

УДК 621.315.592

Источники субмиллиметрового излучения на кремниевых лавинно-пролетных диодах

¹ Карушкин Н. Ф., ² Обухов И. А.

¹ Научно-исследовательский институт «Орион»

г. Киев, ул. Э. Потье, 8А, 03680, Украина

nkarushkin001@gmail.com

² Научно-производственное предприятие «Радиотехника»

г. Москва, 115419, 5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, Российская Федерация

iao001@mail.ru

Получено: 1 ноября 2021 г.

Отрецензировано: 10 ноября 2021 г.

Принято к публикации: 10 ноября 2021 г.

Аннотация: Представлены результаты работ по созданию источников электромагнитного излучения в субмиллиметровом диапазоне длин волн с использованием кремниевых лавинно-пролетных диодов. Показано, что минимальные конструктивные потери и максимальная выходная мощность приборов достигаются при использовании колебательной системы на открытой радиальной линии. Приводятся схемы конструкций источников СВЧ излучения, эквивалентные схемы и их основные параметры в интервале температур от 77 К до 300 К.

Ключевые слова: генератор, субмиллиметровый диапазон, терагерцовый диапазон, кремний, лавинно-пролетный диод, радиальная линия.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Карушкин Н. Ф., Обухов И. А. Источники субмиллиметрового излучения на кремниевых лавинно-пролетных диодах // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 2. С. 95—106.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Карушкин, Н. Ф. Источники субмиллиметрового излучения на кремниевых лавинно-пролетных диодах / Н. Ф. Карушкин, И. А. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 2. — С. 95—106.

Sources of submillimeter waves based on silicon IMPATT diodes

N. F. Karushkin¹ and I. A. Obukhov²

¹Scientific Research Institute “Orion”
E. Potier, 8 A, Kiev, 03680, Ukraine
nkarushkin001@gmail.com

²Scientific-Industrial Company “Radiotechnika”
5 Donskoi proezd, 15, build. 11, Moscow, 115419, Russian Federation
iao001@mail.ru

Received: November 1, 2021

Peer-reviewed: November 10, 2021

Accepted: November 10, 2021

Abstract: Results of works in the field of submillimeter waves sources creation based on silicon IMPATT diodes are presented. It is shown that minimum contour losses and maximum output power of devices are achieved by using of oscillating system based on an open radial line. Designs of radiation sources, equivalent electrical circuits and their base parameters in the temperature range from 77 K to 300 K are given.

Keywords: generator, submillimeter diapason, terahertz diapason, silicon, IMPATT diode, radial line

For citation (IEEE): N. F. Karushkin et al. “Sources of submillimeter waves based on silicon IMPATT diodes,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 95–106, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Твердотельные генераторы электромагнитного излучения преобразуют энергию источника питания в энергию высокочастотных колебаний путем нелинейного взаимодействия колебательной системы с активными полупроводниковыми элементами, такими как транзистор, диод Ганна, лавинно-пролетный диод (ЛПД), резонансно-туннельный диод [1].

Колебательная система СВЧ-генератора рассчитывается таким образом, чтобы получить минимальные контурные потери и максимальную выходную мощность от активного элемента [1, 2, 3]. Уменьшение потерь в колебательной системе особенно важно при использовании ЛПД, у которого абсолютная величина отрицательного импеданса мала (1—3 Ом). В коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн решение этой задачи дополнительно осложнено малыми размерами резонатора.

Для уменьшения потерь колебательную систему ЛПД целесообразно реализовывать на открытой радиальной линии. При этом довольно высокий импеданс линии передачи трансформируется в сравнительно низкий импеданс нагрузки радиальной линии. Это основная причина, по которой колебательную систему с радиальным резонатором открытого типа выгодно применять в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Очевидно, что полные потери в трансформаторах импедансов должны быть минимальными.

Обеспечение высоких коэффициентов трансформации импедансов диодов при включении их в СВЧ-цепь, особенно в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн, является основной особенностью создания колебательных систем источников излучения на ЛПД с максимальными энергетическими характеристиками.

