

УДК 621.315

Профили концентрации и оптические константы ионно-имплантированных пленок соединений халькогенидов элементов первой группы

Г. А. Мустафаев, Д. Г. Мустафаева, М. Г. Мустафаев

Проведено исследование профилей концентрации и оптических констант ионно-имплантированных пленок соединений халькогенидов элементов первой группы. Основными параметрами, определяющими относительные пробеги частиц в пленке материалов, являются атомный номер и масса бомбардирующих частиц и атомов мишени. Оптические константы облученных поверхностей пленок соединений халькогенидов элементов первой группы изменяются по сравнению с исходными значениями, причем их изменения тем больше, чем выше доза облучения и чем тяжелее внедряемые ионы. Минимальная доза, необходимая для изменения оптических констант, с уменьшением массы иона увеличивается, показатель преломления увеличивается, коэффициент экстинкции уменьшается. Показано, что максимум концентрационного профиля ионно-имплантированной примеси смещается к поверхности с увеличением порядкового номера и атомного веса внедренного иона. Профили концентрации по глубине хорошо согласуются с теоретическими выводами о положении и распределении имплантированных ионов.

PACS: 73.61.Le

Ключевые слова: пленка, профиль, облучение, оптические константы, концентрация, доза, дефект, ион, параметр, свойства, показатель преломления, коэффициент экстинкции.

Введение

Исследование влияние ионного облучения на свойства пленок различных соединений важно для решения задач разработки и применения приборных структур и приборов на их основе, а также для направленного изменения их свойств. Применение ионно-лучевой технологии к соединениям халькогенидов элементов первой группы связано с возможностью создания на их основе эффективных источников тока и фотопреобразователей.

Информацию об энергетическом спектре носителей заряда можно получить, изучая механизмы взаимодействия электромагнитных волн с кристаллом, в частности, носителями заряда, совершающими переходы между зонами, свободными

носителями заряда в пределах одной зоны и носителями заряда, совершающими переходы между зонами и примесными уровнями. Наиболее полезные сведения дают исследования поглощения, обусловленного межзонными переходами и свободными носителями заряда. Вызванные светом межзонные переходы приводят к появлению в спектре поглощения характерных порогов поглощения при энергии кванта света, равной минимальной энергии перехода.

Целью данной работы являлось исследование профилей концентрации и оптических констант ионно-имплантированных пленок соединений халькогенидов элементов первой группы.

Профили концентрации ионно-имплантированной примеси в пленках соединений

Основными параметрами, определяющими относительные пробеги частиц в пленке материалов, являются атомный номер и масса бомбардирующих частиц и атомов мишени.

Облучение производилось хорошо коллимированным пучком ионов перпендикулярно к по-

Мустафаев Гусейн Абакарович, профессор.
Мустафаева Джамиля Гусейновна, доцент.
Мустафаев Марат Гусейнович, ассистент.
Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет).
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.
E-mail: dzhamilya79@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.

© Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г., 2016

верхности мишени, и количество частиц в каждом слое, параллельном поверхности, характеризует распределение ионов вдоль начального пути частиц или проекции пробегов на это направление. Наиболее важными характеристиками глубинного распределения ионов являются средний проецированный пробег ионов и среднее квадратичное отклонение (страгглинг) проецированных пробегов.

Значения характеристик энергий ионов ε , рассчитанные согласно [1], для соединений халькогенидов элементов первой группы при энергии облучения 100 кэВ находятся в пределах $0,8 < \varepsilon < 5,0$. Поэтому можно использовать приближенные формулы, предложенные в [2] для среднего проецированного пробега и среднее квадратичное отклонение проецированных пробегов.

Рассчитанные концентрационные профили ионно-имплантированной примеси представлены на рис. 1. Они показывают, что с увеличением порядкового номера и атомного веса внедренного иона при облучении максимум профиля внедренной примеси смещается к поверхности.

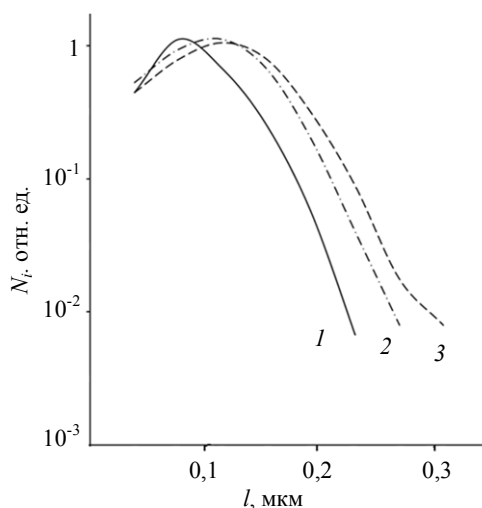


Рис. 1. Расчетные профили концентрации легирующей примеси N_i по глубине проникновения l : 1 — фосфор, 2 — кислород, 3 — азот.

