анализатора мутности заключается в понимании того, отвечает ли его конструкция и используемая шкала измерения поставленной аналитической задаче.

В нефелометрах для определения мутности используется принцип светорассеяния, определяемого под углом 90° к источнику. Поскольку в конструкции большинства современных анализаторов мутности применяются детекторы как на проходящее, так и на рассеянное под различными углами к источнику излучение, а сами производители довольно свободно оперируют всеми тремя терминами, для наименования анализаторов мутности используют наиболее общий термин «мутномер».

ОВП метр (ORP метр) измеряет окислительно-восстановительный потенциал. Это уровень способности химических веществ восстанавливаться, то есть присоединять электроны.

С помощью ОВП (ORP) метра можно измерить окислительно-восстановительный потенциал в водоемах и бассейнах, аквариумах, и даже ОВП почвы. С точки зрения водоподготовки можно проводить измерения ОВП жидкостей: воды и слабых водных растворов, кислот, щелочей, солей.

Окислительно-восстановительный потенциал определяют электрохимическим методом с использованием стеклянного электрода, например, ОВП (ORP) метра с red-ox, и выражают в милливольтках (мВ) относительно стандартного водородного электрода в стандартных условиях. В природных условиях значение ОВП (Eh) воды находится в пределах от — 400 до + 700 мВ. Окислительно-восстановительный потенциал взаимосвязан с уровнем кислотности (pH) и зависит от температуры среды.

Таким образом, рассмотренные приборы контроля качества воды имеют ряд достоинств и недостатков в использовании, а также могут отличаться друг от друга, например, набором совместимых с устройством электродов, объемом встроенной памяти, качеством дисплея и т.п.

1. Алексеев, Л.С. Контроль качества воды / Л.С. Алексеев. - М.: ИНФРА-М, 2004. - 154 с.
2. Брайнина Х.З. Электроанализ: от лабораторных к полевым вариантам // Журн. аналит. химии. 2001. - № 4. - С. 344-354.
3. Викулина, В.Б. Метрологическое обеспечение контроля качества воды / В.Б. Викулина. - М.: МГСУ, 2011. - 83 с.
4. Кожинов В.Ф. Очистка питьевой и технической воды - М.: ООО "БАСТЕТ", 2008. - 304 с.
5. Куцева Н.К. Общий органический углерод-показатель содержания органических веществ в воде // Питьевая вода. – 2006. – № 6. – С. 24–26.
6. Методы и приборы контроля качества и содержания вредных веществ в воде / А.И. Потапов и др. - М.: Наука, 2008. - 760 с.
7. Шляпунова Е.В. Проточно-инжекционная кондуктометрия карбонатной щелочности природных и питьевых вод // Аналитика России: Матер. 2 Всерос. конф. по аналит. химии с международным участием (к юбилею акад. Ю.А. Золотова), Краснодар, 7–12 окт. 2007. – Краснодар, 2007. – С. 402.

Муратов А.С., Отажонов С.М., Кулбаев Г.Г., Уалиев Д.М.
Особенности электродвижущих сил в многослойных полупроводниковых структурах

*Каракалтакский государственный университет им. Бердаха
(Узбекистан, Нукус)*

doi: 10.18411/lj-03-2021-50
 idsp: ljjournal-03-2021-50

Аннотация

В работе анализируется фото-ЭДС в полупроводниковых многослойных гетеропереходах. Рассмотренная теоретическая модель, оптоэлектронных свойств многослойных периодических структур позволяет определить характерные частоты,

при которых ЭДС имеет экстремальные значения. Определенные значения частоты, при которых ЭДС, меняет знак, достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Показано, что максимумы ЭДС прямо пропорциональна к числу слоев, и имеют сложную зависимость от расстояния между центрами молекулы, и толщины электронного газа. Рассмотренную многослойную полупроводниковую структуру из nGaAs и nZnSe можно использовать в переключающих устройствах, так как время переключения их достаточно мало.

Ключевые слова: электродвижущая сила, колебания, электрон, частота, энергия.

