

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЯ ФЕРМИ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

© В.С.Гарнык

Институт металлургии им.А.А.Байкова Российской академии наук,
117911 Москва, Россия
(Получена 18 января 1995 г. Принята к печати 18 апреля 1995 г.)

В работе показано, что вводя активные центры донорного типа (например, термодоноры) в *p*-кремний, можно добиться такого положения уровня Ферми, при котором появляющиеся в результате облучения быстрыми электронами радиационные дефекты не будут оказывать влияния на концентрацию носителей заряда.

В работе [1] было показано, что удельное сопротивление монокристаллов кремния, легированных цирконием, не изменяется под воздействием облучения быстрыми электронами. В указанной работе исследовалась верхняя часть бездислокационного слитка кремния, выращенного по методу Чохральского в направлении $\langle 100 \rangle$. Диаметр слитка был 100 мм. Содержание кислорода в кристалле не превышало $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Примесью, определявшей тип проводимости, был бор. Концентрация циркония, который вводился в слиток из расплава в процессе выращивания, достигала 10^{14} см^{-3} . Особенностью изучаемого материала было то, что несмотря на легирование бором, проводимость *p*-типа обладала только периферийная часть кристалла вблизи боковой поверхности. Эта часть слитка имела вид полого цилиндра с толщиной стенок $5 \div 7$ мм. Остальной объем кристалла был *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 12 Ом · см, концентрацией носителей заряда $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и временем жизни неосновных носителей заряда около 300 мкс. В данной работе образцы для исследования вырезались из области, характеризовавшейся проводимостью *n*-типа. Время жизни неосновных носителей заряда измеряли фазовым методом [2] (относительная ошибка измерений 30%) на образцах, имевших вид параллелепипедов размером $3 \times 3 \times 20 \text{ мм}^3$. Эдс Холла измеряли по стандартной методике при использовании переменного электрического тока и постоянного магнитного поля (ошибка 20% [2]) на образцах размером $1 \times 3 \times 10 \text{ мм}^3$. Наибольшие ребра всех образцов совпадали с направлением выращивания кристаллов $\langle 100 \rangle$.

Для облучения образцов использовался импульсный поток быстрых электронов в энергии 8 МэВ, с частотой следования импульсов 250 Гц и длительностью импульса 3 мкс. Облучение проводили

при комнатной температуре. Для предотвращения разогрева во время облучения образцы помещали в охлаждаемую водой и обдуваемую сжатым воздухом кассету и устанавливали относительно потока электронов таким образом, чтобы облучалась наибольшая грань. При измерении времени жизни неосновных носителей заряда на эту грань направляли световой поток. Плотность потока электронов во всех экспериментах была $6.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Интервал доз облучения образцов лежал в пределах $3.2 \cdot 10^{14} \div 6.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

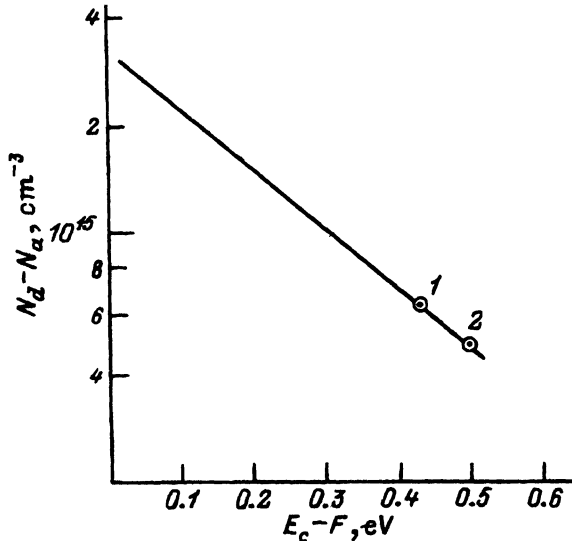
Наблюдаемая неоднородность по типу проводимости материала могла быть результатом образования термодоноров в процессе охлаждения слитка после выращивания. Подтверждением этого предположения служит тот факт, что температурная зависимость концентрации носителей заряда в образцах, вырезанных из области, характеризовавшейся проводимостью n -типа, в интервале температур $100 \div 300 \text{ К}$ свидетельствовала о существовании в запрещенной зоне таких кристаллов донорного уровня с глубиной залегания $E_c - 0.13 \text{ эВ}$, характерного для термодоноров [3]. Энергия активации уровня определялась по результатам измерения температурной зависимости концентрации носителей заряда. При расчетах предполагали, что в запрещенной зоне исследованного материала имелись один донорный и один акцепторный уровни, т.е. ход температурной зависимости концентрации носителей описывался выражением $n = A \exp(-E_d/kT)$ [4], где E_d — глубина залегания донорного уровня. После десятиминутного отжига при 600°C уровень $E_c - 0.13 \text{ эВ}$ исчезал, и материала становился p -типа проводимости с удельным сопротивлением около $30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

