

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЛЕНОК АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Цель работы: определить показатель преломления, толщину и коэффициент пропускания аморфного гидрогенизированного кремния путем изучения спектра его оптической прозрачности в диапазоне (0.4-1.2) мкм.

Приборы и оборудование, используемые в работе:

1. Спектрофотометр СФ-26.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Высокоэффективные преобразователи солнечной энергии, созданные для применения в космических аппаратах, поставили на повестку дня вопрос о возможности широкомасштабного использования экологически чистой солнечной энергии на Земле.

Для решения этой проблемы необходимо снизить стоимость электроэнергии, вырабатываемой солнечными элементами (СЭ).

Одним из направлений решения этой проблемы является уменьшение стоимости СЭ путем снижения стоимости их изготовления, предполагающего технологичные, автоматизированные процессы изготовления, низкую стоимость используемых материалов, осажденных в виде тонких пленок на недорогих подложках.

Эффективность преобразования солнечной энергии и стабильность СЭ должны быть при этом достаточно высокими для экономически оправданного применения их в энергетике.

Одним из материалов, отвечающих этим требованиям, является широко исследуемый в последнее время аморфный гидрогенизированный кремний $a\text{-Si:H}$, являющийся представителем класса некристаллических полупроводников.

В последние годы достигнут значительный прогресс как в понимании физических процессов, происходящих в $a\text{-Si:H}$, так и в технологии его получения.

По сравнению с кристаллическим Si, область межзонного (собственного) поглощения $a\text{-Si:H}$ более благоприятна для его использования в солнечных элементах. Максимум солнечного излучения расположен около 2,4 эВ, а оптическая ширина запрещенной зоны $a\text{-Si:H}$ в зависимости от содержания водорода лежит в пределах $1.49 < E_g < 2.2$, тогда как $E_g^{\text{опт}}$ монокристалла Si составляет 1.12 эВ при комнатной температуре. Коэффициент поглощения аморфного Si при энергиях фотонов $E_g^{\text{опт}} < h\nu < 3$ эВ на один-полтора

порядка выше, чем кристаллического материала. В аморфном полупроводнике из-за малой длины когерентности волновой функции и в соответствии с соотношением неопределенности неопределенность волнового вектора (квазиимпульса) валентного электрона близка к величине самого волнового вектора. В этих условиях закон сохранения импульсов при непрямых “оптических” переходах нарушается, что обуславливает повышение вероятности таких переходов и, следовательно, увеличение поглощения света.

Спектральная зависимость коэффициента α в пленках a-Si:H напоминает аналогичные кривые для других аморфных полупроводников. В области $h\nu > E_g^{opt}$, $\alpha > 10^3 \text{ см}^{-1}$, спектральная зависимость α обусловлена межзонным поглощением и имеет вид:

$$(\alpha h\nu) = B^2 (h\nu - E_g^{opt})^2, \quad (1)$$

где постоянная B прямо пропорциональна полной концентрации водорода в пленке, мало меняется при легировании примесями P или As и заметно уменьшается после введения бора.

В области $h\nu < E_g^{opt}$, $\alpha < 10^3 \text{ см}^{-1}$, оптическое поглощение обусловлено электронными переходами между нелокализованными состояниями в запрещенной зоне вблизи зоны проводимости E_c или между локализованными состояниями вблизи края зоны E_v и нелокализованными состояниями зоны проводимости. Зависимость коэффициента α от энергии $h\nu$ имеет экспоненциальный вид в соответствии с теоретическим выражением

$$\alpha(h\nu) = \frac{\pi^{3/2} \cdot e^2 \cdot h}{m^2 \cdot c} \cdot \frac{p_a^2 \cdot N_a(E_t) \cdot V_c \cdot N_s \cdot \exp\left(\frac{h\nu}{E_c}\right)}{n \cdot h \cdot \nu} \quad (2)$$

где $N_a(E_t) = 4\pi(2m/h^2)^{3/2} \cdot E_t^{1/2}$ можно рассматривать как концентрацию электронов в зоне проводимости, отнесенную к единичному интервалу энергий, постоянная E_t характеризует распределение $N(E)$ в хвосте зоны. Для импульса электрона в аморфном полупроводнике выполняется приближенное соотношение $p_a^2 \cong (h/a)^2$, где a - параметр структуры, n - показатель преломления, V_c - объем элементарной ячейки, N_s - полная концентрация структурных дефектов, которым отвечают локализованные состояния, e , h , c и m - обычные физические константы. Это соотношение дает возможность определить значение E_t по экспериментальной зависимости $\alpha h\nu$ от $h\nu$ и оценить концентрацию N_s . Так, значение E_t , экспериментально найденное для пленок a-Si:H, составляет 0.264 эВ.

