

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

Вакуумная и плазменная электроника

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления  
210100.62 – Электроника и наноэлектроника

## **Аксенов, Александр Иванович**

Исследование вторичной электронной эмиссии = Вакуумная и плазменная электроника: методические указания к лабораторной работе для студентов направления 210100.62 – Электроника и нанoeлектроника / А.И. Аксенов, Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2013. - 12 с.

Цель настоящей работы: изучить физику явления вторичной электронной эмиссии, исследовать зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии первичных электронов, определить энергетический спектр вторичных электронов.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9); способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 210100.62 – Электроника и нанoeлектроника по курсу «Вакуумная и плазменная электроника».

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Вакуумная и плазменная электроника

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления 210100.62 – Электроника и наноэлектроника

Разработчик

канд. техн. наук, доц. каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ А.И. Аксенов  
\_\_\_\_\_ 2013 г

2013

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение .....	5
2 Теоретическая часть .....	5
2.1 Коэффициент вторичной эмиссии .....	5
2.2 Зависимость $\sigma$ от энергии первичных электронов .....	5
2.3 Распределение вторичных электронов по энергиям .....	7
2.4 Контрольные вопросы .....	8
3 Экспериментальная часть .....	8
3.1 Схема для снятия характеристик .....	8
3.2 Задание .....	9
3.3 Порядок выполнения работы .....	10
3.4 Содержание отчета .....	10
Рекомендуемая литература .....	10

## 1 Введение

Цель настоящей работы: изучить физику явления вторичной электронной эмиссии, исследовать зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии первичных электронов, определить энергетический спектр вторичных электронов.

При бомбардировке поверхности кристаллов (металлов, проводников или диэлектриков) ускоренными электронами наблюдается встречный поток эмитируемых кристаллом электронов, называемых вторичными электронами. Это явление носит название вторичная электронная эмиссия.

Теоретически исследования вторичной электронной эмиссии затруднены из-за сложности явления, а для практики вторичная эмиссия долгое время имела значение только как побочное и, большей частью, нежелательное явление в электронных приборах. Повышение интереса к вторичной электронной эмиссии было связано с разработкой и практическим применением метода каскадного усиления электронных токов с помощью вторичной эмиссии в таких приборах, как фотоэлектронные умножители, передающие электронно-лучевые трубки и Оже-спектрометры.

## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Коэффициент вторичной эмиссии

Экспериментально установлены следующие закономерности вторичной электронной эмиссии чистых металлов. Число вторичных электронов  $N_2$  пропорционально для данного металла эмиттеру числу первичных электронов  $N_1$ :

$$N_2 = \sigma \cdot N_1, \quad I_2 = \sigma \cdot I_1,$$

где  $I_1$  - ток первичных электронов;  $I_2$  - ток вторичных электронов;  $\sigma$  - коэффициент вторичной эмиссии.

Коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma$  показывает сколько вторичных электронов приходится на один первичный электрон.

### 2.2 Зависимость $\sigma$ от энергии первичных электронов

Коэффициент  $\sigma$  зависит от энергии первичных электронов (рис. 2.1).

С ростом энергии первичных электронов  $\sigma$  быстро растет и при энергиях порядка 400–600эВ для металлов достигает максимума. Дальнейшее увеличение энергии первичных электронов вызывает уменьшение  $\sigma$ . Величина коэффициента вторичной эмиссии зависит от типа кристалла, а у металлов  $\sigma$  сравнительно не велико ( $\sigma = 0,5 \div 2$ ).

Основная масса первичных электронов настолько глубоко проникает в металл. Двигаясь в металле быстрее, электроны теряют часть энергии при фоновых взаимодействиях, а другую отдают электронам кристалла.

