

ВАКУУМНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В США

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Несмотря на то, что и вакуумная, и твердотельная электроника в равной степени являются основой современных систем вооружения, акценты в их развитии существенно различаются. Стало складываться мнение, что вакуумная электроника, сформировавшаяся много десятилетий назад, — устаревает. В результате сокращается финансирование исследований и разработок вакуумных приборов, свертывается ряд программ. Многие ученые-вакуумщики США, обеспокоенные ухудшающимся положением в отрасли, выступили с обоснованием ее важности, в том числе для обеспечения национальной безопасности и военного потенциала страны [1–3]. Наиболее явно это выразилось в аналитическом докладе Министерству обороны (МО) США, составленном по результатам совещания представителей военных ведомств, промышленности электровакуумных приборов (ЭВП), правительственных лабораторий и вузов [2]. В докладе определялись текущее состояние технологии, требования действующих и будущих систем военного назначения к ЭВП. Были даны конкретные рекомендации по инвестициям в исследования и разработки, необходимые для поддержания национальной технологической базы вакуумной электроники в США.

И.Виколов, к.т.н.,
Н.Кичаева

ПОЛОЖЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ ЭВП

Электровакуумную промышленность США образуют около 20 компаний. На долю четырех крупнейших из них — Communications and Power Industries, L-3 Communications EDD, Boeing Electron Dynamic и Teledyne Electronic Technologies — приходится примерно 90% всех продаж ЭВП. Эти компании находятся в Калифорнии, в них работают приблизительно 2 тыс. человек. В число национальных лабораторий, поддерживающих вакуумную технологию, входят: Исследовательская лаборатория ВМС (Naval Research Laboratory, NRL), Центр военно-морских вооружений (Naval Surface Warfare Center, NSWC) в Крейне, шт. Индиана, Центр стэнфордского линейного ускорителя (Stanford Linear Accelerator Center, SLAC), Лос-Аламосская национальная лаборатория и Исследовательский центр NASA. Основная организация, руководящая исследованиями и разработками в области вакуумной электроники, — NRL. SLAC и Лос-Аламосская национальная лаборатория поддерживают разработки в интересах Министерства энергетики, а также создание сверхмощных приборов СВЧ (энергетического оружия). Исследования по вакуумной электронике проводятся также в шести вузах США: Массачусетском технологическом институте, двух университетах в Калифорнии (Девиса и Стэнфордский) и трех — в штатах Мэриленд, Висконсин и Мичиган.

В 1989 году объем продаж ЭВП в США достигал 600 млн. долл. (в том числе мощных сеточных ламп — 130 млн. долл.) (рис.1). К 1997 году продажи ЭВП упали до 330 млн. долл. (мощных сеточных ламп — до 80 млн. долл.). В период 1998–2000 годы продажи стабилизировались на уровне 350 млн. долл. От 70 до 75% объема продаж приходится на долю ЭВП военного назначения. Доля продаж продукции европейской электровакуумной промышленности на рынке США составляет ~13%.

Структура продаж ЭВП в США по типам ламп имеет следующий вид:

| Тип ЭВП | Доля на рынке, % |
|--|------------------|
| Клистроны..... | 18 |
| Приборы М-типа (усилители со скрещенными полями и магнетроны)..... | 10 |
| ЛБВ на связанных резонаторах | 20 |
| Спиральные ЛБВ..... | 52 |

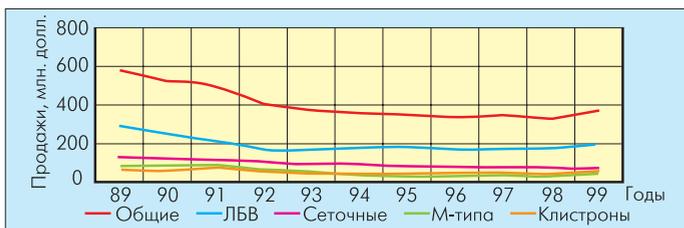


Рис. 1. Объем продаж ЭВП в США

Общее число работающих в промышленности ЭВП США в 1989 году достигало 4800 человек, из них – 750 ученых и инженеров (рис.2). К 2001 году эти цифры снизились, соответственно, до 2200 и 400 человек. Электровакуумная промышленность постоянно теряет опытные кадры. Здесь играет роль и уход их на пенсию, и агрессивный набор специалистов в высокотехнологичные коммерческие отрасли. Промышленности приходится прилагать немало усилий, чтобы привлечь студентов к участию в исследовательских и образовательных программах вузов по специальности ЭВП. К 2001 году дефицит дипломированных специалистов в области вакуумной электроники составлял 18%.

