

К. А. Лукин, П. П. Максимов

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12 ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: lukin.konstantin@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОГЕНЕРАТОРОВ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ РЕЗКИХ P-N-ПЕРЕХОДОВ

Численно исследуются энергетические характеристики автогенераторов миллиметровых и субмиллиметровых волн на основе резких Ge, Si и GaAs p-n-переходов с постоянным обратным смещением. Показано, что возбуждение автогенераторов обусловлено взаимозависимостью электрического поля и лавинного тока, которая наблюдается при лавинном токе, сравнимом по величине с предельным током p-n-перехода. Рассчитаны мощность, частота и электронный КПД. Показано, что мощность и электронный КПД автогенераторов существенно выше, чем у мощных импульсных лавинно-пролетных диодов. Ил. 5. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: полупроводниковые автогенераторы миллиметровых и субмиллиметровых волн, ударная ионизация, резкий p-n-переход, частота, мощность, электронный КПД.

Одной из актуальных проблем электроники СВЧ является повышение частоты, мощности и электронного КПД твердотельных генераторов. Наиболее перспективными в этом плане являются генераторы на основе лавинно-пролетных диодов (ЛПД), использующие явление ударной ионизации. Однако ЛПД имеют малую мощность и низкий электронный КПД. Основная причина этого заключается в том, что они работают в режиме ограничения величины лавинного тока [1–4]. Это существенно влияет на характеристики ЛПД, так как при малых токах амплитуда постоянного напряжения на диоде намного больше амплитуды переменного напряжения, приложенного к диоду для обеспечения режима лавинного умножения. В работах [5, 6] показано, что в отсутствие ограничения на величину лавинного тока резкие p-n-переходы с постоянным обратным смещением могут работать в режиме автоколебаний. Однако энергетические характеристики этих переходов не исследованы.

Целью работы является исследование с помощью диффузионно-дрейфовой теории, основанной на уравнениях диффузионно-дрейфовой модели (ДДМ), энергетических характеристик автогенераторов миллиметровых и субмиллиметровых волн на основе резких Ge, Si и GaAs p-n-переходов с постоянным обратным смещением и определение возможности повышения частоты, мощности и электронного КПД.

1. Постановка задачи. На рис. 1 представлена схема резкого обратносмещенного p-n-перехода с постоянным напряжением U/U_{av} (U_{av} – напряжение лавинного пробоя резкого p-n-перехода без учета заряда подвижных носителей [7]). Точка $x_2 = 0$ принята за начало координат и является границей раздела однородно легированных p- и n-областей p-n-перехода, x_1 – граница p-области, x_3 – граница n-области, $w_p(t)$ и $w_n(t)$ – координаты

обедненной области p-n-перехода, зависящие от времени в режиме автоколебаний.

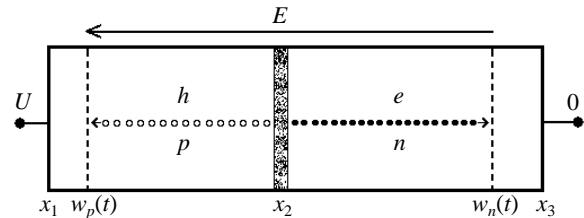


Рис. 1. Одномерная модель обратносмещенного p-n-перехода с подвижными границами обедненной области ($U < 0$)

В качестве математической модели обратносмещенных резких p-n-переходов использованы уравнения ДДМ, исходные уравнения которых имеют следующий вид [1, 2]:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} (p - n + N); \quad \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial x} = -E(x, t);$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + \alpha_n J_n + \alpha_p J_p - R(n, p);$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + \alpha_n J_n + \alpha_p J_p - R(n, p);$$

$$\left. \begin{aligned} J_n &= qn\mu_n E + qD_n \frac{\partial n}{\partial x}, \quad J_{cm} = \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \\ J_p &= qp\mu_p E - qD_p \frac{\partial p}{\partial x}; \end{aligned} \right\}$$

$$J(t) = J_n(x, t) + J_p(x, t) + J_{cm}(x, t),$$

где E – напряженность электрического поля; ϕ – электрический потенциал; J – плотность полного лавинного тока; J_n – плотность электронной составляющей лавинного тока; J_p – плотность

