

Министерство образования Российской Федерации

---

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

---

Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

Высшая инженерно-физическая школа

## **БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА КРИСТАЛЛОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

Методические указания к подготовке и к выполнению  
лабораторной работы № 3

Составитель:

старший преподаватель

Высшей инженерно-физической

школы ИФНиТ

ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Паневин Вадим Юрьевич

Санкт-Петербург

2020

УДК 535.343.2

**Бесконтактная диагностика кристаллов карбида кремния. Методические указания к подготовке и к выполнению лабораторной работы № 3.** СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. — 24 с.

Методическое указание к подготовке и к выполнению лабораторной работы № 3 лабораторного практикума по экспериментальным методам исследования полупроводников.

© Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2020

## Оглавление

Карбид кремния – материал экстремальной электроники.....	4
Электронные свойства SiC .....	7
Примесное поглощение света .....	8
Отражение света от границ раздела, учет многократных отражений .....	11
Описание экспериментальной установки .....	14
Порядок проведения эксперимента .....	16
Задание к работе .....	18
Контрольные вопросы для допуска к лабораторной работе.....	19
Приложение 1. «Планшетные сканеры» .....	21
Благодарности.....	23
Список литературы .....	23

## Карбид кремния – материал экстремальной электроники

Карбид кремния SiC – единственный материал среди соединений элементов IV группы Периодической системы Д.И. Менделеева обладающий полупроводниковыми свойствами<sup>1</sup>. Он является изоэлектронным аналогом простых полупроводников – германия, кремния и т. д.

Карбид кремния SiC (техническое название – **карборунд**, минерал – **муассанит**) кристаллизуется в виде большого числа отличающихся по свойствам политипных модификаций, которые можно рассматривать как целый класс полупроводниковых материалов. Химическое соединение кремния Si и углерода C в решетке карбида кремния характеризуется сильной ионно-ковалентной связью, которая придает ему уникальные физические свойства. Так, по твердости карбид кремния уступает лишь алмазу и карбиду бора; при температурах до 300-400<sup>0</sup>C он практически не взаимодействует ни с одним из известных травителей для других полупроводниковых материалов. Сильная связь является причиной низких коэффициентов диффузии большинства примесей и повышенной устойчивости к воздействию ионизирующих излучений. Как полупроводник, карбид кремния обладает уникальным сочетанием свойств особо привлекательных для приборных применений. С одной стороны, - это большая ширина запрещенной зоны (от 2,4 до 3,3 эВ для разных политипов), высокая температура Дебая (1300К), высокая теплопроводность (3-5 Вт/см·град), большая напряженность поля лавинного пробоя (3-6 МВ/см), высокая насыщенная скорость дрейфа электронов ( $2 \cdot 10^7$  см/с). С другой стороны, это высокая растворимость донорных и акцепторных примесей ( $10^{20} - 10^{21}$  см<sup>-3</sup>), высокая однородность и способность к окислению с

---

<sup>1</sup> Комбинации типа GeSi, GeSn и т.п. не в счёт, т.к. они являются не химическими соединениями, а твёрдыми растворами.

образованием на поверхности диэлектрической пленки двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  (что является очень важным для применения карбида кремния в качестве базового материала при изготовлении интегральных схем).

Карбид кремния можно считать родоначальником большого семейства политипных соединений: сам термин "политипизм" был специально введен для карборунда вследствие того, что различные кристаллические формы  $\text{SiC}$  структурно очень близки друг к другу. В настоящее время известно свыше 140 кристаллических модификаций  $\text{SiC}$ . Все известные политипы карбида кремния кристаллизуются по законам плотной шаровой упаковки и представляют собой бинарные структуры, построенные из идентичных слоев, отличающихся как порядком расположения кубической и гексагональной прослоек, так и числом этих прослоек в элементарной ячейке. Для характеристики политипа часто используют обозначения Рамсделла, состоящие из натурального числа, равного числу слоев в периоде, в направлении, перпендикулярном базовой плоскости, и буквенного символа, характеризующего сингонию решетки Браве: С-кубическая, Н- гексагональная, R -ромбоэдрическая. Наиболее распространенными являются политипы 2Н, 4Н, 6Н, 3С, 15R. В настоящее время не существует удовлетворительной во всех отношениях теории, способной объяснить, почему  $\text{SiC}$  кристаллизуется в виде большого количества политипов. Нет полной ясности и в том, какие факторы благоприятствуют образованию того или иного политипа.

Политипы карбида кремния имеют довольно сложную структуру энергетических зон. Детальные расчеты энергетической зонной структуры проведены только для наиболее простых политипов 3С (структура сфалерита) и 2Н (структура вюрцита), имеющих в элементарной ячейке наименьшее количество атомов и составляющих основу всех остальных политипов. Структура энергетических зон кубического 3С карбида кремния приведена на рис. 1.

