

# АМЕРИКАНСКАЯ ПРОГРАММА ПО СВЧ ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ HiFIVE



И.Викулов, к.т.н., Н.Кичаева

На рубеже 2000-х годов в США был сформирован и запущен ряд крупных научно-технических программ, направленных на опережающее развитие новых видов технологий [1]. Несколько проектов были развернуты и в области элементной базы СВЧ-электроники. Так, с 2000 года продолжается "Технологическая инициатива по широкозонным полупроводникам", WBGSTI [2]. Недавно, выступая на нижегородской научно-технической конференции "Стратегия развития радиоэлектронного комплекса России", академик Ю.В.Гуляев привлек внимание участников к новой американской инициативе, на этот раз в области электровакуумной электроники, под названием "СВЧ-интегральная вакуумная электроника" (High Frequency Integrated Vacuum Electronics, HiFIVE) [3]. Так же, как WBGSTI, программа инициирована одним из структурных подразделений Агентства перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA) – отделом микросистемной технологии (Microsystems Technology Office). Рассмотрим, в чем суть предлагаемой программы и какие задачи предстоит решить в процессе ее выполнения.

## ЦЕЛЬ И КОНЦЕПЦИЯ ПРОГРАММЫ HiFIVE

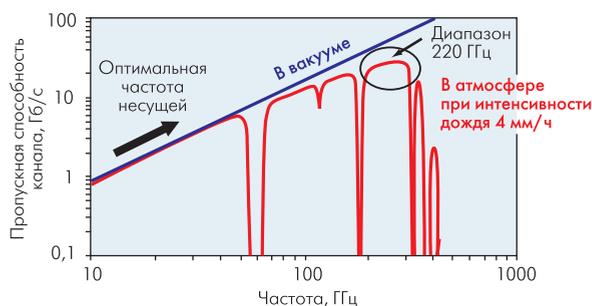
В рамках программы HiFIVE для мощных СВЧ-передатчиков с помощью методов прецизионной микрообработки предлагается создать интегральную конструкцию мощного вакуумного усилителя, работающего в верхней части миллиметрового диапазона (центральная частота 220 ГГц) с выходной мощностью более 50 Вт и полосой рабочих частот свыше 5 ГГц [4]. Прибор должен включать твердотельную монолитную интегральную схему (МИС) предварительного усилителя миллиметрового диапазона, катод, электронную пушку, микроструктурную ВЧ-систему взаимодействия с электронным пучком и коллектор. Главный параметр прибора – произведение выходной мощности на ширину полосы частот – должен составлять не менее 500 Вт·Гц. Технология должна

отвечать требованиям производства с объемом выпуска, соответствующим военным потребностям.

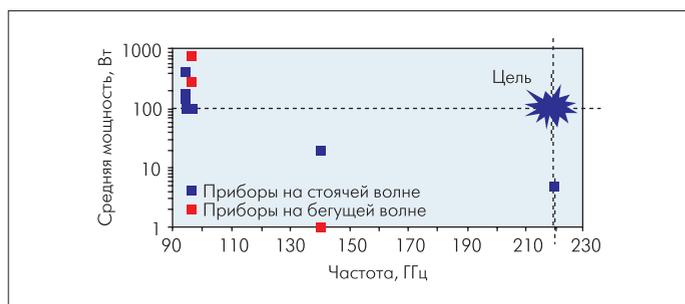
Выбор высокочастотного участка миллиметрового диапазона авторы проекта обосновали необходимостью расширения рабочей полосы частот, которая определяет пропускную способность каналов связи, используемых для обмена данными между военными системами различного назначения. На участке спектра от 200 до 300 ГГц, который обычно не используется, располагается широкий минимум атмосферного затухания радиоволн и, как показывают оценки, в районе 220 ГГц может быть достигнута наибольшая пропускная способность каналов связи в условиях, близких к реальным (рис.1) [5].