Если принять далее, что $\alpha=0.543$ нм, $h=3.40$ при $\lambda=0.6$ мкм, то величина N_s для данных пленок оказывается равной 4.8×10^{17} см⁻³. Для тетраэдрического a-Si:H без водорода, осажденного в тех же условиях, $n=4.01$ и $E=0.323$ эВ, так что $N_s=3.2 \times 10^{19}$ см⁻³.

Температурная зависимость $\alpha(h\nu)$ описывается известным экспериментальным правилом Урбаха:

$$\alpha(h\nu) = A \cdot \exp\left[b(h\nu - E_g^{\text{opt}})/kT\right], \quad (3)$$

где A и b - константы материала. Соотношение (3) описывает экспоненциально край поглощения в области $h\nu < E_g^{\text{opt}}$, наблюдаемый в кристаллических и аморфных полупроводниках.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для снятия спектра поглощения какого-либо вещества необходимы следующие элементы в общей экспериментальной схеме: а) источник излучения, б) прибор, позволяющий выделить из сплошного или сложного спектра излучения участки определенных длин волн, в) прибор для измерения и регистрации интенсивности прошедшего излучения.

В данной работе используется спектрофотометр СФ-26. Схема СФ-26 приведена на **рис.1**.

Оптическая схема монохроматора - автоколлимационная.

Излучение от источника 1' падает на зеркальный конденсатор 2, который направляет его на плоское поворотное зеркало 3 и дает изображение источника излучения в плоскости линзы 4, расположенной вблизи входной щели 5. Прошедшее через входную щель излучение падает на вертикальный объектив 6 и, отразившись, параллельным пучком направляется на призму 7. Пройдя призму под углом, близким к углу наименьшего отклонения, и отразившись от ее алюминированной грани, диспергированный пучок направляется обратно на объектив и фокусируется им на выходной щели 8, расположенной над входной щелью. При вращении призмы монохроматическое излучение различных длин волн проходит через выходную щель 8, линзу 9, контрольный или измеряемый образец, линзу 10 и с помощью поворотного зеркала 11 собирается на светочувствительном слое одного из фотоэлементов 12 или 13.

Объектив представляет собой сферическое зеркало с фокусным расстоянием 500 мм.

Диспергирующая призма имеет преломляющий угол 30° , основание 30 мм и эффективный диаметр 44 мм.

Призма, линзы и защитные пластинки изготовлены из кварцевого стекла с высоким коэффициентом пропускания в ультрафиолетовой области спектра.

Для обеспечения работы спектрофотометра в широком диапазоне спектра используются два фотоэлемента и два источника излучения сплошного спектра. Сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с окном из кварцевого стекла применяется для измерений в области спектра от 186 до 650 нм, кислородно-цезиевый фотоэлемент - для измерений в области спектра от 600 до 1100 нм. Длина волны, при которой следует переходить от измерений с одним фотоэлементом к измерениям с другим фотоэлементом, указывается в паспорте спектрофотометра.

Дейтериевая лампа предназначена для работы в области спектра от 186 до 350 нм, лампа накаливания - для работы в области спектра с 340 до 1100 нм. Для проверки градуировки используется ртутно-гелиевая лампа.

Упрощенная структурная схема показана на **рис.2**.

Сигнал с фотоприемника поступает на вход усилителя.

Нагрузкой фотоприемника является делитель, состоящий из резисторов R12...R15, включенных в цепь обратной связи усилителя. Регистрирующим устройством является измерительный прибор ИП. Шкалы переключаются с помощью переключателя В1 и подобраны так, что при переключении из положения "x1" в положение "x0.1" показания прибора изменяются в 10 раз, при переключении из положения КАЛИБР в положение "x0.01" - в 100 раз.

