

01;06

Математическое моделирование режима усиления импульсного тока в канале микроканальной пластины

© А.Б. Беркин, В.В. Васильев

Новосибирский государственный технический университет,
630092 Новосибирск, Россия
e-mail: berkin@epu.ref.nstu.ru

(Поступило в Редакцию 18 июня 2007 г.)

Решена краевая задача для напряженности электрического поля в канале микроканальной пластины при импульсной модуляции входного тока. Получены аналитические соотношения для поля и тока в канале, а также тока на выходе канала и коэффициента усиления во временной области. Исследовано влияние параметров модуляции на форму импульсов выходного тока.

PACS: 85.60.Вт

В электронно-оптических преобразователях с микроканальной пластиной (МКП) широко используется импульсная модуляция тока фотокатода для регулировки яркости изображения [1]. Усиление импульсного тока происходит и при использовании МКП в детекторах микрочастиц [2]. В нелинейном режиме из-за инерционности МКП происходит искажение формы импульсов тока на выходе МКП.

В настоящей работе предлагается модель, позволяющая рассчитать форму импульсов тока на выходе канала МКП при заданных параметрах канала и входных импульсов. Модель основана на решении краевой задачи для поля в канале [3] и содержит аналитические соотношения для поля и тока в канале, а также коэффициента усиления во временной области.

Постановка задачи

Эквивалентная схема канала в виде цепочки резистивных и емкостных элементов и источников тока показана на рис. 1. Элементы цепочки отображают участок канала длиной dz : ток $I(z)$ есть усредненный на dz конвекционный ток, $r' = R/L$ — сопротивление на единицу длины канала, R — сопротивление резистивного слоя МКП, приходящееся на один канал, C'/dz — емкость МКП в расчете на один канал, приходящаяся на участок канала длиной dz , L — длина канала. Канал при этом рассматривается как одномерная активная среда

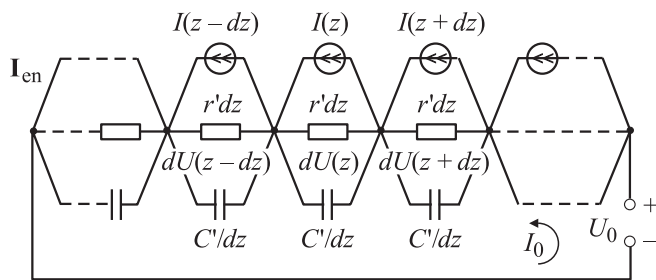


Рис. 1. Эквивалентная схема канала.

с распределенным усилением вдоль оси z . Полагаем известными коэффициент усиления тока в линейном режиме M_0 и ток источника постоянного напряжения U_0 , приходящийся на один канал при нулевом токе I_{en} на входе канала, $I_s = U_0/R$ при $I_{en} = 0$. Контурный ток I_0 на рис. 1 включает в себя ток I_s , а также ту часть токов $I(z)$, которая замыкается через цепь источника напряжения U_0 . Считается, что инерционность МКП обусловлена только временем перезарядки емкости с постоянной времени $\tau = RC$, типичное значение которой в МКП составляет $10^{-2} - 10^{-3}$ с. Пролетные эффекты вследствие малости пролетных времен, составляющих $10^{-10} = 10^{-9}$ с, не учитываются.

Теоретический анализ

Сущностью переходного процесса в канале при выключении входного тока является перезарядка распределенной емкости и постепенное изменение распределения поля и тока в канале, а также коэффициента усиления. Для получения переходных характеристик воспользуемся операторным методом. Уравнения контурных токов для конуров с токами I_0 и $I(z)$ (рис. 1) в операторной форме имеют вид

$$\bar{I}_0 LZ'(p) - Z'(p) \int_0^L \bar{I}(z) dz = \frac{U_0}{p},$$

$$[\bar{I}_0 - \bar{I}(z)]Z(p) dz = d\bar{U}(z),$$

где чертой отмечены изображения по Лапласу, p — оператор Лапласа, $Z'(p) = r'/(1 + p\tau)$ — операторное погонное сопротивление, $\tau = RC = r'C'$ — постоянная времени. Исключив из уравнения \bar{I}_0 , получим изображение напряженности поля

$$\bar{E} = \frac{d\bar{U}}{dz} = \frac{E_0}{p} + \frac{Z'(p)}{L} \int_0^L \bar{I}(z) dz - \bar{I}(z)Z'(p), \quad (1)$$

