

**А.И. Дедык¹, А.А. Семенов¹, Ю.В. Павлова¹, П.Ю. Белявский¹,
А.А. Никитин¹, О.В. Пахомов², И.Л. Мыльников¹**

¹ ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

² ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский национальный исследовательский
университет информационных технологий, механики и оптики

Фотоэлектрические свойства титаната стронция

Представлены результаты исследования влияния освещения в УФ и видимом диапазонах на диэлектрические свойства МДМ -структур на основе монокристаллического титаната стронция. Обнаружен устойчивый эффект возрастания ёмкости структур при воздействии света из области собственного поглощения при низких температурах. Обсуждаются возможные механизмы явления.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, диэлектрическая проницаемость, фототок

Титанат стронция является предметом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований. Высокие значения диэлектрической проницаемости и ее сильная зависимость от температуры и электрического поля [1-3] приводят к необычным механизмам переноса зарядов [4-6]. Легированием и восстановлением можно регулировать электронные свойства SrTiO₃ от диэлектрических до полупроводниковых, металлических и даже сверхпроводящих [7-9]. Имеются отдельные данные по фотоэлектрическим свойствам этого материала [10,11], однако влияние неравновесных носителей заряда на диэлектрические свойства SrTiO₃ изучены мало.

Задачей данной работы являлось экспериментальное исследование влияния облучения монокристаллического титаната стронция в УФ и видимой областях спектра на диэлектрическую нелинейность.

Исследования проводились на монокристаллах SrTiO₃, выращенных по методу Вернейля с ориентацией (110). Концентрация примесей составляла (вес.%): Fe – 0,005; Cr, Co, Ni, Al, Cd, Mg, Ba, Si – по 0,001; Mn, Pb – 0,0001. Исследуемые образцы вырезались из буль монокристаллов SrTiO₃ в форме параллелепипедов с размерами 5x5x0,2 мм³ и механически полировались по 14 классу. Полупрозрачные электроды из Ni и Au диаметром 4 мм наносились методом термического испарения в вакууме. Образцы помещались в оптический криостат, который заполнялся либо жидким гелием, либо жидким азотом. Измерения ёмкости (ВФХ) проводились на частоте 1 кГц. Облучение проводилось квазимонохроматическим светом в УФ и видимом диапазонах. Предварительно были измерены спектры пропускания образцов SrTiO₃ (рис.1), по которым можно судить, что диапазон длин волн от 370 нм (3,35 эВ) до 380 нм (3,27 эВ) соответствует ширине запрещенной зоны титаната стронция, которая по данным [12] составляет 3,25 эВ при T= 300К и 3,29 эВ при T = 78К.

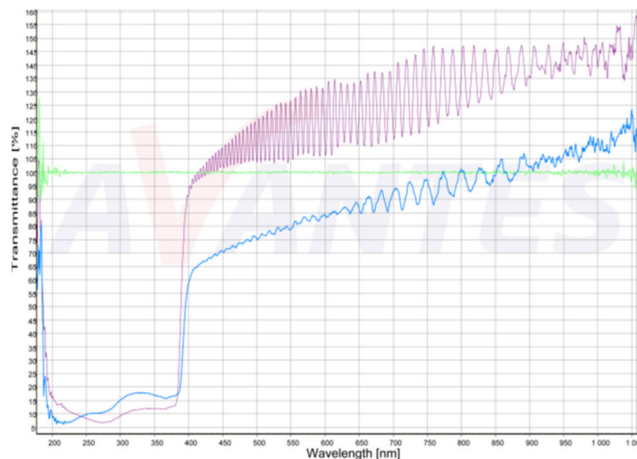


Рисунок 1

При исследовании влияния освещения на ВФХ обнаружен фотодиэлектрический эффект в титанате стронция, который заключается в изменении ёмкости структуры $\text{Me} / \text{SrTiO}_3 / \text{Me}$ (МДМ-структуры) под действием света. Эффект наблюдался как для структур $\text{Ni} / \text{SrTiO}_3 / \text{Ni}$ так и для структур $\text{Au} / \text{SrTiO}_3 / \text{Au}$.

