

анода присутствует группа быстрых электронов (рис. 4, б, кривые 5 и 6).

Наличие максимума в положительном столбе разряда при давлениях 0,05 и 0,025 мм рт. ст. (рис. 3, б, кривая 4 и рис. 4, б, кривые 5 и 6) уже нельзя объяснить рассеянием пучка первичных электронов. Обогащение хвоста функции распределения быстрыми электронами объясняется, по всей видимости, влиянием поля страты, находящейся на границе фарадеевого пространства и положительного столба. В работе [4] также были выявлены максимумы на ФРЭЭ при энергиях 30—40 эВ, возникающие при прохождении электронов через область с резким скачком потенциала в разряде в водороде. Для того чтобы выявить действие поля страты на функцию распределения электронов в положительном столбе разряда при давлении 0,05 мм рт. ст., нами искусственно была вызвана страта. Однако измерить скачок потенциала в ее головке не удалось. Как видно из рис. 5, страта вызвала небольшое изменение формы ФРЭЭ (кривая 1), что подтвердило предположение о влиянии поля страты на функцию распределения. При удалении от страты (кривая 2) величина максимума на функции распределения убывает. В отсутствие страты в плазме существовало распределение, изображенное кривой 3.

Таким образом, применяя метод регуляризации к решению уравнения (1), нам удалось установить сложный характер изменения функции распределения быстрых электронов в различных областях газового разряда низкого давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Волкова Л. М., Девятков А. М., Кралькина Е. А., Меченов А. С. Определение функции распределения электронов по энергиям по интенсивностям спектральных линий.— В кн.: Некорректные обратные задачи атомной физики. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1976, с. 73—91. [2] Волкова Л. М., Девятков А. М., Кралькина Е. А. Определение функции распределения электронов по энергиям по интенсивностям спектральных линий в плазме газового разряда.— Там же, с. 92—95. [3] Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971, с. 292—332. [4] Аброян М. А., Каган Ю. М., Колоколов Н. Б., Лавров Б. П. О функции распределения электронов по энергиям в контрагированном дуговом разряде в водороде при пониженном давлении.— ЖТФ, 1974, 44, № 11, с. 2416—2417.

Поступила в редакцию  
10.12.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1981, Т. 22, № 6

УДК 621.373.7

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА МДП-ВАРИКАПАХ

В. Ф. Винярский, В. Ф. Марченко

(кафедра радиофизики СВЧ)

**§ 1. Введение.** Рабочие характеристики параметрического генератора (ПГ) на МДП-варикапах имеют ряд отличий от известных характеристик ПГ, в котором используются барьерные варикапы [1, 2]. Эти отличия обусловлены в первую очередь своеобразным видом вольтфарадной характеристики МДП-варикапа, имеющей области насыщения.

Кроме того, конкретные образцы МДП-варикапов имеют ряд особенностей (отсутствие прямых и обратных токов, минимум добротности в области максимальной крутизны  $C(V)$ -кривой, нестабильность нижней ветви этой кривой), которые влияют на характеристики ПГ. Так, описанные в [3] экспериментальные макеты ПГ не представляли практического интереса, поскольку добротность опытных образцов МДП-варикапов не превышала нескольких единиц. Лишь в последнее время были разработаны МДП-приборы, имеющие добротность, близкую к добротности барьерных варикапов, относительно высокий коэффициент перекрытия по емкости  $K_{\pi} = C_{\max}/C_{\min} = 3-5$  (при изменении напряжения смещения на 1 В) и приемлемую стабильность  $C(V)$ -характеристики.

В работе приведены основные экспериментальные характеристики вырожденного параметрического генератора на МДП-варикапах, работающего в диапазоне радиочастот.

**§ 2. Описание конструкции ПГ и свойств МДП-варикапов.** В работе использовалась балансная схема генератора с двумя противофазными источниками накачки (рис. 1).