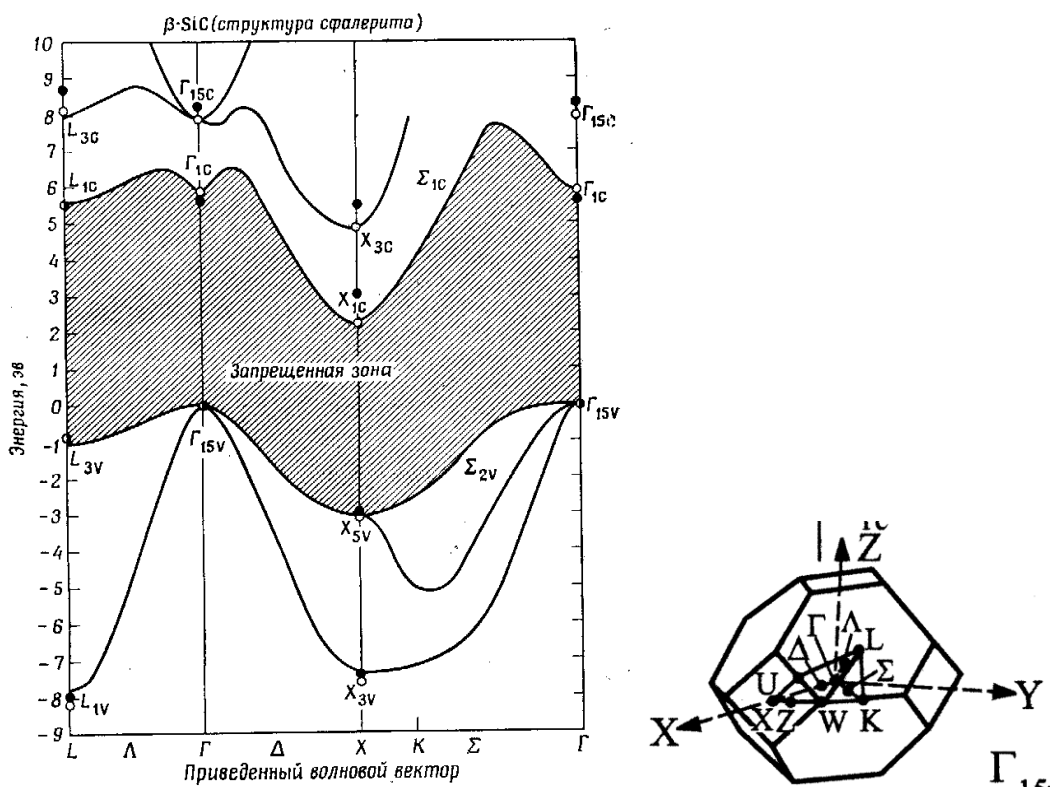


Рис. 1. Структура энергетических зон 3C-SiC (слева) и геометрия взаимного расположения некоторых точек  $k$ -пространства в пределах ячейки Вигнера – Зейтца (справа) [1]

Видно, что карбид кремния представляет собой непрямозонный полупроводник. При этом величина запрещенной зоны существенно зависит от поли-типа и изменяется от 2,39 эВ для 3C-SiC и до 3,3 эВ для 2H-SiC. Согласно ре-зультатам экспериментальных и теоретических работ, максимум валентной зоны находится в центре зоны Бриллюэна ( $\Gamma$ -точка), а минимум зоны прово-димости расположен на ее границе.

Так как при формировании зонной структуры полупроводников значи-тельную роль играет ближний порядок расположения атомов, то зонная струк-тура политипов карбида кремния должна быть во многом схожей с зонной структурой простейших фаз – чисто кубического (3C) и чисто гексагонального (2H) карбида кремния. Но, тем не менее, в сложных политипах существует

некоторая особенность зонной структуры. Чередование гексагональных и кубических прослоек в длиннопериодных (с большим номером) поли типах можно рассматривать как действие на электрон, помещенный в кристалл кубической модификации, некоего сверхпериодического потенциала. Наличие естественной **сверхструктуры** в поли типах должно приводить к появлению дополнительных плоскостей брэгговского отражения для электронов, вследствие чего в энергетическом спектре электронов должно возникать минизонное расщепление (зона проводимости разбивается на серию подзон). Экспериментальные исследования действительно показали наличие такого расщепления в зоне проводимости сложных поли типов.

### Электронные свойства SiC

С точки зрения приборных применений интерес представляет возможность управления концентрациями легирующих примесей в полупроводнике, как донорных, так и акцепторных. Специально не легированные кристаллы карбида кремния, выращенные сублимационным методом (впервые этот метод для SiC реализовал немецкий учёный J.A.Lely в 1955 г.) имеют значительную концентрацию примеси азота. Это обусловлено очень высокой растворимостью азота в карбиде кремния (около  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ ). Атом азота имеет на один электрон больше, чем собственные атомы кристаллической решетки, поэтому он является донорной примесью и, значит, специально не легированные кристаллы карбида кремния обладают электронным, *n*-типом проводимости. Изменить тип проводимости можно добавлением акцепторной примеси алюминия, атомы которого будут забирать себе свободный электрон от доноров – компенсировать примесь азота. Если концентрация акцепторов  $N_A$  превысит концентрацию доноров  $N_D$ , то полупроводник приобретет дырочный тип проводимости. Таким образом, проводимость и концентрация свободных носителей заряда в кристаллах карбида кремния определяется разницей  $N_D - N_A$ , а

одна из основных задач разработчиков приборов на основе SiC является определение уровня легирования. Причем предпочтение отдается бесконтактным экспресс методам диагностики, например, оптическим.

Рассмотрим, как можно оптическим способом определить концентрацию некомпенсированной донорной примеси.

