

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

С.Г. Еханин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СВЕРХЪЯРКИХ СВЕТОДИОДОВ**

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине
«Методы неразрушающего контроля и диагностики»

Томск
2022

УДК 53.097; 537.9
ББК 30.3-1
Е-93

Рецензент

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

Еханин Сергей Георгиевич

Е-93 Исследование вольтамперных характеристик сверхъярких светодиодов: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Методы неразрушающего контроля и диагностики» / С.Г. Еханин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 19 с.

В методических указаниях кратко изложены теоретические основы электропроводности полупроводниковых гетероструктур, описаны устройство и технические характеристики образцов светоизлучающих диодов на основе гетероструктур AlGaN/InGaN/GaN. Приводятся технические характеристики и описание прецизионного источника-измерителя Keysight B2912A. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы. Предназначено для студентов, интересующихся проблемами неразрушающего контроля и диагностики полупроводниковых гетероструктур.

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

УДК 53.097; 537.9
ББК 30.3-1

© Еханин С.Г., 2022

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

Оглавление

1 ВВЕДЕНИЕ	4
2 ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ	5
2.1 Инжекционный ток	6
2.2 Рекомбинационный ток	6
2.3 Туннельно-рекомбинационный ток	7
3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ СИД.....	9
4 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИБОРА KEYSIGHT B2912A	11
4.1 Техническое описание:	11
4.2 Основные характеристики:	11
4.3 Подготовка прибора к использованию	12
4.4 Описание и назначение ручек управления на лицевой стороне прибора	12
5 ИЗМЕРЕНИЕ ВАХ СИД	15
5.1 Сохранение данных.....	15
5.2 Преобразование записанного файла	16
6 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	17
6.1 Исследование прямых ветвей ВАХ в зависимости от времени испытаний СИД.....	17
6.2 Исследование обратных ветвей ВАХ в зависимости от времени испытаний СИД	17
7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	18
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	19

1 ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие технологии производства излучающих свет полупроводниковых структур, сверхъярких светоизлучающих диодов (СИД), в последние годы привело к значительным успехам в области повышения качества приборов на их основе. Существенно увеличилось число различных конструкций и типов серийно производимых кристаллов СИД, изготовленных на основе эпитаксиальных гетероструктур твердых растворов AlGaInN, позволяющих создавать источники излучения с любыми необходимыми характеристиками для различных сфер применения.

Однако имеет место ряд проблем при изготовлении как самих гетероструктур, так и СИД на их основе, которые до сих пор недостаточно исследованы, а отсутствие методов их комплексного решения на стадии производства излучающих кристаллов и технологии их сборки в светодиодах существенно ограничивает применение готовых приборов в большинстве устройств специальной сигнализации (светофоры, световая сигнализация), в устройствах ответственного применения с повышенной степенью надежности (судовое, шахтное и аварийное освещение) и в устройствах стратегического назначения (военная и космическая техника).

Наиболее значимой является проблема изменения (деградации) всего комплекса первоначальных параметров излучающих структур и светодиодов в целом. Изучение механизмов деградации в сложившихся условиях массового производства кристаллов и светодиодов на их основе является очень актуальным.

Результаты исследований выходят за рамки чисто научных программ и становятся востребованными непосредственно на производстве, где уже сейчас все больше требуется достоверная оценка не только параметров произведенных светодиодов, но и неразрушающие методы текущей диагностики, прогнозирование их надежности и срока службы.

Одним из самых информативных методов неразрушающей диагностики состояния гетероструктуры СИД является вольтамперная характеристика (ВАХ). Подробное рассмотрение ВАХ, показывает, что при малых токах, когда последовательное сопротивление оказывает минимальное влияние на ход ВАХ, наблюдаются наиболее существенные изменения ВАХ в процессе испытаний. Это происходит из-за наличия шунтирующих центров безызлучательной рекомбинации, влияние которых заметно при самых низких прямых напряжениях при измерении ВАХ. Даже в начале наработки (испытаний), на начальной стадии деградации, происходит изменение наклона кривой ВАХ, она становится линейной, стремясь к характеристике линейного сопротивления.

