

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

© 2016 г. К.Д. БАКЛАНОВА, С.И. ГУДКОВ, М.В. КАМЕНЩИКОВ,
А.В. СОЛНЫШКИН, Д.А. КИСЕЛЕВ*

Тверской государственный университет,

*Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Москва
e-mail: cauchyandtaylor@gmail.com

Введение

Сегнетоэлектрики уже достаточно давно используются для создания пьезоэлектрических, акустических, оптических, пирозлектрических устройств и т.д. Одну из ведущих позиций среди сегнетоэлектрических материалов занимает ниобат лития (LiNbO_3) [1,2]. В последнее время сегнетоэлектрики все чаще применяются в современной электронике в виде пленок [3]. Однако свойства пленочных структур сильно зависят от способа изготовления, материалов электродов и подложки, поэтому поиск оптимального сочетания данных условий, необходимых для каждого из практических применений, остается актуальным по сей день. В данной работе представлен анализ электрофизических характеристик тонкопленочной структуры на основе ниобата лития, нанесенного методом ВЧ магнетронного распыления.

Объекты исследования и методики эксперимента

Исследования производились на тонкопленочной структуре $\text{Cu/LiNbO}_3/\text{Si}$. Данный образец синтезировался в вакуумной технологической камере SUNPLA 40TM (Корея). Процесс синтеза осуществлялся в аргоновой среде при давлении 0,5 Па, а мощность магнетрона при этом составляла 60 Вт. В качестве подложки был выбран кремний ориентации (111), предварительный процесс очищения которого ионной пушкой занял 5 минут. Во время процесса синтеза подложка была смещена относительно зоны распыления, а скорость ее вращения составляла 5 мин^{-1} . Мишенью же являлась пластина ниобата лития Z-среза, которая была закреплена на медном основании. Далее был произведен постростовой отжиг. При этом температура составляла 700°C , а время отжига – 120 минут. Толщина пленки была измерена при помощи эллипсометра $\alpha\text{-SE}^{\text{TM}}$ (J.A.Woollam Co., Inc., США). Ее значение составляет около 200 нм [4,5].

Выполнены исследования кинетики электрического отклика, полученного при освещении образца лазерным излучением, модулированным импульсами прямоугольной формы с частотой от 1 Гц до 20 кГц. В качестве источника излучения использовался лазерный модуль «CLM – 1845 IR – 980» с длиной волны излучения 980 нм и мощностью 220 мВт. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и диэлектрический отклик были получены при помощи измерителя иммитанса E7-20. Напряжение, приложенное к пленке, считаются положительными, если к верхнему электроду пленки приложен положительный потенциал, и отрицательными при обратной полярности напряжения.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Поскольку LiNbO_3 является сегнетоэлектриком, была предпринята попытка обнаружить пирозлектрические свойства у исследуемых «девственных» пленок. Измерения были выполнены динамическим методом. Однако измерения показали, что наблюдаемый отклик имеет непирозлектрическую природу. Предполагаемые пиро-

электрические токи должны быть по порядку величины меньше наблюдаемых, по крайней мере, в 100 раз. Поэтому в работе была исследована кинетика данного электрического отклика (рис. 1). Как видно из представленной осциллограммы, электрический отклик в момент освещения образца демонстрирует резкое увеличение с дальнейшей релаксацией до установившегося значения, то есть состоит из нестационарной и стационарной составляющих. Сигнал типа «полки» свидетельствует о наличии фотопроводимости в исследуемых структурах. Был измерен фототок короткого замыкания при непрерывном освещении, величина которого составила порядка $0,15 \cdot 10^{-7}$ А.

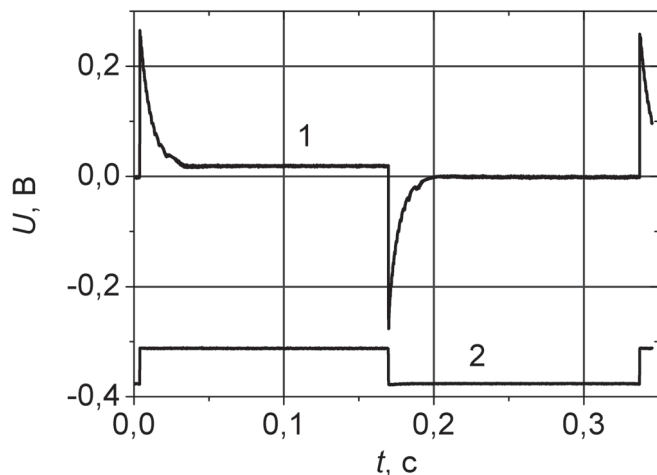


Рис. 1. Кинетика электрического отклика структуры тонкопленочной структуры Cu/LNO/Si (1) и светового сигнала (2). Частота модулируемого сигнала – 3 Гц, длина волны – 980 нм, мощность – 220 мВт.

