

К. ф.-м. н. В. А. ВАСИЛЬЕВ
 Россия, Пензенский государственный университет
 E-mail: paspen@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
 05.11 2001 г.

Оппонент к. т. н. Л. Д. БУЙКО
 ("Белмикроанализ", г. Минск)

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПТОЕМКОСТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Комплекс позволяет исследовать оптические свойства полупроводниковых материалов, в частности, ширину запрещенной зоны, энергию ионизации примесей.

Известны различные оптические спектральные методы исследований твердых тел — отражательной спектроскопии, спектроскопии пропускания, спектроскопии фотопроводимости [1—3] и др. Методы отражательной спектроскопии и спектроскопии пропускания удобны тем, что они являются бесконтактными, в отличие от спектроскопии фотопроводимости.

Метод оптоемкостной спектроскопии является бесконтактным методом, в котором, как и в методе спектроскопии фотопроводимости, используется свойство полупроводников изменять электропроводность при воздействии оптического излучения.

Метод реализуется с использованием двух металлических пластин 1 и 2 (рис. 1), расположенных в одной плоскости, диэлектрика 3, емкостного преобразователя, спектрометра (например [4, 5]) или монохроматора. Исследуемый образец полупроводниковой пластины 4 помещается на металлические пластины 1 и 2 со стороны диэлектрика. Металлические пластины имеют электрические выводы *a* и *b*, которые служат для подключения твердотельной структуры к преобразователю емкости в электрический сигнал.

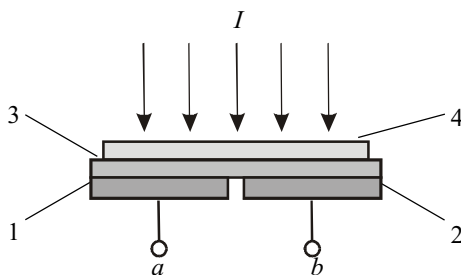


Рис. 1. Твердотельная структура для реализации метода

На рис. 2 показана блок-схема информационно-измерительного комплекса для оптоемкостной спектроскопии. Оптическое излучение от источника оптического излучения 1 через оптическую систему 2 и модулятор 3 попадает в монохроматор 4. Из монохроматора оптическое излучение с определенной длиной волны (частоты) направляется на твердотельную

структуру 5 с исследуемым образцом полупроводникового материала. Емкость твердотельной структуры преобразуется в электрический сигнал преобразователем 6. С помощью регистрирующего устройства 7 записывается емкость структуры и относительное изменение емкости структуры в зависимости от частоты (энергии фотонов).

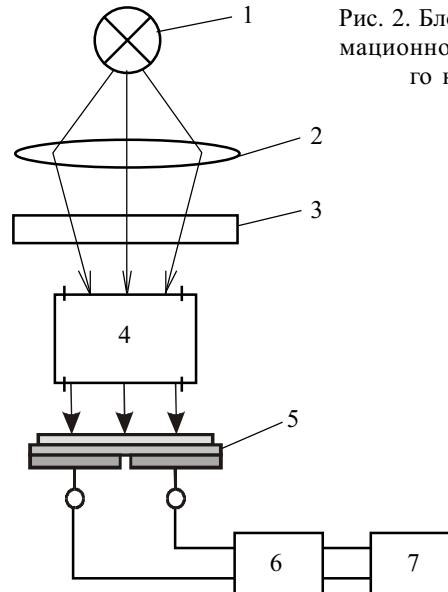


Рис. 2. Блок-схема информационно-измерительного комплекса

Таким образом, облучая поверхность полупроводникового материала оптическим излучением различной частоты ν , представляется возможным регистрировать зависимость относительного изменения емкости от энергии фотонов $h\nu$ (частоты ν , длины волны λ) с помощью установки рис. 2. При облучении поверхности полупроводникового материала в поверхностном слое полупроводника образуется избыточная концентрация свободных носителей заряда. Это приводит к изменению поверхностного сопротивления полупроводника; оно становится меньше, возрастает проводимость поверхностного слоя, и поверхностный слой начинает выполнять функции третьей проводящей пластины, расположенной параллельно металлическим пластинам 1 и 2 (рис. 1). При этом глубинные области полупроводникового материала выполняют роль диэлектрика. Как известно, диэлектрическая проницаемость полупроводников достаточно высока ($\epsilon \sim 11-14$), а емкость обычного конден-

сатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости. В результате наблюдается существенное изменение емкости между двумя металлическими пластинами.

