

УДК 537.533

Управление пространственной информацией электронно-лучевых волновых полей в электронно-лучевых вычислителях и электронных микроскопах

Б. Н. Васичев

Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет),
Москва, Россия

Обсуждены проблемы синтеза пространственных электронных волновых полей с заданными амплитудами и фазами и возможные конструктивные решения реализации управляемых электронно-лучевых транспортов и фильтров, синтезирующих волновые поля с заданными свойствами для электронно-лучевых вычислителей.

В связи с необходимостью повышения быстродействия, увеличения надежности, снижения потребляемых мощностей, освоения новых диапазонов спектра электромагнитных колебаний все чаще приходится обращаться к

использованию разнообразных физических явлений. Это привело к возникновению многих новых направлений, таких как оптоэлектроника, акустоэлектроника, магнитоэлектроника, нейроэлектроника и микровакуумная электроника.

Совершенно новое направление исследований в области электронной оптики представляет направление по созданию электронно-лучевых вычислителей. Ведется разработка теории, конструкции, схем и технологии изготовления электронно-лучевых вычислителей на базе микровакуумных ячеек. Это очень перспективное направление создания вычислителей на свободных электронных пучках. Вычислители такого типа выгодно отличаются от получивших широкое распространение полупроводниковых микропроцессоров, так как они обладают в сотни раз большим быстродействием и во столько же раз большей эффективностью использования объема "кристалла". Они выгодно отличаются от аналогов — оптических вычислителей своей гибкостью управления и габаритными размерами. Электронно-лучевые вычислители представляют собой новый виток развития вакуумной микроэлектроники, имеющей большие перспективы. Использование электронной оптики, как элементов вычислительной техники в микровакуумном исполнении, позволит расширить номенклатуру и возможности элементов твердотельной электроники.

Электронная оптика, формирующая и преобразующая волновые поля электронного пучка, используется в различных областях знаний. Это не только электронная микроскопия, но и электронная литография, приборы ночного видения, а также другие ее применения. Электронная оптика включает в себя различные способы получения полной пространственной информации о волновых полях (об их амплитуде и фазе), а также методы обработки информации, переносимой полями.

В данной работе мы лишь коснемся некоторых теоретических проблем, возникающих при синтезе пространственных волновых полей с заданными амплитудами и фазами, и рассмотрим возможные конструктивные решения реализации управляемых электронно-лучевых транспорантов и фильтров, синтезирующих волновые поля с заданными свойствами для электронно-лучевых вычислителей, оставив в стороне вопрос о поле зрения [1—3]. Это одна из наиболее важных проблем электронной оптики. Для моделирования электронно-оптических систем используется метод расчета непараксиальных траекторий в широкоугольных и иммерсионных электронно- и ионно-оптических системах, содержащих электрические и магнитные поля [4]. Пакет WIDE-ANGLE OPTICS обеспечивает высокую точность расчетов траекторий, зависящих только от точности задания полей, в приосевой области и на большом удалении от оси, а также при произвольных значениях угла наклона траектории к оси (включая 90°) и произвольных значениях скорости частицы (включая случай нулевой начальной или промежуточной скорости).

Электронно-оптические элементы в миниатюрном исполнении [5] позволяют выполнять ряд операций над исходными информационными полями. Они допускают осуществление как операций сложения, умножения, интегрирования, так и операций логической алгебры, линейное и нелинейное усиление пространственных сигналов, а главное, выполнение операции Фурье-преобразования над сигналами, что не под силу полупроводниковым элементам микроэлектроники.

Двумерная электронно-лучевая голограмма Фурье

На рис. 1 представлена блок-схема получения двумерной электронно-оптической голограммы Фурье. При взаимодействии плоской однородной

волны с преобразователем волнового поля, волновое однородное поле преобразуется под воздействием вводимой информации и становится пригодным для преобразования Фурье. Эту операцию осуществляет блок фурье-преобразования. Приемник регистрирует преобразованное волновое поле, и сигнал поступает на дешифратор.