### **Примесное поглощение света**

Наличие донорных примесей в кристалле приводит к появлению примесных энергетических состояний в запрещенной зоне полупроводника вблизи дна зоны проводимости. Энергией ионизации примеси азота около 0,1 эВ – это одна из самых мелких изученных примесей в карбиде кремния. Тем не менее, её значительная, по сравнению с тепловой энергией  $k_B T$ , величина энергии ионизации приводит к тому, что часть примесных атомов, при комнатной температуре, остается не ионизована и электроны, сидящие на донорах, могут участвовать в поглощении света. Процесс перехода электрона с примесного уровня в одно из вышележащих состояний в зоне проводимости, сопровождающийся поглощением кванта света, называют примесным поглощением света или фотоионизацией донорных уровней. Фрагмент зонной диаграммы карбида кремния с примесью азота представлен на рис. 3. Косыми стрелками на рис. 3 показаны возможные оптические переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости (межзонное поглощение света). Прямыми вертикальными стрелками показаны переходы типа донор-зона, т. е., с уровней донора в состояния зоны проводимости. Как видно из рис. 3, особенность зонной структуры легированного азотом карбида кремния такова, что энергетические зазоры между примесными и зонными состояниями соответствуют энергии квантов около 2 эВ и 3 эВ. Поэтому, при исследовании поглощения света в



видимом диапазоне спектра можно наблюдать полосы поглощения, соответственно, в красной и в фиолетовой областях спектра.

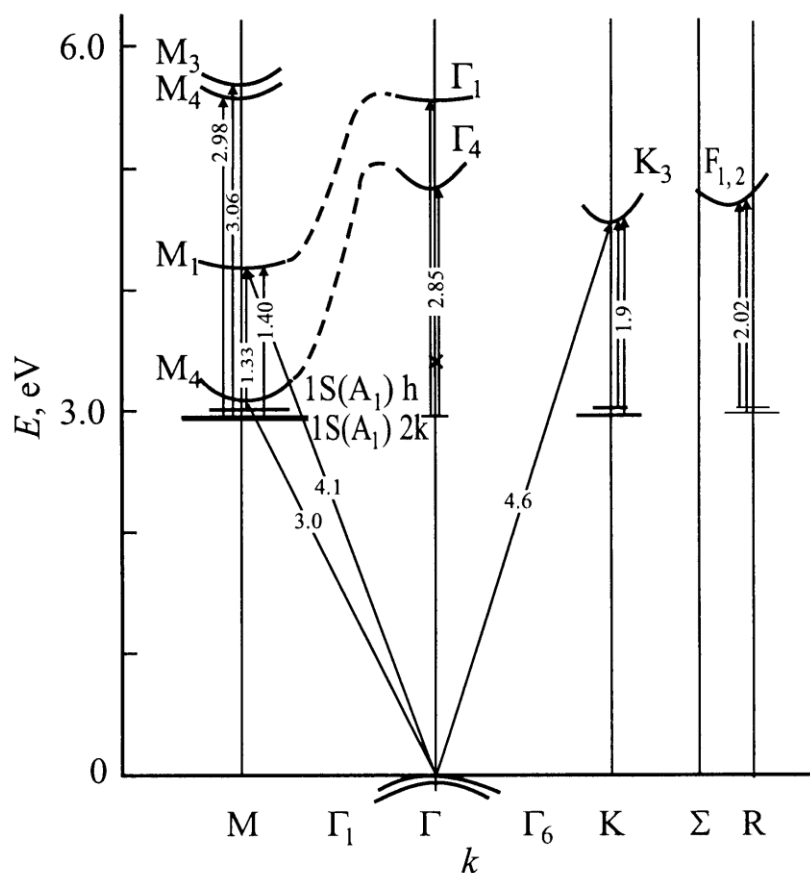


Рис. 3. Фрагмент зонной диаграммы 6H-SiC с учетом энергетических уровней примеси азота [2]. Вертикальными стрелками показаны основные оптические переходы типа примесь-зона (фотоионизация примеси). Цифры у стрелок соответствуют энергии фотона в эВ.

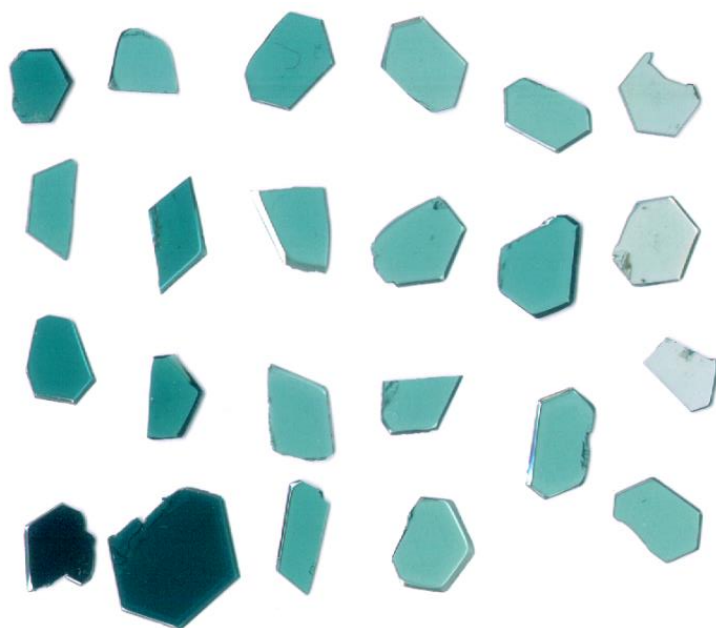


Рис. 4. Фотография кристаллов карбида кремния с различной концентрацией примеси азота на белом фоне. Изменение насыщенности зеленого цвета, связано с изменением концентрации примеси в образцах.

