

**УДК 621.375.4 СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ГЕНЕРАТОРОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С.Э.Волков,
И.К.Сундучков, К.С. Сундучков**

*ГП "Укркосмос", ОАО НПП "Сатурн", ИТС НТУУ "КПИ"
Украина, г. Киев,*

*Приведен обзор традиционных и новых решений построения
твердотельных источников колебаний для схем миллиметрового
диапазона длин волн.*

При проектировании телекоммуникационных сетей с беспроводным доступом к мобильным абонентам в миллиметровом диапазоне длин волн необходимо решить ряд задач по созданию приёмо-передающих устройств. Важное место в них отводится источникам гетеродинных сигналов. Для выбора гетеродинных генераторов преобразовательных устройств систем передачи информации выполнен данный обзор литературы по состоянию развития генераторов миллиметрового диапазона волн. *

Системы передачи информации следующего поколения из-за постоянно увеличивающегося спроса на все более широкую полосу рабочих частот будут работать со скоростями передачи данных порядка нескольких Гбит/с. Для такого типа применения, на таких высоких скоростях передачи данных, объединение в едином чипе цифровых демультиплексеров, делителей частоты и аналоговых источников тактовых генераторов, усилителей и др. не только полезно для снижения цены производства, но и является необходимым для обеспечения высоких параметров сборок в целом. Объединенные системы требуют в качестве тактового источника высокочастотный генератор. Генератор - ключевой компонент для реализации этих схем.

Основными полупроводниковыми источниками на частотах свыше 15 ГГц являются генераторы на лавинно-пролетных диодах (ГЛПД) [1] и генераторы на диодах Ганна (ГДГ) [2]. Отрицательная динамическая проводимость этих диодов позволяет их использовать и для усиления колебаний.

Конструктивное исполнение ГЛПД и ГДГ сходно. Их колебательными системами являются резонаторы, чаще в виде закороченных отрезков волноводов; в том числе с пониженным по узкой стенке поперечным сечением, коаксиальных или микрополосковых линий. В волноводных конструкциях согласование низкоомного диода с большим волновым сопротивлением линий передачи достигается применением открытых радиальных (дисковых) резонаторов или размещением диода в толстой емкостной диафрагме. Связь с нагрузкой осуществляется с помощью ступенчатого трансформатора или диафрагмы. Узел крепления диода в резонаторе должен обеспечивать хороший надежный электрический контакт и теплоотвод. Высокоэффективные узлы крепления полупроводниковых диодов приведены, например, в а.с. СССР №693945, опубл. 1979г., а.с. СССР № 1109829, опубл. 1984 г. МКИ Н01Р 1/00, пат. Украины № 57222, опубл. 2003 г., бюл. №6.

Генераторы на ЛПД перекрывают диапазон частот от единиц до 300 ГГц, отдавая соответственно мощность от 10 Вт до единиц милливольт. Генераторы на диодах Ганна имеют несколько меньшие КПД, чем ГЛПД, но существенно лучшие шумовые характеристики. Работают они в диапазоне рабочих частот 4...200 ГГц, генерируют мощность от сотен до единиц милливольт. Для питания ЛПД необходимы генераторы тока, а для питания диодов Ганна необходимы генераторы напряжения.

Большинство интегральных схем, работающих на частотах порядка 60 ГГц и выше, построены на транзисторах использующих материалы с высокой подвижностью электронов (НЕМТэ), которые имеют высокое значение критической частоты [3]. Генераторы на транзисторе с высокой подвижностью электронов были открыты в начале 90-х годов [4]. Наивысшая генерируемая частота НЕМТ генератора составляет 213 ГГц [5]. Однако, фазовые шумы НЕМТ генератора велики из-за большого фликер-шума. Кроме того, характеристики НЕМТ транзистора очень неустойчивы и это создает проблемы их воспроизводства.

Уровни фазового шума генераторов на НЕМТ транзисторах приведены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни фазового шума некоторых НЕМТ генераторов

f _c , ГГц	Фазовый шум		Источник
	величина, дБ	расстройка, кГц	
23	102	100	[6]
28,65	92	100	[7]
30	102	100	[8]
38	68	100	[9]

Открытие НВТ (Heterojunction Bipolar Transistor) генераторов было долгожданным. Частота генерации таких генераторов достаточно высока, а собственный фликер-шум низкий [10]. В работе [11] описана интегральная схема генератора, работающего на частоте 62 ГГц и имеющая уровень фазового шума при расстройке на 1 МГц ниже на 104 дБ. Самые высокочастотные НВТ генераторы, работающие на частотах 104, 134, 150 ГГц, описаны в литературе [5, 12].