дырочной составляющей лавинного тока; $J_{см}$ – плотность тока смещения; n – концентрация электронов в зоне проводимости; p – концентрация дырок в валентной зоне; q – абсолютное значение заряда электрона; $\varepsilon\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; $R(n, p)$ – скорость рекомбинации электронов и дырок соответственно; $N(x) = \begin{cases} -N_a, & x_1 \leq x < x_2; \\ N_d, & x_2 < x \leq x_3 \end{cases}$ – распределение

примесных атомов в p - n -переходе; N_a, N_d – концентрация акцепторов и доноров;

$$\alpha_{n,p}(E) = A_{n,p} \exp\left[-\left(\frac{b_{n,p}}{E}\right)^{m_{n,p}}\right] - \text{коэффициенты}$$

ударной ионизации для электронов и дырок соответственно [8]; D_n, D_p – коэффициенты диффузии для электронов и дырок, которые связаны с подвижностями μ_n, μ_p соотношениями Эйнштейна $\mu_n = D_n / \varphi_0$; $\mu_p = D_p / \varphi_0$; $\varphi_0 = kT / q$; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана.

Уравнения ДДМ дополняются граничными условиями

$$\left. \begin{aligned} E(w_p, t) = 0, E(w_n, t) = 0, \\ \varphi(w_p, t) = U_0(t), \varphi(w_n, t) = 0, \\ J_p(w_p, t) = J(t) - J_{ns}(w_p, t), \\ J_n(w_n, t) = J(t) - J_{ps}(w_n, t), \end{aligned} \right\}$$

начальным условием

$$J(w_n, t = 0) = J_{ns} + J_{ps}$$

и условиями непрерывности электрического поля и потенциала на границе раздела p - и n -областей

$$\left. \begin{aligned} E(x, t)|_{x=x_2-0} = E(x, t)|_{x=x_2+0}, \\ \varphi(x, t)|_{x=x_2-0} = \varphi(x, t)|_{x=x_2+0}, \end{aligned} \right\}$$

где J_{ns}, J_{ps} – плотность электронной и дырочной составляющих тока тепловой генерации соответственно; $U_0(t) = -\int_{w_p}^{w_n} E(x, t) dx$ – динамическое напряжение на p - n -переходе.

Уравнения ДДМ при численном решении преобразовывались в безразмерные уравнения следующим образом: $E' = E / E_0$; $\varphi' = \varphi / \varphi_0$; $n' = n / n_i$; $p' = p / n_i$; $N' = N / n_i$; $x' = x / L_0$; $t' = t / t_0$; $J'_p = J_p / J_0$; $J'_n = J_n / J_0$; $J'_{см} = J_{см} / J_0$;

$D'_p = D_p / D_0$; $D'_n = D_n / D_0$. Основные нормировочные коэффициенты равны: $E_0 = \varphi_0 / L_0$, В/м; $D_0 = 1$, м²/с; $\varphi_0 = kT / q$, В; $L_0 = \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0 \varphi_0 / q n_i}$, м; $J_0 = q n_i D_0 / L_0$, А/м²; $t_0 = L_0^2 / D_0$, с.

В ДДМ пренебрегают рекомбинационными процессами, так как время жизни носителей заряда значительно превышает время пролета ими обедненной области, и не учитывают диффузионный ток, так как он существенно меньше дрейфового тока [1]. Для численного решения дифференциальные уравнения ДДМ преобразовывались в разностные. Погрешность аппроксимации дифференциальных операторов разностными не превышает $O(\tau + h)$ [9]. Алгоритм решения разностных уравнений приведен в работе [10]. Шаги на временной сетке τ и на пространственной сетке h удовлетворяют условию Куранта $\tau \leq h / v$ (v – скорость носителей тока), т. е. за один шаг по времени частица не должна «пробежать» более одной ячейки [9].