В настоящее время основное препятствие к использованию верхнего участка мм-диапазона – отсутствие мощных широкополосных усилителей на такие частоты. На более низких частотах миллиметрового диапазона традиционные вакуумные приборы имеют удовлетворительные параметры, однако в области частот свыше 200 ГГц их мощность не превышает единиц ватт (рис.2). К тому же размеры, масса и стоимость делают их неприемлемыми для многих военных применений. Таким образом, задача создания мощного вакуумного усилителя в диапазоне 220 ГГц действительно представляется актуальной. Ее решение потребует привлечения самых передовых технологий.

В своем приглашении к участию в проекте HiFIVE DARPA специально оговаривает, что рассматриваться будут только те предложения по НИОКР, которые способны обеспечить



**Рис. 1. Максимальная пропускная способность канала на различных участках частотного спектра**



**Рис.2. Традиционные вакуумные приборы мм-диапазона**

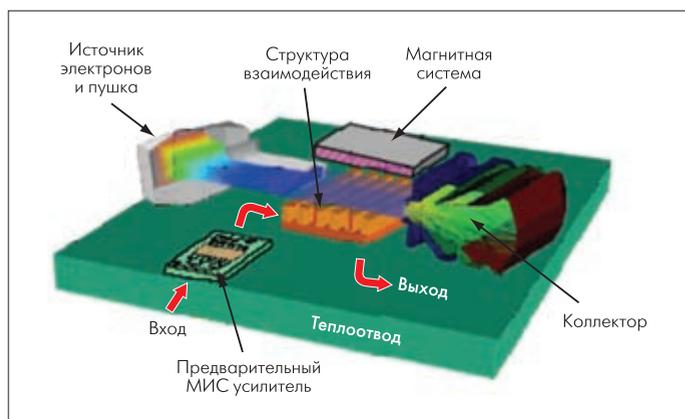
революционные прорывы в научных подходах, материалах, приборостроении и схемотехнике [4].

### ПРОБЛЕМЫ И ОЦЕНКИ

Общая конструктивная схема прибора приведена на рис.3 [6]. Прежде чем интегрировать все элементы конструкции, необходимо решить сложные технологические задачи создания каждого узла прибора.

**Замедляющая структура (ЗС).** Одна из причин снижения мощности вакуумных приборов при переходе в короткий миллиметровый диапазон – ухудшение качества замедляющих структур, так как стандартные методы их изготовления (например, электроискровой) слишком грубы. В последнее время появились более тонкие методы изготовления ЗС: глубокое реактивное травление DRIE (Deep Reactive Ion Etching), LIGA (Roentgen Lithography Galvanik Abformung – комбинация рентгеновской литографии, гальванотехники и формовки), различные МЭМС-технологии с технологическими допусками менее 1 мкм (табл.1).

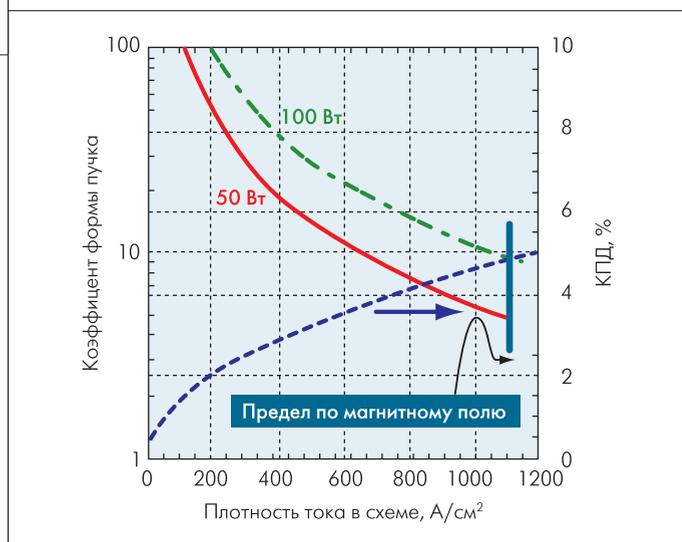
Другая причина связана со снижением на коротких миллиметровых волнах эффективности взаимодействия электронного пучка с полем замедляющей структуры, поскольку поле концентрируется вблизи ее поверхности. При этом отбираемая мощность изменяется пропорционально  $Nf^{8/3}$ , где  $N$  – коэффициент формы пучка, т.е. отношение полной ширины пучка к его толщине (в случае кольцевого пучка  $N$  равно отношению длины окружности пучка к толщине) [5]. Этот эффект можно частично компенсировать за счет увеличения  $N$ .