Для повышения точности отсчета при измерении образцов, мало отличающихся друг от друга по пропусканию, в спектрофотометре предусмотрена возможность включения компенсирующего напряжения, которое вводится в измерительную систему с помощью делителя, состоящего из резисторов R1...R10. Изменение напряжения компенсации происходит дискретно с помощью переключателя В2.

В положении "x1" переключателя В1 компенсируется любое показание измерительного прибора, больше 10 делений шкалы. В положении КАЛИБР переключателя В1 компенсируются показания прибора в пределах 1--10 делений шкалы.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением лабораторной работы необходимо:

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности при работе в учебной лаборатории.

2. Пройти у преподавателя инструктаж по данной работе и получить разрешение на включение установки.

Приступая к выполнению работы необходимо:

1. Ознакомиться с устройством спектрофотометра и органами управления СФ-26, используя для этой цели заводское описание.

2. Установить образец аморфного кремния перед выходной щелью спектрофотометра.

3. Произвести измерения прозрачности образца в диапазоне 0.4-1.2 мкм

Прозрачность образца $T(\%)$ определяется как отношение интенсивности света, прошедшего через образец, к интенсивности света, падающего на него.

$$T(\%) = \frac{I_{\text{п\kappa}}}{I_{\text{пад}}}$$

4. Построить график зависимости прозрачности образца (T) от длины волны λ . Примерный вид спектра пропускания пленки $a\text{-Si:H}$ на кварцевой подложке представлен на рис.3.

5. Построить верхнюю и нижнюю огибающую интерференционной картины (T_{min} , T_{max}), как показано на рис.3. В области сильного поглощения ($T < 10\%$) график $T(\lambda)$ построить в увеличенном (10:1) масштабе. Обратит внимание на точность определения положений λ_m - максимумов и минимумов интерференционной картины.

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Из значения T_{min} для $\lambda = 1.2$ мкм определить показатель преломления пленки $a\text{-Si:H}$ по формуле

$$n = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - n_{\text{подл}}^2}} \quad (4)$$

$$A = (2\chi - 1)(n_{\text{подл}}^2 + 1)/2 \quad ; \quad \frac{1}{\chi} = \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{подл}}}$$

где

$$T_{\text{подл}} = \frac{16 \cdot n_{\text{подл}}^2}{(n_{\text{подл}} + 1)^4}$$

Показатель преломления подложки из кварца считается известным $n_{\text{подл}} = 1.45$.

2. Вычислить порядок интерференционных экстремумов (m) по формуле

$$m = \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_m - \lambda_{m+1}} \quad (5)$$

где λ_m , λ_{m+1} - длины волн двух ближайших экстремумов. (Порядок интерференции должен быть четным для максимумов и нечетным для минимумов). Порядок

интерференции лучше всего определять в длинноволновой области, для уменьшения ошибок в определении λ_m и λ_{m+1} .

3. По известным показателям преломления пленки n и порядка экстремума вычислить толщину пленки

$$\alpha = \frac{m \cdot \lambda_m}{4 \cdot n} \quad (6)$$

4. Коэффициент пропускания $\alpha = f(h\nu)$ в области сильного поглощения ($T < 10\%$) вычислить

$$\alpha = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{(1-R_1)(1-R_2)(1-R_3)}{T} \quad (7)$$

где $R_1 = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$; $R_2 = \left(\frac{n-n_{\text{подп}}}{n+n_{\text{подп}}}\right)^2$; $R_3 = \left(\frac{n_{\text{подп}}-1}{n_{\text{подп}}+1}\right)^2$

Построить график зависимости $\alpha(h\nu)$.

5. Построить зависимость $\sqrt{\alpha h\nu}$ от $h\nu$ (рис.4). Как правило при $\alpha \geq 10^4 \text{ см}^{-1}$ для аморфных полупроводников эта зависимость определяется и по ее экстраполяции к нулевому поглощению, определяется оптическая ширина запрещенной зоны $E_g^{\text{опт}}$.

6. Из графика $\sqrt{\alpha h\nu} = f(h\nu)$ и формулы (1) определить значения постоянной B .