При преобразовании емкости в электрический сигнал удобно использовать сравнение преобразуемой величины емкости твердотельной структуры C_x с опорной величиной C_0 . В качестве опорной величины целесообразно выбирать емкость конденсатора, соизмеримую с емкостью твердотельной структуры. Использование мостовых измерительных цепей позволяет получить высокую чувствительность ($\Delta C/C$) емкостного преобразователя — до $1 \cdot 10^{-9}$ — $1 \cdot 10^{-13}$. Ниже представлены различные электрические схемы преобразователя емкости в электрический сигнал, каждая из которых может быть использована.

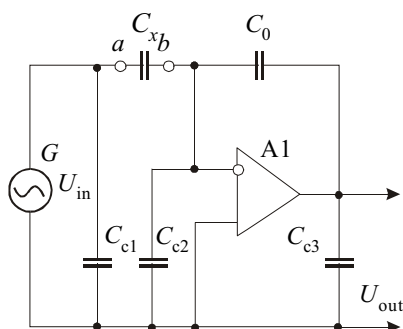


Рис. 3. Автокомпенсационная схема преобразователя емкости твердотельной структуры в электрический сигнал

Схема преобразователя, изображенная на рис. 3, относится к типу автокомпенсационных. Она представляет собой цепь с уравниванием противофазных токов, протекающих через измерительную ветвь, содержащую измеряемую емкость C_x , и опорную ветвь с опорной емкостью C_0 . Выходное напряжение такой измерительной цепи определяется выражением

$$U_{out} \cong U_{in} \frac{C_x}{C_0} \frac{1}{1 + \frac{1}{k} \left(1 + \frac{C_0}{C_x} + \frac{C_{c2}}{C_x} \right)}, \quad (1)$$

где U_{out} , U_{in} — выходное и входное напряжение измерительной цепи;

k — коэффициент усиления операционного усилителя (A1) на несущей частоте;

C_{c2} — емкость экранированного провода.

Анализ выражения (1) показывает, что рассматриваемую измерительную цепь удобно использовать для преобразования в напряжение, поскольку при больших значениях k она практически линейна. Емкости экранированных проводов C_{c1} и C_{c3} слабо влияют на функцию преобразования, и тем меньше, чем меньше выходные сопротивления генератора входного сигнала и самого операционного усилителя. Благодаря глубокой отрицательной обратной связи, охватывающей операционный усилитель, его входное сопротивление, а следовательно, и напряжение на его инвертирующем входе, очень мало. Это обстоятельство позволяет, вне зависимости от длины экранированной линии связи и, соответственно, от емкости C_{c2} , оставлять неизменной измерительную цепь. Однако при этом необходимо использовать операционный усилитель с достаточно высоким быстродействием и большим коэффициентом усиления.

Электрическую схему рис. 3 удобно использовать для измерений в широком температурном диапазоне. Она позволяет разместить измеряемую твердотельную структуру емкостью C_x и опорный конденсатор емкостью C_0 в криостате, на удалении от преобразователя. В качестве конденсатора C_0 можно использовать аналогичную исследуемой твердотельную структуру, помещенную в тень. К недостаткам схемы можно отнести сложность обеспечения устойчивости операционного усилителя и стабилизации его режима по постоянному току при больших k . Устранить этот недостаток можно путем увеличения внутреннего сопротивления операционного усилителя.

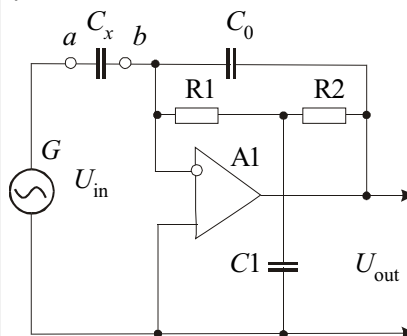


Рис. 4. Схема преобразователя с T-образной R-C-R-цепью обратной связи

На рис. 4 показана электрическая схема преобразователя с T-образной корректирующей цепью из резисторов R1, R2 и конденсатора C1. T-образная цепь обеспечивает стабилизацию режима операционного усилителя по постоянному току. Особенностью ее является то, что она имеет резонансный пик усиления на частоте

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{C_1 C_0}. \text{ Для минимизации динамической погрешности требуется выполнить соотношение } f_{вх} \gg f_0,$$

$f_0 \gg f_{п}$, где $f_{вх}$ — частота напряжения питания, f_0 — частота резонанса измерительной цепи, а $f_{п}$ — частота измерительного процесса.

