

В. П. ДВОРНИЧЕНКО, к. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН, В. В. МАЛЫШКО, В. А. ОРЕХОВСКИЙ

Украина, г. Киев, Научно-исследовательский институт «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ЧАСТОТ Ка-ДИАПАЗОНА

Приводятся результаты разработки генераторов импульсного действия с электронным переключением частоты. В качестве задающего высокостабильного источника СВЧ-импульсов применен малогабаритный синтезатор частоты 8-миллиметрового диапазона длины волны, формирующий СВЧ-импульсы заданной длительности с уровнем мощности 1,0–1,2 Вт. Синхронизированный усилитель, выполненный на лавинно-пролетном диоде, обеспечивает мощность на выходе генератора до 20 Вт при длительности импульсов СВЧ 100–300 нс в рабочей полосе.

Ключевые слова: генератор миллиметрового диапазона, импульсная СВЧ-мощность, лавинно-пролетные диоды (ЛПД), электронное переключение частот.

Полупроводниковые когерентные генераторы импульсного действия с перестройкой частоты от импульса к импульсу являются основой для создания передающих устройств малогабаритных радиолокационных станций (РЛС) в миллиметровом диапазоне длины волны с высоким разрешением по дальности и хорошей помехоустойчивостью. Обеспечение разрешающей способности по дальности до единиц метров требует расширения интервала рабочих частот до 1,0–1,5 ГГц и быстрой смены частоты в указанном интервале. Необходимость быстрого переключения стабильных рабочих частот возникает и при разработке передающих устройств корабельных РЛС для декорреляции отражений от волн морской поверхности. Важными требованиями, предъявляемыми к передающим устройствам рассматриваемого класса, являются максимальная стабильность СВЧ-параметров выходного сигнала в пределах длительности импульса и в пределах пакета импульсов, а также высокая устойчивость СВЧ-параметров к внешним климатическим и механическим эксплуатационным воздействиям. Эти требования во многом определяют схему построения и режим работы полупроводниковых генераторов импульсного действия в миллиметровом диапазоне длин волн.

Известные генераторы с переключением дискретных частот созданы на полупроводниковых диодах типа стабилитронов, частота автоколебаний которых определяется резонансной частотой стабилизирующего резонатора [1]. Переключение частоты автоколебаний осуществляется соответствующим переключением резонансных частот резонатора либо переключением отдельных автономных резонаторов, включенных в СВЧ-цепь. Однако по числу и скорости переключаемых частот, по уровню достига-

емой стабильности и шумов диодные генераторы с переключением дискретных частот не могут конкурировать с генераторами, основанными на переносе сетки высокостабильных опорных сигналов из области низких частот в область радиочастот (диапазон миллиметровых волн) [2].

В то же время генераторы на лавинно-пролетных диодах (ГЛПД) являются наиболее эффективными полупроводниковыми источниками импульсной мощности в миллиметровом диапазоне длин волн: они могут развивать импульсную мощность более 50 Вт в интервале частот 30–40 ГГц и десятки ватт в интервале 90–100 ГГц при длительности импульса 10–300 нс [3–5].

Применение режима внешней синхронизации полупроводниковых генераторов позволяет решать задачи построения передающих устройств с высоким коэффициентом усиления, низким уровнем частотного шума и уровнем выходной мощности, соответствующим максимальному энергетическому режиму. Уровень частотного шума и стабильность частоты выходного сигнала соответствуют параметрам синхронизирующего сигнала. Это обстоятельство позволяет создавать высокостабильные источники в миллиметровом диапазоне волн. Режим синхронизации во многих случаях предпочтительнее режима пассивного усиления, в котором максимальная выходная мощность достигается при малом усилении, не превышающем обычно 4–5 дБ.

В [6] описан принцип построения передающих устройств, основанных на импульсных ГЛПД, которые функционируют в режиме внешней синхронизации сигналом, формируемым синтезатором частоты, обеспечивающим высокую частотную стабильность и низкий уровень спектральной плотности мощности фазового шума.

