспериментальных образцов магнетронов с удлиненным анодом свидетельствуют о том, что при прочих равных условиях импульсная мощность их выходного сигнала была примерно в три раза больше мощности экспериментального образца магнетрона с длиной анода $l_a \approx \lambda$. Зондовые измерения распределения напряженности ВЧ-поля в выходном волноводе вывода энергии показали, что в нем возбуждается волна типа H_{10} , обеспечивающая канализацию в нагрузку мощности фазированных колебаний [1,2]. Очевидно, что освоение субмиллиметрового диапазона с помощью импульсных магнетронов «с харьковским режимом работы» потребует существенно увеличенной осевой протяженности пространства взаимодействия, по сравнению с рабочей длиной волны.

Ряд данных, полученных с помощью методов математического и физического моделирования, свидетельствует о правомерности описания физики процессов электронно-волнового взаимодействия в импульсных магнетронах терагерцового диапазона с удлиненным анодом с помощью дрейфово-орбитальной модели [6,7]. Упомянутая модель, учитывающая нелинейную динамику электронного движения, позволяет отказаться от применяющихся до настоящего времени эмпирических соотношений при определении параметров разрабатываемых магнетронов коротковолновых диапазонов и более корректно определять исходные данные для численного моделирования. Использование аналитической модели дрейфово-орбитальных резонансов для разработки новых магнетронных источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона способствует созданию устройств с требуемыми характеристиками при существенном сокращении затрат времени и ресурсов.

Цель данной статьи – описать алгоритм нашего подхода к выбору оптимальных параметров колебательной системы многорезонаторного импульсного магнетрона субмиллиметрового диапазона на основе аналитического учёта нелинейной динамики электронного потока в скрещенных полях в условиях дрейфово-орбитальных резонансов на рабочей частоте и тестирование его перспективности с помощью трёхмерного численного моделирования. Мы стремимся создать предпосылки для продвижения генераторов М-типа в новый, ранее недоступный для них диапазон.

1. Аналитическая модель

Имеем следующие требования к параметрам магнетрона: генерирование электромагнитных колебаний на частоте около 0.33 ТГц при рабочем напряжении U_a до 13 кВ и рабочем магнитном поле B около 0.7 Тл. Данная величина магнитного поля в зазоре магнита достижима при использовании современных магнитных материалов, при этом обеспечиваются приемлемые вес и габариты генератора пакетированного с постоянным магнитом.

При разработке импульсного магнетрона субмиллиметрового диапазона в качестве исходных условий задается уровень мощности выходного сигнала и повышенный срок службы генератора. Отсюда следует необходимость использования холодного катода, увеличение размеров пространства взаимодействия и уменьшение числа резонаторов анодного блока. Для определения рабочей точки и параметров устройства целесообразен выбор режима электронно-волнового взаимодействия в условиях дрейфово-орбитального резонанса [6]:

$$\omega = p\Omega_1 + n(\Omega_2 - \Omega_1), \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Здесь $\omega = 2\pi c/\lambda$ – угловая частота колебаний в резонаторе; p – число вариаций ВЧ-поля по периметру пространства взаимодействия; $\Omega_{1,2} = \Omega/2 \left(1 \mp \sqrt{1 - 4C/\Omega^2}\right)$ (где $\Omega = eB/m$ – циклотронная частота; e , m – заряд и масса электрона; B – магнитная индукция; $C = 2eU_a/m(r_2^2 - r_1^2)$, r_1 и r_2 – радиусы, соответственно, внутренней и внешней границ пространства взаимодействия).

В общем виде число вариаций ВЧ-поля описывается выражением

$$p = |\gamma + \mu N|, \quad (2)$$

где N – число резонаторов, μ – номер пространственной гармоники, γ – мода колебаний.

Для импульсных магнетронов миллиметрового диапазона с «харьковским режимом работы» характерным является режим работы, обеспечивающий взаимодействие электронного потока с высокочастотным полем волны (-1) -й пространственной гармоники колебаний $\pi/2$ -вида. В этом случае из формулы (2) получаем $p = 3/4 N$. В последние годы появились экспериментальные данные, подтверждающие эффективность магнетронов миллиметрового диапазона на пространственных гармониках, работающих в режиме взаимодействия электронов с волной $(+1)$ -й пространственной гармоники электромагнитных колебаний π -вида [8]. В пространстве взаимодействия таких магнетронов число вариаций поля определяется выражением $p = 3/2 N$, то есть вариаций в два раза больше, чем при взаимодействии с колебаниями $\pi/2$ -вида с аналогичным числом резонаторов. В таком случае обеспечивается возможность применения более низких рабочих напряжений. Создание условий для взаимодействия электронов с волной $(+1)$ -й пространственной гармоники электромагнитных колебаний π -вида в режиме дрейфово-орбитальных резонансов, по нашему мнению, будет перспективным подходом при освоении магнетронами терагерцовой области спектра колебаний.

