

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

С.Г. Еханин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТУННЕЛЬНО-РЕКОМБИНАЦИОННОГО
СВЕЧЕНИЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ**

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине
«Методы диагностики полупроводниковых структур»

Томск
2022

УДК 53.097; 537.9
ББК 22.35
Е 930

Рецензент

Романовский М.Н., доцент кафедры конструирования узлов и деталей
РЭА, канд. техн. наук

Еханин Сергей Георгиевич

Е 930 Исследование туннельно-рекомбинационного свечения
светоизлучающих диодов: методические указания к лабораторному занятию по
дисциплине «Методы диагностики полупроводниковых структур» / С.Г.
Еханин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 18с.

В методических указаниях кратко изложены теоретические основы и краткое описание структурно-чувствительных туннельно-рекомбинационных процессов, протекающих в режиме микро- и нанотоков в активной области светоизлучающих диодов (СИД) на основе гетероструктур AlGaIn/InGaIn/GaIn с множественными квантовыми ямами.

Приводятся технические характеристики и описание прецизионного источника-измерителя «Keysight B2912A», описание и технические характеристики тринокулярного цифрового микроскопа «Альтами» для исследования картин свечения, обусловленного туннельно-рекомбинационными процессами. Приведены порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов, интересующихся проблемами диагностики полупроводниковых гетероструктур.

Одобрено на заседании каф. КУДР протокол № 233 от 17 февраля 2022 г.

УДК 53.097; 537.9
ББК 22.35

© Еханин С.Г., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

Оглавление	
1 ВВЕДЕНИЕ	4
2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ	9
3.1 Объект исследования	9
3.2 Схема экспериментальной установки	9
3.3 О программе Altami Studio	10
3.4 Краткое описание прибора Keysight B2912A	12
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	15
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	17
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	18

1 ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в светоизлучающих диодах (СИД) на основе GaN инжекционная электролюминесценция возникает при напряжении более 2,5 В (когда начинает открываться *p-n*-переход). При более низких напряжениях при практически закрытом *p-n*-переходе в СИД можно наблюдать туннельно-рекомбинационные процессы, сопровождаемые свечением [1].

Как показано в [2-4], спектры наблюдаемого свечения описываются теорией туннельной излучательной рекомбинацией. Процессы туннелирования обусловлены сильными электрическими полями с напряженностью $E=(0,3-1) \cdot 10^6$ В/см, возникающими в активной области СИД в этих условиях.

Изучение спектров туннельно-рекомбинационного излучения показало, что они структурно чувствительны и их изменения связаны с увеличением концентрации точечных дефектов в процессе испытаний [2-5].

Таким образом, процессы электрической деградации можно контролировать по изменениям электрооптических и спектральных характеристик туннельно-рекомбинационного свечения.

Однако все исследования спектров туннельно-рекомбинационного излучения были проведены в основном в СИД с одной квантовой ямой.

Как показано в работах [6,7], в диодах на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ) туннельная компонента свечения на 3 - 4 порядка меньше, чем в диодах с одной квантовой ямой, поэтому это слабое свечение невозможно не только увидеть, но и зарегистрировать его стандартной аппаратурой. А для измерения спектра потребуется еще более чувствительная аппаратура. Тем не менее, установленная связь интенсивности туннельно-рекомбинационного свечения с изменениями дефектной структуры СИД вызывает большой научный и практический интерес.

В связи с этим, разработка методик проведения исследований электрических, оптических и спектральных характеристик туннельно-рекомбинационных процессов на мультяямных сверхъярких СИД в зависимости от режимов и времени испытаний на наш взгляд весьма актуальны.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В работе [8] представлены картины инжекционной электролюминесценции (ЭЛ), демонстрирующие неоднородность свечения и протекания тока по площади кристалла СИД, где планарная неоднородность инжекции носителей заряда в InGaN-квантовую яму после оптической деградации связывается с диффузией и электромиграцией ионов металла и остаточной примеси вдоль дефектных трубок [8], см. рис. 2.1.

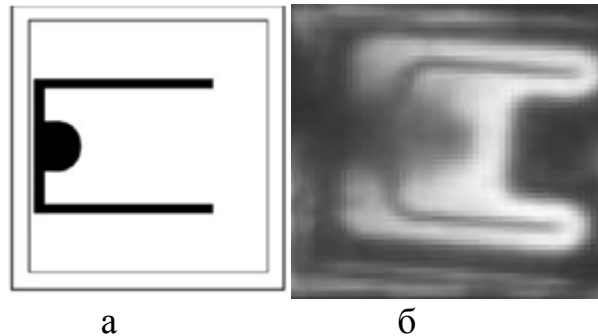


Рисунок 2.1 – Внешний вид поверхности кристалла СИД с электродами (а) и вид светящейся поверхности (б) [8].