2. Возбуждение автоколебаний. Рассмотрим дискретизированный сигнал j_n изучаемых автоколебаний лавинного тока j , состоящий из N последовательных отсчетов $j(n\tau)$, где $n = 0, \dots, N - 1$; $\tau = 0,0118$ пс – временной интервал квантования, через который получены точки дискретизации. Длительность сигнала $T_s = \tau N$.

Процесс развития и установления автоколебаний в генераторах на основе резких GaAs p - n -переходов иллюстрируется на рис. 2 ($U/U_{ав} = 1,78$; $N_a = 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³; $N_d = 6 \cdot 10^{17}$ см⁻³). В этом процессе можно выделить 4 характерных этапа. На этапе 1 напряжение на обедненной области перехода $U(t)$ постоянно, плотности лавинного тока $J(t)$ и мгновенной мощности $P(t) = J(t)U(t)$ равны нулю. Длительность этого этапа определяется временем развития ударной ионизации и временем дрейфа электронов через пролетный участок p - n -перехода.

На этапе 2 в результате ударной ионизации экспоненциально растет лавинный ток. Его заряд частично компенсирует заряд примесных атомов, поэтому электрическое поле снижается. Как следствие, напряжение на обедненной области p - n -перехода и коэффициент ударной ионизации уменьшаются [1, 2].

На этапе 3 наблюдается периодическое нарастание амплитуд напряжения и плотности лавинного тока. При увеличении лавинного тока растет заряд подвижных носителей, увеличивается компенсация объемного заряда в уравнении Пуассона, поэтому электрическое поле и напряжение на обедненной области перехода снижаются.

