

УДК 537.533

## **Установка для межоперационного контроля полупроводниковых структур микрофотоэлектроники на работоспособность и анализа на отказ в технологическом процессе их производства**

*Б. Н. Васичев, С. А. Дицман*

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

*Е. П. Бочаров, В. Т. Савуков*

Государственное предприятие "НИИ электронной и ионной оптики", Москва, Россия

*Рассмотрены основные положения методов электронно-лучевого анализа на отказ и работоспособности полупроводниковых приборов. Дано описание установки ЭЛУ-КНТ, предназначенной для контроля материалов и изделий микрофотоэлектроники методом наведенного тока.*

Электронно-зондовые системы и поточечный принцип формирования электронно-оптических изображений обладают большими информационными возможностями, чем традиционные просвечивающие электронные микроскопы и тем более оптические микроскопы. Электронно-зондовые системы и наличие детекторов, регистрирующих различные по своей природе сигналы, позволяют извлечь богатейшую информацию об объекте. Кроме того, они обладают очень большой глубиной фокуса — на 2–3 порядка выше, чем у светового микроскопа. В сочетании с хорошей наглядностью изображения во вторичных электронах эта уникальная способность электронно-зондовых систем сделала их незаменимыми при исследованиях массивных объектов с ярко выраженным рельефом поверхности. В растровом режиме формирования изображения поверхности контролируемого объекта возможно наблюдать за контрастностью магнитных и электрических микрополей, возникающих над поверхностью полупроводникового объекта, и следить за их перемещениями при функционировании полупроводникового прибора. Появилась возможность наблюдать распределение потенциалов, а также измерять локальные потенциалы при исследовании объектов полупроводниковой микроэлектроники.

Метод наведенного тока (НТ) — один из наиболее эффективных методов получения как качественной, так и количественной информации о составе и физических свойствах полупроводниковых структур в локализованных участках объекта. С помощью этого метода можно визуально наблюдать местонахождение  $p-n$ -переходов, оценивать профиль области пространственного заряда, выявлять различные дефекты в области  $p-n$ -перехода, а также проводить измерения параметров, таких как диффузионная длина и время жизни неосновных носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации и т. д.

Однако имеющиеся растровые электронные микроскопы не позволяют в полной мере реализовать возможности метода НТ. Поэтому задачей настоящей работы является разработка специализированной электронно-лучевой установки для контроля работоспособности и надежности полупроводниковых приборов микрофотоэлектроники методом наведенного тока.

Эта установка учитывает специфику исследования и диагностики приборов микрофотоэлектроники, связанную с необходимостью подачи напряже-

области попадания пучка на поверхность полупроводника до середины  $p-n$ -перехода.

При постоянном токе имеет место динамическое равновесие образованных электронным пучком носителей заряда в данной точке.

Так как сигнал является функцией внутреннего электрического поля, то он представляет собой характеристику реально функционирующего  $p-n$ -перехода, а не границы распределения материалов с различным типом проводимости.

Очевидно, что значение результирующего сигнала зависит от ширины и глубины перехода, от атомных номеров веществ, находящихся под и над переходом, и от времени жизни и диффузионной длины неосновных носителей в этих веществах.

В зависимости от величины тока утечки на переходе по отношению к среднему значению индуцированного тока для детектирования используются различные схемы внешних цепей.

### **Исследование МДП-структур**

При исследовании электронным пучком структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) вблизи границы диэлектрик-полупроводник внешним смещением индуцируется инверсный слой. После этого слоя разделяют носители, которые генерируются в полупроводнике, прошедшем через металлический электрод и окисел  $\text{SiO}_2$  первичными электронами зонда. Ток, наведенный первичными электронами пучка, может быть измерен между металлом и полупроводником при наличии в окисле электрического поля (обычно соответствующего разности потенциалов между металлом и полупроводником). Измеряемый ток соответствует току поля и зависит от числа носителей, генерированных в окисле.

Применение метода НТ для анализа приборов, созданных по МДП-технологии, требует учета ряда их особенностей. Для предотвращения зарядки диэлектрического слоя и деградации структуры при работе на больших токах пучка (это связано с получением приемлемого соотношения сигнал/шум) необходимо стробирование электронного пучка.