**Рис.3. Мощный вакуумный усилитель мм-диапазона, проектируемый по программе HiFIVE**

**Таблица 1. Технологические возможности при обработке ЗС [6]**

Параметры	LIGA	DRIE	МЭМС
Интервал обработки по вертикали, мкм	5–1000	2–400	1–80
Минимальный горизонтальный размер, мкм	10	~0,5	~2–3
Коэффициент формы пучка N	100:1	100:1	~5:1
Допуск, мкм	1–2	~0,5	<1



**Рис.4. Зависимости коэффициента формы пучка для разных значений выходной мощности усилителя на ЗС с бегущей волной и КПД от плотности тока в схеме**

При увеличении ширины пучка (коэффициента формы  $N$ ) в замедляющей структуре могут возникать высшие моды колебаний, что потребует разработки дополнительных методов их подавления. Возможны и другие причины нестабильности (рассогласования в ЗС, генерация на обратной волне и др.).

Расчетные оценки показывают, что для достижения заданной мощности прибора (50–100 Вт) необходимо реализовать конструкцию с коэффициентом формы пучка, равным нескольким десяткам единиц, при плотности тока в несколько сотен ампер на квадратный сантиметр (рис.4) [7].

**Электронный пучок и магнитная фокусировка.** В качестве возможных источников эмиссии рассматриваются все известные типы катодов: холодные с полевой эмиссией, на углеродных нанотрубках, скандатные и др. (рис.5) [5, 7].

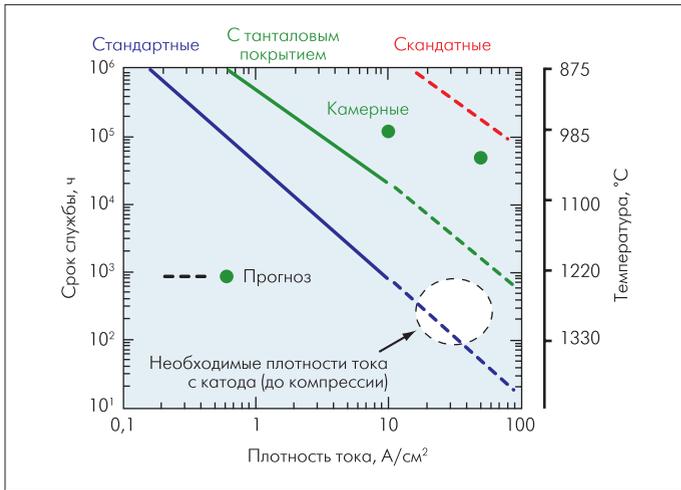


Рис.5. Параметры современных термоэмиссионных катодов [7]

