

Методы исследований

**Методы измерения
концентрации и подвижности
носителей заряда**

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

Полупроводниковая структура помещается в камеру и прижимается уплотнительным кольцом электрохимической ячейки, куда поступает электролит. Площадь контакта ограничивается площадью уплотнительного кольца. Такой контакт – практически полный аналог контакта металл - полупроводник, поэтому

$$C = S \sqrt{\frac{e\epsilon\epsilon_0 N}{2(\Psi - V)}},$$

где S – площадь контакта; e – заряд электрона; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; N – концентрация; Ψ – высота потенциального барьера контакта; V – приложенное к контакту обратное напряжение.

Откуда толщина области обеднения W_d

$$W_d = -\frac{\epsilon\epsilon_0 A}{C}.$$

Далее при приложении противоположного по знаку напряжения происходит травление материала на заданную глубину и удаляется слой полупроводника толщиной W_r . Затем процесс измерения повторяется.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

Толщину слоя W_r , удаленного в результате электролиза, определяют в соответствии с законом Фарадея.

$$W_r = -\frac{M}{ZFDS} \int_0^{\Delta t} I dt = C \cdot I \cdot \Delta t,$$

где M – молекулярная масса; D – плотность; F – постоянная Фарадея; Z – валентность, Δt – интервал времени травления полупроводника при условии постоянства тока I .

Профиль распределения концентрации носителей заряда N (ионизированной примеси) по толщине слоя полупроводника x определяется по следующим соотношениям.

$$N = -\frac{2}{eS^2 \epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{dU}{d(C_{sc}^{-2})}, \quad x = W_d + W_r = -\frac{\epsilon \epsilon_0 S}{C}.$$

Постоянное малое (обычно нулевое) смещение позволяет оценивать концентрацию носителей заряда в диапазоне более шести порядков величины, в то время как автоматические операции измерения-травления могут дать разрешение по глубине порядка 0.01 мкм.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

Профилметр BIO RAD Semiconductor Measurement System Polaron PN 4100

Преимущества электрохимического метода.

- Широкий диапазон измерений концентрации носителей от $1 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{19}$ см^{-3} .
- Применим ко многим материалам. Типичными примерами являются: полупроводниковые соединения GaAs, InP, GaAlAs, GaInAsP, GaP, GaAsP, InSb, InAs, CdTe и Si.
- Подготовки образцов не требуется - измерения сразу после выращивания слоев.
- Глубина профилирования не ограничена напряжением пробоя как в обычном CV анализе.
- Электрические характеристики материалов, такие как ток, проводимость и емкость от напряжения могут быть легко получены в любой точке профиля.
- Неразрушающее преобразование поверхности позволяет получать карту концентрации носителей заряда.
- Автоматически останавливается доходя до p-n-переходов.
- Быстрое определение типа проводимости материала подтверждается при измерении фотовольтаического эффекта от прозрачного электрода.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

Профилометр BIO RAD Semiconductor Measurement System Polaron PN 4100

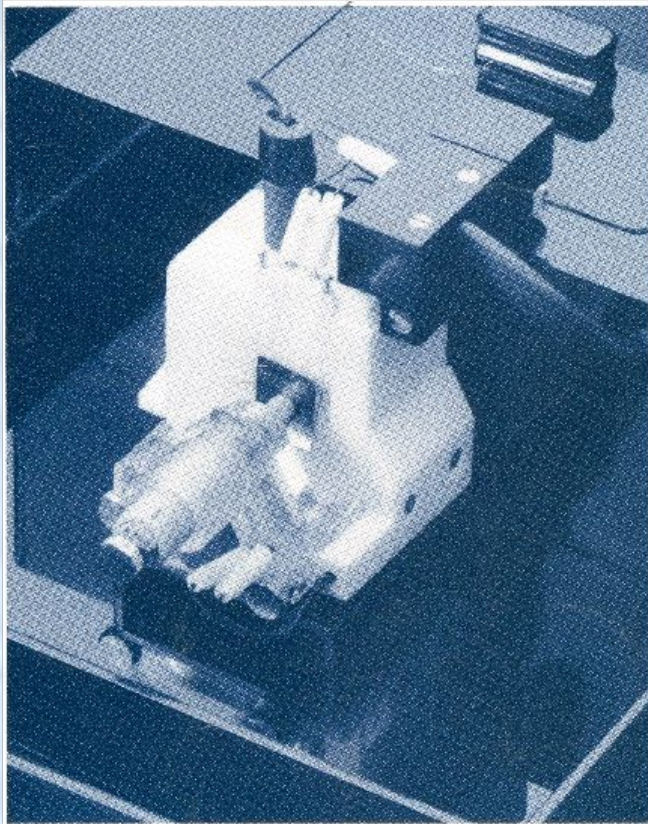


Внешний вид электрохимического профилометра PN4100.