2 ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ

Рассмотрим анизотипный гетеропереход, у которого ширина запрещенной зоны полупроводника р-типа (E_{g1}) меньше, чем ширина запрещенной зоны полупроводника n-типа (E_{g2}). Энергия же электронного сродства у первого полупроводника X_{01} больше, чем у второго X_{02} . После приведения этих полупроводников в контакт и установления равновесного состояния положение уровня Ферми по обе стороны контакта должно быть одинаковым. Исходя из этого, энергетическую диаграмму гетероперехода можно строить следующим образом, см. рис. 2.1а.

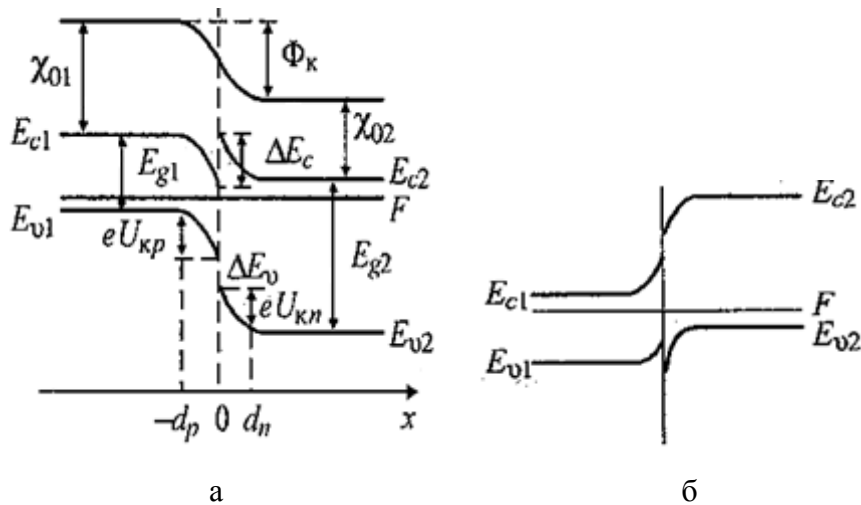


Рисунок 2.1 – Энергетические диаграммы p-n (а) и n-p (б) – переходов

Вначале проводится горизонтальная линия, соответствующая положению уровню Ферми (F) после контактирования. Уровень энергии электрона в вакууме для каждого из полупроводников должен располагаться выше уровня Ферми на расстояниях, равных термодинамическим работам выхода X_{01} и X_{02} . Перепад уровня энергии электрона в вакууме на границе раздела полупроводников определяет контактную разность потенциалов $\Phi_k = X_{01} - X_{02}$. Дно зоны проводимости первого полупроводника (E_{c1}) должно иметь энергетический зазор X_{01} с уровнем электрона в вакууме вплоть до границы раздела (штриховая линия с координатой $x = 0$). Потолок валентной зоны (E_{v1}) располагается ниже (E_{c1}) на ширину запрещенной зоны (E_{g1}). Аналогично строится и правая часть энергетической диаграммы гетероперехода.

Величины разрывов краёв зон ΔE_c ΔE_v можно рассчитать, зная значения X_{01} и X_{02} , E_{g1} и E_{g2} . Для точки $x = 0$ имеем:

$$E_{g2} = E_{g1} + \Delta E_c + \Delta E_v, \quad (2.1)$$

$$\Delta E_c = X_{01} - X_{02} \quad (2.2)$$

Тогда из равенства (2.1) следует, что:

$$\Delta E_v = E_{g2} - E_{g1} - (X_{01} - X_{02}) \quad (2.3)$$

Принципиальное различие рассматриваемого p – n-гетероперехода от обычного p – n-перехода заключается в том, что высоты барьеров, которые

