

ПОСЛОЙНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ И ИЗБИРАТЕЛЬНОГО СМАЧИВАНИЯ

Л. Ф. Бахтурова, В. В. Баковец, И. П. Долговесова, Б. М. Аюпов

Институт неорганической химии Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, Новосибирск, Россия
(Получена 22.07.1992. Принята к печати 1.10.1992)

Методами многоугольной эллипсометрии (длина волны света 632.8 нм) и избирательного смачивания получены профили изменения показателя преломления, коэффициента экстинкции и контактного угла смачивания поверхности при послойном удалении кремния, имплантированного ионами $^{40}\text{Ag}^+$ (доза 10^{15} см $^{-2}$) и $^{31}\text{P}^+$ (доза 10^{16} см $^{-2}$) с энергией 40 кэВ. Авторы считают, что изменение коэффициента поглощения и угла смачивания по глубине имплантированного образца соответствует профилю распределения дефектов. Профиль изменения показателя преломления обусловлен совместным влиянием дефектов и имплантированной примеси.

Введение. Имплантация ионов широко используется для изменения свойств полупроводниковых материалов. В результате имплантирования ионов в полупроводник в зависимости от дозы, энергии, плотности потока и типа ионов, а также температуры подложки в объеме полупроводника возникает то или иное распределение примесей — ионов и вызванных ими дефектов. Максимумы распределений дефектов и имплантированных примесей, как правило, не совпадают. В предположении, что эти распределения описываются функцией Гаусса, можно рассчитать теоретические величины, соответствующие максимумам профилей распределений [1]. В реальных системах имеет место диффузия дефектов в глубь образца и к поверхности. Некоторые авторы считают, что правильное даже говорить не об одиночных дефектах, а о кластерах дефектов [2, 3]. Очевидно, что чем меньше размер кластеров, тем они более подвижны. Поверхность является местом стока дефектов, поэтому спустя некоторое время равновесное распределение дефектов характеризуется наличием двух максимумов — в глубине образца и вблизи его поверхности. Что же касается профиля имплантированных примесей, то для него характерно наличие одного максимума в глубине образца с концентрацией имплантированных примесей, на несколько порядков большей, чем на поверхности [4].

Для восстановления профиля распределения дефектов по объему используют послойное удаление имплантированной части подложки. В [5] слои удаляли ионным распылением, а в [6, 7] — растворением предварительно полученного анодного окисла. Необходимо иметь в виду, что при этом каждый раз исследуется вновь образованная поверхность, которая вносит возмущение в реальный профиль, и каждый раз происходит некоторое перераспределение дефектов. Разупорядоченный приповерхностный слой служит стоком для дефектов из объема полупроводника [3, 8]. Закреплению подвижных дефектов у поверхности может способствовать повышенная концентрация неконтролируемых примесей.

Для исследования ионно-имплантированных образцов используют разные методы, каждый из них имеет свои ограничения. Измеряемые величины связаны с реальным распределением дефектов и примесей, поэтому для получения достоверного представления необходимо сочетание разных методов. Нами для изучения ионно-имплантированного кремния использованы методы избирательного смачивания и эллипсометрии.

Величина измеряемого угла смачивания определяется свойствами поверхностного мономолекулярного слоя вещества. Известно, что смачиваемость поверхности кремния после облущения ионами изменяется [9]. Ранее [10] метод избирательного смачивания был применен к исследованию кремния, имплантированного ионами V^+ и Ag^+ .

Для исследования использованы пластины кремния p -типа проводимости (фирмы Wacker, ФРГ), $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, ориентации (111), имплантированного ионами $^{40}Ag^+$ (в дозах 10^{12} и 10^{15} см^{-2}) и ионами $^{31}P^+$ (в дозах 10^{12} и 10^{16} см^{-2}). Имплантацию проводили при комнатной температуре ионами с энергией 40 кэВ и плотностью тока $1-5 \text{ мкА/см}^2$.

