

# Генераторы на СВЧ- и КВЧ-диодах.

## Часть 2. Промышленные изделия генераторов на диодах

Владимир ГЕВОРКЯН,  
к. т. н.  
GevorkianVM@mpei.ru  
Виктор КОЧЕМАСОВ,  
к. т. н.

Во второй части статьи рассмотрены диодные генераторы, промышленно выпускаемые ведущими фирмами-производителями, проведена сравнительная оценка их параметров и даны некоторые рекомендации по выбору возможных поставщиков изделий.

В настоящее время серийно выпускаются (или предлагаются к поставке) диодные генераторы фиксированных частот (по существу, с малой перестройкой/подстройкой частоты) в диапазоне от десятка до нескольких сотен ГГц. Однако на рынке число производителей и поставщиков диодных автогенераторов ограничено единицами фирм, предлагающих как профильную продукцию, так и сопутствующие образцы. Проведем краткий обзор предлагаемых ими изделий.

### Автогенераторы фиксированных частот непрерывной мощности

Предложения производителей автогенераторов фиксированных частот непрерывной мощности приведены в таблице 1, где использованы следующие обозначения:  $P_{\text{вых}}$  — выходная мощность; МП — диапазон механической перестройки частоты;  $F_{\text{стаб}}$  и  $P_{\text{стаб}}$  — температурные частотная стабильность и стабильность выходной мощности; ФШ — уровень спектральной плотности фазовых шумов при отстройке от центральной (несущей) частоты генерации.

Заметим, что в таблице 1 представлены модели ГДГ, что соответствует основному направлению развития устройств ГД. Во-вторых, несмотря на класс ГД — ГДГ фиксированных частот, большинство генераторов снабжено устройством механической подстройки частоты генерации. Перечисленные в таблице 1 компании соответствуют библиографическому списку: Ducommun [7]; Microsemi [8]; Spacek [9]; Quinstar [10]; Sage [11]; Cernex [12]; Farran [13].

Наименьшее значение технологической настройки частоты генерации из числа представленных ГД составляет 0,1%.

Устройство механической подстройки частоты генерации, как правило, представляет элемент, меняющий размеры резонатора, —

Таблица 1. Генераторы на диодах Ганна с фиксированной частотой генерации

Компания	Модель, серия	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вых}}$	МП, МГц	$F_{\text{стаб}}$ , МГц/°С	$P_{\text{стаб}}$ , дБ/°С	ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц
Ducommun	OGL-42240110-31	24,125	+10 дБм	±500	-0,2	-0,03	-98
Ducommun	OGL-28350110-32	35	+10 дБм	±500	-0,4	-0,04	-95
Microsemi	MO86751A	10,525	10 мВт	—	0,35	—	—
Microsemi	MO9060	24,125	+5 дБм	—	1	—	—
Microsemi	MO9205A	35,5	15–30 мВт	—	0,8	—	—
Spacek	GV-xxx-FT	50–75	60 мВт	10	4	-0,04	—
Spacek	GE-xxx-FT	60–90	60 мВт	10	5	-0,04	—
Spacek	GW1-xxx-FT	75–95	40 мВт	10	5	-0,04	—
Spacek	GW2-xxx-FT	95–110	10 мВт	10	5	-0,04	—
Quinstar	QSO	33–50	+10...+17 дБм	—	0,05	—	-106
Quinstar	QSO	50–75	+10...+16 дБм	—	0,05	—	-103
Quinstar	QSO	75–110	+10...+12 дБм	—	0,07	—	-101
Sage	SOL-94210-SF-D1	9,375	+10 дБм	±25	-0,1	-0,01	-110
Sage	SOL-24310-42-G1	24,125	+10 дБм	±500	-0,2	-0,02	-98
Sage	SOL-35320-28-G1	35	+20 дБм	±500	-0,3	-0,03	-95
Sage	SOL-36313-28-G1	35,5	+14 дБм	±1000	-0,3	-0,03	-95
Cernex	CMG900910	9,375	+10 дБм	±100	-0,1	-0,01	-105
Cernex	CMG422410	24,15	+10 дБм	±500	-0,2	-0,02	-98
Cernex	CMG283510	350	+10 дБм	±500	-0,4	-0,03	-95
Farran	GO-28	26–35	300 мВт	±3000	—	—	—
Farran	GO-15	60–70	100 мВт	±5000	—	—	—
Farran	GO-08	110–140	15 мВт	±3000	—	—	—
Farran	GN-22	33–50	10–250 мВт	±50	—	—	—
Farran	GN-10	75–100	5–10 мВт	±75	—	—	—

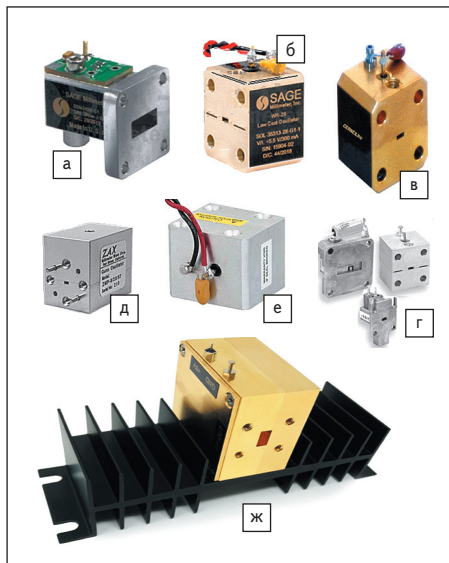
например, короткозамыкающий поршень в объемных полых резонаторах [1] или металлический или диэлектрический штырь или диск, возмущающий структуру его полей [1]. Штыри и диски чаще применяют для подстройки частоты ДР [6]. Попутно отметим, что подстройка частоты ферромагнитных резонаторов, к примеру ЖИГ-резонаторов, достигается вариацией в малых пределах величины постоянного магнитного поля изменением воздушного зазора размещения ферромагнитного резонатора.

В зависимости от степени возмущения структур полей механическая перестройка частоты может быть в пределах технологической подстройки, необходимой для любого ГД и обычно ограничивающейся долями процента, либо в размере от единиц-десятка процентов до октавы. Это соответствует ГД с механической перестрой-

кой частоты. Тип устройства перемещения элемента перестройки частоты относительно резонатора может быть выполнен либо в виде простого, либо в виде прецизионного (микрометрического) винта. Винт элемента настройки частоты в ГД фиксированной частоты нередко недоступен пользователю. Микрометрический винт обеспечивает более точную установку частоты генерации.

### Автогенераторы непрерывной мощности с механической перестройкой частоты

Автогенераторы непрерывной мощности с механической перестройкой частоты приведены в таблице 2. Компании-производители соответствуют библиографическому списку: Ducommun [7]; Microsemi [8]; Spacek [9]; Quinstar [10]; Sage [11]; Cernex [12]; Farran [13];



**Рис. 1.** Автогенераторы фиксированных частот разных производителей:  
 а) SOL-24314-42-G1 фирмы Sage;  
 б) SOL-35313-28-G1-1 фирмы Sage;  
 в) CMGL Series фирмы Cernex;  
 г) MO8651—MO9205 фирмы Microsemi;  
 д) серии ZFF фирмы ZAX [20];  
 е) FMWGN1001 К-диапазона, рекламируемый фирмой Fairview Microwave [21];  
 ж) серии 830 фирмы Mi-Wave

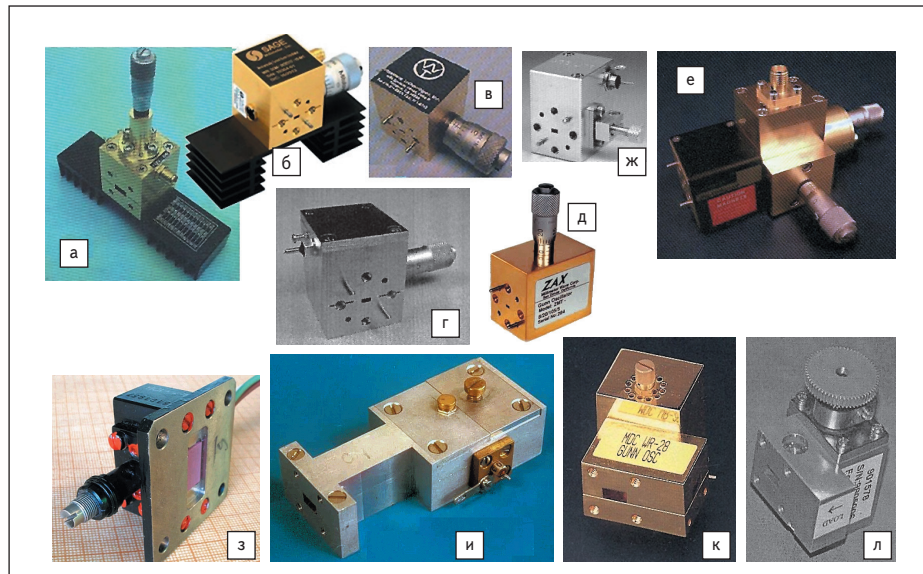
Mi-Wave [14]; Cobham [15]; Pasternack [16]; hxi [17]; Millitech [18]; MDT [19].