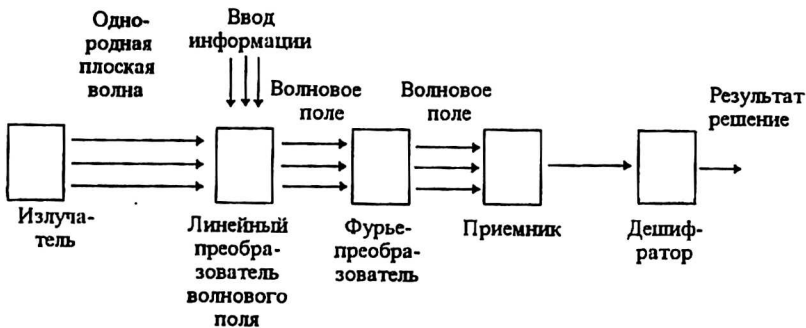


Рис. 1. Блок-схема получения двумерной электронно-оптической голограммы Фурье

Рис. 2 иллюстрирует электронно-оптическую схему электронно-лучевого фурье-преобразователя. Преобразователь волнового поля (транспортир) с амплитудным пропусканием $p(u, v)$ помещен в передней фокальной плоскости электронной линзы (u и v — пространственные координаты в этой плоскости). При освещении транспортира слева однородной плоской волной с единичной амплитудой волновое однородное поле преобразуется в волновое поле с заданными транспортиром свойствами (в локальных зонах изменяются амплитуда и фаза). Электронная линза преобразует это поле в волновое поле, отображающее фурье-преобразование волнового поля. В задней фокальной плоскости электронной линзы формируется фурье-голограмма. При использовании магнитной электронной линзы фурье-голограмма развернута на угол

$$\varphi = \sqrt{\frac{e}{8mU}} \int_a^b B_z dz = -\frac{14,8}{\sqrt{U}} \int_a^b B_z dz.$$

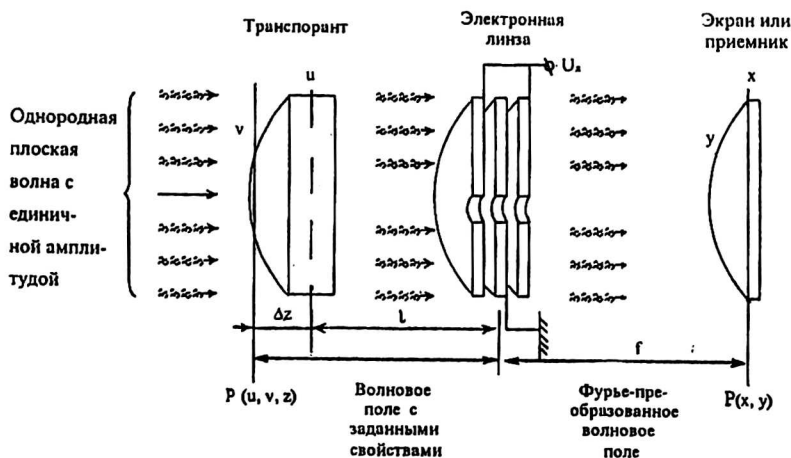


Рис. 2. Схема электронно-лучевого фурье-преобразователя на электростатической электронной линзе

Распределение потока электромагнитного излучения в заданной фокальной плоскости электронной линзы представляет собой фурье-преобразование функции $p(u, v)$

$$P(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} p(u, v) \exp(-i)(2\pi / \lambda f)(ux + vy) dudv,$$

где x, y — пространственные координаты в задней фокальной плоскости;
 λ — длина волны электромагнитного излучения (Дебройля);
 f — фокусное расстояние линзы.

Для тонкой электростатической электронной линзы имеем:

$$1 / f = \frac{1}{8\sqrt{U}} \int_a^b \frac{[U'(z)]^2}{U(z)^{3/2}} dz.$$

Из приведенных соотношений следует, что $P(x, y)$ зависит от ускоряющего напряжения электронного пучка U и оптической силы линзы $1/f$, связанной с напряжением, подаваемым на линзу U_n (или с силой тока возбуждения магнитной электронной линзы). Возможность варьировать величины U и U_n (или B для магнитной линзы) значительно расширяет возможности электронно-лучевого фурье-преобразователя.