должны преодолеть электроны и дырки при переходе через границу раздела, оказываются разными. Из рис. 2.1а видно, что для перехода из n- в p-область электрон должен преодолеть потенциальный барьер с высотой $\Phi_{\text{он}} = eU_{\text{кп}}$, где $U_{\text{кп}}$ – контактная разность потенциалов в n-области. Переход дырок из p- в n-область связан с преодолением барьера высотой $\Phi_{\text{ор}} = eU_{\text{кр}} + U_{\text{кп}} + \Delta E_v$, где $U_{\text{кр}}$ – контактная разность потенциалов в p-области. Отсюда следует, что в случае, когда $\Phi_{\text{ор}} \gg \Phi_{\text{он}}$ при подаче прямого смещения на такой гетеропереход инжекционная составляющая тока должна полностью обеспечиваться электронами широкозонного полупроводника.

Рассмотрим возможные механизмы переноса зарядов в анизотипных гетеропереходах, см. рис. 2.1 и соответствующие им зависимости тока от напряжения.

2.1 Инжекционный ток.

Для p-n -переходов, энергетические диаграммы которых представлены на рис. 2.1, при прямом смещении преобладающим может быть ток, обусловленный инжекцией основных носителей из широкозонного полупроводника в узкозонный.

$$J = J_0 \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_{\text{к2}}}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U_2}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{e \cdot U_1}{kT}\right)\right] \quad (2.4)$$

Где для гетероперехода второго типа (рис.2.1 б)

$$U_2 = \frac{U}{\delta_r}; \quad U_1 = (1 - \delta_r^{-1}) \cdot U; \quad \delta_r = 1 + \varepsilon_p p_p / \varepsilon_n n_n \quad (2.5)$$

Если ток ограничен скоростью диффузии дырок в узкозонном полупроводнике, а не рекомбинацией в ОПЗ, то:

$$J_0 = eK_p p_p D_{p1} / L_{p1}, \quad (2.6)$$

где K_p – коэффициент пропускания дырок через границу раздела. Он показывает, какая часть носителей, имеющих энергию, достаточную для преодоления барьера, на самом деле переходит в узкозонный полупроводник. Из этого выражения следует, что при достаточно большом прямом смещении

$$J \sim \exp(eU / (\delta_r kT)) \quad (2.7)$$

В случае, когда $\varepsilon_n n_n \gg \varepsilon_p p_p$, $\delta_r = 1$, а $U_1 = 0$.

2.2 Рекомбинационный ток

Если на границе раздела p-n-гетероперехода имеются рекомбинационные уровни, см. рис. 2.2, то рекомбинационный ток может стать основной составляющей прямого тока. В модели Са-Нойса-Шокли, предполагается, что центры рекомбинации однородно распределены в ОПЗ p-n-гетероперехода и

что их энергетическое положение в запрещенной зоне можно характеризовать одним значением энергии Et . В гетеропереходе граничные состояния имеют (как правило) непрерывное распределение по энергии и сосредоточены вблизи от границы раздела. С учетом этих обстоятельств было показано, что:

$$J_{рек} \approx \exp\left(\frac{eU}{\delta_p kT}\right), \quad (2.8)$$

где δ_p меняется от 1 до 2 в зависимости от величины отношения: $\frac{\epsilon_p P_p}{\epsilon_n n_n}$.

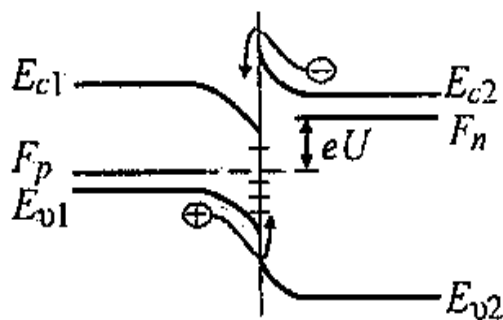


Рисунок 2.2 – Энергетическая диаграмма p-n – гетероперехода при прямом смещении

2.3 Туннельно-рекомбинационный ток

Туннельно-рекомбинационная составляющая тока через p-n-гетеропереход, у которого n-область легирована сильнее, чем p-область, может быть обусловлена переходами электронов из зоны проводимости n-полупроводника на локальный уровень в запрещенной зоне с последующим туннелированием в валентную зону p-полупроводника, см. рис. 2.3, путь А. Либо электрон вначале может туннелировать на локальное состояние в запрещенной зоне p-полупроводника, а затем перейти в валентную зону, рис. 2.3, путь В. Возможен также переход из зоны проводимости n-полупроводника по пути С, состоящем из нескольких ступенек «туннелирование – рекомбинация».

