

01;06

Математическая модель режима усиления постоянного 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 заданной величине тока на входе канала. Получены аналитические соотношения для распределения поля, потенциала и тока вдоль канала, а также для коэффициента усиления тока и тока в цепи источника постоянного напряжения в зависимости от величины входного тока.

PACS: 85.60.Bt

Введение

Неискаженная передача изображения через многоканальную пластину (МКП) возможна только в линейном режиме, когда усиление тока в каналах не зависит от величины тока на их входах. Для оценки допустимой степени нелинейности и степени искажения изображения полезна модель, позволяющая связать усиление канала с величиной входного тока при заданных параметрах канала. Подобная задача была поставлена в работе [1], а ее решение дано в виде алгоритма некоторой итерационной процедуры, позволяющей получить численные решения для заданных значений сопротивления резистивно-эмиссионного слоя. Модель, предлагаемая в настоящей работе, получена путем решения краевой задачи для поля в канале МКП, она дает аналитические соотношения [2], позволяющие определить распределения поля и тока в канале, а также усиление канала и ток в цепи источника напряжения на МКП в различных режимах работы канала при усилении постоянного тока.

Постановка задачи

Электрическое поле в канале складывается из стороннего поля с напряженностью E_0 , образованного источником приложенного к МКП постоянного напряжения U_0 , наведенного поля E_{in} , обусловленного протеканием наведенного тока по окружающему канал резистивному слою, и поля пространственного заряда электронов. Как будет показано ниже, поле пространственного заряда

пренебрежимо мало. Наведенное поле можно выразить через вторично-эмиссионный конвекционный ток, воспользовавшись эквивалентной схемой канала (рис. 1) в виде цепочки источников тока и резистивных элементов.

Элементы цепочки отображают участок канала длиной dz : $I(z)$ есть усредненный на dz конвекционный ток, $r' = R/L$ — погонное сопротивление, R — сопротивление резистивного слоя МКП, приходящееся на один канал, L — длина канала. Канал при этом рассматривается как одномерная активная среда с распределенным вдоль оси z усилением. В отличие от схемы, использованной в [1], не учитываются резистивные элементы эмиссионного слоя. При решении задачи считаются известными коэффициент усиления тока в линейном режиме M_0 и ток источника постоянного напряжения I_0 , приходящийся на один канал, при нулевом токе на входе канала: $I_S = U_0/R$.

Теоретический анализ

Если известен закон распределения тока по длине канала $I(z)$, то соответствующее распределение приращений потенциала $dU(z)$ в канале может быть получено из уравнений контурных токов. Для контуров с контурными токами $I(z)$ и I_0 (рис. 1) можно записать

$$[I_0 - I(z)]r'dz = dU(z), \quad I_0 r' L - \int_0^L I(z)r'dz = U_0. \quad (1)$$

Исключив из этих уравнений контурный ток I_0 , получим

$$dU(z) = \frac{U_0}{L} dz + \frac{dz}{L} \int_0^L I(z)r'dz - I(z)r'dz,$$

или, переходя к напряженности поля,

$$E(z) = \frac{dU}{dz} = E_0 + E_{in} = E_0 + \frac{r'}{L} \int_0^L I(z) dz - I(z)r'. \quad (2)$$

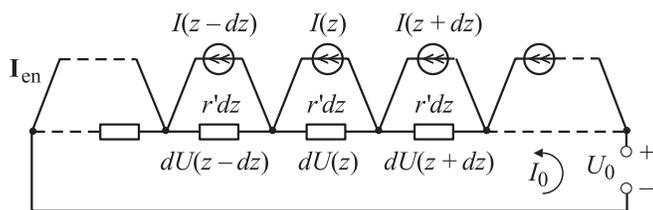


Рис. 1. Эквивалентная схема канала.

Свяжем далее наведенное поле E_{in} с конвекционным током в канале. Известно [3], что при малой величине входного тока в линейном режиме напряженность электрического поля постоянна ($E(z) = E_0$, $E_{in} = 0$), а конвекционный ток вдоль оси z канала распределен по закону

$$I(z) = I_{en} e^{\alpha z},$$

где $\alpha = \ln(M_0)/L$ — инкремент, определяющий величину погонного усиления тока. С увеличением входного тока распределение напряженности электрического поля в канале изменяется за счет наведенного поля, а распределение тока отклоняется от экспоненты. Для корректировки тока воспользуемся формулой [1]:

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

Подставим выражение (3) в уравнение (2) и перегруппируем его члены:

$$E(z) + I_{en} e^{\alpha z} \frac{E(z)}{E_0} r' = E_0 + \frac{r'}{L} \int_0^L I_{en} e^{\alpha z} \frac{E(z)}{E_0} dz.$$

