

# РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА ГАННА В РЕЖИМЕ ОНОЗ НА $f \sim 10$ ГГц

Э. Д. Прохоров, А. В. Дядченко

Харьков

Режим ограниченного накопления объемного заряда (ОНОЗ) в настоящее время является весьма перспективным режимом работы диодов Ганна. Это объясняется возможностью получения наибольших мощностей в сравнении с другими режимами работы и возможностью получения довольно высоких к. п. д., а также широким частотным диапазоном (от единиц гигагерц до 150—200 ГГц).

Расчету генераторов Ганна в режиме ОНОЗ посвящено ряд работ [1—6]. Некоторые из этих расчетов оказываются неверными [3, 6], в других — определяется полный к. п. д. генератора, а не гармоник. В большинстве работ приведены лишь результаты численных расчетов из-за отсутствия достоверной зависимости  $V(E)$  в аналитическом виде [1, 2, 4]. Кроме того, результаты различных расчетов во многом определяются конкретной зависимостью  $V(E)$  и изменением этой зависимости от параметров материала.

Ниже приводится простой расчет характеристик генератора Ганна в режиме ОНОЗ, позволяющий определить в аналитическом виде все наиболее важные характеристики генератора и их зависимости от параметров материала GaAs.

Рассмотрим работу диода Ганна в режиме ОНОЗ в одноконтурной резонансной схеме. Зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля  $V(E)$  с достаточной степенью точности может быть аппроксимирована выражением [7]

$$V(E) = \begin{cases} \mu_1 E \dots & E < E_n; \\ (\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 E \dots & E_n < E < E_v; \\ V_v \dots & E > E_v, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mu_1$  — подвижность в слабом электрическом поле;  $\mu_2$  — отрицательная дифференциальная подвижность, соответствующая участку характеристики при  $E_n < E < E_v$ ;  $V_v$  — минимальная скорость дрейфа электронов;  $E_n$  — пороговая напряженность электрического поля;  $V_n$  — пороговая скорость электронов. Характеристика  $V(E)$  (1) — стержневая, на ней основан расчет всех параметров генератора.

Для определения необходимых зависимостей (к. п. д., сопротивление нагрузки, мощность, эквивалентная реактивная проводимость и т. д. от напряжения питания амплитуда переменной составляющей напряженности электрического поля и параметров материала) используем простейший подход, который в основном используется при расчете генераторов также в режиме

ОНОЗ, заключающийся в том, что распределение электрического поля и концентрации носителей в диоде принимаются однородными, т.е. пренебрегают влиянием процессов накопления и рассасывания объемного заряда в диоде в течение периода колебаний и неоднородным легированием кристалла от контакта к контакту. При таких условиях плотность тока через диод

$$I = qn_0V(E), \quad (2)$$

т.е. она определяется формой приложенного напряжения и конкретным видом зависимости  $V(E)$ .

Поскольку диод работает в одноконтурной резонансной схеме, напряженность электрического поля в нем

$$E(t) = E_0 + E_1 \sin \omega t, \quad (3)$$

где  $E_0$  — постоянная напряженность электрического поля;  $E_1$  — амплитуда переменной составляющей напряженности электрического поля;  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $T$  — период СВЧ поля.

Амплитуда высокочастотного поля должна быть такой, чтобы в течение короткой части ВЧ периода результирующая напряженность электрического поля была меньше  $E_n$  — пороговой напряженности электрического поля, т.е.  $E_1$  должно быть больше  $E_0 - E_n$ . Такое требование вытекает из условия отсутствия накопления объемного заряда в полупроводнике, в течение которого результирующая напряженность электрического поля оказывается меньше  $E_n$  и удовлетворяет условию (рис. 1)