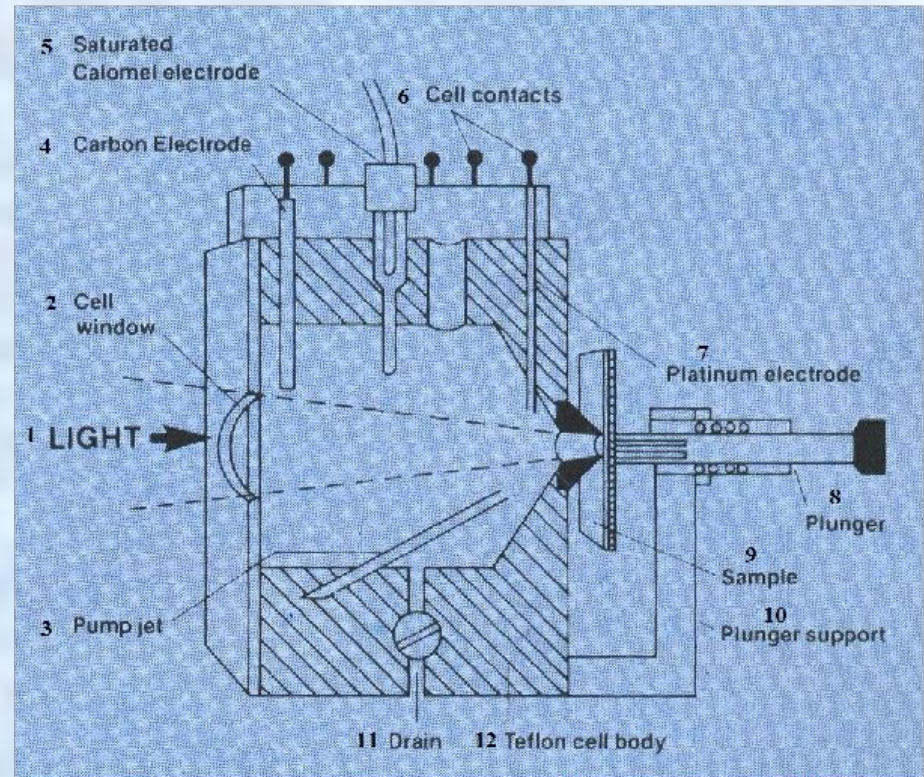
Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

Профилометр BIO RAD Semiconductor Measurement System Polaron PN 4100



Внешний вид электрохимической ячейки профилометра PN4100.



Электрохимическая ячейка профилометра PN4100.
1 - свет; 2 – окно ячейки; 3 – струйный насос; 4 – углеродный электрод; 5 – насыщенный каломелью электрод; 6 – контакты ячейки; 7 – платиновый электрод; 8 - плунжер; 9 - образец; 10 – держатель плунжера; 11 - сток; 12 – тefлоновое основание

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

Профилометр BIO RAD Semiconductor Measurement System Polaron PN 4100

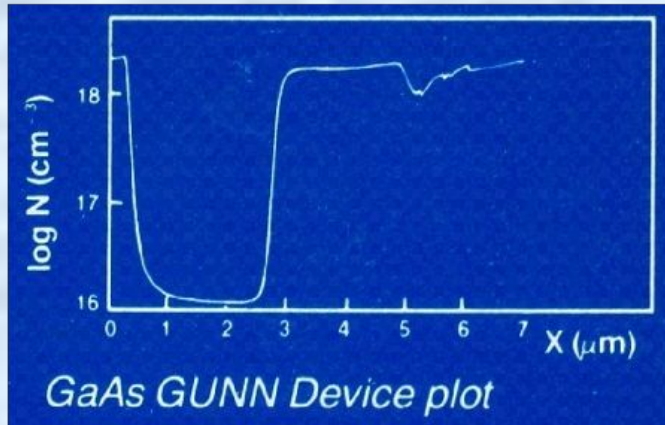
Работа измерительной системы Polaron PN 4100 требует размещение образца в контакте определенной площади с электролитом и приложение небольшого стабилизированного постоянного напряжения к контакту полупроводник-электролит.