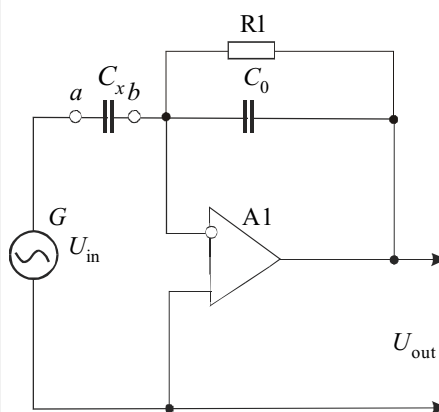


Рис. 5. Схема преобразователя с шунтирующим резистором в цепи обратной связи

С точки зрения расширения полосы пропускания преимущество имеет цепь отрицательной обратной связи по постоянному току в виде шунтирующего сопротивления R1 (см. рис. 5), включаемого между инверсным входом и выходом операционного усилителя A1. В этом случае необходимо выполнение условия $f_{вх} \gg 1/(2\pi R_1 C_0)$, из которого выбирается значение $R_1 \gg 1/(2\pi f_{вх} C_0)$. Введение шунтирующего резистора приводит к смещению выходного напряжения по постоянному уровню и, следова-

тельно, к уменьшению диапазона выходного напряжения операционного усилителя. В результате снижается чувствительность преобразователя.

В качестве устройства регистрации сигнала в самом простейшем варианте может быть использован вольтметр. При этом модулятор оптического излучения 3 (см. рис. 2) не нужен. Он необходим только в случае использования принципа синхронного детектирования сигнала, которое позволяет существенно повысить соотношение "сигнал/шум". Однако это требует применения преобразователя емкости в электрический сигнал с высокими динамическими характеристиками. С этой целью можно использовать схему рис. 4 при условии выполнения указанных выше соотношений частот.

Устройство регистрации сигнала, использующие принцип синхронного детектирования, описаны в работах [4, 5]. Блок-схема такого устройства, позволяющего регистрировать сигнал при помощи ПЭВМ, представлена на **рис. 6** (ПЭВМ на рисунке не показана).

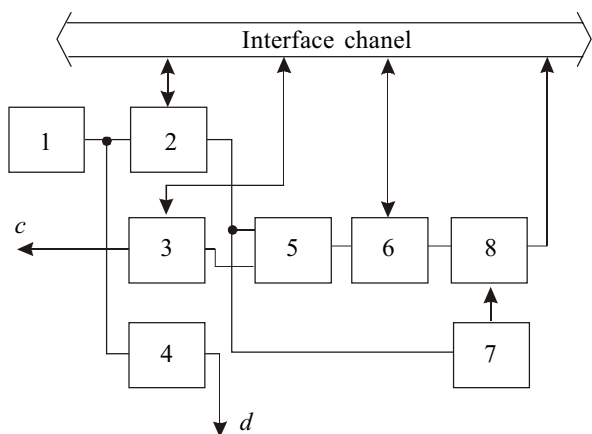


Рис. 6. Блок-схема устройства регистрации сигнала

Устройство регистрации сигнала подключается к ПЭВМ при помощи интерфейса параллельного обмена, позволяющего осуществлять ввод и вывод информации через канал в виде 16-разрядного параллельного двоичного кода по 16 адресам, принимать сигналы запросов прерываний по 4 линиям с учетом приоритета. Опорный сигнал формируется кварцевым генератором 1. Для получения опорного сигнала, сдвинутого по фазе относительно первоначального, служит фазовращатель 2. Канал регистрации включает в себя усилитель низкой частоты 3, синхронный детектор 5, фильтр низкой частоты 6, аналого-цифровой преобразователь 8. Сигнал от преобразователя емкости в электрический сигнал подается на вход *c*. Модуляция оптического сигнала осуществляется при помощи модулятора (см. рис. 2), который представляет собой лопасти, установленные на оси шагового двигателя, управляемого коммутатором шагового двигателя 4 (выход *d*). Фазовращатель, усилитель низкой частоты и фильтр низкой частоты снабжены цифровыми блоками управления. Для установки и считывания коэффициента усиления использовано 10 бит, для записи и считывания фазы — 6 бит, для записи и считывания постоянной интегрирования — 3 бита, что, соответственно, позволяет изменять ко-

эффициент усиления от 1 до 1023 по 1024 градациям, сдвигать фазу опорного сигнала относительно информационного сигнала в пределах от 0 до 360° по 128 градациям и устанавливать постоянную времени интегрирования фильтра низкой частоты от 0 до 5 с по 8 градациям, осуществляя контроль состояния регистров. Как показала практика, регулировка параметров в указанных пределах с таким числом градаций является вполне достаточной.

