

## Особенности вольт-фарадных характеристик МДП-структуры $\text{Cu-SiO}_2-p\text{-InSb}$

© Р.А. Алиев<sup>1</sup>, Г.М. Гаджиев<sup>1</sup>, М.М. Гаджиалиев<sup>1</sup>, А.М. Исмаилов<sup>1,2</sup>, З.Ш. Пирмагомедов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, 367003 Махачкала, Россия

<sup>2</sup> Дагестанский государственный университет, 367003, Махачкала, Россия

E-mail: hadzhyGM@mail.ru

(Получена 25 февраля 2016 г. Принята к печати 25 мая 2016 г.)

Измерены вольт-фарадные характеристики и проводимость МДП-структур на основе InSb при разных частотах измерительного сигнала с целью изучения влияния условий технологического синтеза на емкостные свойства данных структур. Обсуждается влияние положительного, встроенного в диэлектрик, заряда на измеренные характеристики образца, которое проявляется в виде резкого „переключения“ емкости при смене полярности слабополевого внешнего воздействия ( $E < 10^6$  В/см).

DOI: 10.21883/FTP.2017.03.44212.8220

### 1. Введение

Для области спектра (2–5 мкм) наиболее подходящим полупроводниковым материалом для изготовления МДП-фотоприемных устройств является антимонид индия [1]. Недостатком этих устройств является необходимость их охлаждения до температуры жидкого азота для нормального режима работы [2]. Стабильность и надежность длительно функционирующих МДП-приборов зависят от таких важных характеристик как заряд окисла и плотность поверхностных состояний [3,4]. Эти характеристики в свою очередь очень сильно зависят от природы диэлектрика и технологических приемов его нанесения на полупроводник при изготовлении МДП-структур [5–7].

Самым простым и прямым методом определения качества МДП-элементов является исследование их вольт-фарадных характеристик (ВФХ). На вид ВФХ МДП-структур на основе InSb существенное влияние оказывают встроенный в диэлектрик (на стадии его технологического роста) заряд и его изменение в процессе внешнеполевого воздействия на структуру [8]. Причем этот вид может отличаться от образца к образцу даже для образцов из одной технологической серии, что, в большинстве случаев, обусловлено качеством поверхности полупроводника. Поэтому выяснение физических механизмов накопления заряда в диэлектрике МДП-устройств под действием внешнего электрического поля все еще остается важной задачей физики поверхности полупроводников.

В данной работе наблюдалось скачкообразное изменение емкости МДП-структуры:  $\text{Cu-SiO}_2\text{-InSb}$  при смене полярности напряжения смещения в условиях слабополевого воздействия на структуру ( $E < 10^6$  В/см).

### 2. Образцы и методика эксперимента

Для изготовления МДП-структуры на основе InSb в качестве подзатворного диэлектрика мы использо-

вали  $\text{SiO}_2$ . Нанесение слоя  $\text{SiO}_2$  на поверхность полупроводника осуществлялось методом магнетронного распыления. В качестве образцов InSb  $p$ -типа использовались прямоугольные пластинки с размерами  $6 \times 4 \times 1.5$  мм, изготовленные из монокристаллического слитка ( $p = 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) с помощью операций резки, шлифовки, полировки (механическая, финишная химическая). Для напыления диэлектрика и материала затвора использовали маски из листа нержавеющей стали с размерами  $3 \times 4$  мм и  $1.8 \times 2.5$  мм соответственно. В работе использовались мишени: кремний (для осаждения диэлектрической пленки), медь (для напыления затвора), хром (для напыления тонкого буферного слоя между диэлектриком и медной пленкой с целью обеспечения высокой адгезии меди). Очистку поверхности образцов InSb от собственных окислов проводили бомбардировкой ионами аргона непосредственно перед осаждением диоксида кремния в течение 10 мин. Для уменьшения энергии распыленных частиц, попадающих на ростовую поверхность, процесс распыления мишени из кремния в газовой смеси  $\text{Ar}:\text{O}_2 = 1:1$  (по потоку) проводился при максимально высоком давлении горения магнетронного разряда (0.3 мм Hg), т.е. был подобран режим термализации распыляемого вещества. Расстояние мишень-подложка составляло 5 см, температура подложки  $T \approx 200^\circ\text{C}$ . Условия нанесения затвора были одинаковыми для всех образцов. После нанесения диэлектрика меняли маску и наносили тонкий слой хрома в течение 2 мин. Затем поверх тонкого слоя хрома напыляли медную пленку толщиной 1 мкм. Для подключения образца к измерительной ячейке к тыльной стороне образца и на затвор припаивалась тонкая медная проволока припоем из индия.

Зарядовые свойства МДП-структур  $\text{Cu-SiO}_2-p\text{-InSb}$  изучались путем анализа их вольт-фарадных ( $C-V$ ) характеристик. Измерения проводились на LCR-измерителе AM-3001 (АКТАКОМ). Напряжение смещения на структуру подавалось от источника питания АТН-3331 с шагом 0.1 В и контролировалось вольтметром В7-78/1.

