

- [5] Лугаков П. Ф., Лукашевич Т. А., Шуша В. В. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 2. С. 401—404.
 [6] Литвинко А. Г., Макаренко Л. Ф., Мурия Л. И., Ткачев В. Д. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 4. С. 776—780.
 [7] Ferenczi G., Lodos C. A., Pavelka T., Somogyi M., Mertens A. // Def. Semicond. Trans. Techn. Switzerland, 1986. P. 947—951.
 [8] Thonke K., Hangleiter A., Wagner J., Sauer R. // J. Phys. C. 1986. V. 18. N 23. P. L795—L798.
 [9] Asom M. T., Benton J. L., Sauer R., Kimerling L. C. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 4. P. 256—258.
 [10] Trombetta J. M., Watkins G. D. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 14. P. 1103—1105.
 [11] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 472 с.
 [12] Hall R. N. // Phys. Rev. 1952. V. 87. N 2. P. 387—388. Shockley W., Read W. // Phys. Rev. 1952. V. 87. N 4. P. 835—842.
 [13] Bean A. R., Newman R. C. // J. Phys. Chem. Sol. 1972. V. 33. N 2. P. 255—268.

Научно-исследовательский институт
 прикладных физических проблем
 им. А. Н. Севченко БГУ им. В. И. Ленина
 Минск

Получено 9.11.1988
 Принято к печати 7.12.1988

ФТП, том 23, вып. 4, 1989

ДИСЛОКАЦИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ВОССТАНОВЛЕННОГО РУТИЛА

Девятков М. Н., Кашинцева В. Л., Овчинникова Г. И.

В последние годы активно исследуется дислокационная проводимость в классических полупроводниках, таких как германий и кремний [1, 2]. Эти исследования проводятся при низких температурах, так как при комнатной температуре преобладает собственная проводимость материалов. Можно, однако, наблюдать дислокационную проводимость при комнатной температуре, например, в диэлектриках. Среди диэлектриков можно указать материалы, в которых пластические деформации при определенных условиях образуются без приложения внешних усилий. Так, в нестехиометрических окислах TiO_{2-x} (x — степень отклонения от стехиометрии) пластические деформации появляются в результате перестройки решетки при переходе к нестехиометрической фазе [3, 4]. Наличие внешнего давления приводит к усилению кинетики этих процессов и к некоторому изменению ориентации образующихся плоскостей кристаллографического сдвига (ПКС) [3].

Монокристаллы рутила, выращенные методом Вернейля, восстанавливались путем нагрева в вакууме (парциальное давление кислорода 10^{-13} мм рт. ст.) в присутствии ниобия при температуре 1329 К в течение 2.5 ч. Условия восстановления соответствовали работе [5], где было показано, что восстановление при температурах выше 1329 К во всей области парциальных давлений кислорода вплоть до 10^{-7} мм рт. ст. приводит к устойчивой структуре дефектов, такой, что проводимость при комнатной температуре мало отличается от проводимости при температуре восстановления. Затем образцы охлаждались при комнатной температуре в течение примерно 6 ч. Условия охлаждения важны с точки зрения образования ПКС, так как последние появляются при сравнительно медленном охлаждении [6].

Пользуясь приведенными в работе [7] зависимостями x и проводимости σ от величины парциального давления P_{O_2} , мы оценили x для наших образцов в пределах от 10^{-4} до 10^{-3} . Это довольно слабая степень восстановления, но и в этом случае, согласно [8], наблюдаются как пластинчатые дефекты, так и ПКС.

Экспериментальные наблюдения структурных изменений, происходящих в кристаллах рутила при восстановлении, проводились на сканирующем микроскопе типа S-405A фирмы Hitachi. На рис. 1, а, б представлены фотографии поверхности скола вдоль оси C кристалла рутила до и после восстановления. Если в стехиометрическом рутиле до восстановления виден лишь точечный контраст в виде кластерных образований, то после восстановления появляется более или

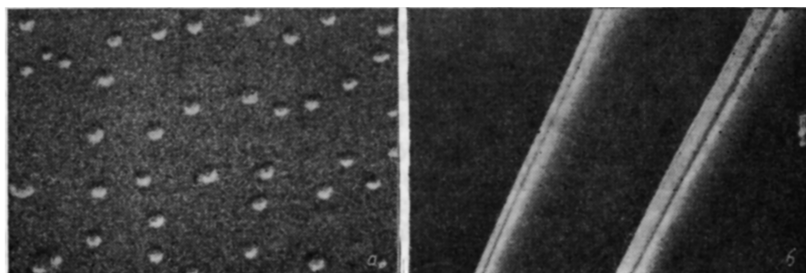


Рис. 1. Фотография поверхности скола вдоль оси C кристалла рутила.
а — до восстановления, б — после восстановления.

менее регулярная сверхструктура, которая может быть отождествлена с ПКС. Расстояния между ПКС $D_{\text{ПКС}} = 10^4 \text{ \AA}$ и связаны с n в структуре типа фаз Магнелли $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ соотношением [9] $D_{\text{ПКС}} = d_{132}$ ($n=0.375$), где d_{132} — межплоскостное расстояние в элементарной ячейке. Переходя от представления структуры в виде $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ к нестехиометрической фазе типа TiO_{2-x} , определяем x для сверхструктуры (рис. 1, б) величиной $x=10^{-4}$, что хорошо согласуется со значением x , определенным независимым способом через связь x и σ с P_{O_2} .

