

УДК 537.533

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ЯРКОСТИ

Л. Б. Розенфельд

Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики,
Москва, Россия

С. Ю. Шахбазов, И. Ю. Пахомова

Научно-исследовательский институт полупроводниковых материалов
и технологий, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы количественной оценки ошибок измерения электронной яркости различными методами. Показано, что основная ошибка, возникающая при использовании линзового метода, является следствием неправомерного предположения, что при размещении апертурной диафрагмы в главной плоскости линзы апертурный угол в плоскости изображения может быть вычислен как отношение радиуса диафрагмы к расстоянию между диафрагмой и плоскостью изображения. Проведена количественная оценка ошибки такого приближения и показано, что ошибка расчета апертуры зависит от конструкции измерительной системы, а ошибка определения яркости может достигать +100 %.

Электронная яркость, как известно [1], является одной из основных характеристик электронных пушек (ЭП), используемых в прецизионном электронно-оптическом научном и технологическом оборудовании, т. к. она определяет предельное значение плотности тока на объекте и, следовательно, максимальную яркость наблюдаемого в электронном микроскопе изображения, либо максимальный ток в зонде и, соответственно, скорость развертки зонда и производительность оборудования.

Средняя электронная яркость определяется как отношение тока пучка ΔI , проходящего в некотором направлении через элемент площади пучка ΔS , к телесному углу $\Delta\Omega$ [1]:

$$\bar{B} = \frac{\Delta I}{\Delta S \Delta\Omega} = \frac{j}{\Delta\Omega}, \quad (1)$$

где j — плотность тока.

В прецизионных электронно-оптических установках (например, в электронных микроскопах) для снижения аберраций электронно-оптической системы применяются пучки очень малой апертуры, вследствие чего используется только центральная часть пучка, формируемого электронной пушкой. Поэтому для данного класса приборов качество электронной пушки определяется максимальным значением электронной яркости на оси системы:

$$B = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \lim_{\Delta S \rightarrow 0} (\Delta I / (\Delta S \Delta\Omega)). \quad (2)$$

Максимально возможное значение электронной яркости с учетом релятивистской поправки может быть оценено для термокатода в режиме насыщения по формуле [2]:

$$B_{\max} = \frac{e j_s}{\pi k T} \Phi_{\text{рел}}, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{рел}} = \Phi_{\text{т}}(1 + \varepsilon\Phi_{\text{т}})$;
 $\Phi_{\text{т}} = U + kT/e$;
 $\varepsilon = e/2mc^2$;

- e — заряд электрона;
- k — постоянная Больцмана;
- T — температура катода, K ;
- m — масса электрона;
- c — скорость света;
- U — ускоряющее напряжение;
- j_s — плотность тока насыщения катода.

Реальная электронная яркость пучка, формируемого электронной пушкой (ЭП), не может превышать теоретический предел, но при неудачно выбранной электронно-оптической системе пушки может быть на несколько порядков ниже теоретического предела, что существенно ухудшает характеристики электронного микроскопа (или другого устройства), в котором используется данная ЭП. Вследствие этого необходима разработка достаточно точных методов экспериментального контроля реальных характеристик пушек.

Все способы измерения электронной яркости сводятся к определению плотности тока пучка электронов в плоскости, где телесный угол пучка ограничен достаточно малой величиной $\Delta\Omega$, заданной конструкцией измерительной системы. В свою очередь плотность тока определяется с помощью измерения тока, проходящего через малую площадку с площадью ΔS . Для реализации этого метода необходима система, состоящая из двух диафрагм и измерителя малых токов, позволяющая определить входящие в (1) величины с требуемой точностью. Измерительная система может также содержать одну или несколько линз. Каждый вариант системы имеет свои преимущества и недостатки как в части трудностей реализации и эксплуатации, так и в части обеспечиваемой точности.

Учитывая, что телесный угол связан с апертурным углом α соотношением

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$$

и что обычно $\alpha \ll 1$, с ошибкой порядка α^4 , выражение (1) преобразуется в известное выражение, используемое для вычисления яркости по результатам измерения тока I , прошедшего через две диафрагмы:

$$B = \frac{IL^2}{(\pi r_1 r_2)^2}. \quad (4)$$

Здесь L — расстояние между измерительными диафрагмами, имеющими соответственно радиусы r_1 и r_2 .