Рис.2 иллюстрирует влияние неравновесных носителей, созданных освещением, на диэлектрический гистерезис и на нелинейные свойства исследованных МДМ-структур. Кривая 1 снята в отсутствии освещения и характеризовалась гистерезисом, типичным для МДМ-структур из титаната стронция при $T = 4,2 \text{ K}$. Кривая 2 получена после воздействия на

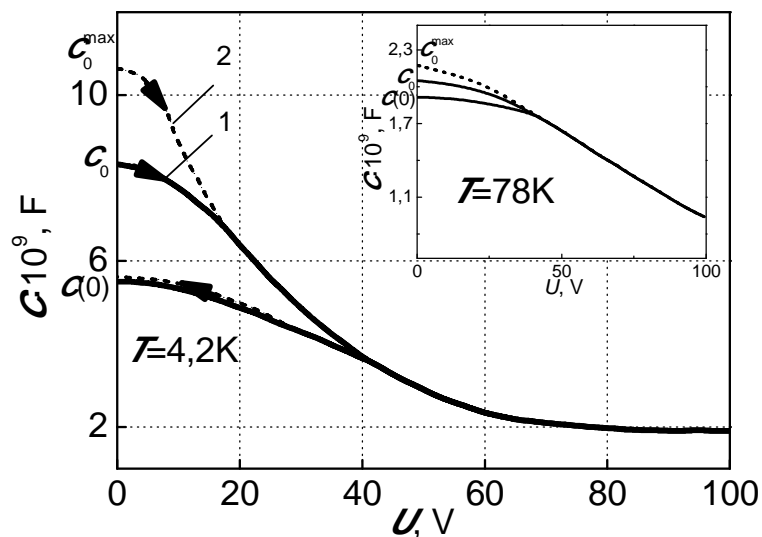


Рисунок 2

образец света с длиной волны $\lambda = 372 \text{ nm}$. В результате освещения УФ гистерезис разрушался и возрастала крутизна зависимости $C(U)$ на начальном участке. Максимальное увеличение ёмкости под действием освещения для различных образцов составляло (15 – 30)% от начального значения темновой ёмкости C_0 . После воздействия напряжения смещения значение $C(0)$ возвращалось к тому же, которое демонстрировала ВФХ до

воздействия света (кривая 1). Исследования, выполненные на тех же образцах при $T = 78$ К показали, что фотоэлектрический эффект при этой температуре также наблюдается, однако выражен слабее во столько же раз, во сколько раз при 78 К уменьшается нелинейность SrTiO_3 (см. врезку на рис.2). При комнатной температуре максимальное возрастание ёмкости под действием освещения составляло 0,6%.

Эффект увеличения ёмкости и разрушения гистерезиса наблюдался в УФ области спектра в диапазоне длин волн $\lambda = 290 - 436$ нм. Величина эффекта во всем диапазоне длин волн при $\lambda < 436$ нм была одинаковой. Отличие заключалось в скорости возрастания ёмкости при воздействии облучения.

На рис.2 представлены временные зависимости ёмкости исследованных образцов при 4,2 К в отсутствие постоянного напряжения смещения при облучении светом с длиной волны $\lambda = 436$ нм и различной интенсивностью. Кривые 1,2,3,4 получены при облучении светом с интенсивностями ($\text{Вт}/\text{м}^2$): $P_1 = 1,04$; $P_2 = 1,0 \cdot 10^{-1}$; $P_3 = 5 \cdot 10^{-2}$; $P_4 = 2,7 \cdot 10^{-2}$. Аналогичные кривые были получены при облучении светом с более короткими длинами волн. Момент времени t_1 соответствует включению, а момент времени t_2 – выключению света. После освещения темновое значение ёмкости C_0 увеличивалось на 30 %. Выключение света ($t > t_2$) практически не изменяло значение возросшей при освещении ёмкости C_0^{max} . Это значение сохранялось в течение суток и более без изменений.

