

УДК 621.383.8

И.Н. Гончаров

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ
ДАТЧИКОВ**

Микроканальные пластины являются компактными вакуумными усилителями пространственно-распределенных потоков частиц и излучений. Конструкция МКП представляет собой диск из свинцово-силикатного стекла и состоит из спеченного вместе множества (700-1000 шт.) идентичных микроканальных сот, каждая из которых в свою очередь включает до 5000-6000 шт. регулярно уложенных и спеченных вместе идентичных миниатюрных трубчатых каналов диаметром от 5 до 10 мкм в зависимости от разновидности МКП.

При приложении напряжения к металлизированным торцам пластины в процессе её эксплуатации по стенкам каждого из каналов структуры течёт ток проводимости, создающий в них однородное электрическое поле с линейно возрастающим потенциалом. Таким образом, все каналы превращаются в идентичные вторично-эмиссионные усилители. Первичный фотоэлектрон, несущий информацию об объекте, испущенный фотокатодом изделия применения, например электронно-оптическим преобразователем (ЭОП), испытывает у входа в канал первое соударение и генерирует определенное количество вторичных электронов характерное для восстановленного свинцово-силикатного стекла. Далее вторичные электроны под влиянием ускоряющего электрического поля канала движутся в сто-

рону его выхода, многократно бомбардируя стенки и выбивая новые вторичные электроны. Таким образом по каналу проходит размножающаяся электронная лавина. Общий коэффициент усиления сигнала на выходе МКП может достигать 10000.

Повышение эффективности и скорости решения задачи разработки новых конструкций МКП связано с наличием соответствующих средств САПР, базирующихся на математических описаниях физических процессов, характерных для явления канального электронного умножения. В общем случае задача исследования электронно-оптической системы (ЭОС) сводится к определению формы электродов и их потенциалов, обеспечивающих формирование пучка электронов с заданными характеристиками. Известно немало средств САПР, позволяющих проводить в интерактивном режиме поиск оптимальных геометрий расположений электродов ЭОС и напряжений на них для получения требуемых характеристик систем электронной оптики вакуумных электронных приборов с широкими электронными пучками, таких как электронно-лучевые трубки, электронно-оптические преобразователи и др. [1, 2].

Структуры, занимающиеся разработкой и производством изделий с вторично-эмиссионным канальным умножением, в значительно меньшей сте-

пени снабжены соответствующими САПР. Задача автоматизированного анализа поведения электронов в условиях вторично-эмиссионного умножителя, и в каналах МКП в частности, является гораздо более сложной поскольку предусматривает не только расчет траекторий электронов в условиях однородных и неоднородных электрических полей и различных граничных условий до взаимодействия с проводящими препятствием, но и моделирование вероятностного явления эмиссии и дальнейшего продвижения в электрическом поле соответствующего количества вторичных электронов.

Создание средств автоматизированного анализа процессов в канальном умножителе и прилегающих областях изделий применения (высоковольтном промежутке между МКП и катодолюминесцентным экраном ЭОП) подразумевает моделирование однородных и неоднородных электрических полей, отличающихся разномасштабностью, в объеме канала с учетом граничных условий, а также в зазоре пластина-экран; моделирование поведения электронов в условиях данных полей; моделирование процессов взаимодействия первичных электронов с резистивно-эмиссионным слоем канала и эмиссии вторичных электронов в соответствии с положениями теории; статистическую обработку результатов исследований.

Общий вид разработанного алгоритма САПР канальных умножителей приведен на рис. 1. Он предполагает решение поставленной задачи в обратном порядке, т.е. разработчиком предлагается конструкция микроканальной пластины и ее параметры согласно техническому заданию (ТЗ), которые в диалоговом режиме последовательно вводятся в ЭВМ. Далее осуществляется последовательный

расчет важнейших характеристик, вывод информации на монитор или печатающее устройство, после чего следует оценка результатов (этап «анализ»). Если проектное решение не получено, экспертным методом производится изменение элементов конструкции или параметров эксплуатации изделия в приборе применения (этапы синтеза), осуществляется пересчет системы с целью оптимизации. Таким образом, методом последовательных приближений достигается соответствие целевых функций поставленным в ТЗ условиям.