Полученные электролюминесцентные изображения показывают, что после частичной деградации в СИД возникает задержка в распределении интенсивности ЭЛ по площади. При импульсном напряжении возникают участки, вокруг р-контакта, где наблюдается более слабая интенсивность свечения. Это хорошо иллюстрируется эквивалентной схемой (см. рис. 2.2), показывающей латеральную неоднородность протекания тока.

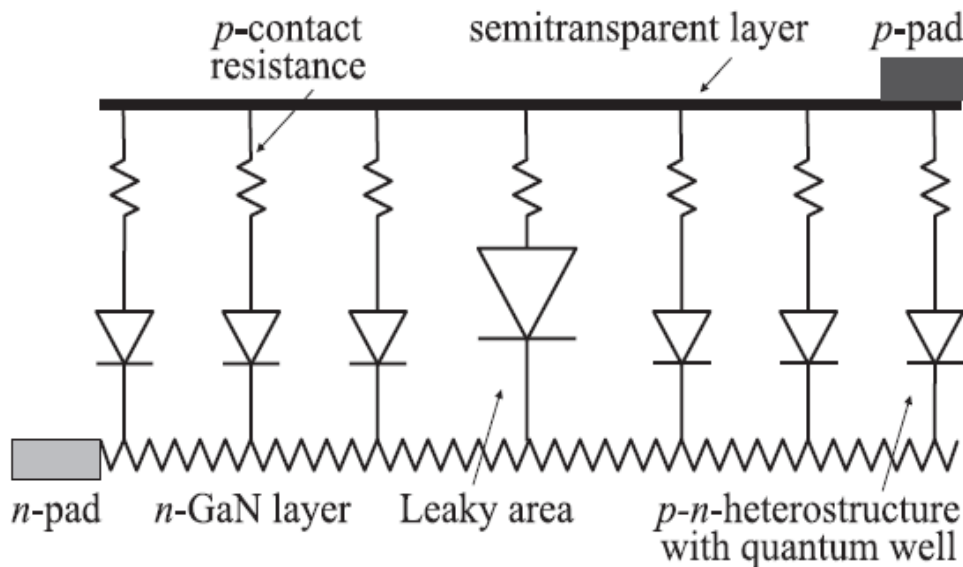
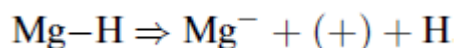


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема светодиода, иллюстрирующая латеральное протекание тока [8].

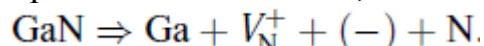
Кроме того, при длительном протекании в СИД (при испытаниях) токов большой плотности происходят процессы формирования новых дефектов [2]. Деградационные изменения в структуре СИД в процессе испытаний особенно явно проявляются на начальных участках ВАХ, см. [9].

Модель первой стадии деградации [2]: при инжекционном возбуждении активной области остаточные комплексы Mg – Н могут разрушаться, водород выходит из комплексов и заряд отрицательно заряженных ионов магния должен компенсироваться дырками:



На второй стадии процесса (после испытаний более 2000 часов) преобладает образование донорных дефектов, компенсирующих акцепторы. Эти дефекты увеличивают вероятность безызлучательной рекомбинации и вероятность излучения в желтой полосе, проявляющейся в туннельной и пробойной электролюминесценции.

Собственными дефектами такого рода могут быть вакансии азота, вероятность образования которых заметно больше, чем вакансий Ga:



Такая модель объясняет вторую стадию процесса старения. Кроме того, происходит миграция дефектов по границам зерен и колонн роста, возникающих при росте пленки, дефекты скапливаются в «слабых местах», в которых электрическое поле максимально. Так можно объяснить рост туннельной компоненты тока и туннельного излучения в спектрах.

Для объяснения того, почему при сравнительно низкой температуре (300 К) возможно образование дефектов структуры в GaN, следует использовать модель создания дефектов горячими электронами. При этом предполагается, что атомы смещаются не при повышении температуры, а при передаче им кинетической энергии горячих электронов, которые получают ее, пересекая гетерограницу с разрывом зон проводимости. Кроме того, электроны, инжектируемые из широкозонного барьера в узкозонный, имеют достаточно большую избыточную энергию, достаточную для такой генерации дефектов. Эту энергию электроны должны отдавать на другом краю квантовой ямы.

Формирование новых дефектов в гетероструктуре кристалла СИД сопровождается изменением спектральных характеристик его свечения.