$$t_4 - t_3 > \frac{\epsilon}{4\pi q n_0 \mu_1}. \quad (4)$$

В то же время  $\frac{t_4 - t_3}{T}$  должно быть значительно меньше единицы, поскольку в противном случае амплитуда высокочастотного поля может стать настолько большой, что начнется поглощение высокочастотной мощности. Это накладывает ограничение на амплитуду  $E_1$  и  $\frac{t_4 - t_3}{T}$  сверху. Величины  $\frac{t_4 - t_3}{T}$  и  $E_1$  связаны соотношением (рис. 1)

$$\frac{\pi(t_4 - t_3)}{T} = \arccos \frac{E_0 - E_n}{E_1}. \quad (5)$$

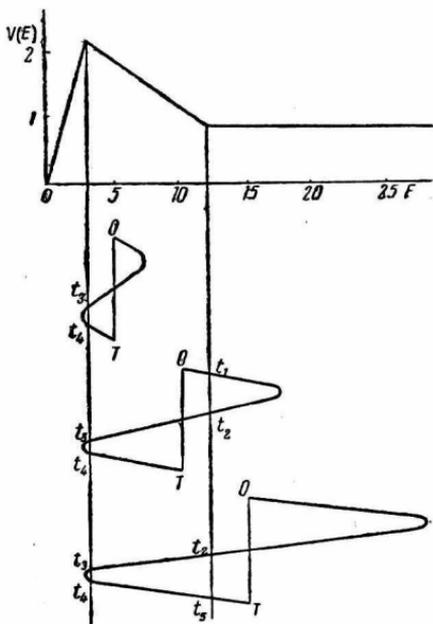


Рис. 1. Аппроксимация  $V(E)$  и временные интервалы, выбранные при расчете для разных  $E_0$ .

Помимо этого, период ВЧ поля должен быть значительно меньше времени формирования домена сильного поля, т. е. должен выполняться критерий существования режима ОНОЗ:

$$2 \cdot 10^4 \ll \frac{I n_0}{f} < 2 \cdot 10^5 \text{ сек/см}^3. \quad (6)$$

При известной зависимости  $V(E)$  нетрудно определить форму тока через диод. Для заданной выражением (3) напряженности электрического поля форма тока в рассматриваемом случае для  $E_0 + E_1 < E_v$

$$I(t) = qn_0 \begin{cases} (\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & 0 < t < t_3; \\ \mu_1 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & t_3 < t < t_4; \\ (\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & t_4 < t < T, \end{cases} \quad (7)$$

где времена  $t_3$  и  $t_4$  определяются из уравнения

$$t_{34} = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{V_n - \mu_1 E_0}{\mu_1 E_1} \quad (8)$$

для  $E_0 + E_1 > E_v$  и  $E_0 < E_v$

$$I(t) = qn_0 \begin{cases} (\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & 0 < t < t_1; \\ V_v \dots & t_1 < t < t_2; \\ (\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & t_2 < t < t_5; \\ \mu_1 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & t_3 < t < t_4; \\ (\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & t_4 < t < T, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$t_{12} = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{(\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 E_0 - V_v}{\mu_1 E_1}; \quad (10)$$

для  $E_0 + E_1 > E_v$  и  $E_0 > E_v$

$$I(t) = qn_0 \begin{cases} V_v \dots & 0 < t < t_2; \\ (\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & t_2 < t < t_3; \\ \mu_1 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & t_3 < t < t_4; \\ (\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 (E_0 + E_1 \sin \omega t) \dots & t_4 < t < t_5; \\ V_v \dots & t_5 < t < T, \end{cases} \quad (11)$$

где  $t_5$  — определяется аналогично  $t_1$  и  $t_2$ .

