

УДК 621.385.833

Формирование электронных пучков малого сечения с энергией до 100 эВ в растровом электронном микроскопе

Г. И. Фатьянова, Ю. В. Куликов
ФГУП «НПО «Орион»», Москва, Россия

Б. Н. Васичев

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

Приведены результаты исследования низковольтных электронно-оптических систем, формирующих электронные пучки малого сечения с энергией до 100 эВ. Рассмотрены два варианта: с торможением электронов в зазоре магнитной линзы и с торможением электронов перед объектом.

Низковольтные электронно-оптические системы (НЭОС) все чаще находят применение как в научных исследованиях, так и при контроле за технологическими процессами. Представляет интерес электронная оптика на микролинзах с диаметром канала в несколько микронов. Особенно она перспективна в растровой электронной микроскопии и устройствах нанотехнологии. В настоящей работе исследовались системы формирования низкоэнергетичного электронного пучка при изменении энергии падающих на объект электронов в пределах 100–1000 эВ. Вы-

бор такой величины ускоряющего напряжения определялся тем, что при такой энергии пучок еще малочувствителен к влиянию внешних магнитных и “паразитных” электрических полей, возникающих в условиях технического вакуума на диэлектрических пленках, загрязняющих внутренние поверхности вакуумного устройства, и относительно небольшой величины дифракции электронов.

Использование в колонне низковольтного растрового электронного микроскопа (РЭМ) объективной линзы с торможением пучка элек-

тронов позволяет уменьшить протяженность области, где энергия электронов мала (и, соответственно, влияние "паразитных" полей невелико), до нескольких миллиметров, что должно способствовать повышению реального разрешения РЭМ. Кроме того, при этом можно реализовать режим работы электронной пушки с достаточно высокой электронной яркостью при ускоряющем напряжении 10 кВ и выше с относительно малым размером кроссовера и малой величиной относительного разброса скоростей электронов в пучке. Замедление электронов в зазоре магнитной линзы приводит к более эффективному воздействию магнитного поля на электроны пучка. Электростатическая иммерсионная линза оказывает дополнительное воздействие на фокусировку пучка и в определенных условиях может компенсировать хроматическую aberrацию магнитной линзы, так как имеет отрицательную хроматическую aberrацию, в то время как магнитная линза имеет положительную хроматическую aberrацию.

В процессе численных экспериментов рассматривались распределения электрических и магнитных полей при различных значениях энергий электронов, бомбардирующих объект. Методом последовательных приближений подбирались ампер-витки катушки возбуждения магнитной линзы так, чтобы параксиальная траектория электронов, вышедшая из осевой точки под углом к оси, пересекла ось в плоскости объекта на одном и том же расстоянии от главной плоскости линзы.

Известно, что в системе, формирующей тонкий электронный зонд, основные параметры зонда (диаметр и ток) и, следовательно, реальное разрешение РЭМ определяются aberrационными характеристиками объектива и параметрами используемой электронной пушки. Из литературных источников следует, что для формирования низкоэнергетического электронного зонда наиболее распространенными представляются конструкции объектива, сочетающие магнитную линзу и систему торможения пучка в немагнитном зазоре.

Альтернативным вариантом может быть торможение электронов пучка перед объектом. Радиальная составляющая сила, действующая на электрон в тормозящем поле, направлена к оси, и это способствует дополнительной фокусировке пучка. Эти варианты полностью не изучены. Поэтому в настоящем исследовании проводилось моделирование основного функционального элемента низковольтного РЭМ — его объективной линзы, работающей в разных условиях формирования пучка.

В качестве модели были использованы электронно-оптические системы (ЭОС) с автоэмиссионной электронной пушкой с диаметром острия около 5–10 мкм; конденсорная линза, обеспечивающая уменьшение пучка в 10 раз, с

диаметром канала, равным 8 мм, и немагнитным зазором 3 мм. Очевидно, что необходимым условием является возможность использования той или иной геометрии объективной линзы, которая способна обеспечить низкий уровень вносимых ею геометрических aberrаций. Другими важнейшими условиями являются: возможность реализации разработанной конструкции объектива с учетом практически достижимой точности изготовления и юстировки деталей линзы; обеспечение электрической прочности зазоров между электродами и электрической прочности используемых изоляторов; отсутствие влияния электрических вводов на работу магнитной линзы; отсутствие насыщения магнитопровода линзы.

Рассматривались два варианта ЭОС. Электроны ускоряются электронной пушкой до энергии 10 кэВ.

В первом варианте анод заземлен и соединен длинной электропроводящей трубкой с первым электродом электростатической иммерсионной линзы, расположенной в магнитном объективе. Второй электрод электростатической линзы имеет потенциал $-900 \div -9900$ В.