Собственно ПГ состоит из контура субгармоники ( $L_2, C_1, C_2$ ) и контура накачки ( $L_1, C_1, C_2$ ). При  $C_1 = C_2$  в точке А отсутствует напряжение накачки, а равенство  $L_1 = L_2$  приводит к отношению резонансных частот контуров накачки и субгармоники, равному двум. Выходное сопротивление окончательного парафазного усилителя доведено до значения более 100 кОм, что обеспечивает режим накачки заданным током. Кроме того, большое выходное сопротивление генератора накачки позволяет получить достаточно высокую ( $\sim 50$ ) добротность контура субгармоники.

Для балансных схем ПГ целесообразно использовать специально изготовленные балансные нелинейные элементы типа структур МДПДМ (металл—диэлектрик—полупроводник—диэлектрик—металл) со «средним» электродом, изготовленным в едином технологическом цикле. Однако описанные в литературе МДПДМ-варикапы имеют разброс характеристик составных емкостных элементов [4], поэтому пока для создания хорошего баланса в схеме рис. 1 необходим отбор идентичных пар одиночных МДП-варикапов.

Образцы бескорпусных МДП-варикапов представляли собой структуру  $Al-SiO_2/Si_3N_4-Si$ . В рабочем диапазоне частот ( $f_H \ll f \ll f_B$ ) вид  $C(V)$ -характеристики сохраняется неизменным. Граничные частоты  $f_H$  и  $f_B$  (см., например, [5]) определяют соответственно низкочастотную и высокочастотную дисперсию вольтфарадной характеристики; для конкретных образцов [6] их значения были  $f_H \leq 10$  кГц,  $f_B \geq 100$  МГц.

В этом диапазоне частот можно ограничиться эквивалентной схемой МДП-варикапа, состоящей из последовательно включенных емкости  $C(V)$  и сопротивления  $R_s$ , которые являются функциями приложенного напряжения. Минимум добротности варикапа соответствует точке максимальной крутизны  $C(V)$ -кривой, причем величина добротности уменьшается с увеличением коэффициента перекрытия  $K_{\pi}$  [5]. Для обеспечения высокой добротности варикапов ( $Q_d \sim 100$ ) коэффициент перекрытия был выбран относительно небольшим:  $K_{\pi} \approx 3-4$ , соответственно, изменение эквивалентных потерь от смещения характеризуется данными:  $R_s(-1В) = 1,7$  Ом,  $R_s(-2,8В) = 5$  Ом,  $R_s(-4В) = 2,5$  Ом.

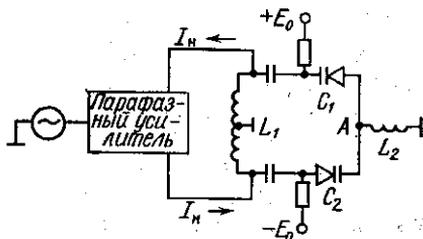


Рис. 1. Схема параметрического генератора,  $I_{\pi}$  — заданный ток накачки

Специальные меры были приняты для стабилизации нижней (инверсионной) ветви  $C(V)$ -характеристики при быстром изменении напряжения смещения. С этой целью использовались тонкие слои полупроводниковой подложки, толщина которых была много меньше толщины неравновесного обфденного слоя [4]. Измерения с помощью мостовой схемы импульсной характеристики варикапов показали, что время релаксации нижней ветви не превышает величины  $\sim 0,02$  мкс. Таким образом, в указанном выше диапазоне частот релаксационными явлениями в МДП-структуре можно пренебречь.

**§ 3. Стационарные характеристики ПГ.** Общий анализ параметрических колебаний в контуре, нелинейная емкость которого описывается кусочно-линейной функцией, представляет трудную задачу, поскольку укороченные уравнения удается записать лишь для частных случаев [7, 8]. Наиболее просто можно оценить пороги возбуждения, воспользовавшись очевидным приближением  $a_c \ll a_n$  ( $a_c$  — амплитуда субгармоники,  $a_n$  — амплитуда накачки).

