



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 2

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
ПРИБОРЫ

ВЫПУСК 1(160)

1983

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

Серия 2

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Выпуск 1(160)

Научно-технический сборник

1983

Издается с 1958г.

СОДЕРЖАНИЕ**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ**

<i>Бирюков В.Н., Васильева Т.Н., Краснопольский А.Г.</i> К расчету времени заряда входной емкости полевого транзистора.....	3
<i>Аблин А.Н., Витвицкий В.Г., Могилевская Л.Я., Хотунцев Ю.Л.</i> Исследование α -параметров полевого транзистора сантиметрового диапазона и характеристик линейного усилителя.....	5
<i>Кирзон В.С., Соловьев В.А., Лагунова Н.Г.</i> Оптимизация примесного распределения в субмикронных структурах арсенида галлия.....	9
<i>Горелик С.С., Зеликман Г.А., Коровин С.К., Сафонов Ю.С.</i> Взаимное влияние компонентов структуры поликристаллический кремний - SiO ₂ -кремний.....	13
<i>Евдокимова Н.Л., Ежов В.С., Кернер Б.С.</i> Исследование пробоя затвор-сток в арсенид-галлиевых полевых транзисторах с барьером Шоттки....	18
<i>Денисенко В.В.</i> Моделирование эффекта оттеснения тока в биполярном транзисторе с применением принципа самоаналогии.....	24
<i>Янавичюс А.И., Стукайте В.А., Занявичюс Д.Ю.</i> Автомодельное решение уравнения диффузии в случае коэффициента диффузии, зависящего от концентрации.....	27

ФИЗИКА МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ

<i>Полянин К.П., Макаруч В.А., Калуга Н.П., Андрюшина Н.А.</i> Исследование сложных концентрационных профилей бора, имплантированного в кремний.....	31
--	----

СОДЕРЖАНИЕ

(окончание)

<i>Матвеев Ю.А.</i> Аномальное прохождение при полном внешнем отражении рентгеновских лучей от поверхности монокристаллов полупроводников.....	34
<i>Давыдов В.Н.</i> Обнаружительная способность неравновесной МДП-структуры при регистрации коротких световых импульсов.....	37
<i>Вальд-Перлов В.М., Вейц В.В., Корнилов С.А., Павлов В.М., Сибирцев Л.С., Шулепов С.Н.</i> Влияние свойств поверхности структуры на шум генераторов на лавинно-пролетных диодах из арсенида галлия.....	41
<i>Соловьев В.Н.</i> Диффузионно-контролируемая деградация некристаллических материалов.....	46

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОВ

<i>Литвиненко С.А., Митрофанов В.В., Соколов В.И.</i> Процессы, протекающие при формировании системы кремний-окисел, и их влияние на свойства кремниевых планарных структур.....	50
<i>Смульский А.С.</i> О нетождественности результатов форсированного нагрева и стандартной термообработки в технологии полупроводниковых приборов	60
<i>Енишерлова К.Л., Антонова И.А., Карпушин М.П.</i> Исследование окислительных дефектов в кремнии и их влияния на некоторые параметры МДП-структур.....	67
<i>Калашников Н.П., Каленов Б.В., Матвеев Ю.А., Харитонов В.П.</i> Деформация поверхностного слоя монокристалла при легировании.....	73
<i>Колмакова Т.П., Лимарь Г.Ф.</i> Легирование эпитаксиальных слоев фосфида индия в хлоридном процессе из жидкого источника монохлорида серы..	77

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<i>Гиманов В.П., Холодова Л.А., Королев В.В., Гоганов Д.А., Бляхер Е.В.</i> Влияние микродефектов на характеристики германиевых радиационных детекторов.....	81
--	----

УДК 539.213

В. Н. Соловьев

ДИФфуЗИОННО-КОНТРОЛИРУЕМАЯ
ДЕГРАДАЦИЯ НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ

Описана теория диффузионных процессов в некристаллических материалах, основанная на учете случайного характера потенциальной энергии в этих системах. Обнаружено, что коэффициенты диффузии атомов значительно выше, чем в кристаллах, и экспоненциально возрастают с увеличением степени неупорядоченности среды.