Получены вольт-амперные характеристики исследуемых структур. На рис. 2 представлены ВАХ гетероструктуры Cu/LiNbO₃/Si в линейном и полулогарифмическом масштабах.

Как видно из данных графиков, ВАХ структуры в целом носит диодный характер. На вольт-амперной характеристике, представленной в полулогарифмическом масштабе, имеется несколько участков, что может обозначать наличие нескольких механизмов проводимости у данной структуры. В интервале полей от -0,5 до 0,5 В ВАХ является в определенной степени линейной, что свидетельствует о доминировании омического механизма проводимости. По начальному участку вольт-амперной характеристики определена удельная электропроводность структуры, которая составила $(8,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹·м⁻¹. В интервале приложенного напряжения от 0,5 до 5 и -2 до -5 В наиболее вероятным механизмом электропроводности являются токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ). Известно [6], что эти токи описываются квадратичным законом Мотта:

По начальному участку вольт-амперной характеристики определена удельная электропроводность структуры, которая составила $(8,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹·м⁻¹. В интервале приложенного напряжения от 0,5 до 5 и -2 до -5 В наиболее вероятным механизмом электропроводности являются токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ). Известно [6], что эти токи описываются квадратичным законом Мотта:

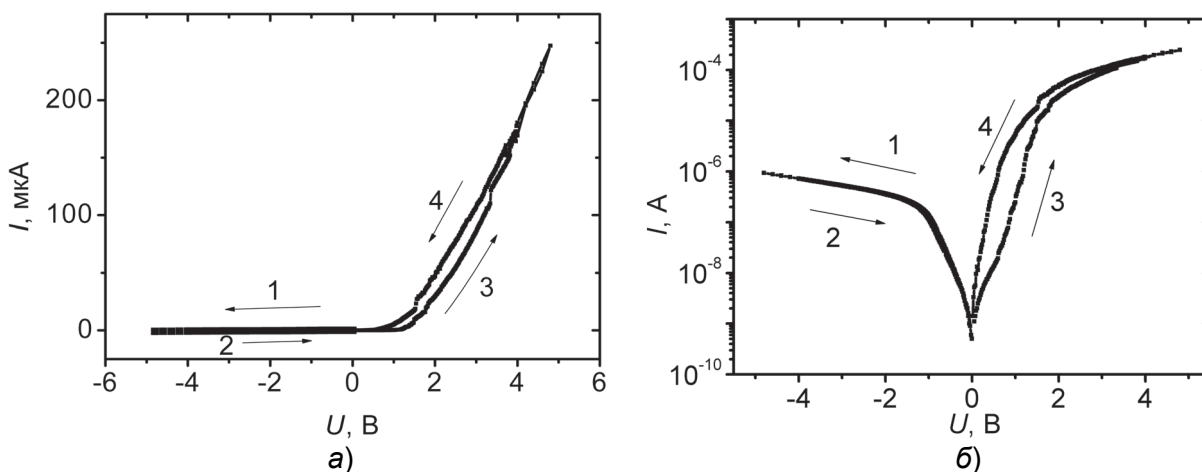


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики пленочной структуры Cu/LiNbO₃/Si в линейном (а) и полулогарифмическом (б) масштабах.

$$j = \frac{9}{8} \tau_{\mu} \sigma_0 \mu \frac{U^2}{L^3}, \quad (1)$$

где j – плотность тока, τ_{μ} – максвелловское время релаксации, σ_0 – электропроводность в глубине материала в отсутствие инжекции, μ – подвижность носителей заряда, L – толщина образца. Область приложенного напряжения от $-0,5$ до -2 В является переходной областью, где выявить превалирующий механизм электропроводности в настоящее время не удалось.