Другая особенность применения метода НТ для анализа МДП-структур связана с тем обстоятельством, что граница раздела диэлектрик-полупроводник является блокирующим контактом, что приводит к дифференцированию сигнала и, как результат, зависимости контраста в режиме НТ от скорости сканирования и градиента изменений электронных свойств по поверхности. Отсутствие инжекционного тока из подложки через этот барьер резко ограничивает возможность получения информации о локальных электрофизических свойствах подложки и дает возможность получить только качественные данные о локальной структуре и свойствах полупроводниковой подложки МДП-структур. Однако применение модуляции по интенсивности электронного зонда приводит к переменному НТ в полупроводниковой подложке МДП-структур и позволяет детектировать вклад в сигнал полупроводника.

### **Анализ по контрасту изображения в режиме НТ**

Все детекторы, влияющие на генерацию в рекомбинацию носителей, а также на их диффузию независимо от того, с полем или без поля проводник, приводят к формированию контраста.

Факторы, влияющие на контраст изображения при контроле полупроводника: локальное увеличение рекомбинации поверхностных носителей индуцирует рекомбинацию носителей, диффундирующих к переходу, что приво-

дит к локальному уменьшению сигнала; локализованные дефекты (микротрещины, нагар, выделения) могут вызвать изменение сигнала за счет рекомбинации и изменения коэффициента обратного рассеяния электронов; сетка дислокаций, образовавшаяся, например, при планарной диффузии, вызывает локальные изменения уровня рекомбинации, тогда как нагромождение дислокаций, возникшее в результате аномальной диффузии, приводит к изменению глубины перехода; ловушки могут располагаться в самой зоне пространственного заряда.

### **Измерение диффузионной длины и времени жизни неосновных носителей методом НТ**

Одной из важнейших характеристик транзисторов является коэффициент усиления по току.

В связи с этим количественное измерение точных параметров, таких как диффузионная длина и время жизни неосновных носителей, является важной задачей. Основным преимуществом измерения этих параметров методом НТ являются большая локальность определения  $L$  и  $\tau$ , а также возможность исследования этих параметров в глубине слоистых структур. С этой целью измеряют ток одного из переходов. Например, эмиттер—база или коллектор—база при изменяющемся ускоряющем напряжении пучка  $U_{ус}$ . Активные области в полупроводниковых приборах обычно разделяют слоями окислов, либо изолирующими  $p-n$ -переходами, либо они могут летать под внутренними слоями металлизации. Следовательно, возрастающая с ростом ускоряющего напряжения глубина проникновения электронного пучка однозначно определяет, какая из областей ответственна за наблюдаемый в режиме НТ эффект.

Очень часто обработку сигнала в НТ проводят с помощью дифференцирования или  $Y$ -модуляции, что позволяет в случае дифференцирования получить больше информации, так как из сигнала  $p-n$ -перехода исключается постоянная составляющая. Метод представления сигнала на экране ЭЛТ, называемый  $Y$ -модуляция, упрощает сравнительный анализ фотографий одного и того же полупроводникового прибора при различных параметрах электронного пучка.

Кроме того, смещение электронного пучка на экране ЭЛТ пропорционально интенсивности сигнала в НТ и, следовательно, области с сигналом НТ будут явно видны по отношению к областям с низким, заданным уровнем сигнала.

Для сбора и регистрации НТ обычно организуется так называемая короткозамкнутая цепь.

### **Контроль распределения легирующих примесей методом НТ**

Распределение легирующих примесей и определение мест аномально высокого или низкого легирования являются важной характеристикой, влияющей на функционирование полупроводниковых приборов.

В настоящее время широкое распространение получили методы интегрального определения концентрации носителей в полупроводниковых приборах, основанные на измерении его вольт-фарадных характеристик и эффекте Холла. Однако эти методы дают интегральную оценку уровня легирования, но не способны оценить локальные вариации уровня легирования и диффузионной длины. В связи с этим хорошим дополнением к ним могут служить методы исследования образцов с использованием режима НТ, которые, хотя и не дают численных значений, но способны быстро давать качественные картины распределения легирующих примесей, определять места аномально высокого или низкого легирования.

В основе методик анализа распределения легирующих примесей методами НТ лежит тот факт, что ширина обедненной зоны в полупроводнике зависит от концентрации свободных носителей заряда (уровня легирования).

В свою очередь, сигнал НТ определяется эффективностью сбора носителей заряда, которая сильно зависит от ширины обедненного слоя.