Сильные изменения спектров были обнаружены для голубых светодиодов при малых токах, $J < 0,15$ мА, где туннельная и инжекционная составляющие свечения примерно равны. Данные спектры измерены при маленьком токе нагрузки (когда р-п – переход только-только начал приоткрываться). При таком токе начинает появляться голубое свечение СИД, на рис. 2.3 это спектральный пик, соответствующий энергии кванта, равной примерно 2,7 эВ. Исследователи выбрали такой режим светодиода, при котором это свечение уже уверенно фиксировалось измерительным прибором. Оказалось, что в таком режиме кроме синего свечения наблюдается еще и свечение в желто-зеленом диапазоне (энергия кванта максимума соответствует примерно 2,2 эВ). Свечение в этом

диапазоне обусловлено (как известно из исследований многих ученых) обусловлено влиянием дефектов кристаллической структуры.

После ускоренных испытаний (большие токи и повышенная температура) интенсивность инжекционной ЭЛ (в режиме микротоков) практически не менялась по мере старения, но при этом относительная доля желто-зеленой полосы (2.1-2.3 эВ) увеличивалась (рис. 2.3). Известно, что желтая полоса обусловлена комплексами с участием дефектов структуры [2]; это свидетельствует об образовании при пропускании прямого тока дополнительных дефектов.

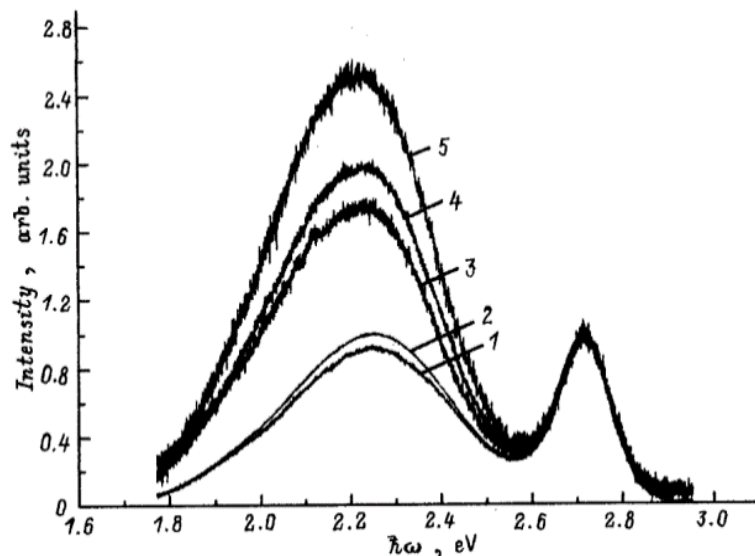


Рисунок 2.3 – Спектры электролюминесценции голубых светодиодов при токе $J=0.15$ мА после старения. Длительность работы t , ч: 1 – 0, 2 – 72, 3 – 558, 4 – 800, 5 – 1000 [2]

На рис. 4 показана энергетическая диаграмма, иллюстрирующая инжекционные и туннельно-рекомбинационные процессы.

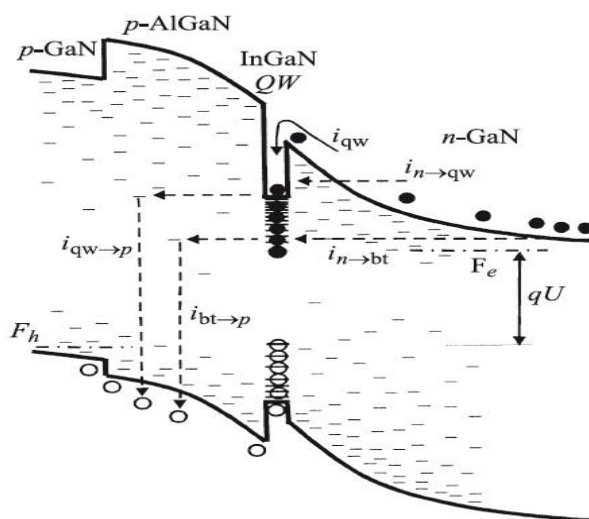


Рисунок 2.4 – Иллюстрация протекания туннельно-рекомбинационных и надбарьерных токов в гетероструктуре AlGaIn/InGaIn/GaN с одной квантовой ямой [9]

На диаграмме рис. 2.4 обозначено:

i_{qw} – инжекционная составляющая тока;

$i_{qw \rightarrow p}$ – туннельный ток утечки;

$i_{n \rightarrow qw}$ – туннельная компонента тока;

$i_{n \rightarrow bt}$ – туннельная инжекция носителей в состояния хвоста из разрешенных зон барьерных слоев;

$i_{bt \rightarrow p}$ – туннельная утечка из состояний хвоста на состояния дефектов в барьерах.

На рис. 2.4 короткими черточками показаны глубокие и мелкие дефекты в запрещенной зоне. Причиной глубоких уровней в запрещенных зонах являются протяженные дефекты — дислокации, границы зерен, дефекты упаковки, а также примесные комплексы. Плотность электрически активных дефектов в той или иной степени зависит от примесей, пассивирующих оборванные связи, и особенностей технологии роста пленок.