Из формулы (4) следует, что относительные ошибки измерения электронной яркости методом двух диафрагм в первую очередь определяются следующими соотношениями:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta I}{I};$$

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{2\Delta L}{L}; \quad \frac{\Delta B}{B} = -\frac{2\Delta r_1}{r_1}; \quad \frac{\Delta B}{B} = -\frac{2\Delta r_2}{r_2}.$$

При выводе формулы (4) предполагается, что пучок равномерно заполняет обе диафрагмы, в то время как реальное распределение тока в пучке неравномерно и в первом приближении описывается распределением Гаусса с полушириной кроссовера порядка десятков микрон. Для выделения относительно равномерной области пучка приходится использовать диафрагмы меньшего диаметра, что увеличивает относительную ошибку измерения их радиуса ($\Delta r/r$) и, следовательно, увеличивает ошибку определения яркости.

Нетрудно показать, что если известна полуширина распределения a и задана точность расчета яркости δ , радиус диафрагмы r_d должен удовлетворять условию

$$r_d < a\sqrt{2\delta}.$$

Смещение центра измерительной диафрагмы относительно максимума плотности тока вносит дополнительную ошибку в результаты измерений. Можно показать, что ошибка измерения яркости за счет смещения центра одной измерительной диафрагмы относительно оси пучка на расстояние p при малых его значениях определяется выражением

$$\Delta B / B = -\frac{r_d^2}{2a^2} \left[1 + 2 \left(\frac{p}{r_d} \right)^2 \right].$$

Так как при заданной величине измеряемой яркости ток через диафрагмы (как следует из формулы (4)) обратно пропорционален произведению квадратов радиусов диафрагм, то при малых радиусах диафрагм величина тока, которую надо измерить в эксперименте, оказывается достаточно малой (порядка нА и менее), что создает определенные трудности для точного измерения тока. В то же время относительная ошибка определения яркости равна относительной ошибке измерения тока через диафрагму, т. е. при уменьшении измеряемого тока с падением точности измерения тока будет падать точность измерения электронной яркости.

Следует отметить, что при измерении электронной яркости методом двух диафрагм, неравномерность распределения плотности тока в кроссовере (или в его изображении) является не единственной ошибкой метода.

Как было показано в [2, 3], точность вычисления электронной яркости при расчете ее по формуле (4) существенно зависит не только от размера кроссовера, распределения яркости в кроссовере и размера измерительных диафрагм, но и от расстояния между измерительными диафрагмами, а также от расстояния пучком электронов является необходимым, но недостаточным условием для реализации заданной точности измерений. Более того, недостаточным являются даже постоянство значения электронной яркости по радиусу кроссовера и изотропность потока электронов в пределах апертурного угла пучка. Это объясняется тем, что доля тока, проходящего через измерительную систему, в общем случае зависит от расстояния той или иной точки кроссовера от оси. Было показано, что ошибка измерения даже при равномерном распределении плотности тока в кроссовере и при радиусе кроссовера, превышающем радиус измерительных диафрагм, быстро возрастает до недопустимой величины при удалении кроссовера от системы измерительных диафрагм. Было также показано, что оптимальный режим измерения яркости может быть реализован в случае, если кроссовер размещается между измерительными диафрагмами. В частном случае, когда $r_1 = r_2 = r_{кр}$, кроссовер должен размещаться посередине между диафрагмами.

Однако реальное размещение кроссовера и его радиус зависят от оптики исследуемой электронной пушки, а возможности исследователя по размещению реальных диафрагм и их минимальным радиусам достаточно ограничены. На практике кроссовер чаще всего располагается в области электрического поля либо формируется его мнимое изображение, располагающееся за катодом. Это не позволяет разместить измерительные диафрагмы оптимальным образом,

следствием чего является существенно заниженная величина электронной яркости, определяемая методом двух диафрагм. Предложенные в [2, 3] формулы для коррекции ошибки, возникающей при неоптимальной системе измерения яркости, пригодны только для строго определенных математических законов распределения плотности тока в кроссовере, совпадающих с реальными законами распределения с той или иной степенью точности.