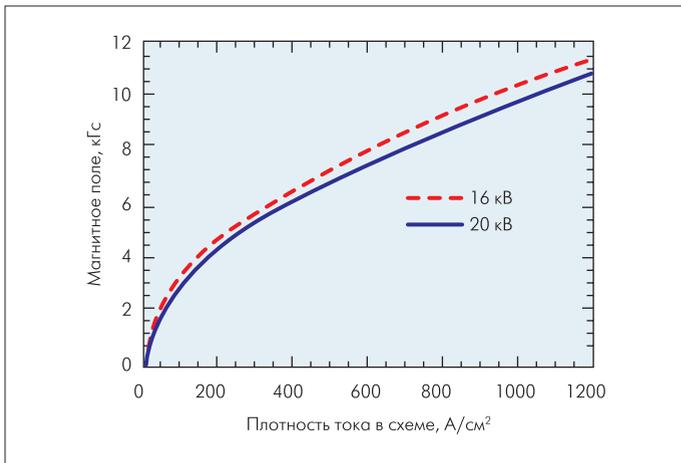


Рис.6. Фокусирующее магнитное поле, необходимое для транспортировки пучка (расчет)

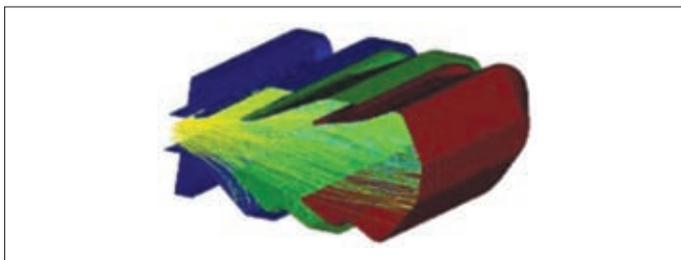


Рис.7. Многоступенчатый коллектор

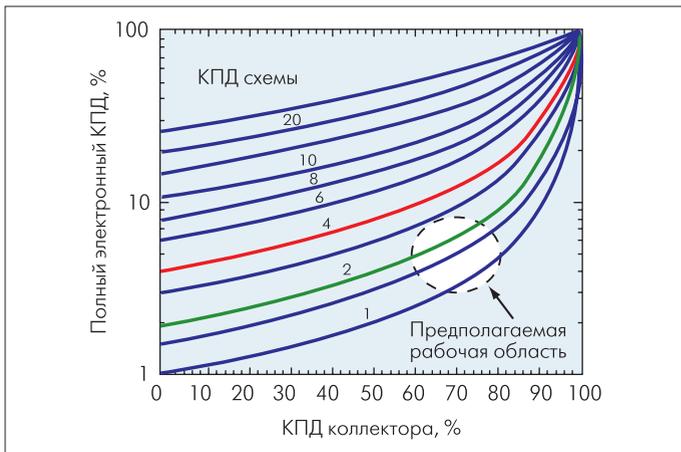


Рис.8. КПД прибора, коллектора и схемы (расчет)

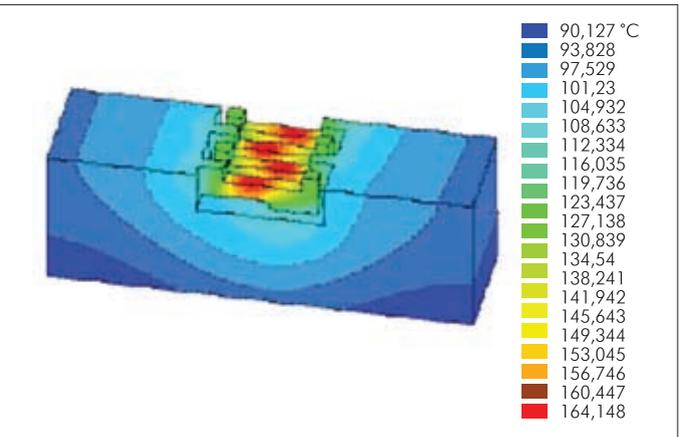


Рис.9. Распределение температуры в ЗС ЛБВ с ленточным пучком (расчет,  $f = 220$  ГГц, материал – медь, плотность тепловой мощности ЗС  $2 \text{ кВт/см}^2$ , что соответствует непрерывной выходной мощности прибора 50 Вт при КПД 2,5%)

Для получения заданной плотности тока (порядка сотен ампер на квадратный сантиметр) необходимо многократное (до десяти раз) сжатие электронного пучка с помощью сходящейся оптики, а для его транспортировки вдоль структуры взаимодействия – значительное магнитное поле (рис.6) [7]. В качестве верхнего предела магнитного поля на основе постоянных магнитов принимается значение  $B_{\text{макс}} = 11$  кГс.