Трехмерная электронно-лучевая фурье-голограмма

Уместно вспомнить, что аксиально-симметричное электромагнитное поле, т. е. электронная линза, обладает значительной глубиной резкости

$$\pm \Delta f = \pm \Delta z = \frac{f - 1}{2}.$$

Рассмотрим схему рис. 2, на которой транспорант расположен вблизи передней фокальной плоскости электронной линзы.

Если трехмерный транспорант (преобразователь) представить функцией амплитудного распределения $p(u, v, z)$, то амплитудное распределение электромагнитного излучения в задней фокальной плоскости электронной линзы с точностью до постоянного множителя будет иметь вид

$$P(x, y) = \iiint_{-\infty}^{\infty} p(u, v, z) \exp(-i)(\pi / \lambda f^2) z (x^2 + y^2) \times \\ \times \exp(-i)(\pi / \lambda f^2) (uz + vy) dudvdz.$$

Эти интегралы можно вычислить с помощью ЭВМ для простых объектов, таких как конечные отрезки прямых линий, плоскостей и простых кривых, произвольно ориентированных в трехмерном пространстве объекта. Для более сложных предметов указанные интегралы обычно аппроксимируют выражением

$$P(x, y) \approx \sum_{k=0,1,2,\dots} \left\{ \exp(-i)(\pi / \lambda f^2) k \Delta z (x^2 + y^2) \iint_{-\infty}^{\infty} p(u, v, k \Delta z) \times \right. \\ \left. \times \exp(-i)(\pi / \lambda f^2) (uz + vy) dudvdz. \right.$$

где Δz — постоянная.

Таким образом, с помощью последнего выражения трехмерный транспорант представляется в виде суммы равноотстоящих поперечных сечений, перпендикулярных оптической оси z .

Учитывая довольно большую глубину резкости электронных линз $\pm \Delta f$ и возможность легко и очень быстро изменять оптическую силу линзы и менять фокусное расстояние f (постоянная времени зависит от системы управления и собственной емкости линзы, которая очень мала), открывается уникальная возможность осуществления трехмерного фурье-преобразования изображений объемных транспорантов. Используя несколько слоев управляемых транспорантов, мы получаем возможность параллельного или поочередного считывания и преобразования больших объемов информации методом трехмерной голографии. Время считывания и обработки одного кадра (транспоранта) τ равно времени пролета электроном расстояния, равного удвоенному фокусному расстоянию линзы $2f$.

Время подготовки исходных данных для транспоранта и их ввод определяются скоростью современных электронных устройств и зависит от сложности решаемой задачи. Чтобы сократить это время, необходимо использовать не один, а несколько транспорантов, для которых расчет исходных данных выполняется параллельно. Если информация снимается непосредственно с матрицы или ЭОПа, скорость опознавания образа значительно сокращается. На рис. 3 представлена схема многоматричного электронно-лучевого опознавателя цели.

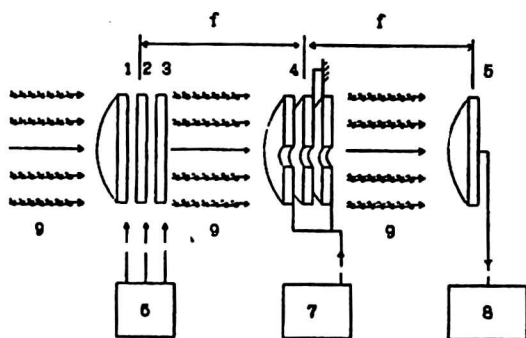


Рис. 3. Схема многоматричного электронно-лучевого опознавателя цели:

- 1—3 — транспоранты;
- 4 — электронная линза;
- 5 — приемник;
- 6 — генератор информации;
- 7 — блок управления линзой;
- 8 — система регистрации результата;
- 9 — волновые поля

Пространственная фильтрация электронно-лучевых волновых полей

На рис. 4 представлена схема осуществления когерентной электронно-оптической пространственной фильтрации. Входное изображение $g_1(x, y)$ формирует транспорант с переменным амплитудным пропусканием, расположенный в передней фокальной плоскости электронной линзы L_1 .