Abstract

The paper analyzes the photo-EMF in semiconductor multilayer heterojunctions. The considered theoretical model of the optoelectronic properties of multilayer periodic structures makes it possible to determine the characteristic frequencies at which the EMF has extreme values. Certain frequency values at which the EMF changes sign are in good agreement with the experimental data. It is shown that the EMF maxima is directly proportional to the number of layers and have a complex dependence on the distance between the centers of the molecule and the thickness of the electron gas. The considered multilayer semiconductor structure of nGaAs and nZnSe can be used in switching devices because of their rather short switching times.

Keywords: electromotive force, vibration, electron, frequency, energy.

Введение

Известно, что многослойные полупроводниковые структуры (МПС) обладают различными особенностями, так, например, на вольтамперной характеристике (ВАХ) имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) [1], при фотовозбуждении возникает электродвижущая сила (ЭДС) [2], наблюдается эффект переключения [2-4].

Экспериментально установлено, что энергию монохроматического светового сигнала МПС GaAs-ZnSe *n*-типа преобразует на ЭДС, в интервале длины волн (0.47-1.7 μm), причем при длине 0.86 μm фото-ЭДС меняет знак, то есть ЭДС переключается от положительного к отрицательному (рис. 1).

Рис.1. Спектральное распределение фоточувствительности МПС nGaAs –nZnSe [2].

Аналогичные эффекты наблюдаются в гетероэпитаксиальной структуре Ge-GaAs [3]. Изучение спектральной характеристики поперечной фото-ЭДС, при различной

интенсивности потока квантов возбуждающего модулированного света, показывает, что инверсия фото-ЭДС происходит при длине волны $0.86 \text{ }\mu\text{m}$. При этом выделяется три характерные особенности. Во-первых, фото-ЭДС возникает в направлении, перпендикулярном падающему потоку света и градиенту концентрации генерированных электронно-дырочных пар, и значит, параллельно границе раздела пленки и подложки. Во-вторых, спектральная характеристика фото-ЭДС дважды меняет знак и имеет три выраженных максимума вблизи длин волн 0.65 , 0.89 и $1.3 \text{ }\mu\text{m}$ (им соответствует энергии квантов света 1.9 , 1.4 и 0.95 eV). В-третьих, наблюдается нелинейная и немонотонная зависимость амплитуды фото-ЭДС от интенсивности света.

К возникновению фото-ЭДС могут привести, как минимум две причины: деформация кристаллических решеткой Ge и GaAs или градиент удельного сопротивления в пленке германия и прилегающей к ней области. Такое предположение подтверждается результатами теоретического расчета [4]. В результате деформации контактирующихся двух молекул возникает мгновенные диполи, которые приводит к возникновению фото-ЭДС, в резонансных частотах наблюдается максимум амплитуды фото-ЭДС.

В работах [4, 5] проведены теоретические исследования показывают, что в гетеропереходах возможны аналогичные переключения ЭДС с одной полярности к другой. Такие особенности связаны с вынужденными колебаниями электронов, а сам процесс объясняется эквивалентной схемой связанных колебательных контуров.

В данной работе проводим анализ теоретических исследований, сопоставляя при этом основные характерные параметры с результатами эксперимента.

В теоретических моделях основным элементом считаются контакты многоэлектронных молекул, какими являются GaAs и ZnSe. Причем между молекулами устанавливается валентная связь.

Рис.2. Спектральная зависимость ЭДС гетероперехода.

В работе [2] приведены результаты эксперимента по определению зависимости фото-ЭДС от длины волны монохроматического светового сигнала. Так как в теоретических работах удобно вести расчеты в виде частотной зависимости ЭДС, используя общеизвестную формулу $\omega = 2\pi c / \lambda$.

Определим характерные частоты, соответствующих длинам волн, определенных на опытах. Таким образом, получаем графическое изображение ЭДС в зависимости от частоты ω .