- Допустим любой стандартный размер образца.
- Ячейка сменная (отдельный блок), выполненная из коррозионностойких материалов.
- Небольшой объем (7 мл) электролита содержится в ячейке все время. Двухкамерная конструкция обеспечивает перемешивание и удаление пузыря.
- Взаимозаменяемые уплотнительные кольца дают чрезвычайно воспроизводимую площадь контакта электролит-полупроводник.
- Подготовки образцов не нужна. Омические контакты к эпитаксиальному слою или к подложке достигаются автоматически с помощью процесса электрического разряда.
- Ячейка является частью оптической системы, обеспечивающей равномерное освещение прозрачного электрода.
- Электролиты требуемого состава быстро и просто приготавливаются из комплекта реактивов, прилагаемого к профилометру.

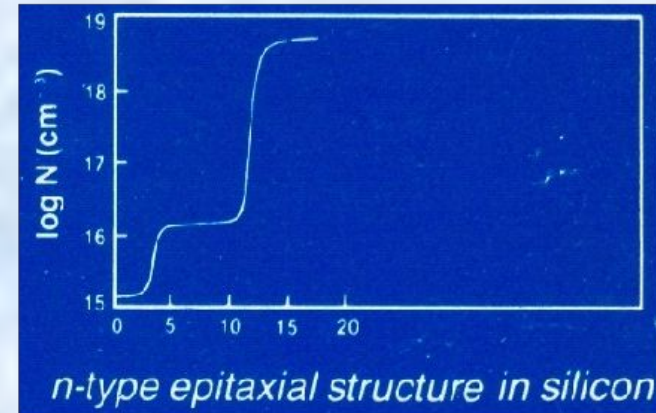
Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

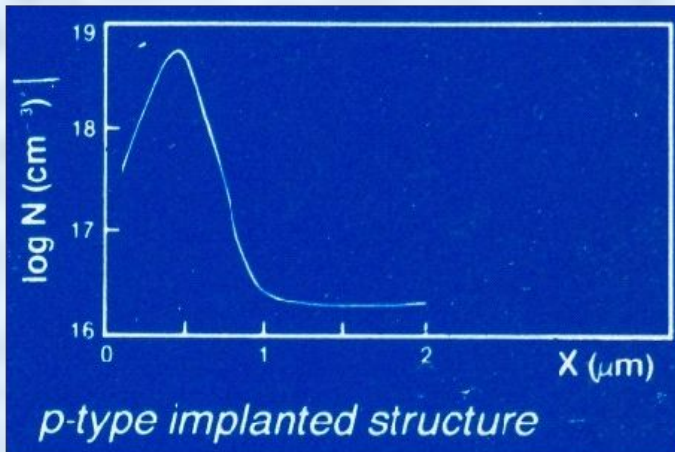
Профилметр BIO RAD Semiconductor Measurement System Polaron PN 4100



1. Профиль концентрации в диоде Ганна на GaAs



2. Профиль концентрации в Si n^-n-n^+ -структуре



3. p^+ -р структура (имплантация B^+ в р-Si и отжиг)

1. Автоматическое профилирование многослойных структур на основе полупроводниковых материалов типа $A_{III}B_V$.
2. Влияние автолегирования и обратной диффузии в кремниевых эпитаксиальных структурах
3. Определение профилей имплантации примесей, дающих n-тип и р-тип проводимости в Si и в полупроводниковых материалах $A_{III}B_V$.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

ECV-Pro. Электрохимический CV-профилометр



Внешний вид профилометра
ECV-Pro

Профилометр ECV-Pro (Nanometrics, США) абсолютно новая автоматизированная установка, сводящая до минимума погрешности измерения, вызванные действиями измерителя. Он лишь устанавливает образец на измерительный столик. После того ECV-Pro все делает сам. Сердце профилометра ECV-Pro - ячейка электрохимического профилирования, а уплотняющее кольцо – важнейший ее элемент. Обслуживание электрохимической ячейки ECV-Pro минимизировано за счет интеграции ячейки в систему и оптимизации конфигурации электродов. Новая конструкция ячейки более чем в два раза увеличивает срок службы уплотняющего кольца

В ECV-Pro установлена система ECVision, позволяющая непосредственно во время измерения контролировать поверхность исследуемого образца. ECVision обеспечивает уровень контроля, недостижимый ранее. В реальном времени можно наблюдать за тем, что происходит с поверхностью во время измерений.

Для оптимального измерения GaN, InGaN и AlGaN разработана дополнительная опция ECV-Pro, расширяющая возможности профилометра.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование ECV-Pro. Электрохимические измерения высокой точности.

