

03:07

## **Влияние напряжения на чувствительность нанокристаллического оксида индия к диоксиду азота в условиях ультрафиолетовой подсветки**

© А.С. Ильин<sup>1</sup>, Н.П. Фантина<sup>1</sup>, М.Н. Мартышов<sup>1</sup>, П.А. Форш<sup>1,2</sup>,  
А.С. Воронцов<sup>1</sup>, М.Н. Румянцева<sup>1</sup>, А.М. Гаськов<sup>1</sup>,  
П.К. Кашкаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
Москва

E-mail: as.ilin@physics.msu.ru

Поступило в Редакцию 15 августа 2014 г.

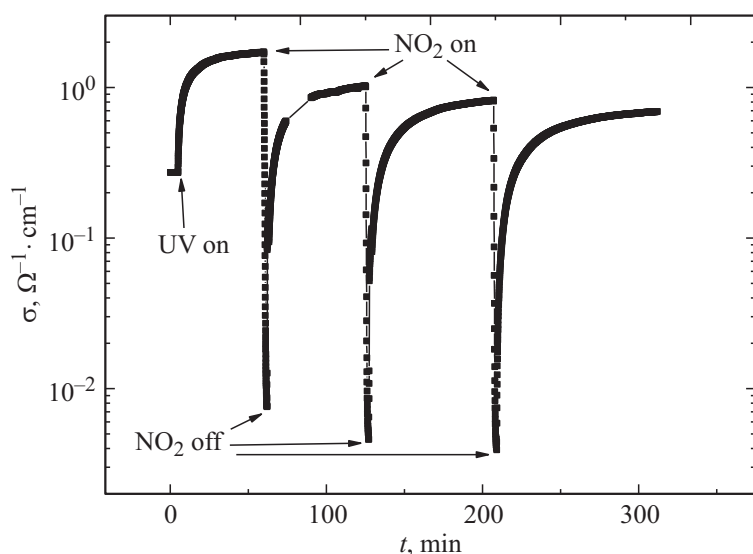
Изучено влияние приложенного напряжения на чувствительность нанокристаллического оксида индия к диоксиду азота в условиях ультрафиолетового освещения при комнатной температуре. Обнаружено увеличение чувствительности нанокристаллического оксида индия к диоксиду азота с повышением приложенного напряжения. Предположено, что наблюдаемый эффект может объясняться влиянием приложенного напряжения на существующий на поверхности образца изгиб энергетических зон.

Оксид индия ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) в настоящее время используется в качестве чувствительного слоя резистивных сенсоров для детектирования диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) в атмосфере. Существующие газовые сенсоры резистивного типа в основном работают при повышенных температурах (от 150 до 500° [1]). Однако необходимость использования нагревательных элементов значительно увеличивает энергопотребление сенсоров и является проблемой при их миниатюризации и встраивании в мобильные устройства. Для ускорения процессов адсорбции и десорбции детектируемых газов вместо нагрева можно использовать ультрафиолетовое излучение, уменьшая при этом рабочую температуру сенсора вплоть до комнатной [1]. Но при замене нагревательного элемента на светодиод, освещающий поверхность чувствительного слоя сенсора, остается проблема с сохранением высокой чувствительности

сенсора к детектируемому газу и достижения достаточно быстрых времен реакции и восстановления сенсора. Улучшить данные характеристики можно посредством добавления примесей к чувствительному слою [2,3] или структурирования сенсорного слоя [4,5]. Также на чувствительность сенсора могут влиять длина волны и интенсивность падающего ультрафиолетового освещения [6]. Однако на данный момент нет экспериментальных работ, изучающих влияние приложенного к сенсору электрического напряжения на сенсорные характеристики. Следует отметить, что уменьшение приложенного напряжения может быть эффективным методом снижения энергопотребления всего сенсора. Кроме того, изучение влияния напряжения на чувствительность  $\text{In}_2\text{O}_3$  к  $\text{NO}_2$  вызывает интерес с точки зрения исследования фундаментальных процессов фотоадсорбции и фотодесорбции активных молекул в нанокристаллических полупроводниковых материалах. В данной работе проведены исследования по влиянию адсорбции  $\text{NO}_2$  на проводимость нанокристаллического оксида индия в условиях ультрафиолетового освещения при различных поданных на  $\text{In}_2\text{O}_3$  напряжениях.

