

И. А. Кобак, И. С. Манах, И. П. Марко

## ХАРАКТЕРИОГРАФ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ И СВЕТОДИОДОВ

При практическом применении инжекционных лазеров возникает необходимость в изучении их характеристик. Поскольку ряд основных параметров инжекционных лазеров находят по вольт-амперной (ВАХ) и ватт-амперной (ВтАХ) характеристикам, их первой и второй производным по току, при определении параметров лазерных диодов возникает необходимость в приборе, который позволил бы производить автоматическое измерение электрофизических и оптических характеристик каждого лазера и проводить их оперативный анализ с использованием ЭВМ. С целью решения этих вопросов разработана характеристикограф для измерения в автоматическом режиме вольт-амперных, ватт-амперных и ватт-вольтных характеристик светодиодов [1].

Рассмотрим некоторые экспериментальные методики, используемые при анализе электрофизических характеристик полупроводниковых оптических приборов. Отметим при этом, что большинство параметров инжекционных лазеров определяется не непосредственно из ватт-амперных, вольт-амперных характеристик, а из анализа их первых и вторых производных по току.

Одним из методов экспериментального получения первых и вторых производных от ВАХ и ВтАХ по току является модуляционное дифференцирование. Этот метод использовался для выявления тонкой структуры прямых ветвей ВАХ туннельных диодов и для исследования неоднородностей на обратных ветвях кремниевых диодов.

Теоретическое обоснование применения метода модуляционного дифференцирования для исследования полупроводниковых лазеров выполнено в работе [2] и состоит в следующем. При наложении слабой модулирующей добавки синусоидальной формы на постоянный ток  $I$ , протекающий через лазер, из-за нелинейности сопротивления последнего возникают различные гармонические составляющие напряжения. Показано, что амплитуда первой гармоники напряжения пропорциональна  $dU/dI$ , т.е. первой производной ВАХ по току, а амплитуда второй гармоники  $-d^2U/dI^2$ , т.е. второй производной ВАХ по току. Для выделения этих гармонических составляющих напряжения обычно применяются стандартные методы синхронного детектирования.

Схемы автоматической записи зависимостей  $dU/dI$  и  $I(dU/dI)$  от

И приведены в работах [2,3], измерительная аппаратура с более широкими функциональными возможностями описана в [4]. Она позволяет регистрировать на самописце следующие графики: прямую и обратную ветви ВАХ, ВтАХ (TE- и TM-моды), а также зависимости от тока таких величин, как  $dU/dI$ ,  $I(dU/dI)$ ,  $dP/dI$ ,  $|d^2P/dI^2|$ , где  $P$  – мощность излучения. Установка построена главным образом на основе промышленного оборудования и предназначена для оперативной оценки качества полупроводниковых инжекционных лазеров.

Для исследования электрофизических и оптических характеристик инжекционных лазеров предназначена установка, описанная в [5]. В ее состав входят микро-ЭВМ и крейт КАМАК, с помощью которых осуществляется управление процессом измерений, обработка результатов и представление их в виде графиков и таблиц. Установка позволяет снимать ВАХ в диапазоне токов  $10^{-10} - 2 \cdot 10^{-1}$  А, ВтАХ в диапазоне токов 0–200 мА и осуществлять построение ВАХ, ВтАХ, зависимостей  $dU/dI$ ,  $I(dU/dI)$ ,  $dP/dI$ ,  $d^2P/dI^2$ ,  $I^2(d^2U/dI^2)$ , напряжения на  $p-n$ -переходе  $U_j$  от  $I$ ,  $dU/dI$  от  $1/I$ , а также других зависимостей, определяемых пользователем. Производные от ВАХ и ВтАХ по току можно получить также в результате численного дифференцирования ВАХ и ВтАХ на ЭВМ [6,7].