Автоматизация измерений дает значительные преимущества лишь при условии высокой точности. Электроника профилометра ECV-Pro исключает дрейф нуля и значительно улучшает соотношение сигнал/шум. Процесс электрохимического профилирования хорошо изучен, точно контролируется и калибруется по специальным стандартам для каждого измерения.

ECV-Pro может измерять концентрации носителей в диапазоне от $1 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{20}$ см^{-3} на глубинах от 50 нм до 50 мкм с разрешением по глубине вплоть до 1 нм.

Электрохимическое профилирование эффективно используется для точного послойного контроля концентрации легирующей примеси, ее распределения по толщине, положения металлургических границ гетеропереходов и p-n переходов. Возможно травление образца на большую глубину с точностью травления не хуже 1 нм. ECV-Pro применяют для контроля наноструктур, толщины отдельных слоев которых достигают единиц нанометров.

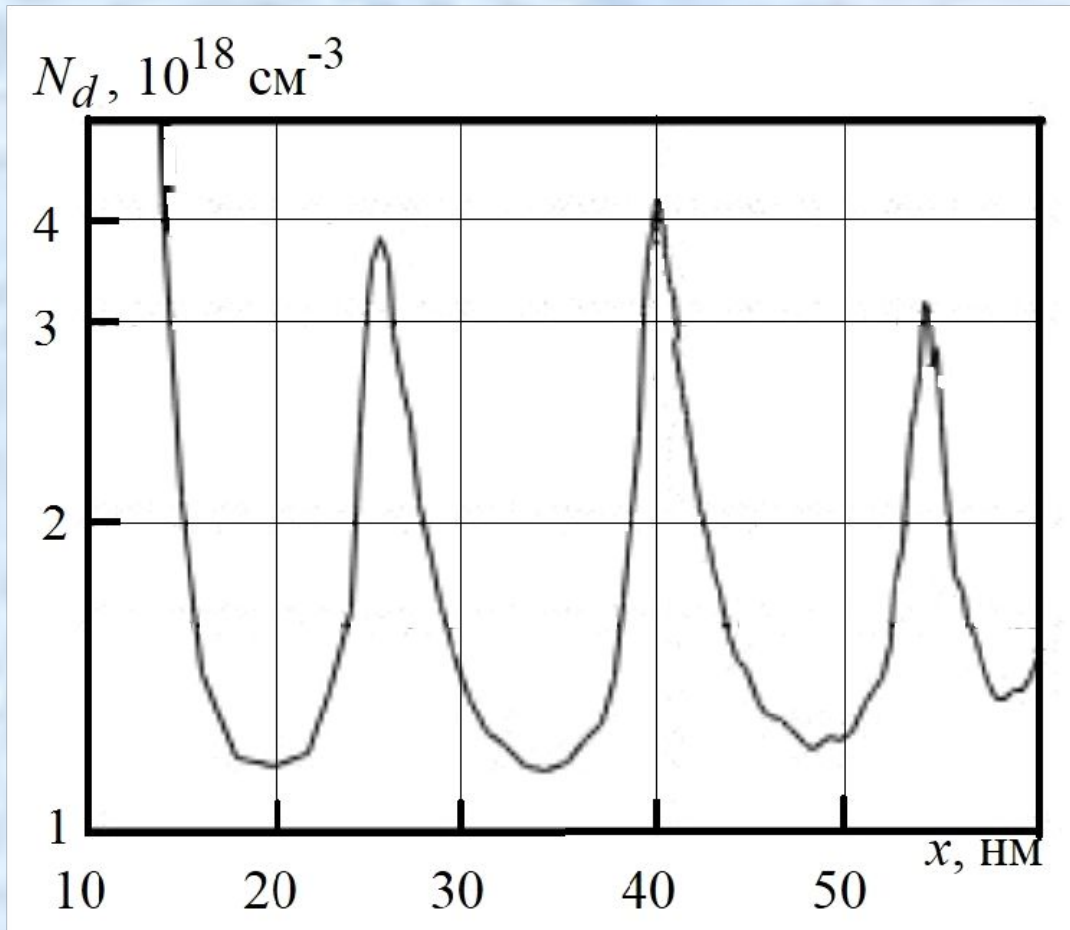
Измеренный с помощью электрохимического профилометра ECV-Pro-UV Nanometrics концентрационный профиль носителей заряда в гетероструктуре InGaN/GaN с квантовыми ямами представлен на следующем слайде.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