При попадании электронного луча на поверхность образца часть электронно-дырочных пар генерируется в обедненном слое, возникающем на границе металл-полупроводник, и практически без рекомбинации дрейфуют в поле барьера к контактам, другая часть пар рождается за пределами обедненной зоны и достигает ее в процессе диффузии. Очевидно, что на этот процесс оказывает влияние рекомбинация носителей, которая уменьшает количество электронно-дырочных пар, достигших обедненного слоя. Величина диффузионной компоненты НТ характеризуется длиной диффузии. Таким образом, сигнал наведенного тока состоит из двух компонент: дрейфовая (определяется шириной обедненного слоя) и диффузионная (определяется длиной диффузии неосновных носителей).

Методика построения профилей легирования основана на различии механизмов формирования контраста в НТ в зависимости от уровня легирования и диффузионной длины неосновных носителей.

При низком легировании ширина обедненной зоны очень чувствительна к изменениям его уровня. Вклад диффузионной компоненты в НТ пренебрежимо мал, так как все пары носителей, родившиеся вне обедненной зоны, рекомбинируют, не успевая его достигнуть. Потому контраст изображения определяется в основном дрейфовой составляющей, т. е. флуктуацией легирующей примеси.

В области, характеризующейся очень высоким уровнем легирования, обедненный слой очень тонок, и его размеры изменяются незначительно с изменением уровня легирования. Здесь контраст изображения обусловлен пунктуациями диффузионной длины.

Пространственное разрешение при низких уровнях легирования определяется размерами области генерации пар носителей, т. е. практически размерами первичного пучка. При высоком уровне легирования разрешение имеет порядок диффузионной длины неосновных носителей.

Таким образом, методика применима в области низких уровней легирования  $1 \cdot 10^{13} \div 1 \cdot 10^{17}$   $1/\text{см}^3$ . Кроме того, она базируется на ряде следующих предположений: размеры контакта Шотки намного больше диффузионной длины; толщина образца намного больше диффузионной длины; генерация носителей осуществляется по закону Гаусса, и все носители, образовавшиеся в обедненной зоне, собираются барьером Шотки. Контраст изображения в НТ зависит также от соотношения между шириной обедненной зоны и длиной свободного пробега электрона первичного пучка.

В зависимости от глубины проникновения электронов первичного пучка (эффективной длиной пробега  $R_{эф}$ ) определяются три механизма формирования контраста. В случае, когда  $R_{эф} > W$  ( $W$  — внутренний квантовый выход рекомбинационного излучения), контраст определяется распределением легирующей примеси, т. е. при сравнимых значениях ширины обедненной зоны и длины пролета электронов эффективность сбора носителей постоянна, и контраст исчезает. Если  $R_{эф} < W$ , эффективность сбора носителей максимальна и не зависит от ширины обедненной зоны. Однако при высокой интенсивности первичного пучка (высокий уровень инжекции) контраст снова появится, правда, в инвертируемом виде, и наибольшей амплитуде НТ соответствует концентрация примеси.

Таким образом, метод НТ дает возможность получать профили распределения примеси в слаболегированных материалах, для которых классические методы распределенного сопротивления и травления нечувствительны; получать профили распределения примесей в сильнолегированных образцах с высоким пространственным разрешением.

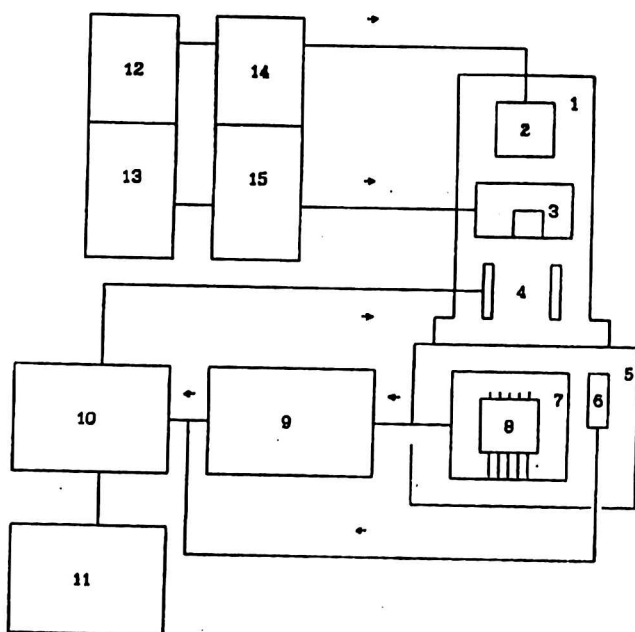
К недостаткам перечисленных методик можно отнести невозможность получения точных численных значений; специальный вид образца; сложную процедуру подготовки материалов для изучения.