Из сравнения характеристик ГДГ в таблицах 1 и 2 следует закономерный вывод: спектральная плотность фазовых шумов ухудшается с ростом диапазона перестройки частоты (что объясняется уменьшением добротности колебательной системы, возмущаемой элементом перестройки частоты ДГ)

**Таблица 2.** Генераторы на диодах Ганна с механической перестройкой

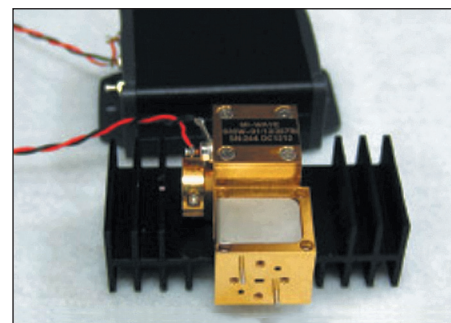
Компания	Модель, серия	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вых}}$	МП, МГц	$F_{\text{стаб}}$ , МГц/°С	$P_{\text{стаб}}$ , дБ/°С	ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц
Cernex	CMG	8,2–12,4	+10...+27 дБм	500–2000	–0,5	–0,01	–90
Cernex	CMG	90–140	0...+17 дБм	500–20 000	–6	–0,03	–70
Cernex	CMGW	28–38	+18...+20 дБм	–	–	–	–90
Cernex	CMGW	56–72	+3...+7 дБм	–	–	–	–90
Cobham	–	40–45	+23 дБм	500	2	0,04	–
Cobham	–	95–100	+17 дБм	300	5	0,04	–
Spacek	GQ-xxx-MT	33–50	1500 мВт	3000	0,7	–0,04	–
Spacek	GW2-xxx-MT	95–110	+10 дБм	1000	5	–0,04	–
Pasternack	PEWGN1001	24,125	+10 дБм	±1000	–0,2	–0,03	–98
Pasternack	PEWGN1000	35	+10 дБм	±3000	–0,4	–0,04	–95
Quinstar	QTM	18–26,5	+10...+27 дБм	100–4000	–1,5	–0,02	–
Quinstar	QTM	130–150	0...+13 дБм	100–2000	–6	–0,03	–
hxi	HGM	40–45	50 мВт	500	–0,9	–	–
hxi	HGM	90–95	40 мВт	1000	–5	–	–
Millitech	CDM-28	26,5–40	+18 дБм	6000	2	–0,02	–
Millitech	CDM-15	50–60	+16 дБм	6000	3	–0,03	–
Millitech	CDM-10	90–100	+13 дБм	8000	5	–0,04	–
Sage	SOF-1003-M1	95	+3 дБм	±15 000	–	–	–90
Sage	SOF-1507-M1	64	+7 дБм	±8000	–	–	–
Sage	SOF-2820-M1	32	+20 дБм	±5000	–	–	–
Farran	GO-28	26–35	300 мВт	±3000	–	–	–
Farran	GO-12	70–80	60 мВт	±6000	–	–	–
Farran	GN-22	33–50	10–250 мВт	±50	–	–	–
Farran	GN-10	75–100	10–50 мВт	±75	–	–	–
Farran	GMB-15	50–60	40 мВт	–	–	–	–
Farran	GMB-10	90–105	25 мВт	–	–	–	–
Ducommun	OGM	50–75	+10...+23 дБм	50–20 000	–4,5	–0,03	–
Ducommun	OGF-2820-01	26,5–40	+20 дБм	10 000	–	–	–
Ducommun	OGF-1003-01	75–110	+3 дБм	35 000	–	–	–
Mi-Wave	830Ku	12,4–18	300 мВт	250	0,3	–	–
Mi-Wave	830W	75–110	50 мВт	500	3	–	–
Spacek	GKa-300VA-1	30	500 мВт	4000	–	–	–
Spacek	GW-920PM	92	25 мВт	±1000	–	–	–
Sage	SOM-75320305-12-M1	75	+5 дБм	±10 000	–	–	–
Sage	SOM-94308315-10-M1	100	+3 дБм	±3000	–	–	–
MDT	MGM	60–65	80 мВт	400	–3	–0,03	–
MDT	MGM	75–80	60 мВт	200	–4	–0,05	–
MDT	MGM	95–100	30 мВт	200	–6	–0,05	–

и с ростом диапазона рабочих частот, что определяется физическими процессами в активной области генераторного диода.



**Рис. 2.** ГДГ с механической перестройкой частоты:  
 а) серии SOF фирмы SAGE Millimeter Inc.; б) серии SOM фирмы SAGE Millimeter Inc.;  
 в) фирмы WiseWave Technologies Inc. [22]; г) серии CBG фирмы CERNEX Inc, причем с настройкой по питанию диода;  
 д) серии ZMT фирмы ZAX; е) серии GDM фирмы millitech; ж) GN-10 фирмы Farran;  
 з) ГДГ X-диапазона длин волн, каталог MDT; и) ГДГ К-диапазона длин волн, каталог MDT;  
 к) МОС фирмы Microwave Development Company, Inc. [23]; л) фирмы Millimeter Wave Productt (HXL)

Внешне генераторы фиксированных частот разных производителей похожи, что иллюстрирует рис. 1. Все ГД образуют замкнутый корпус с линией вывода сигнала, которая в миллиметровом диапазоне длин волн обычно выполнена в виде полого прямоугольного волновода. Генераторы с механической перестройкой частоты, обеспеченной винтом «под шлиц», внешне практически не отличаются от ГД фиксированных частот. Это видно из сравнения устройств на рис. 1 и ГДГ рис. 2ж–к. ГДГ с применением микрометрического винта внешне отличаются от устройств фиксированной частоты и АГ с настройкой частоты простым винтом



**Рис. 3.** ГДГ с механической перестройкой частоты, серия 830, фирма Mi-Wave [14]

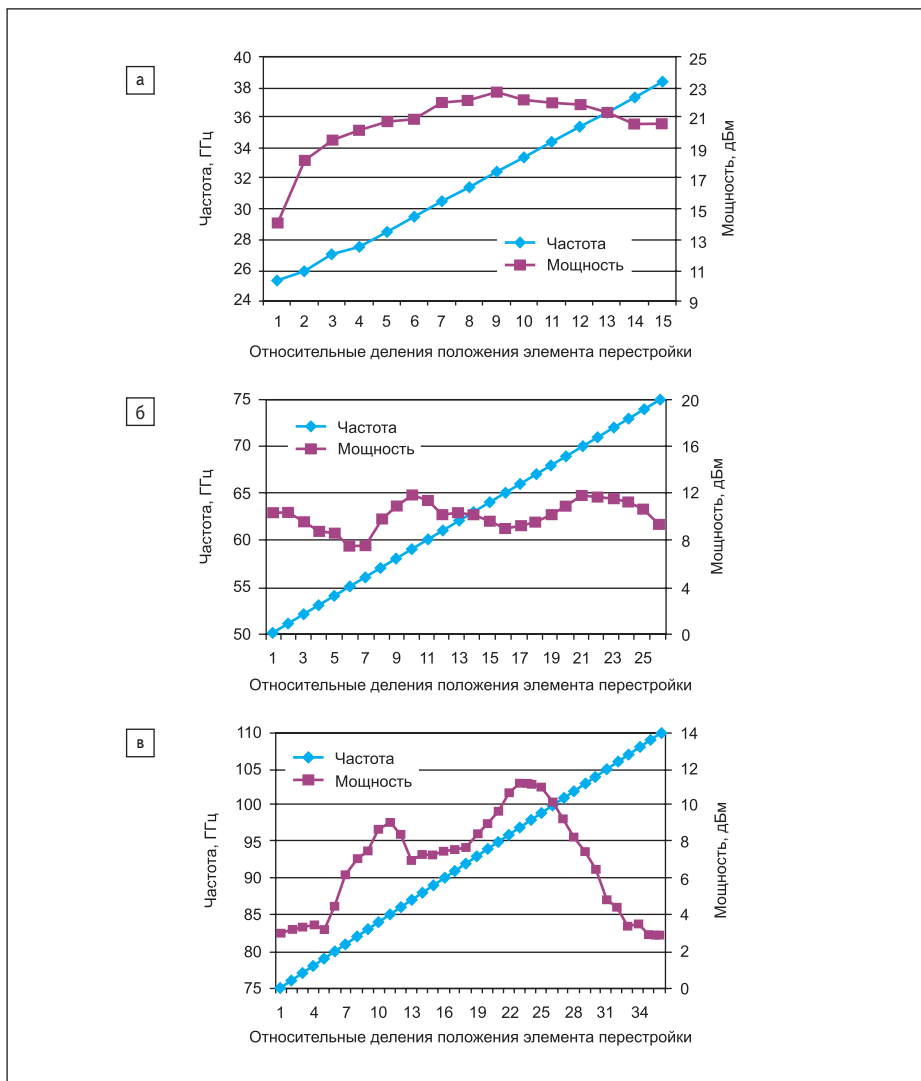


Рис. 4. Пример частотной зависимости характеристик ГДГ фирмы SAGE Millimeter Inc. серии SOF: а) Ka-диапазон; б) V-диапазон; в) W-диапазон

в каждом из частотных поддиапазонов, относящихся к крайним точкам освоенного ими частотного диапазона.