Предложенная аналитическая модель электронно-волнового взаимодействия в силу своей нелинейности учитывает фактор орбитального движения электронов и позволяет определить оптимальные рабочие статические электрическое и магнитное поля при прочих заданных условиях [2, 5–8]. Зависимость $U_a(B)$ в решаемой задаче определяется выражением

$$U_a = U_1 \left(\frac{B}{B_1} \right)^2 - \left(\frac{1 - B/B_1}{1 - 2n/p} \right)^2, \quad (3)$$

где $B_1 = 2 \frac{m \omega}{e p}$; $U_1 = (1 - \sigma^2) \frac{m r_a^2 \omega^2}{e 2p^2}$, $\sigma = r_c/r_a$, r_c и r_a – радиусы катода и анода, соответственно. Зависимость $U_a(B)$ имеет вид, представленный на рис. 1.

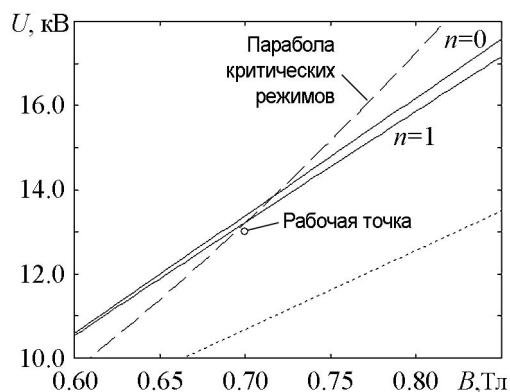


Рис. 1. Результаты аналитического моделирования оптимальных параметров рабочих режимов импульсных магнетронов субмиллиметрового диапазона: пунктирная линия показывает пороговое напряжение для первой гармоники ($n = 1$) дрейфово-орбитального резонанса [6,10], при $p = 54$

Выражения (1)–(3) позволяют определить число лопаточных резонаторов колебательного контура и геометрические размеры пространства взаимодействия терагерцового магнетрона на дрейфово-орбитальных резонансах.

Известные эмпирические соотношения, которые разработчики магнетронов длинноволновых диапазонов применяют для определения осевой длины их анодных блоков, не применимы в технологии проектирования конструкций магнетронов субмиллиметрового диапазона. При разработке конструкции колебательного контура импульсного магнетрона субмиллиметрового диапазона для работы в режиме дрейфово-орбитальных резонансов, мы

воспользовались результатами экспериментальных исследований и рекомендациями создателя магнетронов с «харьковским режимом работы» на пространственных гармониках – И.Д. Трутня, накопленными им при создании магнетронов миллиметрового диапазона с удлиненным анодом. Мы выбрали осевую длину пространства взаимодействия магнетрона субмиллиметрового диапазона равной нескольким длинам рабочей волны. Данный выбор обусловлен стремлением получить приемлемую для практических применений импульсную мощность выходного сигнала создаваемого магнетрона.

2. Численное моделирование

Моделирование терагерцового генератора М-типа с выбранными параметрами проведено с использованием программы CST Microwave Studio – достаточно мощной программы трехмерного моделирования электромагнитных полей. На начальном этапе решения задачи рассматривалась «холодная» колебательная система. Использование стандартного для выбранного диапазона частот волновода WR-2 обусловлено, в первую очередь, удобством при анализе системы. Результаты проведенного численного моделирования колебательной системы магнетрона субмиллиметрового диапазона представлены на рис. 2–3.

На рис. 3 видно, что вдоль оси пространства взаимодействия колебательной системы магнетрона субмиллиметрового диапазона укладывается три полных вариации поля. При этом коэффициент отражения S_{11} на рабочей частоте превышает –20 дБ, величина добротности колебательной системы превышает значение 700.

