

Л.Д. Бахрах, А.А. Блискавицкий. Оптомикроволновые методы формирования излучения сверхширокополосных антенн. В настоящее время в радиодиапазоне в основном используются близкие гармонические узкополосные колебания. Но так было не всегда. Для получения электромагнитных колебаний в опытах Герца [1] и в течение 20 лет после этого использовался искровой разряд, дающий сверхширокополосный (СШП) сигнал. Если граничные частоты спектра сигнала есть f_v и f_n , то его относительная полоса частот $\eta = (f_v - f_n)/(f_v + f_n)$. Сигналы, которые требуется передать, обычно имеют $\eta \approx 1$, но их стараются перенести на несущую $f_0 \gg f_v$ для уменьшения η и упрощения аппаратуры. Однако в ряде случаев при таком переносе наблюдается сильное затухание волны в среде распространения или высокая шумовая температура, что делает его нецелесообразным, т.е. необходимо использовать сигналы без несущей с $\eta \approx 1$. Такие сигналы используются в загоризонтной радиолокации, радиоинтроскопии земных недр, ледовой разведке, радиосвязи с подводными лодками и т.п. [2]. Не менее важны и применения СШП сигналов с несущей с $\eta > 0,33$. В частности, радиолокатор, излучающий мощные нано- и субнаносекундные радиоимпульсы, спектр которых простирается от низких частот до нескольких гигагерц, позволяет обнаруживать и распознавать объекты с малой эффективной площадью рассеяния [3].

Хотя преимущества СШП сигналов известны давно, их использование в радиосистемах пока весьма ограничено, что связано с трудностью переключения высокого уровня мощности с большой скоростью, непригодностью узкополосных СВЧ устройств и недопустимостью детектирования СШП сигналов. Ввиду этого необходимы нетрадиционные методы формирования, приема и обработки СШП сигналов, среди которых выделяются оптомикроволновые методы [4, 6]. К оптомикроволновым устройствам относятся СШП волоконно-оптические системы распределения (ВОСР) и линии задержки (ВОЛЗ) радиосигналов, оптоэлектронные переключатели (ОПЭ) СВЧ, смесители, аттенюаторы т.п. Одномодовые волоконные световоды имеют ряд преимуществ при передаче СВЧ сигнала на оптической несущей: рекордная широкополосность (сотни гигагерц при длине 1 км), сверхнизкие погонные потери (менее 0,5 дБ/км), не зависящие от частоты модулирующего СВЧ сигнала, помехоустойчивость, малые поперечные размеры и масса, высокая гибкость. При построении фидерных систем СШП антенн помимо СШП линий передачи могут потребоваться частотно-независимые устройства деления и сложения мощности, аттенюаторы фазовращатели. Преимуществом волоконно- и интегрально-оптических устройств является независимость их характеристик от частоты модулирующего радиосигнала.

В одномодовой ВССР обычно используется передатчик на лазерном диоде, работающий в режиме одной высокоустойчивой продольной моды при СВЧ модуляции. В этом отношении наиболее перспективны C^3 -лазер, РОС и РБО-лазеры [4]. Ширина полосы (ШП) модуляции лазерного диода ограничена с одной стороны частотой релаксационных колебаний f_p , а с другой —

влиянием паразитных элементов его эквивалентной электрической схемы. Учитывая, что $f_p = (1/2\pi)(Ap/\tau_p)^{1/2}$, где A — дифференциальный коэффициент оптического усиления, p и τ_p — плотность и время жизни фотонов в лазерном резонаторе, увеличить ШП модуляции можно, подняв A и p и уменьшив τ_p и паразитные реактивности [4]. Ожидается, что ШП модуляции лазеров на полупроводниковых сверхрешетках, у которых высоки значения A и p , составит 60—100 ГГц. Однако и сегодня ШП в несколько десятков гигагерц достижима при использовании электрооптических модуляторов бегущей волны с синхронной электродной структурой [4]. Для обеспечения СШП предпочтительны фотодиоды с барьером Шотки или гетероструктурные p-i-n-фотодиоды, имеющие ШП до 100 ГГц и выше.