По зависимости  $I(t)$  — (7), (9), (11) — и известным значениям  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$  нетрудно определить постоянную составляющую тока через диод и амплитуды, первых гармоник тока — через диод синфазных с напряжением и сдвинутых по отношению к напряжению на  $90^\circ$ . Для случая, описываемого выражением (9), токи определяются следующим образом ( $I_0$  — постоянная составляющая;  $I_1$  — амплитуда первой гармоники, синфазная с

напряжением;  $I_1'$  — амплитуда первой гармоники, сдвинутая на  $90^\circ$ ):

$$I_0 = qn_0 \left\{ [(\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 E_0] \left( 1 - \frac{t_4 - t_3 + t_2 - t_1}{T} \right) + V_0 \frac{t_2 - t_1}{T} + \mu_1 E_0 \frac{t_4 - t_3}{T} - \mu_1 E_1 \frac{1}{2\pi} (\cos \omega t_4 - \cos \omega t_3) + \frac{\mu_2 E_1}{2\pi} (\cos \omega t_1 - \cos \omega t_2 + \cos \omega t_3 - \cos \omega t_4) \right\}; \quad (12)$$

$$I_1 = \frac{qn_0}{\pi} \left\{ [(\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 E_0] (\cos \omega t_4 - \cos \omega t_3 + \cos \omega t_2 - \cos \omega t_1) - V_0 (\cos \omega t_2 - \cos \omega t_1) - \mu_1 E_0 (\cos \omega t_4 - \cos \omega t_3) + \mu_1 E_1 \left[ \pi \frac{t_4 - t_3}{T} - \frac{1}{4} (\sin 2\omega t_4 - \sin 2\omega t_3) \right] - \mu_2 E_1 \left[ \pi \left( 1 - \frac{t_4 - t_3 + t_2 - t_1}{T} \right) + \frac{1}{4} (\sin 2\omega t_4 - \sin 2\omega t_3 + \sin 2\omega t_2 - \sin 2\omega t_1) \right] \right\}; \quad (13)$$

$$I_1' = \frac{qn_0}{\pi} \left\{ [(\mu_1 + \mu_2) E_n - \mu_2 E_0] (\sin \omega t_1 + \sin \omega t_3 - \sin \omega t_2 - \sin \omega t_4) + V_0 (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_1) + \mu_1 E_0 (\sin \omega t_4 - \sin \omega t_3) + \frac{1}{4} \mu_1 E_1 (\sin 2\omega t_4 - \sin 2\omega t_3) + \frac{1}{4} \mu_2 E_1 (\sin 2\omega t_4 - \sin 2\omega t_3 + \sin 2\omega t_2 - \sin 2\omega t_1) \right\}. \quad (14)$$

Выражения (12)—(14) справедливы также и для случая, описываемого уравнением (7), при  $t_1 = t_2 = 0$ . Выражения для  $I_0$ ,  $I_1$  и  $I_1'$  легко определить и для случая (11), когда  $E_0 > E_0$ .

При известных значениях  $I_0$ ,  $I_1$  и  $I_1'$  находим мощность, отдаваемую на первой гармонике в нагрузку

$$P = \frac{1}{2} I_1 E_1 t; \quad (15)$$

коэффициент полезного действия на первой гармонике

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{I_1 E_1}{I_0 E_0} \cdot 100\%; \quad (16)$$

сопротивление нагрузки или эквивалентное отрицательное сопротивление, вносимое диодом в резонатор

$$R_n = \frac{E_1 t}{I_1}, \quad (17)$$

и эквивалентное реактивное сопротивление, вносимое диодом в резонатор

$$B = -\frac{E_1 t}{I_1}. \quad (18)$$

Поскольку зависимости  $I_0$ ,  $I_1$  и  $I_1$  определяется параметрами кривой  $V(E)$ , из выражений (15)—(18) следуют зависимости от  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $V_0$ .

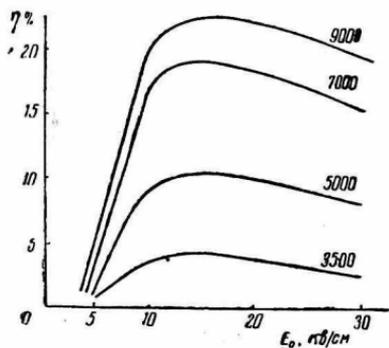


Рис. 2. Зависимость к. п. д. от  $E_0$  при различных  $\mu_1$ .