2. Конструкция и эквивалентная схема источника излучения

В известных конструкциях источников излучения миллиметрового диапазона широко применяется включение диода с использованием волноводно-коаксиального сечения (рис. 1а). Схема генератора на ЛПД содержит волноводный канал (1), резонатор радиального типа (2), ЛПД (3), радиальный фильтр (4), поглощающую нагрузку (5), штырь питания (6) и короткозамыкающий поршень (7).

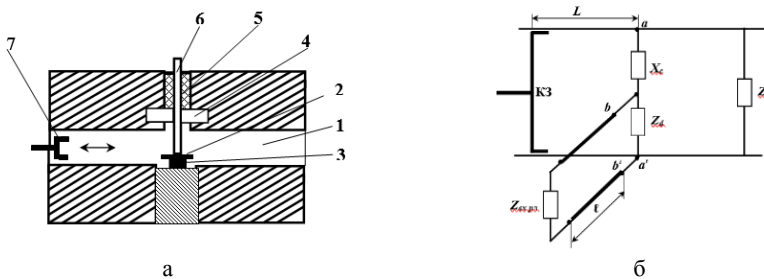


Рис. 1. Схема конструкции генератора на ЛПД с радиальным резонатором (а) и его эквивалентная схема (б).

Fig. 1. Design of IMPATT diode based generator with radial resonator (a) and its equivalent electrical circuit (b)

В связи с тем, что ЛПД обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением в широкой полосе частот, в цепи смещения устанавливается фильтр, запирающий колебания с частотами вблизи рабочей частоты f_0 и прозрачный для всех других частот (особенно лежащих ниже f_0). За фильтром устанавливается резисторная нагрузка.

На рис. 1б представлена эквивалентная схема генератора с радиальным резонатором. Нижняя часть резонатора работает как низкоимпедансная радиальная передающая линия. В эквивалентной схеме она представлена обычной передающей линией с включенной последовательно индуктивностью X_c . В центре пространства под крышкой резонатора установлена активная структура ЛПД с импедансом Z_d . Импеданс волновода Z_b относительно плоскости $a - a'$ изменяется при перемещении короткозамкнутого поршня на расстояние L . $Z_{вх,рл}$ — входное сопротивление разомкнутой на конце радиальной линии. Представленная эквивалентная схема не учитывает особенностей распределения электрического поля в месте включения диода, но с достаточной для практики точностью позволяет выполнять инженерные расчеты источников СВЧ мощности на ЛПД.

Радикальным решением задачи построения генераторов на ЛПД с высокими энергетическими характеристиками является создание конструкций корпусных диодов, сохраняющих принцип резонансной трансформации импеданса диодов. Для этого необходимо построить высококачественные цепи, обеспечивающие согласование импедансов нагрузки и диода в широком диапазоне рабочих частот. При разработке корпуса диода необходимо учитывать полную эквивалентную схему замещения металло-керамического корпуса, в котором керамическая втулка представлена отрезком радиальной линии.

Такое включение диода приводит к эквивалентному увеличению резонансного сопротивления его колебательного контура. Согласование импедансов высококачественной цепи и диода достигается выбором импеданса радиальной линии $Z_{вх,рл}$, включая импеданс диодной структуры Z_d , и импеданса волновода Z_b , приведенного к клеммам $a - a'$, при которых обеспечивается выполнение условий стационарного режима работы генератора.

В миллиметровом диапазоне, и особенно в его коротковолновой части, целесообразно вместо метало-керамических втулок применять малогабаритные часовые камни рубина [4], имеющие размеры, приведенные в табл. 1, низкий $tg(\delta)$ и диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = 9$. Металлизация торцевых поверхностей рубиновых втулок позволяет производить их монтаж методом термокомпрессии.

Известные конструкции диодных источников с использованием волноводно-коаксиального сечения содержат элементы цепи смещения питания (рис. 1а). Эти элементы вносят реактивные сопротивления и усложняют согласование импеданса диода с линией передачи. На рис. 2а представлена конструкция диода, обеспечивающая упрощение согласования импедансов.