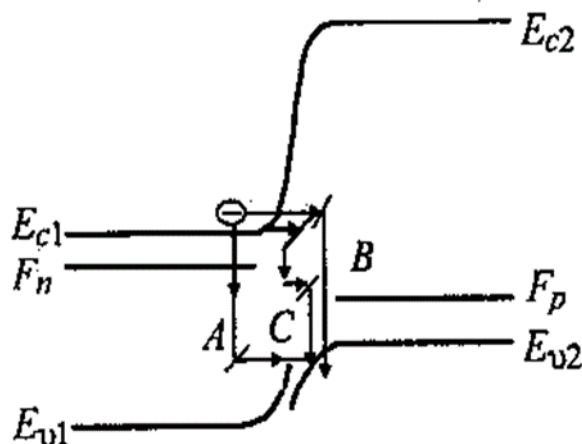


Рисунок 2.3 – Различные пути туннельно-рекомбинационного переноса заряда в p-n – гетеропереходе

В предположении, что переход электронов происходит по пути А и что процессом, ограничивающим скорость переноса заряда, является туннелирование, была получена следующая зависимость плотности тока от напряжения:

$$J \approx N_t \exp \left[- \frac{4\sqrt{2m_n^*}(U_k - \delta_r^{-1}U)}{3\hbar\sqrt{2p_p/\epsilon_p}} \right] \quad (2.9)$$

Это выражение определяет экспоненциальную зависимость ВАХ и слабую зависимость от температуры угла наклона ВАХ в логарифмических координатах. Температурная зависимость туннельно-рекомбинационной составляющей тока определяется соответствующей зависимостью U_k . Выражение (2.9), по-видимому, справедливо для любого из рассмотренных путей перехода электронов из n – в p – область.

Экспериментальные исследования показали, что на прямой ветви ВАХ многих анизотипных гетеропереходов можно выделить два участка, см. рис.2.4.

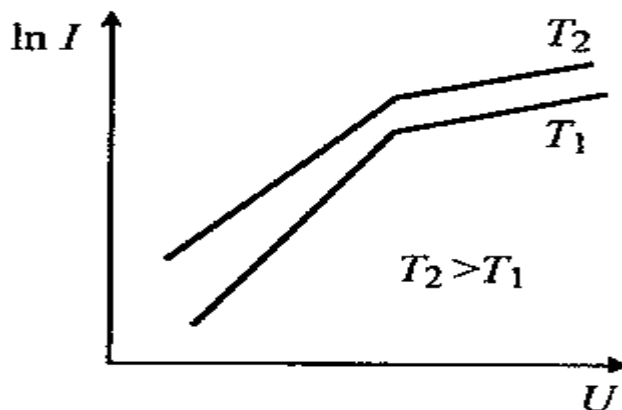


Рисунок 2.4 – Типичный вид зависимости lnI от U для резких анизотипных гетеропереходов

В области малых напряжений преобладающей компонентой является рекомбинационная составляющая тока, и тангенс угла наклона ВАХ в полулогарифмических координатах к оси напряжений уменьшается при увеличении температуры (изменяется обратно пропорционально T).

В области больших напряжений величину тока ограничивает процесс туннелирования и ВАХ описывается формулой (2.9). **Наклон второго участка ВАХ практически не зависит от температуры, см. рис. 2.4.**

Такой переход одного механизма переноса заряда через гетеропереход в другой можно объяснить, предполагая **инжекцию носителей в ОПЗ из широкозонного полупроводника и их рекомбинацию с носителями, туннелирующими из узкозонного полупроводника.**

В этой модели рекомбинационный и туннельный токи текут последовательно при переходе через границу раздела, но так как рекомбинационный ток растет быстрее при увеличении U, чем туннельный, то при высоких напряжениях полный ток ограничивается процессом туннелирования.