Процесс ионного легирования проводился на базе ионно-лучевой установки типа «Везувий». Образцы облучали ионами азота, кислорода и фосфора с энергией 100 кэВ. Температура исследуемых образцов при воздействии ионных пучков не превышала комнатной и ее контролировали термпарой.

Для снятия профилей концентрации ионно-имплантированной примеси в пленках соединений халькогенидов элементов первой группы применяли анализ одного и того же образца материала методами электронной оже-спектроскопии (ЭОС) и вторично-ионной масс-спектроскопии (ВИМС). Изображение в ионах и изображение в оже-

электронах дает картину распределения примесей на поверхности образца и в его объеме. При анализе по глубине методами ЭОС и ВИМС проводили бомбардировку быстрыми ионами для удаления атомных слоев с одновременной регистрацией эмитируемых оже-электронов или вторичных ионов.

Экспериментальные профили концентрации фосфора, кислорода и азота по глубине (рис. 2), полученные методами ЭОС и ВИМС, для пленок сульфида меди достаточно хорошо согласуются с теоретическими о положении и распределении имплантированных ионов фосфора, кислорода и азота (сравни с рис. 1). Экспериментальные исследования проводились на пленках сульфида меди толщиной 1,2—1,3 мкм.

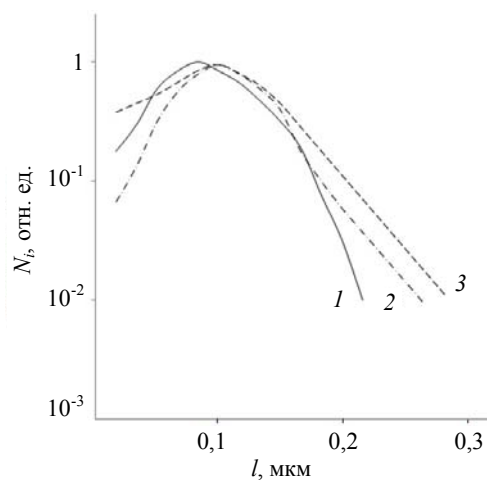


Рис. 2. Экспериментальные профили концентрации легирующей примеси N_i : 1 — фосфор, 2 — кислород, 3 — азот.

Теоретический анализ и экспериментальные исследования показывают, что основными параметрами, определяющими относительные пробеги частиц в пленке материалов соединений халькогенидов элементов первой группы, являются атомный номер Z и масса A бомбардирующих частиц и атомов мишени. Профиль концентрации зависит от Z и A первичных ионов.

Относительный вклад механизмов энергетических потерь сильно зависит от энергии E и атомного номера Z_1 частицы: при малых E и больших Z_1 преобладает ядерное торможение, а при больших E и малых Z_1 — электронное.

Определение оптических констант

Оптические константы n и k определяют фазу и поглощение плоской волны внутри материала. Величины n и k как функции частоты световой волны ω полностью описывают оптические свойства кристалла. Они связаны с экспериментально измеряемыми величинами, а именно, коэффициен-

том поглощения $\alpha(\omega)$ и коэффициентом отражения $R(\omega)$.

Оптические свойства тонких пленок соединений халькогенидов элементов первой группы определяются показателем преломления n и коэффициентом экстинкции k , данные о которых можно получить при эллипсометрическом исследовании. Эллипсометрическая методика исследования оптических констант пленок соединений халькогенидов элементов первой группы основана на оценке изменения состояния поляризации света, отраженного от подложки [3—7]. Состояние поляризации определяется относительной амплитудой параллельной и перпендикулярной составляющими излучения и разностью фаз между ними. При отражении от поверхности отношение амплитуд параллельной и перпендикулярной составляющей излучений и разность фаз между ними характеризует изменения, которые зависят от оптических констант пленки, подложки и толщины пленки. Эллипсометрический контроль осуществляется в видимой области оптического излучения [8—10].