Во втором варианте торможение электронного пучка происходит непосредственно перед объектом. Последний находится под отрицательным потенциалом $-900 \div -9900$ В.

Численное моделирование ЭОС проводилось при изменении энергии падающих на объект электронов в пределах 100–1000 эВ при постоянном ускоряющем напряжении в электронной пушке (10 кВ), а также с различными немагнитными зазорами электронных линз (от 3 до 12 мм). Уменьшение ЭОС было выбрано равным 10, а соответствующие длины отрезков, которые отсчитываются от главной плоскости объектива в разные стороны до плоскости предмета и наименьшего сечения пучка (изображения), выбраны с учетом обеспечения фокусного расстояния 10 мм и, соответственно, равны 110 и 11 мм. Для размещения отклоняющих систем диаметр канала объектива равен 8 мм.

Были прослежены зависимости изменения диаметра выходного пучка от энергии пучка, а также изменения диаметра выходящего пучка от ширины немагнитного зазора линзы.

Для каждого варианта ЭОС была вычислена дифракционная ошибка при апертурном угле $0,5^\circ$ и при различных энергиях электронов на образце $\Delta_d = 0,61 \lambda / \alpha$, где λ — длина волны электронов, определяемая соотношением $\lambda = 12,26 / \sqrt{U_{ac}}$, причем λ — в ангстремах, U_{ac} — в электронвольтах. Реальный размер электронного пучка получен по известной формуле

$$D = \sqrt{D_{cal}^2 + \Delta_d^2}.$$

Такие исследования особенно важны для ЭОС, состоящих из микролинз, изготавливаемых

по МОП-технологии. Эта технология позволяет изготавливать как электростатические, так и электромагнитные линзы. Малые размеры этих линз допускают создание многолучевых систем, которые могут использоваться как в микролитографии, так и в нанотехнологии.

На графиках (рис. 1, 2) представлены зависимости диаметра электронного пучка от энергии электронов для разных зазоров в линзе и диаметра пучка от величины зазора.

На графиках (рис. 3, 4) представлены зависимости диаметра электронного пучка от энергии электронов для разных зазоров в линзе и диаметра пучка от величины зазора. На рис. 5 даны схема НЭОС с торможением электронов перед объектом и распределение электрического потенциала вдоль колонны, а на рис. 6 показан ход траекторий электронов в объективе НЭОС. На рис. 7 представлены схема НЭОС с торможением электронов внутри объектива и распределение электрического потенциала вдоль колонны.

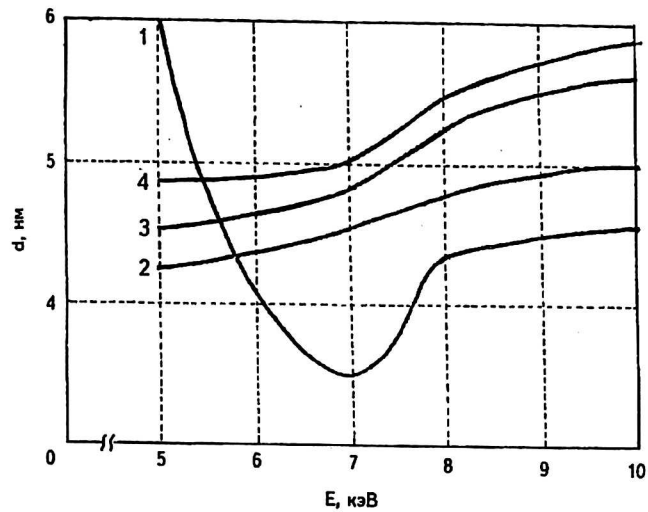


Рис. 1. Зависимость диаметра пучка d от энергии электронов E :
1 — $S = 5$ мм; 2 — $S = 8$ мм; 3 — $S = 10$ мм;
4 — $S = 12$ мм

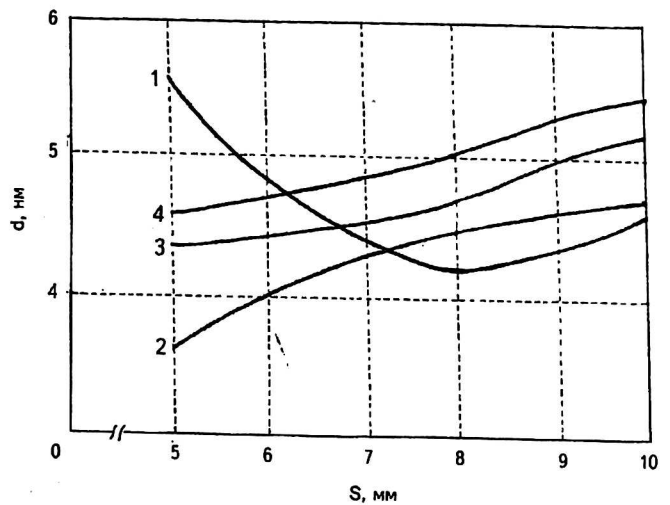


Рис. 2. Зависимость диаметра пучка d от ширины немагнитного зазора S :
1 — $U = 500$ эВ; 2 — $U = 700$ эВ; 3 — $U = 800$ эВ;
4 — $U = 1000$ эВ

