УДК 621.382.28.001.5

НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЗОНАНС В КОНТУРЕ С МДП-СТРУКТУРОЙ, Облучаемой светом

С. Е. Кокарев, В. Ф. Марченко

(кафедра радиофизики СВЧ) -

Аналитическое выражение вольт-фарадной характеристики (ВФХ). МДП-структуры достаточно сложно [1], поэтому при расчетах систем с этими элементами удобно пользоваться кусочно-линейной аппроксимацией ВФХ [2]. Такая аппроксимация оправданна, если амплитуда сигналов значительно превышает интервал напряжений, соответствующий переходу C(V)-кривой с одной ветви на другую, и, кроме того, разница между равновесной и неравновесной (импульсной) ВФХ в рабочем диапазоне частот невелика. Для МДП-структур, используемых



Рис. 1. Импульсная (1) и равновесные ВФХ МДП-структуры при различных интенсивностях света: 1/1_м= =0 (2); 0,25 (3) и 1 (4). Пунктирная линия *abcd* — кусочно-линейная аппроксимация емкости



Рис. 2. Зависимость $\Delta C_{\mathbf{H}}$ от амплитуды прямоугольных импульсов U при $E_0 = -6$ B: $I/I_{\mathbf{M}} = 0$ (1); 0,02 (2); 0,25 (3) и 0,6 (4)

в качестве варикапов, приближенное выполнение последнего условия достигается технологическим путем. Толщина полупроводниковой подложки выбирается значительно меньше толщины обедненного слоя, образующегося в результате воздействия импульсного напряжения на варикап. Так, для исследуемых в работе варикапов на основе структуры $A1-SiO_2 \cdot Si_3N_4-Si$ максимальная разница между равновесной (кривая 2 на рис. 1) и неравновесной (кривая 1) ВФХ составляла $\Delta C_n = 8-10$ пФ.

При освещении светом МДП-структуры в результате генерации носителей заряда в обедненном слое равновесная емкость в области инверсии увеличивается, что ведет к возрастанию величины $\Delta C_{\rm H}$ [3] (кривые 3 и 4 на рис. 1). Если одновременно со световым излучением на МДП-варикап подать переменное напряжение, то изменение емкости будет происходить по кривой, лежащей между равновесной и неравновесной ветвями ВФХ. Положение этой кривой зависит от амплитуды напряжения, поэтому и динамическая емкость также будет зависеть от амплитуды. Для описания этого эффекта следует уточнить используемую в [2] аппроксимацию C(V)-кривой в области инверсии в виде отрезка прямой.

С этой целью были проведены измерения равновесной и неравновесной C(V)-характеристик с помощью мостовой схемы в условиях подсветки различной интенсивности. Со стороны диэлектрика поверхность МДП-структуры облучалась газовым лазером $JI\Gamma$ -52-3 ($\lambda =$ =0,63 мкм), максимальная интенсивность излучения, проникающего в подложку, составляла Ім=1-2 мВт. Напряжение смещения, соответствующее работе в области инверсии, выбиралось равным $E_0 = -(5 \div$ ÷7) В. Величина равновесной емкости, измеренная в режиме малых непрерывных сигналов, линейно растет с-увеличением интенсивности света до значений I/I_м~0,05-0,1, затем наступает замедление роста и насыщение C(I). Зависимость $\Delta C_{\rm H}$ от амплитуды прямоугольных импульсов U при различных интенсивностях света показана на рис. 2. Величина $\Delta C_{\rm H}$ растет линейно с увеличением U и достигает насыщения при U=1,5-2 В, область которого слабо зависит от I. Приближенно можно считать, что $\Delta C_{\rm H} = C(I) - C(0)$, где C(0) — равновесное значение емкости в отсутствие облучения. Это обстоятельство позволяет аппроксимировать C(V)-характеристику слева от точки E₀ в виде отрезков а и b (см. рис. 1), учитывающих уменьшение средней емкости с увеличением амплитуды сигнала. Справа от E_0 аппроксимация выбирается в виде отрезков с, d (для простоты не учитывается область обогащения $E_0 > 0$, описанная в [2]).