Продифференцировав последнее равенство, в котором правая часть не зависит от координаты z , получим линейное уравнение с разделяющимися переменными

$$\frac{dE}{dz} + \frac{I_{en} r'}{E_0} e^{\alpha z} \left(\frac{dE}{dz} + \alpha E \right) = 0.$$

Решение этого уравнения с учетом граничного условия $\int_0^L E(z) dz = U_0$ дает искомое распределение напряженности поля, а также потенциала по длине канала:

$$E(z) = \frac{E_0 \ln M_0}{F \left(1 + \frac{I_{en}}{I_s} e^{\alpha z} \right)}, \quad (4)$$

$$U(z) = \int_0^z E dz = \frac{U_0}{F} \left[\alpha z - \ln \left(1 + \frac{I_{en}}{I_s} e^{\alpha z} \right) + \ln \left(1 + \frac{I_{en}}{I_s} \right) \right]. \quad (5)$$

Здесь учтено, что отношение $E_0/r' = U_0/R$ есть ток I_s , а коэффициент F определяется как

$$F = \ln M_0 + \ln \left(1 + \frac{I_{en}}{I_s} \right) - \ln \left(1 + \frac{I_{en}}{I_s} M_0 \right). \quad (6)$$

Подстановка (4) в (3) дает распределение тока

$$I(z) = I_{en} e^{\alpha z} \frac{\ln M_0}{F \left(1 + \frac{I_{en}}{I_s} e^{\alpha z} \right)}, \quad (7)$$

а при $z = L$ из (7) следует формула коэффициента усиления канала

$$M = \frac{I(L)}{I_{en}} = M_0 \frac{\ln M_0}{F \left(1 + \frac{I_{en}}{I_s} M_0 \right)}. \quad (8)$$

Второе из уравнений контурных токов (1) позволяет получить ток I_0 , протекающий в цепи источника питания (рис. 1):

$$I_0 = I_s + \frac{1}{L} \int_0^L I(z) dz.$$

Вычислив интеграл, определяющий наведенную составляющую тока, получим

$$I_0 = I_s \frac{\ln M_0}{F}, \quad (9)$$

где, как и ранее, F определяется формулой (6).

Результаты расчета

Расчеты проведены для канала МКП-18-10 при двух значениях коэффициента усиления в линейном режиме: $M_0 = 500$ при напряжении на МКП $U_0 = 660$ В и $M_0 = 1000$ при $U_0 = 720$ В. Длина канала 400, диаметр $10 \mu\text{m}$. Сопротивление R , приходящееся на один канал, принято равным $12.7 \cdot 10^{14} \Omega$.

Распределения поля, потенциала и тока в канале иллюстрируются графиками, которые рассчитаны по соотношениям (4), (5), (7) при $M_0 = 1000$ (рис. 2). Представлены распределения для трех режимов работы канала: близкого к линейному (кривые 1), нелинейного (кривые 2) и сильно нелинейного, близкого к насыщению (кривые 3). Форма этих кривых хорошо известна [3], однако впервые они получены аналитически.

Кроме того, модель позволяет определить вклад наведенного тока в полный ток I_0 в цепи источника напряжения на МКП. Переход в сильно нелинейный режим сопровождается значительным увеличением тока I_0 . На рис. 3, а показаны зависимости относительной величины выходного тока $I_{out} = M I_{en}$ от тока на входе канала, полученные из соотношений (8) и (9) при $M_0 = 500$. Видно, что с увеличением степени насыщения ток I_0 может в несколько раз превосходить величину тока I_s , а отношение I_{out}/I_0 стремится к единице.

На рис. 3, б приведена зависимость относительного усиления канала от входного тока для двух значений параметра M_0 . Строго линейный режим усиления сохраняется при величине тока на выходе канала I_{out} , не превышающей $(0.01-0.02)I_s$. Слабая нелинейность, когда усиление снижается не более чем на 10%, имеет место при выходном токе около $0.1I_s$. В области больших выходных токов наблюдается значительная нелинейность усиления.

Таким образом, результаты расчетов соответствуют известным теоретическим и экспериментальным данным [3], что свидетельствует об адекватности предложенной модели канала.