Полученные в результате аналитического и численного моделирования параметры импульсного магнетрона субмиллиметрового диапазона, для работы в режиме дрейфово-орбитальных резонансов, представлены в таблице.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают возможность возбуждения электромагнитных колебаний в сконструированной системе на рабочей частоте 0.3259 ТГц. Однако канализация в нагрузку высокочастотной энергии из пространства взаимодействия электронов и электромагнитных волн колебательной системы магнетрона с удлиненным анодом с помощью стандартного волновода WR-2 может быть недостаточно эффективной. В связи с этим, для достижения оптимальных КПД и мощности выходного сигнала субмиллиметрового генератора М-типа целесообразно провести разработку оптимизированного волноводного вывода энергии на основе сверхразмерного волновода.

Таблица

Основные параметры магнетрона субмиллиметрового диапазона

Диаметр катода d_c , мм	1.0
Диаметр анода, d_a , мм	2.6
Длина катода, l_c , мм	3.6
Рабочее напряж., U_a , кВ	13
Рабоч. магн. поле, B , Тл	0.7
Число резонаторов, N	36
Число вариаций поля, p	54 (36+18)
Тип волновода	WR-2
Размеры трансформатора	0.508x0.15

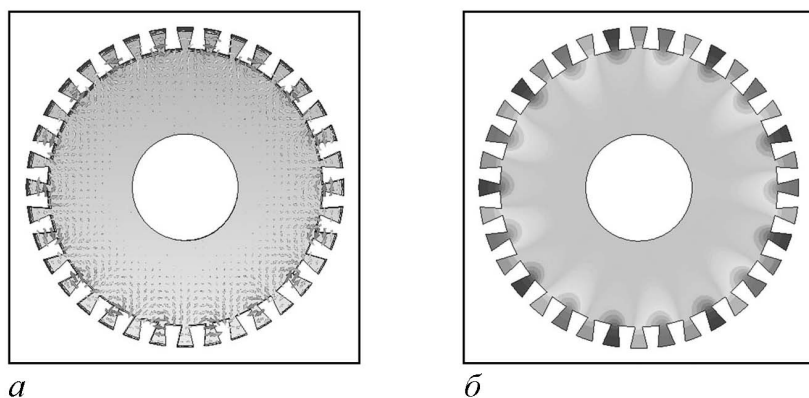


Рис. 2. Распределение в поперечном сечении пространства взаимодействия субмиллиметрового магнетрона высокочастотных электрического (а) и магнитного полей (б) при рабочей частоте 0.3259 ТГц и ненагруженной добротности $Q_0 = 782$

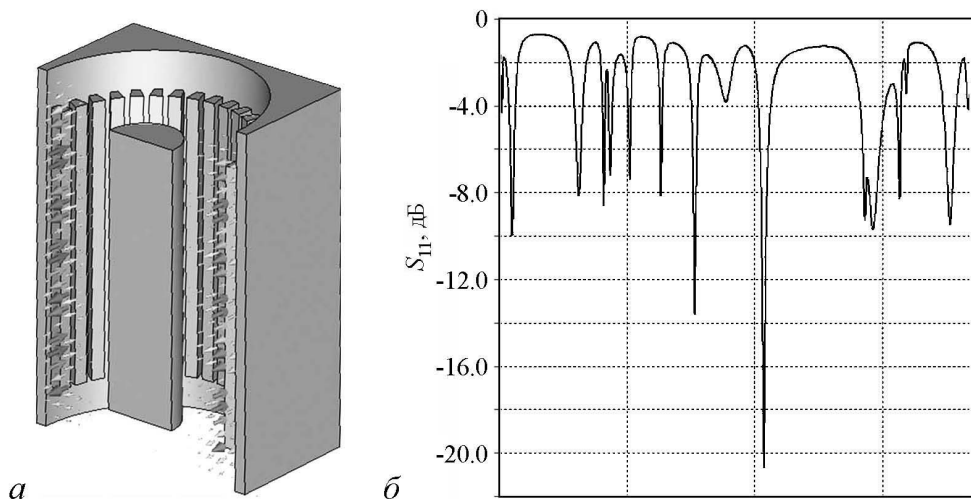


Рис. 3. а – распределение высокочастотного электрического поля в системе (результаты численного моделирования); б – коэффициент отражения S_{11} (результаты численного моделирования)

Заключение

Применение аналитической модели электронно-волнового взаимодействия в режиме дрейфово-орбитальных резонансов, учитывающей нелинейную динамику движения электронов, позволяет выбрать геометрию колебательного контура и пространства взаимодействия генераторного магнетрона субмиллиметрового диапазона при заданных приемлемых параметрах рабочего магнитного поля и анодного напряжения. Численное 3D моделирование позволяет протестировать разработанную аналитическую модель и подтвердить способность колебательной системы прибора эффективно возбуждаться на заданной длине волны. Для обеспечения оптимальных значений КПД и мощности выходного сигнала импульсного магнетрона субмиллиметрового диапазона с удлиненным пространством взаимодействия необходимо провести оптимизацию конструкции сверхразмерного волновода вывода высокочастотной энергии из колебательного контура в нагрузку.