Имплантированную часть кремния удаляли послойно последовательным анодным окислением и растворением образовавшегося окисла разбавленной фтористоводородной кислотой. После каждого шага удаления слоя выполняли измерения на поверхности методами избирательного смачивания и эллипсометрии. Причем измерения эллипсометрических параметров выполняли на поверхности образца с анодным окислом и сразу же после его удаления. Эллипсометрические параметры ψ и Δ измеряли на эллипсометре ЛЭФ-2 (длина волны света 632.8 нм) для нескольких углов падения света на образец ($50, 60, 70, 75, 80^\circ$).

Измерения контактного угла смачивания выполняли на поверхности, свежеработанной раствором HF для уменьшения влияния естественного окисла на результаты. Для измерения использовали систему диэтиловый эфир—вода.

О результатах исследования кремния, имплантированного ионами Ag^+ и P^+ при малых дозах ($\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$), сообщено ранее [11]. В [12] приведены некоторые результаты, полученные для кремния, имплантированного ионами Ag^+ и P^+ при больших дозах.

В общем случае параметры поляризации отраженного света (ψ и Δ) зависят от угла падения света на образец, толщины и показателя преломления слоя окисла и распределения оптических параметров подложки по глубине — показателя преломления (n) и коэффициента экстинкции (k). Измеренные эллипсометрические параметры являются интегральными в том смысле, что содержат информацию о свойствах некоторого объема исследуемого образца, размеры которого определяются глубиной проникновения света, которая в свою очередь может меняться при послойном травлении от шага к шагу вследствие изменения величины коэффициента поглощения подложки.

Для получения расчетных профилей изменения n и k (дифференциальных значений) по глубине образца иногда ограничиваются измерениями эллипсометрических параметров только на поверхности имплантированного образца. Такой подход допустим, если имеется информация о профилях в объеме, полученная какими-либо другими методами. Критерием правильности подбора оптических параметров, характеризующих имплантированный образец, служит совпадение рассчитанных и экспериментальных величин ψ и Δ . Например, в [7] профили n и k представлялись комбинацией двух гауссовых кривых. Авторы принимали, что k сравнительно мал и все слои имплантированного объема вносят соизмеримые вклады в измеряемые на поверхности величины. Но, как правило, k для имплантированных слоев сильно возрастает, и однозначно определить профиль изменения комплексного показателя преломления из измерений только на поверхности невозможно, за исключением случая полной аморфизации

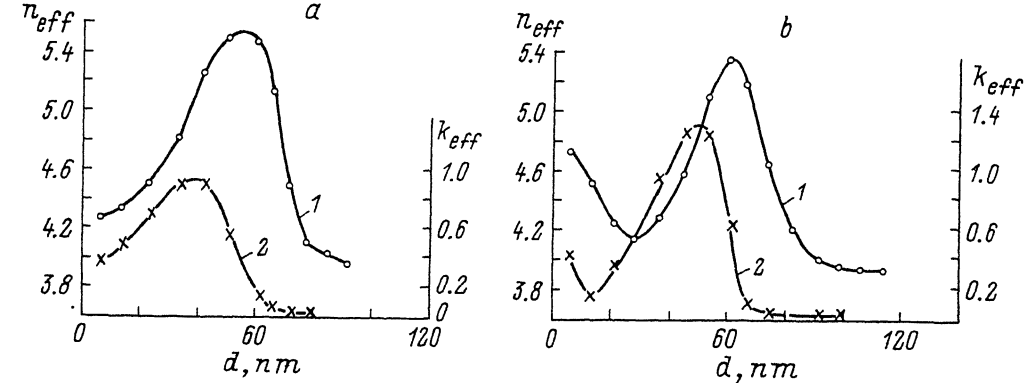


Рис. 1. Изменение эффективных параметров подложки n_{eff} (1), k_{eff} (2) при послойном удалении кремния, имплантированного ионами Ag^+ (а), P^+ (б). d — толщина удаленного слоя кремния.