ВтАХ инжекционного лазера является его основной характеристикой, так как позволяет судить о возникновении генерации и определить пороговый ток  $I_n$  (по отсечке на оси токов, получаемой экстраполяцией послепороговой части зависимости  $P = f(I)$  до пересечения с осью  $I$ ), внешнюю эффективность  $\eta_e$ , равную  $dP/dI$  (по наклону ВтАХ в послепороговой области), а также коэффициент нелинейности ВтАХ. Однако такая форма представления ВтАХ не позволяет судить о спонтанной (допороговой) части излучения, информация о которой важна при исследованиях излучательных свойств лазера. Поэтому ВтАХ целесообразно представить в виде  $\lg(P/P_0) = f(I)$  и  $\lg(P/P_0) = f(\lg(I/I_0))$ , где  $P_0$  и  $I_0$  – нормировочные значения мощности и тока.

Отсутствие нелинейностей на ВтАХ является одним из критериев пригодности лазера для применения в различных сферах. Степень нелинейности ВтАХ при наличии на ней одного излома можно охарактеризовать с помощью коэффициента нелинейности  $\beta$  (рис. 1), определяемого из соотношения  $\beta = (\eta_1 - \eta_2)/\eta_1$ . Более удобно коэффициент  $\beta$  определять по зависимости  $dP/dI$  от  $I$ . Эта зависимость позволяет определить значения  $\eta_1$  и  $\eta_2$  непосредственно в шкале  $dP/dI$ . Приборы, на ВтАХ которых имеется несколько изломов, не представляют прак-

тического интереса.

Так как к нелинейностям на ВТАХ приводят различные физические механизмы, которые могут быть обусловлены как взаимодействием интенсивного электромагнитного поля с активной средой лазера, так и особенностями лазерной гетероструктуры, то совокупность различных электрофизических характеристик может быть весьма полезна для определения природы таких явлений.

Положение максимума второй производной ВТАХ по току используется для более точного определения величины порогового тока.

Во возникновение стационарной генерации в лазерах с однородно уширенной полосой усиления сопровождается насыщением коэффициента оптического усиления и обычно регистрируется с помощью оптических методов. При этом наблюдаются следующие характерные особенности: прекращается рост интенсивности спонтанного излучения (эффект насыщения), уменьшается спектральная ширина излучения, значительно возрастает интенсивность излучения.

В инжекционных лазерах возникновение генерации сопровождается изменением их электрофизических характеристик. В работе [8] показано, что в инжекционном лазере при однородном характере насыщения усиления (однородно уширенной полосе) возникновение непрерывной генерации должно сопровождаться также и насыщением напряжения на  $p-n$ -переходе, величина которого становится равной  $U_{jнас}$  (рис. 1). При этом распределение носителей в соответствующих зонах может рассматриваться как квазиравновесное, то есть подчиняющееся статистике Ферми-Дирака. Следовательно, можно использовать понятие квазиуровней Ферми, разность которых  $\Delta F$  в активной области (определяющая инверсию населенностей рабочих уровней) стабилизируется около некоторого постоянного значения напряжения  $U_{jнас}$ , соответствующего падению напряжения на  $p-n$ -переходе. Если бы разность  $\Delta F$  продолжала возрастать с ростом тока, это привело бы к увеличению коэффициента усиления выше порогового значения, то есть к бесконечному нарастанию амплитуды поля.

Таким образом, если  $p-n$ -переход непосредственно примыкает к активному слою или находится в нем и полностью открыт, то возможно следующее отождествление  $\Delta F = eU_{jнас}$ . Эффект насыщения напряжения на  $p-n$ -переходе в пороговой области экспериментально подтвержден в работе [8] и интерпретирован как указание на однородный характер насыщения усиления.