3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ СИД

В качестве объекта исследования использовались синие AlGaIn/InGaIn/GaN светодиоды малой мощности фирмы SemiLEDs - SL-V-B24AD в корпусе без люминофора. Кристаллы светодиодов размещены в металлополимерном корпусе, пригодном как для ручного, так и для автоматизированного поверхностного монтажа. Общий вид корпуса и его габариты представлены на рис.3.1.

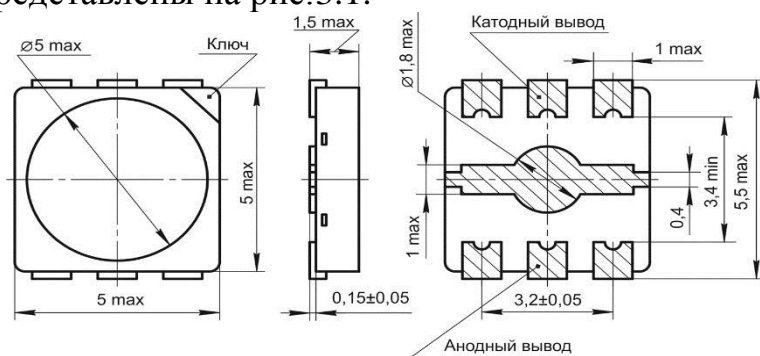


Рисунок 3.1 – Конструкция корпуса СИД

На рис. 3.2 изображены конфигурации электродов кристаллов, в таблице 1 ниже представлены основные характеристики данных светодиодов, а на рис. 3.3 – конструкция кристалла СИД.

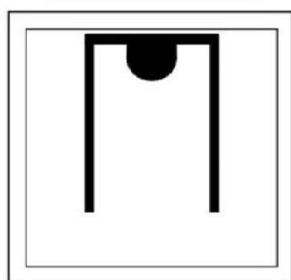


Рисунок 3.2 - Конфигурация электродов кристаллов малой мощности

Таблица 3.1 – Технические характеристики светодиода.

Характеристика	Значение
Пиковый прямой ток	300 мА
Прямой ток	150 мА
Обратное напряжение	5 В
Макс. температура активной зоны	+125 °С
Диапазон рабочих температур	-40 °С...+110 °С
Критическая температура (разрушения)	+280 °С < 10 с
Отн., влажность воздуха при T = +25 °С	не более 98%