По мнению авторов доклада [2], главная проблема вакуумной электроники в США – недостаточное финансирование разработок со стороны Министерства обороны (рис.3). В 1988 году уровень финансирования МО составил 12,6 млн. долл. (в фиксированных ценах 2001 года). Такой уровень был признан недостаточным. Последовало проведение двух программ: совместного проекта трех родов вооруженных сил "Инициатива вакуумной электроники" (Vacuum Electronics Initiative) в 1990–1995 годы и программы ВМС "Развитие науки и технологии в области вакуумной электроники" (VE S&T) в 1996–2000 годы. Однако после 1995 года финансирование МО сокращалось с каждым годом и в 2001 году составило всего 7,7 млн. долл., что ниже критического порога, необходимого для поддержания вакуумной технологии на уровне, соответствующем потребностям военных систем.

На проведение независимых исследований и разработок (IRAD) вакуумная промышленность ежегодно выделяет от 5 до 7% от объема продаж. Эти средства идут в основном на разработку приборов коммерческого назначения и на совершенствование методов компьютерного моделирования.

ЭВП И ВОЕННЫЕ СИСТЕМЫ

В 272 электронных системах вооружения всех родов войск США к началу текущего десятилетия использовалось около

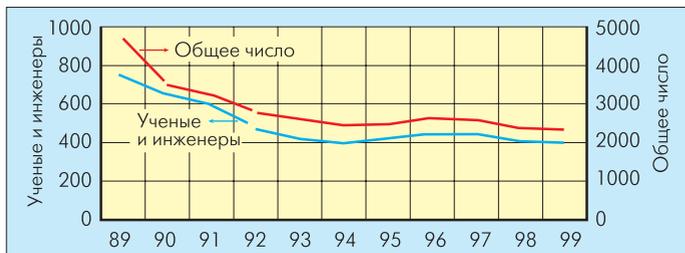


Рис. 2. Число работающих в электровакуумной промышленности США

185 тыс. ЭВП. По оценкам, эти системы останутся на вооружении страны, по крайней мере, еще 20–30 лет. Это потребует замены или модернизации ряда приборов. К ним добавятся и новые приборы, необходимые для комплектования вновь создаваемых систем.

Военно-воздушные силы США используют 46750 ЭВП в своей аппаратуре, устанавливаемой на различных платформах, в том числе на истребителях (F-15, F-16), беспилотных летательных аппаратах (Predator), бомбардировщиках (B-1B, B-2), ракетах (AMRAAM), комплексах AWACS и других. Для станции контроля воздушной обстановки AN/TPS-75 разработан отказоустойчивый передатчик со сложением мощности нескольких ЛБВ на замедляющей системе "кольцо-стержень". Он заменил менее надежный передатчик на одиночном клистроне.



Рис. 3. Финансирование исследований и разработок ЭВП Министерством обороны США

При создании радиолокатора для летательного аппарата Predator применение вакуумно-полупроводниковых мощных СВЧ-модулей (Microwave Power Modules, MPM), в состав которых входит ЛБВ [4], позволило на три года ускорить разработку системы в целом. Для комплекса AWACS разработан современный широкополосный клистрон, заменивший две узкополосные лампы. Это снизило издержки производства, повысило надежность и упростило замену прибора. Совместно с ВМС проведена предварительная проработка возможности создания передатчика помех JSSJ, летные испытания которого были намечены на 2006 год. Рассматривались конкурирующие концепции: широкополосные (2–18 ГГц) мощные MPM-модули компании Northrop Grumman и решетка на мощных монолитных схемах фирмы ИТТ.