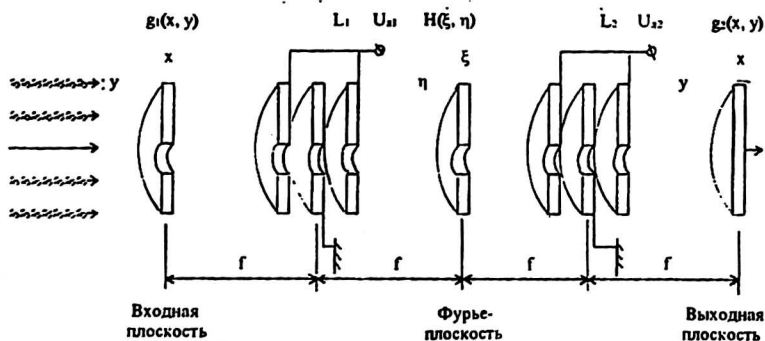


Рис. 4. Схема электронно-оптической пространственной фильтрации:
 L_1 и L_2 — электростатические электронные линзы

Фильтр также представляет собой транспорант с амплитудным пропусканием $H(\xi, \eta)$, соответствующим требуемому частотному отклику фильтра. Переменные ξ и η , соответствующие пространственным частотам, выражаются через пространственные переменные x и y следующим образом:

$$\xi = \frac{x}{\lambda f}; \quad \eta = \frac{y}{\lambda f}.$$

Распределение электромагнитного излучения (потока электронов) в задней фокальной плоскости электронной линзы L_2 и есть желаемое выходное изображение (решение):

$$g_2(x, y) = g_1(x, y) \times h(x, y),$$

где $h(x, y)$ — фурье-преобразование функции $H(\xi, \eta)$ и, следовательно, импульсный отклик фильтра (знаком \times обозначена операция свертки).

Частотный отклик фильтра $H(\xi, \eta)$ является комплексной функцией. Применение пространственной фильтрации — это преобразование кодов, согласованная фильтрация, повышение качества изображений, опознание образов, быстрые вычисления.

Разработчики ЭВМ ведут отчаянную борьбу за повышение быстродействия интегральных схем (ИС). Ведется работа по созданию сверхскоростных ИС (ССИС). Разрабатываются новые технологии, сложное и дорогое оборудование, такое как установки электронной литографии, использующие электронные пучки.

Электронные пучки позволяют создавать не только ССИС, но и сами могут использоваться для решения задач повышения быстродействия ЭВМ в качестве переносчиков и обработчиков массивов информации.

Влияние квантования (дискретности) при фурье-преобразовании электронно-лучевых волновых полей

Транспорант представляет собой набор электронно-оптических элементов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга в одной или разных плоскостях. Управление производится с помощью ЦАП, т. е. управляющий потенциал изменяется тоже шагами. Это вносит определенную специфику в работу вычислителя. Изображение, формируемое транспорантом, в этом случае будет квантовано. При квантовании изображения с малым шагом, т. е. когда число шагов квантования относительно велико, шум квантования можно представить как аддитивный белый шум, не зависящий от квантуемого сигнала. Используя такое представление, Андерсен и Хуанг [6] проанализировали влияние квантования на различные типы фурье-преобразования.

Обычно помехи накладываются на модуль и фазу фурье-преобразования. Влияние равномерного квантования величины или ее действительной и мнимой частей проявляется в добавлении независимого белого шума к амплитуде преобразованного сигнала (при этом мощность шума равна мощности шумов квантования). Влияние логарифмического квантования амплитуды или равномерного квантования фазы проявляется в виде аддитивного шума, налагающегося на амплитуду сигнала (спектральная плотность мощности этого шума пропорциональна квадрату фурье-преобразования оригинала).