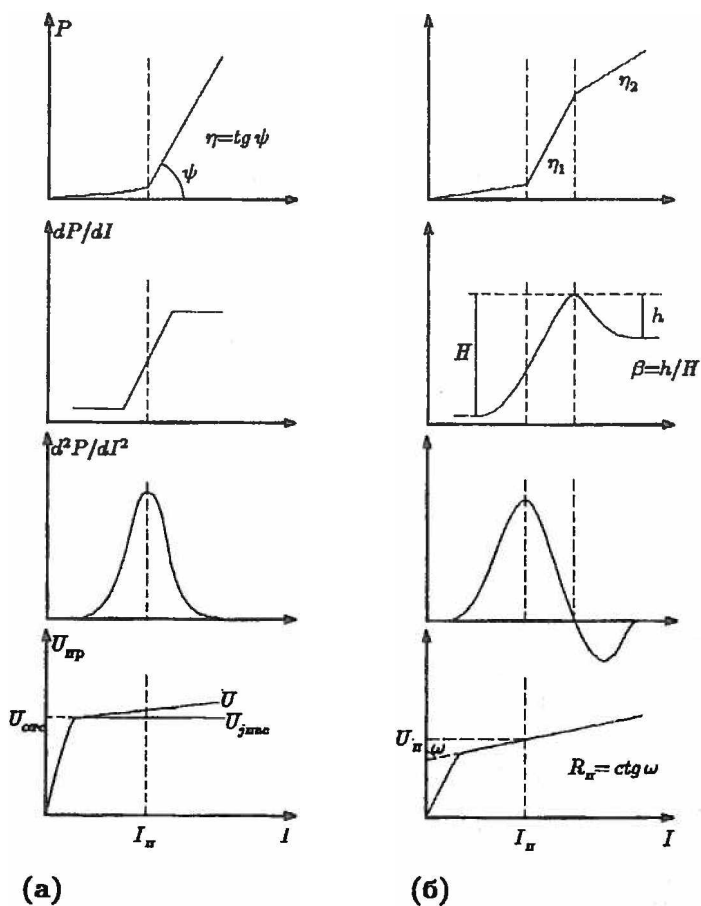


Рис. 1. Электрофизические характеристики идеального лазера с линейной ВАХ (а) и лазера, у которого эта зависимость нелинейна (б):  $P$  — мощность излучения;  $I$  — ток;  $U_{\pi p}$  и  $U_{\pi}$  — падение напряжения на лазере при протекании прямого тока и тока, равного пороговому;  $U_{отс}$  — напряжение отсечки прямой ветви ВАХ;  $U_{нас}$  — напряжение насыщения на  $p$ - $n$ -переходе

Следовательно, отличительной особенностью полупроводниковых инжекционных лазеров является возможность определять наличие или отсутствие как генерации, так и однородного уширения полосы излучения по поведению только электрических параметров лазеров без применения дорогостоящего спектроскопического оборудования. По поведению электрофизических характеристик можно определить и другие параметры лазеров, такие как тип и характер пробоя, наличие эффекта модуляции базы и т. д.

Прямая ветвь ВАХ диодной структуры, содержащей  $p-n$ -переход, описывается соотношением

$$I = I_0 [\exp(q(U - IR_n)/nkT) - 1], \quad (1)$$

где  $I_0$  – ток насыщения;  $U$  – напряжение, приложенное к контактам диода;  $n$  – коэффициент неидеальности ВАХ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $R_n$  – распределенное последовательное сопротивление.

При больших токах, когда напряжение на  $p-n$ -переходе приближается к контактной разности потенциалов  $\varphi_x$ , ВАХ принимает вид:

$$U = \varphi_x + IR_n. \quad (2)$$

Следовательно, по прямой ветви ВАХ, представленной в виде зависимости  $I - U$ , можно определить:

- 1) контактную разность потенциалов  $\varphi_x$  (по величине напряжения отсечки  $U_{отс}$ , получаемой экстраполяцией прямолинейного участка ВАХ в области больших токов до пересечения с осью напряжений  $U$ , при этом с большой степенью достоверности полагается, что  $\varphi_x = U$ );
- 2) сопротивление  $R_n$  (по наклону прямолинейного участка ВАХ).

Известно также, что если сопротивление, описывающее ВАХ, представить в виде  $U = \lg(I/I_0)$ , то по наклону графика можно определить значение  $n$ .

Для различных практических применений представляет интерес изменение дифференциального сопротивления диода с ростом тока, то есть зависимость  $R_d(I) = dU/dI$ .