Библиографический список

1. Электроника и радиопизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А. Я. Усикова. Киев: Наукова думка, 1986. 386 с.
2. Ерёмка В.Д., Кулагин О.П., Науменко В.Д. Разработка и исследование магнетронов в Институте радиопизики и электроники им. А.Я. Усикова и Радиоастрономическом институте НАН Украины // Радиопизика и электроника: Сб. научн. тр. НАН Украины. Харьков: ИРЭ им. А.Я.Усикова. 2004. Т.9, спец. выпуск. С. 42.
3. *Velazco Jose E.* Miniature sub-millimeter wave magnetron oscillator // Final Report № МТИ 09-1-003, Microwave Technologies Incorporated. Project Number R-51449ELSB2061791. Army Contract № W911NF-06-C-0084. 2008. 15 p.
4. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: «Высшая школа», 1972. Т. II. 376 с.
5. Ерёмка В.Д., Науменко В.Д. Исследование и разработка магнетронов миллиметрового диапазона в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. 2008, № 4. С. 23.
6. *Kulagin O.P., Yeryomka V.D.* Optimal conditions for drift-orbital resonance in M-type devices // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. Vol. 32, № 3. P. 1181.
7. Ерёмка В.Д., Копоть М.А., Кулагин О.П. Выбор оптимальных параметров низковольтного магнетрона К-диапазона с холодным вторично-эмиссионным катодом // Труды 19-й Международной Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009). 14–18 сентября 2009. Севастополь: Вебер, 2009. Т. 1. С. 205.
8. *Kim J.-I., Jeon S.-G., Kim G.-J., Kim J., Yeryomka V.D., Kulagin O.P., Tishchenko A.S., and Naumenko V.D.* Investigation of millimeter-wavelength 20-Vane spatial-harmonic magnetron using three-dimensional particle-in-cell simulation // IEEE Trans. on Plasma Science. 2012. Vol. 40, № 8. P. 1966.
9. Гурко А.А. Магнетрон на высших пространственных гармониках π -вида колебаний // Радиопизика и радиоастрономия. 2000. Т. 5, № 2. С. 148.
10. Ерёмка В.Д., Кулагин О.П., Ким Ю.И. Терагерцовый генератор М-типа: Геометрия колебательного контура // Труды 24-й Международной Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). 7–13 сентября 2014. Севастополь: Вебер, 2014. Т. 1. С. 211.

References

1. Electronics and Radiophysics of Millimeter and Submillimeter Radiowaves / Ed. A.Ya. Usikov. Kiev: Naukova Dumka, 1986. 386 p. (in Russian).
2. *Yeryomka V.D., Kulagin O.P., Naumenko V.D.* // Radiophysics and Electronics. 2004. Vol. 9, special issue. P. 42 (in Russian).
3. *Velazco Jose E.* // Final Report. № МТИ 09-1-003, Microwave Technologies Inc.

Project Number R-51449ELSB2061791. Army Contract № W911NF-06-C-0084. 2008. 15 p.

4. *Lebedev I.V.* Engineering and Microwave Devices: Vol. II. M.: «Vysshaya shkola», 1972. 376 p. (in Russian).
5. *Yeryomka V.D., Naumenko V.D.* // Progress of Modern Radioelectronics. 2008. № 4. P. 23 (in Russian).
6. *Kulagin O.P., Yeryomka V.D.* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. Vol. 32, № 3. P.1181.
7. *Yeryomka V.D., Kopot' M.A., Kulagin O.P.* // Proc. 19 Int. Crimea Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2009). 14-18 September, 2009. Sevastopol: Weber Publishing Co. 2009. Vol. 1. P. 205.
8. *Kim J.-I., Jeon S.-G., Kim G.-J., Kim J., Yeryomka V.D., Kulagin O.P., Tishchenko A. S., and Naumenko V.D.* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2012. Vol. 40, № 8. P.1966.
9. *Gurko A.A.* // Radiophysics and Raduoastronomy. 2000. Vol. 5, № 2. P.148 (in Russian).
10. *Yeryomka V.D., Kulagin O.P., Kim Yu. I.* // Proc. 24-th Int. Crimea Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2014). 7-13 September, 2014. Sevastopol: Weber Publishing Co. 2009. Vol.1. P. 211 (in Russian).