Например, при выборе рабочей точки на участке  $V_1 \leq E \leq V_2$  ( $V_1, V_2$  — границы линейного участка  $C(V)$ -характеристики) коэффициент модуляции  $m$  и нелинейная расстройка  $\Delta_{\text{нел}}$  (обусловленная изменением средней емкости при воздействии накачки) имеют вид:

$$m = \frac{\Delta C}{4C_0 \Delta V} a_n, \quad a_n < |v_1|, v_2,$$

$$m = \frac{\Delta C}{4C_0 \Delta V} a_n \left\{ \pi - \arccos \frac{v_1}{a_n} + \frac{v_1}{a_n} \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{a_n^2}} \right\}, \quad |v_1| < a_n < v_2, \quad (1)$$

$$m = \frac{\Delta C}{4C_0 \Delta V} a_n \left\{ \pi - \arccos \frac{v_1}{a_n} - \arccos \frac{v_2}{a_n} + \frac{v_1}{a_n} \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{a_n^2}} + \frac{v_2}{a_n} \sqrt{1 - \frac{v_2^2}{a_n^2}} \right\}, \quad a_n > |v_1|, v_2,$$

$$\Delta_{\text{нел}} = 0, \quad a_n < |v_1|, v_2,$$

$$\Delta_{\text{нел}} = \frac{\Delta C}{2\pi C_0 \Delta V} a_n \left\{ \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{a_n^2}} - \frac{v_1}{a_n} \arccos \frac{v_1}{a_n} \right\}, \quad |v_1| < a_n < v_2, \quad (2)$$

$$\Delta_{\text{нел}} = \frac{\Delta C}{2\pi \Delta_0 \Delta V} a_n \left\{ \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{a_n^2}} - \sqrt{1 - \frac{v_2^2}{a_n^2}} - \frac{v_1}{a_n} \arccos \frac{v_1}{a_n} + \frac{v_2}{a_n} \arccos \frac{v_2}{a_n} \right\}, \quad a_n > |v_1|, v_2,$$

где  $\Delta V = V_2 - V_1$ ,  $\Delta C = C_{\text{max}} - C_{\text{min}}$ ,  $C_0(E)$  — емкость в рабочей точке ( $v = V - |E|$ ).

Пороговые кривые определяются известным условием [1]:

$$m > \sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + (\Delta_{\text{лнн}} + \Delta_{\text{нел}})^2}, \quad (3)$$

где  $\delta = 1/Q_c$ ,  $\Delta_{\text{лнн}} = (\omega_c - \omega_{oc})/\omega_{oc}$  — линейная расстройка частоты субгармоники  $\omega_c$  относительно резонансной частоты контура  $\omega_{oc}$ .

Отличие расчетных кривых (рис. 2) от соответствующих кривых для ПГ с барьерным варикапом заключается, во-первых, в существова-

нии практически симметричной кривой относительно  $\Delta=0$  ( $\Delta_{\text{нел}}=0$ ), во-вторых, в существовании семейства кривых, наклоненных вправо ( $\Delta_{\text{нел}}<0$ ). Эксперименты подтверждают существование симметричной пороговой кривой (сплошная кривая 1 на рис. 2), которой соответствует мягкий режим возбуждения. При других смещениях имеем наклонные пороговые кривые, которым соответствует, как правило, жесткое

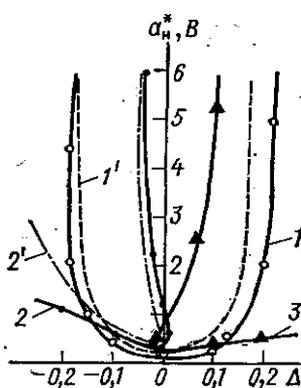


Рис. 2. Зависимости пороговых значений  $a_n^*$  от расстройки: 1, 2, 3 — полученные экспериментально для напряжений смещения  $-2,8$ ;  $-3,5$  и  $-1,5$  В соответственно; 1', 2' — полученные теоретически для кусочно-линейной аппроксимации емкости и смещений  $-2,8$  В и  $-3,5$  В соответственно