Возникновение генерации сопровождается скачкообразным уменьшением  $R_d$  в области порога. Ток, соответствующий этому скачку, и есть пороговый ток  $I_n$ . Кроме того, из этого графика определяется последовательное сопротивление  $R_n$  [8].

При работе с характериографом все операции по нахождению параметров исследуемого лазера осуществляются на ЭВМ автоматически с использованием информации, полученной в результате измерений.

Разработанный нами характериограф представляет собой автоматизированный измерительный комплекс для исследования ВАХ и ВТАХ инжекционных лазеров и светодиодов [9]. Измерение вольт-амперной или ватт-амперной характеристик исследуемого прибора осуществляется в автоматическом режиме. Полученная информация обрабатывается на ЭВМ и отображается в любом удобном виде (вывод графиков на экран монитора, вывод графиков на печатающее устройство или вывод данных в виде таблицы). Возможен анализ измеренных характеристик на ЭВМ. Из анализа этих характеристик определяются наиболее важные электрофизические и оптические параметры исследуемого инжекционного лазера, такие, как пороговый ток  $I_n$ , внешняя эффективность  $\eta_e$ , коэффициент нелинейности  $\beta$ , последовательное сопротивление  $R_n$ , дифференциальное сопротивление диода в области порога  $R_d$ , остаточное сопротивление  $R_{ост}$  (вводится для оценки степени отклонения от идеализированной модели лазерного диода), коэффициент неидеальности ВАХ  $n$ , контактную разность потенциалов  $\varphi_k$ , напряжение пробоя  $U_{проб}$ , напряжение насыщения на  $p-n$ -переходе  $U_{jnac}$ .

Все составные узлы характериографа представляют собой функционально законченные устройства, работающие под управлением ЭВМ. Функциональная схема установки приведена на рис. 2. В состав измерительного комплекса входят следующие основные модули: ПЭВМ, интерфейс, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), программируемый усилитель, коммутатор, фотодиод с согласующим усилителем.

Связь с ЭВМ осуществляется с помощью магистрали через унифицированный интерфейс. Такое построение системы позволяет расширить ее возможности путем включения дополнительных модулей.

Интерфейс разработан для ПЭВМ ЕС-1841 и позволяет работать 16-разрядными словами. В состав интерфейса входят буфер шины данных (БШД), дешифратор адреса (ДА), дешифратор команд управления (ДКУ), буфер команд управления (БКУ) (рис. 3).

Конструктивно интерфейс состоит из двух частей. Первая часть предназначена для дешифрации команд управления и двунаправленной передачи данных, вторая содержит устройства коммутации и управления схемой. Такая конструкция интерфейса наиболее эффективна. Из анализа адресного пространства ПЭВМ для управления различными режимами работы выделены адреса  $\$3e^*$ . При выставлении на адресную шину числа  $\$3e^*$  на выходе ДА, собранного на базе логических элементов микросхем К555ЛН1 и К555ЛА2, появляется сигнал низкого



Рис. 2. Функциональная схема характериографа

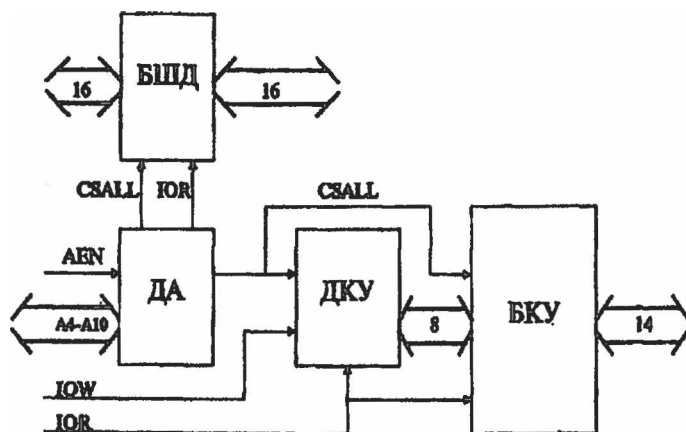


Рис. 3. Структурная схема интерфейса

уровня, разрешающий работу буферных элементов шины данных. Направление передачи информации определяется сигналом IOR. Команды управления, дешифрованные в ДКУ, поступают во внешнюю цепь через буфер управления, работающий в одном направлении.

