

Аномальная растворимость имплантированного азота в кремнии, сильно легированном бором

© Д.И. Тетельбаум[¶], Е.И. Зорин, Н.В. Лисенкова

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 30 октября 2003 г. Принята к печати 3 декабря 2003 г.)

Установлено, что в кремнии, предварительно сильно легированном бором с помощью ионной имплантации, при последующей „горячей“ имплантации азота имеет место аномально высокая концентрация электронов, которая может превышать концентрацию бора. Предложена модель этого явления, основанная на реакции вытеснения бора из узлов решетки собственными межузельными атомами кремния и последующего замещения атомами азота (донорными центрами).

1. Введение

Известно, что азот, в отличие от других донорных примесей V группы, в кремнии обычно обладает низкой растворимостью в узлах решетки и при обычной ионной имплантации не обеспечивает концентрацию носителей (электронов) выше $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [1]. Вместе с тем имеется работа [2], которая указывает на возможность гораздо более высокой растворимости и электрической активности азота. В этой работе методом окрашивания *n-p*-перехода установлено, что при ионной имплантации азота в сильно легированный бором Si удается создавать *n-p*-переходы даже при концентрациях бора более 10^{20} см^{-3} . Данный факт мог указывать на то, что растворимость азота в узлах резко возрастает в присутствии бора. К сожалению, эта давняя работа никем не была повторена. Следует отметить, что метод окрашивания не является прямым и не дает информации о концентрации электронов в легированных слоях. Контраст при окрашивании мог быть следствием нейтрализации бора, например, вследствие образования комплексов B-N и образования *n*-слоя с невысокой концентрацией электронов. В работе [3] было найдено, что при двойной имплантации — бора и азота — могут быть достигнуты аномально высокие концентрации электронов в области локализации атомов бора, причем объемные концентрации электронов и атомов бора были одного порядка величины. В этой работе имплантация обеих примесей проводилась при комнатной температуре, а профили распределения бора и азота непосредственно после имплантации были существенно различными. Результаты интерпретировались на основе представления о донорных свойствах преципитатов Si_3N_4 , а не атомов азота в узлах решетки.

Нами показано, что при определенных условиях концентрация электронов в случае двойной имплантации бора и азота может существенно превышать концен-

трацию бора, а также предложено объяснение этого явления, основанное на реакции Уоткинса [4].

Возможность получения высоких концентраций при ионном облучении азотом имела бы практическое значение, так как по понятным причинам азот (при прочих равных условиях) предпочтительнее фосфора или мышьяка при легировании донорами методом ионной имплантации. Особое значение это может иметь при легировании нанокристаллов Si, например, с целью усиления их люминесцентных свойств для оптоэлектроники [5,6], когда необходимы высокие концентрации примесей.

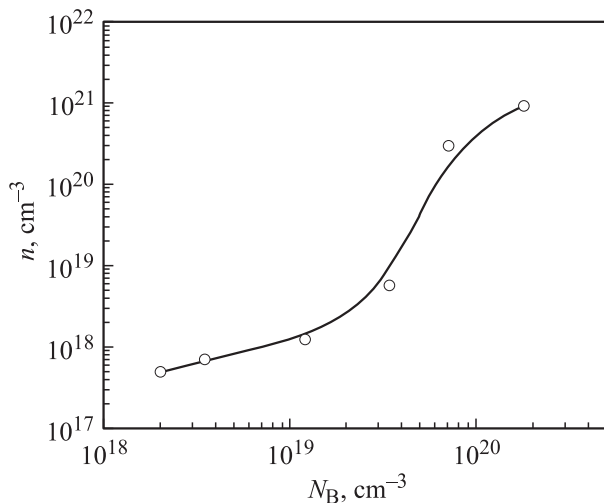
2. Методика эксперимента

Кремний *p*-типа ($15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), выращенный методом Чохральского, подвергался стандартной обработке. Затем проводилась ионная имплантация бора с энергией $E = 40 \text{ кэВ}$ и дозами $\Phi = 3 \cdot 10^{13} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. После этого образцы нагревались до 650°C , и проводилась имплантация ионов азота с $E = 40 \text{ кэВ}$ и Φ в 10 раз больше соответствующей дозы ионов бора. Затем образцы отжигались при 800°C (30 мин) в атмосфере аргона. Средние концентрации имплантированных атомов бора и носителей заряда в имплантированном слое после двойной имплантации рассчитывались путем деления дозы и холловской слоевой концентрации носителей заряда, соответственно, на $R_p + \Delta R_p$, где R_p — пробег ионов бора или азота, ΔR_p — страгглинг.

3. Результаты и их обсуждение

На рисунке приведена зависимость средней концентрации носителей заряда (электронов) n в образцах после двойной имплантации от средней концентрации имплантированного бора N_B . Как следует из этой зависимости, концентрация электрически активного азота растет с увеличением концентрации бора, достигая при больших N_B значений более 10^{20} см^{-3} . Примечательно,

[¶] E-mail: Tetelbaum@phys.unn.ru
Fax: (8312) 65 93 66



Зависимость концентрации носителей заряда (n) от средней концентрации имплантированного бора (N_B) при двойной имплантации кремния.