**Коллектор, теплоотвод.** Обязательным элементом прибора должен стать многоступенчатый коллектор с КПД не менее 80% (рис.7) [5,7]. Но даже при такой высокой эффективности коллектора общий электронный КПД прибора не превысит 5% (рис.8) [7].

Проблемы отвода тепла касаются как коллектора, так и замедляющей структуры. Выделение тепла в замедляющей структуре связано с ВЧ-потерями в ней и с токоперехватом. При этом, по оценкам, тепловая мощность на поверхности ЗС может достигать  $2 \text{ кВт/см}^2$  (рис.9) [8]. Возможно, для охлаждения конструкции потребуются специальные жидкостные хладагенты, пропускаемые через микроканалы, размеры которых обратно пропорциональны частоте ( $1/f$ ).

**Предварительный МИС-усилитель.** Инициаторы программы, ссылаясь на опыт фирмы Northrop Grumman, считают, что технология МИС уже позволяет достигать частоты, значительно превышающие 220 ГГц. Нерешенными здесь остаются проблемы повышения мощности МИС-усилителя и снижения потерь при интеграции [5]. Основное назначение монолитного усилителя – повышение суммарного коэффициента усиления, поскольку коэффициент усиления собственно вакуумного прибора недостаточно высок. Такой подход уже использовался при разработке мощных вакуумно-полупроводниковых СВЧ-модулей на более низкие частотные диапазоны [9].

**ФАЗЫ ПРОГРАММЫ, ПОРЯДОК ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ ЭТАПОВ**

Техническое задание, разработанное DARPA по программе HiFIVE, кратко представлено в табл.2.



В каждой фазе программы предусматривается демонстрация исполнителем полученных результатов и последующее проведение подтверждающих испытаний в государственной исследовательской лаборатории ВМС (Naval Research Laboratory) [6].

## Фаза I.

### Этап 1А. Электронный пучок

Цель этого этапа – демонстрация формирования и прохождения жесткого электронного пучка (коэффициент формы 25) через объем, соответствующий будущей конфигурации прибора. Допускается измерение плотности тока в импульсном режиме. Катод не обязательно представлять в окончательном виде, и срок его службы может отличаться от целевого значения. Важно не допустить нестабильности пучка и перехвата тока. Магнитное сопровождение ( $B_{\text{макс}} < 11$  кГс) должно обеспечивать заданное токопрохождение (95%).

*Госиспытания.* Система формирования электронного пучка или ее копия вместе с методикой и описанием испытательной аппаратуры передаются в гослабораторию, где проводятся независимые высоковольтные испытания и диагностика пучка. Исполнитель предоставляет конструктивные детали электронной пушки и катода, геометрию канала, параметры и размеры магнитной системы. Гослаборатория выполняет независимое моделирование траекторий электронов и сравнение с результатами измерений пучка.

## Фаза I.

### Этап 1В. "Холодные" испытания

На этом этапе предусматривается демонстрация всех электромагнитных характеристик структуры взаимодействия, изготовленной с помощью методов микрообработки, а именно: частотных характеристик прохождения/отражения, дисперсии, резонансов, паразитных мод. Полученные данные сравниваются с результатами трехмерного моделирования.

*Госиспытания.* После завершения "холодных" испытаний замедляющая структура или ее копия передаются в государственную лабораторию, где выполняются независимые "холодные" измерения и оценки. Исполнитель передает в лабораторию чертежи с размерами структуры, по которым проводится ее моделирование и сравнение с результатами "холодных" испытаний. Исполнитель также предоставляет лаборатории предварительные результаты проектирования мощного вакуумного усилителя, полученные с учетом электронно-волнового взаимодействия в режиме большого сигнала и паразитных видов колебаний.