На этих же кристаллах рутила измерялись температурная и частотная зависимости, эффект Холла и вольтамперные характеристики (ВАХ). Образцы в форме параллелепипеда размером $2.5 \times 1.1 \times 0.8$ мм вырезались вдоль оси C ,

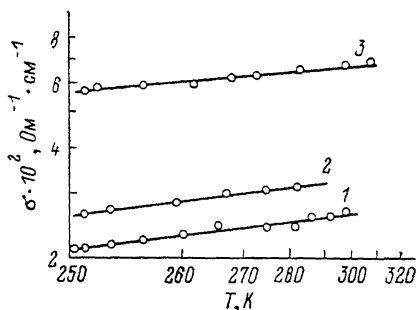


Рис. 2. Зависимость проводимости от температуры.

и на торцы, перпендикулярные оси C , наносились омические контакты. Зависимость $\sigma(T)$, представленная на рис. 2, хорошо аппроксимируется степенным законом $\sigma \sim T^n$ с n , изменяющимся от 1.26 (кривая 1) до 0.9 (кривая 3). Согласно [10], степенная температурная зависимость проводимости является характерной особенностью пластически деформированных кристаллов, и с ростом плотности дислокаций показатель степени в зависимости $\sigma(T)$ уменьшается (кривая 3). Линейная плотность дислокаций в этих образцах изменялась от $3 \cdot 10^3$ (кривая 1) до 10^4 см^{-1} (кривая 3). Другой характерной особенностью дислокационной проводимости является отсутствие при высокой плотности дислокаций частотной зависимости проводимости, что и наблюдалось в наших экспериментах по крайней мере до частот 200 МГц. Измерения постоянной Холла дали значения от 0.9 до $2.7 \text{ см}^3/\text{К}$. Соответствующие им концентрации носителей составили $(9-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Поскольку концентрации носителей достигают величин, характерных для легированных полупроводников, можно говорить о дислокационном легировании кристаллов [11], когда концентрация носителей и их пространственное распределение определяются дислокациями.

Вольтамперные характеристики измерялись на постоянном токе и в импульсном режиме (длительность импульса 5 мкс, частота следования 2 кГц). Как в импульсном режиме, так и при измерениях на постоянном токе участок ли-

нейной зависимости тока от напряжения имел место при напряжениях, меньших 1 В. Выше этих напряжений (поля ~ 10 В/см) вольтамперные характеристики становились нелинейными и аппроксимировались степенной зависимостью с показателем степени 2.5.

В рамках представлений о дислокационной проводимости нелинейность ВАХ объясняется наличием инжекции из обогащенных областей вблизи дислокаций [12]. Согласно [11], концентрация носителей в этих областях соответствует вырожденному случаю, а в междислокационных промежутках средняя концентрация существенно меньше. Проводимость остается линейной, пока внешнее поле меньше собственного, созданного заряженными дислокациями. Концентрация носителей и ток определяются инжекцией, если внешнее поле превышает собственное.

Суммируя все данные проведенных исследований, можно утверждать, что все особенности, присущие поведению электрофизических характеристик пластически деформированных кристаллов, имеют место в кристаллах восстановленного рутила и могут служить подтверждением правильности понимания как структуры дефектов, так и модели, привлеченной для их объяснения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Осипьян Ю. А., Шевченко С. А. // Письма ЖЭТФ. 1974. Т. 20. В. 11. С. 709—712.
- [2] Кляцкина И. В., Кожух М. Л., Рывкин С. М., Трунов В. А., Шлимак И. С. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 6. С. 1089—1094.
- [3] Blanchin M. G., Bursill L. A., Smith D. J. // Phys. St. Sol. (a). 1985. V. 89. P. 559—571.
- [4] Bursill L. A., Smith D. J. // Nature. 1984. V. 309. P. 319—321.
- [5] Smith D. J. // Phil. Mag. A. 1984. V. 50. P. 473—480.
- [6] Gautron J., Marucco J. F., Lemasson P. // Mat. Rev. Bull. 1981. V. 16. P. 575—580.
- [7] Blanchin M. G., Bursill L. A., Smith D. J. // Proc. Roy. Soc. (London). 1984. V. A391. P. 351—370.
- [8] Marucco J. F., Gautron J., Lemasson P. J. // Phys. Chem. Sol. 1981. V. 42. N 2. P. 363—370.
- [9] Bursill L. A., Hyde B. G. // Phil. Mag. 1969. V. 20. P. 347—359.
- [10] Зиновьева К. Н., Кожух М. Л., Трунов В. А., Рывкин С. М., Шлимак И. С. // Письма ЖЭТФ. 1977. Т. 30. В. 5. С. 303—305.
- [11] Глазман Л. И., Суриц Р. А. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 10. С. 1769—1775.
- [12] Глазман Л. И. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 12. С. 2209—2215.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Получено 3.05.1988
Принято к печати 20.12.1988

ФТП, том 23, вып. 4, 1989

СКОРОСТЬ ВВЕДЕНИЯ И ПРОФИЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ А-ЦЕНТРОВ В *n*-КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ ВБЛИЗИ ПОРОГА ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ

Берман Л. С., Витовский Н. А., Воронков В. Б., Ломасов В. Н.,
Ременюк А. Д., Ткаченко В. Н., Толстобров М. Г.

Образование радиационных дефектов (РД) и профили их концентрации $N_{РД}(x)$ в кремнии, облученном электронами с энергией вблизи порога дефектообразования (ПД), рассмотрены в ряде работ [1-7]. Однако резкое уменьшение скорости введения РД $V_{РД}$ вблизи ПД [3, 4] затрудняет измерение их концентрации традиционными методами. Что же касается зависимости $N_{РД}(x)$, то для ее определения использовалось либо измерение проводимости в ходе снятия слоев [8] — метод с низкой чувствительностью, либо косвенный метод, основанный на изменении рекомбинационных характеристик *p-n*-диода после облу-