где $E_0 = U_0/L$. Примем далее, как и в [4], что ток канала связан с полем соотношением

$$I(z) = I_{en} e^{\alpha z} \frac{E(z)}{E_0}, \quad (2)$$

где $\alpha = (\ln M_0)/L$. Изображение этого тока

$$\bar{I}(z) = \frac{1}{p} I_{en} e^{\alpha z} \frac{\bar{E}(z)}{E_0}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1) и выполнив обратное преобразование Лапласа, перейдем к уравнению в оригиналах

$$E = E_0 + \frac{I_{en} r'}{E_0} (1 - e^{-t/\tau}) \frac{1}{L} \int_0^L e^{\alpha z} E dz - \frac{I_{en} r'}{E_0} (1 - e^{-t/\tau}) \alpha E.$$

Продифференцировав последнее равенство по координате z , получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dE}{dz} \left[1 + \frac{I_{en}}{I_s} e^{\alpha z} (1 - e^{-t/\tau}) \right] = \alpha \frac{I_{en}}{I_s} e^{\alpha z} (1 - e^{-t/\tau}) E,$$

в котором учтено, что отношение $E_0/r' = U_0/R = I_s$. Решение этого уравнения с учетом граничного условия $\int_0^L E dz = U_0$ представляет собой функцию координаты и времени

$$E(z, t) = E_0 h_E(z, t), \quad (4)$$

где

$$h_E(z, t) = \frac{\ln M_0}{\left\{ \ln M_0 + \ln \left[1 + \frac{I_{en}}{I_s} (1 - e^{-t/\tau}) \right] - \ln \left[1 + \frac{I_{en}}{I_s} (1 - e^{-t/\tau}) M_0 \right] \right\} \left[1 + \frac{I_{en}}{I_s} (1 - e^{-t/\tau}) e^{\alpha z} \right]}$$

— переходная характеристика поля, характеризующая установление поля в канале после скачка входного тока в начальный момент времени ($t = 0$) при том условии, что начальная напряженность поля равна E_0 по всей длине канала. Очевидно, что наведенное поле можно определить при этом как

$$E_{ind}(z, t) = E(z, t) - E_0 = E_0 [h_E(z, t) - 1]. \quad (5)$$

В импульсном режиме на вход канала поступают прямоугольные импульсы входного тока длительности t_{pul} , следующие с периодом T . Разрядка емкостей во время паузы между импульсами приводит к тому, что начальные условия от импульса к импульсу меняются: началу первого импульса соответствует напряженность поля E_0 по всей длине канала, к началу последующих импульсов сохраняется остаточная напряженность наведенного поля. Поэтому расчет распределения поля в канале во время действия i -го импульса ($i > 1$) должен производиться

согласно соотношению (4) при замене в нем начального значения поля E_0 на поле, устанавливающееся в канале непосредственно перед i -м импульсом:

$$E_i(z, t) = [E_0 + E_{ind, i-1}(z)] h_E(z, t). \quad (6)$$

При этом для первого импульса ($i = 1$) наведенная составляющая поля в (6) $E_{ind, 1}(z) \equiv 0$, а для последующих импульсов ($i > 1$) определяется вытекающим из (5) рекуррентным соотношением

$$E_{ind, i}(z) = [E_0 + E_{ind, i-1}(z)] [h_E(z, t_{pul}) - 1] e^{(T-t_{pul})/\tau}, \quad (7)$$

учитывающим эффект перезарядки емкостей во время паузы между импульсами, длительность которой $T - t_{pul}$.