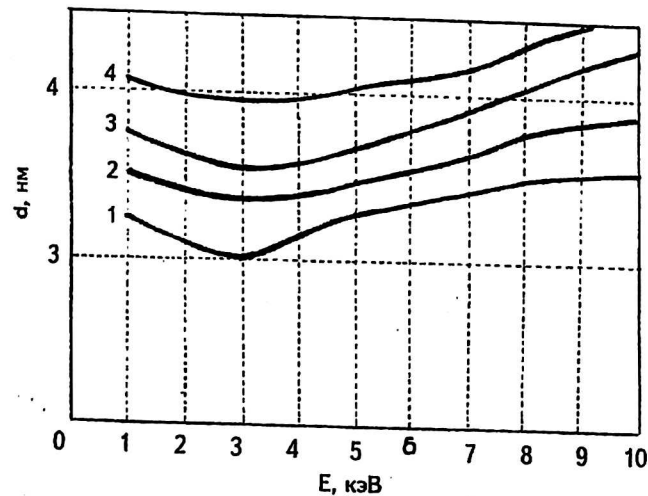


Рис. 3. Зависимость диаметра d пучка от энергии электронов E :
1 — $S = 3$ мм; 2 — $S = 5$ мм; 3 — $S = 8$ мм;
4 — $S = 10$ мм

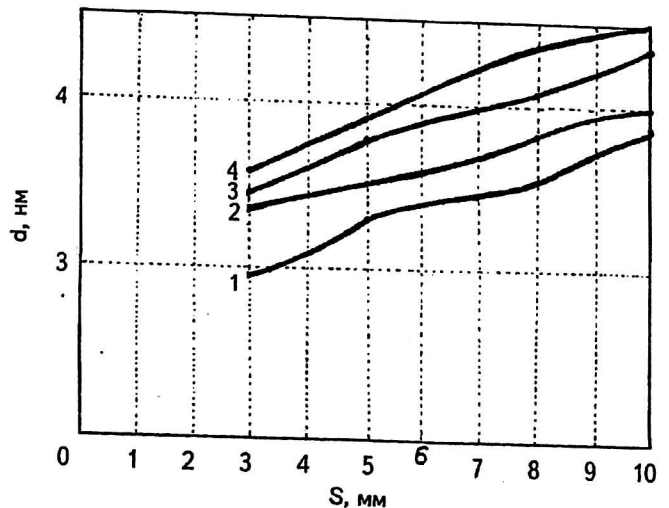


Рис. 4. Зависимость диаметра d пучка от ширины немагнитного зазора S :
1 — $U = 100$ эВ; 2 — $U = 300$ эВ; 3 — $U = 700$ эВ;
4 — $U = 1000$ эВ

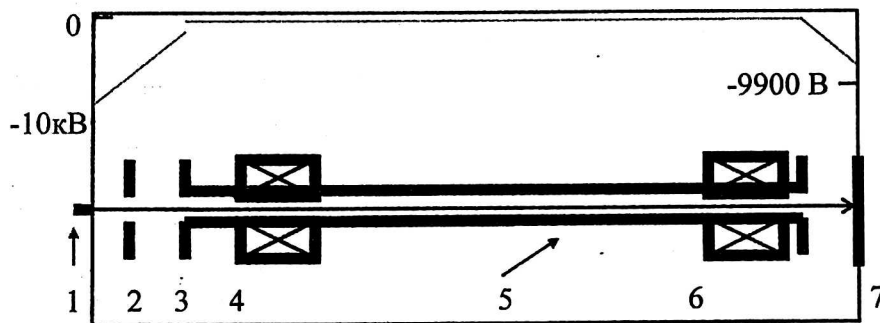


Рис. 5. Схема НЭОС с торможением электронов перед объектом и распределение электрического потенциала вдоль колонны:

1 — катод; 2 — управляющий электрод пушки — первый электрод иммерсионного объектива; 3 — анод — второй электрод иммерсионного объектива; 4 — конденсорная линза; 5 — лучевод под потенциалом 10 кВ; 6 — магнитный объектив; 7 — объект под потенциалом 9,9 кВ

