Uzbek Journal of Physics

Vol.22(№1) 2020 PP.39-43

# ВЛИЯНИЕ ИОНИЗОВАННЫХ ПРИМЕСЕЙ И МИКРОТРУБОК НА ВАХ *p-n*-4H-SiC-ПЕРЕХОДА

**А.Г. Гулямов, Х.Н. Жураев, А.Б. Давлатов, М.У. Хажиев, Б.Г. Атабаев, Д.Ш. Саидов, Н.Б. Адилов, Е.В. Румянцева**

Физико-технический институт АН РУз, ул. Чингиз Айтматова, 2Б,100084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 28.07.2019)

Ионлашган киришмалар ва микро-қувурчаларнинг паст ҳароратли диффузия усули билан олинган 4H-SiC *p-n*-ўтишлар тешилиш кучланишига таъсири тадқиқ қилинган. Тешилиш кучланиши учун формуладан фойдаланиб ва *I-V* характеристикаси тешилиш кучланиши қийматларининг нисбатига қараб кристаллни куйдириш ва кимёвий едиришдан сўнг ундаги ионлашган киришмалар ва дефектларнинг қанчалик ўзгаришини баҳолаш мумкинлиги кўрсатиб берилган.

Исследовано влияние ионизованных примесей и микротрубок на напряжение обратного пробоя *p-n*-перехода на основе 4H-SiC, полученного методом низкотемпературной диффузии. Показано, что, пользуясь уравнением для напряжений пробоя в зависимости от соотношения пробивных напряжений ВАХ *p-n*-перехода, можно определить, насколько изменилась концентрация ионизированной примеси и дефектов после травления кристалла и после его отжига.

The effect of ionized impurities and microtubes on the reverse breakdown voltage of the *p-n* junction based on 4H-SiC obtained by low-temperature diffusion was studied. It is shown that using the equation for breakdown voltages and taking into account the ratio of breakdown voltages of the *I-V* characteristics of the *p-n* junction, one can determine how much the concentration of ionized impurities and defects has been changed after etching of the crystal and after annealing.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Выпрямляющее свойство полупроводниковых диодов имеет большое значение в полупроводниковом приборостроении. Характеристики выпрямительных диодов на протяжении срока службы ухудшаются, что выражается в увеличении токов утечки, снижении пробивного напряжения при обратном включении и увеличении сопротивления диода в прямом направлении. Увеличение пробивного напряжения улучшает выпрямляющее свойство диода, с другой стороны, явление пробоя успешно используется в создании сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов. В этом плане SiC является перспективным материалом, обладающим высоким пробивным напряжением. Однако дефекты, образующиеся на поверхности и в глубине образца, снижают значение пробойного напряжения. Причиной этого могут быть различные примеси, микропоры, винтовые дислокации, прорастающие дислокации с краевым компонентом, базисные дислокации, царапины, вызванные алмазной полировкой, различные микротрубки [1-5]. Методом отжига и протравки удаляются примеси и дефекты с поверхности полупроводниковых материалов, и тем самым увеличивается пробивное напряжение полупроводниковых диодов на основе этих материалов.

Ранее в работах [6-18] исследован метод низкотемпературной диффузии мелких примесей в SiC, изготовлены *p-n* диодные структуры и изучены их электрофизические и оптические характеристики.

В данной работе приведен теоретический анализ влияния ионизированных примесей на ВАХ *p-n* 4H-SiC перехода.

## II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования являются монокристаллические пластинки карбида кремния, выращенные PVT (Physical Vapor Transport) методом, с относительно низкой концентрацией ростовых дефектов: $N$=$10^4$ см$^{-2}$ для дислокаций и $N$~10–$10^2$ см$^{-2}$ для микротрубок (Cree Research, Inc, USA), политипа 4H-*n*-SiC, толщиной ~300–600 мкм и удельным сопротивлением ~3.6–20 Ом·см.