ECV-Pro

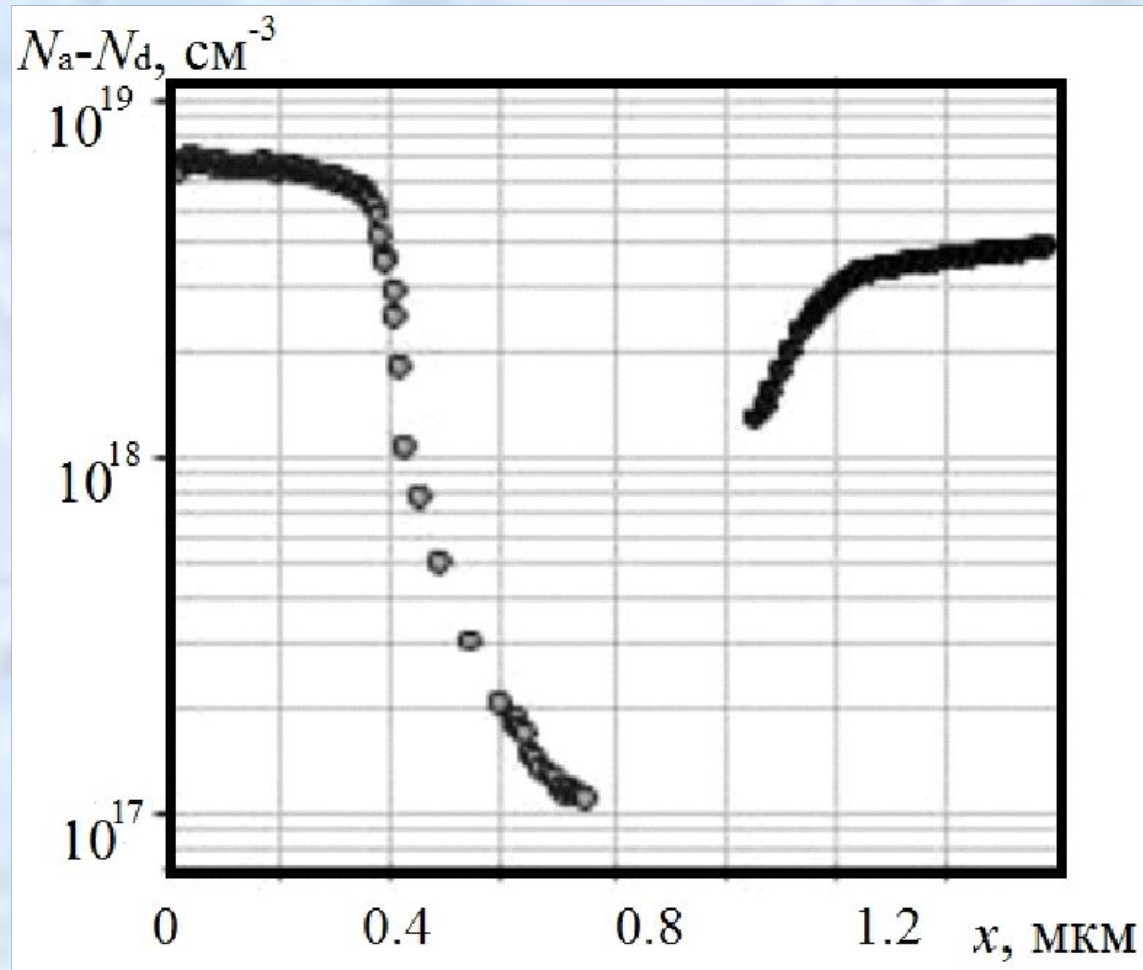
Наблюдаются пики от трех квантовых ям. Можно точно определить период квантовых ям, а с помощью детального анализа можно получить более прецизионную и полную информацию о заряде в квантовых ямах, и об электронном спектре наноструктуры.



Профиль концентрации электронов в гетероструктуре InGaN/GaN с КЯ.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование. ECV-Pro.



Профиль распределения концентрации легирующей примеси по толщине р-і-п структуры в нитриде галлия.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

Преимущества ECV-Pro.

- Исключено влияние оператора на результаты измерений.
- Значительно улучшена воспроизводимость результатов.
- Новая конструкция профилометра снижает занимаемую установкой площадь.
- Система ECVision помогает контролировать процесс измерений.

ECVPro в качестве альтернативы другим приборам.

CV-профилометр с ртутным зондом

Точность и воспроизводимость результатов делают ECV-Pro надежной и безопасной для окружающей среды альтернативой ртутному зондированию. В нем полностью отсутствует ртуть. Горизонтальное расположение столика делает измерение пространственного распределения профилей по поверхности простым и удобным. Благодаря высокой воспроизводимости площади контакта, ECV-Pro способен точно измерять изменения уровня легирования по поверхности пластины.