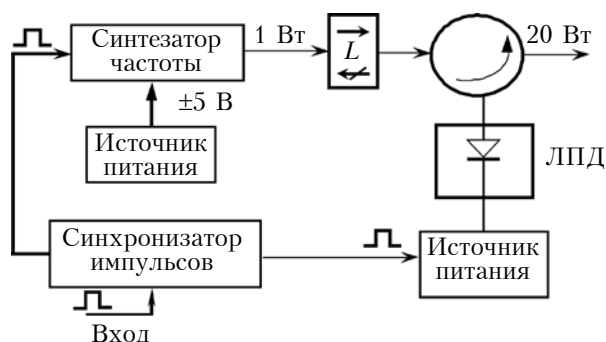


Рис. 1. Блок-схема ГЛПД импульсного действия

В настоящей работе приводятся результаты исследований, направленных на разработку малогабаритного генератора импульсного действия с дискретным переключением частот от импульса к импульсу. Генератор состоит из синтезатора частоты и синхронизированного усилителя на лавинно-пролетном диоде (ЛПД) (рис. 1).

Технические решения при выборе конструкции генератора

Опорный генератор синтезатора синхронизирован кварцевым генератором с помощью цифровой системы ФАПЧ и содержит умножитель частоты и усилитель, работающие в импульсном режиме. Синтезатор обеспечивает выходную мощность на уровне 1,2 Вт в импульсе со стабильностью частоты не хуже $2 \cdot 10^{-6}$. Управление частотой излучения выполняется трехразрядным двоичным кодом в уровнях TTL.

ГЛПД выполнен на базе волноводно-коаксиального Т-образного сочленения (рис. 2). Коаксиальная линия с волновым сопротивлением W_K смещена относительно волновода прямоугольного сечения $7,2 \times 3,4$ мм на величину Δ . В коаксиальной линии установлен лавинно-пролетный диод, смонтированный в рубиновую втулку на медном штифте, и антипаразитная нагрузка. Такая конструкция ГЛПД позволяет в процессе настройки независимо перемещать диод и антипаразитную нагрузку вдоль коаксиальной линии относительно волноводного канала. На одном волноводном выходе конструкции установлен скользящий поршень, другой выход соединен через ферритовый вентиль с нагрузкой и высокостабильным источником синхронизирующего сигнала (синтезатором).

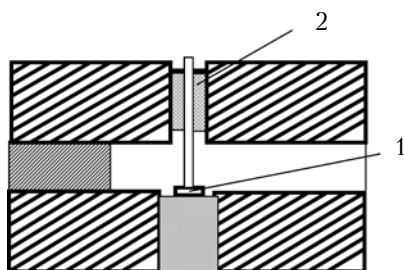


Рис. 2. Конструкция ГЛПД: 1 — ЛПД; 2 — антипаразитная нагрузка

Конструкция ЛПД показана на рис. 3: диодная $p^+-p-n-n^+$ -структура 1, смонтированная внутри рубиновой втулки 2 на позолоченном медном штифте 3, соединена верхним электродом с крышкой 4 при помощи золотой плющины 5.

Упрощенная эквивалентная схема ГЛПД представлена на рис. 4.

Анализ импедансных амплитудно-частотных характеристик применяемых ЛПД с оптимальным профилем легирования $p^+-p-n-p^+$ -структур

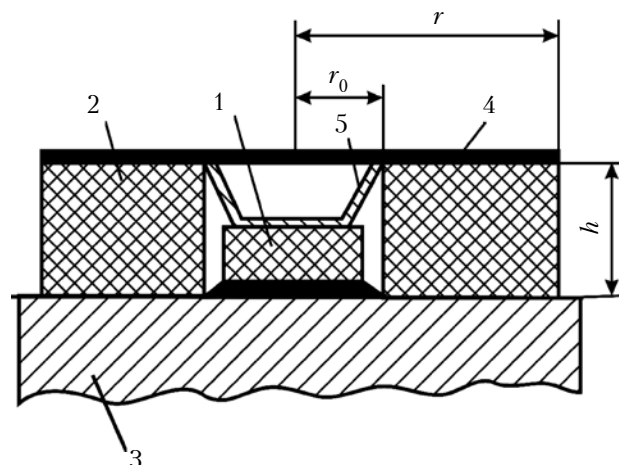


Рис. 3. Конструкция ЛПД:

1 — диодная структура; 2 — рубиновая втулка; 3 — медный штифт; 4 — крышка; 5 — золотая плющина