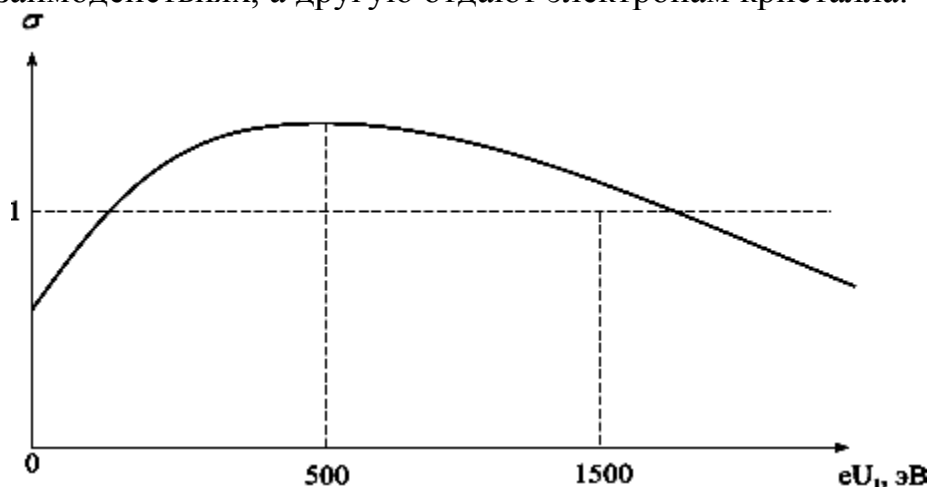


Рисунок 2.1 - Зависимость  $\sigma$  от энергии первичных электронов

Основную часть энергии первичные электроны отдают электронам глубоких энергетических уровней, там где скорость первичных электронов мала. При этом происходит так называемый межзональный переход вторичных электронов, получивших энергию от первичных, на свободные уровни энергии зоны проводимости. Вероятно, что появлению таких вторичных электронов внутри кристалла способствуют и кванты рентгеновского излучения, возникающие при обратных переходах электронах на освобождающиеся глубинные уровни. Беспорядочно двигаясь в металле, вторичные электроны взаимодействуют с валентными электронами, постепенно теряют энергию, и значительная их часть при подходе к поверхности металла обладает энергией, недостаточной для преодоления потенциального барьера. Часть вторичных электронов, которые сохраняют при движении к поверхности достаточно большую энергию, преодолевают потенциальный барьер из кристалла. Они и составляют группу истинно вторичных электронов. Часть первичных электронов отражается от потенциального барьера без потерь энергии и входит в состав тока вторичных электронов.

Для вторичной электронной эмиссии важны два элементарных процесса:

- 1) движение первичных электронов в кристалле эмиттера, сопровождающееся передачей энергии вторичных электронов;
- 2) движение вторичных электронов, сопровождающееся потерей энергии при столкновении с другими электронами.

Сопоставление этих двух процессов объясняет зависимость  $\sigma$  от энергии первичных электронов.

С ростом энергии первичных электронов в кристалле растет число вторичных электронов, создаваемых каждым первичным электроном. Это ведет к увеличению вторичной эмиссии.

С другой стороны первичный электрон, теряя энергию, теряет скорость. Его ионизирующая способность растет. Поэтому основную часть своей энергии

первичный электрон отдает электронам кристалла в конце пути. Чем больше энергия первичных электронов, тем глубже они проникают в кристалл эмиттера и создают там вторичные электроны. Выход вторичных электронов при этом затрудняется, так как возрастают их энергетические потери при движении в кристалле. Это ведет к уменьшению коэффициента вторичной эмиссии.

При небольших энергиях первичных электронов с увеличением их энергии  $\sigma$  увеличивается, при больших энергиях первичных электронов вторичные электроны теряют большую часть энергии и не могут выйти в вакуум – это ведет к уменьшению  $\sigma$ . Это подтверждается экспериментами по исследованию зависимости  $\sigma$  от угла падения первичных электронов  $\theta$ , отсчитываемого от нормали к поверхности эмиттера.

Увеличение  $\sigma$  по сравнению с  $\sigma_0$  (коэффициентом вторичной эмиссии при перпендикулярном к поверхности эмиттера пучка первичных электронов) объясняется тем, что чем больше угол  $\theta$ , тем ближе к поверхности создаются вторичные электроны при том же пути, пройденном в кристалле эмиттера первичным электроном.

### 2.3 Распределение вторичных электронов по энергиям

Распределение вторичных электронов по энергиям исследуют с помощью метода тормозящего поля. Типичная кривая распределения вторичных электронов по энергиям представлена на рис. 2.2