### Устройство и принцип действия установки ЭЛУ-КНТ

Полупроводниковые объекты микрофотоэлектроники имеют специфические особенности при их исследовании и диагностике фоточувствительных элементов электронно-зондовым методом. Эта специфика связана с необходимостью подачи рабочих напряжений на выбранные элементы (для многоэлементных фотоприемников – МЭФП), съема сигнала с этих и рядом расположенных элементов, выявления их взаимного влияния, диагностики критических участков, областей пробоя и т. д. Все это требует создания специализированной электронно-лучевой аппаратуры с многофункциональной системой регистрации сигнала наведенного тока, учитывая специфику полупроводниковых устройств в условиях их функционирования, аналогичным условием применения.

Электронно-лучевая ЭЛУ-КНТ состоит из нескольких сложных функциональных узлов, каждый из которых имеет специализированное назначение.

На рисунке представлена блок-схема электронно-лучевой установки, осуществляющей контроль полупроводниковых материалов и приборов микрофотоэлектроники на промежуточных стадиях их изготовления.



**Блок-схема электронно-лучевой установки:**

- 1 – ЭОС; 2 – электронная пушка; 3 – электронные линзы и стигматор; 4 – отклоняющая система; 5 – технологическая камера (камера объектов); 6 – детектор вторичных электронов; 7 – столик объектов; 8 – объект исследования; 9 – преобразователь сигналов НТ (блок для регистрации сигналов НТ); 10 – видеоконтрольное устройство; 11 – ЭВМ; 12, 13 – высокостабильные источники питания; 14, 15 – блоки управления ЭОС

Электронно-оптическая система (ЭОС) включает в себя электронную пушку, три электронные линзы, стигматор и отклоняющую систему. Основная задача этого функционального узла состоит в том, чтобы сфокусировать электронный зонд (пучок) с заданными параметрами, которыми являются диаметр пучка на поверхности анализируемого объекта, плотность тока или полный ток пучка, положение в пространстве и времени воздействия этого пучка на анализируемый участок объекта. Первые два параметра пучка обеспечиваются с помощью регулирования оптической силы электронных линз ЭОС; регулировка и стабильность их параметров — с помощью функциональных устройств — источников высокостабилизированного питания и системой поддержания требуемого для работы ЭОС температурного режима за счет системы охлаждения термовыделяющих элементов проточной водой. Третий и четвертый параметры пучка регулируются с помощью функционального узла — видеоконтрольного устройства (ВКУ) и, в частности, генератора развертки, являющегося неотъемлемой частью ВКУ. Юстировка ЭОС осуществляется как с помощью механических систем юстировки, так и с помощью специальных электронно-оптических отклоняющих систем. ЭОС соединена с технологической камерой, где с помощью координатного стола испытуемый объект может перемещаться в пространстве и электрически соединен с блоком преобразования сигналов НТ, располагаемым вне технологической камеры (камеры объектов). Технологическая камера снабжена детектором вторичных электронов для прицельного контроля и визуализации объекта в привычном виде и системой охлаждения столика объектов.

Образец помещают в специальный держатель с электрическими зондами, расположенный на координатном столе. Его электрические выводы соединяют с кабелем от блока преобразования сигнала НТ. В технологической камере и ЭОС давление откачивается до рабочего остаточного. Функционирование ЭОС и технологической камеры обеспечиваются с помощью системы вакуумной откачки.

Источники питания обеспечивают питанием электронную пушку, электронные линзы, стигматор, детектор вторичных электронов. Их выходные напряжения и токи устанавливаются согласно требованиям контроля объектов.

ВКУ формирует на экране ЭЛТ изображение объекта во вторичных электронах или сигналах НТ. Перемещая образец последовательно или выборочно с помощью координатного стола, контролируют испытуемый объект.

Загрузку и выгрузку анализируемого объекта из технологической камеры осуществляют с помощью шлюзового устройства.

### **Блок регистрации наведенного тока**

Данный блок предназначен для формирования сигнала НТ, наведенного электронным зондом в полупроводниковом образце; измерения величины этого сигнала и обеспечения передачи сигнала НТ на блок индикации ВКУ; визуального наблюдения на экранах распределения НТ по поверхности исследуемого объекта.