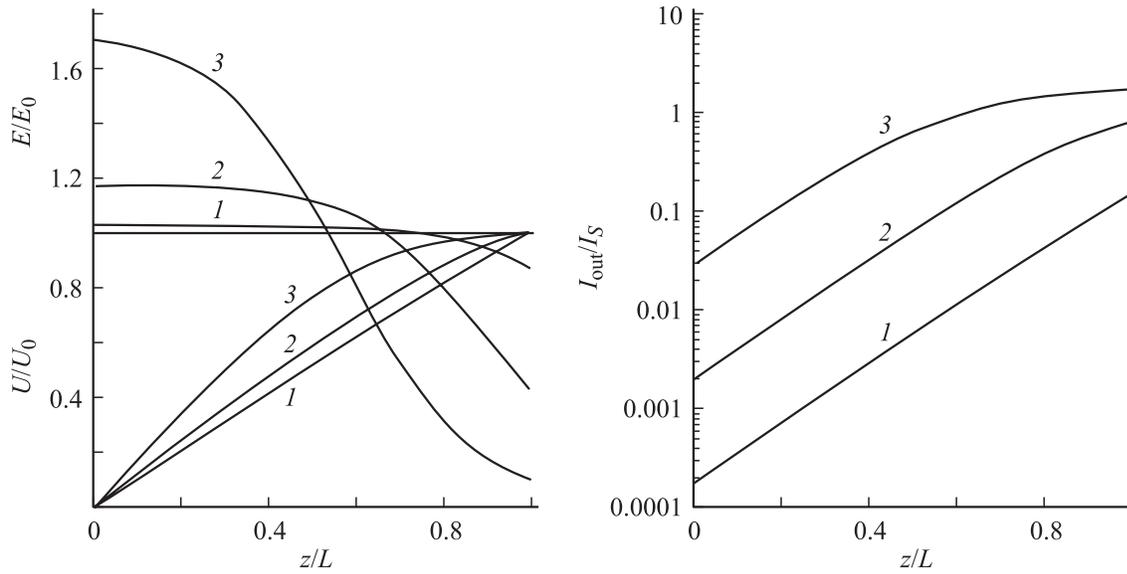


Рис. 2. Распределение напряженности поля, потенциала и тока в канале: 1 — $I_{\text{en}} = 10^{-16}$, 2 — 10^{-15} , 3 — 10^{-14} А.

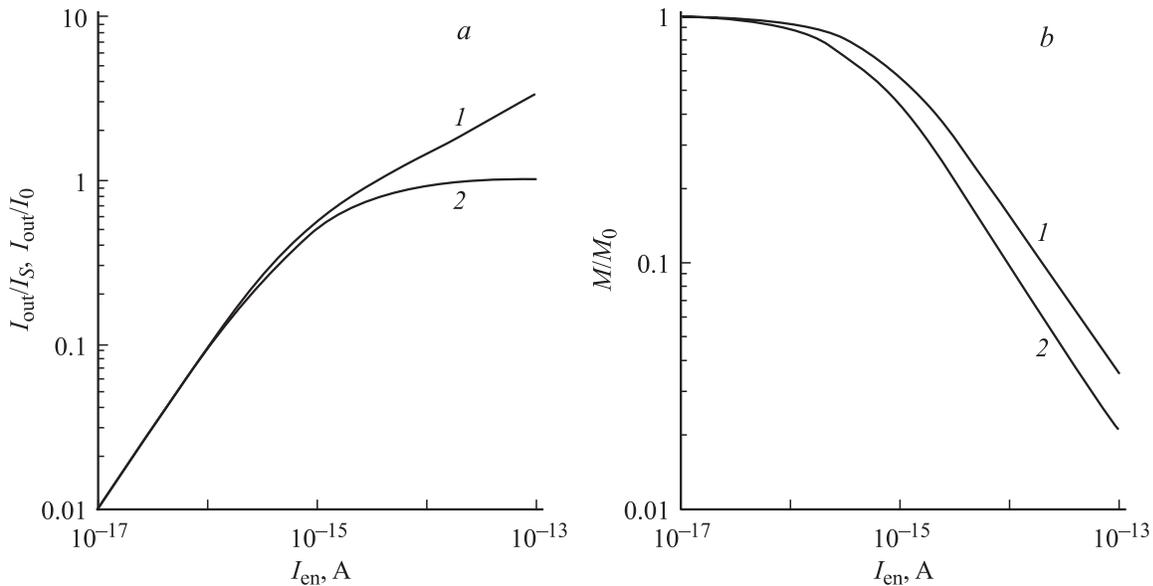


Рис. 3. Зависимость относительной величины выходного тока ($M_0 = 500$, 1 — I_{out}/I_s , 2 — I_{out}/I_0) и коэффициента усиления (1 — $M_0 = 500$, 2 — 1000) от входного тока.