приповерхностного слоя [13]. Толщины аморфных слоев авторы рассчитывали, используя предварительно определенные оптические параметры аморфизованного имплантированного полупроводника.

От интегральных величин ψ и Δ , измеренных при последовательном удалении слоев, можно перейти к оптическим параметрам этих отдельных имплантированных слоев — дифференциальным n и k [14]. Для получения искоемых величин вначале по однослойной модели (окисел — нарушенная подложка) для каждого шага травления решением обратной задачи эллипсометрии определяли эффективные оптические параметры подложки (оставшейся ее части) и толщину окисла (рис. 1).

Однозначное решение обратной задачи эллипсометрии с тремя неизвестными из одного набора экспериментальных данных невозможно. Для уменьшения неопределенности используют ряд допущений. В [15–17] принимали, что показатели преломления анодного и естественного окислов равны между собой. Некоторые авторы считают, что толщина окисла одинакова для имплантированного и неимплантированного полупроводников и постоянна по глубине имплантированного слоя [15, 18]. В [17] предложено принять постоянной по всей глубине имплантированного слоя величину коэффициента поглощения подложки. Хотя физически это справедливо только в случае полной аморфизации приповерхностной области, интересно отметить, что расчеты, выполненные нами по однослойной модели с различными фиксированными значениями k подложки,

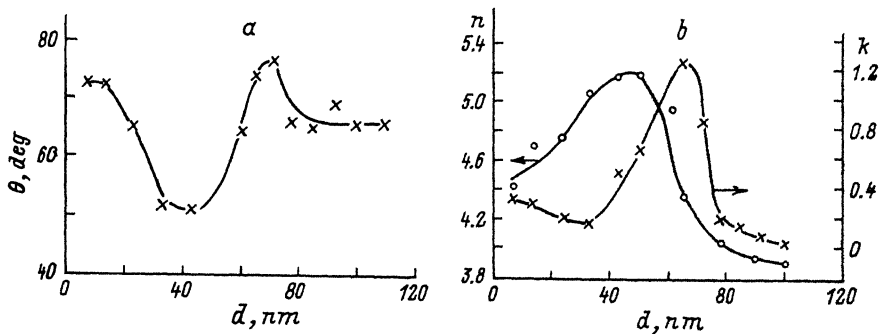


Рис. 2. Изменение угла смачивания θ (а) и оптических параметров n и k (б) поверхностных слоев кремния, имплантированного ионами Ag^+ , по мере продвижения в глубь образца. d — толщина удаленного слоя кремния.

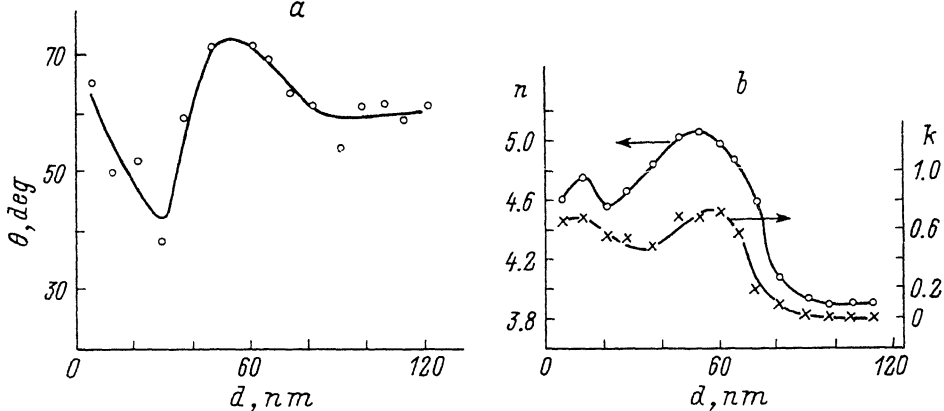


Рис. 3. Изменение угла смачивания поверхности θ (а) и оптических параметров n и k (б) поверхностных слоев кремния, имплантированного ионами P^+ , по мере продвижения в глубину образца.