### Генераторы непрерывной мощности с перестройкой (настройкой) частоты по напряжению питания диода

На практике трудно по внешнему виду отличить ГД с механической перестройкой частоты и генераторы непрерывной мощности с перестройкой (настройкой) частоты по напряжению питания диода. В большинстве случаев эти функциональные возможности ГДГ объясняются исключительно интересом пользователя к применению настройки частоты по питанию и по допустимому диапазону изменения напряжения питания, а также крутизной зависимости частоты генерации от напряжения питания. Так, ГДГ серии CBG фирмы CERNEX Inc. [30], приведенный на рис. 2 и рекламируемый как устройство с механической перестройкой частоты, обладает и функцией настройки частоты генерации по питанию диода, указанной в его характеристике. На рис. 5а приведен вид автогенератора на диоде Ганна со специальной функцией подстройки частоты по напряжению питания фирмы WiseWave Technologies Inc. [22], а на рис. 5б — ГДГ компании SAGE Millimeter Inc. [11], позиционируемый как АГ с высокой выходной мощностью в диапазоне частот до 140 ГГц с механической перестройкой частоты и одновременно с подстройкой по питанию и обладающий высокой стабильностью и низкими АМ- и ФМ-шумами.

Сравнивая внешний вид устройств, можно заметить их практическую идентичность, за исключением мест ввода напряжений питания диодов.

Обычно большинство ГДГ характеризуют комплексом параметров механической и электрической перестройки частоты по напряжению питания, что иллюстрирует таблица 3. И внешне, и по электрическим характеристикам оба ГД не отличаются от устройств фиксированных частот или генераторов с механической перестройкой частоты на примере устройств фирмы SAGE Millimeter Inc. [11].

самим винтом (рис. 2). Качественно отличаются внешним видом ГДГ, частота которых регулируется электрически управляемым механическим устройством. На рис. 2л показан такой ГДГ, а на рис. 3 приведена фотография аналогичного ГДГ, но в сочетании с опцией электрического управления элементом механической перестройки частоты.

На рис. 4 показан типичный вид зависимостей выходной мощности ГДГ при меха-

нической перестройке частоты на примере устройств фирмы SAGE Millimeter Inc. [11].

Заметим, что приведенные в таблицах 1 и 2 характеристики ГД разных фирм иллюстрируют лишь отдельные образцы устройств этих производителей, исчисляемых, как правило, десятком типов, иногда по нескольку

Таблица 3. Генераторы на диодах Ганна с перестройкой по цепи питания

Компания	Серия, модель	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вых}} \text{ дБм}$	МП, МГц	ЭП ( $E_{\text{пит}}$ ), МГц	$S_{\text{эл}}$ МГц/В	$E_{\text{пит}}$ В	$F_{\text{стаб}}$ МГц/°С	$P_{\text{стаб}}$ дБ/°С	ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц
Ducommun	OGB	18–26,5	+10...+27	—	—	10–50	4–12	–2	–0,02	—
Ducommun	OGB	50–75	+10...+23	—	—	100–1000	3–10	–4,5	–0,03	—
Ducommun	OGB	110–150	+5...+13	—	—	100–400	4–10	–8	–0,04	—
Sage	SOB-77305213-12-S1	76,5	+13	±1000	±250	—	3,5–5,5	—	—	—
Sage	SOB-94305210-10-S1	94	+10	±1000	±250	—	3,5–5,5	—	—	—
Sage	SOB-96305218-10-S1	96	+18	±1000	±250	—	9,5–10,5	—	—	—
Cernex	CBG	8,2–12,4	+10...+27	—	—	5–25	$E_0 \pm 0,5$	–0,5	–0,01	–90
Cernex	CBG	12–18	+10...+27	—	—	10–25	$E_0 \pm 0,5$	–0,8	–0,01	–90
Cernex	CBG	33–50	+10...+23	—	—	25–100	$E_0 \pm 0,5$	–3	–0,02	–85
Cernex	CBG	40–60	+10...+20	—	—	25–100	$E_0 \pm 0,5$	–3,5	–0,02	–82
Cernex	CBG	75–110	+10...+19	—	—	50–750	$E_0 \pm 0,5$	–5	–0,03	–75
Cernex	CBG	90–140	+10...+17	—	—	50–750	$E_0 \pm 0,5$	–6	–0,03	–70

Примечание.  $S_{\text{эл}}$  — крутизна настройки частоты по питанию генераторного диода;  $E_{\text{пит}}$  — напряжение питания.

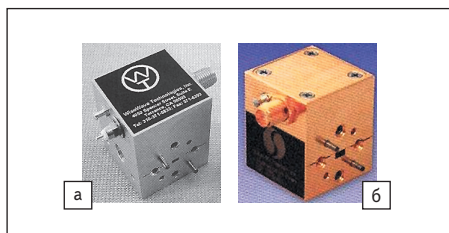


Рис. 5. ГДГ с электрической перестройкой частоты по питанию: а) фирма WiseWave Technologies Inc. [22]; б) фирмы SAGE Millimeter Inc. с механической перестройкой частоты и с подстройкой по питанию



ческой перестройкой частоты. Только необходимо понимать, что поскольку спектральная плотность фазовых шумов помимо прочих причин также зависит от временной стабильности источника питания генераторного диода, то к стабильности перестраиваемого источника питания ГД в данных устройствах могут быть предъявлены более жесткие требования для реализации возможных значений фазовых шумов.

Достоинством электрической перестройки частоты ГД — ее быстроедействие, на порядок более высокое в сравнении с магнитной перестройкой частоты в ГД с ЖИГ-резонаторами. Однако, помимо влияния на шумовые характеристики ГД, управление частотой генератора по цепи питания обычно приводит к заметному изменению уровней выходной мощности и по этой причине для широкой перестройки частоты генерации не используется.

### Автогенераторы непрерывной мощности с электрической перестройкой (настройкой) частоты с применением варикапа

Рациональный вид быстрой электрической перестройки частоты ГД представляют автогенераторы непрерывной мощности с электрической перестройкой (настройкой) частоты с применением варикапа (варакторного диода). В таблице 4 представлены характеристики таких ДГ разных фирм-производителей. Эти генераторы называют ГУН — генераторы, управляемые напряжением.

Внешне эти устройства почти не отличаются от рассмотренных ГД, если не считать дополнительные клеммы или разъем подачи управляющего напряжения на варикап (рис. 6). Важная особенность ГУН — практическое отсутствие потребления по цепи управления частотой, поскольку варикап работает как управляемая емкость (в режиме закрытого *p-n*-перехода).

К цепи питания варикапа предъявляются повышенные требования по стабильности

Таблица 4. Генераторы на диодах Ганна с варакторной перестройкой частоты

Компания	Модель, серия	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вых}}$	МП, МГц	ЭП, МГц	Напряжение на варикапе, В	$F_{\text{стаб}}$ МГц/°С	$P_{\text{стаб}}$ дБ/°С	ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц
Millitech	GDV-28	26,5–40	+20 дБм	—	±500	—	2	-0,02	—
Millitech	GDV-19	50–60	+17 дБм	—	±500	—	3	-0,03	—
Millitech	GDV-10	90–100	+10 дБм	—	±500	—	5	-0,04	—
Quinstar	QTV	18–26,5	+10...+24 дБм	50–300	±150	0–20	-2	-0,03	—
Quinstar	QTV	33–50	+10...+23 дБм	50–500	±150	0–20	-4	-0,04	—
Quinstar	QTV	75–110	+10...+17 дБм	50–500	±150	0–20	-6	-0,04	—
Quinstar	QTE	26,5–40	+10...+25 дБм	300	150	0–30	—	-0,04	—
Quinstar	QTE	33–50	+10...+24 дБм	500	250	0–30	—	-0,04	—
Quinstar	QTE	60–90	+10...+17 дБм	500	250	0–30	—	-0,04	—
Sage	SOV-94202210-90-G1	9,375	+10 дБм	±50	±100	0–20	—	—	—
Sage	SOL-24307-42-GV	24,125	+7 дБм	±50	±150	0–20	-1,5	-0,03	-95
Sage	SOV	60	+13 дБм	—	±250	—	-4	-0,03	-75
Sage	SOV	76,5	+13 дБм	—	±250	—	-4,5	-0,03	-73
Sage	SOV	94	+16 дБм	±250	±250	0–25	-5	-0,03	-70
Sage	SOV	8,2–12,4	+10...+27 дБм	—	100–500	0–20	-0,5	-0,01	-85
Sage	SOV	75–110	+3...+19 дБм	—	100–1000	0–20	-5	-0,03	-70
Ducommun	OGV	18–26,5	+10...+25 дБм	—	50–250	4–12	-2	-0,03	—
Ducommun	OGV	40–60	+10...+22 дБм	—	50–500	3–10	-4	-0,04	—
Ducommun	OGV	75–110	+10...+17 дБм	—	50–500	4–10	-6	-0,04	—
Farran	GV-42	18–26	150 мВт	—	300	—	—	—	—
Farran	GV-12	70–80	60 мВт	—	500	—	—	—	—
Mi-Wave	840Ku	12,4–18	250 мВт	250	100	—	0,3	—	—
Mi-Wave	840W	75–110	50 мВт	500	250	—	3,5	—	—
hxi	HGV	7–12,4	50 мВт	—	60	0–25	-0,5	—	—
hxi	HGV	45–50	20 мВт	—	300	0–25	-1,3	—	—
hxi	HGV	90–95	10 мВт	—	500	0–25	-7	—	—
Microsemi	MO87108-1	10,3	15 мВт	—	40	1–20	0,3	—	—
Microsemi	MO87828-4	23,3	10 мВт	—	40	0–15	0,3	—	—
Microsemi	MO9405-1	34	15 мВт	—	100	1–20	1,25	—	—
Cobham	—	40–45	70 мВт	—	500	—	2	0,04	—
Cobham	—	80–85	30 мВт	—	500	—	6,5	0,05	—
Cernex	CVG	26,5–40	+10...+24 дБм	—	50–250	4–12	-2,5	-0,03	—
Cernex	CVG	75–110	+10...+17 дБм	—	50–250	4–10	-6	-0,04	—
Spacek	GK-xxx-VT	18–26,5	150 мВт	—	100	—	0,4	-0,04	—
Spacek	GU-xxx-VT	40–60	+17 дБм	—	100	—	0,7	-0,04	—
Spacek	GW2-xxx-VT	95–110	+7 дБм	—	2000	—	5	-0,04	—
MDT	MGM	60–65	35 мВт	—	500	0–20	-5	-0,06	—
MDT	MGM	75–80	25 мВт	—	500	0–20	-7	-0,05	—
MDT	MGM	95–100	20 мВт	—	500	0–20	-7	-0,06	—