Синтез нанокристаллических образцов  $\text{In}_2\text{O}_3$  проводился золь-гель методом. После высушивания геля образцы отжигались в печи при температуре  $300^\circ\text{C}$ . Детальное описание получения образцов, их структурных и электрических свойств было представлено в статьях [7,8].

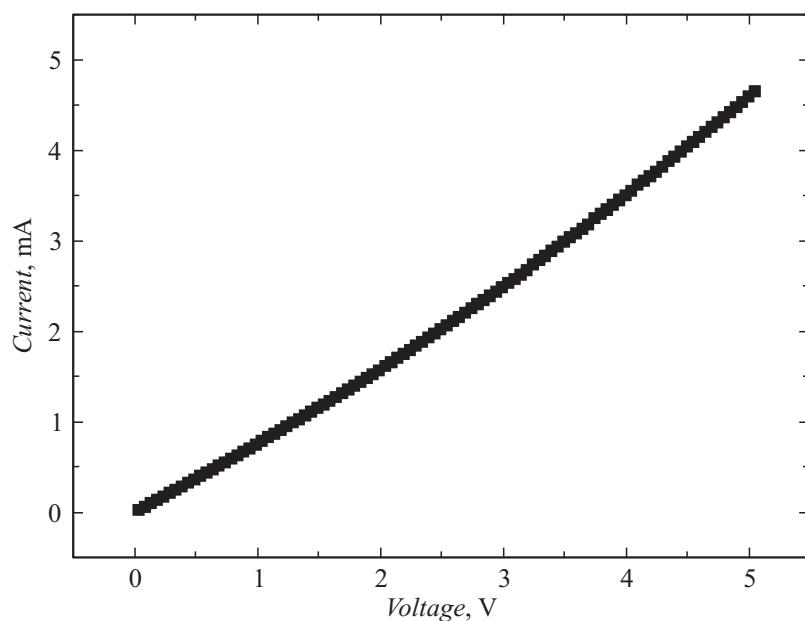
Для проведения измерений образцы помещались в азотный криостат, позволяющий изменять температуру образца в широком диапазоне. Атмосфера с необходимым содержанием диоксида азота в криостате создавалась с помощью продувной системы на основе контроллеров Bronkhorst High-Tech. Сухой воздух, создаваемый генератором ГЧВ-1.2-3, смешивался с диоксидом азота в заданной пропорции и поступал на вход в криостат. Измерения проводились в атмосфере сухого воздуха, а также в атмосфере сухого воздуха с содержанием диоксида азота в концентрации 8 ppm. Через оптическое окно криостата образец освещался ультрафиолетовым светом с длиной волны 385 nm и интенсивностью  $5 \text{ mW/cm}^2$  с помощью светодиода. Проводимость образца измерялась пикоамперметром Keithley 6487. Напряжение, подаваемое на образец, менялось с помощью источника, встроенного в пикоамперметр. Перед экспериментами образцы отжигались при температуре  $180^\circ\text{C}$  для очистки от нежелательных адсорбентов и стабилизации проводимости. Непосредственно во время экспериментов температура образцов находилась на уровне комнатной.



**Рис. 1.** Изменение проводимости  $\text{In}_2\text{O}_3$  в результате напуска  $\text{NO}_2$  при напряжении на образце 50 mV.

На рис. 1 показано изменение проводимости образца нанокристаллического  $\text{In}_2\text{O}_3$  при периодическом добавлении в атмосферу сухого воздуха молекул  $\text{NO}_2$  в концентрации 8 ppm. Измерения были выполнены при напряжении на образце 50 mV. Моменты времени, в которые производились напуск диоксида азота и его отключения, показаны на рисунке. Как видно из рисунка, при включении светодиода проводимость образца резко возрастает и в течение 1 h значение проводимости постепенно выходит на насыщение. После напуска молекул  $\text{NO}_2$  в течение 2 min проводимость резко падает и за 30 s изменяется более чем на порядок. После этого при продувании сухим воздухом под действием ультрафиолетового излучения происходит десорбция молекул  $\text{NO}_2$  и проводимость практически возвращается к своему первоначальному значению.