Среди учитываемых при расчетах элементов конструкции изделия необходимо выделить: средний диаметр канала, особенности его сечения в случае отклонения от круглой формы (эллиптичность, значения большой и малой полуосей), длину канала, средний шаг структуры каналов, длины и особенности конфигураций входной и выходной металлизаций стенок канала, расстояние пластина-экран в изделии применения. Вводимые параметры таковы: напряжение питания МКП, сопротивление МКП, разность потенциалов между выходной поверхностью пластины и экраном. Расчет производится в одноэлектронном режиме. Целевыми функциями являются: коэффициент усиления МКП, диаметр кружка рассеяния. Система позволяет осуществлять массу исследований связанных с влиянием различных факторов на усилительную способность каналов, энергетическое и угловое распределение электронов, вылетающих в высоковольтный экранный промежуток, поведение электронов в зазоре МКП – экран и др.

Из алгоритма видно, что для достижения поставленных целей необходимо разработать и реализовать в виде программного продукта математическую

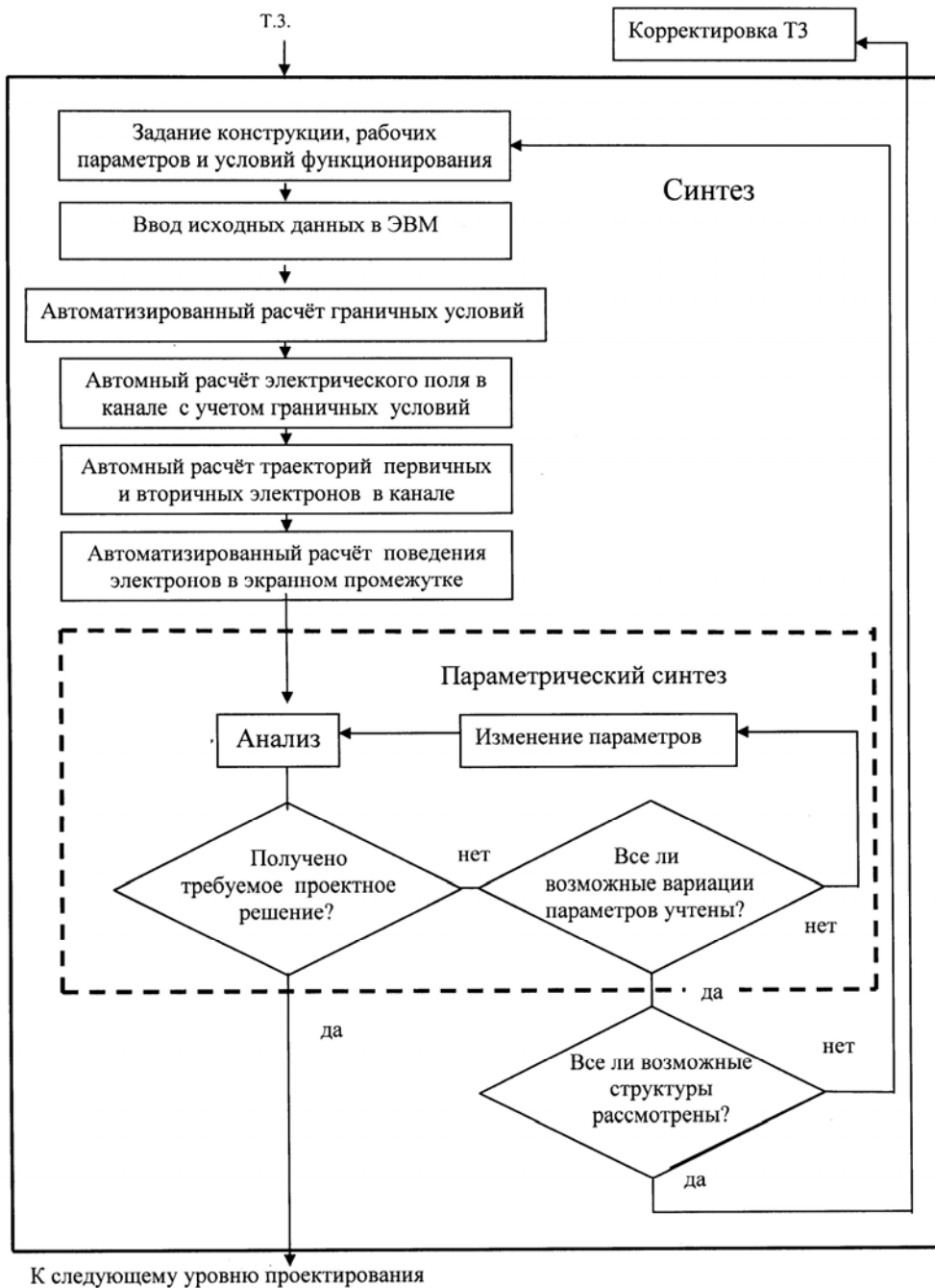


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного проектирования умножителя

модель электрического поля в условиях объема канала с учетом граничных условий, определяемых особенностями изделия, а также модель поведения первичных и вторичных электронов в канале и промежутке МКП - экран. Приведем далее вывод математической модели электрического поля канала МКП.