После облучения во всем использованном интервале доз фотоэффект в исследованных образцах уменьшался настолько, что проводить измерения времени жизни неосновных носителей заряда фазовым методом было невозможно. Концентрация носителей заряда после облучения дозой $6.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, измеренная при комнатной температуре, была около $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Ход температурной зависимости концентрации носителей заряда в интервале температур $100 \div 300 \text{ К}$ в таком образце свидетельствовал о существовании в запрещенной зоне донорного уровня с глубиной залегания $E_c - 0.13 \text{ эВ}$. Таким образом, учитывая ошибку измерений, можно утверждать, что облучение не влияет (или влияет очень слабо) на концентрацию носителей заряда в кремнии, содержащем цирконий.

Не исключено, что в исследованном материале присутствовали активные центры донорного типа, в состав которых входили атомы циркония. Независимо от природы доноров, обусловивших тип проводимости внутренней части слитка, их наличие приводило к компенсации акцепторов, вводимых в запрещенную зону атомами бора. Уровень Ферми при этом находился в верхней половине запрещенной зоны. Согласно теории полупроводников, его положение могло быть оценено из соотношения [4]

$$F = E_d + kT \ln \frac{N_d - N_a}{2N_a},$$

где E_d — глубина залегания донорного уровня, N_d и N_a — концентрации соответственно доноров и акцепторов, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. На рисунке показана расчетная зависимость положения уровня Ферми при температуре 300 К от степени



Изменение положения уровня Ферми в компенсированном кремнии.

1 — положение уровня Ферми в необлученном образце, 2 — в образце, облученном электронами дозой $6.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

компенсации. Как отмечалось выше, в необлученных образцах концентрация свободных электронов, т.е. разность $(N_d - N_a)$, определенная путем измерения эдс Холла, составляла $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Согласно представленной на рисунке зависимости, уровень Ферми в этом случае занимает положение $E_c - 0.44 \text{ эВ}$, т.е. находится ниже донорного уровня. В облученных образцах уровень Ферми мог сместиться до положения $E_c - 0.49 \text{ эВ}$.

В результате облучения в исследованном материале, согласно литературным данным, могли образовываться активные центры: вакансия-атом бора [5] с донорным уровнем $E_v + 0.43 \text{ эВ}$; вакансия-атом кислорода (А-центр), акцепторный уровень $E_c - 0.17 \text{ эВ}$ [6]; а также дивакансии, обладающие донорным $E_v - 0.25 \text{ эВ}$ и акцепторным $E_c - 0.5 \text{ эВ}$ уровнями [7]. Очевидно, что все уровни, как донорные, так и акцепторные, занимающие положение ниже $E_c - 0.44 \text{ эВ}$, оказываются заполненными, а выше этого уровня — свободными. Значит, из четырех активных центров, которые можно ожидать в запрещенной зоне облученных образцов, реально на концентрацию свободных электронов мог оказывать влияние только акцепторный уровень дивакансии. Согласно результатам работы [7] дивакансии в материале с высоким содержанием примеси образуются в меньшем числе, чем другие дефекты. Заметим, что доказательством возникновения при облучении исследованных кристаллов активных центров служит факт резкого уменьшения в облученных образцах величины фотоэффекта, что обусловлено, по-видимому, снижением времени жизни неосновных носителей заряда. Температурные зависимости концентрации электронов в необлученном и облученном быстрыми электронами с энергией 8 МэВ дозой $6.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ образцах в диапазоне $80 \div 300 \text{ К}$ отличались незначительно. Таким образом, концентрация электронов и проводимость материала под воздействием облучения не изменялись или изменялись

