Рис.4. Временные развертки коэффициентов разложения временных разверток с периодом 30 суток величин массовой концентрации M – левая ось ординат, зеленая кривая и направлений прихода воздушных масс в Подмоскowie – M значение 3000. Для исследования данных мы привлекли методы скользящего среднего – красная кривая.

1. Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В. О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 05-06. С. 393-399.
2. Исаков А.А. О внутригодовой изменчивости массовой концентрации субмикронного приземного аэрозоля в Подмоскowie // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 06. С. 462-465.
3. Исаков А.А., Тихонов А.В. О сопоставлении осредненных направлений прихода в Подмоскowie воздушных масс со средними величинами параметра Хенела и показателя преломления вещества частиц // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 01. С. 9-13.
4. Исаков А.А., Тихонов А.В. Связь параметров аэрозоля Центральной России с воздушными вязь параметров аэрозоля Центральной России с воздушными массами // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 03. С. 192-196.

Муратов А.С.¹, Уалиев Д.М.¹, Утениязов Ж.А.²

Статическая ВАХ многослойной гетероструктуры при продольном эффекте

¹Каракалтакский государственный университет им. Бердаха
(Узбекистан, Нукус)

²Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека
(Узбекистан, Ташкент)

doi: 10.18411/lj-11-2020-41

idsp: ljjournal-11-2020-41

Аннотация

В работе приведены результаты исследования статической вольтамперной характеристики многослойной гетероструктуры, при продольном эффекте. Определены комплексные дифференциальные проводимости многослойной гетероструктуры, имеющие N-образную ВАХ, при приложении электрического напряжения вдоль границы разделения слоев. Установлено, что на ВАХ до и после участка отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) реализуется закон Ома. Показано, что диодные структуры при продольном приложении так же обладают участком ОДП на ВАХ, и поэтому могут быть использованы для генерации сверхвысокочастотных колебаний.

Ключевые слова: Диод, вольтамперная характеристика, эффективная масса, сопротивления, ток, напряжения, температура, дифференциальная проводимость.

Abstract

The paper presents the results of a study of the static current-voltage characteristics of a multilayer heterostructure with a longitudinal effect. The complex differential conductivities of a multilayer heterostructure having an N-shaped $I-V$ characteristic are determined by applying voltage along the layer separation boundary. It was established that the Ohm law is implemented on the $I-V$ characteristics before and after the section of negative differential conductivity (NDC). It is shown that diode structures with a longitudinal application also have a portion of the NDC on the $I-V$ characteristics, and therefore can be used to generate microwave frequencies.

Keywords: diode, volt-ampere characteristics, effective mass, resistance, current, voltage, temperature, differential conductivity.

Введение

В качестве физической модели принимали модель Грибникова [1], так как на этой работе впервые предполагается возможности создания диодов из многослойных гетероструктур, имеющих N образную вольтамперную характеристику (ВАХ). Основным требованием считается, что к диоду необходимо приложить электрического напряжения вдоль границы слоев.

Мы установили зависимости плотности тока J от приложенного напряжения E_x . Предполагаем, что к диоду прилагается внешнее электрическое напряжение вдоль границы двух слоев. Мощность этого внешнего электрического поля нагревает электронный газ, повышая их температуру. В результате этого электрон переходит на другой слой, где имеет другую эффективную массу и подвижностей. Эти процессы в конечном итоге должны привести к формированию участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) на прямой ветви ВАХ.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для того, чтобы непосредственно в расчетах рассмотреть влияние внутренних параметров на ВАХ воспользуемся следующими обозначениями.

$$\alpha = d_1 m_1^{3/2} / d_2 m_2^{3/2}, \quad \tau_0 = \tau_1 / \tau_2, \quad t_0 = T_0 / \varepsilon_b, \quad t = T / \varepsilon_b, \quad (1)$$

$$\mu_0 = \frac{\mu_2}{\mu_1}, \quad \mu = \frac{\mu(T)}{\mu_1}, \quad \mu(T) = \frac{\mu_1 + \mu_2 z}{1 + z}, \quad E = \frac{E_x}{E_0}, \quad J = \frac{J_x}{J_0}, \quad d = d_1 + d_2. \quad (2)$$