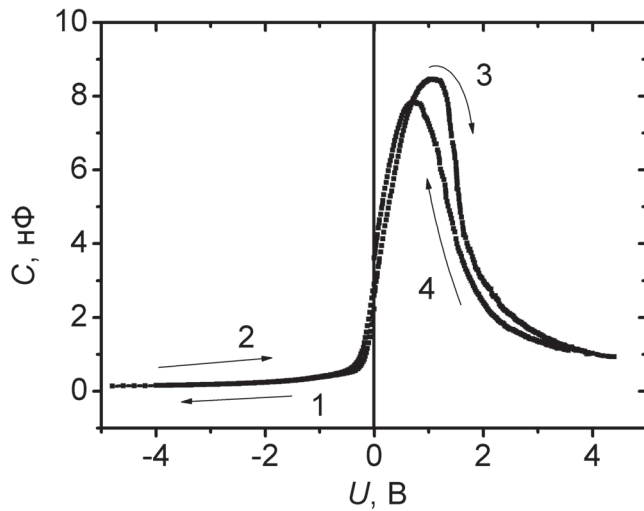


Рис. 3. Вольт-фарадная характеристика гетероструктуры Cu/LiNbO₃/Si.

Проведено исследование диэлектрического отклика структуры Cu/LiNbO₃/Si. На рис. 3 приведена вольт-фарадная характеристика образца. Как видно из данного графика, в случае отрицательного напряжения прямой и обратный ход ВФХ совпадают. Данному положению на графике соответствуют участок 1-2. Легко заметить, что на этом участке изменение емкости относительно не велико (изменяется от 500 до 140 пФ) при напряжении $U < -0,5$ В. При напряжении от $-0,5$ до 1 В наблюдается сильный рост величины емкости, заканчивающийся максимумом при $U \approx 1$ В. Такое поведение, по-видимому, связано с наличием барьерных эффектов на границе раздела сегнетоэлектрик-полупроводник, и изменением барьерной емкости образца.

Получены частотные зависимости диэлектрических характеристик исследуемых структур. График $C(f)$, представленный на рис. 4, а, показывает резкое уменьшение значений емкости при частоте измерительного сигнала от 25 до $\sim 10^3$ Гц, а при больших значениях частоты величина емкости изменяется незначительно. Следует отметить, что величин емкости при частотах 25 Гц и 1 МГц отличаются почти на два порядка и равны 11,47 и 0,17 нФ, соответственно.

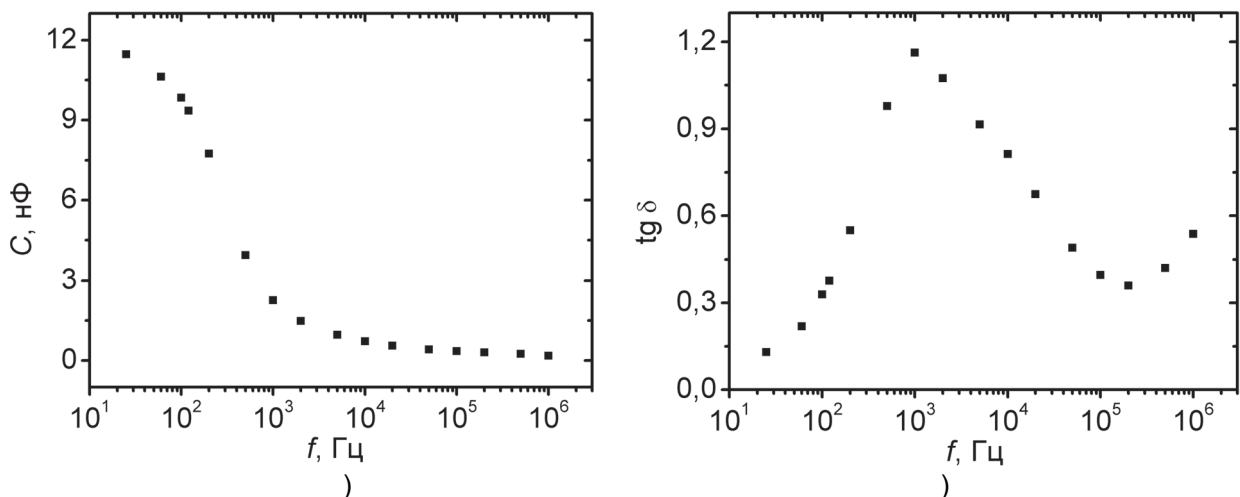


Рис. 4. Зависимость емкости () и тангенса угла диэлектрических потерь () от частоты в полуло Cu/LiNbO₃/Si.