Дешифратор команд управления предназначен для дешифрации управляющих сигналов чтения IOR1-IOR4 и записи IOW1-IOW4. Он разработан на основе микросхемы K1533ИК4, содержащей два дешифратора с 2 на 4.

Аналоговая часть установки включает в себя следующие основные элементы: блок регистров для хранения кода тока накачки лазерного диода и коэффициента усиления программируемого усилителя; ЦАП и схему стабилизации напряжения, задающего ток накачки; помехоустойчивые линии связи для измерений на лазерном диоде и фотодиоде; коммутатор для выбора измерительной цепи; регистр для хранения кода управления коммутатором; схему АЦП; программируемый усилитель; генератор тактовых импульсов; стабилизатор опорного напряжения; блок буферных элементов для связи АЦП с шиной данных.

Для того чтобы задать ток накачки лазера, необходимо создать цепочку элементов, преобразующих двоичный код тока, задаваемого в ЭВМ, в аналоговую величину и усиливающих этот сигнал после преобразования. Структурная схема такого преобразователя приведена на рис. 4.

В зависимости от состояния *D*-триггера ключ может замыкаться на землю или переводить свой выход в высокоомное состояние. При этом схема подачи тока накачки будет соответственно блокироваться или работать в заданном режиме. Управление триггером осуществляется через порт с адресом \$3еb единицей или нулем разряда *D8*.

Цифро-аналоговый преобразователь разработан на основе микросхемы K594ПА1 [10], которая представляет собой параллельный 12-разрядный ЦАП с суммированием токов. Величина тока на аналоговом выходе определяется по формуле

$$I = \left( \frac{U_{REF}}{R_{eq}} \right) \sum_{i=1}^{12} 2^{-i} a_i, \quad (3)$$

где  $R_{eq}$  – эквивалентное сопротивление резистивной матрицы ЦАП;  $a_i$  – значение двоичного кода на входе ЦАП;  $U_{REF}$  – опорное напряжение.

Выбор ЦАП обусловлен малой величиной максимального времени установления выходного тока (максимальное время с момента поступления двоичного кода на входы ЦАП до получения тока на аналоговом

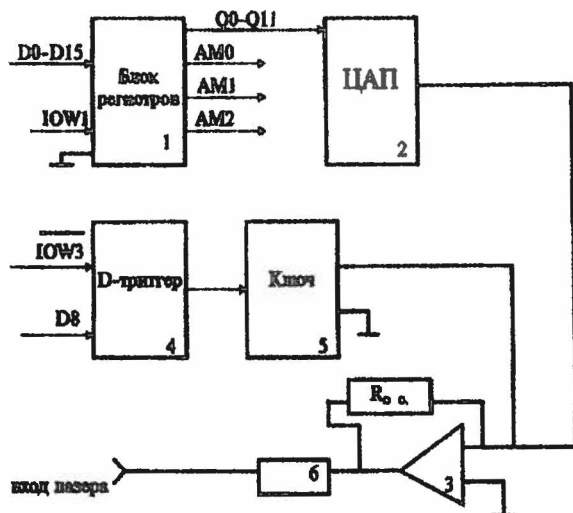


Рис. 4. Структурная схема устройства формирования тока накачки

выходе). Кроме того, двенадцатиразрядный ЦАП позволяет задавать 4095 градаций тока, чем достигается наиболее точное исследование характеристик объекта.

Для формирования опорного напряжения используется параметрический стабилизатор, необходимость которого обусловлена пульсациями напряжения источников электропитания вследствие изменения напряжения сети и изменения нагрузки. Опорное напряжение формируется из нестабильного входного напряжения величиной  $U_{вх} = 15В$ . Использование в схеме стабилизатора КС191Ф обусловлено, во-первых, малым разбросом напряжения стабилизации ( $\pm 5\%$ ) и, во-вторых, очень малым температурным коэффициентом напряжения стабилизации ( $\Delta U_{ст}/\Delta T = \pm 5 \times 10^{-4}\%/^{\circ}C$ ).