Диод (1) содержит полупроводниковую структуру и рубиновую втулку на металлическом основании (2) (теплоотводе). Электрический контакт с крышкой корпуса диода выполнен с помощью ввода питания, состоящего из тонкого металлического штыря (3), который изолирован от основания (2) и расположен от крышки на расстоянии равном $\lambda/8$.

Крышка и основание корпуса образуют радиальный резонатор. Металлический проводник представляет индуктивную нагрузку, и его сопротивление существенно больше волнового сопротивления радиального резонатора.

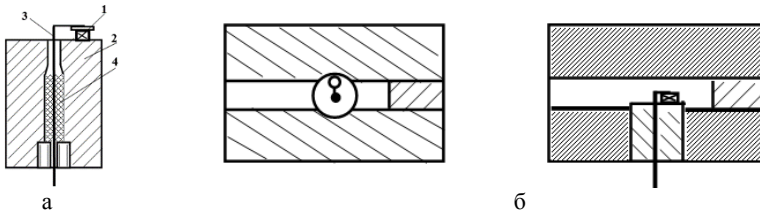


Рис. 2. Конструкция для согласования импеданса ЛПД с линией передачи (а) и волноводная конструкция включения ЛПД в генератор (б).

Fig. 2. Design for IMPATT diode impedance matching with waveguide (a) and of its insert to generator (b)

С целью исключения колебаний в цепи питания диода включен распределенный поглотитель (4). Наличие ввода питания в основании диода позволяет расположить элементы корпуса асимметрично относительно оси его основания, что дает возможность легко согласовывать импеданс диода с импедансом линии передачи в достаточно широком диапазоне частот путем вращения основания с корпусом вокруг своей оси.

Примером использования такого корпуса служит генератор на ЛПД. Металлическое основание с диодом вставляется в отверстие волноводной конструкции перпендикулярно широкой стенке волновода, как показано на рис. 2б. Настройка генератора на заданную частоту производится путем перемещения металлического основания с диодом вдоль его оси, а согласование импеданса диода с нагрузкой — с помощью поворота основания вокруг той же оси.

В области частот 120—180 ГГц (сечение волновода $0,8 \times 1,6$ мм) диаметр основания, содержащего ЛПД, составляет 3 мм. Энергетические и частотные характеристики генератора с использованием предлагаемой конструкции корпуса ЛПД не хуже характеристик генераторов, использующих волноводно-коаксиальный переход ($P_{\text{вых}} \approx 20\text{—}40$ мВт). Такая конструкция корпуса удобнее сопрягается со стабилизирующим резонатором отражательного типа.

Создание источников излучения на корпусированных ЛПД в диапазоне 60—160 ГГц может быть обеспечено применением диэлектрических втулок корпусов на основе промышленных часовых камней рубина с размерами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1.

Table 1

Диапазон, ГГц	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм
50—70	0,8	0,5	0,3
70—100	0,5	0,3	0,2—0,15
100—160	0,4	0,2	0,15

Геометрия контактной плющены (сетки) варьируется в зависимости от рабочего диапазона. В области частот 160—400 ГГц для сохранения принципа резонансной трансформации импеданса диода необходимо применение специальных решений, обеспечивающих достижение резонансных частот в этом диапазоне. В частности, можно использовать корпуса с увеличенным диаметром рубиновой втулки, благодаря чему включается параллельное индуктивное сопротивление, увеличивающее собственную частоту корпуса.

3. Электрофизические параметры лавинно-пролетных структур

С целью увеличения уровня выходной СВЧ-мощности источников излучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн целесообразно применение двухпролетных структур. На рис. 3а и б представлены типичные распределения примесей и электрического поля в таком диоде.

Проведенные исследования показали, что для достижения максимальной выходной СВЧ мощности и КПД значения параметров активных слоев диодной структуры должны быть близкими к значениям, приведенным в табл. 2, где f_p — рабочая частота, N_a, N_d — уровни легирования p и n слоев, l_p, l_n — ширины пролетных p и n слоев. Для зависимости от частоты ширины активных слоев, при которых достигается максимальная выходная мощность и КПД, справедлива формула: l_p, l_n (мкм) $\approx 30 \cdot f_p^{-1}$ (ГГц).

