

Борисов А.А., Галдецкий А.В., Щербаков С.В.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

О радиолокационных применениях полупроводниковых и вакуумных СВЧ приборов

Проведено сопоставление технических характеристик и возможностей применения вакуумных и полупроводниковых СВЧ приборов в радарных системах. Показано, что перспективы использования вакуумных СВЧ приборов в радиолокации зависят не только от прогресса в их характеристиках, но и от уровня развития быстродействующих мощных фазовращателей. Указано на проблемы применения АФАР в реальной помеховой обстановке. Отмечаются возможности ослабления требований к усилению и понижению массогабаритных показателей вакуумных приборов благодаря повышению выходной мощности твердотельных усилителей.

Ключевые слова: АФАР, GaN транзистор, фазовращатель, MEMS, ЛБВ, клистрон.

В последние годы значительное внимание привлекает использование GaN твердотельных приборов в радиолокационных приложениях. Этот тип приборов (транзисторов и МИС) демонстрирует впечатляющий прогресс в выходной мощности и надежности. Например, одиночный GaN транзистор достиг уровня мощности 300 Вт в X-диапазоне при КПД по добавленной мощности 37% [1]. Соединение таких превосходных характеристик с концепцией АФАР, по-видимому, позволяет создавать конструкции радаров сантиметрового диапазона, вполне конкурентоспособные по уровню мощности с системами на основе ЛБВ или клистронов. В качестве примера можно привести обсуждение радара дальнего обнаружения Space Fence [2], который содержит 36000 передающих модулей общей мощностью 2.69 МВт (средняя мощность 0.81 МВт) в S-диапазоне.

Может показаться, что эпоха вакуумных приборов в радиолокации проходит. Однако при сравнении радаров на основе вакуумных и твердотельных приборов необходимо рассматривать ряд дополнительных факторов.

Как правило, радары на основе АФАР значительно дороже чем радары на основе вакуумных приборов с пассивных ФАР.

Важной характеристикой радара является скорость управления лучом, которая определяет количество одновременно обслуживаемых целей. В радаре на основе вакуумного прибора управление лучом, как правило, выполняется с помощью ферритовых фазовращателей. Это уникальные приборы, сочетающие возможность пропускания высокой мощности и малые СВЧ потери. Однако характерные времена переключения таких фазовращателей составляет десятки микросекунд. В активных твердотельных решетках времена переключения определяются транзисторными ключами и составляют единицы и десятки наносекунд. Таким образом, твердотельные радары в принципе могут одновременно обрабатывать значительно большее число задач, чем локаторы на основе пассивных ФАР с вакуумными приборами (если это не ограничивается цифровой частью системы). Поэтому ключевой возможностью несимметричного ответа на вызов АФАР и сохранения конкурентоспособности вакуумных приборов в радарх сантиметрового

диапазона является разработка быстрых мощных фазовращателей с малыми потерями. Наиболее вероятными кандидатами на эту роль могут быть фазовращатели на основе MEMS ключей [3-5] (быстродействие ~5 мкс) и сегнетоэлектрические фазовращатели [6, 7] (время переключения единицы наносекунд).

Кроме того, существенной особенностью АФАР является отсутствие пространственной избирательности каждого отдельного элемента АФАР. Это означает, что каждый приемный модуль принимает все сигналы помех со всей полусферы. Такой режим требует очень высокой линейности и динамического диапазона приемника (~120 дБ), что является непростой задачей. Таким образом, радар с АФАР имеет повышенную уязвимость для мер противодействия и помех. В отличие от АФАР пассивные входные фазовращатели ФАР имеют очень высокий динамический диапазон, что обеспечивает реализацию узкой диаграммы направленности радиолокатора и дополнительное подавление мешающих сигналов в усилительном тракте. Данная проблема тесно связана с задачей защиты радиолокационного приемника. В АФАР полупроводниковые защитные устройства не очень эффективны из-за жестких ограничений по массогабаритным показателям. В противоположность этому одиночный приемник в пассивной ФАР может быть эффективно защищен вакуумным прибором на циклотронном резонансе [8, 9] – выдающимся прибором для радиолокационных применений.

Наряду с конкуренцией мы наблюдаем и примеры удачной кооперации вакуумных и твердотельных приборов СВЧ. Возрастание выходной мощности полупроводниковой усилительной цепочки дает возможность понизить требования к коэффициенту усиления вакуумного прибора, что в свою очередь дает возможность снизить его массо-габаритные показатели. Примером может служить широкополосная ЛБВ с низким усилением (бустер), которая является основой мощных СВЧ модулей (Microwave Power Module – MPM) – мощных усилителей, которые производятся не под конкретную систему, а для широкого использования в различных системах. Такая концепция компоненты-с-полки (COTS) позволяет значительно понизить стоимость и сроки разработки новых радиолокационных систем.

Библиографический список

1. K. Kikuchi, M. Nishihara, H. Yamamoto et al, SEI Technical Review, 2015, 81, 40-44.
2. J. Gallagher, J. A. Haimmerl, T. Higgins and M. Gruber, Microwave journal, 2016, 8, S6-S10.
3. C.D. Nordquist, W. Dyck, M. Kraus и др. A DC to 10-GHz 6-b RF MEMS time delay circuit // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2006. Т. 16. № 5. — с. 305-307.
4. J.J. Maciel, J.F. Slocum, J.K. Smith и др. MEMS Electronically Steerable Antennas for Fire Control Radars. in 2007 IEEE Radar Conference, 6 2007. pp. 677-682.
5. Д.М. Косьмин, И.В.Котельников, В.Н. Осадчий, В.В. Лучинин, А.Б. Козырев. Фазовращатели для связанных фазированных антенных решеток диапазона частот 2 ÷ 30 ГГц. Всероссийская конференция Микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербург. СПбГЭТУ. 4-7 июня 2012. Сборник трудов Т.2.,102-105.
6. A.B.Kozyrev, V.N.Osadchy, A.S.Pavlov, A.Golovkov, M.Sugak, D.Kalinikos, C.M.Carlson, T.V.Rivkin, P.A.Parilla, J.D.Perkins, D.S.Ginley, L.Sengupta, L.Chiu, X.Zhang, Y.Zhu, S.Sengupta, 30 GHz steerable beam antenna based on ferroelectric phase shifters. // Proc. of Progress In Electromagnetics Research Symposium, July 5-14, 2000, vol.1, p.48
7. S. Kazakov, S. Shchelkunov, V. Yakovlev et al, Advanced Accelerator Concepts: 13 Workshop, 2009, 477-482.
8. V. Vanke, V. Lopukhin and V. Savvin, Soviet Physics Uspekhi, 1970, 12(6), 743-755.
9. Budzinsky Y.A., Kantyuk S.P. A new class of self-protecting low-noise microwave amplifiers. in 1993 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 6 1993. pp. 1123-1125 vol.2