Проведена низкотемпературная диффузия бора. Диффузию бора в 4H-*n*-SiC проводили при различных температурах 1150–1300°C по способу, описанному в [9-18]. Тонкая боросиликатная плёнка на поверхности SiC являлась источником атомов бора. Процесс диффузии проводили в атмосфере (для создания потока вакансий от поверхности кристалла в объём образца). По окончании процесса диффузии получена ВАХ образца. Травление образцов проводили в растворе гидрооксида калия КОН при стимуляции ультрафиолетовым (УФ) светом. Для проведения травления образцов *p*-область кристалла покрывали химически стойким лаком, после чего образец помещали в активно перемешивающийся водный раствор гидрооксида калия. Активное перемешивание раствора обеспечивалось посредством вращения посуды под наклонным углом 15–20° к горизонту. В качестве источника излучения использовали УФ лампу, длина волны излучения составила λ~135–331 нм. Освещение УФ излучением проводили с верхней стороны посуды. После травления кристалла получена ВАХ образца.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены ВАХ *p-n* 4H-SiC переходов, изготовленных на травленных и нетравленных кристаллах. Как видно из рисунка, после травления

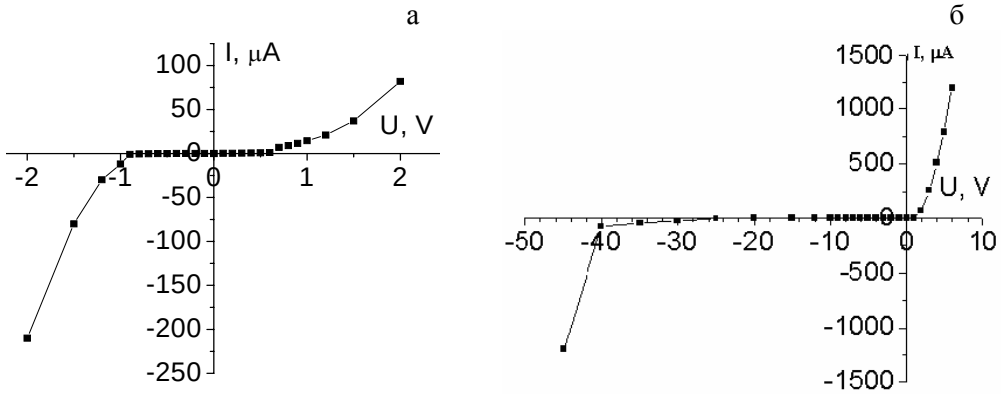



**Рис. 1.** ВАХ *p-n* 4H-SiC перехода, изготовленного низкотемпературной диффузией при 1200°C, после отжига в вакууме при 500°C (*а*); кристалл протравлен в растворе КОН при 300 К при УФ стимуляции (*б*).

напряжение пробоя увеличилось от −1 до −40 В, что свидетельствует об уменьшении дефектов и примесей.

Если ширина обедненной области известна, то напряжение пробоя $V_b$ несимметричного резкого перехода будет [19]

$$V_b = \frac{E_m W}{2} = \frac{\varepsilon_s E_m^2}{2qN_b}, \tag{1}$$

а для линейного перехода

$$V_b = \frac{2E_m W}{3} = \frac{4E_m^{3/2}}{3}\left(\frac{2\varepsilon_s}{q}\right)^{1/2}(a)^{-1/2}, \tag{2}$$

где $N_b$ – концентрация ионизованной примеси в слаболегированной области, $\varepsilon_s$ – диэлектрическая проницаемость полупроводника, $a$ – градиент концентрации примеси, $E_m$ – максимальное электрическое поле.

Под концентрацией ионизованной примеси обычно подразумевается концентрация легированной донорной и акцепторной примеси [19, 20]. Дефекты на поверхности исходных образцов снижают значение пробойного напряжения. В нашем случае дислокации в виде микротрубок способствуют возникновению энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника, на которые захватываются носители заряда, помимо этого, происходит осаждение примесей бора на дислокациях с их последующей ионизацией. Кроме микротрубок, конечно же, не исключается возможность возникновений дефектов в виде различных трещин и царапин. Все изложенное позволяет сделать заключение, что $N_b$ – концентрация ионизованной примеси, фигурирующая в выражении (1), имеет прямую зависимость от концентраций ростовых дефектов в виде дислокаций и микротрубок.