В работах [3, 5] показано, что в коротковолновой части миллиметрового диапазона из-за тепловых ограничений диоды могут работать только в том интервале адмиттансной характеристики, который соответствует большим значениям реактивной и малым значениям активной проводимости, что затрудняет согласование таких диодов с электродинамическими конструкциями генераторов, умножителей и усилителей.

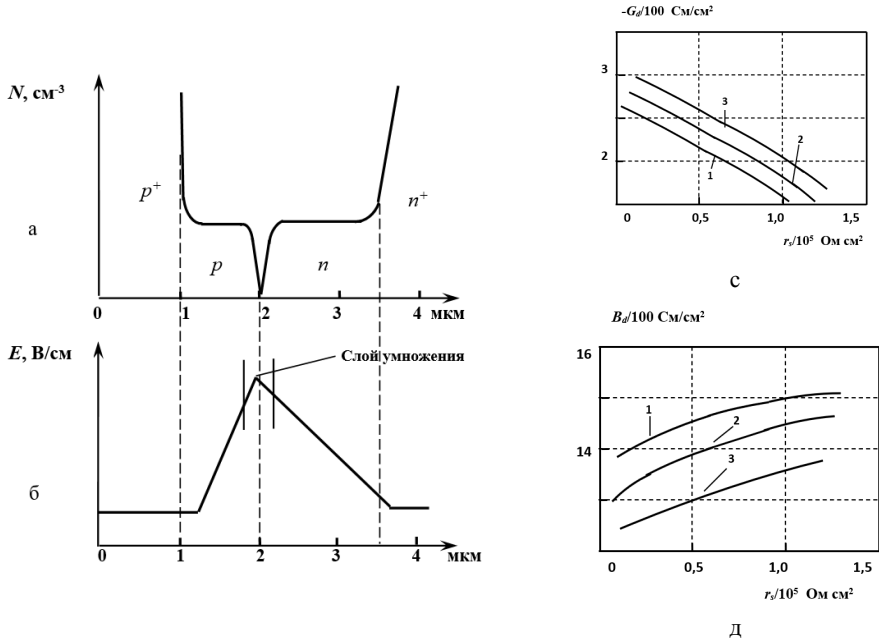


Рис. 3. Распределение примесей (а) и электрического поля (б) в двухпролетном ЛПД и зависимости его активной (с) и реактивной (д) проводимостей от сопротивления r_s на частоте 200 ГГц.

Fig. 3. Impurity (a) and electric field (b) distribution in two-span IMPATT diode and its active (c) and reactive (d) conductivities as a function of resistance r_s at frequency 200 GHz

Быстрый спад выходной мощности с возрастанием частоты связан с уменьшением импеданса диода из-за уменьшения ширины пролетного пространства и, соответственно, с увеличением удельной емкости структуры. Существенное влияние на характеристики диода оказывает величина сопротивления подложки r_s .

Таблица 2.

Table 2

№	f_p , ГГц	N_a , cm^{-3}	N_d , cm^{-3}	l_p , мкм	l_n , мкм
1	60	$6,0 \cdot 10^{16}$	$6,0 \cdot 10^{16}$	0,5	0,5
2	100	$1,3 \cdot 10^{17}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	0,3	0,3
3	150	$2,0 \cdot 10^{17}$	$2,0 \cdot 10^{17}$	0,25	0,25
4	200	$4,0 \cdot 10^{17}$	$4,0 \cdot 10^{17}$	0,15	0,15
5	300	$6,0 \cdot 10^{17}$	$6,0 \cdot 10^{17}$	0,12	0,12
6	400	$8,0 \cdot 10^{17}$	$8,0 \cdot 10^{17}$	0,08-0,1	0,08-0,1