Установки измерения эффекта Холла

ECV-Pro обладает множеством преимуществ перед измерениями эффекта Холла, например, возможность измерения концентрации электрически активных примесей и получение информации об отдельных слоях. В отличие от установок измерения эффекта Холла, работающих лишь со слоями на полуизолирующих или изолированных p-n переходами подложках, ECV-Pro позволяет профилировать широкий ряд материалов и структур.

Метод ВФХ контакта МП

Электрохимическое профилирование

ECV-Pro. Увеличение производительности при уменьшении стоимости.

Устранение влияния измерителя на результаты измерений.

Время, необходимое на обучения работе с CV-профилометром ECV-Pro, значительно уменьшено. Практически не нужна подготовка образца, а программное обеспечение направляет измерителя на протяжении всего цикла измерений, уменьшая вероятность ошибок. Использование алгоритмов для автоматизации измерений позволяет полностью исключить участие измерителя в определении профилей концентрации сложных структур.

Снижение затрат.

Новый дизайн ECV-Pro увеличивает срок службы уплотняющих колец. Сигнальные электроды и контакты нуждаются в замене значительно реже, чем в предыдущих моделях.

Уменьшение эксплуатационных расходов.

Конструкция новой электрохимической ячейки профилометра и ее оптической системы существенно увеличили надежность оборудования.

Сокращение занимаемой площади.

Напольный дизайн ECV-Pro уменьшает занимаемое пространство примерно в 2 раза по сравнению с другими профилометрами. Также отпадает необходимость в оборудовании специального места для хранения электролитов, воды и отработанных жидкостей, поскольку все это располагается внутри установки.

Определение концентрации свободных носителей по оптическому поглощению

Оптический метод основан на поглощении носителями заряда (электронами, дырками) энергии электромагнитной волны и рассеянии этой энергии при столкновениях с колебаниями атомов в кристалле. Коэффициент поглощения α пропорционален концентрации носителей n и увеличивается с ростом длины волны λ по степенному закону. При классическом рассмотрении коэффициент поглощения α в полупроводнике n-типа проводимости равен

$$\alpha \approx \frac{e^3 n}{4\pi^2 c^3 \varepsilon_0 \eta m_n^{*2} \mu_n} \lambda^2,$$

где e - абсолютная величина заряда электрона, n - концентрация электронов, c - скорость света в вакууме, ε_0 - диэлектрическая постоянная вакуума, η - показатель преломления полупроводника, m_n^* - эффективная масса электрона, μ_n - подвижность электронов, λ - длина волны света.

То есть коэффициент поглощения свободными носителями пропорционален их концентрации, квадрату длины волны падающего света и обратно пропорционален подвижности носителей заряда и квадрату их эффективной массы.

В квантовой модели зависимость $\alpha(\lambda)$ также степенная, но показатель степени отличается от 2.

В эксперименте коэффициент поглощения α определяют, используя закон Ламберта - Бугера

$$J(d) = J_0(1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)d},$$

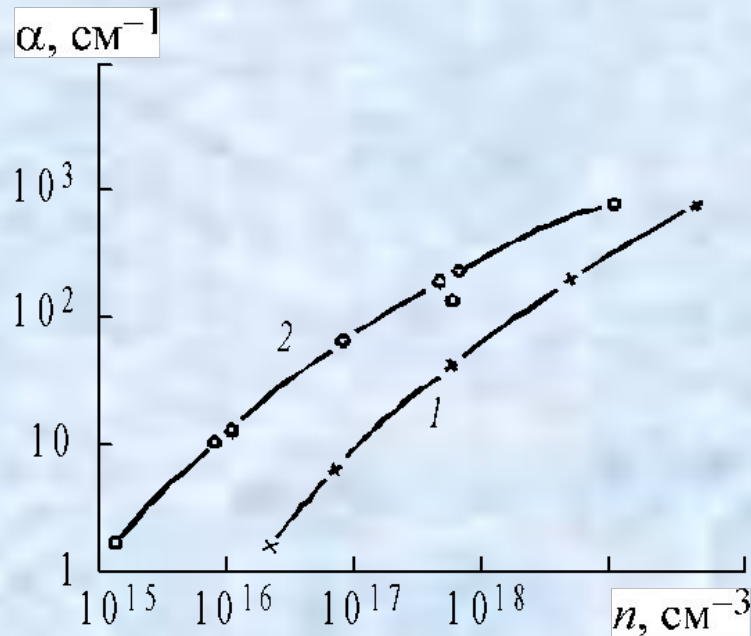
где $J(d)$, J_0 - интенсивности прошедшей и падающей волн; $R(\lambda)$ - коэффициент отражения; d - толщина образца.

