

Изобретение относится к оптическим методам измерения электрофизических свойств полярных полупроводниковых материалов и может быть использовано для исследования явлений, связанных с малыми изменениями в приповерхностной области оптических свойств вещества.

В качестве прототипа выбран способ измерения концентрации носителей заряда в полупроводниковых материалах, основанный на явлениях плазменного резонанса носителей заряда и заключающийся в измерении спектров инфракрасного (ИК) отражения в области длины волны плазменного резонанса [1]. По экспериментальной кривой определяют длину волны плазменного резонанса и используя графики зависимости концентрации носителей заряда от длины волны плазменного резонанса, находят концентрацию носителей заряда. Этот способ удобный в использовании, так как позволяет измерять концентрации носителей зарядов в диапазоне от 5×10^{18} до $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ с точностью не хуже 20% даже при грубой шлифовке материала, что удобно на ранней стадии производства, когда необходимо определить пределы предписанного концентрационного диапазона.

Недостатки способа измерения концентрации носителей заряда, основанного на анализе спектров ИК отражения в области плазменного резонанса:

- недостаточная чувствительность, так как при концентрациях носителей заряда меньше 10^{19} см^{-3} плазменный минимум находится в области миллиметровых или сантиметровых длин волн излучения и сильно уширяется часть спектра в области плазменного резонанса;

- спектральное положение минимума коэффициента отражения в области плазменного резонанса определяется не только концентрацией и подвижностью носителей заряда, но и эффективной массой и диэлектрической проницаемостью, что снижает точность измерения;

- этот способ применим не ко всем полупроводникам, так как в случае полярных полупроводников (например, **ZnO**, **SiC 6H**, **ZnP₂**, **CdP₂** и др.) в области плазменного резонанса проявляется область остаточных лучей, когда коэффициент отражения в широком диапазоне частот резко изменяется от значений, близких к единице, до значений, близких к нулю, что существенно снижает точность измерения длины волны плазменного резонанса.

В основу изобретения поставлена задача повышения чувствительности и точности измерения концентрации и подвижности носителей заряда в приповерхностной области полярных полупроводников, а также упрощение эксперимента и сокращение времени получения результатов.

Поставленная задача достигается тем, что измеряют коэффициент отражения облученной электромагнитным излучением ИК диапазона поверхности полупроводникового материала и сравнивают его со значением на градуировочной кривой, отличающийся тем, что производят измерение коэффициента отражения полупроводникового материала на двух частотах из области минимума остаточных лучей

материала, одна из которых - ν_1 соответствует значению: $\nu_1 = \nu_1 [(E_0 - 1)/(E_{00} - 1)]^{1/2}$, где ν_1 - частота поперечного оптического фонона, E_0 и E_{00} - статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости, а вторая ν_2 , на которой показатели преломления или поглощения отличаются в 2 - 3 раза по сравнению с частотой ν_1 и определяются из уравнения: $\nu_2 = \nu_1 - (\nu_1 / \nu_{11}) \cdot 10$, где ν_1 , ν_{11} - частота продольного оптического фонона перпендикулярно и вдоль оси кристалла.

Сущность предлагаемого изобретения заключается в следующем. Известен широкий класс полярных полупроводниковых кристаллов. К ним относятся большинство двойных и тройных полупроводниковых соединений, у которых проявляется значительная доля (свыше 10%) ионной химической связи. Для таких полярных полупроводников имеется участок в спектре ИК отражения, называемый областью остаточных лучей. Область остаточных лучей расположена между частотами поперечного и продольного оптического фонона и характеризуется высоким коэффициентом отражения, который обусловлен дипольными колебаниями решетки.

Для луча, падающего перпендикулярно к поверхности полярного полупроводника, коэффициент отражения определяется формулой учитывающей наличие концентрации и подвижности носителей заряда в полярном полупроводнике:

$$R(\nu) = [(E(\nu)^{1/2} - 1) / (E(\nu)^{1/2} + 1)]^2, \quad (1)$$

$$E(\nu) = E_{00} + [E_{00}(\nu^2 - \nu_p^2)] / [\nu^2 - \nu^2 - i\nu\gamma_p] - (\nu_p^2 E_{00}) / [\nu / (\nu^2 + \gamma_p)],$$

$$\nu_p = [(4 \pi n_0 q^2) / (m^* E_{00})]^{1/2},$$

$$\mu_L = q / (m^* \gamma_p),$$

где ν - частота света (в см^{-1}), γ_p и γ_p - коэффициенты затухания фононов и плазмонов, ν_p - частота плазменного резонанса, n_0 - концентрация носителей зарядов, μ_L - подвижность носителей заряда, q - заряд электрона.

Запишем дисперсионную формулу для $E(\nu)$ при условии $\nu_r > \nu_p$:

$$E(\nu) = E_{00} + [(E_0 - E_{00}) / (1 - (\nu / \nu_1)^2)] \quad (2)$$

и рассмотрим, как изменяется $R(\nu)$ при изменении частоты.

При возрастании частоты ν от 0 до частоты ν_1 показатель преломления $n(\nu) = [E(\nu)]^{1/2}$ возрастает от значения $[E_0]^{1/2}$ до бесконечности.

Подставляя в формулу (1) значения $[E(\nu)]^{1/2}$, коэффициент отражения будет увеличиваться и на частоте ν_{max} приобретет максимальное значение. Как только ν превзойдет ν_{max} ,

величина $E(\nu)$ делает скачек от $+\infty$ до $-\infty$ и сохраняет отрицательное значение при дальнейшем возрастании частоты от ν_0 до ν , удовлетворяющему уравнению (2) при $E(\nu) = 0$.