В связи с рассмотренными недостатками метода двух диафрагм для измерения электронной яркости используется также линзовый метод измерения яркости [3, 4]. Схема метода приведена на рис. 1. В этом методе апертура пучка ограничивается диафрагмой, размещенной в главной плоскости линзы $\Delta 1$ (а при использовании тонкой линзы — в середине зазора). При этом изображение кроссовера отображается на плоскость второй диафрагмы, и измеряется ток I , прошедший через эту диафрагму. Плотность тока в плоскости второй диафрагмы определяется как

$$j = \frac{I}{\pi r_2^2}, \quad (5)$$

а апертурный угол как

$$\alpha = \frac{r_1}{L}, \quad (6)$$

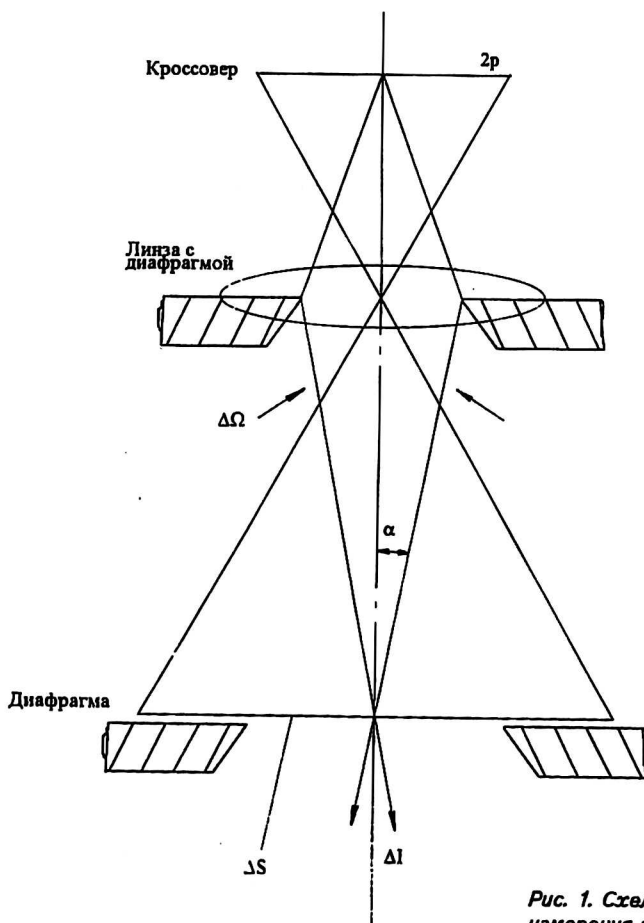


Рис. 1. Схема линзового метода измерения электронной яркости

Следовательно,

$$\Omega = \pi \left(\frac{r_1}{L} \right)^2. \quad (7)$$

В результате получаем

$$B = \frac{j}{\Omega} = \frac{IL^2}{\pi^2 r_1^2 r_2^2}. \quad (8)$$

Нетрудно убедиться, что формула (8) совпадает с формулой (4). Однако в этом методе предполагается, что радиус первой диафрагмы может быть выбран достаточно большим. Поэтому линза должна быть выбрана таким образом, чтобы радиус кружка размытия за счет аберраций линзы (в первую очередь сферической) был бы значительно меньше, чем радиус изображения кроссовера. При этом измеряемый ток получается значительно больше, чем в безлинзовом методе двух диафрагм, что повышает точность измерения. Размер второй диафрагмы выбирается таким, чтобы пропустить только центральную часть пучка. Ошибка, возникающая за счет конечных размеров диафрагмы, может быть определена по формуле (4). Для того чтобы использовать при измерениях вторую диафрагму большего диаметра, можно формировать в плоскости этой диафрагмы увеличенное изображение кроссовера.

В связи с изложенным предполагается, что линзовый метод имеет неоспоримые преимущества перед безлинзовым и не имеет недостатков. Однако опыт экспериментаторов, использующих этот метод, как утверждается в [5], показал, что линзовый метод, использованный на разных испытательных установках, дает не всегда сопоставимые результаты при измерении электронной яркости.