При этом, синие-зеленая часть видимого спектра не поглощается, а свободно проходит сквозь карбид кремния. От этого, освещенные «белым» светом достаточно чистые кристаллы карбида кремния выглядят светло-зелеными (см. рис.4). Но чем выше концентрация легирующей примеси (чем больше примесных электронов могут совершить поглощение красных и фиолетовых лучей), тем темнее выглядит кристалл.

Получается, что прозрачность образца определяется концентрацией примеси. По определению, прозрачность – это отношение интенсивности света на выходе образца к интенсивности света на входе. Рассмотрим, как можно определить на эксперименте прозрачность, чтоб узнать концентрацию примеси.

С точки зрения поглощения света все вещества принято характеризовать коэффициентом поглощения  $k$  [ $\text{см}^{-1}$ ], который определяет то, как быстро убывает интенсивность света в глубине. Действительно, согласно закону Бугера-Ламберта-Бера интенсивность света  $I_0$  при распространении в направлении  $x$  в поглощающей среде уменьшается в соответствии с законом:

$$I(x) = I_0 e^{-kx}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность света в начальной точке (на входе), а  $I(x)$  – интенсивность на глубине  $x$  (или на выходе). Тогда прозрачность (или пропускание) поглощающей среды толщиной  $d$  можно определить соотношением:

$$t = \frac{I(d)}{I_0} = \frac{I_0 e^{-kd}}{I_0} = e^{-kd}, \quad (2)$$

где  $I(d)$  – имеет смысл интенсивности света «на выходе» (в конечной точке  $d$  среды). Таким образом, если на эксперименте измерить интенсивность света на выходе из образца и, зная интенсивность света на входе и зная толщину кристалла, можно определить коэффициент поглощения.

Единственное условие, которое надо задать при использовании такой методики – это чтобы толщина среды  $d$  была соизмерима с характерной глубиной

проникновения света в среду. Глубиной проникновения света в среду называют длину, на которой интенсивность света изменится в  $e$  раз. Исходя из выражения (1) получается, что она равна  $1/k$ . Иначе, если  $d \ll 1/k$ , изменение интенсивности света на выходе среды может оказаться настолько малым, что мы его не заметим и не почувствуем поглощения.

Предположим, мы смогли определить поглощение, но как поглощение связано с концентрацией? В общем случае коэффициент поглощения пропорционален концентрации поглощающих центров (в нашем случае – концентрации некомпенсированных доноров  $N_D - N_A$ ):

$$k = S \cdot (N_D - N_A) . \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности, зависящий от вероятности процесса поглощения, называют сечением поглощения  $S$  [см<sup>2</sup>]. Известно, что в красной области спектра (вблизи энергий фотонов 2 эВ) для примеси азота в 6H-SiC:  $S = 5 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup>.

Таким образом, путём измерения пропускания  $t$  кристалла известной толщины  $d$  можно определять уровень его легирования важнейшей донорной примесью – азотом.

### **Отражение света от границ раздела, учет многократных отражений**

Пропускание исследуемого образца может существенно измениться если учесть наличие границ раздела сред, на которых может происходить отражение света. Наличие границы раздела с коэффициентом отражения  $r$  приведет к тому, что часть света будет отражаться прежде, чем войти в среду (см. рис. 5). При этом, если интенсивность отраженного от границы раздела света равна:

$$I_{\text{отр}} = r \cdot I_0 , \quad (4)$$

то интенсивность света  $I_{\text{прош}}$ , прошедшего сквозь границу раздела равна:

$$I_{\text{прош}} = (1 - r) \cdot I_0 \quad (5)$$

Следует понимать, что отражение происходит на каждой границе раздела воздух\полупроводник, как при входе, так и при выходе из кристалла. При этом, если поглощение света внутри кристалла достаточно слабое, т. е. глубина проникновения света велика по сравнению с толщиной образца  $d \ll 1/k$ , то свет может многократно частично отражаться от передней и задней граней кристалла путешествуя внутри образца. Глядя на рис. 5 легко убедиться, что с учетом эффекта многократных отражений, пропускание образца толщиной  $d$  не будет описываться выражением (2). Точнее, полная интенсивность света прошедшего сквозь пластину уменьшится, а интенсивность света, отраженного от плоскопараллельной пластины, увеличится за счет лучей, которые частично отразились от задней стенки пластины.