Поскольку в большинстве случаев задачи вычислительный образ содержит в основном низкие пространственные частоты, то эти же частоты преобладают в шумах. Влияние квантования фазы светооптических систем было изучено Гужменом и Сильвестри [7]. Управляемые электронно-лучевые транспоранты можно рассматривать как дискретные источники информации, получаемой за

счет преобразования однородного волнового поля в неоднородное волновое поле с заданными свойствами в каждой дискретной точке.

Синтез неоднородных волновых полей и их фильтрация с помощью управляемых (синтезируемых) транспорантов и фильтров

Электрон можно представить в виде электромагнитной волны, обладающей свойствами частицы. Это делает возможным анализ сложных волновых полей электронных потоков. Учет нелинейных процессов взаимодействия волновых полей, в том числе с полями, генерируемыми электродами, дает возможность найти оптимальные решения преобразований информации, переносимой волновыми полями. Однородное волновое поле электронного пучка можно представить как суперпозицию отдельных сложных волн. Для описания волны, представляющей элементарные заряженные частицы, была выбрана волновая функция, которая в полной мере соответствует их физическим свойствам. Эта функция представляет собой поперечную волну, вырожденную в замкнутый гиротропный электромагнитный солитон, у которого вектор напряженности электрического поля совпадает с радиусом, и волна является поперечной, замкнутой на себя и сложена так, чтобы траектория имела вложенные витки. Число витков, как и их длина, квантованы. Радиус, степень поляризации волны и свойства физического вакуума — среды определяют свойства волны-частицы. Векторы напряженности другого знака направлены к центру солитона и взаимно компенсируются. Магнитная составляющая представляет собой продольную часть волны, а потому — биполярна. Этот солитон описывается суммой тензоров римановской кривизны и определенной комбинацией тензоров кручения и ковариантных производных тензора кручения (в первом приближении каждая составляющая описывается шестью степенями свободы: $x_1, x_2, x_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, а в целом она описывается 12 степенями свободы). С ее помощью удастся объяснить многие физические явления, которые в квантовой физике не объясняются, а постулируются, что затрудняет понимание физической сущности многих явлений и, в частности, связанных с электронной оптикой или оптикой заряженных частиц. Для преобразования однородного волнового поля электронного пучка в неоднородное волновое поле с заданными амплитудами и фазами в каждой локальной области по сечению поля используется транспорант.

В электронной микроскопии для преобразования однородного электронно-лучевого волнового поля с единичной амплитудой используют утонен-

ный до $100\text{--}2000 \text{ \AA}$ толщиной объект. Чем меньше ускоряющее напряжение, тем меньше длина свободного пробега электрона в тонкой пленке твердого тела. Переход к очень низким ускоряющим напряжениям делает невозможным использование подобных объектов в качестве транспорантов.

Кроме того, изготовление тонких транспорантов, пригодных для использования в электронно-лучевых вычислителях, — технически еще нерешенная задача. Решение ее станет реальным только с развитием электронно-лучевой или ионно-лучевой нанолитографии и нанотехнологии быстрого нанесения вещества в локальные точки и его удаления.

Пусть распределение волн электромагнитного излучения в плоскости голограммы имеет вид

$$g(x, y) = A(x, y)\exp[i\varphi(x, y)],$$

где A и φ — абсолютная величина амплитуды и фазы, соответственно для пространственных координат x и y .

Для получения такой голограммы необходимы два наложенных транспоранта. Функции синтезируемого транспоранта (или фильтра), например, может выполнять мультилинзовая (фасеточная) электронная оптика в миниатюрном исполнении.

Рассмотрим вариант из двух транспорантов. Первый из них должен формировать переменную плотности потока электронов, но не влиять на фазовую составляющую. Другими словами, его амплитудное пропускание пропорционально $A(x, y)$. Второй должен иметь возможность изменять фазовую составляющую волнового поля электронного пучка, но не оказывать влияния на амплитуду. Его пропускание должно быть пропорционально $\exp[i\phi(x, y)]$.