приводили к одному и тому же профилю изменения эффективного показателя преломления подложки n_{eff} . Иначе говоря, профиль изменения эффективного показателя преломления подложки можно определить, решая задачу по однослойной модели с двумя неизвестными n_{eff} и d_{ox} (толщина окисла) при некоторых фиксированных значениях эффективного коэффициента экстинкции подложки k_{eff} . Этот расчет носит вспомогательный характер, так как получаемые значения толщины окисла условны, и его результаты (значения n_{eff}) можно использовать в дальнейших расчетах при определении k_{eff} и d_{ox} .

Показатель преломления окисла, анодного и естественного, принимали равным 1.46. Кроме того, при расчете эффективных оптических параметров мы искали такое решение, которое бы удовлетворяло измерениям на поверхности с естественным и анодным окислом для каждого шага травления. Подобный способ решения обратной задачи эллипсометрии рассматривается в [19]. Толщину удаленного слоя кремния рассчитывали как $d_{\text{ox}} \cdot 0.41$ [7]. Причем учитывали как толщину анодного, так и толщину естественного окислов.

Оптические параметры отдельных имплантированных слоев (n и k) находили решением обратной задачи эллипсометрии с двумя неизвестными по двухслойной модели (окисел—единичный имплантированный слой—нарушенная подложка). Для каждого шага (N) травления эффективные параметры подложки и толщину имплантированного слоя брали из расчетов по однослойной модели для $(N+1)$ -го шага (рис. 1). Машинное моделирование решения подобной задачи дано в [20].

Результаты и обсуждение

На рис. 2, 3 приведены результаты измерения контактного угла смачивания θ и величин n и k для имплантированных слоев по мере продвижения в глубину образцов кремния, имплантированных ионами Ag^+ и P^+ . Из рисунков видно, что профили изменений θ , n и k имеют сложный характер, причем профили θ и k идентичны друг другу по положению максимумов и минимумов при имплантировании ионами как Ag^+ , так и P^+ . Литературные данные о связи n и k с реальными профилями примесей и дефектов противоречивы. Например, в [5] утверждается, что измерение профиля k является прямым измерением профиля дефектов. Авторы [15] предполагают, что оптические параметры кремния не зависят от концентрации примесей ионов (Ag^+ и P^+), а связаны с образованием аморфной фазы в имплантированном кремнии, т. е. с дефектами. Авторы [16]

считают, что оптические параметры повторяют профиль радиационных дефектов в имплантированном слое. С большой определенностью можно утверждать, что для образцов кремния, имплантированных ионами Ag^+ , профиль изменения угла смачивания θ совпадает с концентрационным профилем распределения дефектов в имплантированном слое. Исходя из этого, мы полагаем, что совпадение положения максимумов и минимумов кривых θ и k для образцов, имплантированных ионами P^+ , указывает на то, что и в этом случае изменение величин θ и k по глубине имплантированной области в основном определяется распределением дефектов. Увеличение k для имплантированных образцов связано с затуханием света на образующихся дефектах. Что же касается n , то эта величина может изменяться как от наличия дефектов, так и от наличия имплантированных ионов — примесей. Если учесть, что профиль примесей смещен в глубь образца по сравнению с профилем дефектов и характеризуется наличием одного максимума в отличие от профиля дефектов, можно объяснить сложный характер профиля n тем, что по мере продвижения в глубь образца возрастает влияние имплантированной примеси на величину n .