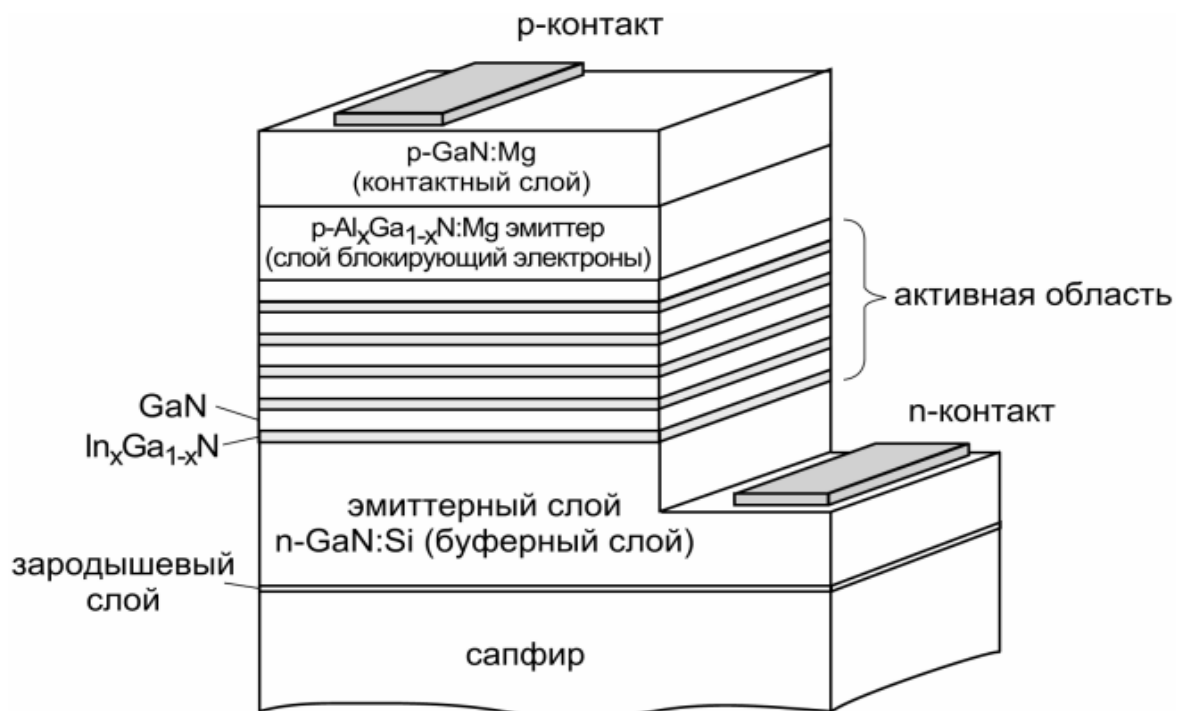


Рисунок 3.3 – Конструкция кристалла СИД

4 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИБОРА KEYSIGHT B2912A

4.1 Техническое описание:

Прецизионный параметрический анализатор B2902A 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.

Благодаря широкому диапазону выходного напряжения и силы тока (3 А в режиме постоянного тока и 10,5 А в импульсном режиме) и высокому разрешению (100 фА/100 нВ) анализатор B2902A обеспечивает высокую точность определения характеристик тестируемого устройства.

Интуитивно-понятный графический пользовательский интерфейс на основе 4,3-дюймового цветного жидкокристаллического дисплея с различными режимами отображения повышает эффективность тестирования, отладки и определения параметров полупроводниковых приборов, компонентов и материалов. Внесен в Государственный реестр средств измерений за номером 48623-11.

4.2 Основные характеристики:

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.

4.3 Подготовка прибора к использованию

Для позиционирования прибора на столе:

1. Возьмитесь за ручку по бокам и потяните наружу.
2. Поверните ручку.
3. Установите прибор по нужным углом к поверхности стола.

Чтобы включить прибор:

1. Подключите шнур питания от входного разъема переменного тока к розетке переменного тока.
2. Нажмите сетевой переключатель (см. поз.1 на рис. 4.1)

4.4 Описание и назначение ручек управления на лицевой стороне прибора

На рис. 4.1 и 4.2 приведен внешний вид передней и задней панелей прибора. Ниже показано назначение кнопок, ручек, панелей, гнезд, разъемов и экрана монитора прибора