Создание перестраиваемых широкополосных генераторов мм-диапазона - актуальная задача современной радиоэлектроники. Известно, что такой активный элемент, как диод Ганна, может работать в широкой полосе частот, как на основной частоте (1-й гармонике), так и на частоте высших гармоник в различных резонансных системах [13].

В диапазоне до $f \approx 20$ ГГц ГЛПД и ГДГ работают на основной частоте генерации, а на частотах 20...60 ГГц - с выходом на основной частоте или второй гармонике, на более высоких частотах с выходом на второй или третьей гармониках. Для обеспечения эффективной работы с выходом на гармонике основной частоты желательно использовать диоды с оптимизированной структурой активного слоя; колебательная система должна содержать два контура, один из которых настроен на основную частоту, а другой (к нему подключена нагрузка) - на ее гармонику. В этом случае вывод энергии через волновод, запердельный для основной частоты, уменьшает влияние нагрузки на этой частоте и повышает стабильность генерируемых колебаний. При правильном подборе режима путем настройки контура, выбора рабочей точки и степени связи с нагрузкой мощность второй или третьей гармоники такого генератора на 10... 15 дБ больше, чем у генератора только с одним контуром, настроенным на частоту этой гармоники [14, 15].

Генераторы на диодах Ганна при наличии вентильной развязки имеют уход частоты $\Delta f = \pm 50$ МГц в интервале температур $20 \pm 20^\circ\text{C}$ [16], а уход мощности при

этом равен ± 1 дБ. В колебательной системе с опорным резонатором имеем: $\Delta f = \pm 2,5$ МГц, а при стабилизации частоты с помощью диэлектрического резонатора эти показатели улучшаются.

В последние годы интенсивно развивается технология и конструирование интегральных схем миллиметрового диапазона на основе кремния. Достигнутые результаты на кремнии удовлетворяют практически всем требованиям разработчиков [17, 18]. Все это обуславливает использование для изготовления активных элементов не только возможности такого сложного технологического цикла, каким является молекулярно-лучевая эпитаксия, но и создавать активные слои для двухпролетных структур диодов (ЛДП) с помощью диффузионной технологи.

В работе [19] рассмотрены технология изготовления и основные параметры генераторного модуля в микрополосковом исполнении на основе двухпролетного кремниевого диода восьмимиллиметрового диапазона длин волн. Получена выходная мощность генераторного модуля $\sim 40\div 50$ мВт. В технологии ЛДП использованы квазиаморфные слои нитрида титана, обеспечивающие высокое качество и термостойкость омических контактов.

Особенность ЛПД заключается в том, что его источник питания должен быть источником стабилизированного тока, а не стабилизированного напряжения, как у других типов генераторов. Связано это с тем, что ЛПД работает на участке лавинного пробоя, где небольшие изменения напряжения питания приводят к значительным изменениям тока.

Фирма «ELVA-1» разработала ГЛПД типа CIDO-19 с параметрами: $P_{\max}=120$ мВт на частотах 40-60 ГГц, и $P_{\max}=60$ мВт (тип СЮО-8) на частотах 90-5-140 ГГц.

В таблице 2 приведены основные характеристики известных частотно стабилизированных автогенераторов диапазона ММВ на ДГ и ЛПД.

Таблица 2. Характеристики автогенераторов на ДГ и ЛПД

№ п/п	1	2	3	4	5	6
Тип диода	ДГ, GaAs	ЛПД, Si, SD	ЛПД, Si, DD	ДГ, GaAs	ДГ, GaAs	ЛПД, GaAs
Диапазон, ГГц	33...36	33...36	33...36	26,5...40	40...60	94
Мощность, Вт	0,1	0,3	0,5	0,2	0,1	0,27
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	-50...+50	-60...+70	-50...+50	0...+60	0...+60	-
$\Delta f, \text{МГц}/^\circ\text{C}$	0,1	0,16	0,1	0,15	0,2	-
СПМШ, дБ/Гц/(F кГц)	-105...-10/10	-85/10	-90/10	-	-120/1000	-85/100
Масса, г	200	50	200	226	170	-
Фирма, страна	«Орион», Украина «Светлана», Россия	«Орион», Украина	«Орион», Украина	Militech, USA	Militech, USA	Tech.Univ Munchen, Germany