Таким образом, процессы электрической деградации можно контролировать по изменениям электрооптических и спектральных характеристик туннельно-рекомбинационного излучения.

Однако все исследования спектров туннельно-рекомбинационного излучения были проведены в основном в СИД с **одной квантовой ямой**.

В СИД с МКЯ туннельно-рекомбинационное свечение практически не наблюдается. Оказывается в многоямных СИД ширина активной области во много раз больше, чем в одноямном СИД, поэтому свечение в режиме туннельной ЭЛ, когда р-п – переход еще практически закрыт, обычными спектральными приборами не регистрируется.

Следует еще иметь в виду, что надо измерять не просто свечение (интегральное), а свечение в узкой спектральной полосе. Это уменьшает такое свечение еще в несколько десятков раз.

Как показано в работах [6,7], в СИД с МКЯ туннельная компонента свечения на 3 - 4 порядка меньше, чем в диодах с одной квантовой ямой, поэтому это слабое свечение невозможно не только зарегистрировать его стандартной аппаратурой, но и увидеть. А для измерения спектра потребуется еще более чувствительная аппаратура.

Однако, появление в научных лабораториях современной прецизионной и высокочувствительной измерительной аппаратуры позволяет вновь обратиться к анализу процессов дефектообразования по характеристикам структурно чувствительного туннельно-рекомбинационного свечения.

3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1 Объект исследования

В качестве объекта исследования использовались синие светодиоды модели «SL-V-B45AK, изготовленных по lift-off технологии.

Образцы СИД представлены АО НИИПП. Светодиоды имеют номинальную величину рабочего тока 350 мА при реальной площади кристалла СИД, равной 1200×1200 мкм. Кристаллы светодиодов размещены на теплоотводы с площадью, рекомендованной производителем.

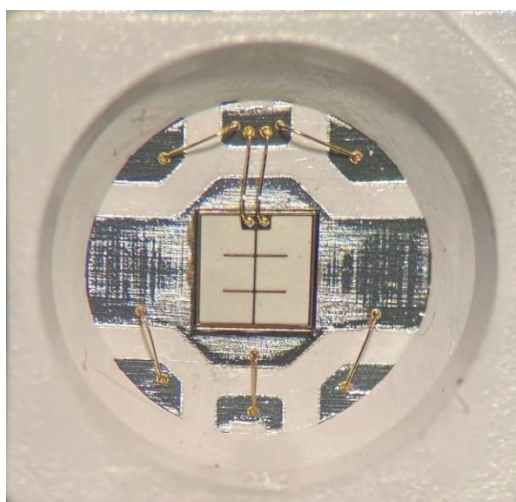


Рисунок 3.1 – Внешний вид светодиода SL-V-B45AK фирмы SemiLEDs в корпусе

3.2 Схема экспериментальной установки

Для того, чтобы лучше понять принцип проведения экспериментов, рассмотрим структурную схему экспериментальной установки, изображенную на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Структурная схема экспериментальной установки

Образец светодиода помещается на предметный столик микроскопа Альтами. На образец, см рис. 3.2, подается требуемое напряжение и ток от источника-измерителя Keysight B2912A. При данном напряжении возникает слабое свечение, несущее информацию о распределении дефектов по поверхности кристалла. Увеличенная с помощью микроскопа Альтами картина свечения фотографируется цифровой фотокамерой. Увеличенное изображение с помощью программного обеспечения Altami Studio 3.4 выводится на экран персонального компьютера.

3.3 О программе Altami Studio

Для запуска приложения воспользуйтесь ярлыком Altami Studio на рабочем столе или воспользуйтесь пунктом меню Пуск → Программы → Altami Ltd → Altami Studio 3.4. Кроме того, приложение можно запустить из папки, куда была установлена программа. После запуска появится главное окно приложения, см. рис. 3.3.

При первом запуске программы появляется диалог, позволяющий указать рабочую директорию — папки для сохранения изображений, отчетов и кадров, полученных в результате быстрой съемки и автосъемки. Кроме того, с помощью данного диалога можно выполнить экспорт настроек из предыдущей версии программы в новую, воспользовавшись пунктом «Мигрировать с версии». Заполните предложенную анкету. Вопросы, отмеченные звездочкой, обязательны для заполнения. После этого нажмите кнопку «Готово».

Для подключения камеры воспользуйтесь пунктом **Файл → Подключить устройство**. Подробнее о настройке камеры смотрите в «Руководстве по настройке камеры».