очень мало. Исходя из вышеизложенного становится понятной причина, обуславливающая повышение радиационной стойкости кремния в способе, защищенном патентом [8], суть которого заключается в том, что в процессе выращивания монокристаллы кремния одновременно легируются элементами III и V групп Периодической системы. Солнечные батареи, изготовленные из такого материала, оказались более устойчивы к воздействию радиации, чем обычные. Известен также способ повышения радиационной стойкости германия [9], заключающийся в одновременном легировании монокристаллов германия элементами VA и IIA групп, например висмутом и барием или фосфором и кальцием, которые вводились в процессе выращивания. Радиационная стойкость полученных таким образом кристаллов повышалась в $2 \div 3$ раза.

Заметим, что в предыдущих работах [10-12] были описаны методы, позволяющие в значительной степени снизить чувствительность к облучению времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии. Как и в случае, описанном в настоящей работе, стабилизировать время жизни удавалось только в материале, находящемся в метастабильном состоянии. Трудно ожидать, что, используя такой материал, можно изготовить высококачественный радиационностойкий прибор. Для создания радиационностойких полупроводниковых приборов более приемлемы пути, предложенные в работах [13,14].

Список литературы

- [1] И.Н. Белокурова, В.С. Гарнык. Неорг. матер., **29**, 1691 (1993).
- [2] Л.П. Павлов. *Методы измерения параметров полупроводниковых материалов* (М., Высш. шк., 1987).
- [3] Т.В. Машовец. ФТП, **16**, 3 (1982).
- [4] П.С. Киреев. *Физика полупроводников* (М., Высш. шк., 1969).
- [5] В.С. Вавилов, С.И. Винтовкин, А.С. Лютович, А.Ф. Плотников, А.А. Соколова. ФТТ, **7**, 502 (1965).
- [6] G.P. Watkins, J.W. Corbett. *Phys. Rev.*, **121**, 1001 (1961).
- [7] J.D. Konozenko, A.K. Semenyuk, V.J. Khivrich. *Phys. St. Sol.*, **35**, 1043 (1969).
- [8] J. Mandelkorn. Патент США, кл. 585-476, № 3. 390.020 (1968).
- [9] Л.А. Гончаров, Т.Н. Достходжаев, В.В. Емцев, Т.В. Машовец, С.М. Рывкин. А.с. СССР, № 593345, МКИ С30В 29/08 (1976).
- [10] З.В. Башелеишвили, В.С. Гарнык, С.Н. Горин, Т.А. Пагава. ФТП, **18**, 1714 (1984).
- [11] В.С. Гарнык, З.В. Башелеишвили. ФТП, **24**, 1485 (1990).
- [12] В.С. Гарнык. ФТП, **28**, 228 (1994).
- [13] В.С. Гарнык. Электрон. техн. сер. 10. Микроэлектронные устройства (М. ПНИИ «Электроника»), вып. 3(81), 19 (1990).
- [14] В.С. Гарнык. Измер. техника, вып. 1, 61 (1994).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of Fermi level location on radiation resistance of compensated silicon

V.S.Garnyk

A.A.Baikov Institute of Metallurgy, Russian Academy of Sciences, 117 Moscow