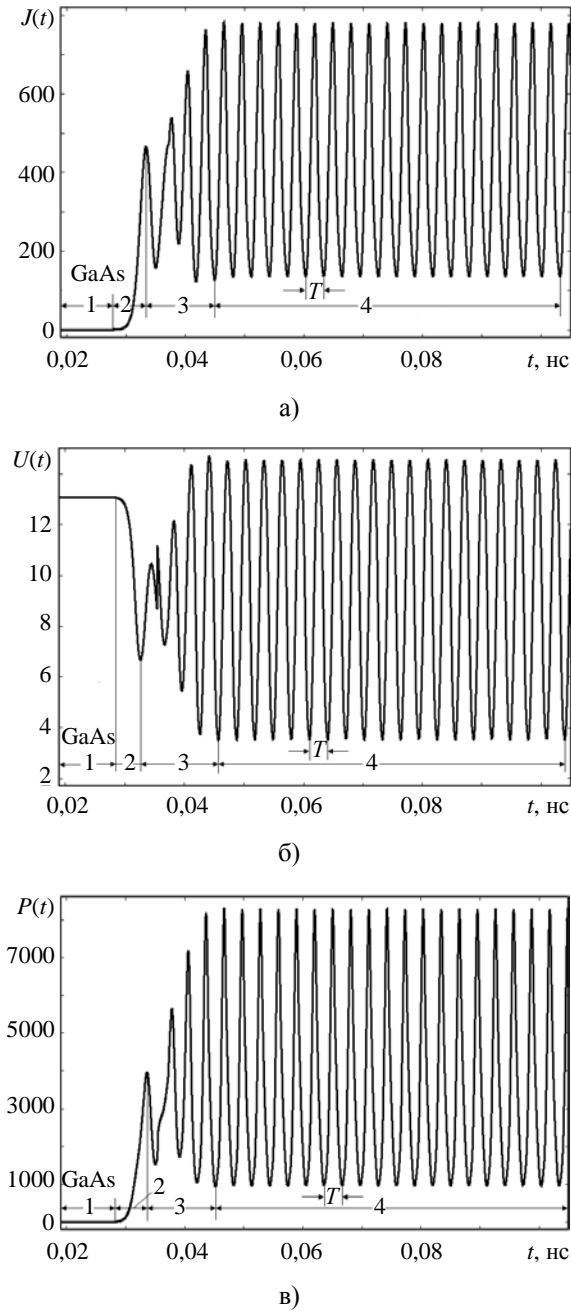


Рис. 2. Развитие и установление автоколебаний в автогенераторе на основе GaAs *p-n*-перехода: (а) – плотность электронного тока $J(t)$, кА/см²; (б) – напряжение $U(t)$, В; (в) – плотность мгновенной мощности $P(t)$, кВт/см²

При снижении электрического поля коэффициенты ударной ионизации для электронов и дырок снижаются, уменьшается число генерируемых электронно-дырочных пар в слое умножения *p-n*-перехода и соответственно уменьшается заряд лавинного тока. При снижении этого заряда уменьшается компенсация объемного заряда в уравнении Пуассона, поэтому электрическое поле

и напряжение на обедненной области перехода возрастают.

На этапе 4 наблюдаются установившиеся автоколебания плотности лавинного тока, напряжения и плотности мгновенной мощности, обусловленные сбалансированностью роста лавинного тока и снижения электрического поля [6]. Из рис. 2 видно, что период установившихся автоколебаний равен $T = 3,067$ пс, что соответствует частоте автоколебаний $f = 326$ ГГц.

3. Фурье-анализ автоколебаний. Рассмотрим автоколебания в частотной области. Частота дискретизации определяется шагом интегрирования τ и равна $f = 1/\tau = 98,625$ ТГц. Шаг частоты дискретизации (абсолютная погрешность определения частоты) равен $df = f/N = 2,46$ ГГц ($N = 40000$ – число временных точек отсчетов).

На рис. 3 приведены фурье-спектры плотности лавинного тока $J(f)$, кА/см² (рис. 3, а), напряжения $U(f)$, В (рис. 3, б) и плотности мощности $P(f)$, кВт/см² (рис. 3, в) автогенератора на основе GaAs *p-n*-перехода, где $P(f)$ – плотность полезной мощности, $P(0)$ – плотность потребляемой мощности.

Видно, что лавинный ток, текущий через диод, напряжение на его зажимах и плотность мгновенной мощности состоят из постоянной составляющей с нулевой частотой и переменной составляющей с частотами $f_1 = 326$ ГГц (1-я гармоника) и $f_2 = 2f_1$ (2-я гармоника).

Таким образом, в цепи источника напряжения течет постоянный (пусковой) ток $J(f_0) = 178$ кА/см², а в нагрузке – переменный ток $J(f) = 65$ кА/см². Такие высокие значения токов характерны для ЛПД в аномальном режиме и в режиме с захваченной плазмой [8]. Это позволяет утверждать, что диффузионно-дрейфовая теория адекватно описывает физические процессы, протекающие в ЛПД в этих режимах.

На рис. 4 приведен фурье-спектр плотности полезной мощности $P(f)$, кВт/см² пяти автогенераторов на основе GaAs *p-n*-переходов. Согласно рис. 4 автогенератор 1 имеет плотность полезной мощности $P(110 \text{ ГГц}) = 1070$ кВт/см² ($U/U_{av} = 2,1$; $U_{av} = -14,65$ В; $N_a = 2 \cdot 10^{17}$ и $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$); автогенератор 2 – $P(177 \text{ ГГц}) = 986$ кВт/см² ($U/U_{av} = 2,4$; $U_{av} = -9,5$ В; $N_a = 4 \cdot 10^{17}$ и $N_a = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$); автогенератор 3 – $P(264 \text{ ГГц}) = 826$ кВт/см² ($U/U_{av} = 2,18$; $U_{av} = -6,9$ В; $N_a = 6 \cdot 10^{17}$ и $N_a = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$); автогенератор 4 – $P(326 \text{ ГГц}) = 680$ кВт/см² ($U/U_{av} = 1,78$; $U_{av} = -5,85$ В; $N_a = 8 \cdot 10^{17}$ и $N_a = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$); автогенератор 5 – $P(377 \text{ ГГц}) = 477$ кВт/см² ($U/U_{av} = 1,74$; $U_{av} = -5,3$ В; $N_a = 9 \cdot 10^{17}$ и $N_a = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