Между теоретическими и экспериментальными зависимостями $\alpha(\lambda)$ наблюдаются расхождения, особенно большие в области больших длин волн.

Определение концентрации свободных носителей по оптическому поглощению

В коротковолновом участке инфракрасной области спектра экспериментальная зависимость $\alpha(\lambda)$ достаточно хорошо согласуется с теоретической.

Метод калибровочный. Функции $\alpha(n)$ при различных длинах волн находят экспериментально, измеряя α на рабочих эталонах с известной концентрацией носителей заряда. Концентрацию носителей определяют по градуировочным графикам. На рисунке представлены зависимости α от концентрации носителей n в Si n-типа проводимости при двух длинах волн λ .



Зависимость коэффициента поглощения α от концентрации свободных носителей n в Si при $\lambda = 5$ мкм (кривая 1) и 40 мкм (кривая 2)

При определении концентрации n следует использовать такую спектральную область, в которой другие механизмы поглощения света отсутствуют. Чувствительность метода увеличивается с ростом λ , но техника измерений при $\lambda > 40$ мкм существенно усложняется.

В ближней ИК области ($\lambda \geq 5$ мкм) оптический метод применим при измерении концентраций $n > (1 \cdot 10^{17} \div 1 \cdot 10^{18}) \text{ см}^{-3}$. Нижний предел измерений при $\lambda \approx 40$ мкм - около $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Оптическим методом удается определить

концентрацию носителей в образцах произвольной формы и без изготовления контактов. Метод является неразрушающим. Погрешность метода составляет около 50%.

Определение концентрации свободных носителей по плазменному резонансу

Так как коэффициент поглощения в некоторой окрестности плазменного резонанса весьма велик, то обычно исследуют не спектр поглощения, а спектр отражения. Зависимость коэффициента отражения от частоты падающего излучения имеет характерный вид. При плазменном резонансе коэффициент отражения R минимален, положение минимума связано с концентрацией и эффективной массой носителей заряда. Плазменный минимум отражения различных полупроводников и металлов находится в довольно широких пределах в ближней или средней инфракрасной области спектра.

В общем случае, если имеет место поглощение света свободными носителями,

$$R = \frac{(\eta_1 - 1)^2 + k^2}{(\eta_1 + 1)^2 + k^2},$$

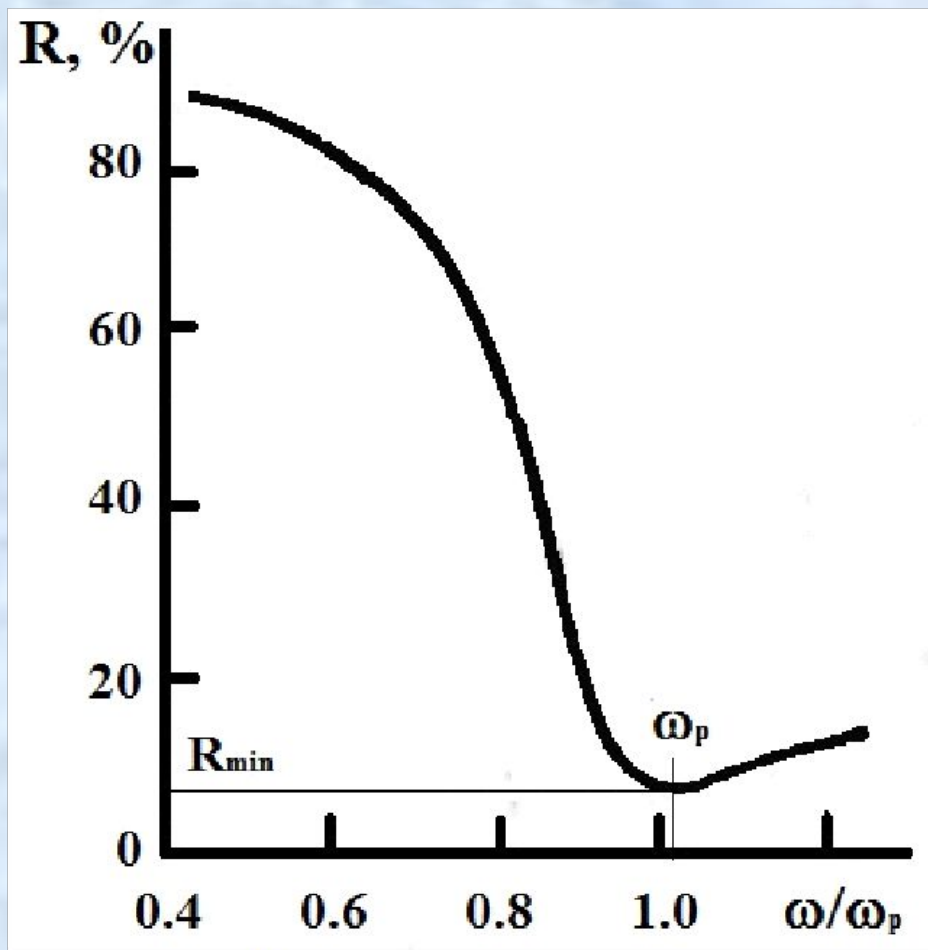
где η_1 – вещественная часть комплексного показателя преломления, k – коэффициент экстинкции (рассеяния), которые связаны между собой следующими соотношениями.