ВВС подчеркивают свою заинтересованность в дальнейшем развитии вакуумной технологии, в частности в разработке твердотельных эмиттеров (Solid State Electron Emitter) на основе InP/CdS/LaS для всех типов ЭВП с целью получения "мгновенной" эмиссии электронов с высокой плотностью тока (10–100 А/см²) при низких значениях напряжения модуляции (<20 В). Это исключило бы расход энергии на подогреватель, повысило бы срок службы и надежность приборов.

Сухопутные силы применяют ЭВП в системах обнаружения артиллерийских позиций (мобильная РЛС AN/TPQ-36 и -37 Firefinder), РЛС ПВО (AN/MPQ-64 Sentinel), системах РЭВ

(AN/ALQ-211 SIRFC), ракетных головах самонаведения (PAC-I, -II, -III) и ракетных комплексах ПВО (Patriot). Предусмотрена модернизация этих систем.

На вооружении сухопутных сил находится система AN/TPQ-47 (модернизация Firefinder), представляющая собой гибридную фазированную решетку на основе мощных MPM-модулей с воздушным охлаждением. При ее разработке усилители на основе SiC-транзисторов не выдержали конкуренции с MPM-модулями.

Для мобильного наземного терминала скрытой помехоустойчивой спутниковой связи SMART-T благодаря более высокой мощности (>50 Вт) также было отдано предпочтение MPM-модулям мм-диапазона (43,5–45,5 ГГц) перед усилителями на основе GaAs PHEMT. Сейчас ставится задача снижения себестоимости модулей до менее 25 тыс. долл. При модернизации системы защиты вертолетов ALQ-211 SIRFC проводится замена ЛБВ на MPM-модули, что сократит массо-габаритные параметры и улучшит характеристики передатчика помех.

В настоящее время в ракетных головках самонаведения (ГСН) систем Patriot PAC-III и Medium Extended Defense System (MEADS) используются ЛБВ на связанных резонаторах Ka-диапазона (26–40 ГГц), выпускаемые во Франции фирмой Thales. В заданном частотном диапазоне ЭВП – единствен-

ное техническое решение, одновременно удовлетворяющее требованиям по мощности (как импульсной, так и средней) и габаритам. Сейчас компания CPI разрабатывает аналогичную ЛБВ американского производства с импульсной мощностью около 1 кВт, способную работать с очень короткими импульсами при высоком коэффициенте заполнения в условиях ограниченного охлаждения.

Военно-морские силы (NRL) имеют в своем активе разработку гироклистрона на 94 ГГц с импульсной мощностью 100 кВт и средней мощностью 10 кВт в полосе 600 МГц и КПД 33%. Гироклистрон используется в разработанной NRL радиолокационной станции W-диапазона WARLOC. В свою очередь WARLOC входит в состав радара слежения за спутниками Haystack Ultra-wideband Satellite Imaging Radar, работающего в X-диапазоне. WARLOC позволяет на порядок повысить разрешение изображения, получаемого радаром Haystack. Ввод комплекса в эксплуатацию в целом планируется на 2008 год [3].

Намечена разработка гироЛБВ диапазона 35 ГГц с полосой 4 ГГц и мощностью 100 кВт для РЛС посадки, а также гиро-ЛБВ с импульсной мощностью 5 кВт и полосой 8 ГГц W-диапазона (96 ГГц) для РЛС космической разведки. В планы NRL входит модернизация корабельной (AEGIS) станции AN/SPY-1, в решетке которой сейчас используются последовательно включенные ЛБВ на связанных резонаторах и усилители M-типа. В качестве одного из вариантов рассматривается замена таких усилителей многолучевыми клистроном (МЛК) S-диапазона.