Блок выполнен в виде автономного узла, что позволяет при незначительной модернизации использовать его для работы с различными моделями электронно-зондовых приборов. В состав блока входят блок коммутации и питания (БКИП), блок для измерения величин наведенного тока и тока электронного зонда (в том числе микровольтнаноамперметр Ф 136); широкополосный усилитель сигнала НТ; осциллограф.

Работа блока основана на использовании электрического сигнала, возникающего в цепи замкнутого  $p-n$ -перехода при облучении объекта исследова-

ния электронным зондом. Физические основы этого метода рассмотрены выше. Сигнал НТ возникает в результате образования в полупроводнике электронно-дырочных пар и диффузии носителей заряда в область объемного заряда вблизи  $p-n$ -перехода. Рекомбинация носителей заряда может происходить также на точечных дефектах в материале, дислокациях, включениях и т. п. Сигнал НТ возникает и в местах дефектов, связанных технологическими нарушениями при производстве изделий микроэлектроники, фоточувствительных устройств, многоэлементных фотоприемников (МЭФП) и других полупроводниковых изделий. Это позволяет контролировать не только изделия, но и сам технологический процесс.

### **Блок коммутации и питания для МЭФП**

Предназначен для регистрации тока, наведенного в полупроводниковом образце электронным пучком его измерения, а также обеспечения возможности визуального наблюдения величины наведенного тока. Значение тока изменяется при сканировании образца электронным пучком и определяется структурой фоточувствительных элементов наличием дефектов в них, в том числе скрытых под поверхностью, что другие методы дефектоскопии сделать не позволяют.

Блок коммутации и питания должен выполнять следующие функции: иметь возможность подавать питающее напряжение на любой фотоэлемент МЭФП, а также на всю линейку; иметь возможность подачи напряжения на любую комбинацию элементов для исключения тех из них, которые имеют повышенные шумы, замыкания, пробои, дефекты в материале, контактах и т. д.; иметь возможность вывода сигнала НТ как на видеоконтрольное устройство (ФКУ) установки, так и на осциллограф для исследования НТ и его количественных характеристик по видеосигналу; вывод видеосигнала НТ как через емкостную связь на предусилитель (с различной постоянной времени), так и непосредственно на широкополосный усилитель в режиме регистрации полного сигнала НТ; иметь возможность измерения сигнала НТ внешним прибором; иметь возможность измерения тока электронного зонда, возбуждающего сигнала НТ, что позволяет проводить измерения условий возбуждения и фоточувствительности по площадке в режимах сканирующего и неподвижного зонда.

В состав блока входит источник питания МЭФП с регулировкой напряжения от 0 до 400 В с положительной и отрицательной полярностью. Габариты блока БКИП допускают его расположение в непосредственной близости от технологической камеры установки для исключения возможных наводок и помех в видеосигнале. Коммутационные связи блока допускают работу прибора в режимах комбинированного наблюдения изображений объекта (НТ и вторичные электроны, вторичные электроны с НТ, отраженные электроны и др.).

При сканировании электронного зонда по образцу, к которому прикладывается напряжение, образуются сигналы вторичных электронов на выходе детектора и сигнал наведенного тока, снимаемый с нагрузки. Эти сигналы непосредственно и через конденсатор поступают на вход усилителя, а после усиления — на вход осциллографа, который позволяет визуально исследовать эти сигналы.

Фоточувствительные элементы контролируемой линейки подключаются к общей шине. Это допускает "опрос" по отдельным элементам линейки, а также группам, с подачей на элементы обратного смещения, дает возможность снимать сигнал с отдельных элементов, групп элементов и со всей линейки. К общей шине через переключатель подключаются резисторы

R1...R11, они выполняют функцию переменной нагрузки, с которой через разъем снимается сигнал наведенного тока. Переменная составляющая сигнала через конденсаторы C1...C11 и переключатель поступает на другой разъем. Конденсаторы C1...C11 позволяют изменять постоянную времени цепи, через которую снимается сигнал. Источник питания имеет правоступенчатую регулировку напряжения.

Переключатель позволяет изменять полярность напряжения смещения на фоточувствительные элементы, соответственно с полярностью напряжения переключается полярность подключения микроамперметра, который измеряет значение НТ. С помощью микроамперметра измеряется ток электронного зонда.