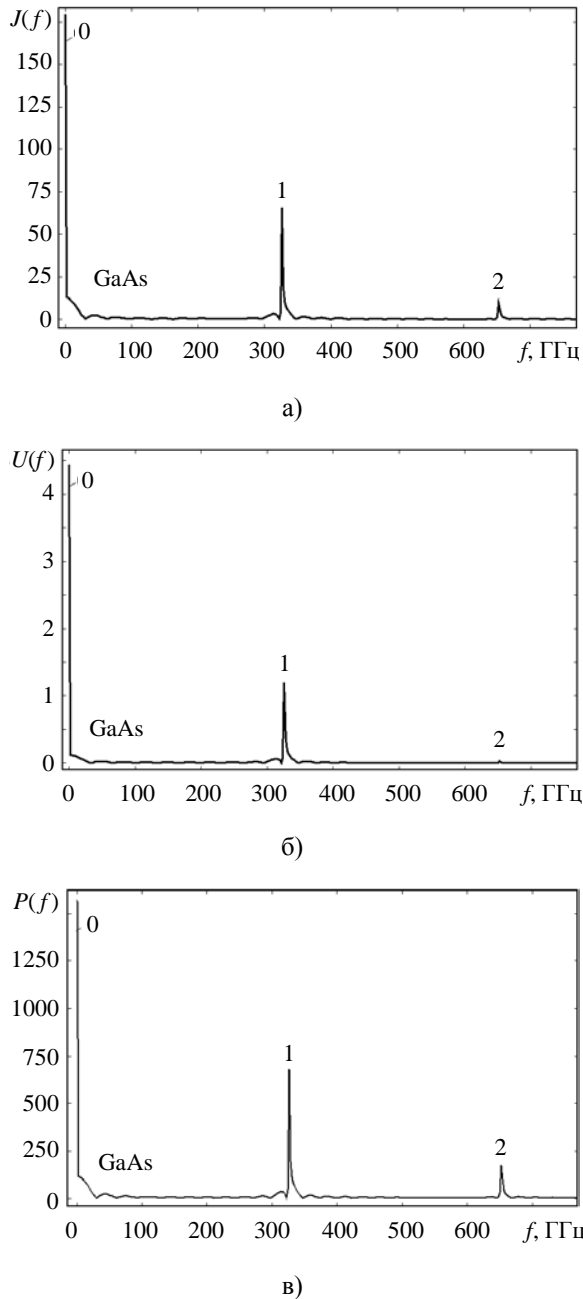


Рис. 3. Фурье-спектр автогенератора на основе GaAs *p-n*-перехода: (а) – спектр плотности лавинного тока $J(f)$; (б) – спектр напряжения $U(f)$; (в) – спектр плотности мощности $P(f)$ ($U/U_{av} = 1,78$; $U_{av} = -5,85$ В; $N_a = 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³; $N_d = 6 \cdot 10^{17}$ см⁻³)

В диодах СВЧ минимальная площадь *p-n*-перехода $S = 2 \cdot 10^{-4}$ см² [11]. Для этого значения S полезная мощность на основных гармониках автогенераторов равна соответственно $P_1 = 214$ Вт, $P_2 = 197$ Вт, $P_3 = 165$ Вт, $P_4 = 136$ Вт и $P_5 = 95$ Вт. Потребляемая мощность автогенераторов равна $P_1(0) = 456$ Вт, $P_2(0) = 475$ Вт, $P_3(0) = 386$ Вт, $P_4(0) = 313$ Вт и $P_5(0) = 260$ Вт. Как известно [1, 2], электронный КПД генератора определяется как отношение полезной мощности к потребленной

мощности $\eta_e = P(f) / P(0) \cdot 100$ %. В соответствии с этим выражением электронный КПД автогенераторов равен $\eta_{e1} = 47$ %, $\eta_{e2} = 41,5$ %, $\eta_{e3} = 43$ %, $\eta_{e4} = 43,5$ %, $\eta_{e5} = 36,6$ %.