Минимум коэффициента отражения наблюдается на длине волны λ_{\min} вблизи $\lambda_{\text{рез}}$, соответствующей собственной частоте колебаний электронной (или дырочной) плазмы ω_p .

$$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{m\varepsilon_0\varepsilon}.$$

Спектральное положение ω_p зависит от концентрации свободных носителей.

Определение концентрации свободных носителей по плазменному резонансу



Зависимость коэффициента отражения полупроводникового материала R от частоты падающего света ω .

Измерив спектральную зависимость коэффициента отражения и определив длину волны λ_{\min} , соответствующую R_{\min} , определяют концентрацию свободных носителей n . Обычно используют в качестве калибровочных эмпирические зависимости $n(\omega_p)$, полученные на рабочих эталонах с известным значением концентрации носителей заряда. Значение концентрации определяют при помощи калибровочных кривых $\lambda_{\min}=f(n)$, построенных по экспериментальным данным, полученным при измерении λ_{\min} на рабочих эталонах. Методом плазменного резонанса можно измерять концентрацию носителей только в высоколегированных полупроводниках.

Определение концентрации свободных носителей по плазменному резонансу

Полупроводник	Тип проводимости	Уравнение кривой, аппроксимирующей экспериментальную калибровочную зависимость	Интервал концентраций	Ошибка аппроксимации
Si	n	$\lambda_{\min} = 3.2908 \cdot 10^{11} n^{-0.5451} + 1.8153$	$1.5 \cdot 10^{18} - 1.5 \cdot 10^{21}$	2.4 %
	p	$\lambda_{\min} = 1.2125 \cdot 10^{15} p^{-0.07370} + 3.1840$ $\lambda_{\min} = 2.4410 \cdot 10^{10} p^{-0.4828} + 3.1840$	$3.0 \cdot 10^{18} - 1.0 \cdot 10^{20}$ $1.0 \cdot 10^{20} - 5.0 \cdot 10^{20}$	0.8 %
GaAs	n	$\lambda_{\min} = 8.4172 \cdot 10^2 n^{-0.08125}$ $\lambda_{\min} = 4.1584 \cdot 10^7 n^{-0.3451}$ $\lambda_{\min} = 1.7231 \cdot 10^{10} n^{-0.4875}$	$1.5 \cdot 10^{17} - 6.0 \cdot 10^{17}$ $6.0 \cdot 10^{17} - 2.5 \cdot 10^{18}$ $2.5 \cdot 10^{18} - 1.0 \cdot 10^{20}$	0.5 %

Погрешность определения концентрации носителей заряда определяется точностью измерения λ_{\min} и «коридором погрешностей» калибровочной кривой $n(\lambda_{\min})$ или $\lambda_{\min}(n)$. Погрешность определения λ_{\min} складывается из систематической погрешности калибровки прибора, измеряющего спектр отражения по длинам волн или по волновым числам, и из случайной погрешности, зависящей от остроты минимума кривой $R=f(\lambda_{\min})$. Поскольку с уменьшением n ширина минимума растет, то случайная погрешность определения λ_{\min} увеличивается, соответственно увеличивается и ошибка в определении концентрации. Случайная погрешность измерения концентрации с доверительной вероятностью 0.95 увеличивается с уменьшением концентрации от $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ от $\pm 10\%$ до $\pm 50\%$ для кремния n-типа проводимости и от $\pm 5\%$ до $\pm 100\%$ для Si p-типа проводимости. В n-GaAs при уменьшении концентрации от $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ погрешность ее определения растет от $\pm 10\%$ до $\pm 80\%$.