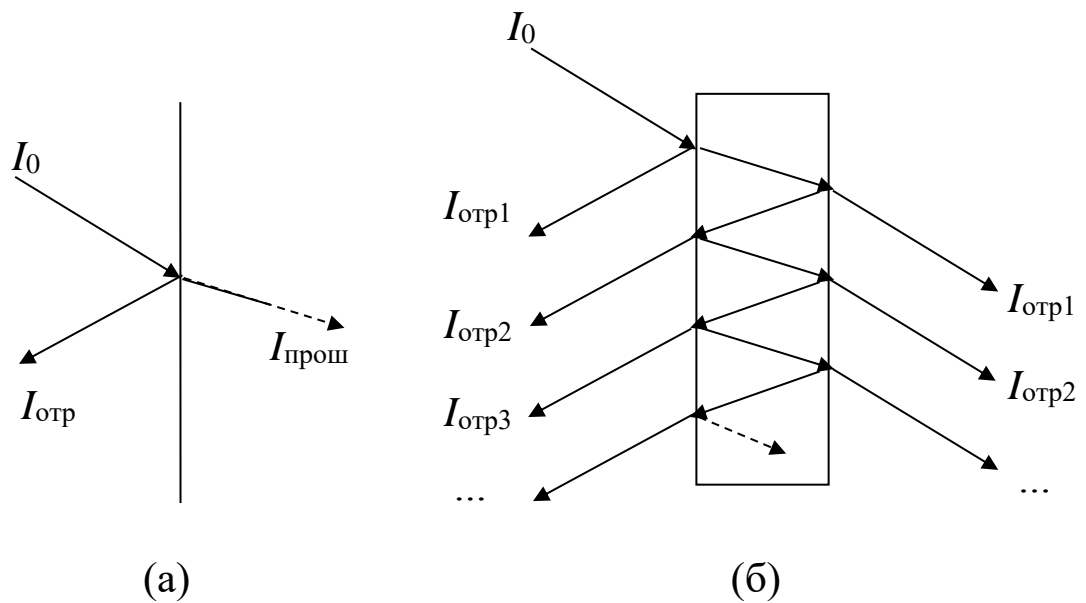


Рис. 5. Сравнительная схема отражения и прохождения луча света для одной границы раздела двух сред (а) и для плоскопараллельной пластины (б). Видно, что интенсивность света, отраженного от одной границы раздела, не несет информацию о поглощении среды, а в случае отражения от пластины, все лучи, начиная с  $I_{\text{отр2}}$ , будут, нести информацию о поглощении света в пластине.

Следует также обратить внимание, что при учете эффекта многократных отражений в отраженном пучке света, точнее, во всех лучах, начиная с  $I_{отр2}$ , будет содержаться информация о коэффициенте поглощения света – эти лучи «побывали в образце, в отличие от  $I_{отр1}$ . Таким образом, становится очевидно, что исследуя отражение полупрозрачной пластины, можно определить поглощение. Очевидно, также, что для этого необходимо знать коэффициент отражения одной границы раздела  $r$ . Как же его определить? Это можно с помощью самого темного образца, в котором имеется очень сильное поглощение и свет не сможет вернуться назад, т. к. глубина проникновения  $1/k$  окажется много меньше, чем толщина образца  $d$ . С помощью образца, в котором свет не сможет испытать многократные отражения, у которого будет лишь один зеркально отраженный луч, интенсивность которого не зависит от поглощения внутри образца, определяется только коэффициентом отражения  $r$ .

Связь полного оптического пропускания и полного коэффициента отражения плоскопараллельной пластины полупроводника, взаимодействующей с пучком направленного некогерентного излучения можно вывести если выписать последовательно значения интенсивностей всех лучей, выходящих из пластины и найти их точную сумму. При этом полный коэффициент отражения будет равен отношению суммарной интенсивности отраженного света к интенсивности падающего света  $I_0$ . Результат этих вычислений приведен, например, в [3]:

$$R = r \frac{1 - (2r - 1) \exp(-2kd)}{1 - r^2 \exp(-2kd)} \quad (6)$$

В задачи работы входит вывод формулы (6)!

Итак, мы продемонстрировали, что для того, чтоб определить поглощение можно использовать отражательную методику эксперимента.

Оригинальная методика использования для этой цели бытового планшетного сканера была предложена в [4]. Она положена в основу данной лабораторной работы.

### **Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка состоит из персонального компьютера с установленным на нем программным обеспечением для сканирования и обработки результата (Windows XP, Adobe Photoshop, Origin) и бытового сканера, подготовленного для лабораторного исследования. Для понимания принципа работы установки следует предварительно ознакомиться с Приложением 1 «Планшетные сканеры».

Геометрия оптической системы сканеров (см. рис. 6) такова, что фотоприемник сканера не улавливает зеркально отраженный свет от сканируемой поверхности. Это сделано специально для борьбы с лучами, отраженными от стекла сканера и бликами, возникающими при сканировании оригиналов, выполненных на глянцевой бумаге. Так, если положить на сканер зеркало, то его отсканированное изображение окажется абсолютно темным, т. к. все зеркально отраженные лучи от источника прошли мимо детектора.

Тут возникает проблема, что все образцы полупроводников тоже имеют зеркальную поверхность и не рассеивают свет. Чтобы сделать зеркальные поверхности кристаллов «видимыми» для сканера предлагается подстелить под них матовую плёнку политетрафторэтилена («тефлон») толщиной 100 мкм (см. рис. 6). Эта плёнка, будет пропускать сквозь себя и рассеивать как свет источника, так и отраженный свет от образца.

Но как же так, нам же нужно измерить именно коэффициент отражения? А получается, что будет видно изображение не отраженного, а рассеянного света... Не беда! Надо откалибровать используемый «рассеиватель» по

эталонным образцам с известным коэффициентом отражения, измеренным иным точным способом. Тогда, в дальнейшем, сравнивая отражение в рассеянном свете образцов с эталонами, зная истинное отражение эталонов, можно определить коэффициент отражения образцов.

Итак, на рабочую поверхность сканера помещена тефлоновая пленка, на которую, в свою очередь, устанавливаются эталоны - объекты с известным коэффициентом зеркального отражения и исследуемые образцы.