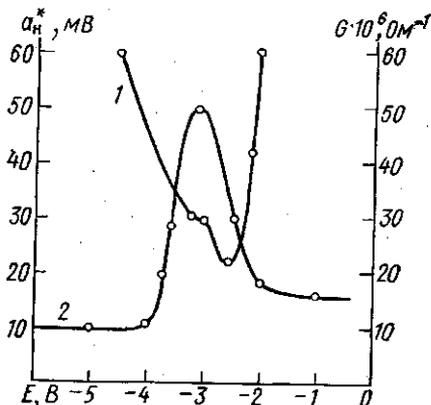


Рис. 3. Зависимости пороговых значений  $a_n^*$  (1) и проводимости  $G$  (2) контура субгармоники от смещения  $E$

возбуждение колебаний. Характерным для ПГ с МДП-варикапами является насыщение пороговых кривых, т. е. независимость  $a_n$  от  $\Delta$  при больших амплитудах накачки.

С точки зрения уменьшения пороговой амплитуды накачки  $a_n^*$  смещение на реальном варикапе следует выбирать из условия компромисса между возрастанием крутизны  $dC/dV$  и уменьшением добротности. На рис. 3 приведены зависимости проводимости контура субгармоники  $G(E)$  и  $a_n^*(E)$  (при возбуждении реализуется оптимальный режим  $\Delta_{\text{лин}}=0$ ,  $\Delta_{\text{нел}}=0$ ). Минимальные значения  $a_{n,\text{мин}}^* \approx 25-30$  мВ достигаются в точке  $E = -2,8$  В, лежащей несколько выше точки, соответствующей максимальной крутизне  $dC/dV$ . Отметим, что при одинаковых добротностях контуров ( $Q_c \approx 30-40$ ) использование МДП-варикапов взамен варикапов типа Д813 позволило снизить порог возбуждения в 2,5—3 раза.

Зависимости установившихся амплитуд субгармоники  $a_c$  и накачки  $a_n$  от расстройки (частоты  $f_n$ ) имеют вид, качественно совпадающий с описанным в [1]. При выборе смещения в середине линейного участка вольтфарадной характеристики ( $\Delta_{\text{нел}} \approx 0$ ) зависимости  $a_c(f_n)$  и  $a_n(f_n)$  почти симметричны относительно  $\Delta_{\text{лин}}=0$  (рис. 4, а). При сравнительно высокой добротности контура накачки ( $Q_n \geq 10$ ) зависимость  $a_c(f_n)$  является двугорбой. При уменьшении добротности (цепь накачки становится по существу нерезонансной) один из максимумов кривой  $a_c(f_n)$  исчезает (рис. 4, б).

Если смещение выбрано в другой точке ВФХ ( $\Delta_{\text{нел}} \neq 0$ ), характеристики  $a_c(f_n)$  и  $a_n(f_n)$  становятся наклонными и на них появляются области неоднозначности (рис. 4, в). При насыщении нелинейной емкости в области больших  $a_n$  гистерезисные явления пропадают.

Зависимость  $a_c(I_H)$  при малых  $a_H$  описывается функцией вида  $a_c \sim \sqrt{I_H}$  [1], а при  $a_H \gg \Delta V$  эта зависимость приближается к линейной, что соответствует случаю ВФХ релейного типа [7].