Представляет интерес сопоставление шумовых характеристик различных диодных генераторов, работающих на основной частоте и на второй гармонике. На Рис. 1 приведены частотные зависимости спектральной плотности мощности фазового шума, при отстройке на 10 кГц (сплошная кривая для основной частоты, пунктирные кривые для работы на второй гармонике при разбросе исходных величин W_Φ на 5 дБ). Цифры рядом с экспериментальными точками на Рис. 1 соответствуют номеру ссылки на литературу в библиографическом списке работы [20].

Из рассмотрения приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Наилучшие результаты по уровню фазового шума достигнуты при разработках генераторов на арсенидгаллиевых диодах Ганна в диапазоне 30... 100 ГГц [21], в 8-ми миллиметровом диапазоне длин волн получены аналогичные результаты на арсенидгаллиевых диодах Ганна [22].

2. Приведенные лучшие результаты близки к теоретическим оценкам, основанным на соотношениях подобия.

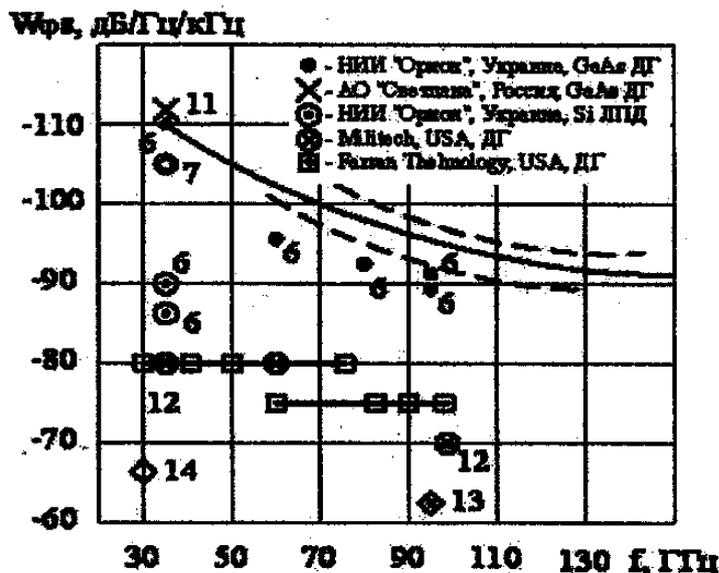


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований диодных генераторов миллиметрового диапазона со стабилизацией частоты резонаторами.

Одним из направлений развития генераторов миллиметрового диапазона длин волн является их построение с использованием структур нового типа.

Традиционные волноводные и полосковые электродинамические структуры не решают в полной мере проблему создания твердотельных источников миллиметрового диапазона волн.

Применение новых типов линий передачи, включая такие металлодиэлектрические структуры, как зеркальные прямоугольные диэлектрические волноводы (ЗПДВ) и другие модификации диэлектрических волноводов (ДВ), позволяет добиться высокой технологичности устройств миллиметрового диапазона на их основе. При этом реализуются новые решения и принципы построения твердотельных источников, нереализуемые при традиционном подходе [23].

В качестве примера можно назвать генератор, который работает на второй гармонике ДГ в диапазоне 75... 110 ГГц. В устройстве используется одномодовый (E_{11}^y - волна) ЗПДВ сечением 0,44x0,88 мм (в диапазоне около 90ГГц), сформированный из алюминиевой керамики методом толстопленочной технологии на металлическом основании. При этом ЗПДВ имеет потери порядка 0,05...0,07 дБ/мм.

Колебательные системы на открытых резонаторах позволяют улучшать спектральные характеристики сигналов и облегчают реализацию устройств со сложением мощности отдельных активных элементов [24].

Основой колебательной системы генераторов является открытый резонатор (ОР), в поле которого размещены один или несколько генераторных диодов с элементами связи, согласования и токоподвода.