Другим фактором, который необходимо учитывать при воздействии света на варикап, является изменение времени релаксации неравновесной ветви. Как следует из эксперимента, эта величина меняется от очень больших значений при отсутствии подсветки до $\tau \sim -40$ мкс при максимальной интенсивности. Это означает, что на частотах 1 МГц и выше влиянием изменения за период колебания C(V)-кривой можно пренебречь, а действие света учесть введением дополнительных потерь (для конкретного контура добротность менялась в пределах от Q(0) = 45 до $Q(I_{\rm M}) = 17$).

Таким образом, в области инверсии динамическая емкость может быть записана в виде функции переменного напряжения $v = V - E_0$: $C = C_0 + C_1(v, E_0)$, где $C_0 = C(0) + \Delta C_{\rm H}$ - значение емкости при v = 0,

$$C_{1}(v, E_{0}) = \begin{cases} \alpha_{1} C(0) (v - v_{2}) - \Delta C_{H}, v \ge v_{2}, \\ -\alpha_{2} C_{0} v, v_{2} \ge v \ge 0, \\ \alpha_{3} C_{0} v, 0 \ge v \ge -v_{1}, \\ -\alpha_{3} C_{0} v_{1}, v < -v_{1}, \end{cases}$$

а₁, а₂, а₃ — наклоны участков b, c, d, являющиеся функциями I:

$$\alpha_1 = \frac{\Delta C_{\mathrm{M}\mathrm{\Pi}\mathrm{\Pi}}}{(v_3 - v_2) C_0} , \quad \alpha_2 = \frac{\Delta C_{\mathrm{H}}}{v_2 C_0} , \quad \alpha_3 = \frac{\Delta C_{\mathrm{H}}}{v_1 C_0}$$

Учитывая, что нелинейная часть функции заряда на емкости $q(v) = = C_0 v + q_{\text{нел}}(v)$ выражается в виде $q_{\text{нел}} = \int_0^v C_1(v', E_0) dv'$, представим ее в одночастотном приближении $(v = a \cos(\omega t + \varphi))$ в форме ряда Фурье по $\theta = \omega t + \varphi$:

 $q_{\text{He}\pi} = g(a)\cos\theta + h(a)\sin\theta$.

Вычислив функцию

$$g(a) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} q_{\text{Hen}} (a \cos \theta) \cos \theta d\theta$$

(ср. [2]), можно получить уравнение семейства резонансных кривых параллельного контура, возбуждаемого заданным током $J = J_0 \cos \omega t$:

$$\left[\frac{\omega_0^2}{1+g(a)/C_0}-\omega^2\right]^2+4\delta^2\,\omega^2=\frac{I_0}{a^2}\,,$$

h(a) = 0, ω_0 — резонансная частота, δ — декремент затухания контура. Расчетные резонансные кривые приведены на рис. 3, *a*. Численные значения параметров $\alpha_{1,2,3}$, C_0 , $\Delta C_{\rm H}$, δ определялись из данных мосто-



Рис. 3. Резонансные кривые контура с L=50 'мкГн, $C_0=130$ пФ при $I/I_{\rm M}=0.25$ и различных значениях J_0 : расчетные (a) и экспериментальные (б)

вых измерений при фиксированной интенсивности света І. По мере увеличения амплитуды переменного сигнала происходит сдвиг скелетной кривой в сторону больших частот, что обусловлено уменьшением средней емкости варикапа. При дальнейшем увеличении напряжения средняя емкость возрастает, поскольку начинает «работать» участок d рис. 1. Экспериментальные кривые рис. 3, б количественно подтверждают указанный механизм изменения резонансной частоты контура в широких пределах изменения интенсивности света. Тот факт, что частота, соответствующая точке возврата скелетной кривой, слабо зависит от интенсивности света, подтверждает выбор ап-

проксимирующей функции с фиксированным нижним значением C(0). Экспериментально при амплитудах, превышающих $a_3 \approx 5$ В, наблюдалось насыщение емкости, обусловленное влиянием ветви обогащения. В этой области амплитуд происходит характерное для МДП-структур исчезновение гистерезисных явлений в контуре при изменении частоты или амплитуды внешнего воздействия.

Механизм изменения динамической емкости МДП-структуры и его количественное описание позволяют выбрать оптимальные условия управления световым лучом систем, в которых в качестве реактивного параметра используются МДП-варикапы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973, с. 347— 400. [2] Марченко В. Ф. Радиотехн: и электроника, 1977, 22, с. 1623. [3] Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микроэлектронных систем металлдиэлектрик-полупроводник. Киев, 1978, с. 167—194.

Поступила в редакцию 27.09.82