§ 4. Нестационарные процессы в ПГ. Характер установления субгармонических колебаний при возбуждении ПГ радиоимпульсом накачки прямоугольной формы определяется в основном [1, 2] наличием

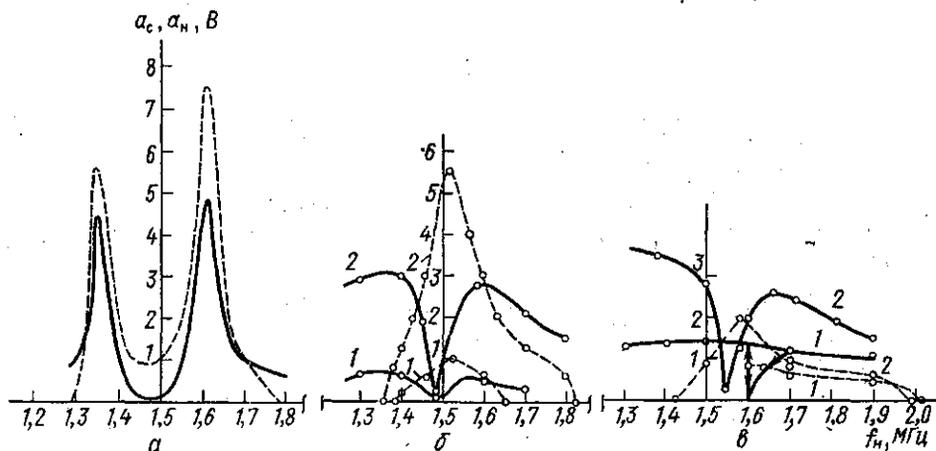


Рис. 4. Зависимости  $a_c(f_H)$  (пунктир),  $a_H(f_H)$  (сплошная линия): а —  $E = -2,8\text{В}$ ,  $Q_H = 30$ ,  $Q_c = 30$ ,  $I_H = 8\text{мА}$ ; б —  $E = -2,8\text{В}$ ,  $Q_H = 3$ ,  $Q_c = 50$ ,  $I_H = 50\text{мА}$  (1),  $I_H = 25\text{мА}$  (2); в —  $E = -3,5\text{В}$ ,  $Q_H = 3$ ,  $Q_c = 50$ ,  $I_H = 10\text{мА}$  (1),  $I_H = 25\text{мА}$  (2)

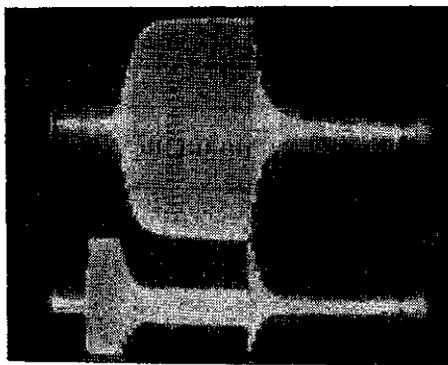


Рис. 5. Переходной процесс при накачке ПГ радиоимпульсом с прямоугольной огибающей (верхний луч — напряжение субгармоники),  $I_H = 5\text{мА}$

расстройки  $\Delta_{\text{лин}} + \Delta_{\text{нел}}$ . При  $\Delta_{\text{лин}} = \Delta_{\text{нел}} = 0$  имеем плавный фронт импульса субгармоники, при  $\Delta_{\text{лин}} = 0$ ,  $\Delta_{\text{нел}} \neq 0$  появляются характерные осцилляции. Отметим, что при больших амплитудах импульса накачки и при соизмеримых добротностях контуров накачки и субгармоники эти осцилляции, как правило, остаются и в условиях  $\Delta_{\text{нел}} = 0$ , что связано с конечным фронтом нарастания импульса накачки в контуре. В области высокой крутизны  $S(V)$  кривой и  $Q_c \approx 30$  минимальное время установления в присутствии предосцилляционного шума составляет 3—4 периода.

Для ряда практических приложений важно осуществить эффективное гашение колебаний субгармоники после окончания импульса накачки. Наличие областей насыщения  $S(V)$ -характеристики позволяет использовать в качестве гасящего напряжения ударные колебания при перестройке контура субгармоники видеоимпульсом (этот режим, описанный в [9], эффективен при отношении  $C_{\text{max}}/C_{\text{min}} = 4$ ).