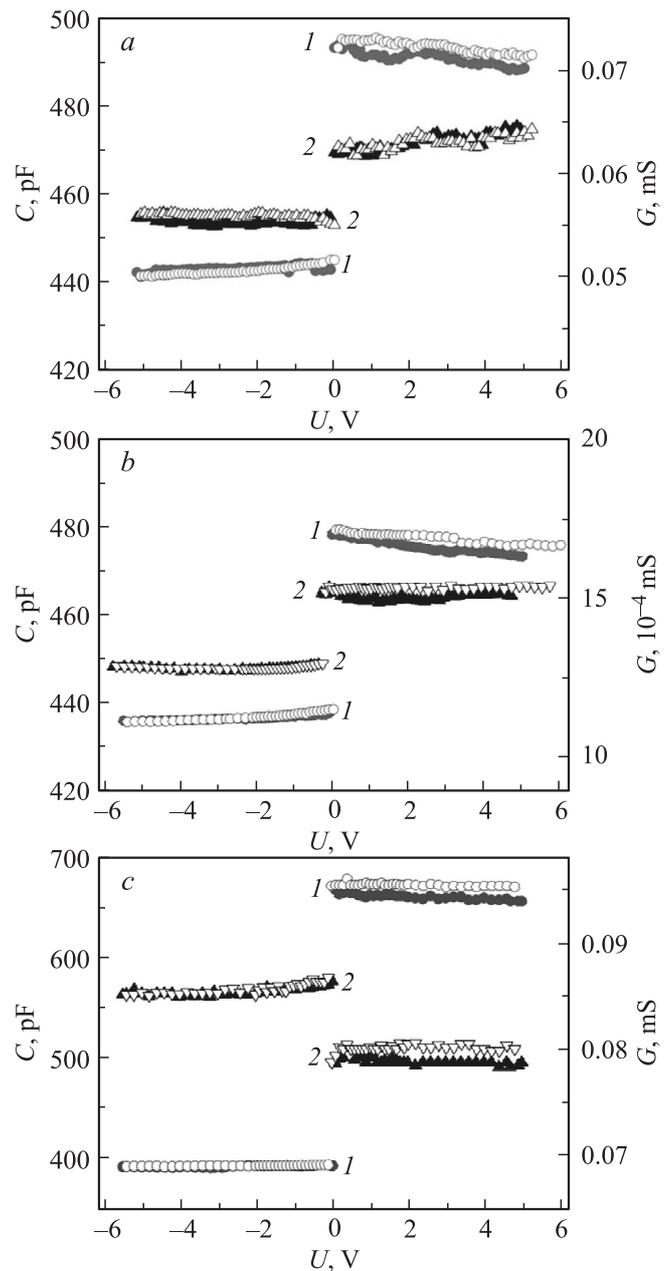
Перед каждым измерением структуры выдерживались под напряжением в течение 1 мин. Все измерения выполнены в темноте при температуре 80 К.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рисунке представлены результаты измерения емкости (кривые 1) и проводимости (кривые 2) образца при изменении напряжения смещения от положительных значений к отрицательным и обратно. Измерения выполнены на частоте 1 кГц (рисунок, *a*), 10 кГц (рисунок, *b*) и 100 кГц (рисунок, *c*). На всех приведенных зависимостях наблюдается скачок соответствующих значений при смене полярности напряжения на затворе структуры, а также незначительный гистерезис в области положительных смещений. Величина „скачка“ емкости составляет примерно 50, 40 и 280 пФ при частоте измерительного сигнала 1, 10 и 100 кГц соответственно. Отрицательные ветви ВФХ и проводимости практически не зависят от напряжения смещения, а положительные ветви испытывают некоторое выполаживание с увеличением частоты тестирующего сигнала, при этом отрицательная ветвь проводимости на частоте 100 кГц выше положительной и в целом проводимость больше, чем при других частотах. При положительном смещении образца слабый рост сквозной проводимости коррелирует со слабым спадом емкости (рисунок, *a, b*), при том что на частоте 10 кГц происходит понижение проводимости почти на 2 порядка (рисунок, *b*).

Еще одной важной особенностью полученных ВФХ является их не типичность для *p*-типа МДП-элементов [9], поскольку для подложек *p*-типа отрицательная ветвь ВФХ должна быть выше положительной. Такое нетипичное поведение ВФХ наших образцов мы связываем с наличием встроенного в диэлектрик положительного заряда, который по действию эквивалентен положительной поляризации МДП-структуры [10]. Положительный заряд в окисле, скорее всего, обусловлен отклонением от строгой стехиометрии  $\text{SiO}_2$  на стадии его технологического роста при магнетронном распылении мишени из кремния. Также нельзя исключать и возможный вклад в такой заряд ионов  $\text{Sb}^+$  (ввиду слабой катионно-анионной связи в  $\text{InSb}$ ), которые могут попасть в приграничную с полупроводником область диэлектрика. Величина такого суммарного заряда может быть достаточной, чтобы своим полем вызвать инверсию носителей тока в приповерхностном слое полупроводника.