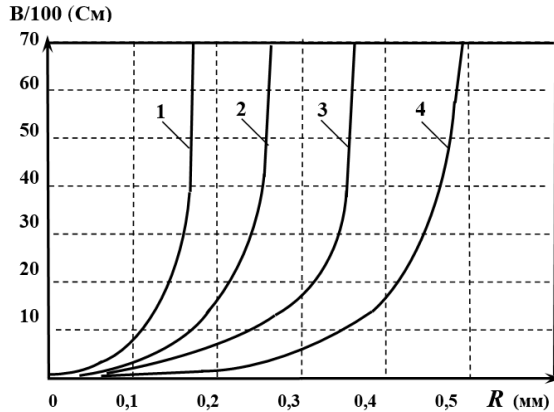


Рис. 4. Зависимости входной реактивной проводимости радиальной линии, подводимой к диоду, от радиуса R при высоте линии $h = 0,15$ мм и различных значениях длины волны: 1 — $\lambda = 0,5$ мм; 2 — $\lambda = 1$ мм; 3 — $\lambda = 1,5$ мм; 4 — $\lambda = 2$ мм.

Fig. 4. Dependence of input reactive conductivity of radial line bringing to diode from radius R when height $h = 0,15$ mm and different wavelengths: 1 — $\lambda = 0,5$ mm; 2 — $\lambda = 1$ mm; 3 — $\lambda = 1,5$ mm; 4 — $\lambda = 2$ mm

На рис. 3с и д представлены зависимости активной G_d и реактивной B_d проводимостей от величины сопротивления r_s для двухпролетной структуры ЛПД на частоте около 200 ГГц при различных значениях плотности тока питания I_0 : 1 — $I_0 = 100$ кА/см², 2 — $I_0 = 120$ кА/см², 3 — $I_0 = 130$ кА/см². Видно, что при значениях r_s , больших, чем 1×10^{-5} Ом \times см², отрицательная проводимость диода исчезает.

В коротковолновой части миллиметрового диапазона ($\lambda = 1\text{--}0,5$ мм) создание колебательных систем с использованием диэлектрических втулок затруднено из-за малых габаритов и наличия элементов монтажа полупроводниковой структуры. В этом случае целесообразно вместо втулок применять кварцевые опоры. Величина и характер реактивного сопротивления, приводимого к диодной структуре, определяется диаметром диска, установленного на кварцевой опоре либо непосредственно на ме-заструктуре.

В работе [4] показано, что для достижения СВЧ излучения в субмиллиметровом диапазоне ($\lambda \approx 1$ мм) на лавинно-пролетных $p^+p\text{--}n\text{--}n^+$ структурах необходимо обеспечить узкий слой умножения и малую величину сопротивления r_s . Формирование таких структур возможно методами молекулярно-лучевой эпитаксии или ионного легирования. Но при применении второго метода возможны радиационные дефекты, негативно влияющие на работу диода.

3. Повышение эффективности работы источников излучения путем охлаждения

Создание полупроводниковых устройств, генерирующих электромагнитные колебания, всегда связано с необходимостью решения задачи об эффективном отводе тепла от активного элемента, поскольку температурный режим определяет его долговечность и энергетические характеристики. Максимальная мощность P , которую способен рассеивать ЛПД определяется выражением:

$$P = (T_{max} - T_0)/R_T,$$

где: T_{max} — максимальная температура p - n перехода; T_0 — температура окружающей среды (теплоотвода); R_T — тепловое сопротивление диода.

Увеличения входной мощности постоянного тока P можно добиться тремя путями: увеличением T_{max} , уменьшением R_T , и охлаждением генератора, т. е. снижением T_0 . Увеличение температуры перехода T_{max} может быть реализовано в широкозонных полупроводниках, таких как фосфид галлия или нитрид галлия. Обычно увеличения входной мощности добиваются за счет уменьшения R_T , которое достигается технологическими методами и применением алмазных теплоотводов, но возможности этого подхода в настоящее время практически исчерпаны. Принудительное охлаждение генераторов до низких температур, позволяет достичь цели не только за счет увеличения разности $T_{max} - T_0$, но и за счет температурной зависимости теплопроводности применяемых материалов. Теплопроводность K_T таких материалов, как кремний, медь и алмаз, при понижении температуры от 300 К до 77 К увеличивается соответственно от 130, 450 и 2000 Вт/мк до 1500, 600 и 11000 Вт/мк.