Некристаллические материалы (НМ) обладают рядом уникальных физических свойств и находят широкое применение в электронной технике. К примеру, аморфные сплавы имеют практически важные магнитные свойства [1], оксидные стекла вследствие высокой ионной проводимости использованы вместо традиционных жидких электролитов в батареях [2]. Пленки аморфного кремния (α -Si) применяют для создания солнечных батарей, матриц тонкопленочных транзисторов, видеоконфигурационных фотопластин. Это объясняется тем, что α -Si характеризуется малой плотностью уровней в запрещенной зоне, а его проводимость можно варьировать в пределах нескольких порядков [3]. По сравнению со сложными соединениями элементов A_{II}-B_{IV} групп α -Si обладает следующими преимуществами: простотой изготовления, воспроизводимостью и стабильностью характеристик [4].

К сожалению, большинство физических свойств НМ имеет узкий температурный интервал стабильности. Это связано с тем, что диффузионные процессы в этих материалах протекают более эффективно, чем в кристаллах. Так, энергия активации диффузии алюминия в поликремнии составляет 1,7 эВ [5], что в 2 раза меньше, чем в кристалле кремния [6]. В настоящей работе рассмотрены возможные причины диффузионной активности атомных частиц в НМ.

В отличие от кристаллов, в которых перескок атома определяется постоян-

ной энергией активации E_a^c , в некристаллических материалах значение энергии активации E_a^a в каждой точке пространства является случайной величиной (рис.1). Это связано с отсутствием периодичности в расположении атомов, поэтому можно говорить лишь о вероятности атому иметь энергию в интервале $(E, E + dE)$, определяемую функционалом $F(E)$. Рассмотрим следствия, к которым приводит случайный характер потенциальной энергии в НМ.

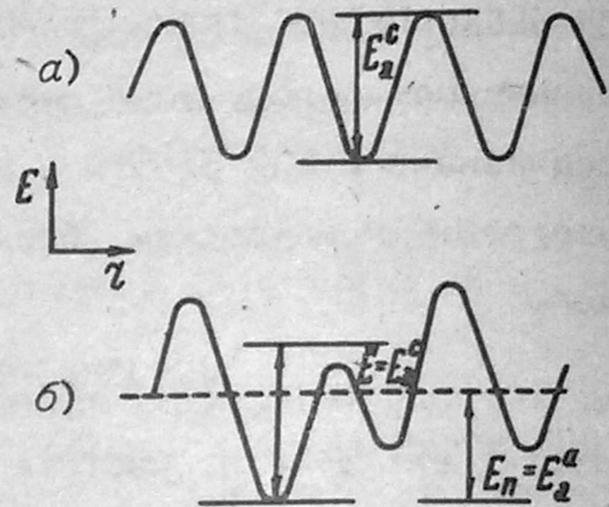


Рис.1. Схематический вид зависимости потенциального рельефа:

a - в идеальном кристалле; b - в некристаллическом материале; E_a^c , E_a^a - энергии активации диффузии атомов в кристаллической и некристаллической фазах; E_n - порог протекания; \bar{E} - среднее значение энергии активации

Коэффициент диффузии в простейшем случае запишем в виде

$$D = D_0 \exp(-\langle E \rangle / kT), \quad (1)$$

где D_0 - предэкспоненциальный множитель, не зависящий от $\langle E \rangle$;
 k - константа Больцмана;
 T - абсолютная температура;
 $\langle E \rangle$ - усредненная энергия активации диффузии в случайном поле.

