

07;13

Образование скрытых проводящих каналов при бомбардировке германия протонами высоких энергий

© Ю.С. Жарких, С.В. Лысоченко, С.А. Лебедь,
О.Г. Кухаренко, Н.Г. Толмачев, О.В. Третьяк

Институт высоких технологий Киевского национального университета
им. Тараса Шевченко, Киев, Украина
E-mail: lys@univ.kiev.ua

Поступило в Редакцию 20 мая 2013 г.

Обнаружено, что при облучении протонами кристаллов германия на установке сканирующего ядерного микроскопа образуются скрытые каналы с высокой дырочной проводимостью. Показано, что механизм модификации материала аналогичен наблюдавшемуся на поверхностях, получаемых механическим раскалыванием образцов. Возникающие при торможении протонов оборванные связи кристаллической решетки играют роль акцепторных центров. Установлено, что значения подвижности в таких каналах близки к реализующимся в монокристаллическом материале. Рассмотренный способ протонного легирования может быть использован для создания высокопроводящих нанофрагментированных слоев и квантовых точек.

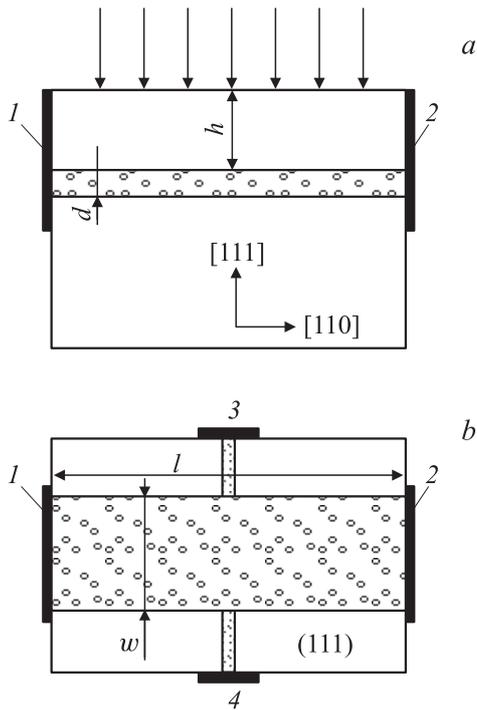
В современной технологии интегральной электроники нашла применение обработка полупроводников пучками протонов, сформированными в ускорителях. При этом основной фактор модифицирования свойств полупроводника связывают с дефектообразованием. Малые дозы облучения приводят к возникновению локальных дефектов кристаллической решетки, а при больших дозах возможно слияние дефектов с образованием пор наноразмерного масштаба. Следует отметить, что процессы формирования нанопористых слоев имплантацией протонов были широко исследованы только в одном материале — кремнии. Это объясняется тем, что такие слои используют в современной технологии „Smart Cut“ для отделения монокристаллической пленки от кремниевой пластины [1]. Отрыв пленки по пористому слою происходит потому, что здесь прочность кристаллической решетки ослаблена оборванными межатомными связями. В рассматриваемом применении

протонной имплантации главная функция оборванных связей (ОС) состоит в их влиянии на механические свойства полупроводникового материала. В то же время ОС могут быть электрически активными центрами, которые влияют на электрофизические характеристики полупроводника. Например, акцепторные свойства ОС были обнаружены при исследовании проводимости поверхностей германия, получаемых сколом [2–5]. В настоящей работе приведены первые результаты исследований проводящих каналов, формируемых протонным облучением германия.

Образцы изготавливали из германия, легированного сурьмой $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и золотом $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Им придавали форму параллелепипедов, в боковые грани которых вплавляли индиевые контакты (см. рисунок). Образец помещали в жидкий азот и измеряли проводимость σ_0 между контактами 1–2. Эта проводимость была низкой $\sigma_0 \approx 10^{-6} \Omega^{-1}$, поскольку легированный глубокой примесью золота германий имел высокое удельное сопротивление $\rho \geq 2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{см}$ при 77 К. Такой материал и условия проведения измерений были выбраны для обнаружения даже небольших измерений проводимости σ_p , возникающей вследствие облучения образца.