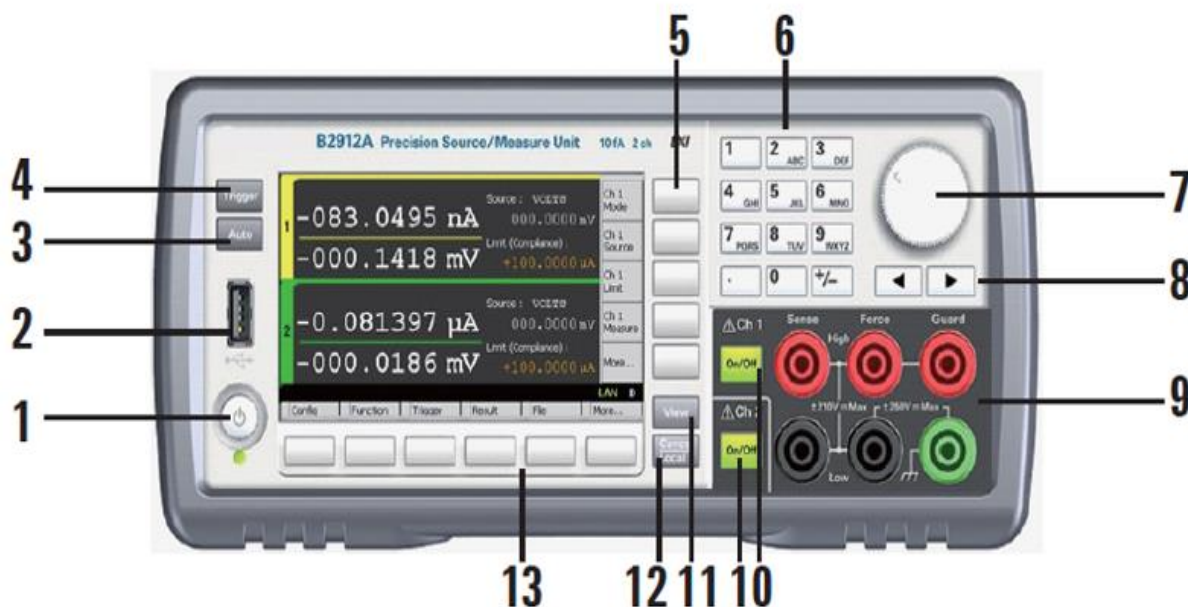


Рисунок 4.1 – Внешний вид лицевой панели прибора

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): перемещает 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. Выключает канал, если он находится в состоянии выхода даже если он находится в удаленном состоянии. 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.



Рисунок 4.2 – Вид прибора сзади

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 /выход, 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.

5 ИЗМЕРЕНИЕ ВАХ СИД

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. Прокручивая поворотную ручку (7), 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».
 4. 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».
 5. После того, как установили напряжение и ток, нажимаем 1 раз 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).
6. 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.

5.1 Сохранение данных

1. Включить 1 канал и вставить флэшку.
2. Нажать один раз кнопку против иконки «More» в нижнем горизонтальном ряду под экраном.
3. Потом нажать в нижнем горизонтальном ряду кнопок под экраном кнопку против иконки «File» - «Save» - «Measure».
4. Крутя шайбу (поворотную ручку) попадаем курсором в командную строку, нажимаем на шайбу в правом вертикальном ряду кнопок (на экране) выбираем буквенный, цифровой или комбинированный вид названия файла напротив иконок «ABC», «123». Вводя имя файла,

пользуемся клавиатурой прибора. Если нужно удалить или вставить символ, пользуемся нижним горизонтальным рядом кнопок.

5. После окончания ввода имени файла нажимаем «ОК». Файл запишется в корневой каталог флэшки.

5.2 Преобразование записанного файла

1. Открываем файл в Microsoft Excel. Данные в этом файле перечислены (приведены) через запятую.
2. Чтобы это исправить, выделяем полностью первый столбец, нажимаем на верхней панели иконку «Данные» в ней находим надпись «Текст по столбцам» и нажимаем.
3. Выбираем параметр «С разделителями» и нажимаем «Далее».
4. Потом в символах «Разделители» выбираем «Запятая» и «Пробел», ставим галочки и нажимаем «Далее».
5. Нажимаем на иконку «Подробнее...», в разделителе целой и дробной части заменяем символ с запятой на точку и нажимаем «ОК» и кнопку «Готово».

6 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

6.1 Исследование прямых ветвей ВАХ в зависимости от времени испытаний СИД

- Ознакомиться с теоретической частью описания лабораторной работы, см. разд. 2, материалом презентаций соответствующих лекций.
- Ознакомиться с конструкцией и характеристиками образцов СИД, см. разд. 3.
- Ознакомиться с кратким описанием прибора Keysight B2912A и его техническими характеристиками, разд. 4.
- Подготовить прибор к измерению прямых ветвей ВАХ, см. разд. 4.
- Ознакомиться с порядком измерения ВАХ СИД (разд. 5).
- Провести измерения ВАХ СИД до и после испытаний при номинальном режиме.
- По результатам измерений сравнить (качественно и количественно) полученные ВАХ друг с другом, выполнить необходимые расчеты, определить критические параметры ВАХ СИД до и после испытаний, сделать выводы, написать отчет.
- Сдать отчет по лабораторной работе с защитой (ответами на контрольные вопросы преподавателя).