В указанных обозначениях система уравнений, из которых следует находить ВАХ, состоит из

$$\begin{cases} I = \left[\mu(t - t_0) / \tau \right]^{1/2}, & E = \left[(t - t_0) / \mu \tau \right]^{1/2}, \\ \mu = (1 + \mu_0 z) / (1 + z), & \tau = (1 + z) / (1 + \tau_0 z), \quad z = \alpha \exp(\varepsilon_b / T). \end{cases} \quad (3)$$

Отсюда при относительно малых напряжениях приложенного поля когда еще не происходит разогрев электрона, имеет линейная связь тока I от E

$$I = e N d^2 (\mu_1 + \mu_2) E. \quad (4)$$

А при больших напряжениях, такая зависимость определяется по формуле

$$I = e N d^2 \frac{\mu_1 d_1 m_1^{3/2} + \mu_2 d_2 m_2^{3/2}}{d_1 m_1^{3/2} + d_2 m_2^{3/2}} E. \quad (5)$$

Это означает, что до и после участка отрицательного сопротивления устанавливается закон Ома [1].

Если $\mu_1 = \mu_2$, то ОДС на ВАХ не наблюдается. Числовые значения тока на поворотах точек возрастает, линейным образом, с ростом отношения подвижностей μ_1/μ_2 . При этом напряжение на поворотных точках уменьшается. Отрицательной проводимости оказывает времени релаксации энергии на слоях. Так, например, с ростом τ_1/τ_2 , одновременно возрастает ток и напряжения на поворотных точках. Если $\tau_1 > \tau_2$ отрицательная проводимость не наблюдается (рис. 1а).

Полный ход ВАХ, как мы отметили, сильно зависит от подвижностей в разных слоях. Численное решение системы уравнений (3) тому доказательство рис. 1а,б. Так, например проведенные вычислительные эксперименты при значениях μ_1/μ_2 равна на 5, 10, 15, 20 приведены в виде графика, указанной на рисунке 1б.

Рис.1. а) Влияние на ВАХ диода в зависимости от $t_1 = \tau_1 / \tau_2$ при значениях $t_0 = 0.1, t_2 = 10, \alpha = 0.1$; б) ВАХ диода в зависимости от относительной подвижности при значениях $t_0 = 0.1, t_1 = 10, \alpha = 0.1$.

При разных значениях τ_1/τ_2 : 3, 5, 10, 15 ток и напряжение на поворотных точках возрастает, влияние этой величины на ВАХ приведены на рисунке 1а.

При этом остальные параметры имеют значения: $t_0 = 0.1, t_1 = 10, z_0 = 0.1$. На рисунке 1б. получены вольтамперные характеристики, при этих же значениях, но варьируя t_2 , как 5, 10, 15, 20. К этим значениям относительной подвижности соответствуют кривые - 1, 2, 3, 4 на ВАХ. Влияние на полный ход ВАХ может влиять высота потенциального барьера между слоями. В наших обозначениях $t_0 = T_0 / \varepsilon_b$ характеризует высоту потенциала ε_b , так как при этом T_0 считаем постоянной величиной. Напомним, что T_0 есть температура окружающей среды в энергетических единицах.

На рисунке 2 приведены семейство ВАХ, при различных значениях. $t_0 = T_0 / \varepsilon_b$: 0.05, 0.1, 0.15 при постоянных $t_1 = 10, t_2 = 10, \alpha = 0.1$. Отсюда видно, что с ростом высоты потенциального барьера токи на поворотных точках уменьшается. Уменьшается также падение напряжения на поворотных точках.

При относительно больших высотах потенциального барьера, участка отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) исчезает. Это связано с тем, что температура электронного газа становится недостаточным, чтобы электроны с одного слоя перебросилось на второй, тем самым электрический ток понижается.

В наших расчетных формулах присутствует величина $\alpha = d_1 m_1^{\frac{3}{2}} / d_2 m_2^{\frac{3}{2}}$, который определяется как функции от отношении d_1 / d_2 , m_1 / m_2 , причем d_1 и d_2 характеризует взаимное отношение толщины слоев, а m_1 и m_2 подвижности эффективной массы электронов, в соответствующих слоях. Влияние α на ВАХ приведены на рисунке 3. Причем кривые 1, 2, 3 и 4 соответствует к значениям

α : 0.01, 0.05, 0.1, 0.2 падения ВАХ до первого поворота. Второй поворотная точка при этом заметно уменьшается. А ток на поворотных точках возрастает всегда.