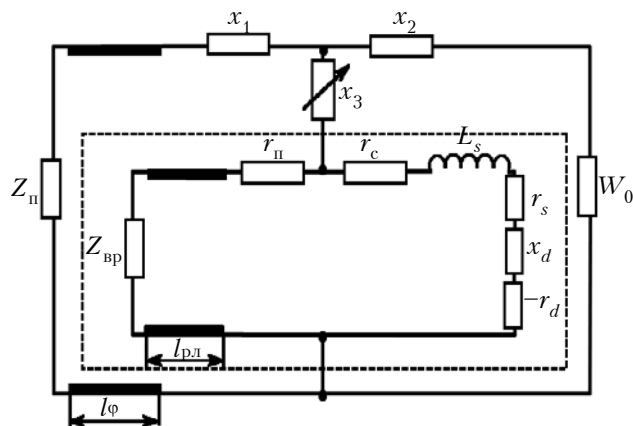


Рис. 4. Упрощенная эквивалентная схема ГЛПД:

x_1, x_2 — реактивные сопротивления включения центрального стержня; x_3 — реактивное сопротивление коаксиального шлейфа, содержащего антипаразитную нагрузку; $Z_п$ — импеданс короткозамыкающего поршня; $Z_вп$ — импеданс волноводной нагрузки радиальной линии; r_n — сопротивление потерь в диэлектрическом корпусе; r_c — сопротивление потерь в контактах монтажа элементов корпуса; r_s — сопротивление растекания; $-r_d$ — отрицательное сопротивление ЛПД; x_d — реактивное сопротивление диодной структуры; L_s — индуктивность контактных полосок (плющины); W_0 — волновое сопротивление линии передачи; $l_{пл}$ — толщина стенки втулки, определяющей эквивалентную длину радиальной линии; $l_ф$ — длина короткозамкнутого отрезка волноводной линии

[7] показывает, что при амплитудах сигнала, соответствующих максимальной электронной мощности, и оптимальном диаметре $p-n$ -перехода модуль отрицательного сопротивления полупроводниковой структуры не превышает 2–3 Ом. В связи с этим при непосредственном включении ЛПД в высокочастотную цепь с нагрузкой, равной волновому сопротивлению линии передачи W_0 , коэффициент трансформации активной составляющей импеданса нагрузки должен составлять $K = W_0 / |Z_{gd}| > 20$. Очевидно, что полные потери в трансформаторе импедансов должны быть минимальными.

Обеспечение высоких значений коэффициента трансформации импеданса диода при включении его в цепь СВЧ является основной особенностью создания высокочастотных систем генераторно-усилительных устройств на ЛПД с минимальными энергетическими потерями в миллиметровом диапазоне. При этом наиболее целесообразным является создание трансформатора в непосредственной близости к полупроводниковой структуре. При выполнении такого трансформатора с минимальными собственными потерями и коэффициентом трансформации импедансов K в высокочастотную цепь, импеданс устройства будет включать в себя трансформированное отрицательное сопротивление диода, модуль которого значительно превышает сопротивление потерь в волноводно-коаксиальных цепях.

При создании генераторов и усилителей с использованием ЛПД в миллиметровом диапазоне в качестве трансформатора импеданса целесообразно использовать металло-диэлектрические корпуса с распределенными параметрами. В этом случае металло-диэлектрический корпус можно рассматривать как радиальную линию с распределенными параметрами, обеспечивающую трансформацию входного импеданса линии передачи к клеммам включения диодной структуры для реализации условий параллельного резонанса в схеме устройства.

Величина и характер импеданса радиальной линии, приводимой к клеммам диодной структуры, определяется выражением [8]

$$Z_{\text{пл}}(r) = jx_{\text{пл}} = -j \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon}} \frac{H}{2\pi r} \text{Ct}(x, y),$$

где $\text{Ct}(x, y)$ — большой радиальный котангенс;

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon} r; \quad y = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon} r_0;$$

λ — длина волны;

ϵ — диэлектрическая проницаемость рубиновой втулки;

r, r_0, H — внешний и внутренний радиусы втулки и ее высота соответственно.