Амплитуду и состояние поляризации светового пучка, отраженного или прошедшего через тонкую однородную плоскопараллельную пленку, можно выразить через оптические константы, толщину пленки и угол падения пучка. При нормальном падении на границу раздела в поглощающей среде распространяется однородная волна, у которой плоскости постоянной амплитуды параллельны плоскостям постоянной фазы.

Параметры, характеризующие отраженный пучок, удобно выразить через отношение осей эллипса поляризации отраженного луча и разность фаз компонент, электрические векторы которых параллельны и перпендикулярны плоскости падения:

$$\frac{r_p}{r_s} = \frac{|r_p| e^{i\beta_p}}{|r_s| e^{i\beta_s}} = e^{i\Delta} \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где Δ — разность фаз двух взаимно перпендикулярных компонент электрического вектора поляризованного света; $\operatorname{tg} \varphi$ — отношение амплитуд компонент.

В случае отражения от плоской границы раздела между изотропными средами с постоянными показателями преломления n_0 и n_1 можно определить отношение амплитуд отраженного и прошедшего света к амплитуде падающего в виде:

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{n_0 \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_0}{n_0 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_0}, \\ r_s &= \frac{n_1 \cos \varphi_1 - n_0 \cos \varphi_0}{n_1 \cos \varphi_1 + n_0 \cos \varphi_0}. \end{aligned} \quad (2)$$

Если среда с показателем преломления n_0 поглощает, то в выражениях n_0 следует заменить на $n - ik$, а угол φ_0 на ϕ , при этом имеем выражение:

$$\sin \phi = \frac{n_1 \sin \varphi_1}{n - ik}. \quad (3)$$

Из этих соотношений следует:

$$\begin{aligned} n^2 - k^2 &= \\ &= n_1^2 \sin^2 \varphi_1 \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi_1 (\cos^2 2\varphi - \sin^2 2\varphi \sin^2 \Delta)}{(1 + \sin 2\varphi \cos \Delta)^2} \right) \\ 2nk &= \frac{n_1^2 \sin^2 \varphi_1 \operatorname{tg}^2 \varphi_1 \sin 4\varphi \sin \Delta}{(1 + \sin 2\varphi \cos \Delta)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Оптические константы n и k можно определить по измеренным значениям Δ и φ для любого угла падения φ_1 .

Для определения оптических постоянных на какой-то частоте необходимо сделать два измерения. Измеряется пропускание и отражение образца.

Для пропускания имеем:

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (5)$$

Тогда коэффициент отражения равен:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (6)$$

где d — толщина образца; α — коэффициент поглощения.

Коэффициент отражения излучения от образца имеет вид:

$$R_0 = R(1 + T e^{-\alpha d}). \quad (7)$$

Для определения n и k измеряют либо пропускание и отражение, либо пропускание для двух образцов разной толщины.

Оптические константы ионно-имплантированных пленок соединений

На ионно-имплантированных образцах соединений халькогенидов элементов первой группы с помощью метода эллипсометрии изучали изменение оптических констант: показателя преломления n и коэффициента экстинкции k .

Проведенные исследования показали, что оптические константы n и k облученных поверхностей пленок соединений халькогенидов элементов первой группы изменяются по сравнению с исходными, причем их изменения тем больше, чем выше доза облучения (величина флюенса ионного пучка Φ за время облучения) и чем тяжелее внедряемые ионы (рис. 3, 4, где n_0, k_0 — до облучения, n, k — после облучения).

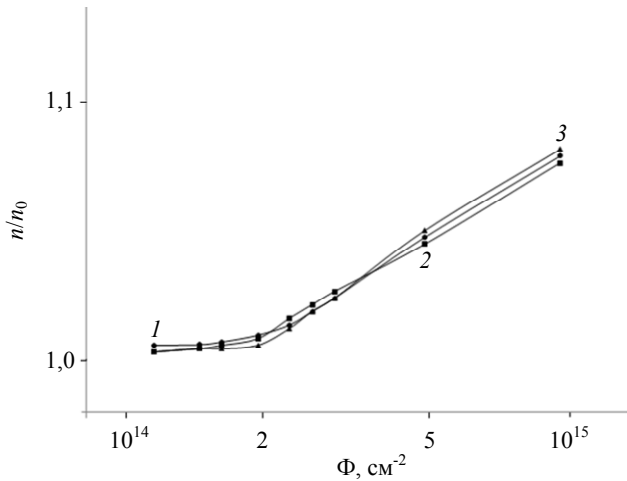


Рис. 3. Зависимости показателя преломления пленок Si_2S от флюенса пучка: 1 — ионами азота (■), 2 — ионами кислорода (▲), 3 — ионами фосфора (●).