Однако суммарное уменьшение R_T не будет пропорционально вышеприведенному возрастанию K_T , так как разогрев диода приводит к уменьшению теплопроводности прилегающих к p - n переходу областей, в которых происходит основное выделение тепла.

Особый интерес представляет изучение возможности повышения мощности излучения и КПД генераторов терагерцового диапазона частот, эффективность работы которых в настоящее время очень низка. В данной работе представлены результаты исследований охлаждаемых генераторов в интервале температур 77—300 К. Конструкция генератора, выполненная на основе волноводно-коаксиального сочленения с волноводным каниалом сечением 0,8×1,6 мм, представлена на рис. 1.

Двухпролетные кремниевые структуры p^+p - n - n^+ типа с пробивным напряжением $U_{пр} = 12$ —12,8 В монтировались в металлизированные ру-

биновые втулки с внешним диаметром $d = 0,4$ мм. Предпробойная емкость диода в корпусе составила $C_{\text{пр}} = 0,3—0,35$ пФ; дифференциальное сопротивление на прямой ветви ВАХ $R_{\text{дф}} = 0,6$ Ом; тепловое сопротивление $p-n$ -переход — корпус $R_T \approx 60$ град/Вт при $T = 300$ К. Генератор помещался в сосуд Дьюара с жидким азотом без вакуумизации.

Понижение рабочей температуры окружающей среды привело к изменению вольтамперной характеристики и уменьшению напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$ диода (см. рис. 5а). Ход зависимости $U_{\text{пр}}$ от температуры определяется характером взаимодействия носителей тока с кристаллической решеткой структуры диода. С понижением температуры растет скорость насыщения носителей заряда V_s , что приводит к увеличению их средней кинетической энергии.

Охлаждение генератора позволило увеличить КПД от 0,5 % до 3,5 % при одновременном увеличении тока в два раза (см. рис. 5б). В эксперименте наблюдаются близкие к линейным зависимости уровней выходной мощности СВЧ и КПД от тока питания. Максимальная мощность, которая была достигнута при температуре 77 К, составила 280 мВт при КПД 3,5 %, что на порядок превышает уровни, достигаемые при комнатной температуре.

Охлаждение генератора, выполненного на запредельном волноводе сечением $0,5 \times 0,75$ мм (генерация на второй гармонике с частотой 312 ГГц), до температуры 77 К и увеличение тока питания диода в два раза позволили получить уровень выходной мощности 1,5—2,0 мВт. При комнатной температуре ее уровень не превышал 50 мкВт. Увеличение выходной мощности СВЧ на второй гармонике может быть также достигнуто за счет введения в конструкцию генератора колебательного контура [3], обеспечивающего эффективную положительную обратную связь на второй гармонике.

Изучение влияния охлаждения диодов на частоту СВЧ колебаний позволило выявить некоторые закономерности. При понижении температуры от 300 К до 77 К наблюдается монотонный рост частоты генерации примерно на 10 %. Основной вклад в этот процесс вносят увеличение скорости насыщения носителей заряда V_s и изменение реактивной проводимости диода. Под влиянием этих факторов в режиме заданного тока зона генерации СВЧ мощности сдвигается в область более высоких частот. Охлаждение теплоотвода жидким азотом позволяет увеличить ток питания диода, при этом область генерируемых частот несколько расширяется, а уровень СВЧ мощности в полосе частот возрастает в 5—10 раз.

Отметим, что разработанные ГЛПД сохраняют высокую степень надежности. Генераторы работают с многочисленными циклами охлажде-

ние — нагревание, при этом явлений, связанных с деградацией корпусированных диодов, обнаружено не было. Это свойство в сочетании с температурной стабильностью частоты диода при низких температурах расширяет границы применения ГЛПД в терагерцовом диапазоне частот.