По оценкам, это позволит на 12 дБ повысить чувствительность РЛС при сохранении существующей структуры решетки. Расчет электронной пушки и коллектора МЛК выполнялся по трехмерной программе MICHELLE, а расчет клистрона в режиме большого сигнала – по программе TESLA. Импульсная мощность клистрона в S-диапазоне достигла 600 кВт при КПД 40%. Токооседание пучка без СВЧ не превышает 1% и составляет 3% в режиме насыщения. В дальнейшем для повышения КПД и расширения полосы планируется использовать 18-лучевую пушку и дополнительные многозачерные резонаторы [3]. Наибольшее число разработок многолучевых клистронов выполнено в России. Так, НПП "Исток" были созданы МЛК L-, S-, K- и Ku-диапазонов. В последнее время активность в области исследования МЛК наряду с США стали проявлять Франция и Китай [1].

NRL проводит собственную программу развития ЭВП, предусматривающую разработку:

- многолучевых усилителей для мощных малолушмящих РЛС;
- линейных и широкополосных усилителей как в виде отдельных приборов, так и в виде MPM-модулей для систем РЭБ и связи;
- усилителей миллиметрового диапазона на медленных волнах Ka- и W-диапазонов;
- мощных гироусилителей Ka- и W-диапазонов;

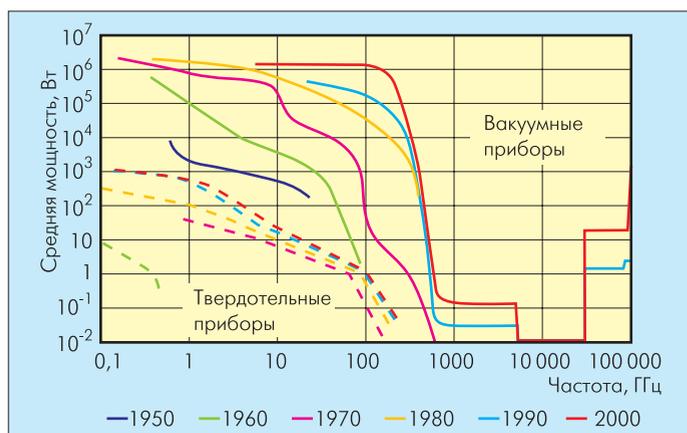


Рис. 4. Динамика изменения мощности электронных приборов: пунктирные линии – твердотельные приборы; сплошные линии – вакуумные приборы

- компьютерного моделирования, в том числе создание интегрального пакета программ проектирования ЭВП;
- технологии обеспечивающих субкомпонентов, в том числе материалов (CVD-алмаз, AlN-керамика), электронных эмиттеров (катодов с плотностью тока $10\text{--}50\text{ А/см}^2$), диэлектриков, постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов и других.

ДОСТИГНУТЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА ЭВП

Динамика развития электронных СВЧ-приборов представлена на рис. 4 и 5. Как видно из рис. 5 плотность мощности вакуумных приборов удваивается каждые два года [1, 2]. По состоянию на 2000 год можно отметить следующие наиболее значительные результаты, полученные в США при разработке ЭВП [2].

В области ЛБВ:

- сверхширокополосные (3–18 ГГц) спиральные лампы мощностью 125–200 Вт и с коэффициентом усиления 47 дБ в центре полосы и 27 дБ на краю при КПД 45 и 25%, соответственно (компания L-3 Communications);
- спиральные ЛБВ миллиметрового диапазона мощностью 130 Вт на частоте 44 ГГц при КПД 40% (1995 год, компания L-3 Communications). По последним данным, выходная мощность таких ЛБВ уже достигает 220 Вт [3];
- достижение спиральными ЛБВ для спутников связи КПД более 73% на частоте до 12 ГГц в полосе 500 МГц. Срок службы этих приборов – более 18 лет (150 тыс. ч), наработка на орбите (МТТФ) – более 10 млн. ч. По этому показателю они сравнимы или превосходят твердотельные приборы (компания Boeing EDD);
- ЛБВ на свернутом волноводе, развивающие мощность 50–100 Вт в диапазоне от 40 до 52 ГГц. Их конструкция может быть масштабирована в диапазон 85–100 ГГц. Результаты компьютерного моделирования показывают возможность достижения КПД >30% при плавном изменении скорости замедленной волны и многоступенчатом понижающем коллекторе (компания L-3 Communications).