выходного напряжения в рабочей точке (значению установленного напряжения), так как его временные девиации пропорциональны фазовым шумам (в соответствии с крутизной варакторной перестройки частоты ГД).

Помимо влияния на фазовый шум ГД по цепи питания варикапа, варикап существенно ухудшает спектральную плотность фазовых шумов (сравните эти параметры устройств в табл. 1–3 с табл. 4) тем, что вно-

сит дополнительные потери в колебательную систему ГД. Это объясняется низкой собственной добротностью варикапа (реально не более 500 даже в сантиметровом диапазоне длин волн) и большим коэффициентом связи варикапа с резонатором ГД, пропорциональным диапазону перестройки частоты ГД.

Анализ характеристик ГДГ (табл. 4) показывает, что данные устройства, снабженные электрической перестройкой частоты, как правило, обеспечены и возможностью механического управления ею. Заметим, однако, что рекламные утверждения производителей относительно высокой стабильности и низких АМ- и ФМ-шумов таких устройств нужно принимать с известной осторожностью, например с уточнением «в своем классе устройств». Это подтверждают и данные таблицы 4.

В частности, модели ГДГ на рис. 6д характеризуются производителем как устройства с высокой выходной мощностью и с широким варакторным диапазоном перестройки частоты с механической подстройкой частоты, с высокой стабильностью и низкими АМ- и ФМ-шумами, однако их характеристики соответствуют передовому уровню параметров аналогов.

В последние годы проявляется повышенный интерес к применению диодов на основе

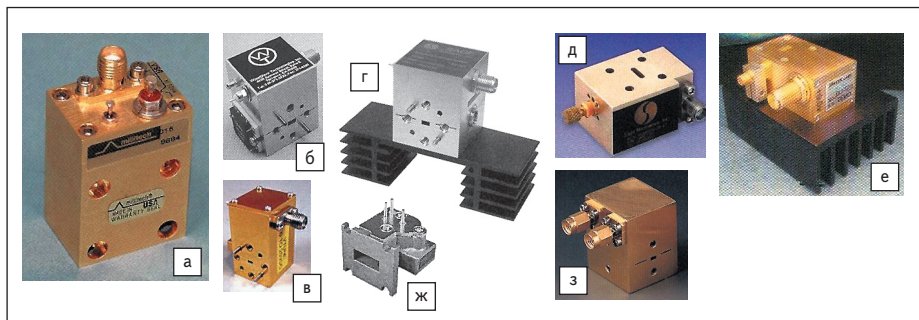


Рис. 6. ГДГ с электрической варакторной перестройкой частоты:

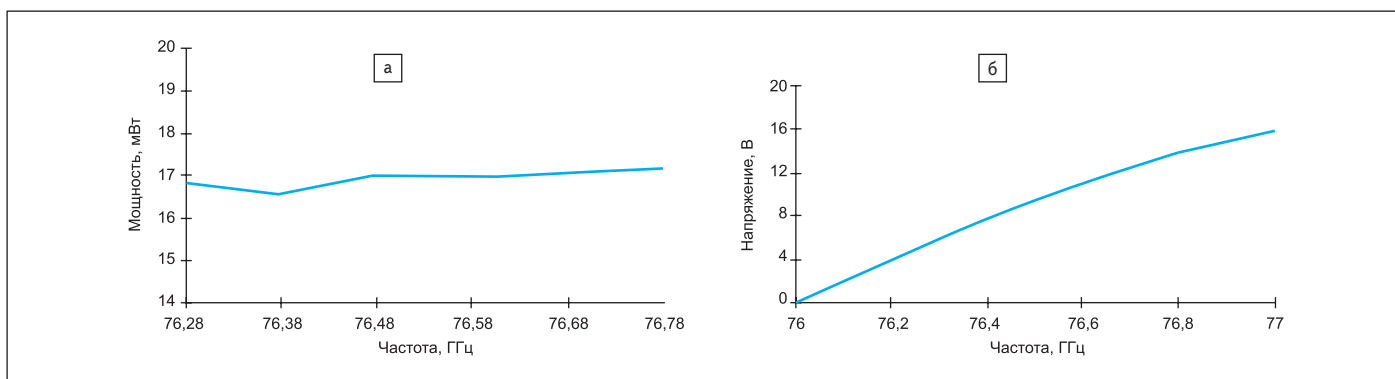
- а) серия GDV, фирма Millimeter Wave Technology&Design (millitech) [18];  
 б) фирма WiseWave Technologies Inc. [22]; в) серия 840, фирма Mi-Wave [14];  
 г) серия SOV, фирма SAGE Millimeter Inc. [11]; д) фирма SAGE Millimeter Inc. [11] на частотах 24, 35, 60, 77 и 94 ГГц;  
 е) модель GU-529P фирмы Spacek labs Inc. [9] на структуре InP в диапазоне частот 50–60 ГГц с выходной мощностью 125 мВт;  
 ж) серии MO фирмы Semiconductor & System Solutions [8]; з) фирма Microwave Development Company, Inc. [23]

**Таблица 5.** Механически перестраиваемые генераторы на диодах Ганна фирмы Spacek labs Inc. [9]

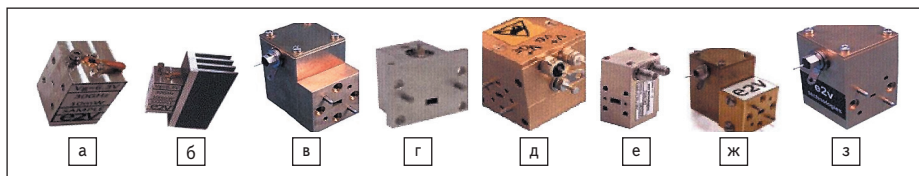
		Частотный диапазон, ГГц					
		18–26	26–40	40–55	55–75	75–95	95–110
Выходная мощность, мВт	GaAs	300	250	150	60	25	10
	InP				100	65	25
Перестройки частоты, % от центральной		10	20	15	2	2	2
Типичная стабильность частоты, МГц/°С	GaAs	0,4	0,5	0,7	4	5	5
	InP				2	3	4
Стабильность выходной мощности, дБ/°С		-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04
Напряжение питания, В	GaAs	6	5	4	4	4	4
	InP				12	10	10
Ток питания (типичный/макс.), А	GaAs	0,8/1,4	0,8/1,4	0,8/1,4	0,8/1,4	0,7/1,3	0,7/1,3
	InP				0,3/0,4	0,2/0,4	0,2/0,4

**Таблица 6.** Электрически перестраиваемые генераторы на диодах Ганна фирмы Spacek labs Inc. [9]

		Частотный диапазон, ГГц					
		18–26	26–40	40–55	55–75	75–95	95–110
Выходная мощность, мВт	GaAs	200	150	75	30	15	10
	InP				50	30	20
Перестройки частоты, % от центральной		2,5	3	4	3	3	3
Типичная стабильность частоты, МГц/°С	GaAs	0,8	1	1,5	5	5	5
	InP				3	4	5
Стабильность выходной мощности, дБ/°С		-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04
Напряжение питания, В	GaAs	6	5	4	4	4	4
	InP				12	10	10
Ток питания (типичный/макс.), А	GaAs	0,8/1,4	0,8/1,4	0,8/1,4	0,8/1,4	0,7/1,3	0,7/1,3
	InP				0,3/0,4	0,2/0,4	0,2/0,4