что величины n при больших значениях N_B превосходят концентрацию бора.

Мы предлагаем следующую модель аномального поведения азота при „горячей“ имплантации в сильно легированный бором Si. Известно [4], что при облучении кремния атомы бора, растворенные в узлах, испытывают реакцию Уоткинса — вытеснение из узлов собственными межузельными атомами (СМА) кремния. Эта реакция протекает, в частности, при повышенных температурах ($> 600^\circ\text{C}$) и является причиной ускоренной диффузии бора при отжиге имплантированного кремния [7]. Во время отжига имплантированных бором образцов источниками СМА служат запасенные во время имплантации комплексы дефектов. При ионном облучении азотом также генерируются СМА наряду с вакансиями. Можно предположить несколько „сценариев“ влияния реакции Уоткинса на концентрацию атомов азота в узлах (т. е. концентрацию доноров).

1. Межузельные атомы азота входят в узлы решетки, вставая на место вакансий. Чем выше мгновенная концентрация последних (N_V), тем больше вероятность замещения азотом узлов. Так как в присутствии высокой концентрации бора часть СМА, которые способны рекомбинировать с вакансиями, расходуется на реакцию Уоткинса, это приводит к возрастанию N_V .

2. Реакция Уоткинса включает в себя две стадии: выход атома бора из узла и замещение образовавшейся вакансии кремнием. На второй стадии атомы азота могут вступать в конкуренцию с СМА за замещение вакансии, и часть их входит в узлы.

3. Не исключен прямой обмен местами между атомами азота в междоузлиях и атомами бора в узлах (аналог реакции Уоткинса).

4. Образование нейтрального комплекса $[B(\text{узел}) + N(\text{узел})]$ с последующим уходом (за счет

реакции Уоткинса) бора из узла, что приводит к появлению донорного центра $N(\text{узел})$.

Поскольку для каждого атома бора выход в междоузлие и последующее осаждение в узел могут повторяться многократно, этот атом способен создавать „посадочные места“ для нескольких атомов азота, поэтому концентрация доноров может превысить концентрацию бора.

Конечно, полученное пересыщенное состояние твердого раствора азота в узлах является метастабильным. Степень его стабильности нуждается в специальном исследовании. Во всяком случае, в наших условиях состояние с высокой концентрацией электронов после имплантации сохраняется.

4. Заключение

Полученные результаты примечательны в нескольких отношениях. Во-первых, они показывают, что при двойной ионной имплантации генерация дефектов и их реакции с примесными атомами влияют на результирующее местоположение примесных атомов в решетке и, следовательно, на концентрацию носителей заряда. В частности, при этом может достигаться аномально высокая концентрация примесей в узлах. Во-вторых, можно сделать вывод, что низкая эффективность легирования азотом при обычной ионной имплантации обусловлена не особенностями строения электронной оболочки атома (по сравнению с другими элементами подгруппы), потенциально влияющими на донорные свойства, а малой растворимостью этого элемента в узлах. Увеличение концентрации азота в узлах позволяет сделать азот столь же (если не более) эффективным донором, как фосфор или мышьяк. В-третьих, использование найденного эффекта открывает интересную перспективу использования ионной имплантации азота в электронной технике, например, для модификации люминесцентных свойств наноструктурированных систем. (До сих пор ионная имплантация азота в кремний применялась в основном для синтеза слоев Si_3N_4 при создании структур кремний-на-изоляторе).

Список литературы

- [1] P.V. Pavlov, E.I. Zorin, D.I. Tetelbaum, A.F. Khokhlov. Phys. St. Sol., **35** (1), 11 (1976).
- [2] W.J. Kleinfelder, W.S. Johnson, J.F. Gibbons. Can. J. Phys., **46**, 597 (1968).
- [3] Г.А. Качурин, И.Е. Тысченко. ФТП, **27**, 1194 (1993).
- [4] В.С. Вавилов, А.Е. Кив, О.Р. Ниязова. *Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках* (М., Наука, 1981).
- [5] Д.И. Тетельбаум, И.А. Карпович, М.В. Степихова, В.Г. Шенгуров, К.А. Марков, О.Н. Горшков. Поверхность, **5**, 31 (1998).
- [6] D.I. Tetelbaum, S.A. Trushin, V.A. Burdov, A.I. Golovanov, D.G. Revin, D.M. Gaponova. Nucl. Instrum. Meth., **B174**, 123 (2001).

- [7] P.A. Stolk, H.-J. Gossmann, D.I. Eaglesham, D.C. Jacobson, C.S. Rafferty, G.H. Gilmer. *J. Appl. Phys.*, **81**, 603 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

Anomalous solubility of nitrogen implanted in silicon strongly doped by boron

D.I. Tetelbaum, E.I. Zorin, N.V. Lisenkova

Physicotechnical Research Institute
of the University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract It has been established that in silicon, previously highly doped with boron by the ion implantation, under subsequent „hot“ nitrogen implantation there is an anomalously high concentration of electrons that may exceed the concentration of boron. Model of this phenomenon is suggested based on the reaction of boron displacement from the lattice sites by intrinsic interstitial silicon with subsequent substitution by nitrogen atoms (donors).