Ряд значений $E_{ind, i}(z)$ при $i = 1, 2, 3 \dots$ в (7) — есть сумма членов геометрической прогрессии, сходящаяся с ростом i к величине

$$E_{ind}(z) = E_0 \frac{[h_E(z, t_{pul}) - 1] e^{-(T-t_{pul})/\tau}}{1 - [h_E(z, t_{pul}) - 1] e^{-(T-t_{pul})/\tau}}.$$

Область сходимости этого ряда ограничена условием

$$[h_E(z, t_{pul}) - 1] e^{-(T-t_{pul})/\tau} < 1.$$

Левая часть этого неравенства максимальна при $z = 0$, $t_{pul} \gg \tau$ и $T - t_{pul} \ll \tau$. Приближенная оценка этого максимума по формуле переходной характеристики (4) при $I_{en} \ll I_s$ позволяет получить условие сходимости в виде неравенства

$$I_{en} < I_s / \sqrt{M_0},$$

соблюдающегося в широком диапазоне входных токов МКП.

Таким образом, напряженность поля в сечении z канала во время действия импульса входного тока при больших i (large i) стремится к установившемуся значению

$$E(z, t) = [E_0 + E_{ind, i}(z)_{large\ i}] h_E(z, t) = E_0 \frac{h_E(z, t)}{1 - [h_E(z, t_{pul}) - 1] e^{-(T-t_{pul})/\tau}}. \quad (8)$$

Форма i -го импульса тока на выходе канала может быть получена из соотношения (2) с учетом (6) при $z = L$:

$$I_i(L, t) = I_{en} M_0 \left[1 + \frac{E_{ind, i-1}(L)}{E_0} \right] h_E(L, t), \quad (9)$$

а установившаяся форма импульсов выходного тока определяется, с учетом (8), как

$$I(L, t) = I_{en} M_0 \left[\frac{h_E(z, t)}{1 - [h_E(z, t_{pul}) - 1] e^{-(T-t_{pul})/\tau}} \right]. \quad (10)$$

В соотношениях (8)–(10) текущее время t отсчитывается от начала каждого импульса: $0 < t < t_{pul}$.

Результаты расчетов и их обсуждение

На рис. 2 показана серия импульсов выходного тока канала при различной величине амплитуды и частоты следования импульсов входного тока со скважностью $T/t_{\text{pul}} = 2$, $\tau = 10^{-3}$ s, $M_0 = 1000$ и $I_s = 10^{-12}$ A. Как видно, установление формы выходных импульсов занимает некоторое время, зависящее как от величины постоянной времени, так и от частоты повторения и амплитуды импульсов.

При высокой частоте повторения ($1/T$), когда $T \ll \tau$, инерционность МКП на форме выходных импульсов сказывается слабо, а коэффициент усиления остается высоким до весьма больших уровней входного тока ($I_{\text{en}}/I_s = 0.01$, $I_{\text{out}}/I_s \approx 9-10$). Это означает, что динамический диапазон линейного усиления канала расширяется при увеличении частоты следования импульсов входного тока. На рис. 3 проиллюстрировано это положение. Показана зависимость относительной величины среднего за период коэффициента усиления в установившемся режиме от амплитуды импульсов входного тока, следующих с частотой $1/T$, равной 50 Hz (кривые 1) и 50 kHz (2) при значениях скважности (T/t_{pul}) 10, 2 и 1.5. Коэффициент M вычислен путем интегрирования по времени функции $I(L, t)$ (10) и усреднения результата за время T . На начальном участке кривых 1, 2 отношение M/M_0 обратно скважности: при $M/M_0 = 0.1, 0.5, 0.67$ скважность $T/t_{\text{pul}} = 10, 2, 1.5$ соответственно. Для сравнения на том же рисунке представлена зависимость усиления от входного тока в непрерывном режиме (кривая 3). Видно, что при увеличении частоты следования импульсов от 50 Hz до 50 kHz максимальный входной ток, соответствующий линейному режиму, увеличивается примерно в 100 раз. В линейном режиме средняя за период T величина