Основные разновидности конструктивной реализации открытых резонаторов: с плоскопараллельными зеркалами, с плоским и сферическим, двумя сферическими зеркалами, типа «эшелетт» и сферическим зеркалами. Первая разновидности практически не применяется из-за трудности юстировки зеркал. По технологическим соображениям наибольшее распространение получил полусферический ОР и в отдельных случаях - сферический. Собственная добротность таких резонаторов в миллиметровом диапазоне волн достигает $10^4 \dots 10^5$.

Выводы

Из обзора литературы по состоянию и тенденциям развития генераторов миллиметрового диапазона длин волн можно отметить следующие достижения и рекомендации.

1. В миллиметровом диапазоне широко применяются наряду с прямоугольными волноводами с металлическими стенками микрополосковые, щелевые и компланарные линии передач, кремниево-металлические полиимидные многослойные структуры («SIMPOL») и диэлектрические волноводы.

2. Развивается технология и конструирование интегральных схем миллиметрового диапазона длин волн на основе кремния. Достигнутые результаты на кремнии в миллиметровом диапазоне длин волн удовлетворяют практически всем требованиям разработчиков.

3. Усилия разработчиков сосредоточены сегодня в основном на увеличении мощности и стабильности (в том числе и фазовой стабильности) генерирующих устройств, увеличению выходной мощности умножительных устройств и усилителей мощности.

4. Получены практические результаты:

- генераторы на GaAs диоде Ганна в диапазоне частот до 40 ГГц имеют выходную мощность 100+200 мВт, а генераторы на ЛПД в диапазоне частот до 94 ГГц имеют выходную мощность 270 мВт;
- умножители частоты выполненные на двух парах диодов с барьером Шотки в диапазоне частот до 74 ГГц имеют выходную мощность 115 мВт при КПД равном 12,5%;
- генератор работающий на новых волноводных структурах описанный в работе [23] имеет в диапазоне частот 94 ГГц в выходную мощность несколько мВт.

5. Перспективным направлением в технике миллиметровых и субмиллиметровых волн считается разработка генераторных устройств с квазиоптическими резонансными системами.

Литература

1. Диодные генераторы и усилители СВЧ / Давыдова Н. С., Данюшевский Ю. З. - М.: Радио и связь, 1986 г. -184 с.
2. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Гасанов Л.Г., Липатов А.А., Марков В.В., Могильченко Н.Н. - М.: Радио и связь, 1988 г. - 288 с.
3. S. E. Rosenbaum, B. K. Kormanyos, L. M. Jelloian, M. Matloubian, A. S Brown, L. E. Larson, L. D. Nguyen, M. A. Thompson, L P. Katehi, and G.M. Reheiz. 155- and 213-GHz AllnAs/GalnAs/InP HEMT MMIC oscillators // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43. no. 4, pp. 927-932,1995.