- сверхлинейные спиральные ЛБВ для коммерческих систем связи. Мощность ЛБВ с линеаризатором в полосе 1,8–2 ГГц составляет 200 Вт при соотношении интермодуляционной составляющей третьего порядка и несущей -73 дБ.

В области мощных МРМ-модулей:

- широкополосные модули (3–18 ГГц) мощностью более 100 Вт для систем РЭБ. Дальнейшее развитие систем требует расширения полосы до 2–18 ГГц и увеличения мощности до 200 Вт (компания L-3 Communications и Northrop);
- МРМ-модули объемом не более 800 см^3 с выходной мощностью 180 Вт в полосе 4–6 ГГц при КПД 50% и коэффициенте шума 10 дБ (компания Northrop);
- МРМ-модули миллиметрового диапазона с непрерывной мощностью 20–40 Вт во всей полосе 18–40 ГГц. Проводится разработка модулей мощностью 50 Вт. К 2010 году ожидается получить в указанной полосе 100 Вт (компания L-3 Communications и Northrop).

В области клистронов:

- компактные клистроны с распределенным взаимодействием, фокусировкой постоянными магнитами с импульсной мощностью 150 Вт в W-диапазоне и 1,5 кВт в Ka-диапазоне. Ставится задача увеличения их средней мощности и полосы до 4–8% (компания CPI);

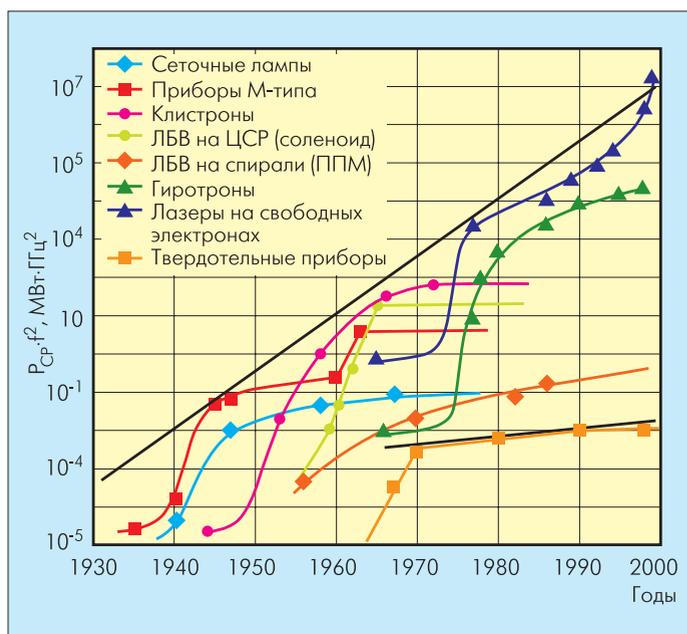


Рис.5. Изменение плотности мощности, определяемой произведением средней мощности на квадрат частоты ($P_{ср} \cdot f^2$), основных типов ЭВП и твердотельных приборов

- введение многоступенчатых понижающих коллекторов, что позволило увеличить КПД клистронов для систем связи в два раза при их работе в линейном режиме в частотных диапазонах от S до Ka (компания CPI);
- малогабаритный клистрон с импульсной мощностью 100 кВт в W-диапазоне, созданный с помощью немецкой литографической технологии LIGA "Клистрино". Диаметр электронного луча – 0,5 мм, диаметр канала – 0,8 мм, рабочее напряжение – 110 кВ (SLAC);
- клистрон с фокусировкой периодическими постоянными магнитами с импульсной мощностью 75 МВт в X-диапазоне – энергетическое оружие (SLAC);
- клистрон L-диапазона с выходной импульсной мощностью 1 ГВт при частоте повторения импульсов 5 Гц и длительности 1 мкс (компания SLAC и Лос-Аламосская национальная лаборатория).

В области приборов М-типа:

- легкие малогабаритные коаксиальные магнетроны для ГСН и аэродромных РЛС;
- синхронизированный магнетрон S-диапазона с импульсной мощностью 50 МВт и "усилением" 13 дБ – энергетическое оружие (компания CPI).