**Рис. 7.** Характеристики ГДГ с электрической перестройкой частоты фирмы Microwave Development Company, Inc. [23]



**Рис. 8.** ГДГ специального назначения фирмы Teledyne e2v [24]:

- а) на частоте 30 ГГц на объемном резонаторе с подстройкой частоты по цепи питания, перестройкой частоты 1 ГГц, выходной мощностью 10 мВт;
- б) на частоте 30 ГГц на объемном резонаторе с подстройкой частоты по цепи питания, перестройкой частоты на 1 ГГц, выходной мощностью 100 мВт, напряжением питания 6,3 В;
- в) на частоте 62,5 ГГц на второй гармонике с объемным резонатором, с подстройкой частоты по цепи питания;
- г) на частоте 76,5 ГГц на второй гармонике с объемным резонатором, с перестройкой частоты на 1 ГГц, выходной мощностью 50 мВт, напряжением питания 5 В, с КВП;
- д) на частоте 94 ГГц на второй гармонике с объемным резонатором, с подстройкой частоты по цепи питания, перестройкой частоты на 400 МГц, выходной мощностью 50 мВт, напряжением питания 4,5 В, с КВП;
- е) на частоте 125 ГГц на второй гармонике с объемным резонатором, с подстройкой частоты по цепи питания, перестройкой частоты на 500 МГц, выходной мощностью 50 мВт, напряжением питания 4,5 В, с КВП;
- ж) ГУН на диоде Ганна на частоте 35 ГГц для вертолетной РЛС;
- з) на частотах 62,5–125 ГГц для применения в системах безопасности

ны ГДГ фирмы Teledyne e2v, которые являются источниками непрерывной мощности на диодах Ганна. Номенклатура ГД на основе ЛПД-диодов менее обширна, и пик интереса к этим генераторам относится к концу прошлого века.

**Генераторы на ЛПД**

В настоящее время генераторы на ЛПД (ГЛПД) рекламируют в основном отечественные фирмы или фирмы ближнего зарубежья, возникшие в процессе распада СССР. Учитывая низкий уровень спектральных характеристик собственно ГЛПД, свойственный процессам в ЛПД, предлагаемые к реализации устройства, называемые ГЛПД, в действительности, как правило, представляют комбинации различных опций, включающих собственно ГЛПД, работающий в усилительном режиме, и источник автоколебаний на основе ГДГ или транзисторных АГ, которые, в свою очередь, стабилизируются по частоте с помощью объемных резонаторов, в том числе и ДР. Такое техническое решение позволяет одновременно решать задачу термостабилизации генератора, например на основе термокомпенсации смещений резонансной частоты ДР или применения инвара в качестве материала полых объемных резонаторов. В состав таких «ГЛПД» включают вентили, а нередко

фосфата индия (InP), который обеспечивает ряд преимуществ ГД по мощности и КПД, что иллюстрируют таблицы 5 и 6 параметров ГДГ на примере изделий фирмы Spacek labs Inc. [9].

Типичный вид частотной характеристики ГДГ с варакторной перестройкой частоты в миллиметровом диапазоне длин волн иллюстрирует рис. 7.

Современные направления создания ГДГ наглядно демонстрирует номенклатура продукции, рекламируемая Microwave

Technology Centre под эгидой Teledyne e2v [24], которая включает несколько моделей автогенераторов миллиметрового диапазона длин волн, разработанных в University of Nottingham. В рекламных сообщениях приведены неполные данные изделий, тем не менее, учитывая указываемые функциональные назначения генераторов, предназначенных в основном для решения задач оборонной тематики, можно предположить достаточно высокий уровень комплекса характеристик этих ГДГ. Рассмотрим их. На рис. 8 показана

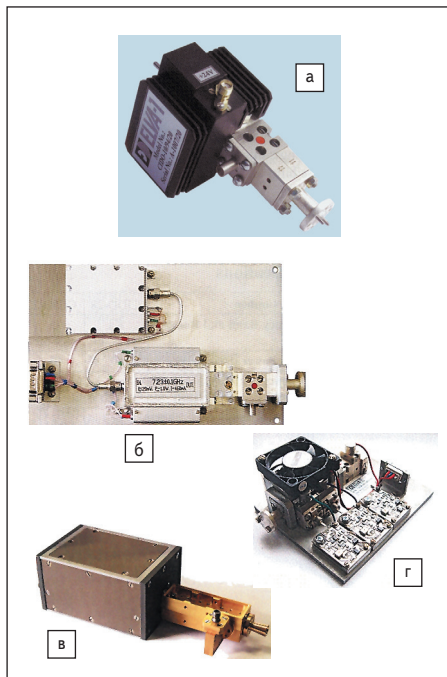


Рис. 9. ГЛПД фирмы ELVA-1 [25]:

- а) малошумящий, стабилизированный объемным резонатором;  
 б) импульсный АГ на частоте 140 ГГц;  
 в) АГ непрерывной мощности на частоте 130 ГГц;  
 г) сверхмалошумящий ГЛПД с высоким уровнем выходной мощности на частотах 26–180 ГГц

и умножители частоты, которые могут быть образованы на ЛПД, и т. д. Внешний вид реализаций ГЛПД с такими опциями фирмы ELVA-1 (Millimeter Wave Division) [25] приведен на рис. 9.

ГЛПД на рис. 9а иллюстрирует модель серии CIDO-XX. Модели этой серии (табл. 7) работают в диапазоне температур  $-50 \dots +80 \text{ }^\circ\text{C}$ , построены на основе умножения частоты задающего АГ на диоде Ганна, стабилизированного инваровым полым коаксиальным резонатором. ЛПД выполняет функции умножителя и усилителя сигнала. ГЛПД этой серии снабжен выходным вентиляем. На рис. 9б показана модель серии FOM ГЛПД фиксированной частоты в диапазоне 26–180 ГГц. Генераторы серии FOM (табл. 8) рекламируются как очень стабильные по частоте ( $\sim 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ) источники сигнала со сверхнизким уровнем ФМ- и АМ-шумов, что достигнуто структурой, образованной каскадным соединением транзисторного автогенератора (ГТр) с выходной мощностью 20–50 мВт стабилизированного ДР на ча-

Таблица 7. Характеристики ГЛПД серии CIDO ELVA-1 [25]

Характеристики	Модель							
	CIDO-28	CIDO-22	CIDO-19	CIDO-15	CIDO-12	CIDO-10	CIDO-8	CIDO-6
Диапазон частот, ЕА	Ka	Q	U	V	E	W	F	D
Диапазон частот, ГГц	26,5–40	33–50	40–60	50–75	60–90	75–110	90–140	110–150
Выходная мощность, мВт	50	40	30	30	30	30	20	10
Стабильность частоты, $1/^\circ\text{C}$	$10^{-5}$	$8 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
Стабильность мощности, дБ/ $^\circ\text{C}$	0,01	0,01	0,015	0,015	0,015	0,02	0,02	0,02
Питание, В/мА	50/150	45/150	45/150	35/150	35/200	27/200	24/250	24/250

Таблица 8. Характеристики ГЛПД серии FOM ELVA-1 [25]

Характеристики	Модель							
	FOM-28	FOM-22	FOM-19	FOM-15	FOM-12	FOM-10	FOM-8	FOM-6
Диапазон частот, ЕА	Ka	Q	U	V	E	W	F	D
Диапазон частот, ГГц	26,5–40	33–50	40–60	50–75	60–90	75–110	90–140	110–180
Выходная мощность, мВт	150	150	120	100	50	30–50	15–30	10–20
Выходной сигнал ГТр, мВт	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50
Коэффициент умножения	5–8	6–10	7–10	8–13	10–15	14–18	18–24	19–25
Питание, В/мА	12/0,6	12/0,6	12/0,6	12/0,6	12/0,6	12/0,6	12/0,6	12/0,6
	-12/0,01	-12/0,01	-12/0,01	-12/0,01	-12/0,01	-12/0,01	-12/0,01	-12/0,01
	50/0,15	45/0,15	45/0,15	35/0,15	35/0,2	27/0,2	24/0,25	24/0,25

стоте 6–8 ГГц, усилителя мощности и ЛПД-умножителя. Применение опции температурной стабилизации моделей этой серии, по утверждению производителя, позволяет улучшить стабильность параметров генераторов, приведенных в таблице 8. Можно заметить, что по питанию устройства, представленные в таблице 7 и 8, различаются только питанием опции ГТр.

На рис. 9в изображен импульсный автогенератор с частотой заполнения 140 ГГц, с выходной мощностью 3,6 Вт, длительностью импульсов 80 нс при частоте повторения 50 Гц. Уровень фазовых шумов ГЛПД равен  $-65 \text{ дБ/Гц}$  при отстройке от центральной частоты 10 кГц. Питание генератора 27 В, присоединительный фланец WR-08. ГЛПД фиксированной частоты 130 ГГц, приведенный на рис. 9г, характеризуется выходной мощностью 130 мВт, относительной стабильностью частоты  $5 \times 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , температурной стабильностью выходной мощности 0,02 дБ/ $^\circ\text{C}$ , фазовыми шумами  $-65 \text{ дБ/Гц}$  при отстройке от центральной частоты 10 кГц. В отличие от предыдущей рассмотренной модели, питание устройства осуществляется от двух источников: +12 и +24 В. Присоединительный фланец WR-06. Аналогичный комплекс параметров характеризует рекламируемый той же фирмой автогенератор на частоту 77 ГГц с присоединительным разъемом WR-12.