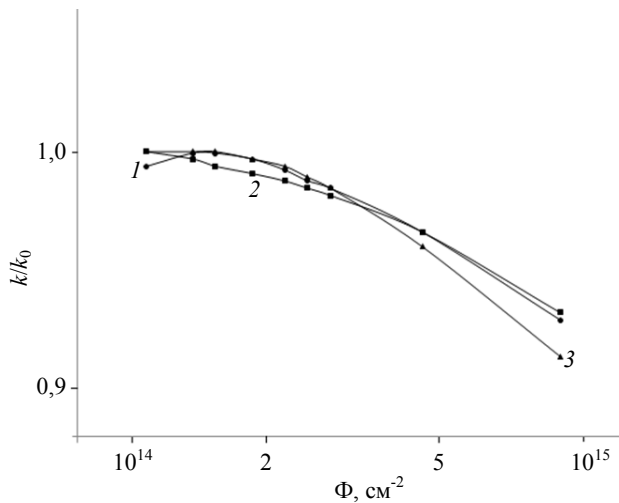


Рис. 4. Зависимости коэффициента экстинкции пленок Si_2S от флюенса пучка: 1 — ионами азота (■), 2 — ионами кислорода (▲), 3 — ионами фосфора (●).

Для конкретных материалов и типов заряженных частиц пользуются определенными моделями, так как степень изменения оптических свойств вещества определяется величиной энергии частиц, их зарядом и типом материала.

Поскольку число отклонений и энергия, передаваемая при столкновении, являются переменными величинами, характеризующими случайный

процесс, то остановившиеся ионы будут распределены по некоторому объему материала. Пробеги ионов описываются функцией распределения и ее параметрами. Очевидно, распределением пробегов определяется изменения оптических констант и поэтому важно знать, какое распределение пробегов ожидается в облученном материале для ионов заданной энергии.

Показатель преломления материала связан с электронной поляризацией и плотностью составляющих его ионов по формуле Лорентц-Лоренца:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4}{3} \pi \Sigma N \alpha_{\text{эл}}, \quad (8)$$

где N — плотность атомов; $\alpha_{\text{эл}}$ — электронная поляризуемость ионов.

Для большинства ионов при реально существующих плотностях потока поляризуемость не влияет на изменение показателя преломления. Из (8) видно, что показатель преломления материала может возрасти из-за увеличения плотности атомов при образовании химических соединений, вызванных имплантацией ионов.

Однако, по-видимому, изменение показателя преломления образца определяется локальным изменением плотности вещества, так как показатель преломления уменьшается при отжиге. Отжиг проводился в среде аргона в течение 20 минут при 450°C .

При облучении потоком ионов оптические константы образца изменяются от дозы (флюенса) облучения. Так, показатель преломления увеличивается, тогда как коэффициент экстинкции уменьшается. Подобный ход подтверждает предположение о том, что изменения оптических констант обусловлено дефектами, внедренными при облучении. Это согласуется с проведенными исследованиями, которые характеризуют единую природу влияния дефектов на свойства исследуемых пленок.

Оптические параметры n и k можно связать непосредственно с электрофизическими свойствами халькогенидов элементов первой группы. Связь электрофизических параметров с оптическими константами выражается соотношениями:

$$n^2 - k^2 = \varepsilon - \frac{4\pi\tau/\rho}{1 + 4\pi^2 c^2 \tau^2 \lambda^{-2}}, \quad (9)$$

$$nk = \frac{\lambda/\varepsilon\rho}{1 + 4\pi^2 c^2 \tau^2 \lambda^{-2}},$$

где c — скорость света; ε — диэлектрическая проницаемость; ρ — удельное сопротивление; τ — время релаксации, λ — длина волны.

Результаты исследования показывают, что минимальная доза, необходимая для изменения оптических констант, с уменьшением массы иона увеличивается. Это означает, что главный вклад в изменении оптических констант вносит ядерная тормозная способность.

Результаты проведенных исследований подтверждаются и изменениями параметров глубинного распределения и ее функцией. Сокращение длины пробега иона с увеличением массы иона указывает на возрастание доли энергии, затрачиваемой в упругих столкновениях, что ведет к увеличению концентрации радиационных дефектов. Это происходит за счет уменьшения толщины поврежденного слоя и вследствие возрастания количества дефектов, приходящихся на один ион.