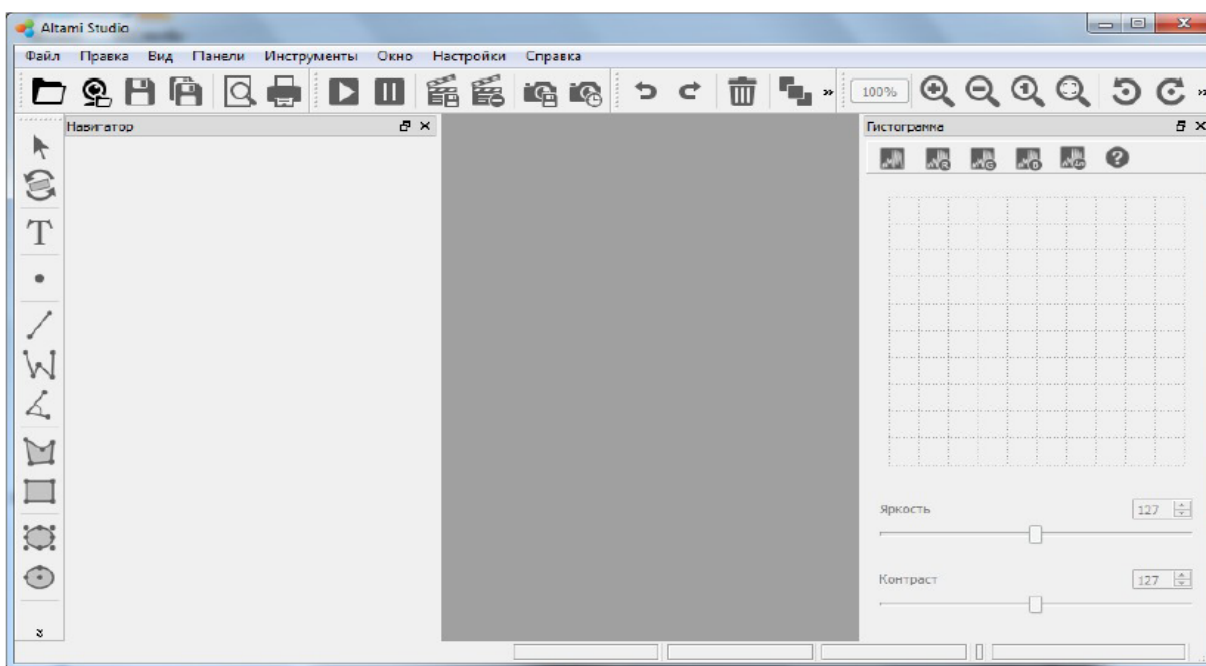


Рисунок 3.3 – Главное окно приложения Altami Studio 3.4.

О том, как использовать и применять к изображениям фильтры в программе Altami Studio, вы можете также прочесть tutorиалы. Для этого пройдите в меню Справка → Учебник → Фильтры и выберите из выпавшего списка tutorial о фильтре, который вас интересует. Читая tutorial, вы можете вслед за автором повторять в программе его действия по обработке изображения. Изображения, используемые при написании tutorialов, находятся в папке установленной вами программы Altami Studio 3.4.

Работа в программе

Контекстное меню

При щелчке правой кнопкой мыши по любому участку изображения появляется контекстное меню со следующими пунктами:

Показывать фигуры — показывает панель с фигурами;

Приблизить — приближает изображение на один шаг;

Отдалить — отдаляет изображение на один шаг;

По размеру окна — устанавливает такой масштаб, чтобы изображение целиком отображалось в окне изображения;

Масштаб 1:1 — устанавливает масштаб 100%;

Повернуть по часовой стрелке — поворачивает изображение по часовой стрелке;

Повернуть против часовой стрелки — поворачивает изображение против часовой стрелки;

Показать линейки — показывает линейки.

Работа с камерой

Для удобства все устройства захвата будем называть камерами. В программе возможна установка настроек камеры по умолчанию. А также для камер Altami реализована автоматическая настройка баланса белого.

Для подключения камеры воспользуйтесь пунктом Файл → Подключить устройство.

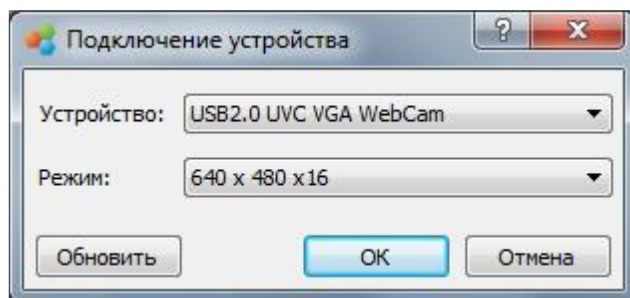


Рисунок 3.4 – Меню выбора камеры

Здесь следует выбрать устройство и его режим работы. Если в списке устройств необходимое устройство не отображается, проверьте подключение устройства и нажмите кнопку **Обновить**, см. рис. 3.4. После подключения

камеры в окне документа будет отображаться видеопоток в режиме реального времени.