Теория процесса переноса в сильно неоднородных средах при исследовании прыжковой проводимости описана в [7]. Исходя из локализованных в отдельных ямах атомов, вычислим вероятность перехода атома между двумя состояниями i и j . Подсчитаем число переходов

$i \rightarrow j$ в единицу времени. В отсутствие электрического поля такое же количество атомов совершает обратный переход. В слабом поле прямые и обратные переходы окажутся несбалансированными, т.е. возникает ток, пропорциональный электрическому полю. Вычислив ток, найдем сопротивление данного перехода R_{ij} и сведем задачу к вычислению электропроводности эквивалентной сетки случайных сопротивлений

$$R_{ij} = R_{ij}^0 \exp(\gamma_{ij}),$$

где $\gamma_{ij} = E_{ij}/kT$; E_{ij} - энергия активации перехода $i \rightarrow j$; R_{ij}^0 - постоянный множитель.

В [8] вычислен показатель экспоненты эффективной электропроводности среды с локальной удельной электропроводностью $\sigma(r)$, неоднородность которой экспоненциально велика

$$\sigma(r) = \sigma \exp[-\xi(\bar{r})].$$

Показано, что если последовательно в порядке возрастания сопротивлений включать элементы среды, то показатель экспоненты $\sigma(\bar{r})$ определится теми элементами, которые впервые создадут бесконечную связную область, обеспечивающую протекание тока. В этом случае $\xi(\bar{r})$ равно критическому значению ξ_c , отыскиваемому методами теории протекания [8].

Следовательно, в выражение для эффективной ионной проводимости

$$\sigma I = \sigma_0^I \exp(-\langle E \rangle/kT) \quad (2)$$

вместо $\langle E \rangle$ следует подставить критическое значение E_{II} , называемое уровнем протекания. Поскольку в соотношениях (1) и (2) входит один и тот же экспоненциальный множитель, то коэффициент диффузии (1) можно переписать в виде

$$D = D_0 \exp(-E_{II}/kT).$$

Вычислим уровень протекания. По смыслу последний представляет собой минимальную энергию, которую должен иметь диффундирующий атом для классического движения в пространстве с профилем по-

тенциальной энергии $E(\bar{r})$. Найти E_{II} можно из условия, что доля пространства $V_{II}(E)$, занятого областями с энергией $E \leq E_{II}$, на пороге протекания равна так называемому инварианту Шера-Заллена [8]

$$V_{II}(E) = \int_{-\infty}^{E_{II}} F(E) dE = f x_c. \quad (3)$$

Здесь f - плотность упаковки, x_c - порог протекания для задачи узлов [8]. Произведение $f x_c$ постоянно и равно $\approx 0,15$ для всех трехмерных решеток.

Расчет интеграла в (3) прост и для известных распределений $F(E)$ (равномерного, показательного, нормального) имеем

$$E_{II} = \bar{E} - m\sigma, \quad (4)$$

где \bar{E} - математическое ожидание (среднее значение) энергии; σ - дисперсия соответствующего распределения; m - константа, равная 0,4 для нормального, 1,06 для показательного и 1,21 для равномерного распределения.

При незначительном изменении \bar{E} относительно энергии активации в кристалле выражение (4) предсказывает уменьшение порога протекания с ростом неупорядоченности среды. При $\sigma \rightarrow 0$ порог протекания постоянный и равен \bar{E} . Это условие соответствует, видимо, кристаллическому переходу, а \bar{E} будет равно энергии активации диффузии в кристалле E_a^c . С увеличением σ порог протекания или E_a^a понижается до полного снятия барьера ($m\sigma \approx \bar{E}$ и $E_{II} = 0$).

Из (4) следует общий вывод: в неупорядоченных средах наблюдается эффект делокализации атомных частиц, проявляющийся в уменьшении энергии активации диффузии с увеличением степени дисперсности среды. Этот эффект противоположен переходу Андерсона [9], в котором квантовые частицы с увеличением неупорядоченности среды стремятся к локализации.