ВОСР радиосигнала имеет существенные отличия от традиционных радиочастотных распределительных устройств. Если коэффициент передачи по мощности распределительного устройства СВЧ вида $1 : N$ обратно пропорционален числу N выходных каналов, то в случае ВОСР с прямым фотодетектированием он обратно пропорционален N^2 [5]. В такой ВОСР амплитуда сигнала на выходе фотодетектора пропорциональна квадрату амплитуды входного оптического сигнала, поэтому входной сигнал с динамическим диапазоном $D^{1/2}$ может детектироваться только фотодетектором с динамическим диапазоном D , что ограничивает динамический диапазон системы. Эти недостатки преодолеваются лишь при использовании лазерного гетеродинирования. Для волоконно-оптического тракта радиосигнала особое значение имеют следующие параметры: ШП, коэффициент шума, динамический диапазон, нелинейные искажения, коэффициент передачи по мощности, а также амплитудная и фазовая стабильность.

В одномодовой ВОЛЗ произведение времени задержки на ШП составляет 10^6 , что на два-три порядка больше, чем в других линиях задержки [6]. На основе таких ВОЛЗ можно построить СШП волоконно-оптическую диаграммообразующую схему многолучевой антенной решетки [7], показанной на рис. 1. Для формирования лучей диаграммы направленности в требуемых направлениях используются ВОЛЗ соответствующей длины между каждым лучевым разъемом диаграммообразующей схемы и каждым элементом решетки. Длины ВОЛЗ подбираются так, чтобы скомпенсировать задержки возбуждения излучателей каждой из плоских волн, приходящих с требуемых направлений. Для формирования луча в угловом направлении ϑ от нормали к раскрытию решетки длины соседних ВОЛЗ должны отличаться на величину $l = d \sin \vartheta / n$, где d — шаг решетки, n — групповой показатель преломления световода. Сверхширокополосность такой решетки обусловлена тем, что возникающий вдоль нее при изменении частоты дополнительный фазовый набег из-за различных длин ВОЛЗ компенсируется изменением относительного шага решетки, выраженного в длинах волн, в результате чего наклон фазового распределения и соответственно угловое положение луча остаются неизменными. В этом случае ШП решетки ограничена ШП излучателей, а также частотой, на которой побочные главные

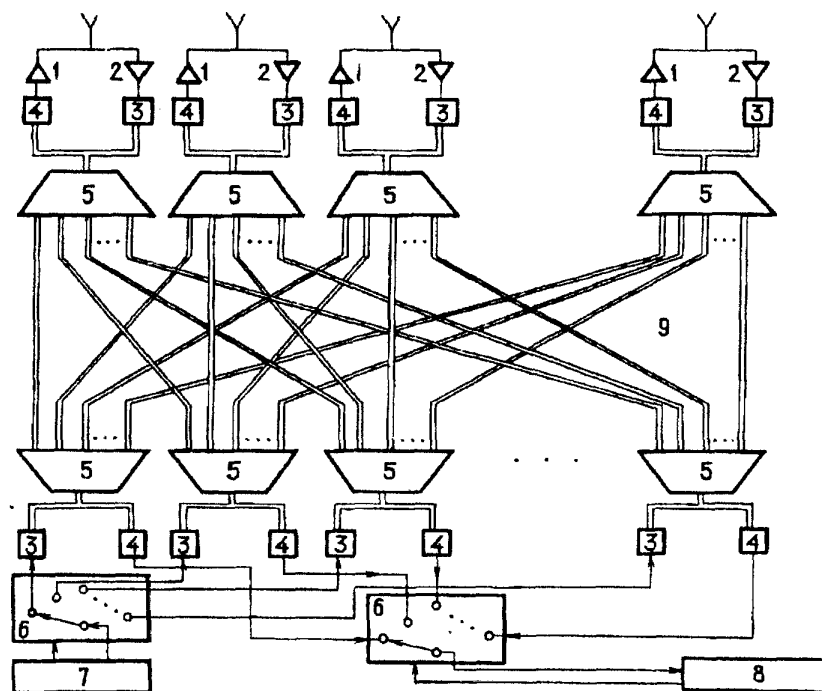


Рис. 1. Сверхширокополосная многолучевая активная антенная решетка с волоконно-оптической диаграммообразующей схемой. 1 — усилитель мощности СВЧ, 2 — малошумящий усилитель СВЧ, 3 — оптический передатчик с СВЧ модуляцией, 4 — СВЧ фотоприемник, 5 — оптический делитель/сумматор, 6 — переключатель СВЧ, 7 — блок формирования сигнала и управления в режиме передачи, 8 — блок обработки принимаемого сигнала и управления в режиме приема, 9 — волоконно-оптическая диаграммообразующая схема на волоконно-оптических линиях задержки

максимумы диаграммы направленности попадают в область видимости.