При использовании соотношения Лиддейна -

Сакса - Теллера уравнение (2) при учете (3) переписывается:

$$E(\nu_{\max}) = E_{00}[1 - (\nu^2 - \nu_1^2)/(\nu_{\max}^2 - \nu_1^2)] = 0. \quad (4)$$

В интервале частот $\nu_1 - \nu$ показатель преломления является чисто мнимой величиной, а следовательно, коэффициент нормального отражения составляет 100%, т.е. кристалл в этой полосе частот полностью отражает падающий на него свет. При дальнейшем росте частоты в интервале от ν до $\nu_1 = \nu_{\min}$ коэффициент отражения уменьшается от 100 до 0%. Частота минимума ν_1 вычисляется из условия:

$$E(\nu_1) = E_{00} + [(E_0 - E_{00}) / (1 - (\nu_1/\nu_1)^2)] = 1, \quad \nu_1 = \nu_1[(E_0 - 1)/(E_{00} - 1)]^{1/2}. \quad (5)$$

Частота минимума ИК отражения в области остаточных лучей полярных полупроводников определяется по формуле (5). Она не зависит от концентрации и подвижности носителей зарядов и определяется только параметрами кристаллической решетки. Для каждого полярного полупроводника ν_1 есть величина постоянная, принадлежащая ИК диапазону, что удобно при регистрации экспериментальных спектров ИК отражения с высокой точностью. Вторая частота определяется из условия, чтобы существовало резкое отличие между показателями преломления или поглощения на частотах ν_1 и ν_2 , что увеличивает точность и однозначность определения концентрации и подвижности носителей зарядов. Для полярных полупроводников частота ν_2 определяется из уравнения: $\nu_2 = \nu_1(\nu_1/\nu_{11}) * 10$.

Изменения коэффициента отражения вызываются изменением диэлектрической проницаемости полярного кристалла.

Повышение чувствительности способа к изменению концентрации и подвижности носителей заряда и точности ее определения происходит благодаря малой отражательной способности в области минимума остаточных лучей спектра отражения. Малый коэффициент отражения позволяет использовать значительные интенсивности падающего на кристалл излучения. Небольшие изменения концентрации носителей зарядов в приповерхностной области вызывают значительные изменения отражательной способности $\Delta R(\nu)$ и относительного коэффициента отражения $\Delta R(\nu)/R(\nu)$.

Упрощение способа регистрации концентрации носителей зарядов в полярных полупроводниках достигается за счет того, что в широком диапазоне концентраций носителей зарядов ($10^{16} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$) частота минимума в области остаточных лучей выше частоты минимума плазменного резонанса и не требуется регистрации спектра отражения в области плазменного резонанса.

Измерения спектров отражения в области минимума остаточных лучей позволяют использовать стандартные промышленные приборы без необходимости их модернизации (замена призм, приготовление элементов НПВО и т.д.). Это расширяет возможности применения способа, упрощает и делает его универсальным. Сокращение времени получения окончательных

результатов достигается благодаря использованию более простых по сравнению с прототипом формул для определения концентрации и подвижности носителей заряда, так как в прототипе концентрация и подвижность определяется путем решений сложных трансцендентных уравнений для получения соответствующих зависимостей. В предлагаемом изобретении измеряется только коэффициент отражения полярного кристалла.

Предлагаемым способом можно измерить концентрации и подвижности носителей заряда в широком диапазоне концентраций и температур. Способ позволяет измерить концентрацию и подвижность носителей заряда дистанционно.

Схема опыта по измерению концентрации и подвижности носителей заряда в приповерхностной области полярного кристалла достаточно проста и требует наличия плоской поверхности кристалла толщиной, значительно больше длины волны излучения. Наиболее простым экспериментом является измерение сигнала отражения при нормальном падении луча на плоскую поверхность полярного кристалла. Для изотропных кристаллов отпадает необходимость использования поляризатора, для одноосных кристаллов можно использовать неполяризованное излучение при ориентации поверхности нормально к оптической оси C кристалла. При анизотропной эффективной массе носителей зарядов спектр отражения измеряется с поляризатором при электрическом векторе $E \parallel C$ и $E \perp C$. Выбор частоты излучения упрощен благодаря предварительной оценке для исследуемого полярного кристалла положения минимума в области остаточных лучей по формуле (5).

Для определения отражения $R(\nu)$ на частотах ν_1 и ν_2 значения $R(\nu_1)$ и $R(\nu_2)$ подставляют в формулу (1) и получают два уравнения с двумя неизвестными {все другие параметры известны}, что дает возможность однозначно определить с помощью ЭВМ концентрацию и подвижность носителей заряда. Точность определения ν_p и μ_L на порядок выше, чем в прототипе, данный способ прост, так как необходимо измерить всего два значения $R(\nu)$ на известных ранее частотах (постоянных для данного полярного полупроводника), точность определения ν_0 и μ_L в нашем способе зависит только от точности измерения $R(\nu_{1,2})$, измеряемых с точностью 1%.

Разработана экспериментальная калибровочная кривая, с помощью которой можно определить концентрацию и подвижность носителей заряда, измерив $\Delta R(\nu)$ на частоте ν_1 и сравнив его со значениями на градуировочной кривой.

Разработаны простые аналитические зависимости концентрации носителей зарядов от коэффициента отражения на частоте минимума в области остаточных лучей (при известных параметрах полярного кристалла, включая значения коэффициентов затухания плазмонов), с помощью которых можно определять концентрацию носителей заряда, измерив $\Delta R(\nu)$ на частоте ν_1 .

При контроле степени однородности легирования полупроводниковых пластин ИК микрозондом по отражению достаточно задаться допустимым значениям $R(\lambda)$, что удобно при автоматизированном неразрушающем режиме контроля. Возможна дистанционная оценка степени легирования в процессе введения примеси.