Заключение

Исследования показали, что максимум концентрационных профилей ионно-имплантированной примеси халькогенидов элементов первой группы смещается к поверхности с увеличением порядкового номера и атомного веса внедренного иона при облучении, показатель преломления увеличивается, а коэффициент экстинкции уменьшается. Изменения оптических констант обусловлены изменением дефектности исследуемых пленок.

Профили концентрации по глубине хорошо согласуются с теоретическими выводами о положении и распределении имплантированных ионов.

Заметим, что применение ионно-лучевой технологии к соединениям халькогенидов элементов первой группы связано с возможностью создания на их основе эффективных источников тока и фотопреобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мейер Дж., Эриксон Л., Девис Дж. Ионное легирование полупроводников. — М.: Мир, 1973.
2. Schiott U. E. Radiat. Eff. 1970. Vol. 6. No. 1. P. 107.
3. Фельдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. — М.: Мир, 1989.
4. Шульман А. Р., Фридрихов С. А. Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. — М.: Наука, 1977.
5. Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Ташлыков И. С. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. — Мн.: Университетское, 1987.
6. Оцуки Ё. Х. Взаимодействие заряженных частиц с твердыми телами. — М.: Мир, 1985.
7. Еловиков С. С. Электронная спектроскопия поверхности и тонких пленок. — М.: МГУ, 1992.
8. Chu W. K., Mayer J. W., Nicolet M. A. Backscattering Spectroscopy. — N. Y.: Academic Press, 1978.
9. Пиеницин В. И., Абаев М. И., Лызлов Н. Ю. Эллипсометрия в физико-химических исследованиях. — Л.: Химия, 1986.
10. Аззам Р. М., Башара Н. М. Эллипсометрия и поляризованный свет. — М.: Мир, 1981.

Concentration profiles and optical constants for ion-implanted films of chalcogenide compounds of the first group elements

G. A. Mustafaev, D. G. Mustafaeva, and M. G. Mustafaev

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
44 Nikolaeva str., Vladikavkaz, 362021, Russia
E-mail: dzhamilya79@yandex.ru

Received March 14, 2016

Consideration is given to profiles of concentration and optical constants of ion-implanted films of chalcogenide compounds of the first group elements. The main parameters that determine the relative runs of the particles in the film materials are the atomic number and mass of the bombarding particles and target atoms. The optical constants of the films irradiated surfaces compounds chalcogenide of elements of the first group change compared to baseline with, the more they change, the higher the radiation dose, and heavier ions are being introduced. The minimal dose necessary to change the optical constants, with a decrease in the ion mass increases, the refractive index increases, the extinction coefficient decreases. It is shown that the maximum concentration profile of an ion-implanted dopant moves to the surface with increasing atomic number and atomic weight of the ion implanted. Concentration depth profiles are in good agreement with the theoretical conclusions on the status and distribution of the implanted ions.

PACS: 73.61.Le

Keywords: film, profile, radiation, optical constants, concentration, dose, defect, ion, parameter properties, refractive index, extinction coefficient.

REFERENCES

1. J. Meyer, L. Erickson, and J. Davies. *Ion alloying of semiconductors*. (Moscow, Mir, 1973) [in Russian].
2. U. E. Schiott, *Radiat. Eff.*, **6** (1), 107 (1970).
3. L. Feldman and D. Mayer. *Basics of analysis of surfaces and thin films*. (Moscow, Mir, 1989) [in Russian].
4. A. R. Shulman and S. A. Fridrikhov, *Secondary-emissive research methods solid*. (Moscow, Nauka, 1977) [in Russian].
5. F. F. Komarov, M. A. Kumakhov, and I. S. Tashlykov. *Non-destructive analysis of solid surfaces by ion beams*. (Minsk, University, 1987) [in Russian].
6. Yo. H. Otsuki, *The interaction of charged particles with solids*. (Moscow, Mir, 1985) [in Russian].
7. S. S. Elovikov, *Electronic spectroscopy of surfaces and thin films*. (Moscow, MGU, 1992) [in Russian].
8. W. K. Chu, J. W. Mayer, and M. A. Nicolet, *Backscattering spectroscopy*. (N. Y.: Academic Press, 1978).
9. V. I. Pshenitsyn, M. I. Abaev, and N. Y. Lyzlov. *Ellipsometry in the physico-chemical studies*. (Leningrad, Chemistry, 1986) [in Russian].
10. R. M. Azzam and N. M. Bashir, *Ellipsometry and polarized light*. (Moscow, Mir, 1981) [in Russian].