Для того чтобы избежать паразитной засветки от внешних источников излучения (солнечного света, осветительных ламп в помещении и т. п.), рабочая поверхность сканера с образцами накрывается специально изготовленным колпаком из зачерненного картона («абсолютно чёрным телом»).

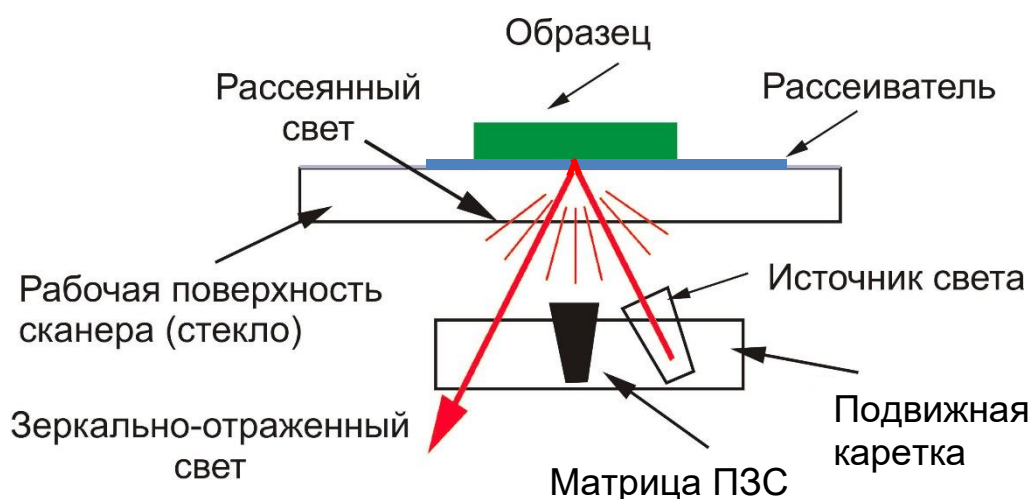


Рис. 6. Оптическая схема эксперимента

Используемые в работе образцы – это монокристаллы SiC политипа 6H, выращенные по методу Lely на Подольском Заводе Чистых Материалов; основная сопутствующая примесь – азот (N). Поверхности образцов плоскопараллельны, отполированы электрохимическим способом.

В качестве эталонов предлагаются плавный кварц, арсенид галлия, германий, хром и алюминий на стекле (зеркало), коэффициенты зеркального отражения  $R$  которых измерены в едином цикле на лазерной установке. Значения коэффициентов отражения эталонов приведены ниже в Табл.1.

Таблица 1.

Название эталона	Коэффициент отражения $R$
Кварц	0,041
GaAs	0,338
Ge	0,435
Al(on glass)	0,815
Cr	0,565

(В ходе лабораторных работ набор эталонов может варьироваться, уточните у преподавателя конкретный набор эталонов).

### **Порядок проведения эксперимента**

1. Включаем ПК и ждем окончания загрузки ОС Windows
2. На рабочем столе отыскиваем иконку пакета Adobe Photoshop или CorelPP и левой кнопкой мыши запускаем программу (открываем рабочее окно).
3. На панели задач находим меню “FILE” и в нем команду “IMPORT”.
4. В подменю выбираем программный модуль (драйвер) «WIA Mustek 1200 UB Plus...», с помощью которого происходит обслуживание сканера.левой кнопкой мыши запускаем этот модуль и ждем появления на экране рабочей панели мастера настроек сканера.



5. На рабочей панели мастера в меню настроек качества сканируемого изображения сканера выбираем следующие параметры процесса сканирования:

РЕЖИМ..... «цветной снимок»

РАЗРЕШЕНИЕ.... 200-300 dpi

Настройка сканера завершена.

6. На тефлоновую ленту раскладываем (вдоль всей ее длины) эталоны и образцы («лицом», естественно, вниз). Записываем в рабочей тетради порядок их расположения.

7. Накрыв рабочую поверхность сканера защитным колпаком “абсолютно черным телом” и нажав кнопку “просмотр”, осуществляем предварительное сканирование в скоростном режиме. После этого ограничиваем курсором на мониторе сканера необходимую область сканирования, в которую должна попасть вся пленка с эталонами и образцами, нажимаем кнопку “сканировать” и осуществляем сканирование. По завершению сканирования мастер настроек сканера автоматически закроется, а отсканированное изображение появиться в виде нового файла.

8. После появления изображения объектов сканирования в рабочем окне редактора Adobe Photoshop (или иной), с помощью лупы (Zoom Tool) на панели инструментов (слева) увеличиваем полученное изображение. Далее, выбрав в качестве рабочего инструмента выделитель области (Elliptical или Rectangular Marquee Tool или Lasso Tool), выделяем наиболее представительные участки исследуемых эталонов и образцов (без царапин, пылинок, вдали от края и т.п.) и осуществляем их анализ.

9. Для анализа выделенной области используйте опцию “Histogram” в меню “Image” на панели задач. Из всех возможных гистограмм выбирайте RED в строке “channel”- она отвечает интересующей Вас задаче (анализ яркости

изучаемых картин на тех длинах волн, где расположен пик поглощения примеси азота).

10. Важнейшая для Вас характеристика, выдаваемая гистограммой – среднее значение яркости выделенной области (mean). Запишите её. Она характеризует количество рассеянного света, отражённого объектом по 8-разрядной шкале АЦП сканера (256 ступеней яркости от 0 до 255). Чтобы перевести полученную из гистограммы цифру в значение коэффициента отражения в рассеянном свете  $R_s$  её следует поделить на 255.