На рисунке 2 приведено принципиальное изображение такого графика, где ω_0 , ω_1 и ω_2 являются характерными частотами, при которых ЭДС имеет различные значения. Так, например, при ω_0 ЭДС меняет знак. А при ω_1 и ω_2 частотами отмечены характерные частоты, при которых фото-ЭДС имеют различные значения.

Вычисление частоты переключения - ω_0

При частотах ω_0 монохроматического светового сигнала ЭДС будет равно нулю. В работах [4,5] для такой частоты получена формула

$$\omega_0^2 = \frac{40B}{(R_g/2)^6} \frac{1}{m_0}, \quad B = 20E_0r_0^4.$$

В этих формулах E_0 и r_0 обозначает боровскую энергию электрона и радиуса первой боровской орбиты, m_0 -масса электрона, R_g -толщина электронного газа в контактной области. Следовательно, имеет место $\omega_0 \sim R_g^{-3}$.

При $R_g = 5.2 \cdot 10^{-10}$ м, $\omega_0(0) = \omega_0(T) = 22 \cdot 10^{14}$ рад/с, что соответствует экспериментально определенному значению длины волны $\lambda_0 = 0.86 \cdot 10^{-6}$ м. Для вычисления $\omega_0(R_g)$ в зависимости от R_g можно воспользоваться формулой $\omega(R) = \omega_0(R_g/R)^3$.

Вычисление характерных частот ω_k и ω'_k

В работе [5] показано, что при отсутствии электронного газа имеет место колебание двух осцилляторов с частотами ω_k и ω'_k

$$\omega_k^2 = \frac{2ke^2}{m_0R^3} \left(\frac{\sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_2}}{\sqrt{Z_1Z_2}} \right)^3 Z_2^{3/2} Z_1, \quad (\omega'_k)^2 = \frac{2ke^2}{m_0R^3} \left(\frac{\sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_2}}{\sqrt{Z_1Z_2}} \right)^3 Z_1^{3/2} Z_2.$$

Так как зарядовые числа GaAs и ZnSe $Z_1 = Z_2 = 64$, т.е. равны, то $\omega_k = \omega'_k$ будут равными. При этом наблюдается только одно колебание. Если расстояние между центрами этих молекул будет равно $R = 40 \cdot 10^{-10}$ м, то ω_k и ω'_k определяется как $\omega_k \sim R^{-3/2}$.

Если учитывать индукционные силы при кулоновских взаимодействиях, то происходят колебания двух осцилляторов, отношение их собственных частот определяется формулой

$$\left(\frac{\omega'_{ki}}{\omega''_{ki}} \right)^2 = \sqrt[5]{\frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_1 - 1} \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^2}.$$

Если принимать расстояние между молекулами $R_0 = 4.0 \cdot 10^{-9}$ м, то $\omega'_{ki} = \omega''_0(R_0/R)^3$.

При этом $\omega''_0 \sim 10^6$ рад/с, следовательно, доля индукционных сил на энергетический баланс на много меньше, но наблюдается тенденция запасаения энергии. Заметим, что колебания происходят только при различных значениях диэлектрических постоянных, контактирующих полупроводников.

Расчет собственных колебаний электронов в Томас-Фермиевском потенциале

Если электрон находится в окружении электронного газа, то при $\varepsilon_1 = 11.2$, $\varepsilon_2 = 8.1$ равновесие находится на расстоянии $x_m = 4 \cdot 10^{-12}$ м от края электронного газа. При этом имеет место колебание с частотами ω_{Ti} и ω'_{Ti} ,

$$\omega_{Ti}^2 = 80 B^2 \frac{V_0}{e^2 m} \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon_1 - 1)}{(x_g / 2 - x_m)^{12}}, \quad (\omega'_{Ti})^2 = 80 B^2 \frac{V_0}{e^2 m} \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon_2 - 1)}{(x_g / 2 + x_m)^{12}},$$

где V_0 - классической объем электрона.