В заключение анализа устройств ELVA-1 приведем характерный вид частотной зави-

симости выходной мощности ГУН на ЛПД (рис. 10).

ЛПД-генераторы, подобные генераторам фирмы ELVA-1, предлагает и компания QuinStar technology, Inc. [26]. В частности, ГЛПД с широкополосной микрометрической механической подстройкой частоты, экономичным питанием и соотношением цены и качества электрических характеристик, соответствующих данным таблицы 9, а также ГЛПД с перестройкой частоты по питанию (табл. 10). Внешний вид генераторов иллюстрирует рис. 11.

Отечественный производитель ГЛПД, именуемых в рекламных источниках Sub-THz Oscillators (IMPATT Diodes), — предприятие Terasense Development Labs [27] (г. Черноголовка, МО), входящее в компанию Terasense Group, Inc. (USA), реклами-

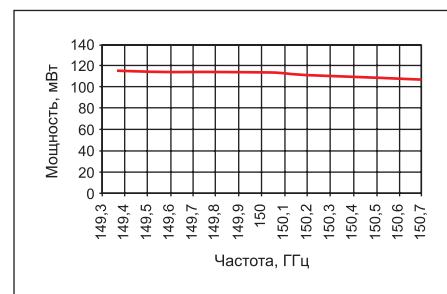


Рис. 10. Типичный вид частотной зависимости выходной мощности ГУН на ЛПД фирмы ELVA-1 [25]

Таблица 9. Генераторы на ЛПД с механической перестройкой частоты фирма QuinStar technology, Inc. [26]

Диапазон частот, ГГц	Ka	Q	V	W
Центральная частота, ГГц	34–36	44–46	55–65	90–100
Выходная мощность, мВт	500	500	150	100
Механическая перестройка частоты, ГГц	1	2	3	3
Питание, В/мА	50/150	45/350	35/350	30/400
Размеры, мм	38,1×35,6×63,5	38,1×35,6×63,5	35,6×21,6×48,3	35,6×21,6×48,3

Таблица 10. Генераторы на ЛПД с перестройкой частоты по питанию фирмы QuinStar technology, Inc. [26]

Диапазон частот, ГГц	Ka	Q	V	W
Центральная частота, ГГц	34–36	43–47	58–62	92–97
Выходная мощность, мВт	1000	1000	500	300
Диапазон перестройки частоты по питанию, МГц	50	75	100	150
Питание, В/мА	50/300	40/325	35/350	30/400
Размеры, мм	38,1×35,6×63,5	38,1×35,6×63,5	35,6×21,6×48,3	35,6×21,6×48,3



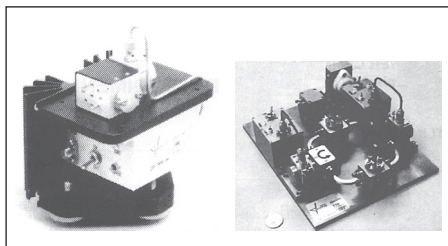


Рис. 11. Вид ГЛПД фирмы QuinStar technology, Inc. [26]

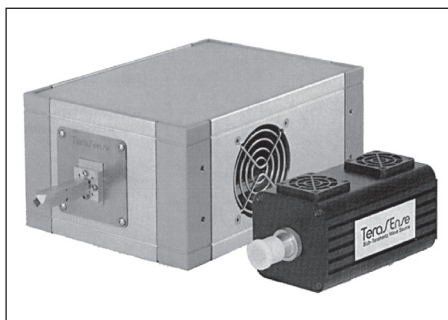


Рис. 12. Вид ГЛПД серии TRz sources, производитель ООО Terasense Development Labs [27]

рует серию источников TRz sources (рис. 12) на частоты 100, 140, 200 и 300 ГГц с выходной мощностью, соответственно уменьшающейся с 400 мВт в нижней части диапазона частот до 50–10 мВт на частоте 290 ГГц. Особо отмечается узкая ширина спектральной линии источников, не превышающая 1 МГц (вероятно, по уровню 3 дБ), компактность, возможность применения опции цифровой (ТГЛ) модуляции с фронтами меньше 1 мкс и относительно низкая цена устройства.

Дальнейшее развитие диодных генераторов в направлении повышения частоты генерации в область терагерц осуществляется на основе применения варизонных диодов Ганна [11]. Если предельная частота InN диодов составляет 0,7–0,8 ТГц, то у варизонных AlInN-диодов она достигает 0,9–1,3 ТГц. Тем не менее в настоящее время на частотах выше 300 ГГц в основном поставляются ГДГ на основе структур  $A_{III}B_{V}$ . В [28] представлены характеристики лабораторного образца автогенератора на InP-диоде Ганна на частоте 480 МГц с линией вывода мощности WR-6 и мощностью 350 мВт. Ряд ГДГ миллиметрового диапазона длин волн с частотами 220–444 ГГц предлагает компания Farran Technology Millimeter Wave Components & Subsystems [13]. Тем не менее сегодня твердотельные генераторы в терагерцевом диапазоне чаще выпускают с применением умножителей частоты более низкочастотных ГДГ. Пример такого источника КВЧ-колебаний на диодах Ганна представлен на рис. 13а, где показан вариант генератора фирмы Virginia Diodes, Inc. [29] с умножением частоты автогенератора на диоде Ганна с выходной мощностью 0 дБм на частоте 18 ГГц и при выходной мощности гене-

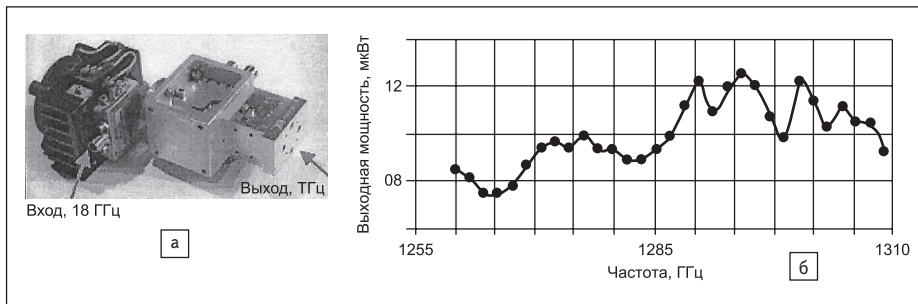


Рис. 13. а) генератор фирмы Virginia Diodes, Inc. [29] с умножением частоты автогенератора на диоде Ганна; б) его выходная мощность в зависимости от частоты

ратора не менее 8 мВт в диапазоне частот 1255–1310 ГГц (рис. 13б).

Подводя итоги анализа диодных автогенераторов, можно заключить, что приведенные характеристики ГД зарубежных компаний демонстрируют примерно одинаковый уровень характеристик предлагаемых устройств различных фирм. Производители генераторов, как правило, профильные фирмы, предлагающие продукцию различного функционального назначения с применением диодов Ганна и ЛПД.

### Отечественные производители ГД

Отечественные компании — изготовители ГД, по существу, представлены фирмами, так или иначе продолжающими советские предприятия.

Российский профильный производитель генераторов на диодах Ганна и ЛПД — НПП «Исток» [2] с 1970 года по настоящее время разработал более 120 типов изделий для бортовой и наземной аппаратуры бытового и военного назначения. Предприятие изготавливает диодные генераторы для частот 8–110 ГГц (внешний вид изделий с электрической перестройкой частоты приведен на рис. 14). При относительной электрической перестройке несущей частоты 10–40% с крутизной 50–900 МГц/В генераторы обладают выходной мощностью от 100 мВт (на низких частотах) до 3 мВт на высших частотах.

Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов (АО НИПП), г. Томск (создан в СССР в 1964 г.) [3], рекламирует линейку квазимонолитных генераторов на диодах Ганна (табл. 11) с температурной нестабильностью не бо-

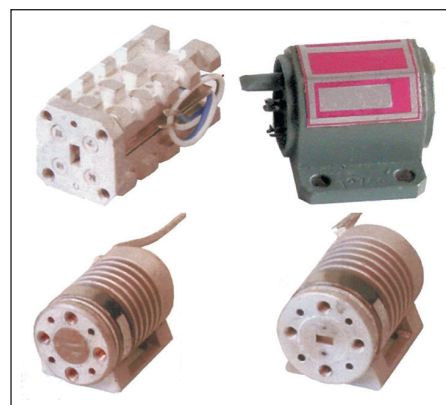


Рис. 14. ГДГ с широким диапазоном электрической перестройки частоты на основе варакторных диодов со сверхрезким переходом производства НПП «Исток»



Рис. 15. Квазимонолитные ГДГ производства АО НИПП, г. Томск

Таблица 11. Квазимонолитные генераторы на диодах Ганна

Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность на фиксированной частоте, мВт	Выходная мощность (с электрической перестройкой, перепад мощности ≤1 дБ), макс, мВт	
		Δf ≤0,7 ГГц	Δf ≤3 ГГц
26–37,5	250	200	30
37,5–53	150	100	40
52–78	150–40–25	100–40–20	
78–119	25–5	20–3	

лее  $2,3 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$  и типовым объемом в виде куба со стороной  $(20 \pm 5)$  см (без учета разъемов для питания). Конструктивно генераторы представляют собой отрезок волновода с размещенной в Е-плоскости монолитной структурой (рис. 15). По уровню приведенных параметров предложение соответствует характеристикам передовых зарубежных производителей.