Поступила в редакцию 20.02.2015

SUBMILLIMETER-WAVE MAGNETRON WITH THE ELONGATED ANODE: OPTIMAL PARAMETERS OF OSCILLATORY CIRCUIT

V. D. Yeryomka¹, O. P. Kulagin¹, Jung-Il Kim²

¹A.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine

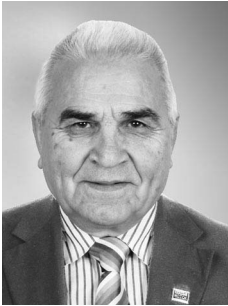
²Korea Electrotechnology Research Institute

The estimation of optimal parameters with the analytical model regarding nonlinear electron motion dynamics is fulfilled for the submillimeter-wave M-type oscillator tor operating on frequency about 0.33 THz with anode voltage 13 кV and magnetic field 0.7 T. Revealing from this model, the magnetron interaction space geometry providing the effective electron interaction with a high-frequency field on (+1) spatial harmonic of π -mode oscillations is proposed for the drift-orbital resonance regime.

Using three-dimensional numerical simulation, the selected oscillation circuit geometry is verified and the system suitability is confirmed on the operation frequency. Also directions of the system optimization are specified. The possibility to design magnetrons with rather low operating anode voltages, magnetic fields and with the increased service life is shown in the terahertz band.

Keywords: Submillimeter-wave range, oscillating circuit with an elongated anode magnetron, drift-orbital resonance, non-linear analytical model, three-dimensional numerical model.

Ерёмка Виктор Данилович – родился в Донецкой обл. Украины (1938), окончил Киевский политехнический институт (1961). После окончания КПИ работает в Институте радиофизики и электроники имени А.Я. Усикова Национальной Академии Наук Украины (ИРЭ НАНУ). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ХГУ (1974) в области физической электроники. Руководил Лабораторией вакуумной СВЧ электроники и микроэлектроники (1982–1996); Отделом вакуумной электроники (1996–2001). С 2001 года по настоящее время – старший научный сотрудник того же отдела. Соавтор монографий «Электровакуумные приборы диапазона миллиметровых волн» (2007), «Физические основы и радиоэлектронные средства контроля надводной обстановки и судоходства» (2012), «Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью» (2013). Опубликовал более 130 научных статей по направлениям физической электроники и радиофизики. Автор 75 изобретений в области электроники СВЧ. Член редколлегии журнала «Техника и приборы СВЧ», член Программного комитета Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), член Программного комитета Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, член Украинского физического общества, Senior Member IEEE.



61085 Украина, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
E-mail: v.yerjomka@gmail.com

Кулагин Олег Павлович – родился в Харькове (1969), окончил физико-технический факультет Харьковского политехнического института (1994). После окончания ХПИ работает в Институте радиофизики и электроники имени А.Я. Усикова Национальной Академии Наук Украины (ИРЭ НАНУ), в отделе вакуумной электроники, в настоящее время занимает должность научного сотрудника. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИРЭ НАНУ (2013) в области физической электроники. Научные интересы – электровакуумные приборы М-типа, нелинейная динамика электронных потоков в скрещенных полях. Опубликовал более 70 статей, патентов и докладов на международных конференциях по указанным выше направлениям.



61085 Украина, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
E-mail: kulagin2008@mail.ru

Юнг-Ил Ким – получил степень бакалавра на кафедре физики Сеульского университета в Республике Корея (2000), степень магистра (2002) и доктора философии (2006) в школе физики Сеульского Национального университета. После защиты диссертации (2006) работает в Корейском электро-технологическом научно-исследовательском институте в Ансане, адъюнкт-профессор Университета науки и технологии в Тажоне, Республика Корея. Научные интересы включают разработку и создание с применением MEMS-технологии вакуумных электронных приборов миллиметрового и терагерцового диапазонов с холодными катодами, развитие двумерных и трехмерных систем визуализации терагерцового диапазона.



Ansan, 426-170, Korea
Korea Electrotechnology Research Institute
E-mail: gjkim@keri.re.kr