График $\text{tg}\delta(f)$, приведенный на рис. 4, б, при частоте измерительного сигнала $\sim 10^3$ Гц демонстрирует максимум, который, по-видимому, обусловлен вкладом барьера, возникающего на интерфейсе сегнетоэлектрик-полупроводник, в диэлектрический отклик.

Зависимость проводимости по переменному полю от частоты измерительного сигнала (рис. 5) обнаруживает три характерных практически линейных участка. Следует отметить, что переход от первого ко второму участку наблюдается в области частот соответствующей максимуму $\text{tg}\delta(f)$ зависимости.

Заключение

В работе выполнено исследование электрофизических характеристик гетероструктуры $\text{Cu}/\text{LiNbO}_3/\text{Si}$, содержащей сегнетоэлектрический слой ниобата лития, при приложении как постоянного, так и переменного электрического поля. На основе ВАХ были выявлены основные механизмы электропроводности: омический – при приложении к структуре электрического напряжения, не превышающего 0,5 В, а также токи, ограниченные пространственным зарядом в интервалах напряжения от 0,5 до 5 и –2 до –5 В. По начальному участку ВАХ определена удельная электропроводность структуры в малых полях $((8,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$. При воздействии модулированного лазерного излучения с длиной волны 980 нм установлено, что основной отклик имеет фотовольтаическую природу. Определена величина фототока короткого замыкания при непрерывном освещении образца $(0,15 \cdot 10^{-7} \text{ А})$. Исследованы диэлектрические характеристики гетероструктуры $\text{Cu}/\text{LiNbO}_3/\text{Si}$, которые свидетельствуют о наличии барьерных эффектов на границе раздела сегнетоэлектрик-полупроводник.

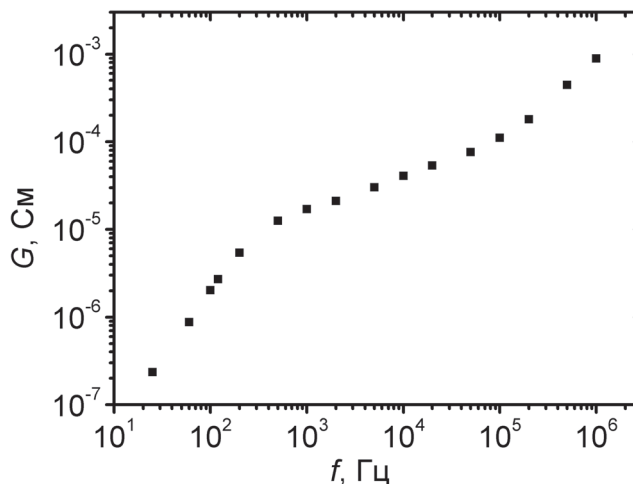


Рис. 5. Частотная зависимость проводимости в логарифмическом масштабе для гетероструктуры $\text{Cu}/\text{LiNbO}_3/\text{Si}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00420 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 264 с.
2. Сидоров Н.В., Волк Т.Р., Маерин Б.Н., Калинин В.Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. – М.: Наука, 2003. 255 с.
3. Scott J.F. Application of modern ferroelectrics // Science. – 2007, v. 315, p. 954-959.
4. Киселев Д.А., Жуков Р.Н., Быков А.С., Воронова М.И., Щербачев К.Д., Малинкович М.Д., Пархоменко Ю.Н. Влияние отжига на структуру и фазовый состав тонких электрооптических пленок ниобата лития // Неорг. Материалы. – 2014, т. 50, № 4, с. 453-456.
5. Кубасов И.В., Кислюк А.М., Быков А.С., Малинкович М.Д., Жуков Р.Н., Киселев Д.А., Ксенич С.В., Темиров А.А., Тимушкин Н.Г., Пархоменко Ю.Н. Бидоменные структуры, сформированные в монокристаллах ниобата лития и танталата лития методом фотонного отжига // Кристаллография. – 2016, т. 61, № 2, с. 256-261.
6. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990. 672 с.