Ограничения модели

1. Сопротивление эмиссионного слоя

Эмиссионный слой окисла, покрывающий поверхность канала, обладает продольным R_1 (вдоль оси канала) и поперечным R_2 сопротивлениями. Соответствующие сопротивления участков dz канала должны быть введены в эквивалентную схему. Однако при этом принятый подход к отысканию $E(z)$ и $I(z)$ приводит к дифференциальному уравнению третьего порядка, не имеющему решения в аналитическом виде. Численные

решения могут быть получены итерационным методом [1]. Расчеты показывают, что существенным является отношение продольного сопротивления резистивного слоя $R = U_0/I_s$ к сопротивлению R_2 , а влияние сопротивления R_1 в силу неравенства $R_1 \gg R$ невелико. При $R/R_2 \geq 10^3$ эмиссионный слой практически не влияет на распределения поля и тока в канале и на коэффициент усиления. Так, например, в канале с сопротивлением резистивного слоя $R = 12.7 \cdot 10^{14} \Omega$ ($U_0 = 720 \text{ В}$) влиянием эмиссионного слоя можно пренебречь, если сопротивление $R_2 \leq 12.7 \cdot 10^{11} \Omega$. Если длина канала 400, диа-

метр $d = 10$ и толщина эмиссионного слоя $\Delta = 0.01 \mu\text{m}$, то удельное сопротивление окисла должно при этом удовлетворять условию $\rho \leq R_2 \pi d L / \Delta \approx 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$.

При уменьшении отношения R/R_2 поле в канале заметно меняется за счет падения напряжения при протекании наведенного тока сквозь эмиссионный слой, а усиление тока снижается. Например, при $R/R_2 = 10^2$ ($\rho \approx 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$) усиление канала в сравнении с расчетом по соотношению (8) снижается в нелинейном режиме на 10–15%.

Типичные значения удельного сопротивления стехиометрической двуокиси кремния составляют $\sim 10^{16}$, свинцово-силикатного стекла $\sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$. С учетом обогащения поверхности канала атомами щелочных металлов и частичного восстановления окисла в процессе изготовления и работы МКП [4] реально сопротивление может снижаться на 1–2 порядка. Поэтому представленная модель позволяет проводить физическое моделирование и инженерные расчеты с приемлемой точностью без учета сопротивления эмиссионного слоя.

2. Влияние отрицательного пространственного заряда

Оценим величину напряженности поля пространственного заряда в канале. Плотность пространственного заряда в сечении z выразим через плотность конвекционного тока и скорость электронов:

$$\rho(z) = \frac{I(z)t_1}{0.25\pi d^2 L},$$

где скорость оценивается как отношение длины канала к среднему времени пролета (t_1) электронов через канал, d — диаметр канала. С другой стороны, в одномерной задаче

$$\frac{dE_\rho}{dz} = \frac{\rho(z)}{\epsilon_0},$$

где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$. Полагая поле пространственного заряда в начале канала равным нулю, можно записать

$$E_\rho(z) = \frac{1}{\epsilon_0} \int_0^z \rho(z) dz = \frac{t_1}{0.25\pi d^2 L \epsilon_0} \int_0^z I(z) dz.$$

После интегрирования выражения (7) получим

$$E_\rho(z) = \frac{I_S t_1}{0.25\pi d^2 \epsilon_0 F} \times \left[\ln \left(1 + \frac{I_{\text{en}}}{I_S} e^{\alpha z} \right) - \ln \left(1 + \frac{I_{\text{en}}}{I_S} \right) \right]. \quad (10)$$

Определим величину напряженности поля E_ρ на выходе канала ($z = L$), где она достигает максимального значения. Примем следующие значения параметров: $I_S = 0.57 \cdot 10^{-12} \text{ A}$, $M_0 = 1000$, $L = 400 \mu\text{m}$, $d = 10 \mu\text{m}$,

а среднее время пролета $t_1 = 10^{-9} \text{ s}$. При токе на входе канала $I_{\text{en}} = 10^{-14} \text{ A}$, что соответствует глубокому насыщению, получим из (10) $E_\rho(L) = 0.594 \text{ V/m}$. Эта напряженность много меньше, чем $E_0 = 1.8 \cdot 10^6 \text{ V/m}$, и чем наведенное поле, напряженность которого, как видно из рис. 2, составляет на выходе канала около $0.9E_0$.

Таким образом, поле пространственного заряда оказывается пренебрежимо малым и может не учитываться в модели для всех режимов работы МКП в составе электронно-оптического преобразователя (ЭОП).

Заключение

Предложенная аналитическая модель позволяет осуществить расчет усиления постоянного тока в канале МКП в широком диапазоне токов на входе канала. В отличие от ранее известных моделей данная модель обеспечивает возможность получить распределение поля, потенциала и тока вдоль канала, а также тока в цепи источника питания в зависимости от величины входного тока, что важно для решения ряда физических и технологических задач. Расчет тока канала в нелинейном режиме позволяет оценить искажения при передаче изображения в ЭОП и оптимизировать режим использования МКП.

Список литературы

- [1] Беркин А.Б., Васильев В.В. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 98–102.
- [2] Беркин А.Б., Васильев В.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 15. С. 75–79.
- [3] Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Радио и связь, 1988. С. 85–102.
- [4] Then A.M., Pantano C.G. // Non-Crystalline Solids. 1990. Vol. 120. P. 178–187.