Для проверки результатов было проведено квантово-химическое моделирование диффузионных процессов в аморфном кремнии. Методика расчета описана в [10]. Фрагмент α -Si, передающий наиболее важные его характеристики (кривые радиального распределения ато-

мов, угловые и радиальные искажения, плотность состояний), включает 17 атомов (две координационные сферы). Исходные координаты атомов выбирали такими же, как и в кристалле. Затем задавали случайные смещения, лежащие в пределах $\Delta a/a_0 \approx 0,05 - 0,15$ (a - равновесное межатомное расстояние), и координаты их фиксировали. Отыскивали положение остальных атомов, обеспечивающее минимум полной энергии системы.

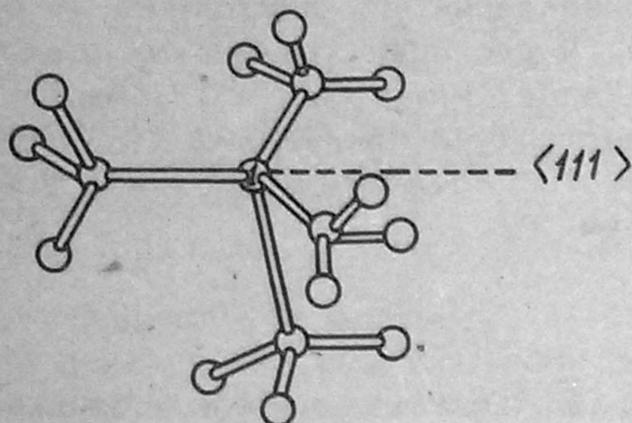


Рис. 2. Фрагмент аморфного кремния. Указан атом и направление его движения при расчете активационных барьеров:

1 - исходное положение атома

Машинный эксперимент проводили следующим образом. Центральному атому 1 квазимолекулы α -Si (рис. 2) в направлении, близком к $\langle 111 \rangle$, сообщали импульс, достаточный для смещения атома из узла в междоузлие, и рассчитывали барьер для указанного перехода. Объем выборки для статической обработки результатов составлял 50 барьеров для каждого набора смещений граничных атомов $\Delta a/a_0 = 0,05; 0,10; 0,15$. Полученные барьеры распределены нормально во всех трех случаях. Для сравнения рассчитан аналогичный барьер в кристалле кремния. Полученные результаты приведены в таблице и свидетельствуют о существенном снижении барьера для перескока собственного атома в междоузлие в α -Si по сравнению с кристаллом. Отрицательное отношение (E_a^c / E_a^a) соответствует инверсии барьера ($m\sigma > \bar{E}$, $E_{II} < 0$).

Таким образом, в неупорядоченных конденсированных средах диффузионные процессы значительно эффективнее, чем в соответствующих кристаллических. Это объясняется тем, что в случайном по-

ле наиболее вероятным будет движение атома по траектории, определяемой наименьшими барьерами. Чем больше разброс диффузионных барьеров, тем выше вероятность наименьших барьеров. Следовательно, с увеличением дисперсности среды эффективная энергия активации диффузии будет уменьшаться.

Зависимость относительных значений энергии активации диффузии в кристаллическом и аморфном кремнии от дисперсии в распределении по барьерам при различных граничных условиях

$\Delta a/a_0$	σ	E_a^c/E	E_a^c/E_a^a
0,05	0,32	0,96	1,70
0,10	0,77	0,70	3,00
0,15	2,11	0,63	-0,70

В [11] сообщено о катастрофической деградации в течение трех месяцев металлических контактов (алюминий, золото, олово, медь, серебро, никель, хром) к аморфному германию из-за быстрого проникновения атомов металла в матрицу. Имеются данные по температурной деградации α -Si [12]. В поликремнии, используемом для получения солнечных батарей, исследована диффузия бора [13]. Показано, что коэффициент диффузии бора значительно выше, чем в кристалле кремния. Ускоренная диффузия наблюдалась в оксидных стеклах [2], металлических сплавах [14].