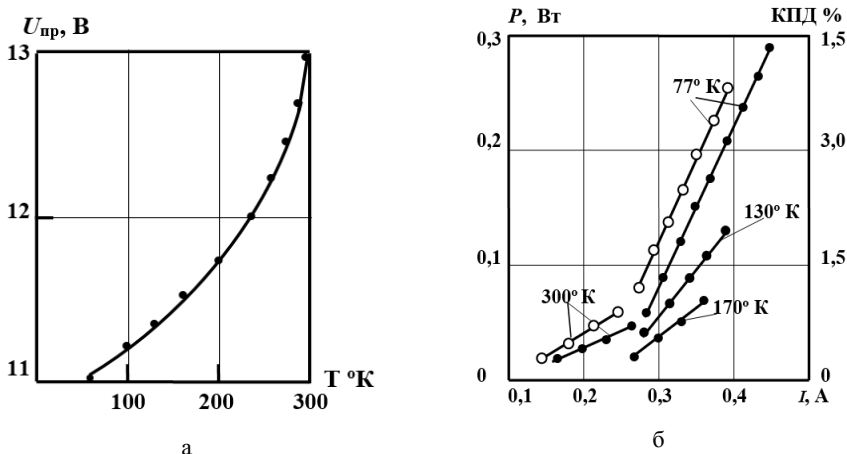


Рис. 5. Зависимости напряжения пробоя $U_{пр}$ от температуры (а), выходной СВЧ мощности P (б, —•—•—) и КПД (б, —○—○—) от тока при различных температурах.

Fig. 5. Dependence of breakdown voltage from temperature (a), input microwave power P (b, —•—•—) and efficiency (b, —○—○—) from current under different temperatures

4. Заключение

Методы создания корпусированных ЛПД на основе резонансной трансформации импеданса полупроводниковой структуры при использовании монтажных элементов корпуса решают задачу согласования импеданса диода и нагрузки в широком частотном диапазоне при минимальных энергетических потерях. Охлаждение генераторов позволяет повысить токи питания. При этом уровень выходной СВЧ мощности возрастает на порядок, а область генерации смещается в область более высоких частот примерно на 10 %.

В области частот 300—400 ГГц также необходимо применять трансформацию импеданса ЛПД. Однако конструктивное исполнение ГЛПД требует использования специальных решений, обеспечивающих достижение резонансных частот в этом диапазоне. Создание лавинно-пролетных структур с оптимальными параметрами целесообразно методами молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющей получать максимально резкие профили легирования.

Список литературы

- 1 Касаткин Л. В., Чайка В. Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. Севастополь : Вебер, 2006. 319 с.
- 2 Othman M. A., Arshad N. S. M., Hussain M. N. [et. al.] Si IMPATT Diode Optimization for Performance Analysis : an Overview // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 9, No. 7. P. 1140—1148.
- 3 Балабанов В. М., Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А. Источники СВЧ-мощности на лавинно-пролетных диодах в коротковолновой части миллиметрового диапазона. В сб. : 27-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2017 (Севастополь, 10—16 сент. 2017 г.). 2017. С. 109—117.
- 4 Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А. Пат. 2657324(РФ). Применение промышленного часового камня в качестве корпуса полупроводникового устройства миллиметрового диапазона длин волн. Оpubл. в Б. И. 2018. № 17.
- 5 Белоусов Н. П., Гудзь И. А., Новожилов В. В., Чайка В. Е. Исследование характеристик кремниевых ЛПД в коротковолновой части миллиметрового диапазона // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1979. Вып. 2. С. 55—63.

Информация об авторах

Карушкин Николай Федорович, начальник отдела Научно-исследовательского института «Орион», г. Киев, Украина.

Обухов Илья Андреевич, технический директор Научно-производственного предприятия «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Nikolai F. Karushkin, head of department, scientific research institute “Orion”, Kiev, Ukraine.

Ilya A. Obukhov, technical director, scientific-industrial company “Radiotechnika”, Moscow, Russian Federation.