Примечание. Определить по ВАХ следующие параметры (до и после испытаний):

- величину паразитного параллельного сопротивления, для этого построить ВАХ в диапазоне напряжений от 0...1,0В в обычных координатах; см. материал презентаций лекций и [1];
- величину паразитного последовательного сопротивления [1],
- величину напряжения преждевременного включения, см. [1] и материал презентаций лекций;
- коэффициент неидеальности ВАХ, см. [1] и материал презентаций лекций.

6.2 Исследование обратных ветвей ВАХ в зависимости от времени испытаний СИД

- Ознакомиться с теоретической частью лабораторной работы.
- Ознакомиться с конструкцией и характеристиками образцов СИД, разд. 2 описания лабораторной работы.
- Ознакомиться с кратким описанием прибора Keysight B2912A и его техническими характеристиками, разд. 3 описания лабораторной работы.
- Подготовить прибор к измерению ВАХ, см. разд. 3.3 – 3.4 описания лабораторной работы.

- Ознакомиться с порядком измерения ВАХ СИД (разд. 4) описания лабораторной работы.
- Провести измерения полной ВАХ СИД (прямой и обратной ветвей) до и после испытаний при номинальном режиме.
- По результатам измерений сравнить (качественно и количественно) полученные ВАХ друг с другом, определить критические параметры ВАХ СИД до и после испытаний, сделать выводы, написать отчет.
- Сдать отчет по лабораторной работе с защитой (ответами на контрольные вопросы преподавателя).

Примечание. Провести исследование полных ВАХ (прямой и обратной ветвей ВАХ: от -3 до $+3$ В). Обращать основное внимание на обратные ветви полностью и начальные и конечные участки прямой ветви ВАХ.

Определить по ВАХ следующие параметры (до, после испытаний и после релаксации):

- Величину токов утечки, для этого построить ВАХ в диапазоне напряжений от $-3 \dots +3,0$ В в полулогарифмических координатах; см. материал презентации лекции №7. Сравнить величины токов насыщения (утечки) по прямой и обратной ветви ВАХ;
- величину напряжений расположения пиков ВАХ и их значения, см. материал презентации лекции №7. Для сравнения удобно графики разместить вместе (на одном рисунке);
- величину напряжения начала экспоненциального нарастания обратного тока (если такое есть), см. материал презентации лекции №8;
- наличие процессов ударной ионизации в гетероструктуре при обратной полярности, см. материал презентации лекции №8.
- определить (если это возможно) концентрацию заряженных примесей (дефектов), см. материал лекции №8.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего необходимо анализировать ВАХ гетероструктуры СИД.
2. Записать аналитическое выражение реальной ВАХ СИД.
3. Как определить величину паразитного параллельного сопротивления СИД.
4. Чем обусловлены токи утечки в гетероструктуре СИД.
5. Как определить величину паразитного последовательного сопротивления СИД.
6. От чего зависит величина паразитного последовательного сопротивления СИД
7. Что такое коэффициент неидеальности ВАХ СИД.
8. Чем обусловлены токи утечки при обратных напряжениях.
9. Как определить напряженность электрического поля в активной зоне СИД.
10. Как определить концентрацию заряженных примесей (дефектов) по напряжению начала ударной ионизации.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича – 2-е издание - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008, - 496 с.
2. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426с.
3. Блок прецизионного источника-измерителя серии Agilent B2900. Руководство пользователя. Электронный ресурс. Режим доступа: https://kiptm.ru/images/Production/Keysight/precision_parametric_analyzers/B2901A-opisanie-tipa.pdf.
4. Сушков В., Никифоров С. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов // Полупроводниковая светотехника. - №3. – 2011. – С.10-13.
5. Бочкарева Н.И. и др. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов // Физика и техника полупроводников. – Т.40. – вып. 1. – 2006. – С.122-127.