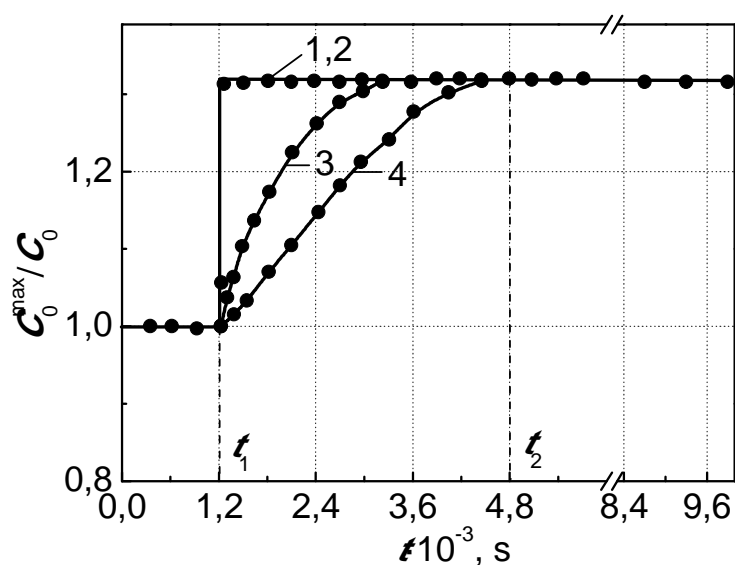


Рисунок 3

Тангенс угла диэлектрических потерь до освещения для большинства образцов составлял $\tan \delta = 10^{-3}$, при освещении потери возрастали до $\tan \delta = 10^{-1}$, при выключении света тангенс дельта снижался до первоначального уровня.

При $T = 4,2$ К проводились также измерения фотопроводимости и фототоков короткого замыкания. Максимумы на спектральной зависимости изменения ёмкости и на спектральной зависимости фотопроводимости совпадали и наблюдались при $\lambda = 372$ нм ($h\nu = 3,32$ эВ). Образцы освещались через полупрозрачные электроды. На зависимостях

фототоков короткого замыкания ($I_{к.з.})^{1/2}$ от энергии фотонов $h\nu$ (рис.4) наблюдались линейные участки, свидетельствующие о наличии барьера[10] Высота барьера для исследованных образцов составляла $\sim 2,1$ эВ независимо от использования в качестве электродов Ni или Au. По-

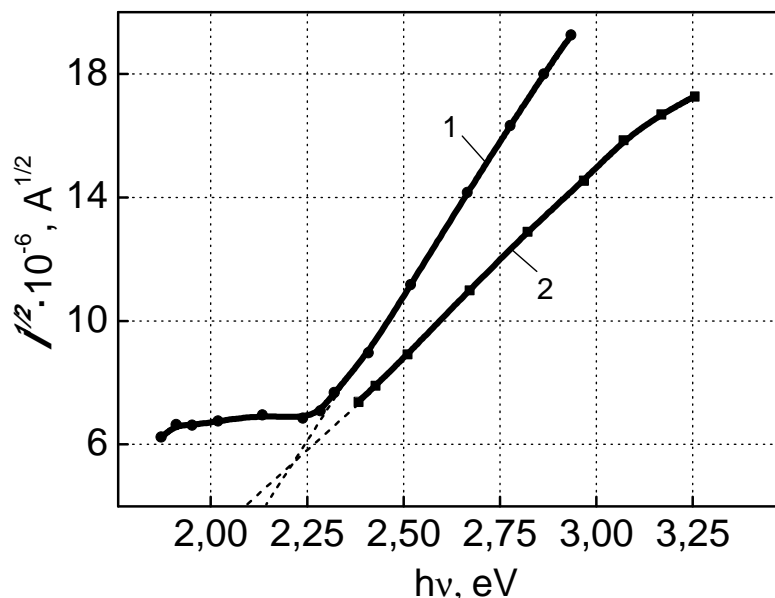


Рисунок 4.

видимому, наличие барьера определяется поверхностными состояниями. Наличие фототока короткого замыкания позволяет сделать вывод о существовании в образцах, несмотря на параэлектрическое состояние $SrTiO_3$, внутреннего поля, в котором происходит дрейф неравновесных носителей заряда в объёме кристалла. Причиной, вызывающей внутреннее поле, может являться заряд, возникающий на границе раздела с металлом. Оценка внутреннего поля для исследованных образцов даёт значение $\sim 10^4$ В/м.