Первый транспорант представляет собой множество электронных микролинз, расположенных в одной плоскости с диафрагмой, расположенной между линзой и плоскостью фокуса (рис. 5, а). Изменением оптической силы линзы с помощью ЦАПа изменяют угол раскрытия пучка ϕ_1 . Интенсивность пучка на выходе из диафрагмы меняется пропорционально величине ϕ_1 . В случае электростатической линзы следует позаботиться о том, чтобы на ее выходе энергия электронов не изменялась. Заботиться о точности изготовления отверстий диафрагм не следует, так как их разброс легко компенсируется при настройке ЦАПов.

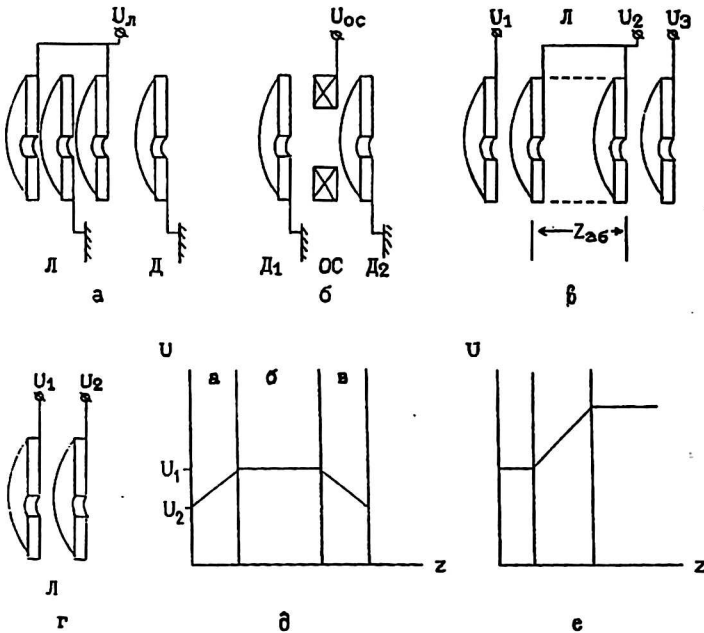


Рис. 5. Элементы электронно-оптического транспоранта (фильтра): а, б — ячейки транспоранта, изменяющие амплитуду излучения (интенсивность); в, г — ячейки транспоранта, изменяющие фазу излучения; д, е — изменение потенциала в ячейках транспоранта в и г; U_n — разность потенциалов на электродах линзы; U_1-U_3 — потенциалы на электродах линзы; U_0 — потенциал отклонения пучка; Л — линза; Д — диафрагма

Другой возможный вариант заключается в том, что используют схему (см. рис. 5, б), где пучок отклоняется от оси, и на выходе диафрагмы D_2 сила тока пучка меняется. Амплитуда $A(x, y)$ линейно изменяется при малых значениях угла отклонения ϕ_2 и переходит в экспоненциальную зависимость при больших значениях ϕ_2 . Угол ϕ_2 зависит от оптической силы линз, а следовательно, от разности потенциалов на электродах.

Второй транспортант представляет собой одиночные электростатические линзы с "толстыми" средними электродами (см. рис. 5, в). Они действуют следующим образом. На участке *a* (см. рис. 5, в) электроны ускоряются до установленного значения потенциалом U_1 (участок *a*). Затем электроны летят с постоянной скоростью v_1 (участок *b*). Время пролета этого участка электронами со скоростью v_1 равно $t_1 = Z_{аб}/v_1$. Изменение потенциала электрода приводит к изменению скорости электронов, а следовательно, к изменению времени.

Длина волны электронного пучка также меняется. Все это приводит к изменению фазы волнового поля в плоскости экрана, помещенного в задней фокальной плоскости. Фаза волны излучения $\varphi(x, y)$ меняется линейно с изменением разности потенциалов на электродах транспортанта.

Оптические оси линз первого транспортанта должны совпадать с оптическими осями линз второго транспортанта. Оба транспортанта легко совместить между собой и расположить в плоскости объекта линзы, осуществляющей фурье-преобразование.