В связи с этим нами был проведен анализ ошибок измерения линзового метода. Очевидно, что основные результаты, полученные при анализе метода двух диафрагм, применимы и к линзовому методу (т. к. здесь также используются две диафрагмы). Основное отличие заключается в размещении первой диафрагмы в поле конденсорной линзы, что может послужить причиной появления дополнительных ошибок измерения, не связанных с аберрационными характеристиками линзы. Результаты анализа показали, что основным источником ошибок при определении электронной яркости линзовым методом является использование формулы (6) для вычисления апертуры пучка, сходящегося в плоскости второй диафрагмы. Действительно, как известно из световой оптики [6], апертурный угол пучка на выходе из оптической системы определяется не радиусом ограничивающей диафрагмы, а положением и радиусом выходного зрачка оптической системы:

$$\alpha = \frac{r_3}{L_3}, \quad (9)$$

где r_3 — радиус зрачка.

L_3 — расстояние от плоскости выходного зрачка до плоскости второй диафрагмы.

При этом положение зрачка не совпадает с положением апертурной диафрагмы, а радиус зрачка не совпадает с радиусом апертурной диафрагмы: размер и положение выходного зрачка зависят не только от размера ограничивающей диафрагмы и ее расположения относительно линзы, но и от оптической силы линзы.

Величины, входящие в правую часть формулы (9), непосредственно измерены быть не могут и должны быть рассчитаны с учетом реального распределения магнитного поля линзы по измеренным значениям радиуса первой диафрагмы и расстояния между диафрагмами.

При использовании формулы (6) не учитывается то, что существует ряд принципиальных различий между световой и электронной оптикой:

1. Оптическая система, содержащая стеклянные линзы, состоит из резко ограниченных областей, внутри которых коэффициент преломления постоянен. Предмет, диафрагмы и изображения предмета находятся в пространстве, где коэффициент преломления равен 1. В электрооптической системе фокусирующее магнитное поле распределено в пространстве от $-\infty$ до $+\infty$, причем это поле неравномерно распределено в пространстве. Вследствие этого коэффициент преломления в электронной оптике является непрерывной функцией координаты пространства, а оптические свойства магнитной линзы и положения кардинальных элементов при прочих равных условиях зависят от положения объекта (в отличие от обычной оптики).

2. Следствием изложенного в п. 1 является то, что траектория светового луча представляет ломаную линию (состоящую из отрезков прямых), причем излом происходит на границах линз. Траектория же электрона криволинейна от плоскости предмета до плоскости изображения, и в тех случаях, когда мы полагаем в первом приближении, что она прямолинейна в пространстве предметов или в пространстве изображения, законность такого предположения всегда должна оцениваться количественно. По этой же причине магнитная линза всегда должна рассматриваться как толстая.

3. Принципиальное отличие толстой магнитной линзы от толстой стеклянной линзы состоит в том, что в ней положение главных плоскостей обратно положению указанных плоскостей в стеклянной линзе [6, 7]. На рис. 2 и 3 приведены соответственно для стеклянной и магнитной линз положения главных плоскостей пространства предмета Z_{H_0} и пространства изображения Z_{H_1} .

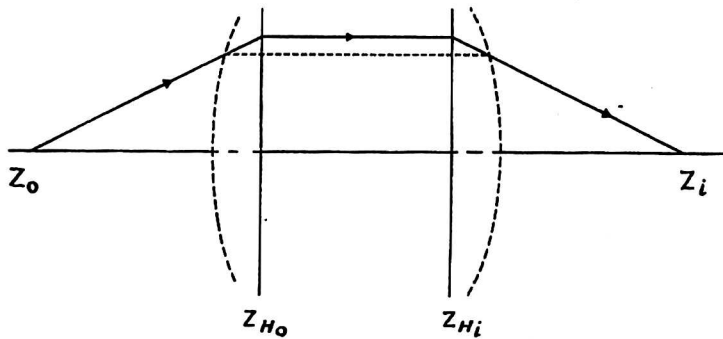
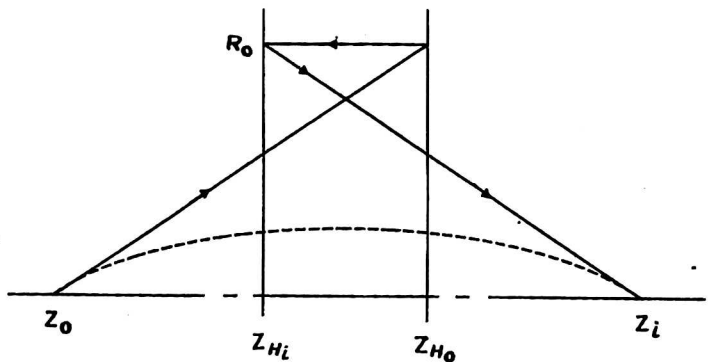