Выводы. 1. Образцы кремния, имплантированного ионами $^{40}\text{Ag}^+$ (доза 10^{15} см^{-2}) и ионами P^+ (доза 10^{16} см^{-2}) с энергией 40 кэВ, исследованы методами многоугловой эллипсометрии и избирательного смачивания при последнем удалении имплантированной части с помощью анодного оксидирования. При имплантации ионами Ag^+ максимумы экспериментально полученных профилей θ , n и k лежат ближе к поверхности, чем при имплантации P^+ , что можно объяснить большей массой ионов Ag^+ [2] и несколько меньшей дозой имплантации, чем для P^+ .

2. Профили θ и k идентичны друг другу при имплантации как ионами Ag^+ , так и P^+ и соответствуют профилю распределения дефектов в имплантированном слое. Профиль изменения n , вероятно, обусловлен совместным влиянием дефектов и внедренной примеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей, 350. Минск (1980).
- [2] В. В. Юдин, И. Л. Ерохин, А. Б. Терешина, Л. И. Шашкова. Электрон. техн., сер. 2. Полупроводн. приборы, вып. 10 (102), 85 (1975).
- [3] Е. К. Баранова, В. М. Гуреев, Ю. В. Мартыненко, К. В. Старинин. ФТП, 13, 2017 (1979).
- [4] Е. И. Зорин, П. В. Павлов, Д. И. Тетельбаум. Ионное легирование полупроводников, 288. М. (1978).
- [5] Z. Shuzhi, W. Ai-jian, T. Chun-yu, X. Yue-yuan, L. Zhen-huan, Z. Zhaolin, W. Yihua, C. Lu, L. Jia-rui, Z. Zong-shuang, Z. Peiran. Vacuum, 39, 147 (1989).
- [6] А. С. Мардежов, В. Г. Серяпин, В. А. Швец. ФТП, 22, 1306 (1988).
- [7] J. R. Adams, N. M. Bashara. Surf. Sci., 49, 441 (1975).
- [8] В. Н. Гаштольд, Н. Н. Герасименко, А. В. Двуреченский, Л. С. Смирнов. ФТП, 9, 835 (1975).
- [9] А. С. Валеев, Г. И. Шаповалов. Электрон. техн., сер. 3, Микроэлектроника, вып. 2 (50), 97 (1974).
- [10] Н. Н. Лебедева, В. В. Баковец, Е. А. Седьмова, Н. Б. Придачин. Изв. АН СССР, Неорг. матер., 22, 1602 (1986).
- [11] В. В. Баковец, Л. Ф. Бахтурова, И. П. Долговесова, Б. М. Аюпов. Электрон. техн., сер. 6, Материалы, вып. 7 (261), 18 (1991).
- [12] В. В. Баковец, Л. Ф. Бахтурова, И. П. Долговесова, Б. М. Аюпов. В кн.: Тез. VIII Всес. конф. по росту кристаллов, 1, 55. Харьков (1992).
- [13] T. Lohner, G. Mezey, E. Kotai, F. Pasztl, A. Manuaba, J. Gyulai. Nucl. Instrum. Meth., 209/210, 615 (1983).
- [14] А. С. Мардежов, В. Г. Серяпин, Р. И. Любинская, К. К. Свитащев, Л. С. Смирнов, А. И. Семенов. ФТП, 13, 2347 (1979).
- [15] K. Nakamura, T. Gotoh, M. Kamoshida. J. Appl. Phys., 50, 3985 (1979).
- [16] А. С. Яковлев, Г. Н. Кузнецова, М. А. Еремеева. Поверхность, вып. 7, 64 (1984).
- [17] С. В. Степанова, М. С. Финарев. Поверхность, вып. 8, 36 (1982).
- [18] В. И. Браерская, С. Г. Неделько, В. А. Одарич, М. В. Хищенко. УФЖ, 30, 1397 (1985).

[19] Э. Е. Дагман. Опт. и спектр., 66, 174 (1989).

[20] Э. Е. Дагман, Р. И. Любинская, А. С. Мардезов, К. К. Свиташев, А. И. Семенов, В. А. Швец.
УФЖ, 29, 187 (1984).

Редактор Л. В. Шаронова