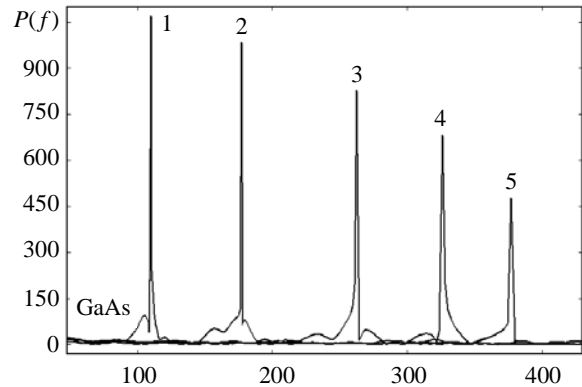


Рис. 4. Фурье-спектр плотности полезной мощности $P(f)$ пяти автогенераторов на основе GaAs *p-n*-переходов с различной концентрацией примесей и напряжением обратного смещения

Таким образом, полезная мощность и частота автогенераторов на основе GaAs *p-n*-переходов определяется концентрацией примесных атомов и измеряется сотнями ватт, а электронный КПД – десятками процентов. С увеличением частоты полезная мощность снижается [1, 2, 4].

Фурье-спектр плотности полезной мощности $P(f)$, кВт/см² и электронного КПД η_e , % автогенераторов на основе Ge и Si *p-n*-переходов с различным напряжением и постоянной концентрацией примесных атомов $N_a = 6 \cdot 10^{17}$ и $N_d = 4 \cdot 10^{17}$ см⁻³ иллюстрируются на рис. 5.

Из рис. 5, а видно, что плотность полезной мощности 1-й гармоники Ge *p-n*-перехода равна $P(375 \text{ ГГц}) = 163$ кВт/см² ($U/U_{av} = 1,415$, сплошная линия) и $P(381 \text{ ГГц}) = 51,8$ кВт/см² ($U/U_{av} = 0,935$, пунктирная линия). Для $S = 2 \cdot 10^{-4}$ см² находим соответственно полезную мощность гармоник $P(375 \text{ ГГц}) = 32,6$ Вт и $P(381 \text{ ГГц}) = 10,4$ Вт.

Из рис. 5, б следует, что плотность полезной мощности 1-й гармоники Si *p-n*-перехода равна $P(439 \text{ ГГц}) = 437$ кВт/см² (87,4 Вт при $S = 2 \cdot 10^{-4}$ см²; $U/U_{av} = 1,665$, сплошная линия) и $P(442 \text{ ГГц}) = 180$ кВт/см² (36 Вт при $S = 2 \cdot 10^{-4}$ см²; $U/U_{av} = 1,2$, пунктирная линия).

Согласно рис. 5, б электронный КПД основной гармоники Ge *p-n*-перехода равен 55 % ($U/U_{av} = 1,415$, сплошная линия) и 34 % ($U/U_{av} = 0,93$, пунктирная линия). Электронный КПД 1-й гармоники Si *p-n*-перехода равен 51 % ($U/U_{av} = 1,665$, сплошная линия) и 33,8 % ($U/U_{av} = 1,2$, пунктирная линия). Следовательно,

максимальную полезную мощность имеют автогенераторы на основе GaAs $p-n$ -переходов, затем на основе Si $p-n$ -переходов и Ge $p-n$ -переходов. Зависимость максимальной мощности от материала полупроводника обусловлена свойствами полупроводника – шириной запрещенной зоны и скоростью насыщения носителей заряда [4, 8].