Неразрешимая ранее проблема переключения высокого уровня мощности с большой скоростью и временной точностью может быть решена с помощью ОЭП СВЧ, в которых осуществляются управляемые оптическим излучением резкие изменения амплитуды сигнала за счет эффекта фотопроводимости. Они сверхширокополосны и имеют пикосекундную временную точность срабатывания. В докладе приводятся сведения об объемном ОЭП СВЧ, содержащем кристалл GaAs, который при облучении лазерным диодом за несколько пикосекунд во всем объеме лавинообразно переходит в проводящее состояние и становится способным пропускать гигаватты мощности. Эффективность преобразования постоянного тока в СВЧ сигнал у него в сотни раз выше, чем у ОЭП в линейном режиме фотопроводимости.

ОЭП СВЧ можно использовать и в составе генератора застывшей волны или генератора инжектируемой волны [8] для генерации коротких СВЧ всплесков. Генератор застывшей волны состоит из нескольких секций линии передачи СВЧ, соединенных последовательно через ОЭП СВЧ. Электрические длины секций равны половине длины волны СВЧ, на которой должен работать генератор. При разомкнутых ОЭП соседние секции заряжаются противоположно и вдоль них формируется застывшее распределение напряжения. При синхронном замыкании ОЭП эта застывшая волна начинает двигаться как в направле-

нии нагрузки, где она выделяется в виде СВЧ импульсов, так и в направлении разомкнутого конца линии передачи, от которого она отражается и также следует в нагрузку. Таким образом, использование в этом генераторе N секций линии передачи СВЧ обеспечивает генерацию N периодов СВЧ.

Поскольку ОЭП СВЧ могут работать синхронно, можно создать активную антенную решетку на основе таких генераторов СВЧ и за счет сложения СВЧ мощности в свободном пространстве преодолеть любые ограничения по пиковой