Остановить поток можно кнопкой на панели инструментов, возобновить — кнопкой ОК. При остановке потока с камеры в окне документа будет отображаться последний полученный с нее кадр.

Настройки камеры могут сильно различаться у разных производителей и моделей камер. Для ознакомления с ними вы можете прочитать «Руководство пользователя по настройке камеры» или подобный материал, предоставляемый производителем камеры.

Для сохранения активного документа, выберите пункт меню **Файл** → **Сохранить** → **Сохранить**, или **Файл** → **Сохранить как...** При этом документы будут сохраняться в формате *.adfx*

3.4 Краткое описание прибора Keysight B2912A

Прецизионный параметрический анализатор B2912A представляет собой настольный двухканальный прибор, в котором сочетаются возможности четырехквadrантного источника и измерителя тока и напряжения, что позволяет с высокой точностью измерять вольтамперные характеристики различных устройств без изменения конфигурации подключений и использования дополнительного оборудования.

Измерительные характеристики:

- 2 канала измерений.
- Минимальное разрешение: 1 пА/1 мкВ (для источника), 100 фА/100 нВ (для измерителя).
- Максимальное выходное напряжение: 210 В.
- Максимальный выходной ток: 3 А (в режиме постоянного тока), 10,5 А (в импульсном режиме).
- Генератор сигналов произвольной формы и оцифровка сигналов с интервалом от 20 мкс.

Общие характеристики

- Сочетание возможностей 4-квadrантного источника и измерителя тока и напряжения.
- Цветной жидкокристаллический дисплей с диагональю 4,3 дюйма поддерживает графический и числовой режимы отображения.
- Бесплатное прикладное программное обеспечение для управления прибором с помощью ПК.
- Высокая производительность и поддержка стандартного набора команд SCPI.

На рис. 4.1 приведен внешний вид передней панели прибора. Ниже показано назначение кнопок, ручек, панелей, гнезд, разъемов и экрана монитора прибора