Используя ячейки транспортанта как управляющие элементы, обеспечивающие активное программируемое усиление элементов пространственного сигнала и регулирование их параметров (амплитуды и фазы) за счет индивидуальных обратных связей, возможно влиять на величины и параметры пространственных волновых полей, расширяя возможности вычислительной среды. Такими комплексными возможностями не обладают световые вычислительные системы.

В ряде случаев практическая реализация мультилинзового транспортанта может оказаться довольно сложной технической задачей. Другой недостаток таких транспортантов — их дискретность.

Вычислительная среда представляет собой микровакуумные электронно-оптические ячейки с когерентным источником электронного пучка. Такая ячейка рассматривалась в работе [5].

Планарная полупроводниковая технология обеспечивает изготовление таких устройств. Их размеры (в плане) в перспективе могут быть не больше, чем полупроводниковые вентили. Используя объем "кристалла", удастся значительно увеличить его КПД, расширить эксплуатационные возможности.

Фурье-преобразование большинства образов имеет очень большой динамический диапазон, а именно амплитуды постоянной и низкочастотных составляющих оказываются намного больше, чем у высокочастотных составляющих. Это приводит к большим трудностям при регистрации фурье-преобразования. Чтобы упростить эту задачу перед преобразованием оригинала $p(u, v)$, его надо умножить на произвольный фазовый множитель $A = \exp[i \Theta(u, v)]$, который легко задается изменением потенциалов на соответствующем транспортанте, в результате чего величины коэффициентов Фурье становятся более однородными. Оптическим аналогом такой математической операции добавления фазового множителя является введение непосредственно перед транспортантом диффузного рассеивателя.

Выводы

1. Рассмотрено проявление дуализма элементарным зарядом с позиций его волновой природы.
2. Затронуты некоторые из основных проблем теории формирования фурье-голограмм методом электронной оптики: формирование двумерных и трех-

мерных голограмм, пространственной фильтрации высокочастотных волновых полей.

3. Рассмотрены вопросы влияния квантования "изображения" транспоранта, амплитуд и фаз волнового поля высокой частоты.

4. Рассмотрены проблемы синтеза неоднородных волновых полей с изменяемыми амплитудами и фазами в локальных участках поля.

5. Предложены конструктивные решения электронно-оптических управляемых транспорантов, осуществляющих изменения амплитуд и фаз высокочастотных волновых полей.

6. Рассмотрены пути реализации в миниатюрном исполнении вычислительной среды, в том числе систем элементов будущих ЭВМ.

7. Показано, что электронная оптика является более гибким инструментом, чем оптическая голография и полупроводниковая электроника.

Л и т е р а т у р а

1. Васичев Б. Н. Синтез электронно-оптических систем с заданной переходной характеристикой для решающих устройств//Известия РАН. Сер. физич.. 1993. Т. 57. № 8. С. 131—136.
2. Васичев Б. Н. Переходные характеристики электронно-лучевых решающих устройств//Тез. докл. на Всероссийской науч.-техн. конф. "Электроника и информатика". — г. Зеленоград, Россия. Ноябрь, 1995.
3. Васичев Б. Н. Разработка вакуумного электронно-лучевого решающего устройства//Тез. докл. на науч.-техн. конф. "Вакуумная техника". — г. Гурзуф, Украина, 1996. Сентябрь.
4. Васичев Б. Н., Розенфельд Л. Б., Михальцов Е. П.//Прикладная физика. 1997. № 2—3. С. 166—167.
5. Васичев Б. Н.//Там же. 1999. № 4. С. 38—48.
6. Anderson G. B. and Huang T. S.//Errors in frequency — domain processing of images, in 1969 Spring Joint Computer Conf.: AFIPS Conf. Proc., № 34. P. 173—185.
7. Goodmar J. W. and Silvestri A. M. Some effects of Fourier domain phase quantization//IBM J. Res. Develop. 1970. V. 14. Sept. P. 478—484.

Management information electron-beam wave fields in electron-beam calculators and electron microscope

B. N. Vasichev

Moscow State Institute of Electronics and Mathematicians (Technical university), Moscow, Russia

The mathematical and physical model of synthesis of intensive wave fields with given amplitudes and phases is discussed. The device for decision of this problem is submitted.