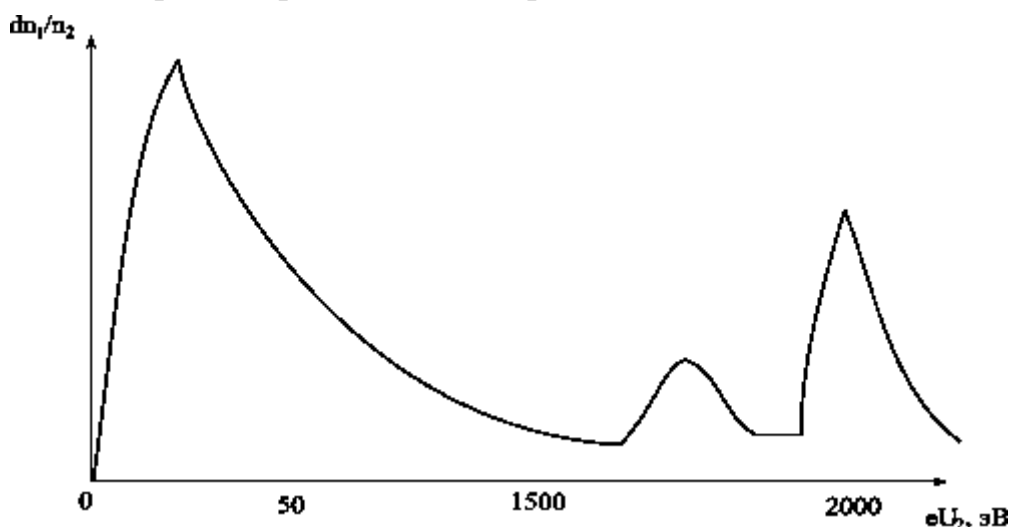


Рисунок 2.2 - Распределение вторичных электронов по энергиям

Широкий пик, максимум которого приходится на энергию порядка  $5 \div 15 \text{ эВ}$ , соответствующий истинно вторичным электронам. Этот пик не зависит от энергии первичных электронов. Узкий пик, соответствующий энергии первичных электронов, показывает наличие во вторичном токе упруго отраженных от эмиттера первичных электронов. При изменении энергии первичных электронов этот пик соответственно перемещается.

Существенной особенностью вторичной электронной эмиссии является ее независимость от эффективной работы выхода материала эмиттера. Причина в

том, что первичные электроны имеют большую энергию (сотни электрон-вольт). Энергия образующихся вторичных электронов намного превышает работу выхода, и разница работ выхода на  $1-2\text{эВ}$  существенного значения не имеет.

Вторичная эмиссия наблюдается с поверхности металлов, диэлектриков и полупроводников. Все перечисленные группы кристаллов не пригодны в качестве материалов для вторичных эмиттеров. Металлы и полупроводники имеют малые  $\sigma$ , а диэлектрики, заряжаясь при бомбардировке первичными электронами, неспособны поддерживать определенный потенциал на поверхности. В приборах в качестве вторичных эмиттеров используются полупроводники с широкой запрещенной зоной. Необходимая величина проводимости обеспечивается легированием донорной примесью. Такими являются сплавные вторичные эмиттеры ( $AgMg, CuMg, Al, AgBeSi$  и др.). После специальной термической обработки в окислительной среде (активирования) на поверхности кристалла образуется тонкий слой окиси щелочного металла ( $MgO$  и  $BeO$ ) с избыточным числом атомов металла. Оптимальная толщина окиси составляет  $\approx 100\text{нм}$ . У этих кристаллов  $\sigma = 8 \div 15$ . Коэффициент вторичной эмиссии стабилен, слабо зависит от температуры и плотности тока. Такие эмиттеры применяются во всех приборах использующих  $\sigma$ .

## 2.4 Контрольные вопросы

- 2.4.1. Что такое  $\sigma$ ?
- 2.4.2. Как  $\sigma$  зависит от энергии первичных электронов, почему?
- 2.4.3. Какой ток протекает в цепи динода?
- 2.4.4. Что происходит на поверхности кристалла диэлектрика, если  $\sigma > 1$ ?
- 2.4.5. Что изменится, если  $\sigma < 1$ ?
- 2.4.6. Как  $\sigma$  зависит от эффективной работы выхода материала динода?
- 2.4.7. Объясните распределение вторичных электронов по энергиям.
- 2.4.8. Способы увеличения  $\sigma$ .
- 2.4.9. Почему не учитывается влияние  $\sigma$  на ток анода в цепи динода?
- 2.4.10. Объясните зависимость  $\sigma$  от угла падения первичных электронов.
- 2.4.11. Объясните особенность вторичной эмиссии с полупроводников.