В *p-n*-переходе на кремнии максимальное поле определяется выражением [21]:

$$E_m = \frac{4\times10^5}{1-\frac{1}{3}\lg(N_b/10^{16})}\ \text{[В/см]}, \tag{3}$$

где $N_b$ измеряется в см$^{-3}$.

Если учесть, что в уравнении (3) $N_b$ находится под логарифмом, то можно считать что изменение логарифмического члена пренебрежимо мало, и в первом приближении максимальное электрическое поле $E_m$ можно считать постоянным. В данном случае при использовании (1) появляется возможность оценить, насколько изменяется $N_b$ концентрация ионизованной примеси в слаболегированной области (дефекты, примеси и т.д.).

Оценим изменение концентрации ионизованной примеси после травления кристалла, приведенной на рис. 1(б):

$$N_{b1}/N_{b2} = U_{b2}/U_{b1}. \tag{4}$$

Здесь $N_{b1}$ и $N_{b2}$ – концентрации ионизованной примеси соответственно до и после травления кристалла, $U_{b1}$ и $U_{b2}$ – пробойное напряжение до и после травления кристалла. Как видно из рис. 1, пробойное напряжение до травления было $U_{b1}\approx$–1 В, а после травления $U_{b2}\approx$–40 В. Таким образом, изменение

концентрации ионизованной примеси будет $N_{b1} \approx 40 N_{b2}$. То есть травление кристалла уменьшило концентрацию ионизованной примеси в слаболегированной области примерно в сорок раз. Это говорит о том, что при травлении с поверхности образца удаляются ростовые дефекты в виде дислокаций, микротрубок, трещин и царапин, а вместе с ними и осажденные на них примеси бора. Рассмотрим теперь, как влияет процесс отжига на концентрацию ионизованной примеси. На рис. 2 приведены ВАХ для *p-n*-SiC-перехода, изготовленного с применением УФ травления: а) после диффузии, б) после отжига при 500°С, в) после отжига при 700°С; г) после отжига при 900°С. Время отжига составляло 10 минут. Используя соотношение (4), можно определить изменение концентрации ионизованной примеси. После отжига при 500°С будет $N_{b1} \approx 1.6 N_{b2}$, после отжига при 700°С будет $N_{b1} \approx N_{b2}$, после отжига при 900°С будет $N_{b1} \approx 1.2 N_{b2}$.