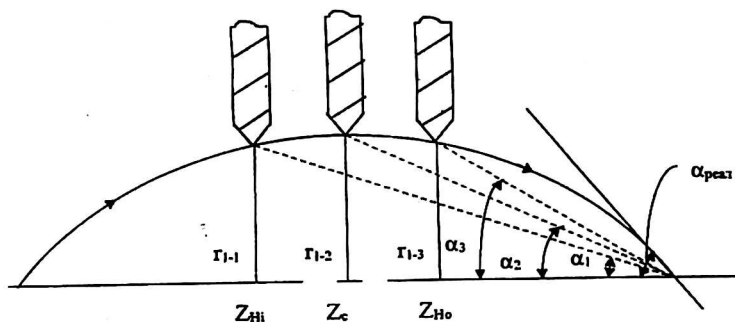
Рис. 2. Построение хода лучей в стеклянной линзе, заданной ее главными плоскостями Z_{H_0} и Z_{H_1} (Пунктиром показан реальный путь света внутри стеклянной линзы)

Рис. 3. Построение хода лучей в магнитной линзе, заданной ее главными плоскостями Z_{H_0} и Z_{H_1} (Пунктиром показан реальный путь пучка внутри линзы)



Там же показан ход параксиального луча (траектории) через линзу, представленную главными плоскостями. Реальный луч и реальная траектория представлены пунктирной линией. Из рис. 2 и 3 видно, что формула (6) неверна особенно в случае электронной оптики, т. к. радиус траектории внутри линзы (в том числе и в главных плоскостях) значительно меньше радиального отрезка, отсекаемого прямым параксиальным лучом в главных плоскостях Z_{H_0} и Z_{H_1} . На рис. 4 схематически показано, как изменяется расчетный апертурный угол при размещении измерительной диафрагмы в главных плоскостях магнитной линзы и в ее средней плоскости (Z_c). Из рис. 4 видно, что расчетное значение апертурного угла меньше реальной апертуры пучка, что приводит при расчете по формулам (6)—(8) к завышенным расчетным значениям электронной яркости (зачастую превышающим теоретический предел).

Рис. 4. Зависимость расчетного апертурного угла от положения апертурной диафрагмы. (Сплошной линией показан реальный путь пучка внутри линзы)



Для количественной оценки этой ошибки нами была в качестве первого приближения использована модель колоколообразного магнитного поля Глазера [7] для компоненты поля по оси Z . Достоинством такого приближения является то, что существует аналитическое решение для уравнения, описывающего параксиальную траекторию электрона.

Расчеты показали, что отношение V величины реального апертурного угла к величине, определяемой по формуле (6), колеблется в пределах от 1,1 до 1,4 раза при расстоянии от центра линзы до плоскости изображения в пределах от d до $10d$ (где d — полуширина распределения). Следовательно, значение яркости, рассчитанное по формуле (8), может превышать реальную величину примерно в V^2 раза (примерно в 1,2—2 раза). Ошибка определения апертурного угла уменьшается с ростом рабочего отрезка, однако с его ростом быстро возрастают коэффициенты сферической и хроматической aberrаций линзы, что также снижает точность определения электронной яркости.

Очевидно, что величина ошибки определения апертурного угла зависит от реальной формы магнитного поля, положения плоскостей предмета и изображения относительно максимума поля и от закона, по которому уменьшается напряженность магнитного поля по мере удаления от его максимума. Полученные результаты объясняют несопоставимость результатов, получаемых разными исследователями на разных экспериментальных установках.