На рис. 5, где приведены расчетные частотные зависимости трансформированной входной проводимости радиальной линии $B_{\text{пл}}(r)$ в сече-

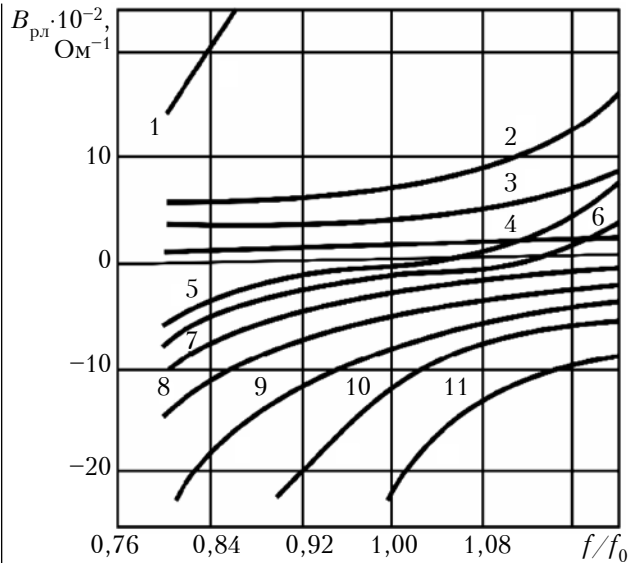


Рис. 5. Частотная зависимость реактивной проводимости радиальной линии, приведенная к клеммам включения диодной структуры, при различных значениях отношения внешнего диаметра втулки к размеру широкой стенки волновода D/a :
1 — 0,31; 2 — 0,27; 3 — 0,23; 4 — 0,19; 5 — 0,58; 6 — 0,54; 7 — 0,5; 8 — 0,46; 9 — 0,42; 10 — 0,38; 11 — 0,39

нии $r_0 = d/2$, видно, что изменением размеров радиальной линии (диаметра втулки) достигается требуемая величина и характер реактивности для реализации на клеммах полупроводниковой структуры параллельного резонанса при определенных значениях L_s . При заданных размерах радиальной линии частота параллельного резонанса подбирается значением L_s .

На практике величина L_s может задаваться путем выбора ширины контактной плюшины, соединяющей диодную структуру с корпусом.

ЛПД выполнен на кремниевой полупроводниковой структуре p^+-p-n^+ -типа с диаметром $p-n$ -перехода чипа 160–180 мкм и с профилем легирования, оптимальным для достижения максимальных значений энергетических параметров: $N_p = 3,15 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $L_p = 0,8 \text{ мкм}$; $N_n = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $L_n = 1,0 \text{ мкм}$ (N_p, N_n — концентрация носителей в p - и n -областях, L_p, L_n — длина этих областей).

Важной особенностью разработанной конструкции синхронизированного усилителя на ЛПД является возможность регулировки коэффициента трансформации проводимости нагрузки при изменении смещения оси коаксиальной линии относительно центра волновода. Это позволяет обеспечить требуемое согласование импеданса диода и нагрузки без применения дополнительных реактивных неоднородностей в выходном сечении волноводной секции ГЛПД.

Таким образом, основным частотно-избирательным узлом СВЧ-цепи ГЛПД является корпусированный диод с резонансной трансформацией импеданса к полупроводниковой структу-

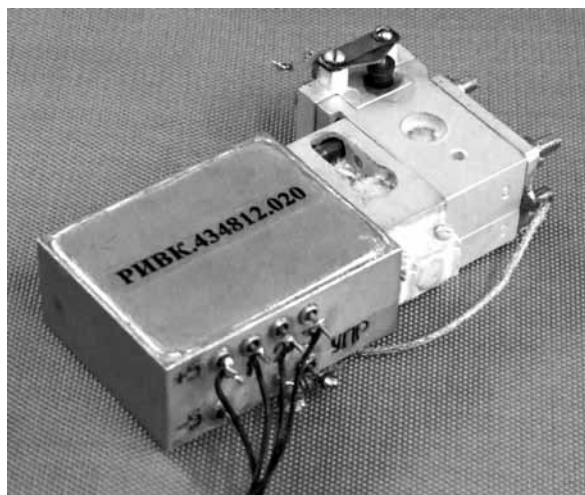


Рис. 6. Генератор импульсного действия 8-мм диапазона длин волн

ре. Запасенная энергия в такой СВЧ-системе сосредоточена в основном в области корпусированного диода, и обобщенная добротность системы оказывается минимальной.