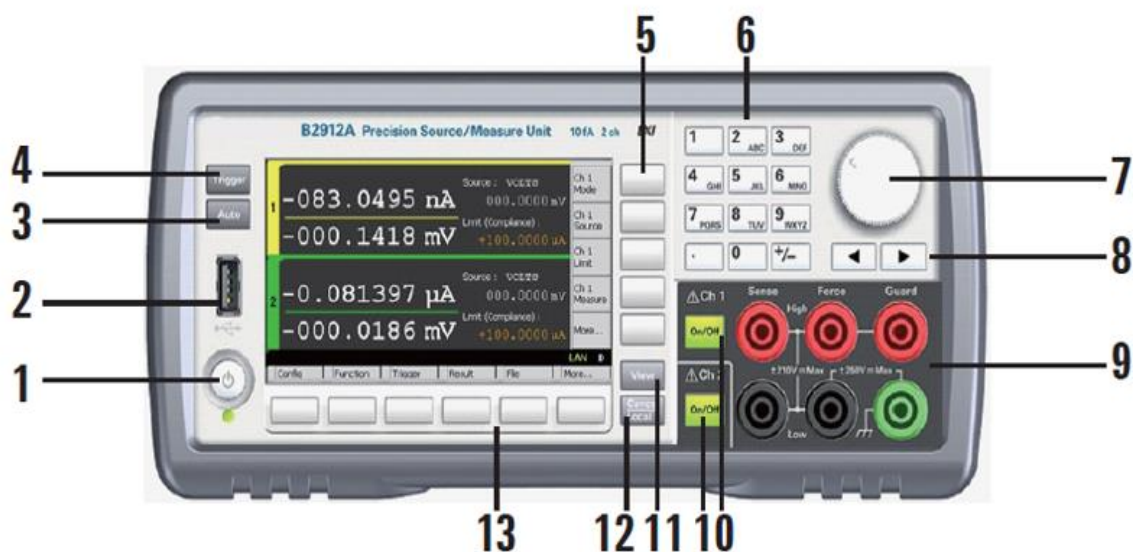


Рисунок 4.1 – Внешний вид лицевой панели прибора

1. Сетевой выключатель: включает или выключает прибор.
2. Разъем USB-A: используется для подключения флэш-памяти USB.
3. Клавиша «Auto»: запускает или отменяет повторное измерение.
4. Клавиша запуска «Trigger»: запускает одно измерение, прерывает повторное измерение или его запускает.
5. Вспомогательные клавиши: пять клавиш для помощи при настройке - Режим, Источник, Лимит, Мера, Больше и т. д.
6. Цифровые / буквенные клавиши используются для ввода значений параметров настройки, указанных указателем поля.
7. Поворотная ручка:
В состоянии MOVE (синий): при повороте указатель поля перемещается. Нажатие на нее фиксирует положение указателя. В состоянии EDIT (зеленый) при его изменении изменяется значение параметра указателя поля. Нажатие на нее фиксирует значение.
8. Клавиши «Влево» и «Вправо» в состоянии MOVE (синий) перемещают указатель поля. В состоянии ПРАВКА (зеленый) изменяет значение параметра указателя поля. Если указатель поля находится на числовом поле ввода значения, нажатие клавиши меняет указатель на указатель цифры.
9. Клеммы канала 1: высокая сила, низкая сила, высокая чувствительность, низкая чувствительность, защита и земля (шасси).
10. Переключатель включения / выключения канала используется для включения или отключения канала. Два переключателя на 2-канальных моделях. Переключатель становится зеленым, если канал включен. Переключатель становится красным, если канал находится в состоянии высокого напряжения.
11. Клавиша просмотра: изменяет режим отображения.

12. Отмена / Локальный ключ: Отменяет операцию настройки, если прибор находится в локальном состоянии. Возвращает прибор в локальное состояние, если он находится в удаленном состоянии.
13. Функциональные клавиши: шесть клавиш для детальной настройки нескольких функций. «Конфигурация», «Функция», «Триггер», «Результат», «Файл», «Программа», «Ввод / вывод», «Система» и многое другое.
14. Клеммы канала 2: только на двухканальных моделях.
15. Разъем интерфейса GPIB: подключается к интерфейсу GPIB внешнего компьютера или оборудования.
16. Разъем USB-B: подключается к интерфейсу USB.
17. Разъем интерфейса локальной сети: подключается к интерфейсу 10/100 Base-T. Левый светодиод указывает на активность. Правый светодиод указывает на целостность ссылки.
18. Разъем цифрового ввода / вывода: 25-контактный гнездовой разъем D-sub для универсального ввода / вывода (GPIO). Для триггерного входа / выхода, интерфейс к обработчику, интерфейс к цепи блокировки и т. д. Если клеммы блокировки открыты, то выход прибора ограничен до ± 42 В.
19. Входной разъем переменного тока: шнур питания переменного тока подключен к этой розетке.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Включаем прибор Keysight B2902A клавишей (1), расположенной в левом нижнем углу передней панели прибора, см. рис.4.1.

2. После того, как прибор прогрузится, присоединяем исследуемый образец СИД к прибору с помощью контактов четырехжильного экранированного кабеля, подсоединенного к клеммам (9) первого канала, соблюдая полярность подсоединения и СИД.

3. Помещаем и фиксируем образец СИД на предметном столике микроскопа Альтами. Используя программное обеспечение Altami Studio 3.4 получаем увеличенное цветное изображение поверхности кристалла СИД на экране компьютера при внешней подсветке.

4. Затемняем образец СИД от внешней подсветки так, чтобы изображение на экране ПК исчезло.

5. Прокручивая поворотную ручку (7) на приборе Keysight B2902A, выбираем значение напряжения для 1 канала, например, 2,5 В, и нажимаем на нее. Чтобы установить и сохранить это значение, на правом от экрана вертикальном ряду кнопок нажать кнопку рядом с иконкой «V».

6. После этого, прокрутив поворотную ручку (7) на один шаг, устанавливаем значение максимального тока. Например, чтобы установить 100 мА, нужно нажать на поворотную ручку и набрать цифру 100, после чего нажать кнопку против иконки «mA».

7. После того, как установили напряжение и ток, нажимаем на кнопку (11) - «View» и попадаем в окно информации для первого канала. Поворотной ручкой (7) прокручиваем и нажимаем на «Measure speed»: AUTO. Далее нажимаем справа от окна экрана кнопку «auto», затем на «more» и нажимаем «show sweep». Выбираем «Sweep Parameters: OFF» и на правой панели выбираем «Linear Single», прокручивая шайбу выбираем начальные и конечные значения «Start», «Stop» от 0 до 2,5 В и количество точек на заданном интервале «Points», к примеру – 1000, и нажать на поворотную ручку (шайбу).

8. Кнопкой «View» находим окно построения графика:

[1 ON 2 ON Y: I(A) LINEAR X: V(V) LINEAR],

Включаем 1 канал «Ch1» - загорается зеленая кнопка, затем нажимаем «Trigger» и потом в правом вертикальном ряду кнопок нажимаем кнопку напротив иконки «Auto Skale», при этом график растянется на весь экран. График построен от нуля до требуемого порогового напряжения (узнать у преподавателя). **После этого на образце остается это конечное напряжение**, и можно будет фотографировать возникающее при этом напряжении слабое туннельно-рекомбинационное свечение.

9. Получить фотографии поверхности СИД при разных напряжениях в диапазоне от 1,9 – 2,3 В с шагом 0,1 В.

10. Провести анализ изменения цветовых оттенков картин свечения в зависимости от напряжения.