## Фаза II.

### Этап 2А. Проверка работы мощного усилителя в сборке

Задача этапа – демонстрация совместной работы всех элементов мощного усилителя (включая МИС предварительного уси-

**Таблица 2. Целевые параметры программы HiFIVE**

Измеряемые параметры	Фаза I	Фаза II	Фаза III
Напряжение пучка, кВ	20	–	–
Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	750	–	–
Коэффициент формы пучка N	25	–	–
Токопрохождение, %	95	–	–
Точность установки центральной частоты, %	±2	–	–
Выходная мощность, Вт	–	50	>50
Полоса частот, ГГц	–	5	5
Произведение мощности на частоту, Вт-ГГц	–	250	500
КПД, %	–	5	5
Полный ток, мА	–	250	250
<b>Дополнительные параметры</b>			
Паразитные составляющие при отстройке 250 кГц от несущей, дБ	–	-50	-50
Выходная мощность предварительного МИС усилителя, мВт	–	50	50

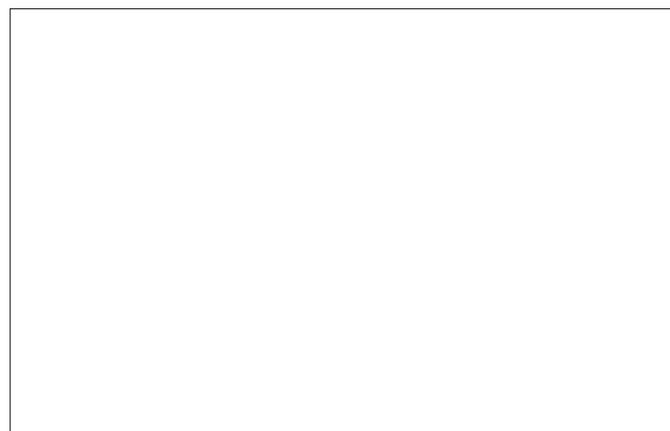
лителя и коллектор), подтверждающая способность выбранной конструкции обеспечить требуемое произведение мощности на частоту. Допускается, что срок службы и другие параметры катода могут не соответствовать целевым значениям программы. Тепловая конструкция прибора должна обеспечить непрерывную работу усилителя в течение как минимум 100 ч.

*Госиспытания.* Образец усилителя или его копия вместе с описанием измерительного оборудования и методикой измерений доставляются в государственную лабораторию, где проводятся высоковольтные испытания и подтверждается отсутствие побочных видов колебаний. Исполнитель передает лаборатории детали проектирования всех компонентов усилителя. Лаборатория выполняет независимое моделирование прибора в режимах малого и большого сигнала, а также тепловой анализ, и сравнивает полученные данные с результатами измерений.

## Фаза II.

### Этап 2В. Перспективный катод

Цель этапа – продемонстрировать в качестве отдельного компонента вакуумного усилителя катод с очень высо-



кой плотностью тока, полностью отвечающий разработанной конструкции прибора. Срок службы катода должен превышать 1000 ч при реальных значениях вакуума, рабочего напряжения и полном токе 250 мА, измеряемом на его поверхности. Катод должен быть полностью подготовлен для включения в состав конструкции мощного усилителя в ходе третьей фазы программы.

*Госиспытания.* После испытаний у исполнителя катод или его копия передается в государственную лабораторию, где независимо измеряются эмиссионные характеристики, временная стабильность и срок службы, значения тока и его плотности, а также однородность эмиссии и химический состав поверхности катода.