4. Y. Kwon, D. Pavlidis, M. Tutt, G. I. Ng, R. Lai, and T. Brock. W-band monolithic oscillator using InAlAs/InGaAs HEMT // *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 13. pp. 1425-1426, Aug. 1990.
5. Kenji Uchida, Hiroyuki Matsuura, Tsuyoshi Yakihara, Shinji Kobayashi, Sadaharu Oka, Tadashige Fujita, and Akira Miura. A Series of InGaP/InGaAs HTB Oscillators up to D- band // *IEEE Trans, on Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, №5, May 2001, pp.858-865.
6. S. -W. Chen, L. -C. Chang, and J.Y. Chin. A unified design of dielectric resonator oscillators for telecommunications systems // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 1986, pp. 593-596.
7. Andrew R. Brown, Gabriel M. Rebeiz. A Ka-Band Micromachined Low-Phase-Noise Oscillator // *IEEE Trans, on Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, №8, August 1999, pp. 1504-1508.
8. M. Funabashi, T. Inoue, K. Ohata, K. Maruhashi, K. Hosoya, M. Kuzuhara, K. Kanekawa, and Y. Kobayashi. A 60-GHz MMIC stabilized frequency source composed of a 30-GHz DRO and a doubler// *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 1995, pp. 71-74.
9. P. G. Wilson. Monolithic 38-GHz dielectric resonator oscillator // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 1991, pp. 831-834.
10. Q. Lee, B. Agarwal, D. Mensa, R. Pullela, J. Guthrie, L. Samoska, and M. J. W. Rodwell. A >400 GHz f_{max} transferred-substrate heterojunction bipolar transistor IC technology// *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 19. pp. 77-79, Mar. 1998.
11. H. Wang, K. W. Chang, L. T. Tran, J. C. Cowles, T. R. Block, E. W. Lin, G. S. Dow, A. K. Oki, D. C. Streit, and B. R. Allen. Low phase noise millimeter-wave frequency sources using InP-based HBT MMIC technology// *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 31, no. 10. pp. 1419-1425, 1996.
12. Yves Baeyens, Claus Dorschky, Nils Weimann, Qinghung Lee, Rose Kopf, George Georgiou, John-Paul Mattia, Robert Hamm, and Young-Kai Chen. Compact InP-Based HBT VCOs with a Wide Tuning Range at W-and D-Band // *IEEE Trans, on Microwave Theory and Tech.*, vol. 48, №12, December 2000, pp. 2403-2408.
13. Дядченко А.В., Мишнёв А.А., Прохоров Э.Д. Широкополосный GaAs генератор мм-диапазона / Труды 11-й Международной конференции "Техника СВЧ и телекоммуникационные технологии" ("CriMiCo-2001"), 10-14 сентября, Севастополь, Крым, Украина, 2001 г., стр. 164-165.
14. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем / Згуровский М.З., Ильченко М.Е., Кравчук С.А. и др. В 2т. - К.: 1ВЦ "Видавництво "Політехніка", 2003 г., т.2: Устройства передающего и приемного трактов. Проектирование устройств и реализация систем. - 616с.: ил.
15. Плаксин С.В., Погорелая Л.М., Соколовский И.И., Лукаш В.С. Полупроводниковый генератор миллиметрового диапазона на запердельном волноводе // *ТКЭА*, вып. 2 (68), 2007 г., с. 31-33.
16. Eisels H., Rydberg A., Haddad G.I. Recent Advances in the Performance of InP Gunn Devices and GaAs TUNNETT Diodes for the 100-300 GHz Frequency Range and Above // *IEEE Trans, on MTT*. - 2000. - Vol. 48, nr 4. - P. 626 - 631.
17. Luy Johann Fridrich. Silicon-Based Millimeter-Wave Integrated Circuit // *Thin-solid Films*, 1990, v. 184, pp. 185-197.
18. Boltovets N.S., Ivanov V.N., Konakova R. V., Kurakin A.M., Milenin V.V., Soloviev E.A., Verimeychenko G.M. Technology and Experimental Studies of Contact for Microwave Diodes Based on Interstitial Phases // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2001, , v. 4, №1, pp. 158-171.
19. Басанец В.В., Болтовец Н.С., Зоренко А.В., Конакова Р.В., Миленин В. В., Войциховский Д.И. Микроволновые осцилляторы на основе кремниевых IMPATT диодов, используемые в интегральных схемах миллиметрового диапазона / Труды 11-й Международной конференции "Техника СВЧ и телекоммуникационные

технологии", ("CriMiCo-200r), 10-14 сентября, Севастополь, Крым, Украина, 2001 г., стр. 149-151.

20. Касаткин Л.В., Рукин В.П. Частотно-стабилизированные полупроводниковые источники электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона длин волн // ISSN 0021 -3470. Радиоэлектроника. Известия ВУЗов, 2004 г., № 5, стр. 3-И6.

21. Ракитин С.П., Карушкин **Н.Ф.**, Цвирко Ю.А. и др. Твердотельные компоненты для перспективной радиоэлектронной аппаратуры ММ и субММ диапазонов длин волн (26,5...300 ГГц) / Труды 10-й Международной конференции "Техника СВЧ и телекоммуникационные технологии" ("CriMiCo-2000"), Севастополь, Крым, Украина, 2000 г., стр. 33 - 36.

22. Информация АО "Светлана", <http://www.brown.nord.nv.ru/svetlana>.

23. Коцержинский Б.А., Мачусский Е.А., Першин Н.А., Тараненко В.П. Твердотельные генераторы с квазиоптическими резонансными системами - // Радиоэлектроника. 1987 г. Т.30, №10, стр. 13-23. (Изв. вузов).

24. Chang J.-W. Millimeter-wave (W-band) Quarts Image Guide Gunn Oscillator // IEEE Trans, on MTT. - 1983. - Vol. 31, nr 2. - P. 194 - 199.