Для преобразования информативного сигнала использовался 15-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Формирование импульсов его запуска осуществляется формирователем импульсов 7. Его электрическая схема отличается использованием активного фильтра низкой частоты с частотой среза ~15 Гц во входном каскаде (что обеспечивает устойчивую работу) и формирователем парных импульсов (для надежного запуска АЦП).

С формирователя импульсов 7 на вход запуска АЦП в режиме измерения поступает последовательность импульсов. Считывание данных с выходных регистров АЦП производится по запросу прерывания, которым служит импульс конца преобразования АЦП.

Использование усилителя низкой частоты с цифровым управлением коэффициентом усиления, фазовращателя с цифровым управлением фазы и фильтра низкой частоты с цифровым управлением постоянной интегрирования позволяет осуществлять установку коэффициента усиления, фазы и постоянной интегрирования как с клавиатуры ПЭВМ, так и автоматически — по выходному сигналу с АЦП с помощью программы "настройка". Детальное описание работы функциональных блоков и алгоритмы приведены в [5].

Проведено экспериментальное исследование образца полупроводящего GaAs (площадь 35 мм², толщина 0,4 мм, ориентация [100], удельное сопротивление 1,7·10⁷ Ом·см, подвижность носителей заряда $\mu=2215$ см²/В·см). Спектральная зависимость относительного изменения емкости для GaAs, измеренная при температуре 300 К, показана на **рис. 7**. В области энергий фотонов от 1,3 до 1,45 эВ четко проявляется край собственного поглощения, а в области от 0,75 до 1,1 эВ наблюдается примесная полоса поглощения. Известно, что оптические свойства полупроводника и, в частности, GaAs определяются его зонной структурой. Зонная структура GaAs представлена на **рис. 8** [6, с. 482]. Край собственного поглощения в GaAs соответствует вертикальным перехо-

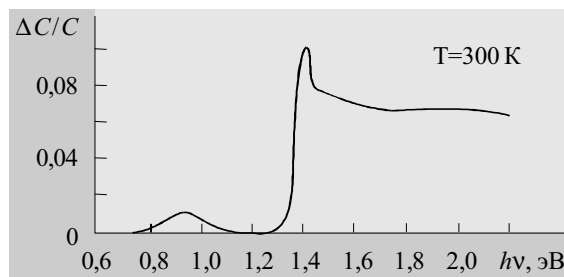


Рис. 7. Зависимость относительного изменения емкости твердотельной структуры от энергии фотонов для GaAs

дам между экстремумами двух зон при $k=0$. Ширина запрещенной зоны при температуре $T=300$ К имеет значение $\sim 1,43$ эВ, что хорошо согласуется с результатами эксперимента (рис. 7).

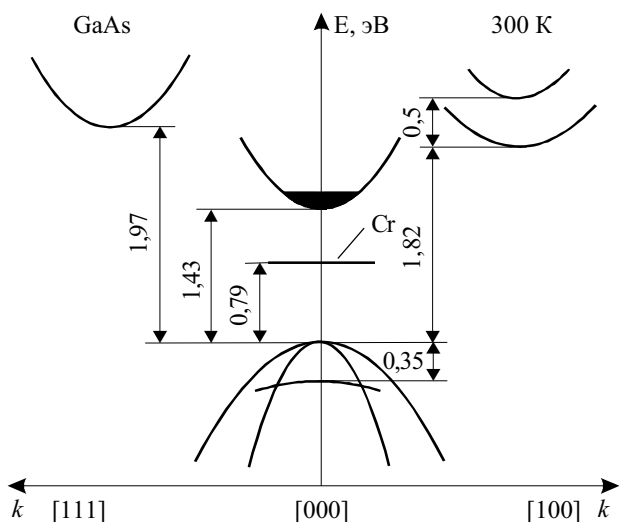


Рис 8. Энергетическая зонная диаграмма GaAs

Обычно кристаллы GaAs с высоким удельным сопротивлением ($\sim 10^7$ Ом·см) получают путем легирования арсенида галлия железом или хромом. Fe и Cr создают глубоколежащие энергетические уровни акцепторного типа и являются высокоэффективными рекомбинационными ловушками. Энергии ионизации этих примесей имеют значения: Fe — 0,52 эВ, Cr — 0,79 эВ [6, с. 488]. Судя по зависимости рис. 7, в исследованном образце присутствует примесь Cr. Ее наличие объясняет поглощение в области от 0,75 до 1,1 эВ. Уровень энергии ионизации Cr показан на рис. 8, он находится в запрещенной зоне между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны.