### Фаза III.

#### Интегрированная конструкция мощного усилителя

На этой фазе должен быть продемонстрирован в полном составе мощный компактный вакуумный усилитель. В ходе проведения этапа измеряются все характеристики усилителя в непрерывном режиме работы. Проверяются все целевые параметры программы, в том числе выходная мощность на частоте 220 ГГц, полоса рабочих частот, производство выходной мощности на полосу рабочих частот.

*Госиспытания.* После завершения испытаний у исполнителя окончательный образец или его копия вместе с описанием аппаратуры и методики измерений передаются в государственную лабораторию, где проводятся независимые измерения вольт-амперных и высокочастотных характеристик усилителя. Дается окончательное подтверждение правильности проведенных измерений.

В конце 2000 года на совещании, проведенном с участием представителей промышленности, военных организаций и вузов США, было высказано мнение о недостаточном финансировании Министерством обороны работ в области вакуумной СВЧ-электроники [10]. Судя по всему, сейчас положение меняется, и МО готово вкладывать средства в программу HiFIVE. DARPA предлагает потенциальным участникам программы самим назвать реальные объемы финансирования и сроки проведения этапов [5]. В ходе выполнения работ от участников потребуются ежеквартальные технические и финансовые отчеты, а по их завершении – заключительный финансовый отчет [4].

Идеологически программа HiFIVE продолжает линию DARPA по стимулированию разработок мощных компактных широкополосных источников СВЧ-мощности, совмещающих в одном приборе достоинства вакуумной и полупроводниковой электроники, – так называемых мощных СВЧ-модулей [9]. С системной точки зрения цель работы – значительное повышение пропускной способности линий связи путем расширения их полосы, что соответствует общей

тенденции создания перспективных систем вооружения [11]. Что касается технологических решений, которые потребуются при разработке интегральной конструкции мощного вакуумного усилителя коротковолновой части миллиметрового диапазона, то они, как ожидают инициаторы программы, должны носить прорывной характер. Ближайшее время покажет, примет ли американская вакуумная СВЧ-электроника такой серьезный технологический вызов со стороны своего военного ведомства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. The National Nanotechnology Initiative: Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry. [www.nano.gov/NNI\\_08Budget.pdf](http://www.nano.gov/NNI_08Budget.pdf)
2. Викулов И., Кичаева Н. GaN-технология. Новый этап развития СВЧ-микросхем. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, № 4, с.80–85.
3. Шахнович И. Стратегия развития радио-электронного комплекса России: лед тронулся? Краткие итоги конференции в Нижнем Новгороде. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, № 7, с.9–12.
4. Rosker Mark J. High Frequency Integrated Vacuum Electronics (HiFIVE). – <http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/pdf/amendment2.pdf>
5. Rosker M. J. Background, Program Objectives and Structure. – High Frequency Integrated Vacuum Electronics Industry Day Meeting, Arlington, 24 July 2007. [http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/HiFIVE\\_Overview.pdf](http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/HiFIVE_Overview.pdf)
6. Calame J. Circuit Integration and Circuit Demonstrations. – [http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/pdf/Integration\\_Demos.pdf](http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/pdf/Integration_Demos.pdf)
7. Levush B. High Aspect Ratio Electron Beam, High Efficiency Interaction Structure, and High Power Amplifier Design. – [http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/pdf/Beam\\_Structure\\_Amplifier.pdf](http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/pdf/Beam_Structure_Amplifier.pdf)
8. Calame J. High Efficiency Thermal Management. – [http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/pdf/Thermal\\_Management.pdf](http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/pdf/Thermal_Management.pdf)
9. Викулов И., Кичаева Н. Мощные СВЧ-модули. Гибрид вакуумной и твердотельной электроники. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, № 7, с.69–71.
10. Викулов И., Кичаева Н. Вакуумная СВЧ-электроника в США. Состояние и тенденции развития. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, № 5, с.66–71.
11. Wilson J.R. Avionics enter the 5th generation. – Military & Aerospace Electronics, Jan. 2008.