Блок 3 включает в себя два операционных усилителя серии К140УД14 и транзистор КТ972. Один из операционных усилителей предназначен для преобразования выходного тока ЦАП в напряжение, величина которого стабилизируется схемой, собранной на втором операционном усилителе и транзисторе. Резистор  $R_{0с}$  определяет коэффициент преобразования напряжения. В данной схеме резисторы подобраны таким образом, что максимальному коду на входе цифро-аналогового преобразователя соответствует напряжение  $U_{вых} = 7,5В$  на эмиттере транзистора. В аналитической форме связь напряжения

на выходе со значением двоичного кода на входе ЦАП определяется формулой:

$$U_{\text{вых}} = R_{\text{ос}} I = \left( \frac{U_{\text{REF}} R_{\text{ос}}}{R_{\text{сч}} \right) \sum_{i=1}^{12} 2^{-i} a_i. \quad (4)$$

В качестве аналого-цифрового преобразователя в приборе используется модуль, собранный на базе микросхемы КР572ПВ1 [10], выполняющий функции 12-разрядного АЦП последовательных приближений с выводом параллельного двоичного кода. Типовое время преобразования АЦП составляет 110 мкс. Для обеспечения работы АЦП собран генератор тактовых импульсов с частотой 160 кГц (на основе микросхемы К555ЛН1 [11]). В данной схеме включения между выходом ЦАП микросхемы КР572ПВ1 и компаратором напряжения (К555СА3) используется буферный операционный усилитель (К140УД14) для достижения максимальной точности и стабильности статических параметров преобразования.

Запуск АЦП осуществляется при записи любого числа в порт с адресом \$3ea. По приходу импульса "Конец преобразования" соответствующий измеренной величине напряжения код записывается в регистры, после чего считывается из порта с адресом \$3e0.

В измерительной цепи фотодиода осуществляются следующие операции: на выходе согласующего усилителя формируется напряжение, пропорциональное обратному току фотодиода  $U_{\text{ос}} = R_{\text{ос}} I_{\text{обр}}$ ; это напряжение преобразуется в ток, который на выходе шины опять преобразуется в напряжение.

Измерительная цепь базируется соответствующим кодом NC0-NC1 на входах коммутатора. Запись кода в регистр осуществляется при наличии логического нуля на выходе D-триггера числом из порта с адресом \$3e8.

По включению питания автоматически происходит обнуление цифро-аналогового преобразователя и перевод D-триггера в состояние, блокирующее схему подачи тока накачки лазерного диода. Затем, при исследовании вольт-амперной характеристики соответствующим кодом осуществляется переключение коммутатора на вход лазера. После этого происходит сброс триггера блокировки и в регистры, связанные с ЦАП, записывается начальное значение кода тока накачки. Так как ключ открыт, на лазерном диоде устанавливается некоторое значение напряжения. После этого происходит запуск АЦП. Код, сформированный АЦП и характеризующий величину напряжения на лазере, через буферный элемент записывается в ЭВМ. Коэффициент усиления



Рис. 5. Структурная схема программного обеспечения

программируемого усилителя в процессе измерений выбирается автоматически из условия обеспечения максимальной точности измерений. После первого шага осуществляется переход ко второму и так далее. Требуемый диапазон измерений задается оператором.

При исследовании ватт-амперной характеристики на каждом шаге аналого-цифровой преобразователь преобразует в код напряжение на лазере, необходимое для вычисления величины тока, протекающего через лазерный диод, и напряжение на фотодиоде, пропорциональное мощности генерируемого излучения. Таким образом, на каждом шаге происходит переключение входов коммутатора. Коэффициент передачи программируемого усилителя выбирается автоматически.

В ходе измерений ВАХ и ВТАХ на диске формируется файл данных, который затем подвергается дальнейшей обработке, в ходе которой вычисляются действительные значения измеренных физических величин и устраняются погрешности измерений. В результате этой обработки на диске формируется новый файл, содержащий информацию, готовую к отображению.