После измерений исходной проводимости σ_0 образец помещали в вакуумную камеру мишени установки сканирующего ядерного микронзонда и проводили его облучение по технологии РВМ (Proton Beam Micromachining) [6]. Установка обеспечивала высокую моноэнергетичность ионов — разброс энергий протонов в пучке не превышал 10^{-2} процента при их энергии 1.8 MeV. Диаметр сфокусированного пучка на поверхности образца составлял $55 \mu\text{м}$. Образец облучали при температуре 300 К по точкам (пикселям). Каждый пиксель формировали протонным током $1.7 \cdot 10^{-10} \text{ А}$ при выдержке 8 s, чем обеспечивалась интегральная доза имплантации $3.6 \cdot 10^{-14} \text{ proton} \cdot \text{см}^{-2}$. Образец пошагово перемещали относительно неподвижного пучка протонов так, чтобы создать планарную область с конфигурацией холловского образца (рис. 1, *b*).

Облученные образцы помещали в жидкий азот и продолжали исследования их электрофизических характеристик. Измерения проводимости образца после облучения σ_p между контактами 1–2 показали, что она возросла приблизительно на два порядка по сравнению с исходной σ_0 . Это возрастание проводимости вызвано модифицированием материала при внедрении высокоэнергетичных протонов.



Конструкция образца в разрезах и его ориентация по кристаллографическим направлениям. $h \approx 30 \mu\text{m}$ — глубина залегания, $d \approx 2 \mu\text{m}$ — толщина, $l = 5500 \mu\text{m}$ — длина и $w = 55 \mu\text{m}$ — ширина проводящего канала, 1–2 и 3–4 — контакты для измерения проводимости и напряжения Холла соответственно. Направление имплантации протонов показано стрелками (а).

Обычной практикой ионного легирования является проведение постимплантационного отжига. Для прогревов материала в области канала нами применялось тепловое действие электрического тока. Установлено, что при достижении подводимой к контактам 1–2 электрической мощности $P \geq 10 \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ проводимость σ_p необратимо увеличивается. Этот эффект был исследован при подаче на образец серии импульсов напряжения длительностью 3 с с подводимой мощностью $P \geq 200 \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Импульсы из начала серии приводили к последовательному возрастанию проводимости отожженных образцов

σ_{pt} , так что она возростала на порядок. Далее импульсы уже не вызвали существенных изменений величины σ_{pt} . Максимальное значение удельной проводимости при выбранной дозе облучения составляло $\sigma_{\max} \approx 10^{-2} \Omega^{-1} / \square$.

Обсуждая полученные результаты, можно предположить, что, как и в кремнии, легкие ионы водорода не формируют в германии сложных радиационных комплексов, а приводят к локальным разрушениям кристаллической решетки с возникновением ОС [1]. Дефектообразование происходит наиболее интенсивно в конце тормозного пути протона. Распределение дефектов по глубине германиевого образца, рассчитанное нами по программе SRIM [6], показало, что слой с максимальной плотностью дефектов находится на глубине $h \approx 30 \mu\text{m}$, а толщина его $d \approx 2 \mu\text{m}$. То, что слой тонкий, обусловлено малым разбросом глубин пробега протонов (страглингом) из-за незначительного различия их энергий (менее 200 eV). Поскольку модифицирование материала протонным пучком происходит в основном в этом слое, то и появление проводимости σ_p связано с возникновением здесь проводящего канала (см. рисунок). Холловскими исследованиями было установлено, что проводимость σ_{pt} в области максимума осуществляется свободными дырками с концентрацией $\Gamma_p \approx 5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$ и подвижностью $\mu_{pt} \approx 10^4 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Такие значения подвижности близки к реализующимся в объеме германия. Дырочный тип проводимости канала свидетельствует о том, что ОС, образующиеся под поверхностью образца при бомбардировке протонами, являются такими же акцепторными центрами, как ОС на сколотой поверхности германия [2–5].

Измерения Γ_p и μ_{pt} в области значений σ_{pt} , близких к максимуму, показали, что возрастание проводимости при отжигах обусловлено пропорциональным увеличением концентрации дырок Γ_p в канале от $\Gamma_p = 2 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$ до $\Gamma_p = 5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$ при неизменной их подвижности $\mu_{pt} \approx 1.1 \cdot 10^4 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Это свидетельствует о том, что прогревы приводят к возрастанию плотности ОС в области, насыщенной протонами. Механизм увеличения числа оборванных связей в данном случае может быть таким же, как хорошо изученный в технологии „Smart Cut“. Действительно, плотность протонов, внедренных в область канала, была более 10^{18}cm^{-3} , что намного превышает предельно возможную растворимость водорода в германии ($\sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$). Поэтому здесь образуются поры наноразмерного масштаба, заполненные