### Синхронизируемые генераторы

Помимо автогенераторов, на рынке диодных генераторов представлены устройства, которые называют «синхронизируемые генераторы», а в зарубежной терминологии — «устройства с инжекционной син-

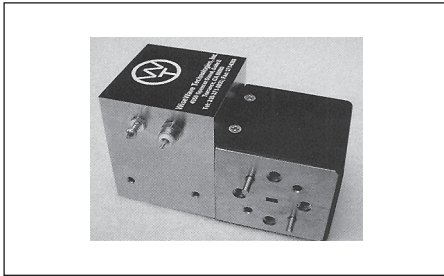


Рис. 16. Синхронизируемый генератор на диоде Ганна серии OGI фирмы Ducommun Technologies [7]

Таблица 12. Синхронизируемые генераторы на диодах Ганна фирмы Ducommun Technologies [7]

Диапазон частот, ГГц	Волновод, стандарт EIA*	Выходная мощность, дБм	Выходная мощность, мВт, дБм	Полоса синхронизации, ГГц	Напряжение питания, В	Ток питания, А
26,5–40	WR28	0–10	24	1,5	4–12	0,3–2,5
33–50	WR22		23	2	4–11	0,3–2
40–60	WR19		22		3–10	0,3–2
50–75	WR15		20		3–10	0,3–1,5
60–90	WR12		19		3–10	0,25–1,5
75–110	WR10	19	19	4–10	0,25–1,5	

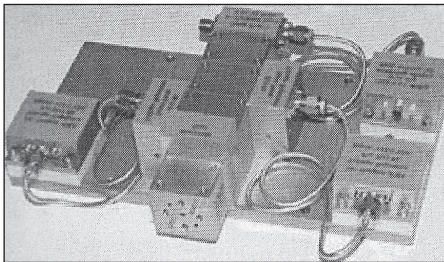


Рис. 17. Синхронизируемый генератор на диоде Ганна фирмы ZAX Millimeter Wave Corporation [20]

хронизацией». По существу, эти генераторы представляют собой каскадное соединение задающего АГ и регенеративного усилителя. На рис. 16 показан ГД фирмы Ducommun Technologies [7] серии OGI, работающий в диапазоне температур 0...+50 °С. Типичные характеристики синхронизированных генераторов иллюстрирует таблица 12.

Аналогичный синхронизированный генератор на диоде Ганна фирмы ZAX Millimeter

Wave Corporation [20] в комбинации с умножителем частоты для диапазона частот 40–150 ГГц при выходной мощности 100 мВт (на частоте 94 ГГц) и полосой синхронизации 1% иллюстрирует рис. 17.

### Устройства с фазовой синхронизацией частоты

Отдельный класс ГД представляют устройства с фазовой синхронизацией частоты с внешними или внутренними опорными генераторами. Актуальность этих источников колебаний определяется достижением в них на один-два порядка лучших уровней фазомодулированных шумов в области синхронизации, что особенно важно в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, где спектральная плотность собственных шумов АГ даже на основе диодов Ганна (не говоря о ЛПД) ухудшается до значений 50–60 дБ/Гц при отстройке на 10 кГц от центральной частоты. Отметим, что устройства фазовой синхронизации ГДГ миллиметрового диапазона обычно включают умножители сигналов синхронизированного ГД.

Внешние генераторы этого типа разных фирм-производителей мало отличаются, что подтверждают фотографии устройств различных серий (рис. 18). Что касается электрических характеристик, то отличие ограничивается особенностями функциональных схем построения, которое, в свою очередь, обусловлено, как правило, специфическими требованиями заказчика разработки (или особенностями условий применения конкретного изделия).

Видимое отличие конструкции, представленной рис. 18д, связано с применением блочного типа построения этого ГД. Такой подход более рационален в случае устройства с фазовой синхронизацией частоты с внешними опорными генераторами.

Электрические характеристики ряда моделей ГДГ с фазовой синхронизацией частоты приведены в таблице 13.

Описания моделей фазостабилизируемых генераторов разных производителей характеризуются практически одинаковыми функциональными схемами, образованными опорными кварцевыми генераторами и фа-

зостабилизирующими кольцами, что определяет практически одинаковые свойства устройств, о которых в рекламных буклетах, как правило, отзываются в превосходной степени. Нередко на выходе синхронизируемых устройств включаются умножители частоты, что позволяет расширить частотный диапазон генераторов до нескольких сотен гигагерц.

Представление о размерах синхронизируемых генераторов можно составить, ориентируясь на свойства модели 957-й серии фирмы Mi-Wave Technology. Размеры 101,6×76,2×39,9 мм и вес устройства 0,7 кг соответствуют характеристикам генератора для диапазона частот 18–26,3 ГГц, а на более высоких частотах эти параметры уменьшаются, причем в первом приближении можно считать обратно пропорционально соотношению частот.

Заметим, что в случае синхронизации частоты с применением внешнего опорного генератора уровень спектральной плотности фазовых шумов определяется стабильностью опорного генератора и является расчетной величиной, например при отстройке от центральной частоты на <100 кГц по формуле:

$$N_{\text{ген}} \approx N_{\text{опген}} + 20 \lg N + 3 \text{ дБ},$$

где  $N_{\text{ген}}$  — спектральная плотность мощности фазовых шумов;  $N_{\text{опген}}$  — спектральная плотность мощности фазовых шумов опорного генератора;  $N$  — отношение выходной и опорной частот.

Отметим, что ограниченный спектр анализируемых моделей генераторов с фазовой синхронизацией частоты объясняется отсутствием детального описания их свойств, которое часто сводится к качественным характеристикам, например, реклама генераторов фирмы Quin Stare Techn., Inc. [5] серии QPL ограничена указанием на «низкий уровень фазовых шумов, возможность применения как внутренних, так и внешних опорных источников, высокую выходную мощность». Тем не менее, учитывая примерно одинаковый уровень параметров известных генераторов (табл. 13), следует ожидать аналогичный уровень характеристик моделей других производителей.

Таблица 13. Генераторы на диодах Ганна с фазовой синхронизацией частоты

Компания	Серия, модель	Диапазон частот / частота, ГГц	$P_{\text{вых}}$	Рабочий диапазон, °С	Стабильность частоты, 1/°С	Спектральная плотность фазовых шумов, дБ/Гц <sup>2</sup>	Гармоники, max, дБн	$P_{\text{стаб}}$ , дБ	$P_{\text{опер. ген}}$ , мВт, дБм <sup>2</sup>	Частота опорного генератора, МГц <sup>4</sup>
Mi-Wave Technology	957	18–140	200–10 мВт	0...+50	до $2 \times 10^{-9}$	нет данных <sup>1</sup>	–30	±1	10	90...120
Ducommun Technology	OPL	5–110	30–10 дБм	0...+50	$\pm 5 \times 10^{-6}$	нет данных <sup>1</sup>	–20	–	±3	100
Cernex, Inc. <sup>2</sup>	CPO	4–14	14 дБм	0...+60	нет данных	–110 <sup>1</sup>	–20	±0,6	0 ±4	10,4–130
Cernex, Inc. <sup>3</sup>	CPO	8,2–140	500–5 мВт	нет данных	–	–	–	–	–	–
Sage Millimeter Inc. <sup>4</sup>	SOP	10–110	29–10 дБм	нет данных	$\pm 5 \times 10^{-6}$	(–70 <sub>94ГГц</sub> ...104 <sub>24,5ГГц</sub> ) <sup>5</sup>	<–20	–	0	100
Sage Millimeter Inc.	SOP-75310117-12-B1	/75	17 дБм	0...+50	$\pm 5 \times 10^{-6}$	–75 <sup>5</sup>	–20	±1	0	100
Sage Millimeter Inc.	SOP-94310117-10-B1	/94	17 дБм	0...+50	$\pm 5 \times 10^{-6}$	–70 <sup>5</sup>	–20	±1	0	100

#### Примечания.

- 1) При отстройке от центральной частоты на 100 кГц.
- 2) Диапазон механической подстройки частоты: 2–3%. 3) 10 поддиапазонов (от К до F).
- 4) 30 моделей, каждая на частотную точку в полосе 1–94 ГГц.
- 5) При отстройке от центральной частоты на 10 кГц (лучшие значения).
- 6) Внешний опорный генератор. 7) Внутренний опорный генератор.