Программы управления функционально ориентированными модулями обработки и отображения результатов разбиты на элементарные

блоки, хранящиеся в базовой библиотеке, объединяемой в требуемый алгоритм функционирования и обработки соответствующих сигналов согласно с требованиями оператора в зависимости от складывающихся условий проведения эксперимента.

В состав базовой библиотеки входят: подпрограмма ввода информации; подпрограмма головного меню; подпрограммы исследования ВАХ и ВtАХ, преобразования результатов измерений; подпрограммы определения параметров лазера; меню выбора способа отображения информации; подпрограммы вывода графиков на принтер, на экран и табличного вывода информации (рис. 5).

Управление установкой осуществляется таким образом, что выполнение всех процедур возможно в любой последовательности. Это позволяет выбрать наиболее эффективный способ проведения измерений. При доработке прибора в программное обеспечение возможно добавление новых блоков, обеспечивающих выполнение дополнительных функций.

Как отмечалось выше, цифро-аналоговый преобразователь обеспечивает 4095 градаций тока через  $p-n$ -переход лазерного диода. Максимальное значение тока устанавливается внешним переключателем (60мА, 120мА, 200мА). Кроме того, в схеме используется 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь, на входе которого включен программируемый усилитель, обладающий коэффициентами усиления, образующими следующий набор: 1.2:1, 1:1, 1:2, 1:5, 1:10, 1:20, 1:50, 1:100. Таким образом достигается достаточно высокая точность проводимых исследований.

### Литература

1. Игнатенко О. В., Манах И. С., Пикулик В. Г. Автоматизированный комплекс для измерения электрических и энергетических параметров светодиодов // Применение лазерной и оптико-электронной техники в учебном процессе. Вып. 2. - Мн.: Белгосуниверситет, 1995. - С.109-120.
2. Barnes P. A., Paoli T. L. Derivative Measurements of the Current-Voltage Characteristics of Double-Heterostructure Injection Lasers // IEEE J. Quantum Electronics. - 1976. - Vol.QE-12, №10. - P. 633-639.
3. Елисеев П. Г., Охотников О. Г., Пак Г. Т. Свойства планарных полосковых гетероплазеров. II. Анализ электрических характеристик // Квантовая электроника. - 1980. - Т.7, №8(98). - С. 1670-1678.
4. Пушин И. Б., Шейкман М. К., Шерварлы Г. К. Комплекс методов для исследований электрооптических характеристик светоизлучающих структур // Тез. докл. XI Всесоюз. конф. по физике полупроводников. Т. 2. - Кишинев: 1988. - С.148-150.

5. Пузын И. Б., Шерварты Г. К. Установка для определения электрифизических параметров полупроводниковых инжекционных лазеров // Электронная техника. Сер.11. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1990. Вып. 2(54). - С. 74-80.
6. Елисеев И. Г., Страхов В. П. Одномодовая генерация в инжекционных лазерах // Письма в ЖТФ. 1972. Т. 16, вып.11. - С. 606-608.
7. Wright F. D., Joyce W. B., Craft D. C. Electrical Derivative Characteristics of InGaAsP Buried Heterostructure Lasers // J.Appl.Phys. 1982. Vol 53, №3. P 1354-1372.
8. Пузын И. Б., Шейнман М. К., Шерварты Г. К. Определение важнейших параметров непрерывных инжекционных гетеролазеров из анализа их электрофизических характеристик // Электронная техника. Сер.11. Лазерная техника и оптоэлектроника. - М.: 1991. - Вып. 1(57). - С. 3-17.
9. Бородавко А. Н., Малак И. С., Марко И. П. Характернограф для инжекционных лазеров // Научное и аналитическое приборостроение. Тез. докл. резм. конф. - Мн.: АНБ, 1995. - С.34.
10. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП. М.: Энергоатомиздат, 1990. - 365 с.
11. Цифровые интегральные микросхемы. Справочник. - Мн.: Беларусь, 1991. - 420 с.