Данную модель необходимо строить на основе уравнения Пуассона для электрического поля в вакууме:

$$\nabla^2 U = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

где ∇^2 – дифференциальный оператор Лапласа, форма которого зависит от выбора координатной системы, $1/\text{м}^2$; U – потенциал поля, В; ρ – плотность объемного заряда, $\text{Кл}/\text{м}^3$. (суммарный электрический заряд всех электронов в импульсе, в случае с электронами он имеет отрицательный знак, поэтому правая часть уравнения (1) становится положительной).

Уравнение (1), описывающее в декартовой системе координат поле, обладающее вращательной симметрией, приобретает вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

где x , y , z – значения координат в декартовой системе, м.

Уравнение (2) является моделью распределения электрического поля в канале МКП и его необходимо решить. Наиболее удобно с точки зрения последующей реализации модели в виде программного продукта произвести приближенное (численное) решение данного уравнения методом конечных разностей. Его основные принципы таковы.

Непрерывное распределение потенциала внутри рассчитываемой области заменяется дискретным, т.е. значения потенциала определяются в некотором конечном множестве точек

(узлов). Совокупность узлов называется сеткой.

Дифференциальные уравнения в частных производных заменяются соответствующими уравнениями в конечных разностях, которые получаются заменой производных приближенными выражениями через конечные разности.

Результатом расчета распределения потенциала в канале методом конечных разностей являются значения потенциалов в ячейках сетки, расположенных внутри канала при известных значениях потенциала на границе области (на стенках канала), т.е. решается задача Дирихле для уравнения Пуассона.

Рассмотрим систему канала МКП, приведенную на рис. 2. Разделим рассчитываемую область путем нанесения на объем канала квадратной сетки. Стоит задача найти значения потенциалов, удовлетворяющие уравнению Пуассона (2) в ячейках сетки, расположенных внутри области, при известных граничных условиях, т.е. при известном распределении потенциала в стенках канала, а также на его входе и выходе.

Линии сетки целесообразно выбрать совпадающими с направлением координатных осей X , Y и Z . Шаг сетки следует принять равным 1 мкм поскольку: во-первых, каналы МКП имеют близкие габариты, во-вторых, это обеспечит достаточную точность производимых расчетов, в-третьих, как будет показано далее, в таком случае значительно упростится решение уравнения Пуассона.

Обозначим линии сетки (см. рис. 2), определяющие приращение вдоль оси X через i вдоль оси Y через j вдоль Z через k . В этом случае каждой ячейке сетки будут соответствовать свои индексы i , j , k . Выберем произвольную ячейку с индексами i , j , k (см. рис. 2).