## 3 Экспериментальная часть

### 3.1 Схема для снятия характеристик

Закономерности и способности вторичной электронной эмиссии исследуются в пентоде, имеющем специальный электрод с большим коэффициентом вторичной эмиссии (динод). Динод предназначен для получения вторичных электронов, он имеет положительный потенциал относительно катода, однако его потенциал должен быть ниже потенциала



анода обычно на 30–50%. Динод располагается в системе электродов за сетками рядом с анодом. Конструктивно система электродов выполнена так, ток электронов, проходящих через плоскость последней третьей сетки системы электродов, не мог попасть на анод, минуя динод. Попадающие на динод электроны, имеющие кинетическую энергию, соответствующую напряжению динода, выбивают из него вторичные электроны, которые потом под действием более высокого потенциала анода переходят на анод. Динод выполнен из материала с коэффициентом вторичной эмиссии  $\sigma = 4 \div 5$ . В качестве материала для изготовления динода используют бериллиевую или магниевую бронзу. Если считать, что все электроны, прошедшие третью сетку попадают на динод, то будем считать их первичными электронами и обозначать  $I_1$ . Вторичные электроны, покидая кристалл, создают ток вторичных электронов  $I_2$ , при этом  $I_2 = I_1 \sigma$ . Во внешней цепи динода протекает ток  $I_d = I_2 - I_1 = I_1(\sigma - 1)$ , причем ток протекает в противоположном направлении. Анод притягивает к себе вторичные электроны, и в его цепи протекает ток  $I_a = I_2$ . Интересно проследить распределение электронов между динодом и анодом. Для этого на все электроны подаем одинаковое постоянное напряжение, а на аноде напряжение меняем.

Пока  $U_a$  меньше  $U_d$ , анодный ток практически отсутствует, так как вторичные электроны не могут уйти от динода на анод. Ток в цепи динода практически равен току первичных электронов, потому что сколько вторичных электронов вышло из динода, столько же вернулось на динод. Вторичные электроны не участвуют в создании тока. Когда  $U_a$  становится больше  $U_d$ , кривая тока анода круто поднимается вверх до значения  $I_a = I_1 \sigma$  и потом переходит в почти горизонтальный участок. Учитывая, что напряжение на диноде постоянное,  $\sigma$  также остается величиной постоянной и  $\sigma > 1$ . С ростом  $U_a$ , когда  $U_a > U_d$ , вторичные электроны уходят на анод, и ток в цепи динода резко уменьшается и переходит в противоположный знак. Ток в цепи динода равен  $I_d = I_1(\sigma - 1)$ , и тоже остается почти постоянным далее.

При приближении значения  $U_d$  к  $U_a$  в связи с прекращением перехода вторичных электронов с динода на анод появляются довольно протяженные падающие участки токов, т.е. участки с отрицательными значениями внутреннего сопротивления.

## 3.2 Задание

3.2.1 Изучить закономерности и особенности вторичной эмиссии.

3.2.2 Разобраться в схеме для вторичной электронной эмиссии.

Подробная схема питания представлена на стенде.

3.2.3 Записать паспортные данные исследуемого прибора, зарисовать цоколевку.

3.2.5 Снять зависимость коэффициента вторичной эмиссии  $\sigma$  от энергии первичных электронов.

3.2.5 Методом задерживающего потенциала снять зависимость  $I_{I2}$  от напряжения на аноде.

3.2.6 По данным 3.2.5 путем графического дифференцирования рассчитать энергетический спектр вторичных электронов.

### 3.3 Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы преподаватель проверяет готовность студента к занятиям.

2. Включить стенд только после проверки преподавателем.

3. При выполнении пункта п.3.2.4 необходимо учитывать, что ток в цепи динода является алгебраической суммой токов первичных и вторичных электронов. Регистрацию токов вторичных электронов производят в цепи анода, а ток вторичных в цепи динода с учетом  $\sigma$ .

4. При выполнении пункта п. 3.2.5 потенциал анода относительно динода менять от  $+50B$  до отрицательного значения, при котором ток на анод полностью прекращается. Измерения проводят для трех значений энергии первичных электронов.

5. Эксперименты по п. 3.2.4 и 3.2.5 проделать не менее трех раз, исходные зависимости построить по средне статическим значениям измеренных величин.

### 3.4 Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Паспортные данные и цоколевка исследуемого прибора.
3. Описание установки и методики эксперимента.
4. Основные расчетные формулы.
5. Результаты работы и их обсуждение.
6. Выводы. (ПК-9, ПК-20)
7. Литература.

### Рекомендуемая литература

1. Фридрихов С.А., Мовнин С.М. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1982. – 608 с.

2. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники: Учебник для вузов. – М.: Вышш. школа, 1979. – 448 с.

3. Бронштейн И.М., Фейман В.С. Вторичная электронная эмиссия. – М.: Наука, 1969. – 407с.

4. Клейнер Э.Ю. Основы теории электронных ламп. – М.: Высшая школа, 1974. –

Учебное пособие

Аксенов А.И.

Исследование вторичной электронной эмиссии

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника»

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40