В области гироприборов:

- гироЛБВ с импульсной мощностью 100 кВт и средней 10 кВт на частоте 94 ГГц при КПД 30%. Работа выполнена фирмой CPI совместно с NRL, компанией Litton и университетом Мэриленда и является примером успешного компьютерного проектирования с первой попытки;
- гиротронный генератор для энергетических исследований с непрерывной мощностью 1 МВт на частоте 100 ГГц (компания CPI);

- гироклистрон с импульсной мощностью 100 кВт и средней 10 кВт на частоте 94 ГГц (NRL).

ПРЕДЛОЖЕНИЯ АМЕРИКАНСКИХ ЭКСПЕРТОВ ПО ПОДДЕРЖКЕ РАЗВИТИЯ ЭВП

По мнению американских специалистов, сокращающийся уровень финансирования вакуумной электроники создал угрозу разрушения национальной технологической базы. В аналитическом докладе группы экспертов [2] даются следующие рекомендации по развитию вакуумной технологии.

I. Базовые исследования. Ежегодное финансирование в размере 5 млн. долл. в течение пяти лет для укрепления образовательных и исследовательских программ вузов и индивидуальных конкурсных проектов.

II. Прикладные исследования. Восстановить финансирование в объеме 12 млн. долл. в год для продолжения и расширения работ в области перспективных технологий, в том числе для разработки двух- и трехмерных программ расчета ЭВП, а также создания специальных типов ЭВП:

- сверхширокополосных мощных спиральных ЛБВ;
- спиральных ЛБВ, ЛБВ на связанных резонаторах и клистронов с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона для высокоскоростных систем связи, ГСН и РЛС с синтезированной апертурой для беспилотных летательных аппаратов;
- мощных гироусилителей миллиметрового диапазона для РЛС с высоким разрешением;
- мощных многолучевых клистронов.

Ставится и задача финансирования разработки обеспечивающих технологий, включая новые типы систем взаимодействия, новые технологические материалы, улучшенные эмиттеры, эффективные многоступенчатые коллекторы и высокопереванские электронные пушки с прецизионной оптикой.

III. Перспективные разработки. Ежегодное финансирование в объеме 10 млн. долл. для подготовки новых приборов к внедрению в системы, в том числе и для улучшения процессов сборки, испытаний на воздействие внешних факторов и повышения надежности. Цель этих работ – снижение стоимости систем и связанных с ними рисков.

IV. Производственная технология. Необходимый уровень финансирования 5–7 млн. долл. в год в течение трех лет. Цель – создание пилотного производства недорогих МРМ-модулей и демонстрация надежности приборов.

VI. Промышленная инфраструктура. Рекомендовано в течение пяти лет отчислять 3 млн. долл. в год на обеспечение ЭВП необходимыми материалами и компонентами, что позволит улучшить параметры и снизить себестоимость приборов.

VII. Действующие системы. Для модернизации передатчиков систем, в которых используются ЭВП, таких как ALQ-99, ALQ-184 и TPS-25, рекомендовано затратить 2–4 млн. долл. на систему. Это позволит улучшить характеристики и



повысить надежность систем, а также обеспечить экономию затрат на их эксплуатации в течение прогнозируемого срока службы порядка 30 лет.

Изменится ли положение в электровакуумной промышленности США, покажет будущее. Во всяком случае, предпосылки для дальнейшего развития американской вакуумной электроники имеются. Прежде всего, это сохраняющаяся потребность военных систем в вакуумных приборах, а также появившиеся в последнее время новые технологии обработки и материалы ЭВП.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Abrams R.H.** et al. Vacuum Electronics for the 21st Century. – IEEE Microwave Magazine, Sept. 2001, p.61–72.
2. Report of Department of Defense Advisory Group on Electron Devices. – Special Technology Area Review on Vacuum Electronics Technology for RF Applications. Dec. 2000.
3. **Levush B.** et al. Vacuum Electronics: Status and Trends. – www.radar2007.org.
4. **Викулов И.** и др. Мощные СВЧ-модули – гибриды вакуумной и твердотельной электроники. Готовится в печати в журнале ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №6.