Контрольные вопросы:

1. Укажите и объясните оптимальный интервал значений ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов, применяемых для изготовления фотоэлементов, служащих солнечными фотопреобразователями.
2. Пояснить оптический метод нахождения ширины запрещенной зоны аморфных полупроводников.
3. Чем определяется наличие максимумов и минимумов в спектре коэффициента пропускания?
4. Каким параметром пленки определяется частота следования максимумов в спектре пропускания?
5. От чего зависит величина максимумов в спектре пропускания?

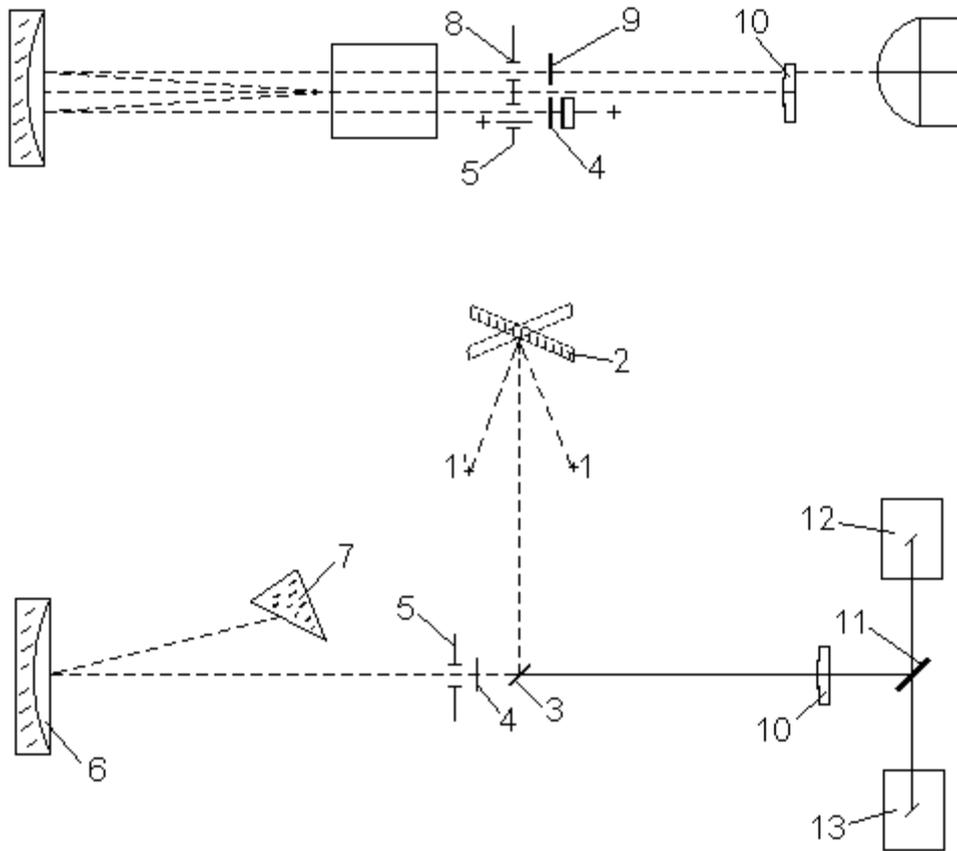