Физическую картину в многослойных $n-n^+$ структурах при продольном приложении электрического напряжения от 0 до V_r' проводимость структуры определяется проводимостью электронов в отдельных слоях, как параллельно соединенные элементы ВАХ законом Ома [2].

Рис. 2. ВАХ диода в зависимости от высоты потенциального барьера.

Рис. 3. ВАХ диода в зависимости от параметра α .

По мере увеличения приложенного напряжения электроны в контактной области разгоняются, набирая при этом скорость. Часть кинетической энергии электронов повышает температуру. При этом эффективная масса будет m_1 и подвижность будет μ_1 . При дальнейшем росте температуры часть электронов перебросится во второй слой, там их эффективная масса теперь будет другой, а именно $m_2 > m_1$. Соответственно уменьшается также подвижность электронов. Тогда потребуются приложение большого напряжения, так как проводимость становится меньше первоначального. Для того, чтобы электрический ток не уменьшался необходимо, чтобы время релаксации энергии τ_2 была больше τ_1 . То есть электроны должны дольше придерживать в себе накопленную энергию. При указанных условиях работы, $n-n^+$ слой обладает участком ОДП. ВАХ имеет N образный характер.

Таким образом, установлено, что ВАХ определяется функциональной зависимостью $J = J(E)$. Дифференциальная проводимость при этом определяется, как первое производное от тока J по напряженности приложенного поля. Напомним, что направление вектора E лежит на поверхности раздела двух слоев. Однако в нашем случае зависимость J от E определена через параметрическую связь, то есть явная функциональная связь в виде $J = J(E)$ у нас отсутствует. Поэтому для расчета дифференциальной проводимости используем другой метод. В математике такой метод называется, как производные через промежуточный аргумент. Так как в теории полупроводников в своей практике впервые используем, поэтому более основательно приведем последовательность расчета.

Возведем в квадрат обе стороны уравнения (3), т.е. имеем. Что

$$I^2 = [\mu(t-t_0) / \tau], \quad (6)$$

$$E^2 = [(t-t_0) / \mu\tau]. \quad (7)$$

Считая, что μ и τ зависят от t берем производную по t (6) и (7).

$$2I \frac{dI}{dt} = \mu / \tau + (t-t_0) \mu' / \tau + (t-t_0) \mu (\tau^{-1})',$$

$$2E \frac{dE}{dt} = (t-t_0) \tau^{-1} \cdot \frac{1}{\mu} - \frac{t-t_0}{\tau} \cdot \frac{\mu'}{\mu^2}.$$

Исключив из этих уравнений dt , после соответствующего преобразования получим, что

$$\frac{I}{E} \cdot \frac{dI}{dE} = \mu^2 \frac{\left[1 + (t-t_0) \mu' / \mu + (t-t_0) (\tau^{-1})' / \tau^{-1} \right]}{\left[1 + (t-t_0) (\tau^{-1})' / \tau^{-1} - (t-t_0) \mu' / \mu \right]}. \quad (8)$$

Дальше определим μ' / μ , $(\tau^{-1})' / \tau^{-1}$. Для этого воспользуемся соотношением (3). Тогда,

$$\mu' = \frac{(\mu_0 - 1)}{(1+z)^2} \cdot z', \quad (\tau^{-1})' = \frac{\tau_0 - 1}{(1+z)^2} \cdot z',$$

где z' есть производное от $z = z_0 e^{1/t}$ по t т.е. $z' = -z / t^2$.

Таким образом, имеем что

$$\mu' / \mu = -\frac{1}{t^2} \cdot \frac{\mu_0 - 1}{1 + \mu_0 z} \cdot \frac{z}{1 + z}, \quad (\tau^{-1})' / (\tau^{-1}) = -\frac{1}{t^2} \cdot \frac{\tau_0 - 1}{1 + \tau_0 z} \cdot \frac{z}{1 + z}.$$

Подставим этих величин в (8), тогда имеем, что

$$\frac{dI}{dE} = \mu^2 \frac{\left[1 - \frac{t-t_0}{t^2} \cdot \frac{z}{1+z} \left(\frac{\mu_0 - 1}{1 + \mu_0 z} + \frac{\tau_0 - 1}{1 + \tau_0 z} \right) \right]}{\left[1 - \frac{t-t_0}{t^2} \cdot \frac{z}{1+z} \left(\frac{\tau_0 - 1}{1 + \tau_0 z} - \frac{\mu_0 - 1}{1 + \mu_0 z} \right) \right]}. \quad (9)$$