При положительной поляризации МДП-элемента электроны инверсной области полупроводника могут туннелировать в диэлектрик по механизму Фаулера–Нордгейма [11], уменьшая встроенный положительный заряд. Уменьшение такого заряда при развертке внешнего напряжения, по всей видимости, происходит неравномерно, так как емкость, определяемая как  $C = dQ/dV$ , претерпевает слабый спад. Практически одинаковые значения работы выхода  $\phi$  и энергии электронного



$C$ – $V$ -характеристики (кривые 1) и проводимость структуры (кривые 2), измеренные при частоте измерительного сигнала, кГц: *a* — 1, *b* — 10, *c* — 100. Кривые 1 относятся к левой оси ординат, кривые 2 — к правой оси ординат. Темные кружки и треугольники соответствуют изменению напряжения смещения на образце от положительных значений („+“ на затворе) к отрицательным („–“ на затворе), а светлые кружки и треугольники — изменению напряжения от „–“ к „+“.

сродства  $\text{InSb}$  ( $\approx 4.6$  эВ) дают основание полагать о возможности эмиссии электронов из затворного электрода в диэлектрик по вышеназванному механизму и при отрицательном смещении образца. В этом случае полагаем, что число туннелируемых электронов больше и эффективный положительный заряд в диэлектрике скачкообразно уменьшается. Пологий участок ВФХ

( $dQ/dV \approx \text{const}$ ) при отрицательных смещениях указывает на равномерный характер уменьшения положительного заряда диэлектрика, что может косвенно свидетельствовать о близости центра положительного заряда к границе диэлектрик-полупроводник.

На высоких частотах существенное влияние на результаты измерений может оказывать паразитная индуктивность, которая достигает нескольких единиц микрогенри [12]. Следовательно, частотная зависимость вышеописанного эффекта, а также слабый гистерезис в  $C-V$  характеристиках и ВАХ проводимости на рисунке,  $b$  и  $c$  связаны взаимосвязанным (конкурирующим) вкладом емкости и индуктивности в формирование реактивной составляющей импеданса. Увеличение отрицательной ветви ВАХ проводимости на частоте 100 кГц (рисунок,  $c$ ) может быть связано с краевой проводимостью МДП структуры, обусловленной с растеканием отрицательного заряда по поверхности диэлектрика вне полевого электрода [9].

#### 4. Заключение

Таким образом, при соблюдении вышеуказанных условий в технологическом процессе нанесения  $SiO_2$  на подложку  $InSb$ , могут быть получены МДП-структуры с резким „переключением“ емкости при смене полярности напряжения смещения. Такой эффект, на наш взгляд, может быть использован при изготовлении различных функциональных устройств для микро- и радиоэлектроники.

#### Список литературы

- [1] А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко. *Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоелектроники* (М., Физматкнига, 2010) с. 128.
- [2] В.С. Вавилов, А.Ф. Плотников, В.Э. Шубин. *ФТП*, **4**, 598 (1970).
- [3] E.C. Ross, I.T. Wallmark. *RCH Rev.*, **30**, 366 (1969).
- [4] D.F. Barbe. *Proc IEEE*, **63**, 38 (1975).
- [5] F. Schwier, J. Pezoldt, R. Granzner. *Nanoscale*, **7**, 8261 (2015).
- [6] T.D. Subash, T. Gnanasekaran, C. Divya. *J. Semicond.*, **36**, 014003 (2015).
- [7] M.M. Uddin, H.W. Liu, K.F. Yang, K. Nagase, K. Sekine, C.K. Gaspe, T.D. Mishima, M.B. Santos, Y. Hirauama. *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 123502 (2013).
- [8] В.Г. Вайнер. Канд. дис. (Новосибирск, Ин-т физики полупроводников, 1984).
- [9] T. Nakagava, H. Fujisada. *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 348 (1977).
- [10] S.R. Hofstein, K.H. Zaininger, G. Warfield. *Proc. IEEE*, **52**, 971 (1964).
- [11] R.H. Fowler, L. Nordheim. *Proc. Royal Soc.*, **119**, 173 (1928).
- [12] В.С. Вавилов, А.Ф. Плотников, В.Э. Шубин. *ФТП*, **5**, 2064 (1971).

Редактор Г.А. Оганесян

#### The effect of oxide charge states on the capacitance-voltage characteristics of the MOS structure of $Cu-SiO_2-p-InSb$

R.A. Aliev<sup>1</sup>, G.M. Gajiev<sup>1</sup>, M.M. Gadzhialiev<sup>1</sup>,  
A.M. Ismailov<sup>1,2</sup>, Z.Sh. Pirmagomedov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics after Kh.I. Amirkhanov,  
Dagestan Scientific Center  
of the Russian Academy of Sciences,  
367003 Makhachkala, Russia

<sup>2</sup> Dagestan State University,  
367003 Makhachkala, Russia

**Abstract** Capacitance-voltage characteristics and conductance of *MOS* structures based on *InSb* at different frequencies of the measuring signal, with the aim of studying the influence of technological conditions of synthesis on the capacitive properties of these structures have been measured. The influence of the positive charge, embedded in the dielectric, on the measured characteristics of the sample is discussed. The influence manifests itself as a sharp „switch“ capacity if changes the polarity of the external effects of low-field ( $E < 10^6$  V/cm).