Изменение положения отражающей антипаразитной нагрузки влияет на параметры усилителя. Так, при ее положении на расстоянии примерно $\lambda/2$ относительно диода последовательно с импедансом диода подключается импеданс последовательного контура. Известно, что в таких системах обеспечивается компенсация реактивных сопротивлений, улучшающая диапазонные характеристики усилителя. Расчет СВЧ-характеристик синхронизированного ГЛПД показывает, что в конструкции генератора достижимая рабочая полоса $\Delta f/f$ составляет 10–15% при коэффициенте усиления больше 14 дБ.

Основные параметры генератора приведены в **таблице**, а его фото — на **рис. 6**.

Основные параметры генератора импульсного действия 8-мм диапазона длин волн

Диапазон рабочих частот	Ka
Полоса рабочих частот	1,0 ГГц
Выходная импульсная мощность	15–20 Вт
Длительность импульса	300 нс
Частота повторения импульсов	6 кГц
Длительность фронтов СВЧ-импульсов	не более 20 нс
Количество переключаемых частот	6
Ширина спектра выходного СВЧ-сигнала по уровню 0,5	не более 8 МГц
Время установления рабочей частоты	не более 0,1 с
Потребляемая мощность	не более 6,0 Вт
Интервал рабочих температур	–40...+60°C
Габаритные размеры	60×30×15 мм
Масса	110 г

Заключение

Разработан генератор импульсного действия 8-мм диапазона длин волн, согласование высокочастотных нагрузок и структуры ЛПД в котором достигается путем установки диода в параллельный резонансный контур. Его параметры определяются геометрическими размерами диэлектрической втулки и контактных полосок монтажа. При этом дополнительные неоднородности в волноводном канале исключаются. Запасенная энергия сосредоточена в основном в области корпусированного диода. Для расширения рабочей полосы усилителя последовательно с параллельным резонансным контуром диода целесообразно включить последовательный резонансный контур, который существенно уменьшает реактивную проводимость диода и увеличивает полосу синхронизации в частотном диапазоне.

Разработанный генератор может найти применение в качестве задающего источника для синхронизации полупроводниковых и электровакуумных мощных приборов импульсного действия.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Касаткин Л.В., Швачка А.В. Полупроводниковые генераторы электромагнитных колебаний с переключением дискретных стабильных частот // Техника и приборы СВЧ. — 2008. — № 1. — С. 30–35.
2. Карушкин Н.Ф., Дворниченко В.П., Малышко В.В. и др. Полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частоты миллиметрового диапазона // Матер. 22-й Междунар. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Украина, г. Севастополь. — 2012. — С. 103–105.
3. Касаткин Л.В., Рукин В.П. Мощные импульсные полупроводниковые источники миллиметрового диапазона волн в режиме внешней синхронизации // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2005. — Т. 48. — № 6. — С. 3–19.
4. Тарасюк В.М., Басанец В.В., Болтовец Н.С. и др. Кремниевые лавинно-пролетные диоды 8-мм диапазона для мощных импульсных однодиодных СВЧ-генераторов // Техника и приборы СВЧ. — 2011. — № 1. — С. 21–23.
5. Карушкин Н.Ф. Использование кольцевых структур ЛПД для увеличения средней импульсной СВЧ-мощности генераторов миллиметрового диапазона // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. — 2010. — Вып. 4 (507). — С. 46–54.
6. Карушкин Н.Ф., Касаткин Л.В., Хитровский В.А. Опыт разработки твердотельных когерентных передающих устройств высокого уровня мощности в Ka-диапазоне // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2003. — № 2. — С. 3–8.
7. Карушкин Н.Ф., Касаткин Л.В. Стабилизация СВЧ-параметров импульсных ГЛПД // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. — 2000. — Вып. 1 (475). — С. 22–27.
8. Справочник по волноводам / Перевод с англ. под редакцией Я.Н.Фельда. — Москва: Сов. радио, 1952.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 28.04 2015 г.*

В. П. ДВОРНІЧЕНКО, М. Ф. КАРУШКІН, В. В. МАЛИШКО, В. О. ОРЕХОВСЬКИЙ

Україна, м. Київ, Науково-дослідний інститут «Оріон»

E-mail: ndiorion@tsua.net

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ З ЕЛЕКТРОННИМ ПЕРЕМИКАННЯМ ЧАСТОТ КА-ДІАПАЗОНУ

Наводяться результати розробки генераторів імпульсної дії з електронним перемиканням частоти. Малогабаритний синтезатор частоти 8-міліметрового діапазону довжин хвиль застосовується як задавальне високостабільне джерело НВЧ-імпульсів, яке формує імпульси заданої тривалості з рівнем потужності 1,0–1,2 Вт. Синхронізований підсилювач, який виконано на лавинно-пролітному діоді, забезпечує потужність на виході генератора до 20 Вт при тривалості імпульсів НВЧ 100–300 нс в робочій смузі частот.