На рис. 9 и 10 показаны спектр поглощения [6, с. 489] и спектр рекомбинационного излучения [7, с. 353] GaAs. Сопоставляя с ними полученный спектр рис. 7, можно сделать вывод о том, что результаты экспериментальных исследований с использованием метода оптоемкостной спектроскопии хорошо согласуются с данными, полученными другими методами. Так, положение крутого подъема края собственного поглощения GaAs, изображенное на рис. 9 (кривая

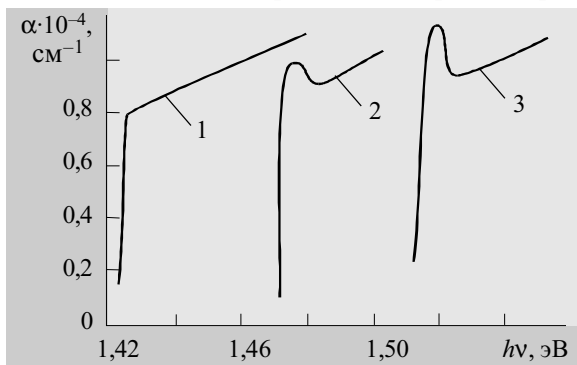


Рис 9. Зависимость коэффициента поглощения от энергии фотонов для GaAs:
1 — $T=294$ К; 2 — $T=186$ К; 3 — $T=21$ К

1), совпадает с положением крутого подъема края собственного поглощения на рис. 7. Размытость полосы края собственного поглощения в области от 1,27

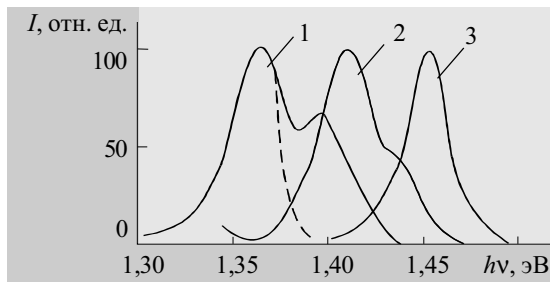


Рис 10. Зависимость интенсивности рекомбинационного излучения от энергии фотонов для GaAs:
1 — $T=300$ К; 2 — $T=200$ К; 3 — $T=77$ К

до 1,38 эВ, проявляющаяся в спектре рис. 7, подтверждается результатами исследований рекомбинационного излучения на рис.10 (кривая 1).

Как показали результаты экспериментов, информационно-измерительный комплекс, использующий бесконтактный метод оптоемкостной спектроскопии, позволяет исследовать особенности полупроводников, обнаруживать в них наличие примесей, наличие собственного поглощения. По спектральным зависимостям относительного изменения емкости можно определять глубину залегания примесей и ширину запрещенной зоны.

Достоинством метода является и то, что он позволяет исследовать полупроводниковые пластины (и полупроводниковые слои на диэлектрических подложках), толщина которых меньше, чем диффузионная длина свободных носителей заряда.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Баранов А. Н., Васильев В. А., Копылов А. А., Шерстнев В. В. Спектроскопия оптического отражения эпитаксиальных структур $\text{InAs}_x\text{Sb}_y\text{P}_{1-x-y}/\text{InAs}$ / Тез. докл. 1-й Всесоюз. конф. по физическим основам твердотельной электроники. Т. А.— Ленинград, 25—29 сентября 1989 г.— С. 164—165.
2. Васильев В. А., Дышловенко П. Е., Копылов А. А., Шакмаев А. А. Длинноволновая фурье-спектроскопия примесных состояний в фосфиде галлия // Оптоэлектронные материалы.— Л.: (Изв. ЛЭТИ.— 1989.— Вып. 414).— С. 21—24.
3. Васильев В. А. Примесная фотопроводимость в твердом растворе германий—кремний // Там же.— 1990.— Вып. 420.— С. 17—21.
4. А. с. 1622775 СССР. Фурье-спектрометр / В. А. Васильев, А. А. Копылов, А. Н. Холодилов.— Оpubл. в Б. И., 1991, № 3.
5. А. с. 1681171 СССР. Фурье-спектрометр / В. А. Васильев, А. А. Копылов, А. Н. Холодилов.— Оpubл. в Б. И., 1991, № 36.
6. Справочник по электротехническим материалам / Под ред Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева.— Т. 3.— Л.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Гавриленко В. И., Грехов А. М., Корбутяк Д. В., Литовченко В. Г. Оптические свойства полупроводников. Справочник.— Киев: Наукова думка, 1987.