Другой способ подавления переходных колебаний возможен при  $\Delta_{\text{нел}} = 0$ , поскольку в этом случае единственным механизмом ограничения колебаний субгармоники является обратная реакция на накачку. Импульс накачки имеет вид, показанный на рис. 5 (нижний луч). С увеличением амплитуды субгармоники величина накачки падает.

В момент окончания импульса накачки свободные колебания субгармоники генерируют вторую гармонику, поэтому затухают быстрее, чем по закону  $e^{-t/Q}$ , характерному для линейного контура с добротностью  $Q$ .

Затухание остаточных колебаний проявляется тем сильнее, чем больше величина стационарной амплитуды субгармоники. При соизмеримых добротностях  $Q_c$  и  $Q_n$  падение напряжения накачки оказывается настолько большим, что его величина становится меньше пороговой. В этом случае возможно возбуждение автомодуляционных колебаний. При добротностях  $Q_n \leq 10$  этот вид колебаний отсутствовал.

**§ 5. Заключение.** Исследование балансной схемы параметрического генератора на МДП-варикапах выявило ряд отличий от известных характеристик параметрического варикапа на широко используемых емкостях запертого  $p-n$ -перехода. Эти отличия обусловлены в основном видом вольтфарадной характеристики МДП-варикапа, имеющей отчетливо выраженные области насыщения. Применение МДП-варикапов может обеспечить ряд преимуществ: более низкий порог возбуждения по накачке, большую крутизну перестройки, сведение к минимуму гистерезисных явлений при надлежащем выборе напряжения смещения.

Стабильные по своим характеристикам МДП-варикапы целесообразно использовать в параметрических системах вплоть до частот 1 ГГц. На более высоких частотах, как следует из литературных данных [5], вследствие падения добротности использование МДП-варикапов, по-видимому, не обеспечит каких-либо преимуществ по сравнению с барьерными варикапами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Каплан А. Е., Кравцов Ю. А., Рылов В. А. Параметрические генераторы и делители частоты. М., 1966, с. 14—328. [2] Ершов В. Н. и др. Емкостные параметроны. М.: Изд-во ВЦ АН СССР, 1966, с. 37—191. [3] Патрикеев А. Н. и др. Параметрон на поверхностном варикапе.— В кн.: Нелинейная полупроводниковая емкость и ее применение. Под ред. И. П. Степаненко. М.: Изд-во МИФИ, 1969, с. 97—102. [4] Ковтунюк Н. Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник—диэлектрик. М.: Энергия, 1976, с. 132—135. [5] Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973, с. 237—406. [6] Мартынов В. П., Мартынова В. П., Марченко В. Ф., Петручук И. И. Динамические характеристики и кусочно-линейная аппроксимация нелинейной емкости МДП-варикапа.— Электронная техника, Сер. 11, 1975, вып. 2, с. 65—67. [7] Винярский В. Ф., Марченко В. Ф. Вырожденный режим взаимодействия волн (колебаний) в системах с нелинейностью кусочно-ломаного типа.— Радиотехника и электроника, 1981, 26, № 1, с. 108—117. [8] Лагуткин А. Н. Метод времени отсечки при анализе многочастотных систем с резкой нелинейностью. Канд. дис. М., 1973. [9] Комолов В. П., Рознятовский В. А. Преобразование радиосигнала в параметрическом контуре с импульсной накачкой.— Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1978, 19, № 2, с. 118—119.

Поступила в редакцию  
14.12.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, Т. 22, № 6

УДК 621.178.821

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КАПЕЛЬ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СВЕТОМ КАПИЛЛЯРНЫХ ПЛЕНОК РАСТВОРОВ

Б. А. Безуглый, В. В. Низовцев

(кафедра учебной и научной фотографии и кинематографии МГУ)

Каплеобразование при облучении тонкого слоя жидкости впервые было обнаружено в исследованиях с расплавом йода [1]. При локаль-