Аналогичные изменения проводимости  $\text{In}_2\text{O}_3$  при освещении в результате напуска  $\text{NO}_2$  наблюдаются и при других использованных напряжениях (от 0.05 до 5 V). Эксперименты, проведенные при раз-



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика пленок  $\text{In}_2\text{O}_3$ , измеренная при УФ-подсветке.

личных напряжениях, показали, что чувствительность  $\text{In}_2\text{O}_3$  возрастает с увеличением напряжения. Однако зависимость является достаточно слабой: увеличение напряжения на два порядка приводит лишь к незначительному возрастанию (на несколько процентов) чувствительности  $\text{In}_2\text{O}_3$  к  $\text{NO}_2$ .

В настоящее время, насколько нам известно, в литературе отсутствуют экспериментальные результаты, свидетельствующие о влиянии приложенного напряжения на чувствительность оксида индия к различным газам, однако есть теоретические предположения о возможности влияния напряжения на чувствительность сенсора резистивного типа [9]. Предполагается, что изменение напряжения приводит к изменению изгиба зон вблизи поверхности пленки, что в свою очередь может изменять чувствительность материала. В нашем случае изгиб зон может существовать не только на поверхности полупроводника, но и на

контакте полупроводника с золотыми электродами. Об этом может свидетельствовать слабая нелинейность вольт-амперной характеристики наших образцов, измеренная при освещении (рис. 2).

Чувствительность нанокристаллического оксида индия к диоксиду азота может в значительной степени определяться концентрацией дефектов на поверхности полупроводника и/или у перехода полупроводник–металл, на которые адсорбируются молекулы диоксида азота, а также их зарядовым состоянием. При приложении электрического напряжения осуществляется перезарядка дефектов, вследствие чего чувствительность к детектируемому газу может изменяться.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что есть определенный эффект влияния величины напряжения, приложенного к нанокристаллическому оксиду индия, на его чувствительность к диоксиду азота в условиях ультрафиолетовой подсветки. При уменьшении напряжения чувствительность монотонно уменьшается, однако ее уменьшение невелико. Это дает возможность снижения энергопотребления сенсора за счет уменьшения подаваемого на активный слой напряжения с несущественными потерями в чувствительности к детектируемому газу. С другой стороны, обнаружение влияния напряжения на сенсорные свойства полупроводника открывает перспективы прояснения механизмов, по которым происходят фотодесорбция и фотоадсорбция молекул.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ для ведущих научных школ (НШ-3461.2014.2).

## Список литературы

- [1] *Eranna G., Joshi B.C., Runthala D.P., Gupta R.P.* // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2004. V. 29. P. 111–188.
- [2] *Zhao J., Yang T., Liu Y., Wang Z., Li X., Sun Y., Du Y., Li Y., Lu G.* // Sensors and Actuators B: Chemical. 2014. V. 191. P. 806–812.
- [3] *Gurlo A., Barsan N., Ivanovskaya M., Weimar U., Gopel W.* // Sensors and Actuators B. 1998. V. 47. P. 92–99.
- [4] *Suchea M., Katsarakis N., Christoulakis S., Nikolopoulou S., Kiriakidis G.* // Sensors and Actuators B: Chemical. 2006. V. 118. P. 135–141.
- [5] *Wang C., Becker R., Passow T., Pletschen W., Kuhler K., Cimalla V., Ambacher O.* // Sensors and Actuators. B. 2011. V. 152. P. 235–240.

- [6] Prades J., Jimenez-Diaz R., Hernandez-Ramirez F., Barth S., Cirera A., Romano-Rodriguez A., Mathur S., Morante J. // *Sensors and Actuators. B: Chemical*. 2009. V. 140. P. 337–341.
- [7] Forsh E.A., Marikutsa A.V., Martyshov M.N., Forsh P.A., Rummyantseva M. N., Gaskov A.M., Kashkarov P.K. // *Thin Solid Films*. 2002. V. 558. P. 320–325.
- [8] Martyshov M.N., Forsh E.A., Marikutsa A.V., Forsh P.A., Rummyantseva M.N., Gaskov A.M., Kashkarov P.K. // *J. Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2011. V. 6. N 4. P. 452–455.
- [9] Бару В.Г., Волькенштейн Ф.Ф. Влияние облучения на поверхностные свойства полупроводников. М.: Наука, 1978. 288 с.