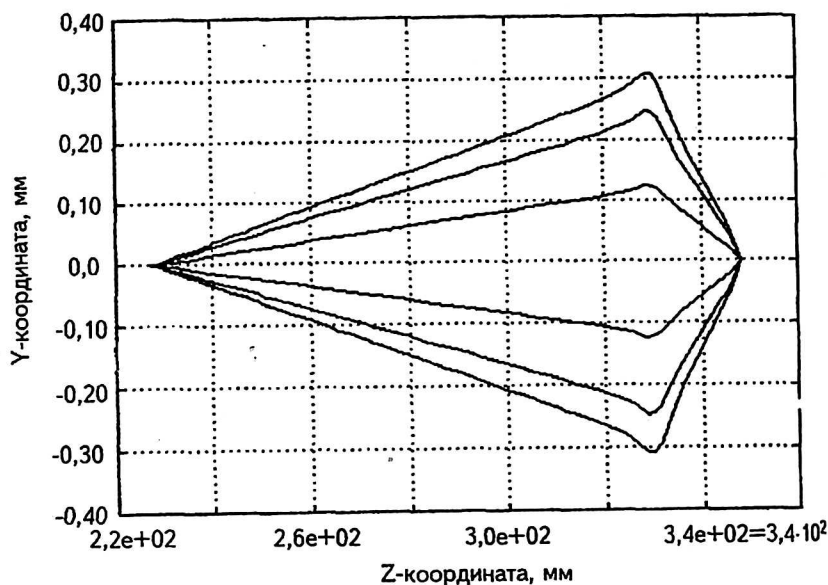


Рис. 6. Фокусировка электронного пучка

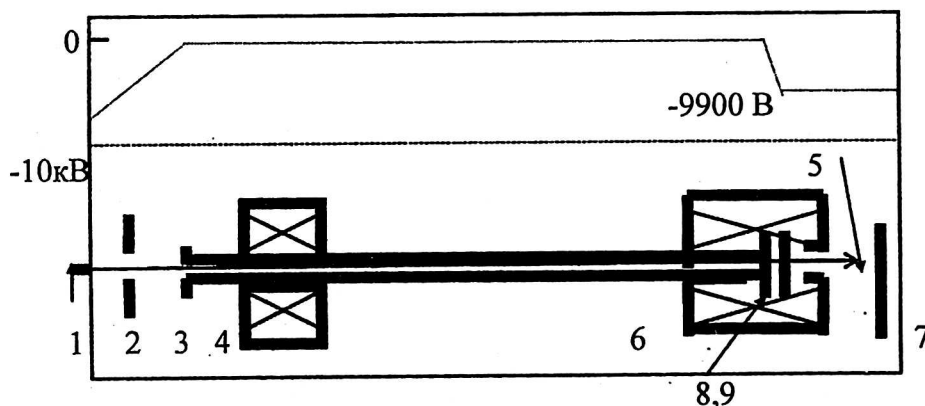


Рис. 7. Схема НЭОС с торможением электронов внутри объектива и распределение электрического потенциала вдоль колонны:

1 — катод; 2 — управляющий электрод пушки — первый электрод иммерсионного объектива; 3 — анод — второй электрод иммерсионного объектива; 4 — конденсорная линза; 5 — лучевод под потенциалом 10 кВ; 6 — магнитный объектив; 7 — объект под потенциалом 9,9 кВ; 8 и 9 — электроды иммерсионной линзы, тормозящей электроны с тормозящим полем

Заключение

Из приведенных результатов следует, что из двух рассмотренных вариантов лучшие результа-

ты получаются при торможении пучка электронов непосредственно перед объектом. Дело в том, что при торможении электронов в магнитной линзе с уменьшением их энергии снижается

и магнитно-движущая сила линзы — ее оптическая сила уменьшается. Сферическая aberrация больше у линз с малой величиной оптической силы. У слабых линз она резко возрастает.

Величина немагнитного зазора магнитной линзы оказывает существенное влияние на свойства НЭОС. При ускоряющем напряжении 300 В линза с немагнитным зазором в 3 мм

обеспечивает формирование минимального диаметра зонда в 30 Å.

Ток пучка при этом равен $8 \cdot 10^{-12}$ А при отношении сигнала к шуму 3/1.

Коэффициенты сферической и хроматической aberrаций, а также дифракции в наилучшем варианте НЭОС имеют следующие величины: $C_{sp} = 1,23$ мм, $\Delta_{sp} = 1,05$ нм; $C_{hr} = 0,76$ мм, $\Delta_{hr} = 0,48$ нм.

Forming the light-section 100 eV electron beams in a raster-type electron microscope

G. I. Fatyanova, Yu. V. Kulikov

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

B. N. Vasichev

The Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

Given are results of examination of low-tension electron-optical systems, which form the 100-eV electron beams of light section. Two alternate versions (with inhibiting action of electrons in a backlash of a magnetic lens and with inhibiting action of electrons before an object) are considered in the article.