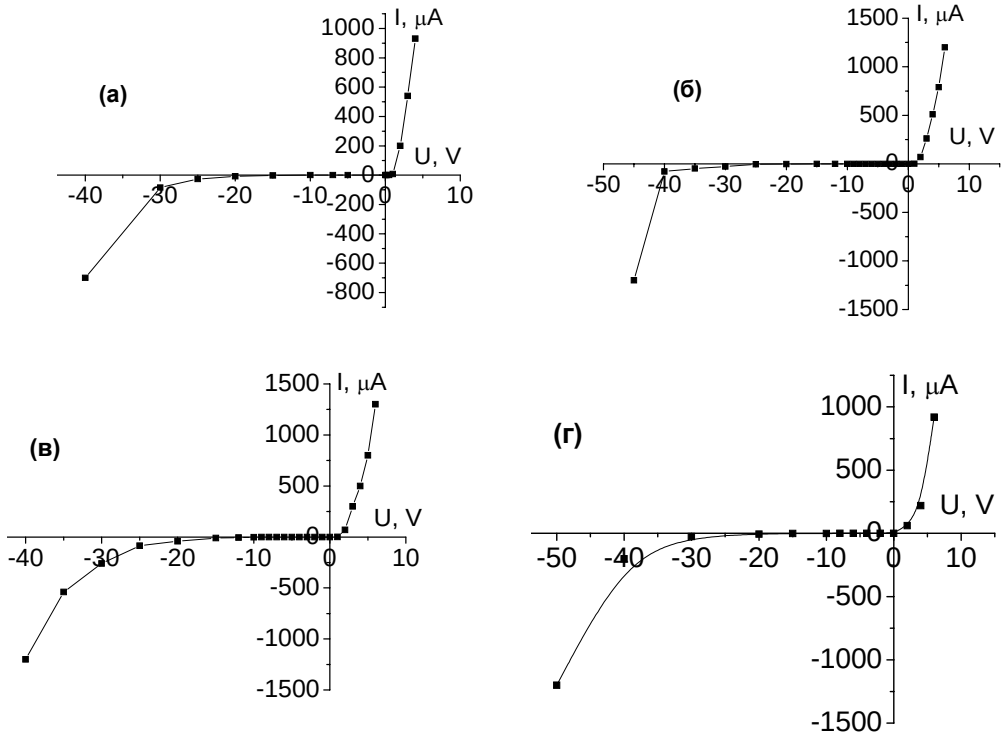



**Рис. 2.** ВАХ *p-n* 4H-SiC перехода, изготовленного с применением УФ травления: *а*) ВАХ после диффузии; *б*) ВАХ после отжига при 500°С, *в*) ВАХ после отжига при 700°С; *г*) ВАХ после отжига при 900°С. Время отжига 10 мин.

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– травление образцов в растворе гидрооксида калия с применением УФ увеличивает пробивное напряжение до –40 В;

– отжиг образцов после травления способствует уменьшению концентрации дефектов и примесей от 1.2 до 1.6 раз, что соответственно увеличивает обратное пробивное напряжение;

– с помощью соотношения (1) можно определить насколько изменилась концентрация ионизованной примеси и дефектов после травления кристалла и после его отжига. В частности, травление кристалла КОН при стимуляции УФ светом увеличивает обратное напряжение до –40 В и уменьшает концентрацию примесей и дефектов $N_{b1} \approx 40 N_{b2}$, при отжиге от 500°C до 900°C примеси и дефекты уменьшались от 1.2 до 1.6 раз.

**ЛИТЕРАТУРА**


1. T. Watanabe, Y. Nakao et al., Mater. Sci. Forum **600-603**, 999-1002 (2008).
2. A. Syrkin, V. Dmitriev et al., Mater. Sci. Forum **389-393**, 1173 (2002).
3. E.V. Kalinina et al., Mater Sci. Forum **338-342**, 505 (2000).
4. E. Rauls, J. Elsner, R. Gutierrez et al., Proc. Conf. ICSCRM, p.360 (October 1999).
5. И.М. Викулин, В.И. Стафеев. Физика полупроводниковых приборов (Москва, Радио и связь, 1990).
6. C.C. Tin, S. Mendis, K. Chew et al., Thin Solid Films **518**, 118 (2010).
7. S. Mendis, C.C. Tin, I.G. Atabaev et al., Inter. J. Fund. Phys. Sci. **3**, 75 (2013).
8. C.C. Tin, S. Mendis, M.T. Tin et al., J. Appl. Phys. **114**, ID 244502 (2013).
9. I.G. Atabaev, T.M. Saliev, and E.N. Bakhranov, UZ Patent, IAP 02792 (2006).
10. C.C. Tin, A.V. Adedeji, I.G. Atabaev et al., US Patent, 7999268 B2 (2011).
11. I.G. Atabaev et al., Materials Science Forum **600-603**, 457-460 (2008).
12. I.G. Atabaev et al., J. Synch. Investig. **5**, No 4, 796–800 (2011).
13. И. Г. Атабаев и др. Патент РУз, № IAP 05087 (2015).
14. I.G. Atabaev et al., Materials Sciences and Applications **1**, 53 (2010).
15. I.G. Atabaev et al., Materials Sciences and Applications **2**, 1205 (2011).
16. I.G. Atabaev, Kh.N. Juraev, V.A. Pak, Adv. Cond. Matter Phys. ID 7820676 (2017).
17. I.G. Atabaev, Kh.N. Juraev, Adv. Mater. Sci. Engineering ID 8797031 (2018).
18. I.G. Atabaev, Kh.N. Juraev, M.U. Hajiev, J. Spectroscopy ID 8705658 (2018).
19. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (Москва, Мир, 1984).
20. U.K. Mishra and J. Singh. Semiconductor Device Physics and Design (Springer, 2008).
21. Ж.И. Алфёров. История и будущее полупроводниковых гетероструктур, ФТП **32**(1), 3 (1998).