Рис.1. Оптическая схема

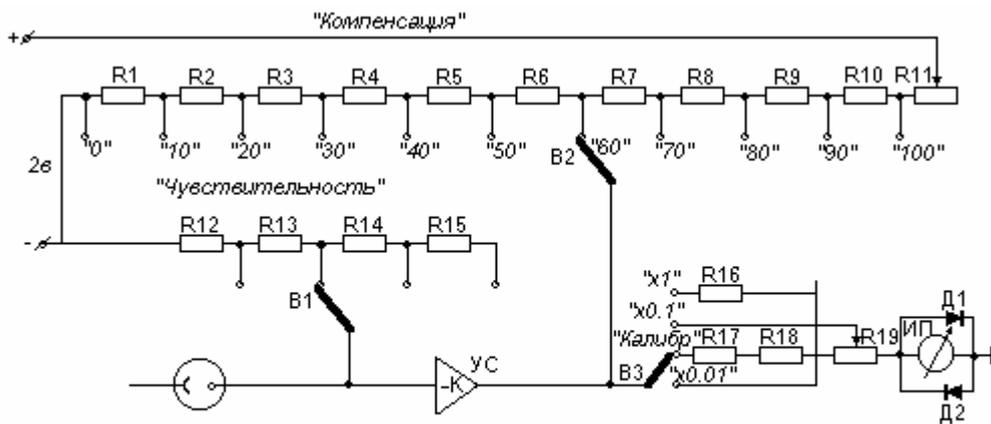


Рис.2. Электрическая схема

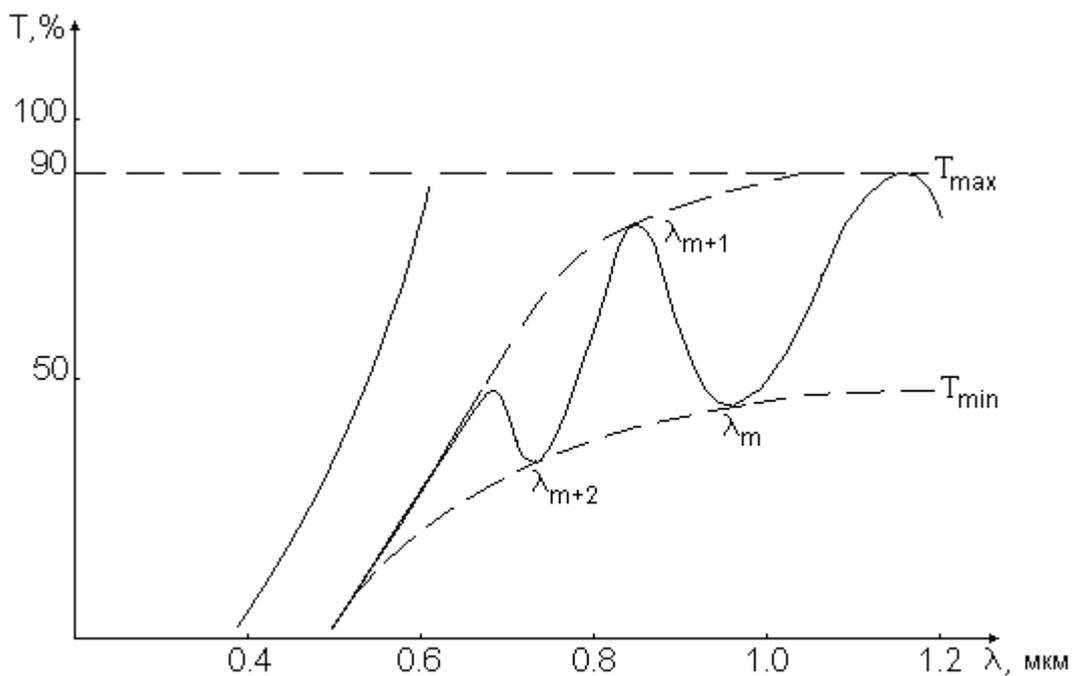


Рис.3. Примерный вид спектра пропускания пленки a-Si:H.

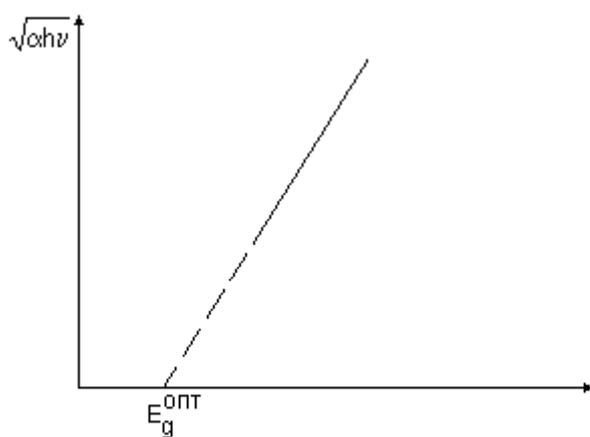


Рис.4. График зависимости $\sqrt{\alpha h\nu} = f(h\nu)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Бродски “Аморфные полупроводники”, М., “Мир”, 1982.
2. Итоги науки и техники. Серия Электроника, т.16, Москва, 1984.
3. Раков А.В. “Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур”, М., “Советское радио”, 1975.
4. Уханов “Оптические свойства полупроводников”.