11. Провести визуальный анализ картины свечения поверхности кристалла СИД при напряжении 2,3 В (дать описание).

12. Используя средства Mathcad, провести пиксельный анализ картины свечения поверхности кристалла СИД при напряжении 2,3 В в следующей последовательности:

а) Изображения светодиодов, обработанные предварительно графическим редактором, уменьшаются до размера 300x300 точек (максимальное разрешение фотографии определяется мощностью компьютера).

б) После того, как была произведена предварительная обработка фотографий СИД в графическом редакторе, необходимо получить матрицы соответствующих изображений в MathCad. С помощью команды $f_0 = \text{READRGB}()$ можно считать изображение в RGB матрицу. В цветном изображении яркость каждого компонента пикселя может изменяться в диапазоне от нуля до 255. Ноль - черный цвет, 255 - максимально насыщенный цвет (красный, зеленый, синий).

Полученная RGB матрица 300x900 состоит из трех частей размером 300x300 точек красного, зеленого и синего цвета.

Поскольку зеленый цвет связан с накоплением в процессе испытаний точечных дефектов, рассматриваем зеленый сектор в полученных матрицах до и после испытаний. Данные из ячеек матрицы зеленого цвета вставляем в Excel, складываем и получаем суммарное значение яркости пикселей.

Эта программа позволяет получить информацию о цветности и цветовой яркости свечения, распределенного по поверхности кристалла СИД, этим самым получить искомую спектральную характеристику сверхслабого свечения поверхности СИД.

13. Результаты измерений сравнить (качественно и количественно), выполнить необходимые расчеты, сделать выводы, написать отчет.

14. Сдать отчет по лабораторной работе с защитой (ответами на контрольные вопросы преподавателя).

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего необходимо анализировать кинетику дефектообразования в гетероструктуре СИД.
2. Физическое описание эквивалентной схемы гетероструктуры, показывающей латеральную неоднородность протекания тока
3. Механизмы образования точечных дефектов в гетероструктуре СИД
4. Чем обусловлены токи утечки в гетероструктуре СИД.
5. Спектральный метод определения кинетики дефектообразования в гетероструктуре.
6. Физическая природа туннельно-рекомбинационного свечения. В каких условиях оно наблюдается.
7. Почему не удается измерить спектр туннельно-рекомбинационного свечения в гетероструктуре СИД с множественными квантовыми ямами стандартными приборами.
8. В чем заключается lift-off технология изготовления СИД. Какие еще технологии изготовления СИД вы знаете.
9. Каковы преимущества и недостатки исследования картин туннельно-рекомбинационного свечения гетероструктур СИД по сравнению с обычными спектральными исследованиями.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Е. Кудряшов, К.Г. Золин, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович, А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин. Туннельные эффекты в светодиодах на основе гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с квантовыми ямами // Физика и техника полупроводников, 1997. – том 31. – вып. 11. С. 1304-1309.
2. Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. Изменения люминесцентных и электрических свойств светодиодов из InGaN/AlGaN/GaN при длительной работе. ФТП, 1999. – том 33 – вып. 2. – С. 224-232.
3. В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович, А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин. Люминесцентные и электрические свойства светодиодов InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами // Физика и техника полупроводников, 1999. – том 33. – вып. 4. С. 445-450.
4. Кудряшов В. Е., Юнович А. Э. Туннельная излучательная рекомбинация в р-п- гетероструктурах на основе нитрида галлия и других соединений типа АПВВ // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2003. — Т. 124, № 5. — С. 1133–1137.
5. Н.И. Бочкарева, Е.А. Zhirnov, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, Ю.Г. Шретер. Туннельно-рекомбинационные токи и эффективность электролюминесценции InGaN/GaN светодиодов // Физика и техника полупроводников, 2005. – том 39. – вып. 5. С.627-632.
6. Кудряшов В. Е., Юнович А. Э. Туннельная излучательная рекомбинация в р-п- гетероструктурах на основе нитрида галлия и других соединений типа АПВВ // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2003. — Т. 124, № 5. — С. 1133–1137.
7. Авакянц Л.П., Асланян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Матешев И.С., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Люминесцентные и электрические свойства ультрафиолетовых и фиолетовых светодиодов на основе нитрида галлия // Ученые записки физического факультета МГУ. – 3. – 163401-1(2016).
8. Бочкарева Н. И., Ефремов А. А., Ребане Ю. Т., Горбунов Р. И., Клочков А. В., Шретер Ю. Г. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов. ФТП, 2006. – том 40. – вып.1. – С. 122-127.
9. Бочкарева Н.И., Иванов А.М., Клочков А.В. и др. Прыжковый транспорт в области объемного заряда р-п – структур с квантовыми ямами InGaN/GaN как источник избыточного 1/f шума и потерь эффективности светодиодов. // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49. – вып. 6. – С.847-855.