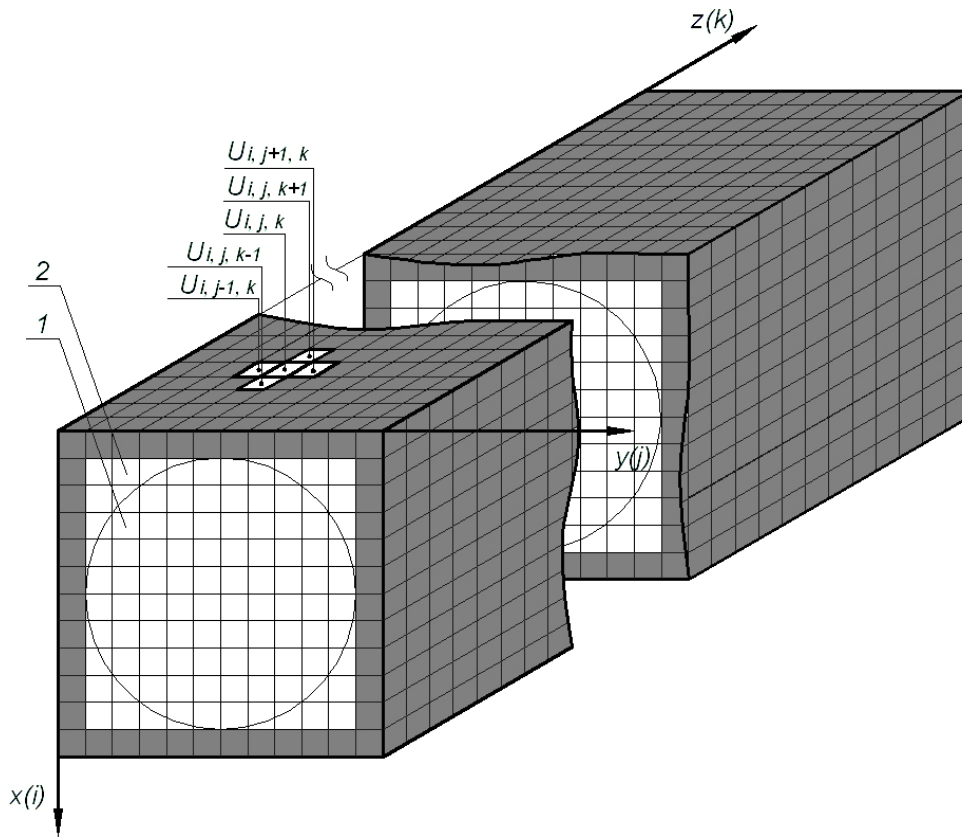


Рис. 2. Схема канала МКП: 1 – ячейка внутри канала (потенциал в них не известен); 2 – граничные ячейки значением потенциала

Если задача решена, то потенциалы в ячейках сетки должны удовлетворять уравнению Пуассона, записанному в форме для декартовой системы координат (2). С помощью формулы Тейлора, которая позволяет для известного значения функции и её производных в точке a , определить значение функции в соседней точке x , отстоящей от неё на малое расстояние $(x-a)$, равное шагу сетки, можно записать приближенные выражения для частных производных, входящих в уравнение (2). Формула Тейлора имеет вид [3]:

$$f(a+(x-a)) = f(x) = f(a) + \frac{x-a}{1} f'(a) =$$

$$= \frac{(x-a)^2}{2!} f''(a) + \dots + \frac{(x-a)^n}{n!} f^{(n)}(a) + \frac{(x-a)^{n+1}}{(n+1)!} f^{(n+1)} * [a + \theta(x-a)], \quad (3)$$

где θ - число, заключенное между 0 и 1.

Пусть $(x-a)$ - шаг сетки, обозначим его через h . Т.к. данное значение мало, перепишем выражение (3), ограничившись тремя первыми членами:

$$f(a+h) = f(x) = f(a) + \frac{h}{1} f'(a) + \frac{h^2}{2!} f''(a) \quad (4)$$

Примем за величину a узел с индексами i и j , тогда можно записать:

$$\begin{aligned}
U_{i-1,j,k} &\cong U_{i,j,k} - h \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}; \\
U_{i+1,j,k} &\cong U_{i,j,k} + h \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}; \\
U_{i,j-1,k} &\cong U_{i,j,k} - h \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}; \\
U_{i,j+1,k} &\cong U_{i,j,k} + h \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}; \\
U_{i,j,k-1} &\cong U_{i,j,k} - h \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}; \\
U_{i,j,k+1} &\cong U_{i,j,k} + h \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}.
\end{aligned} \quad (5)$$

Сложив почленно три группы, получим

$$\begin{aligned}
U_{i-1,j,k} + U_{i+1,j,k} &\cong 2U_{i,j,k} + \frac{h^2 \partial^2 U}{\partial x^2}; \\
U_{i,j-1,k} + U_{i,j+1,k} &\cong 2U_{i,j,k} + \frac{h^2 \partial^2 U}{\partial y^2}; \\
U_{i,j,k-1} + U_{i,j,k+1} &\cong 2U_{i,j,k} + \frac{h^2 \partial^2 U}{\partial z^2}.
\end{aligned} \quad (6)$$

Из уравнений (6) следует:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} &\cong \frac{U_{i-1,j,k} + U_{i+1,j,k} - 2U_{i,j,k}}{h^2}; \\
\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &\cong \frac{U_{i,j-1,k} + U_{i,j+1,k} - 2U_{i,j,k}}{h^2}; \\
\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} &\cong \frac{U_{i,j,k-1} + U_{i,j,k+1} - 2U_{i,j,k}}{h^2}.
\end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя выражения (7) в уравнение Пуассона (2), получим:

$$\begin{aligned}
\frac{U_{i-1,j,k} + U_{i+1,j,k} + U_{i,j-1,k} + U_{i,j+1,k} + U_{i,j,k-1} + U_{i,j,k+1}}{h^2} + \\
+ \frac{U_{i,j,k+1} - 6U_{i,j,k}}{h^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}
\end{aligned} \quad (8)$$