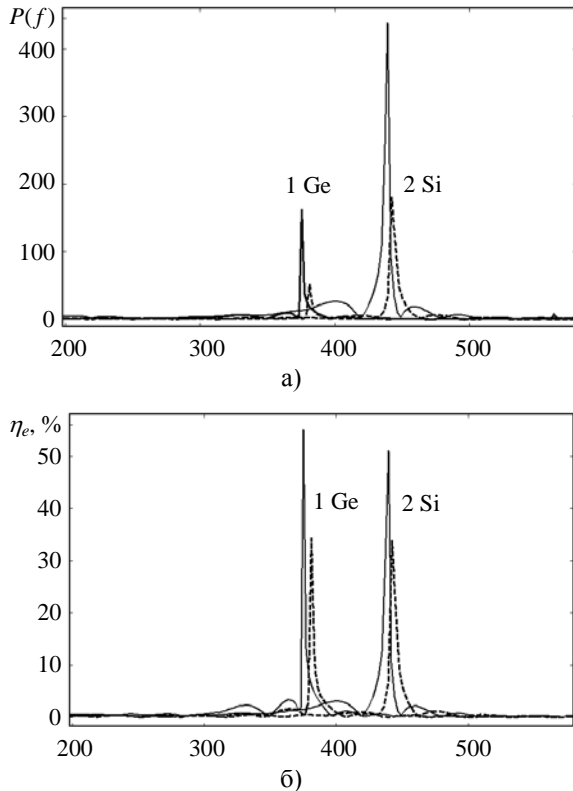


Рис. 5. Фурье-спектр плотности полезной мощности $P(f)$, кВт/см² (а) и электронного КПД η_e , % (б) автогенераторов на основе Ge и Si $p-n$ -переходов при двух напряжениях обратного смещения.

Из рис. 5 видно, что с уменьшением напряжения на Ge и Si $p-n$ -переходах плотность мощности и электронный КПД снижаются (пунктирные линии). Такая зависимость мощности от напряжения подтверждена экспериментально [1].

Как известно [11], полезная мощность импульсных 8-мм ЛПД с длительностью импульса 280 нс достигает 20 Вт. Согласно результатам данной работы эта мощность может быть существенно увеличена в автогенераторах на основе резких Si, Ge и GaAs $p-n$ -переходов в режиме автоколебаний. Приведенные мощности автогенераторов (сотни ватт) согласуются с известными результатами – такие мощности достигаются в лавинно-пролетных диодах в аномальном режиме и в режиме с захваченной плазмой [8]. При высоких уровнях мощности для обеспечения тепловых режимов оптимальным является импульсный режим работы автогенераторов [12].

Выводы. Показано, что частота, полезная мощность и электронный КПД автогенераторов на основе резких Ge, Si и GaAs $p-n$ -переходов определяются концентрацией примесных атомов и напряжением обратного смещения. При увеличении концентрации примесных атомов частота повышается, а полезная мощность уменьшается вследствие увеличения потребляемой мощности и снижения электронного КПД. Максимальная полезная мощность достигается в автогенераторах на основе широкозонных GaAs $p-n$ -переходов с высокой дрейфовой скоростью электронов, затем на основе Si $p-n$ -переходов и Ge $p-n$ -переходов.