Следует отметить, что обычно для измерения электронной яркости линзовым методом используют колонну просвечивающего электронного микроскопа с апертурной диафрагмой, размещенной в зазоре конденсорной линзы. При этом

для упрощения эксперимента возбуждается также объективная линза микроскопа, создающая увеличенное изображение кроссовера в плоскости второй диафрагмы, размещаемой обычно в районе проекционного тубуса или фотокамеры. Возбуждение конденсорной линзы подбирается таким, чтобы она проектировала кроссовер в предметную плоскость объектива. Апертурный угол в плоскости второй диафрагмы при этом пересчитывается с учетом увеличения объектива (или увеличения электронно-оптической системы, если в формировании изображения кроссовера участвуют также проекционные линзы). Такая схема измерения яркости вносит дополнительную ошибку в определение яркости вследствие того, что в просвечивающем микроскопе предметная плоскость обычно находится в достаточно сильном поле объективной линзы. Поэтому предполье объективной линзы на пути пучка к предметной плоскости осуществляет дополнительную фокусировку пучка, увеличивая его апертурный угол и, соответственно, увеличивая ошибку метода измерения яркости.

В ы в о д ы

1. Проведен анализ факторов, влияющих на точность измерения электронной яркости методом двух диафрагм и линзовым методом.

2. Рассмотрены методы инженерного расчета влияния на точность измерения электронной яркости следующих факторов:

ошибки измерения тока;

ошибок измерения радиусов диафрагм;

ошибки определения положения диафрагм;

ошибки центровки диафрагм;

влияния распределения плотности тока в кроссовере, соотношения размеров кроссовера и размеров измерительных диафрагм, а также влияния взаимного расположения диафрагм и кроссовера. Показано, что в реальных электронных пушках не удается, как правило, разместить измерительные диафрагмы так, чтобы метод двух диафрагм (безлинзовый) обеспечивал приемлемую точность измерения яркости.

3. Проведен анализ причин большой ошибки измерения электронной яркости, наблюдаемой при использовании линзового метода. Показано, что возникающая ошибка является следствием неправомерного предположения, заключающегося в том, что при размещении апертурной диафрагмы в главной плоскости линзы апертурный угол в плоскости изображения может быть вычислен как отношение радиуса диафрагмы к расстоянию между диафрагмой и плоскостью изображения. Показано также, что ошибка расчета апертуры зависит от положения измерительной диафрагмы в поле конденсорной линзы, формы распределения магнитного поля в линзе и расстояния между измерительными диафрагмами, а ошибка определения яркости может достигать +100 %.

4. Для достоверного измерения электронной яркости целесообразно использовать метод двух диафрагм, обеспечив требуемые для точных измерений размер кроссовера и его положение с помощью вспомогательной линзы (или системы линз). При этом диафрагмы должны размещаться вне поля линзы. Оптимизация такой системы должна быть проведена методом численного моделирования с учетом следующих факторов: размеров кроссовера; точности изготовления, измерения и позиционирования малых диафрагм; точности измерения малых токов, а также аберраций используемой линзы (или системы).

Л и т е р а т у р а

1. Manfred von Ardenne. Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Ultramikroskopie. 1956. № 1. P. 136—143, Berlin.
2. Кафатов А. А., Розенфельд Л. Б., Гарсюков С. А. //Изв. АН СССР. Сер. физ., 1977. Т. 41. № 5. С. 964—969.
3. Кафатов А. А., Розенфельд Л. Б., Гарсюков С. А. //Радиотехника и электроника. 1979. Т. XXIV. С. 1468—1471.
4. Lauer R. //Adv. Opt. Electron Micros. 1982. V. 8. P. 137.
5. Хокс П., Каспер Э. Основы электронной оптики. — М.: Мир, 1993. Т. 2. С. 477.
6. Кругер М. Я. и др.: Справочник конструктора опико-механических приборов. — Л., 1967. С. 760.
7. Глазер В. — М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. С. 763.

ANALYSIS OF FACTORS, INFLUENCING UPON ELECTRON BRIGHTNESS MEASUREMENT ACCURACY

L. B. Rozenfeld

Research Institute for Semiconductor Materials and Technologies, Moscow, Russia

S. Yu. Shahbazov, I. Yu. Pahomova

Moscow, Russia

Different methods for measurement of electron brightness are discussed, and necessary formulas for calculation of methods errors are produced. It is demonstrating, that the main error of lens method is result of erroneous formula usually using for calculation of aperture angle. For this reason the error of brightness value calculation can reach +100 %.