водородом под высоким давлением. Давление становится еще большим при повышении температуры области канала во время прогревов. Это приводит к увеличению размеров пор за счет разрыва межатомных связей кристаллической решетки. Размеры изменяются анизотропно: преимущественный рост пор происходит вдоль плоскости (111), которая в германии является плоскостью легкого скалывания [2]. По мере роста соседние поры сливаются. Проводимость канала достигает своего предельного значения σ_{pt} после того, как исчерпываются возможности возникновения ОС за счет разрастания нанопор. При этом заканчивается формирование области скрытого расслоения под поверхностью образца. Она состоит из параллельных участков плоскостей (111), которые распределены по толщине канала таким же образом, как были распределены исходные поры. На переходах от одного участка к другому возникают ступени, на краях которых остаются ненасыщенные ОС. Захватывая электроны, они приводят к появлению дырочной проводимости, так же как на механически сколотой поверхности германия [3–5].

Оборванные ковалентные связи химически активны. При взаимодействии с окружающей средой они насыщаются и перестают выполнять функцию акцепторов. Скорость этого процесса определяется условиями доступа и активностью среды. Так, проводимость открытой механически сколотой поверхности исчезает после выдерживания образца на воздухе в течение нескольких секунд [3]. В нашем случае проводимость канала мало изменялась при выдерживании образца в атмосфере лаборатории (300 К) в течение трех суток, а затем постепенно падала до нуля на протяжении более десяти суток. Относительно большое время релаксации проводимости может быть связано с затруднением доступа воздуха к скрытому в объеме образца каналу. Более вероятной причиной насыщения оборванных валентностей является их взаимодействие с химически активным водородом, внедренным при протонной имплантации [1]. Реакция имеет активационный характер и практически не протекает при 77 К. Этот вывод следует из того установленного факта, что проводимость канала оставалась практически неизменной при хранении образцов в жидком азоте в течение месяца.

Акцепторные свойства оборванных связей были обнаружены при разных способах разрушения кристаллической решетки германия, например, при расколе образцов в разных средах (жидких азоте и гелии, вакууме) [2–5] или при мельничном дроблении материала в порошок [7].

Во всех случаях поверхностная плотность акцепторных центров была одного порядка ($\approx 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), а отличия в подвижности дырок были намного больше: от $\mu \approx 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ в канале, сформированном протонами, до $\mu_{pt} \approx 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ в канале на сколотой поверхности. Это свидетельствует о том, что способ разрыва связей слабо влияет на поверхностную плотность акцепторных центров, но условия переноса дырок могут существенно различаться. Так, у сколотой поверхности дырки зажаты в тонком канале ($\approx 10^{-2} \mu\text{m}$) и поэтому эффективно рассеиваются на поверхностных заряженных центрах [2,3,5].

Отметим, что примененную нами протонную обработку полупроводника можно рассматривать как специфичный способ ионного легирования. В отличие от обычной технологии, функцию легирующих центров выполняют не внедренные атомы (протоны), а сопутствующие внедрению дефекты кристаллической решетки (ОС). Ввиду большой проникающей способности хорошо сфокусированного пучка протонов, этот способ применим для создания в глубине полупроводника проводящих областей низкой размерности (двумерных каналов, одномерных шнуров, квантовых точек).

Список литературы

- [1] Козловский В.В., Козлов В.А., Ломасов В.Н. // ФТП. 2000. Т. 34. В. 2. С. 129–147.
- [2] Dobrovolskii V.N., Zharkikh Yu.S. // Phys. Stat. Sol. 1971. V. 6a. N 2. P. 655–663.
- [3] Жарких Ю.С., Лысоченко С.В. // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31. В. 12. С. 753–756.
- [4] Вул Б.М., Заварицкая Э.И. // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31. В. 3. С. 177–180.
- [5] Zharkikh Yu.S., Lysochenko S.V. // Surf. Sci. 1986. V. 177. P. 615–624.
- [6] Лебедь С.О., Кухаренко О.Г., Толмачев М.Г. и др. // Вопросы атомной науки и техники: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2012. Т. 81. № 5. С. 131–138.
- [7] Овсянников Д.А., Попов М.Ю., Буга С.Г. // Труды МФТИ. 2012. Т. 4. № 3. С. 36–43.