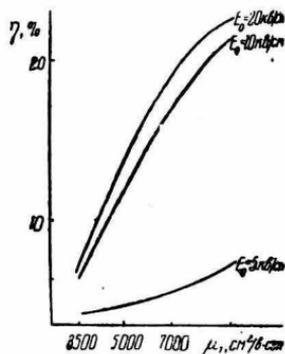


Рис. 3. Зависимость к. п. д. от  $\mu_1$  при различных  $E_0$ .

Некоторые результаты расчетов показаны на рис. 2—6. Результаты расчета максимального к. п. д. генератора на первой гармонике (при оптимальных значениях амплитуды переменной составляющей  $E_1$  и неизменном  $E_0$ ) в зависимости от приложенной к диоду напряженности электрического поля  $E_0$  показаны на рис. 2. Из приведенных зависимостей следует, что максимальное значение к. п. д. генератора в режиме ОНОЗ достигается при 3—5  $E_n \sim E_0$ . Дальнейшее увеличение  $E_0$  приводит к уменьшению к. п. д., что связано с изменением формы тока через диод и уменьшением амплитуды первой гармоники тока — такой вывод непосредственно следует из (13) для  $I_1$ .

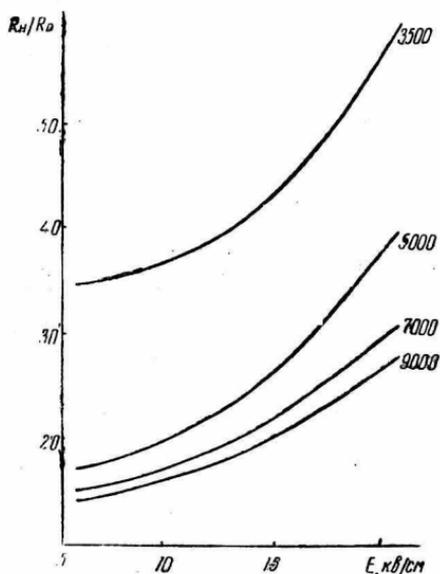


Рис. 4. Зависимость  $R_n/R_0(E_0)$ .

Следует отметить, что в значительной мере к. п. д. зависит от подвижности  $\mu_1$  (рис. 3). При подвижностях  $\sim 7000$ —

9000  $см^2/в \cdot сек$  к. п. д. генератора достигает 19—23%, в то время как при низких подвижностях — составляет несколько процентов.

Важным параметром генератора является также и сопротивление нагрузки, оптимальное при данном  $E_0$  и  $\mu_1$  (рис. 4, 5). Увеличение подвижности  $\mu_1$  требует меньших сопротивлений нагрузки и, следовательно, позволяет в большей степени нагружать генератор в режиме ОНОЗ, отбирать от него большую полезную мощность. Увеличение питающих напряжений требует также больших сопротивлений нагрузки. Оптимальными сопротивлениями для  $\mu_1 \sim 7000 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$  следует считать 7 — 12  $R_0$ .

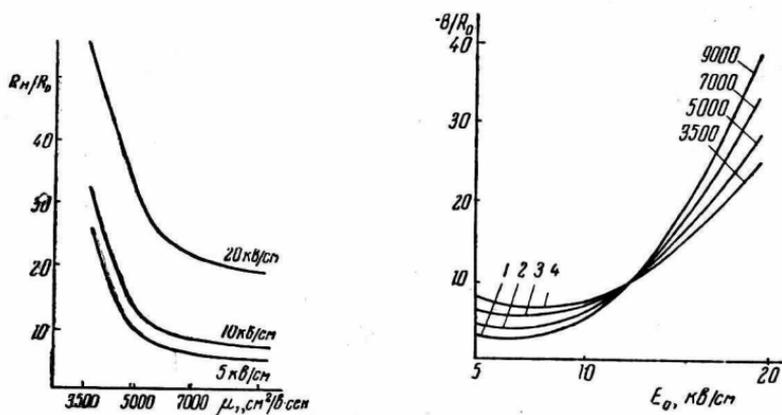


Рис. 5. Зависимость  $R_{н}/R_0$  ( $\mu_1$ ).