В литературе имеются данные, указывающие на повышенную радиационную стойкость аморфных полупроводников. Эта особенность, на наш взгляд, связана не с понижением порогов образования дефектов в НМ, а с их высокой подвижностью. По всей вероятности, энергия образования дефектов здесь ниже, чем в кристалле, но ввиду больших коэффициентов диффузии стационарная концентрация дефектов мала, что определяет высокую стабильность НМ в поле радиации.

Рассмотренный эффект делокализации атомов наблюдается не только в некристаллических веществах, он проявляется и в неоднородных кристаллических сре-

дах. Это приводит к конечному значению дисперсии, определяющей диффузионно-контролируемую нестабильность материала.

ВЫВОДЫ

1. Методы теории сильно неоднородных сред использованы для исследования активационных процессов в некристаллических материалах.

2. Предсказан эффект делокализации атомов в неупорядоченных средах. Он обязан существованию распределения по барьерам в окрестности диффундирующего атома. Эффект делокализации не зависит от вида распределения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cahn R.W. Metallic glasses. - Contemp. Phys., 1980, 21, N11, p.43-75.
2. Tuller H.L., Button D.P., Uhlmann D.R. Fast ion transport in oxide glasses. - J.NonCryst.Sol., 1980, 40, p.93-118.
3. Ceasar G.P., Grimshaw S.F., Okumura K. Ion beam deposition of a-Si: H- Sol.St.Comm., 1981, 38, N 2, p.89-93.
4. Snell A.J., Mackenzie K.D., Spear W.E., LeComber P.G. - Application of amorphous silicon fields effect transistors in addressable liquid crystal display panels. - Appl.Phys., 1981, 24, N4, p.357-362.
5. Reith T.M. - Aging effects in Si doped Al Schottky barrier diodes. - Appl.Phys.Lett., 1976, 28, N 3, p.152-154.
6. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. - Л.: Наука, 1972. - 384с.
7. Miller A., Abrahams E. Impurity conduction at low concentration. - Phys.Rev., 1960, 120, p.745-752.
8. Шкловский Б.И., Эфрос А.А. Электронные свойства легированных полупроводников. - М.:Наука, 1979.
9. Anderson P.W. Absence of diffusion in certain random lattice. - Phys.Rev., 1958, 109, p.1492-1497.
10. Кив А.Е., Соловьев В.Н. Искаженные структуры в алмазных решетках. В кн.: Методические материалы

- по машинному моделированию дефектов в кристаллах. - Кривой Рог, НИГРИ, 1978, с.59-97.
11. Smid V., Triska A., Janda V. The influence of different contact materials on the behavior of the metal-amorphous Ge junction. - Phys.Stat.Sol.(a), 1979, 56, K101-104.
 12. John P., Odeh I.M., Thomas M.J.K. et al. Physical degradation of a-Si films on thermal treatment: a scanning electron microscope study. - J.Mater. Sci., 1981, 16, N 5, p.1305-1309.
 13. Jain C.C., Chakravarty B.C., Singh S.N. Dopant profile analysis of boron in solar grade poly- and single-crystalline silicon. - Appl.Phys.Lett., 1981, 38, N 10, p.815-817.
 14. Бокштейн Б.С., Клиггер Л.М., Разумовский И.М., Уварова Е.Н. О диффузии в аморфных сплавах. - ФММ, 1981, 51, №3, с.561-568.

Статья поступила
7 апреля 1982 г.

ИНФОРМАЦИЯ • ИНФОРМАЦИЯ

В научно-техническом сборнике "Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы", вып.2, 1983 г. будут опубликованы следующие статьи:

Егудин А.Б. Работа СВЧ полевых транзисторов при большом сигнале.