11. Используя параметры эталонов для зеркально отражаемого света  $R$  (см. выше табл.1) и найденные Вами значения  $R_s$  (для рассеянного света), строим калибровочную кривую рассеивателя:  $R_s = R_s(R)$ , демонстрируемую им на данном конкретном сканере MUSTEK 1200 UB Plus. Калибровочная кривая позволит Вам решить обратную задачу – найти коэффициент зеркального отражения  $R_{SiC}$  исследуемых кристаллов карбида кремния по их рассеивающим параметрам  $R_s$ . Зная коэффициенты зеркального отражения нескольких образцов карбида кремния, можно вычислить их степень легирования.

### Задание к работе

1. Используя набор «эталон» получить калибровочную кривую рассеивателя PTFE-100 на сканере Mustek 1200 UB P в виде аналитической зависимости  $R$  ( $R_s$ ).
2. Измерить коэффициент отражения  $R_s$  в рассеянном свете 4-х кристаллов карбида кремния SiC политипа 6H (6H-SiC), легированных азотом. Используя полученную в п.1 аналитическую зависимость  $R(R_s)$ , определить коэффициент отражения  $R$  кристаллов 6H-SiC:N.
3. Проведите несколько дополнительных измерений, оцените точность, с которой в данных условиях вы получаете экспериментальные данные.

4. Выполните вывод формулы для коэффициента отражения пластины с учетом многократных отражений. Для этого последовательно напишите отдельные выражения для интенсивности отдельных отраженных лучей  $I_{отр1}$ ,  $I_{отр2}$ ,  $I_{отр3}$ , ... и т. д., как функции  $r$ ,  $k$ ,  $d$  и  $I_0$ , до тех пор пока не определите закономерность и не сможете найти точную сумму  $I_{\Sigma}$ , полученного числового ряда. Используя  $I_{\Sigma}$  и  $I_0$ , запишите выражение для полного коэффициента отражения пластины и сравните с выражением (6). В случае несоответствия – проверьте свои расчеты до достижения соответствия. Выразите из (6) коэффициент поглощения  $k$ .

5. Определите, для какого из ваших кристаллов SiC можно считать, что  $R = r$ ? Прокомментируйте ваш выбор изобразив схематично сравнительную схему хода лучей в этом образце по сравнению с остальными. Используя результаты исследования этого образца рассчитайте коэффициент поглощения  $k$  ( $\text{см}^{-1}$ ) остальных кристаллов SiC, а также их уровень легирования азотом, используя выражение (3). Сечение поглощения  $S$  для красного света принять равным  $5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ . Толщины образцов считать следующими:  $d_1 = 0.32 \text{ мм}$ ,  $d_2 = d_3 = d_4 = 0.45 \text{ мм}$ .

5. Указать точность определения значений концентрации примеси с учетом оценок, выполненных в п.3.

### **Контрольные вопросы для допуска к лабораторной работе**

1. Что такое свет? Что такое поглощение света, коэффициент поглощения?
2. Зонная диаграмма собственного и примесного полупроводника (в т.ч., SiC).
3. Может ли происходить поглощение света в полупроводнике? Межзонное (фундаментальное), примесное поглощение? Изобразить оптические переходы, связанные с поглощением света на зонной диаграмме. Какова энергия

фотона, которая поглощается при таком оптическом переходе? Почему SiC имеет зеленый цвет, чем определяется прозрачность SiC?

4. Чему равен коэффициент примесного поглощения?

5. Как зависит интенсивность света от расстояния при распространении света в поглощающей среде (з-н Бугера-Ламберта-Бера)? Что такое пропускание (прозрачность)? Как на эксперименте можно определить коэффициент поглощения (начертить схему хода луча в эксперименте)?

6. Что такое отражение света, почему оно происходит, от чего отражается свет? Чему равна интенсивность отраженного света? Как измерить на эксперименте коэффициент отражения поверхности?

7. Как распространяется свет при встрече с полупрозрачной пластиной толщиной  $d$  (начертить схему хода луча в эксперименте)? Чему равна интенсивность света, отраженного от полупрозрачной пластины? Многократные отражения. Чему равно  $I_{отр2}$ ?

8. Как можно определить коэффициент поглощения в эксперименте по исследованию коэффициента отражения (начертить схему хода луча в эксперименте)?

9. Как устроен планшетный сканер, основные оптические элементы (нарисовать схему хода лучей)? Что такое ПЗС (CCD) матрица? Как будет выглядеть изображение зеркала, полученное с помощью планшетного сканера? Как заставить сканер увидеть на своей поверхности зеркало?

10. Как можно на эксперименте определить коэффициент отражения от одной грани SiC (коэффициент отражения границы раздела сред  $r$ ) если имеется набор образцов с разным уровнем легирования? Поясните ответ на сравнительной схеме хода лучей в образцах.