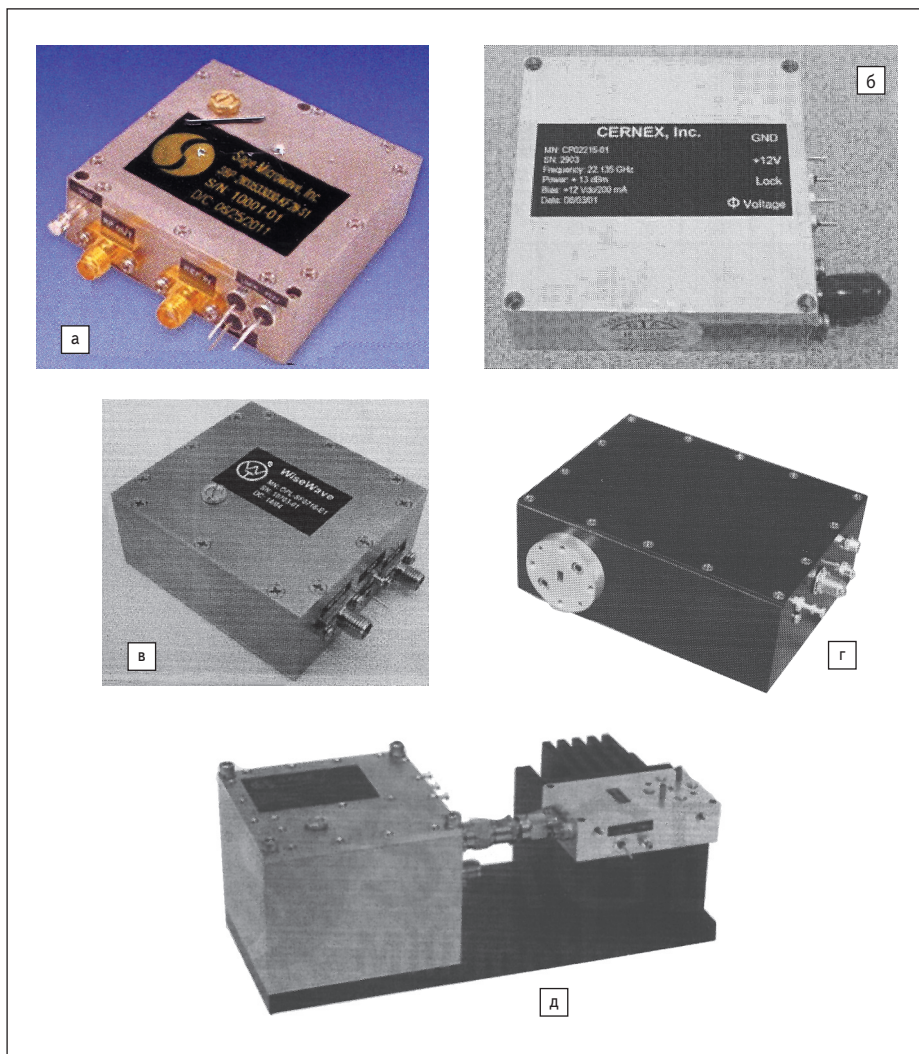


Рис. 18. Генераторы с фазовой синхронизацией частоты:  
 а) SOP-серия, фирма SAGE Millimeter Inc. [11]; б) CPO-серия, фирма CERNEX Inc. [12];  
 в) OPL-серия, фирма WiseWave Technologies Inc. [22]; г) 957-я серия, фирма Mi-Wave Technology;  
 д) модель SOP-75310117-12-B1, фирма SAGE Millimeter Inc. [11]

температурная стабильность определяет стабильность частоты АГ. С учетом этого к стабильности частоты резонатора предъявляются повышенные требования, соответственно, аналогично варианту пассивной термокомпенсации, изменение рабочей частоты АГ (частотной литеры), а значит, и резонансной частоты колебательной системы может потребовать корректировки его конструкции (для ДР — корректировка ТК<sub>ε</sub>). Однако такая коррекция несравненно проще подбора ТК<sub>ε</sub>, в варианте пассивной термокомпенсации, поскольку не требует учета влияния на частоту температурных изменений параметров активного элемента генератора.

Заметим, что в моделях АГ, рекламируемых как устройства с повышенной температурной стабильностью, если таковая действительно реализуется, наверняка применяется термокомпенсация. Причем, скорее всего, используется вариант пассивной термокомпенсации, как более дешевый и оптимальный по соотношению цены и качества.

## Заключение

Проведенный обзор состояния рынка диодных генераторов позволяет определить основное направление усилий научной и технической мысли по развитию активных СВЧ- и КВЧ-устройств на основе диодов Ганна и ЛПД. Надо отметить видимое преимущество зарубежных производителей по широте спектра проводимых работ и предлагаемой продукции. Тем не менее в этом направлении электронной техники отставание отечественной промышленности представляется восполнимым, конечно, при определенных вложениях, которые представляются относительно умеренными. ■

## Литература

- Геворкян В., Кочемасов В. Генераторы на СВЧ- и КВЧ-диодах. Часть 1. Состояние производства. Принципы построения // Компоненты и технологии. 2019. № 6.
- АО «НПП «Исток» им. Шокина». [www.istokmw.ru](http://www.istokmw.ru)
- Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов (АО НИИПП). [www.niipp.ru](http://www.niipp.ru)
- Стороженко И.П., Ярошенко А.Н., Кайдаш М.В., Аркуша Ю. В. Моделирование варизонных ALINN-диодов Ганна. Труды 22-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Крым-МиКо-2012). Севастополь, 10–14 сентября 2012 г.
- QwinStar Technology, Inc (QID). [www.qwinstar.com](http://www.qwinstar.com)
- Геворкян В.М., Кочемасов В.Н. Объемные диэлектрические резонаторы. Основные типы. Характеристики. Производители. Часть 1 // Электронная техника. Наука. Технология. Бизнес. 2016. № 4.

## Автоподстройка генерируемой частоты

Завершая рассмотрение диодных генераторов, коротко остановимся на анализе двух специфических моментов, интересных с точки зрения проектирования автогенераторов, в том числе и диодных. Речь пойдет о приемах автоподстройки генерируемой частоты. Обычно автоподстройка частоты относится к компенсации температурного смещения частоты. Такое действие в той или иной мере применяется во всех высококачественных конструкциях генераторов солидных фирм. Принцип термокомпенсации смещений частоты кратко описан в разделе «Принципы построения генераторов на диодах», и его можно отнести к приему пассивного регулирования. Напомним, что в основе пассивного регулирования лежит прием компенсации влияния на частоту автогенератора температурных уходов параметров конструкции, в том числе и резо-

нансной частоты колебательной системы. Поэтому в качестве резонатора наиболее приемлем ДР, резонансная частота которого просто регулируется выбором ТК<sub>ε</sub>, а диапазон возможных значений температурных коэффициентов относительной диэлектрической проницаемости известных, предназначенных для образования ДР керамических материалов перекрывает диапазон значений примерно  $\pm(5-7) \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ , достаточный для обеспечения термокомпенсации. Однако такой подход удобен в варианте крупносерийного производства генераторов, когда нет необходимости в постоянной коррекции параметров резонатора ввиду изменения его рабочей частоты.

В случае мелкосерийного производства более рационален прием активной автоподстройки частоты АГ, основанный на принципе автоподстройки частоты автоколебаний ГУН относительно опорного резонатора. Здесь резонатор выступает в качестве опоры частотного дискриминатора, а его

7. Ducommun Technologies. [www.ducommun.com](http://www.ducommun.com)
8. Semiconductor & System Solutions. [www.microsemi.com/product-directory/rf-discretes/3305-diodes-gunn](http://www.microsemi.com/product-directory/rf-discretes/3305-diodes-gunn)
9. Space labs Inc. [www.spaceklabs.com](http://www.spaceklabs.com)
10. Quin Stare Technology, Inc. [www.quinstar.com](http://www.quinstar.com)
11. SAGE Millimeter Inc. [www.sagemillimeter.com](http://www.sagemillimeter.com)
12. CERNEX Inc. [www.cernex.com](http://www.cernex.com)
13. Farran Technology Millimeter Wave Components & Subsystems. [www.farran.com](http://www.farran.com)
14. Mi-Wave Technology. [www.miwv.com](http://www.miwv.com)
15. COBHAM Microwave. [www.bbrc.ru/brendy/cobham/](http://www.bbrc.ru/brendy/cobham/)
16. Pasternack. [www.pasternack.vilcom.ru](http://www.pasternack.vilcom.ru)
17. Millimeter Wave Product (HXI). [www.hxi.com](http://www.hxi.com)
18. Millimeter wave technology&design (millitech). [www.millitech.com](http://www.millitech.com)
19. Каралог Microwave Device Technology Corporation. [www.mdtcorp.com](http://www.mdtcorp.com)
20. ZAX Millimeter Wave Corporation. [www.millimeterwave.com](http://www.millimeterwave.com)
21. Фирма Fairview Microwave Inc. [www.fairviewmicrowave.com](http://www.fairviewmicrowave.com)
22. WiseWave Technologies Inc. [www.wisewave-inc.com](http://www.wisewave-inc.com)
23. Microwave Development Company, Inc. [www.myvisajobs.com](http://www.myvisajobs.com)
24. Microwave Technology Centre Teledyne-e2v. [www.teledyne-e2v.com](http://www.teledyne-e2v.com)
25. ELVA-1 (Millimeter Wave Division). [www.elva-1.com](http://www.elva-1.com)
26. QuinStar technology, Inc. [www.everythingrf.com/directory/rf-oscillators](http://www.everythingrf.com/directory/rf-oscillators)
27. Terasense Development Labs. [www.terasense.com](http://www.terasense.com)
28. Eisele H. 480 GHz oscillator with an InP Gunn device // Electronics Letters. 18 March 2010. Vol. 46. No. 6.
29. Virginia Diodes, Inc. [www.virginiadiodes.com](http://www.virginiadiodes.com)