### Основные характеристики установки

Проведенные исследования позволили определить общую концепцию конструкции установки, предназначенной для исследования и контроля изделий микрофотоэлектроники. В соответствии с техническим заданием основные характеристики установки удовлетворяют следующим показателям качества:

локальность обнаружения отклонений	
от нормы (дефектов), мкм .....	0,8
ток электронного пучка, А .....	$1 \cdot 10^{-8}$
увеличение электронно-оптического	
изображения, тыс. крат .....	250
электронно-лучевая разрешающая способность, нм .....	20
ускоряющее напряжение, кВ .....	25
предельное остаточное давление	
в камере, мм рт. ст. ....	$1 \cdot 10^{-4}$
управление установкой .....	ручное
потребляемая мощность, кВт .....	5

Установка включает в себя систему регистрации сигнала НТ, позволяющую измерять этот сигнал и получать на экране ВКУ изображение исследуемого объекта в сигнале НТ и других видах излучений (в режиме работы прибора как растрового электронного микроскопа).

### Конструкция установки ЭЛУ-КНТ

Установка ЭЛУ-КНТ состоит из двух частей электронно-лучевой установки на основе базовой модели растрового электронного микроскопа РЭМ-50-01, содержащей следующие конструктивные элементы: электронно-оптическую систему (колонну), формирующую и управляющую электронным зондом; высокостабилизированные источники питания; систему вакуумной откачки технологической камеры со шлюзовым устройством и электронно-оптической системы; видеоконтрольное устройство; блок регистрации и преобразования сигналов НТ; кабели связи.

Блок регистрации НТ выполнен в виде самостоятельного изделия, располагаемого вблизи электронно-оптической колонны и связанного с другими частями прибора системой кабелей.

Внутрикамерная оснастка технологической камеры обеспечивает размещение в ней координатного столика с держателем объекта контроля и детектора вторичных электронов для формирования видеосигнала и визуализации поверхности контролируемого объекта, а также выход из камеры электросигналов через специальные многоконтактные высокочастотные разъемы. Конструкция камеры позволяет разместить на ней устройство для охлаждения объекта исследования. Устройство включает в себя сосуд Дюара (для жидкого азота) и хладопровод объекта, термически изолированный от столика объектов.

Система регистрации и измерения наведенного тока создана в виде автономной системы, которая может модифицироваться и функционировать с разными моделями электронно-лучевых приборов.

Для обработки и идентификации результатов измерений может использоваться персональный компьютер.

В процессе разработки опытного образца установки ЭЛУ-КНТ (1999 г.) изготовлена конструкторская документация на следующие составные части установки: блок контроля НТ МБТИ.433335010; стенд видеоконтрольного устройства АГГ.2200032; стенд вакуумный АГГ.2950010; колонна электронно-оптическая АГГЗ.351020; коммутатор АГГ.6617002; устройство для охлаждения объекта МБТИ.307142001; блок регистрации сигнала наведенного тока МБТИ.41125601; блок коммутации и питания МБТИ.433614009; схема электрическая принципиальная МБТИ.436614009 ЭЗ; сборный чертеж МБТИ.436614009 СБ; перечень элементов МБТИ.436614009 ПЭЗ; панели, направляющие кожух МБТИ.745140009, МБТИ.745140010, МБТИ.742214014, МБТИ.735314005; каркас стойки МБТИ.301241002.

В состав изделия входят микровольтнаномер Ф 138 – 2 шт.; усилитель электрометрический У5-11 – 1 шт.; осциллограф С1-67 – 1 шт.; техническое описание и инструкция по эксплуатации МБТИ.41125601 ТО, МБТИ.433335010 ТО.

Разработанная установка обеспечивает контроль на отказ полупроводниковых структур микрофотоэлектроники методом НТ, а также наблюдение исследуемых объектов в режиме растрового электронного микроскопа.

## **Device for between-operation controls of microphotoelectronics semi-conductor structures on capacity for work and rejection**

*B. N. Vasichev, S. A. Disman*

Moskow Institute Electronics and Mathematics (Technical university), Moskow, Russia

*E. P. Bocharov, V. T. Savukov*

Research Institute for Electronics and ion optics, Moskow, Rissia

*It is showed electron-beam metod control and analisis semi-conductor structures on capacity for work and rejection. The description of device for control of materials and wares by method of inducced current is given.*