## Приложение 1. «Планшетные сканеры»

Планшетные сканеры являются весьма интересными и довольно сложными опто-электронно-механическими устройствами. Для понимания значения характеристик нужно представлять себе конструкцию типового планшетного сканера: сканируемый оригинал (далее – «образец») располагается на поверхности сканера – прозрачном неподвижном стекле, вдоль которого передвигается сканирующая каретка с источником света и детектором света (см. рис. 2). Свет источника направлен на образец. Детектор расположен на каретке, рядом с источником, так, что в него может попасть только рассеянный поверхностью образца свет. При этом, в него не могут попасть лучи, зеркально отраженные от образца. Детектор состоит из трех отдельных независимых друг от друга фоточувствительных приемных элементов, каждый из которых, благодаря различным оптическим фильтрам, реагирует на свет только своего спектрального диапазона (красный, зеленый или синий). Приёмный элемент преобразует уровень освещенности в уровень напряжения (все ещё аналоговую информацию). Далее, после возможной коррекции и обработки, аналоговый сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). С АЦП информация выходит уже в "знакомом" компьютеру двоичном виде и, после обработки в контроллере сканера через интерфейс с компьютером поступает в драйвер сканера - обычно это так называемый TWAIN-модуль, с которым уже взаимодействуют прикладные программы.

Источник света: в сканерах старого образца - обычная флуоресцентная лампа (родственна обычным лампам дневного света). Недостаток - слабая стабильность характеристик освещения и ограниченный срок службы. В современных моделях - лампа с холодным катодом, имеющая лучшие параметры и значительно больший срок службы. В нашей работе используется сканер Mustek 1200 UB Plus, источником света у которого служат три набора линеек

светодиодов, излучающих поочередно три цвета – красный (длина волны 650 нм), зеленый (527 нм), синий (460 нм). Детектором является массив (матрица) фоточувствительных элементов – приборов с зарядовой связью (ПЗС или CCD – Charged coupled devices), которая преобразует свет в электрический сигнал.

Различают два вида разрешения сканера: оптическое и механическое.

**Оптическое:** количество элементов в линии матрицы, поделённое на ширину рабочей области. Определяется матрицей и шириной рабочей зоны. Измеряется в единицах [dpi] – число точек на дюйм строки.

**Механическое:** количество раз "считывания" информации CCD-матрицей, поделённое на длину пути, пройденного за это время сканирующей кареткой. Иногда его тоже называют оптическим ("оптическое разрешение 300x600"), но на самом деле это не так (оптическое будет 300 dpi, а 600 – это тоже реальное разрешение, но механизма, а не оптики).

**Интерполяционное** - произвольно выбранное разрешение, до которого программа сканера берётся "сама рассчитать" недостающие точки (например, выдать 16 x 16 точек, получив со сканера 3 x 3 точки).

**Количество бит на цвет** (разрядность цветовой схемы). Можно, для примера, рассмотреть устройство, в котором под хранение информации о цвете одной точки полноцветного изображения выделяется 24 бита на каждую точку, по 8 бит на каждый из основных цветов RGB (Red, Green Blue), что даёт свыше 16 млн. вариантов цвета этой точки. Более тонкие оттенки глаз не различает, и устройства вывода обычно их не воспроизводят. В процессе сканирования сканер разбивает изображение на отдельные точки – пикселы, количество которых зависит от его разрешающей способности. Каждый пиксел имеет свой цветовой «паспорт» – обладает координатами в RGB-пространстве. Например, запись (245, 13, 100) означает, что пиксел отражает красный цвет с интенсивностью 245 двоичных единиц (дв. ед.), зеленый – с интенсивностью 13 дв. ед.

и синий – с интенсивностью 100 дв. ед. Компьютер получает все эти пиксели со своими «паспортами» и сохраняет их в файл в той же последовательности, в которой они были отсканированы – получается двумерный массив троек цифр – файл, хранящий информацию о насыщенности цвета в каждой точке изображения. Этот файл может иметь, например, расширение «.jpeg», «.bmp» и т. п. Существует целый ряд компьютерных программ для просмотра и корректировки изображений (графических редакторов, таких как Adobe Photoshop и т. п.), позволяющих не только просто прочитать информацию из файла и восстановить изображение на матрице экрана компьютера, но и, что важно в контексте данной работы, считать из файла информацию о насыщенности цвета того или иного цветового канала отдельно от других. Они позволяют подсчитывать количество пикселей в определенном участке изображения, выводить их распределение по интенсивности, по цвету в виде гистограмм, проводить усредненные оценки по этим участкам и т. п.

### **Благодарности**

1. Анатолию Вениаминовичу Штурбину (23.05.1938 – 27.11.2007) – изобретателю использованной в лабораторной работе оригинальной методики экспресс диагностики кристаллов карбида кремния.
2. Александру Генриховчу Железняку – с его финансовой поддержкой стало возможно создание самого первого варианта лабораторного комплекса.

### **Список литературы**

1. Зубкова С.М., Русина Л.Н., Смелянская Е.В. Температурная зависимость зонной структуры политипов 3С, 2Н, 4Н и 6Н карбида кремния // Физика и техника полупроводников, 2003, выпуск 3, том 37, стр. 257-265.

2. Горбань И.С., Крохмаль А.П. Примесное оптическое поглощение и структура зоны проводимости в 6H-SiC // Физика и техника полупроводников, 2001, выпуск 11, том 35, стр. 1299-1305.
3. В.И. Гавриленко и др. Оптические свойства полупроводников // Киев, Наукова Думка, 1987, стр. 528.
4. Е.В. Горохов, «Компьютерная экспресс-диагностика кристаллов карбида кремния» – магистерская дисс., 2004 г. РФФ, СПбГПУ, науч. рук. ст. н. с.  
А.В. Штурбин