С учетом того, что $h=1$ мкм, величину потенциала центральной ячейки через потенциалы соседних можно определить из выражения

$$\begin{aligned}
U_{i,j} = &\left(\frac{U_{i-1,j,k} + U_{i+1,j,k} + U_{i,j-1,k} + U_{i,j+1,k}}{6} + \right. \\
&\left. + \frac{U_{i,j,k-1} + U_{i,j,k+1}}{6} \right) - \frac{\rho}{\varepsilon_0}
\end{aligned} \quad (9)$$

Вычитаемое в выражении (9) учитывает степень влияния пространственного заряда, формируемого электронной лавиной в канале, на распределение электрического поля в нем. Следует иметь в виду, что в режиме изделий применения, в частности в электронно-оптических преобразователях, коэффициент усиления МКП не превышает $10^3 \div 5 \cdot 10^3$ (при $U_{\text{МКП}}=700 \div 800\text{В}$), что недостаточно для развития процессов зарядового насыщения в канале. Зарядовое насыщение – это ограничение размножения электронной лавины, вследствие того, что на выходе канала плотность поверхностного положительного заряда становится весьма значительной и начинается искажение ускоряющего поля. Известно, что объемный заряд влияет на электрическое поле канала при условии, когда напряжение на МКП и усиление M достаточно велики ($M=10^4 \div 10^5$ и выше). Следует отметить, что такие режимы значительно более жесткие, чем те, что рассматриваются в данной работе поэтому уравнение (9) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned}
U_{i,j,k} = &\frac{U_{i-1,j,k} + U_{i+1,j,k} + U_{i,j-1,k} + U_{i,j+1,k} + \\
&+ \frac{U_{i,j,k-1} + U_{i,j,k+1}}{6}}{6}
\end{aligned} \quad (10)$$

Если далее для каждой внутренней ячейки сетки записать такое выражение, получится система линейных алгебраических уравнений, которая и является математической моделью электрического поля в канале МКП. Для её решения эффективно использовать итерационный метод, сущность которого заключается в последовательном неоднократном пересчете потенциалов в ячейках сетки, при известных граничных условиях. Количество итераций определяет точность расчета.

Результирующее распределение считается достоверным, если разница в величине потенциала одних и тех же ячеек сетки соседних итераций очень невелика. Она не должна превышать долей вольт.

Говоря о граничных условиях, необходимо учитывать следующее:

- диаметр и длину канала;
- распределение потенциала вдоль стенки канала;
- глубину металлизации во входной и выходной части канала;
- влияние внешних электрических полей, в частности в выходной части канала.

В заключение следует остановиться на основных результатах работы, они таковы:

1. Разработан алгоритм автоматизированного проектирования канального электронного умножителя, целевыми функциями которого яв-

ляются диаметр кружка рассеяния электронного изображения канала и усилительная способность канала.

2. Разработана математическая модель ускоряющего электрического поля в условиях канала МКП с учетом граничных условий. Проведенное численное решение данного уравнения позволило получить форму описания однородных и неоднородных полей, удобную для реализации в виде программного продукта.

Представленная математическая модель электрического поля в канале МКП, как показали соответствующие расчеты, имеет высокую степень адекватности и в комплексе с алгоритмом, приведенным на рис. 1, удобна для проведения инженерных теоретических исследований, а также при проектировании канальных электронных умножителей и других изделий вакуумной электроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бронштейн Б. Кейзан.* Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений. - М.: Мир, 1978 Т.1 - 335 с.

2. *Дебновецкий С.В., Журавлев О.В.* Численные методы анализа электронных

приборов. - Киев: УМК ВО, 1998. - 280 с.

3. *Пискунов Н.С.* Дифференциальное и интегральное исчисления. - М.: Наука, 1974. - 544 с. **ИДБ**

Коротко об авторе

Гончаров И.Н. – кандидат технических наук, доцент, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), кафедры "Электронные приборы", г. Владикавказ.

Статья представлена Северо-Кавказским горно-металлургическим институтом.