Фотодиэлектрический эффект (ФДЭ) в титанате бария [13] связывают с наличием доменов в сегнетоэлектрике, тогда как $SrTiO_3$ является параэлектриком. ФДЭ в ZnO , ZnS , CdS [10] связывают с тем, что в результате возникновения фотопроводимости в некоторых частях неоднородных образцов уменьшается эффективное расстояние между пластинами конденсатора, что увеличивает ёмкость и эквивалентно увеличению диэлектрической проницаемости. В нашем случае нельзя объяснить ФДЭ обычной фотопроводимостью, т.к. ростом интенсивности света: 1) фототок линейно возрастал с ростом интенсивности света, а изменения C_0 при увеличении интенсивности света достигали насыщения; 2) изменения C_0 , которые произошли под действием освещения, сохранялись и после длительного пребывания образцов в темноте (рис. 3)

Возможно наблюдаемый эффект возникает в результате действительного изменения диэлектрической постоянной вещества, вызываемого присутствием в возбуждённом образце большого числа поляризованных центров, которые представляют собой ловушки со слабо связанными электронами. Подтверждением этой гипотезы может быть

исследование роли вакансий титана и кислорода и комплексов этих вакансий, предпринятое в [14] в связи с обнаруженной недавно устойчивой фотопроводимостью в титанате стронция при комнатной температуре.

Библиографический список

1. Смоленский Г.А., Боков В.А., Исупов В.А. и др. Физика сегнетоэлектрических явлений – Л.: Наука. – 1985. – С.396.
2. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. Вендика О.Г.// - Москва: Сов. Радио. – 1979. – С.272.
3. Hemberger J. Electric-field-dependent dielectric constant and nonlinear susceptibility in SrTiO₃ / Hemberger J., Lunkenheimer P., Viana R., Boehmer R, Loidl A.// - Phys.Rev. – 1995. – Vol. B52, pp.13159 – 13162.
4. Дедык А.И. Электропроводность высокоомных монокристаллов титаната стронция в интервале 150 – 400 К/ Дедык А.И., Прудан А.М., Тер-Мартirosян Л.Т.// - ФТТ. – 1985. - Т.27. – Вып.6. – С.1615 – 1619.
5. Spinelli A. Electronic transport in doped SrTiO₃: Conduction mechanisms and potential applications / Spinelli A., Torija M.A., Liu C., Jan C., Leighton C.// - Phys. Rev. – 2010. – Vol. B 81. – pp.155110-1 – 155110 - 14.
6. Son J. Epitaxial SrTiO₃ films with electron mobilities exceeding 30,000 cm² V⁻¹ s⁻¹ / Son J., Moetakef P., Jalan B., Bierwagen O., Wright N.J., Engel-Herbert R., Stemmer S.// - Nat. Mater. – 2010. – Vol.9. – pp.482 – 484.
7. Schooley J.F. Superconductivity in Semiconducting SrTiO₃ / Schooley J.F., Hosler W.R., Cohen M.L. // - Phys. Rev. Lett. – 1964. – Vol.12. - № 17. – pp.474 – 475.
8. Frederikse H. P. R. Electronic Transport in Strontium Titanate/ Frederikse H. P. R., Thurber W. R., and Hosler W. R. // - Phys. Rev. - 1964 - Vol. 134 - , pp. A442- A445.
9. Tufte O.N. and Chapman P.W. Electron Mobility in Semiconducting Strontium Titanate. / Tufte O.N. and Chapman P.W. // - Phys. Rev. – 1967. – Vol.155. - pp. 796-802.
10. Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики – полупроводники. – Москва: Наука. – 1976 – С.408.
11. Козырев А.Б. Влияние ультрафиолетового излучения на процессы «медленной» релаксации в сегнетоэлектрических конденсаторах. / Козырев А.Б., Алтынников А.Г., Гагарин А.Г., Гайдуков М.М.// - Письма в ЖТФ. – 2011. – Т.37. – Вып.12. – С.1 – 6.
12. Van Benthem K. Bulk electronic structure of SrTiO₃: Experiment and theory. / Van Benthem K., Elsässe C., and French R.H. // - J. Appl. Phys. - 2001 - Vol. 90. - pp. 6156-6164.
13. Раевский И.П. Фотосегнетоэлектрические явления в области сегнето- и антисегнетоэлектрических фазовых переходов в монокристаллах окислов со структурой типа перовскита. / Раевский И.П., Боков А.А., Попов Ю.М. и др.// - в кн.: Кристаллизация и свойства кристаллов: Межвуз. Сб. – Новочеркасск. – 1979. – вып.6 – с.73 – 78.
14. Tarun Marianne C. Persistent Photoconductivity in Strontium Titanate. / Tarun Marianne C., Selim Farida A., and Matthew D. McCluskey// - Phys.Rev.Lett. – 2013. – Vol. 111. – pp.187403-1 – 187403-5.