Результаты работы могут быть использованы разработчиками мощных импульсных автогенераторов миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Библиографический список

1. Тагер А. С. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ / А. С. Тагер, В. М. Вальд-Перлов. – М.: Сов. радио, 1968. – 480 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. Кн. 2 / С. Зи; пер. с англ. под ред. Р. А. Сурица. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Контакты с диффузионными барьерами на основе внедрения TiN, Ti(Zr)B_x в СВЧ-диодах диапазона 200–350 ГГц / Н. С. Болтовец, В. Н. Иванов, А. Е. Беляев и др. // Физика и техн. полупроводников. – 2006. – 40, вып. 6. – С. 753–757.
4. Прохоров Э. Д. Твердотельная электроника / Э. Д. Прохоров. – Х.: Харьк. нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2008. – 544 с.
5. Lukin K. A. Terahertz self-oscillations in reverse-biased $p-n$ -junction / K. A. Lukin, H. A. Cerdeira, P. P. Maksymov // Proc. MSMW'07 Symp. – Kharkov, 2007. – V. 1. – P. 201–203.
6. Лукин К. А. Режим автоколебаний в резких $p-n$ -переходах с постоянным обратным смещением / К. А. Лукин, П. П. Максимов // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, № 2. – С. 232–238.
7. Лукин К. А. Статические электрические поля в обратно смещенных $pn-i-pn$ -структурах / К. А. Лукин, П. П. Максимов // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2002. – 7, № 2. – С. 317–322.
8. Кэрролл Дж. СВЧ-генераторы на горячих электронах / Дж. Кэрролл; пер. с англ. под ред. Б. Л. Гельмонта. – М.: Мир, 1972. – 384 с.
9. Самарский А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
10. Максимов П. П. Алгоритм решения уравнений диффузионно-дрейфовой модели полупроводниковых структур с лавинными $p-n$ -переходами / П. П. Максимов // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, № 3. – С. 523–528.
11. Мощные кремневые импульсные лавинно-пролетные диоды 8-мм диапазона / В. В. Басанец, Н. С. Болтовец, А. В. Зоренко и др. // Техн. и приборы СВЧ. – 2009. – № 1. – С. 27–30.
12. Влияние перегрева $p-n$ -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов / А. Е. Беляев, В. В. Басанец, Н. С. Болтовец и др. // Физика и техн. полупроводников. – 2011. – 45, вып. 2. – С. 256–262.

Рукопись поступила 28.10.2011

К. А. Lukin, P. P. Maksymov

RESEARCH OF POWER CHARACTERISTICS
OF OSCILLATORS OF MILLIMETRIC AND
SUBMILLIMETRIC WAVES BASED
ON ABRUPT *P-N*-JUNCTIONS

Numeral power characteristics of oscillators of micro-waves are explored on the basis of abrupt Ge, Si and GaAs *p-n*-junctions with the permanent reversed bias. It is shown that excitation of oscillators is conditioned by interdependence of the electric field and avalanche current, which is observed at an avalanche current comparable on a value with the limit current of *p-n*-junction. Power, frequency and electronic efficiency of oscillators, is explored and comparison is executed with characteristics of IMPATT-diodes. It is shown that power and electronic efficiency of oscillators is substantially higher than at IMPATT-diodes.

Key words: semiconductors, oscillators of mm and submm waves, impact ionization, abrupt *p-n*-junctions, frequency, power, electronic efficiency.

К. О. Лукин, П. П. Максимов

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК АВТОГЕНЕРАТОРІВ
МІЛІМЕТРОВИХ І СУБМІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ
НА ОСНОВІ РІЗКИХ *P-N*-ПЕРЕХОДІВ

Чисельно досліджуються енергетичні характеристики автогенераторів міліметрових та субміліметрових хвиль на основі різких Ge, Si і GaAs *p-n*-переходів з постійним зворотним зсувом. Показано, що збудження автогенераторів обумовлено взаємозалежністю електричного поля і лавинного струму, яка спостерігається при лавинному струмі, порівняному по величині з граничним струмом *p-n*-переходу. Розраховано потужність, частоту та електронний ККД. Показано, що потужність і електронний ККД автогенераторів суттєво вищі, ніж у лавинно-пролітних діодів.

Ключові слова: напівпровідникові автогенератори міліметрових і субміліметрових хвиль, ударна іонізація, різкий *p-n* перехід, частота, потужність, електронний ККД.