Напомним, что плотности тока и напряженности поля нормированы относительно J_0 и E_0 ,

$$J_0 = N(e\varepsilon_b \mu_1 / \tau_1)^{1/2}, \quad E_0 = (\varepsilon_b / e\mu_1 \tau_1)^{1/2}.$$

Тогда отношение J_0 / E_0 , который входит в (9) будет

$$J_0 / E_0 = Ne\mu_1.$$

Это отношение означает эффективную проводимость двух слоев $d = d_1 + d_2$ и $N = n_1 + n_2$, при одинаковых подвижностях электронов μ_1 . Таким образом дифференциальная проводимость рассматриваемой модели определяется формулой

$$\frac{dJ}{dE_x} = Ne\mu_1 \frac{1 + \mu_0 z \left[1 - \frac{t-t_0}{t^2} \cdot \frac{z}{1+z} \left(\frac{\mu_0-1}{1+\mu_0 z} + \frac{\tau_0-1}{1+\tau_0 z} \right) \right]}{1 + z \left[1 - \frac{t-t_0}{t^2} \cdot \frac{z}{1+z} \left(\frac{\tau_0-1}{1+\tau_0 z} + \frac{\mu_0-1}{1+\mu_0 z} \right) \right]} \quad (10)$$

Отсюда видно, что дифференциальная проводимость сильно зависит от технологических параметров. Анализируем дифференциальную проводимость.

Относительно при низких температурах, когда $t = 0, z \rightarrow \infty, \varepsilon_b \rightarrow \infty$, получаем, что

$$\left. \frac{dJ}{dE} \right|_{t \rightarrow 0} = eN\mu_2 \quad (11)$$

Так как, все величины входящие (11) положительны, то получается положительная дифференциальная проводимость, что совпадает предположением Грибникова [1]. Наблюдается закона Ома. В предельном случае, когда $t \rightarrow \infty$, из формулы (10) имеем

$$\left. \frac{dJ}{dE} \right|_{t \rightarrow \infty} = Ne \frac{\mu_1 d_1 m_1^{3/2} + \mu_2 d_2 m_2^{3/2}}{d_1 m_1^{3/2} + d_2 m_2^{3/2}} \quad (12)$$

При этом получается постоянная дифференциальная проводимость. Кроме того, эта величина не зависит от высоты потенциального барьера. Ток от напряженности поля имеет линейную зависимость.

Таким образом, установлено, что на ВАХ до и после участка ОДП имеет место закон Ома.

В работе [3] приведены теоретические исследования эффекта возникновения ОДС в структурах $p-n$ - перехода в сверхвысокочастотном поле. Методом последовательного соединения диодов с ОДП в резонансной цепи можно получить несколько участков ОДП на ВАХ [4]. Как указано выше, диодные структуры при продольном приложении так же обладают участком ОДП на ВАХ, и поэтому могут быть использованы для генерации сверхвысокочастотных колебаний.

1. Грибников З.С. Отрицательная дифференциальная проводимость в многослойной гетероструктуре // ФТП. 1972. Т. 6. В. 7. С. 1380–1382.
2. Отениязов Е., Муратов А.С., Алимбетов К.Е., Турсынбаев С.А. Динамическая характеристика $p-n$ -структуры // «Вестник ККОАН РУз. 2016, №2, С. 10-14.
3. Romanov Yu.A. Negative high-frequency differential conductivity in semiconductor superlattices // Journal of Applied Physics. -2003. vol. 93. - No. 8. -pp. 4696-4703.
4. Боцула О.В., Прохоров Э.Д. Импедансные характеристики совместно работающих диодов с ОДП // Радиофизика и электроника. - Харьков. -2004. - 9, №1. - С. 282-288.

Штыков А.С.

Инновации в области использования низкотемпературной плазмы в промышленности и в социальной сфере (2019-2020 гг.)

*ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
(Россия, Петрозаводск)*

doi: 10.18411/lj-11-2020-42

idsp: ljjournal-11-2020-42

Аннотация

Цель настоящей работы – определить направления разработки инноваций в области использования низкотемпературной плазмы в промышленности и в социальной сфере. В качестве инноваций были рассмотрены технические решения,