Ключові слова: генератор міліметрового діапазону, імпульсна НВЧ-потужність, лавинно-пролітні діоди (ЛПД), електронне перемикання частот.

DOI: 10.15222/TKEA2015.4.03

UDC 621.373.5.52:621.373.29

V. P. DVORNICHENKO, N. F. KARUSHKIN,

V. V. MALYSHKO, V. A. OREKHOVSKII

Ukraine, Kyiv, State Enterprise «Research Institute «Orion»

E-mail: ndiorion@tsua.net

SOLID STATE KA-BAND PULSE OSCILLATOR WITH FREQUENCY ELECTRONIC SWITCHING

Semiconductor high-stable pulse oscillators with frequency tuning from pulse to pulse are the basis for designing transmitting devices for small radars in the millimeter wavelength range with high resolution on range and noise immunity. The work presents the results of research and development of compact pulse oscillators with digital frequency switching from pulse to pulse. The oscillator consists of a frequency synthesizer and a synchronized amplifier on the IMPATT diode. Reference oscillator of synthesizer is synchronized by crystal oscillator with digital PLL system and contains a frequency multiplier and an amplifier operating in pulse mode. Small-sized frequency synthesizer of 8 mm wave lengths provides an output power of ~1.2 W per pulse with a frequency stability of no worse than $2 \cdot 10^{-6}$. Radiation frequency is controlled by three-digit binary code in TTL levels. Synchronized amplifier made on IMPATT diodes provides microwave power up to 20 W in oscillator output with microwave pulse duration of 100–300 ns in an operating band. The oscillator can be used as a driving source for the synchronization of semiconductor and electro-vacuum devices of pulsed mode, and also as a transmitting device for small-sized radar of millimeter wave range.

Keywords: millimeter wave oscillator, pulse microwave power, IMPATT diodes, frequency electronic switching.

REFERENCES

1. Kasatkin L.V., Shvachka A.V. [Solid state oscillator of electromagnetic waves with switching of discrete stable frequencies]. *Tekhnika i pribory SVCh*, 2008, no 1, pp. 30-35. (Rus)

2. Karushkin N.F., Dvornichenko V.P., Malyshko V.V., Orekhovskiy V.A., Tsvir A.V. [Solid state pulse millimeter wave oscillator with frequency electronic switching]. Proc. of 22nd International Crimean conference "Microwave and Telecommunication Technology", 2012, Ukraine, Sevastopol, pp. 103-105. (Rus)

3. Kasatkin L.V., Rukin V.P. [Solid state power pulse sources of millimeter wavelength in the external sync mode]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radioelektronika*, 2005, vol. 48, no 6, pp. 3-19. (Rus)

4. Tarasuk V.M., Basanets V.V., Boltovets N.S., Zorenko A.V., Kolesnik N.B. [Silicon avalanche transit diodes of 8-mm

band wavelength for pulse power single diode microwave oscillators.] *Tekhnika i pribory SVCh*, 2011, no 1, p. 21-23. (Rus)

5. Karushkin N.F. [Applying the IMPATT diodes ring structures to increase average pulse microwave power of millimeter wave oscillators]. *Elektronnaya Tekhnika. Series 1. SVCh Tekhnika*, iss. 4(507), 2010, pp. 46-54. (Rus)

6. Karushkin N.F., Kasatkin L.V., Khitrovskiy V.A. [Experience in the development of solid-state coherent transmitters with high power in Ka band.] *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radioelektronika*, 2003, no 2, pp. 3-8. (Rus)

7. Karushkin N.F., Kasatkin L.V. [Stabilization of microwave parameters of pulse IMPATT oscillators.] *Elektronnaya Tekhnika. Series 1. SVCh Tekhnika*, iss. 1(475), 2000, pp. 22-27. (Rus)

8. *Handbook of waveguides*, Translated from English, edited by Y.N. Feld, Moscow, Sov. Radio, 1952.