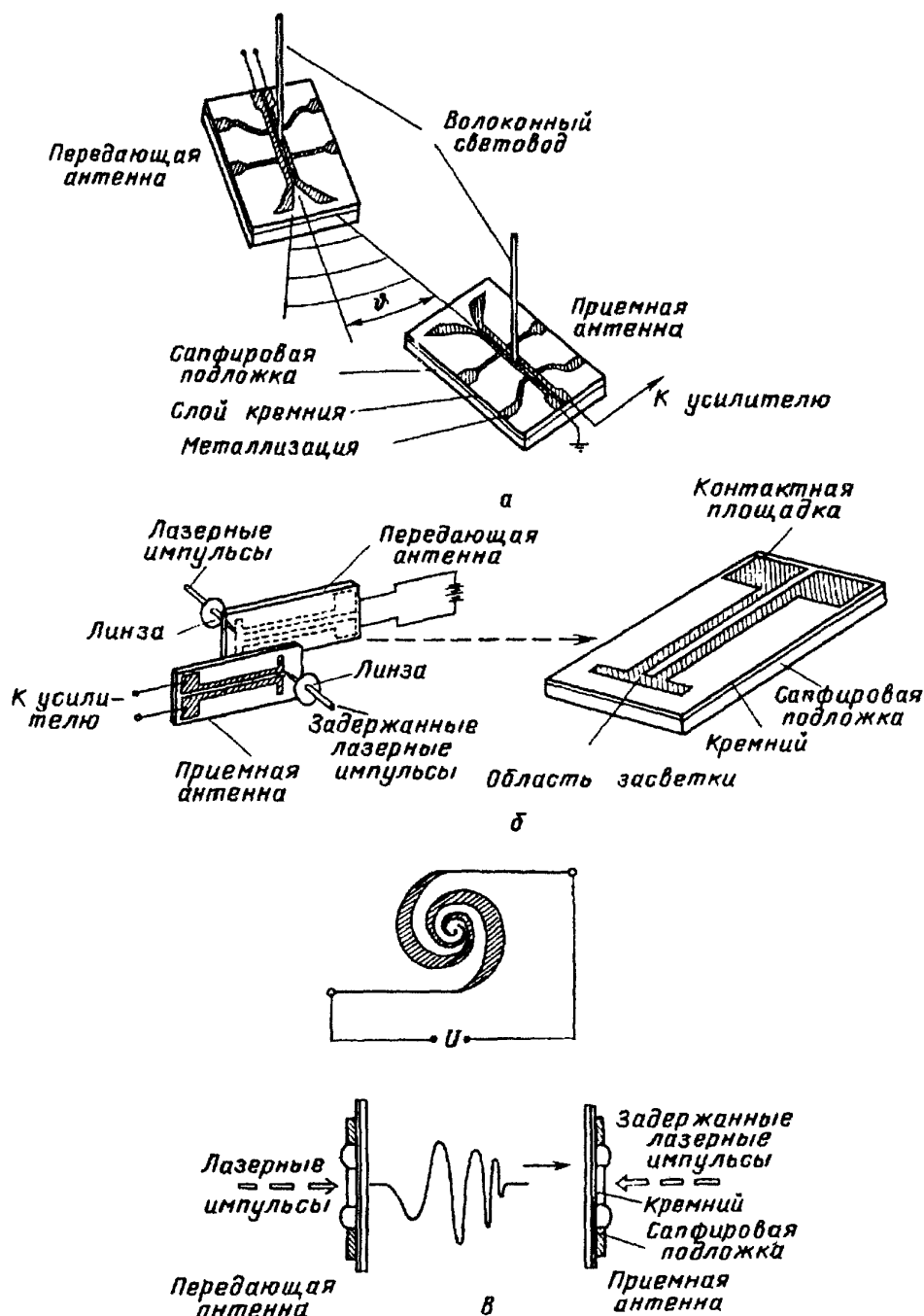


Рис. 2. Эксперименты со сверхширокополосными микрополосковыми излучателями, интегрированными с ОЭП СВЧ. *а* — С излучателем на основе экспоненциальной линии, *б* — С диполем Герца. *в* — С излучателем на самоподполняющих двухзаходных плоских спиралях

мощности. Посылая управляющие лазерные импульсы на ОЭП в составе решетки с соответствующими задержками, можно обеспечить ее фазирование, т.е. формировать требуемую диаграмму направленности антенной решетки. Для обеспечения сверхширокополосности такой решетки необходимы СШП излучатели, интегрированные непосредственно с оптомикроволновым прибором [8]. На рис. 2 представлены следующие СШП микрополосковые излучатели, интегрированные с ОЭП: на основе экспоненциальной линии, на самодополняющих двухзаходных плоских спиралях с постоянным углом намотки и диполь Герца. Все они изготавливались фотолитографией на подложке "кремний на сапфире". Для исследования излучателя на его электроды подавалось напряжение, и в результате возбуждения подложки лазерными импульсами генерировались короткие электромагнитные импульсы и излучались в пространство. Электромагнитные импульсы наводили напряжение на электродах идентичной приемной антенны, из которого задержанные на требуемое время лазерные импульсы производили оптоэлектронное стробирование. Спиральный излучатель диаметром 2,5 мм имел полосу частот от 10 до 100 ГГц, экспоненциальный излучатель длиной 3,7 мм с раскрытием 2,6 мм имел ШП около 120 ГГц, а полоса частот диполя Герца с вибраторами длиной 50 мкм простиралась от 100 ГГц до 2 ТГц [7], что обеспечивает формирование субпикосекундного электромагнитного импульса и позволит экспериментально изучать распространение на десятки километров электромагнитного сигнала [8,9], излученного решеткой таких диполей, энергия которого убывает значительно медленнее, чем квадрат обратного расстояния от антенны.

Оптомикроволновые методы формирования излучения СШП антенн, основанные на последних достижениях оптоэлектроники, лазерной техники и полупроводниковой технологии, позволяют достичь рекордной ШП и отличных массо-габаритных характеристик антенно-фидерных систем, существенно упростить фазирование СШП антенных решеток, решить многие аспекты проблемы электромагнитной совместимости и обеспечить пикосекундную временную точность формирования излучаемого сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hertz H.* Electric Waves. — London: Macmillan, 1893.
2. *Хармут Х. Ф.* Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. — М.: Радио и связь, 1985.
3. *Астанин Л.Ю., Костылев А.А.* Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. — М.: Радио и связь, 1989.
4. *Бахрах Л.Д., Блискавицкий А.А.*// КЭ. 1988. Т. 15, № 5. С. 879.
5. *Бахрах Л.Д., Блискавицкий А.А.*// Радиотехника. 1990. № 9. С. 62.
6. *Бахрах Л.Д., Блискавицкий А.А.*// Вопросы радиоэлектроники. Сер. "Общие вопросы радиоэлектроники". 1991. Вып. 14. С. 3.
7. *Бахрах Л.Д., Блискавицкий А.А.*// Антенны. Вып. 36/Под ред. А.А. Леманского. — М.: Радио и связь, 1989.— С. 4.
8. *Бахрах Л.Д., Блискавицкий А.А.*// Вопросы радиоэлектроники. Сер. "Общие вопросы радиоэлектроники". 1992. Вып. 5. С. 3.
9. *Содин Л.Г.*// Радиотехн. и электроника, 1991. Т. 36, № 5. С. 1014.