Подставляя численных значений параметров, получаем, что

$$\omega_{Ti}^2 = 11 \cdot 10^{16} (\text{rad/s})^2, \quad (\omega'_{Ti})^2 = 3.1 \cdot 10^{16} (\text{rad/s})^2.$$

Теперь рассмотрим случай, когда на электрон действуют кулоновские, Томаса-Фермиевские потенциалы и потенциалы индукционных сил. При этом воспользуемся диаграммой сложения колебаний сложных систем. В наших расчетах определены квадраты частот отдельных осцилляторов, поэтому они скалярные величины и характеризует энергию осцилляторов. Однако их арифметическая сумма энергии этих осцилляторов не дает полную энергию, так как некоторые из них погасят энергию другого осциллятора. Отсюда следует необходимость определить запасенную в колебательной системе энергию. Поэтому в работе [5], принимая рассмотренную систему колебаний осцилляторов, как два связанных колебательных контуров определены формулы

$$\omega_1^2 = \frac{1}{LC}, \quad \omega_2^2 = \frac{1}{LC} + \frac{2}{C_b L}.$$

Электрофизическая эквивалентная схема контакта приведена на рисунке 3.

Рис. 3. Эквивалентная схема контакта.

Так как в течение времени T вся энергия, запасенная в первом колебательном контуре, переходит ко второму колебательному контуру, то эти энергии полностью запасаются в индуцированных полях. Тогда получаем, что

$$\frac{2}{C_b L} = \frac{40 e^2 k_0}{m_0 (R_g / 2)^6} = \omega_0^2.$$

При этом амплитуда модулированных волн будет равна нулю. Известно, что резонансные явления в связанных колебательных контурах происходят в двух разных частотах. Запасенная энергия создает ЭДС. Следовательно, при $\omega^2 < \omega_0^2$ и $\omega_0^2 \leq \omega^2 \leq \omega_2^2$ интервале наблюдаются резонансы, причем ЭДС имеет две разные

полярности. На рис. 2 видно, что прибор имеет три устойчивых состояния $(+1, 0, -1)$, что позволяет использовать этот эффект как переключатель в радиоэлектронных схемах [5]. Экспериментально такой эффект наблюдается в многослойных периодических структурах, изготовленных из GaAs и ZnSe n -типа проводимости [2] и Ge-GaAs [3].

Заключения

Таким образом, рассмотренная теоретическая модель, оптоэлектронных свойств многослойных периодических структур позволяет определить характерные частоты, при которых ЭДС имеет экстремальные значения. Определенные значения частоты, при которых ЭДС, меняет знак, достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Показано, что максимумы ЭДС прямо пропорциональна к числу слоев, и имеют сложную зависимость от расстояния между центрами молекулы, и толщины электронного газа. Численные значения этих величин хорошо согласуются с экспериментом в рамках предположения низких температур. Рассмотренную многослойную полупроводниковую структуру из n GaAs и n ZnSe можно использовать в переключающих устройствах, так как время переключения их достаточно мало.

1. Шик А.Я. Сверхрешетки-периодические полупроводниковые структуры (обзор) // ФТП. – 1974. – Т. 8. – В. 10. – С. 1841-1864.
2. Дуйсенбаев М., Кан М.А., Аuezов С.А. О свойствах многослойных полупроводниковых структур // Узбекский физический журнал. – 2002. – №4. – С. 69-71.
3. Шеховцев Л.В., Венгер Е.Ф., Семенова Г.Н., Садофьев Ю.Г., Корсунская Н.Е., Семцев М.П., Сапко С.Ю. Особенности долговременной релаксации фото-ЭДС в гетероэпитаксиальной структуре ZnSe-GaAs // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – № 5. – С. 23-30.
4. Исмаилов К.А., Муратов А.С. Квантовая теория оптоэлектронных процессов в гетеро-структурах. Структурная релаксация в твердых телах. Материалы VI международной научно-практической конференции. – Винница (Украина), 2018. – С. 215-219.
5. Исмаилов К.А., Муратов А.С. Колебания электронов, находящихся в контактной области двух полупроводников // Научно-методические проблемы инженерной физики. – Ташкент, 2017. – С. 161-163.