Рис. 6. Зависимость  $-B/R_0$  ( $E_0$ ) при различных  $\mu_1$ .

Для каждого конкретного диода Ганна параметры кривой  $V$  ( $E$ ) могут быть различны (что чаще всего и встречается на практике), поэтому различными будут и к. п. д. и  $E_0$ , и сопротивление нагрузки. Возможные варианты для одной из аппроксимаций  $V$  ( $E$ ) показаны на рисунках 2—6. На рис. 6. приводится зависимость реактивной составляющей, носящей емкостной характер, вносимой диодом в резонатор в зависимости от  $E_0$  и  $\mu_1$  (эквивалентная емкость диода, вносимая в резонатор, уменьшается при увеличении  $E_0$ ; максимальная вносимая емкость соответствует 5—10  $\text{кВ/см}$ ).

Рассмотрев полученные результаты, видим, что для введения в режим ОНОЗ генератор следует нагружать слабо (т. е. нагрузка должна быть невелика, в особенности при малых  $E_0$ ). При каждом фиксированном  $E_0$  параметры генератора будут зависеть от амплитуды переменной составляющей  $E_1$  — в этом нетрудно убедиться, определяя к. п. д. генератора для  $E_0 > E_1 > E_0 - E_n$ .

Из анализа простейшего подхода к расчету генератора в режиме ОНОЗ, рассмотренном выше, что частота не влияет на основные выходные характеристики генератора. Частота при таком подходе должна лишь удовлетворять условию (6). Это справедливо в диапазоне частот от нескольких гигагерц примерно до 20—25 ГГц.

т. е. до частот, когда времена междолинного перехода электронов из центрального минимума в боковые, и наоборот, еще несущественно сказываются на зависимости  $V(E)$ .

Для определения параметров генератора Ганна в режиме ОНОЗ на более высоких частотах необходимо пользоваться не статической характеристикой  $V(E)$ , а динамическими характеристиками зависимости дрейфовой скорости от напряженности электрического поля и периода колебаний.

При работе диода Ганна в режиме ОНОЗ, в многоконтурной резонансной схеме к. п. д. может быть увеличен до 30% (8). Расчет такого генератора (например, двухконтурного) легко проводить в рамках того подхода, который был использован выше. Увеличение к. п. д. генератора в этом случае обусловлено увеличением длительности импульсов большого тока через диод по сравнению с длительностью импульсов большого тока при синусоидальной форме напряжения на диоде.

Таким образом, приведенный расчет позволяет для диода с заданными характеристиками ( $V(E)$  и  $R_0$ ) определять условия, необходимые для работы диода в режиме ОНОЗ. Приведенный расчет — оценочный, однако он позволяет рассчитывать параметры довольно быстро, поскольку конечные результаты получены в аналитическом виде.

Следует отметить, что такие моменты, как учет влияния неоднородности легирования по длине кристалла от контакта к контакту, частотные зависимости параметров — требуют отдельных детальных рассмотрений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. A. Copeland. Proc. IEEE, v. 54, 1479, 1966.
  2. J. A. Copeland. J. Appl Phys., v. 38, 3096, 1967.
  3. I. B. Bott, C. Hilsu m. IEEE Trans., ED—14, 9,492, 1967.
  4. R. I. Harrison, S. P. Denker, M. L. Hadley. IEEE Trans., ED—15, 10, 792, 1968.
  5. R. O. Olsson. IEEE Trans., ED-16, 202, 1969.
  6. R. R. Mueller, B. Nitz. Electronics letters. v. 5, 20, 1969.
  7. P. N. Butcher. Rept. Progr. in Physics, v. 30, 97, 1967.
  8. J. A. Copeland. Proc. IEEE, v.57, 9, 1966, 1969.
-