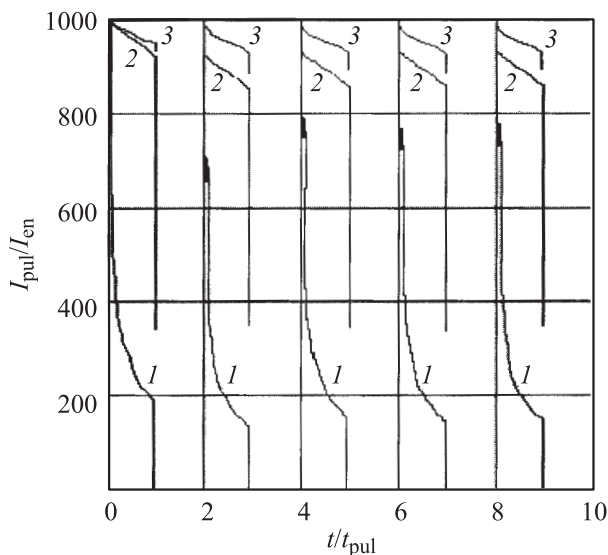


Рис. 2. Форма импульсов выходного тока. 1 — $I_{\text{en}} = 10^{-14}$, $F = 0.5$, 2 — 10^{-14} , 5, 3 — 10^{-16} A, 0.5 kHz.

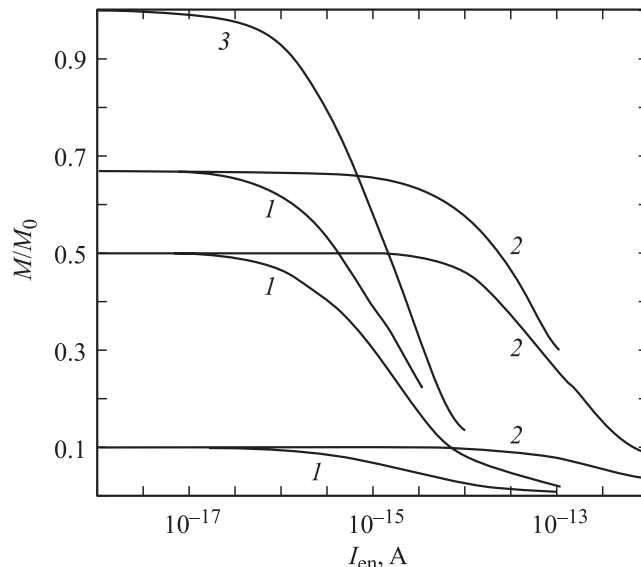


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента усиления в установившемся режиме от амплитуды импульсов входного тока при частоте следования импульсов 50 Hz (1) и 50 kHz (2) со скважностями 10, 2, 1.5 и в непрерывном режиме (3).

выходного тока обратно пропорциональна скважности, это позволяет эффективно управлять усилением МКП путем регулировки длительности импульсов входного тока.

Заключение

Полученные аналитические соотношения позволяют с высокой точностью провести инженерные и физические расчеты для определения поля и тока в канале, а также коэффициента усиления во временной области для импульсного режима работы МКП, исследовать влияние параметров модуляции на форму импульсов выходного тока. Результаты настоящей работы могут быть использованы при проектировании устройств на основе МКП, работающих в импульсном режиме, и анализе результатов экспериментов, проводимых на базе этих устройств.

Список литературы

- [1] Estreza J., Saldana M. // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4796. P. 60–70.
- [2] Wiza J.L. // Nucl. Instr. and Meth. 1979. Vol. 162. P. 587–601.
- [3] Беркин А.Б., Васильев В.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 15. С. 75–79.
- [4] Беркин А.Б., Васильев В.В. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 98–102.