Алексеева Т.Б., Карпов Е.К., Мальцев Ю.А., Соколов В.И., Шеленкевич В.А. Дефекты металлизации и их развитие в процессе изготовления ИС.

Шор М.Я. Высоковольтное многофункциональное полупроводниковое устройство "Мультитрон".

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СБОРНИКА "ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА."
СЕРИЯ 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ "

Требования к рукописи

1. Содержание направляемых в редакцию статей должно соответствовать профилю сборника, его научно-техническому уровню и представлять интерес для широкого круга квалифицированных специалистов.

2. Статьи для публикации в сборнике представляются в редакцию в двух экземплярах (один из которых обязательно должен быть первым) с сопроводительным письмом за подписью руководителя предприятия, необходимой документацией, подтверждающей возможность открытого опубликования рукописи.

3. Рукопись и чертежи подписываются всеми авторами с указанием домашних адресов и телефонов. Текст статьи должен быть отпечатан на машинке через два интервала с полями слева 3-4 см на одной стороне листа форматом 21x30 см. Объем статьи не должен превышать 10 страниц. К статье необходимо приложить аннотацию объемом до 0,5 страницы. В конце текста должны быть даны конкретные выводы.

4. Заглавие статьи не должно содержать сокращенных наименований и условных обозначений.

5. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

Необходимо следить за научной чистотой терминологии, не прибегая к расплывчатым формулировкам и жаргонным названиям. Все буквенные обозначения, употребленные в тексте статьи и в формулах, должны быть расшифрованы при первом упоминании. Нумеровать следует только те формулы, на которые авторы ссылаются в последующем изложении. Промежуточные математические выкладки следует опускать.

6. Формулы и буквенные обозначения должны быть разборчиво вписаны в текст рукописи чернилами с четким написанием индексов, показателей степени, ясным различием между заглавными и строчными буквами. В сомнительных случаях следует делать расшифровки на полях.

7. Заглавия таблиц, все надписи в вертикальных графах и горизонтальных строках пишут полностью, используя только общепринятые сокращения или буквенные обозначения, расшифрованные ранее в тексте статьи.

8. Рисунки должны быть выполнены черной тушью на плотной белой бумаге или на кальке с соблюдением ГОСТов. Фотографии должны быть контрастными, на глянцевой бумаге размером не менее 9x12 см. На рисунках нужно изображать только те кривые, детали и элементы, которые используются в статье. Все необходимые разъяснения и наименования деталей, кривых, блоков следует выносить в подрисовочную подпись или в текст статьи. Подписи к рисункам нужно оформить на отдельном листе. На обороте каждого рисунка должны быть проставлены: фамилия автора, название статьи, номер рисунка. На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

9. Библиография дается общим списком в конце статьи, а в тексте указывается в квадратных скобках порядковый номер.

10. Список литературы приводится в порядке упоминания источников в тексте. В список можно включать только печатные издания. Для статьи необходимо указать фамилии и инициалы всех авторов, полное название статьи, название журнала или трудов (все на языке оригинала), год, том, номер выпуска, страницу. Если иностранный журнал (книга) переведены на русский язык, то название статьи (книги) приводят на русском языке с указанием в скобках "перевод с...". Для авторского свидетельства нужно указать его номер и данные бюллетеня, в котором оно обусловлено. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

Серия 2. Полупроводниковые приборы.

Редакторы: Л.А.Красовская, О.Д.Кротова,
Н.В.Климова

Техн.редактор С.Е.Крупнова
Корректор Т.И.Шалимова

Т-03756	Подписано к печати 28/II-83г.	Формат 60x90/8	
Печать офсетная	Усл.печ.л. 10,5	Уч.-изд.л. 9,1	Тираж 2050
Заказ 192	Цена 1р.36к.	Индекс 3836	18 статей

Издательство ЦНИИ "Электроника", Москва 117415

1 р. 36 к.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. СЕР. 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ, 1983. ВЫП. 1 (160), 1-84

Индекс 3836