

©1995 г.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМНОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПОДСИСТЕМ И РОЛЬ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ДИФФУЗИИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Г.С.Куликов, Р.Ш.Малкович

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 14 декабря 1994 г. Принята к печати 16 декабря 1994 г.)

Рассмотрены два существенных фактора, определяющих характер атомной диффузии в полупроводниках — взаимодействие примесей и точечных дефектов (вакансий и собственных междоузельных атомов) с электронно-дырочной подсистемой и роль точечных дефектов в процессе диффузии.

Последние годы своей научной деятельности Анатолий Робертович Регель возглавлял Лабораторию диффузионных процессов в полупроводниках Физико-технического института, активно поддерживая направления исследований, сформированные Борисом Иосифовичем Болтаксом и в течение длительного времени успешно развивавшиеся им и его сотрудниками. В настоящей работе вниманию читателя предлагается краткий обзор некоторых существенных аспектов, связанных с общими тенденциями исследования диффузии примесей в полупроводниках, в немалой степени определяющими характер экспериментальных и теоретических работ, проводимых ныне в Лаборатории диффузии и дефектообразования в полупроводниках ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН.

Диффузии в полупроводниках присущи все основные закономерности диффузии в твердых телах, и в первую очередь активационный характер перескоков, при которых атомы меняют свое оседлое положение в пространстве [1-3]. Специфические особенности диффузии в полупроводниках, отличающие ее от свободной (в отсутствие внешнего электрического поля) диффузии в диэлектриках и металлах, в значительной степени определяются взаимодействием диффундирующих атомов, а также дефектов решетки с носителями тока — электронами и дырками, или, другими словами, взаимодействием атомной и

электронно-дырочной подсистем [4-5]. Это взаимодействие проявляется, во-первых, в перераспределении примеси по зарядовым состояниям, различающимся по диффузионной подвижности, во-вторых, в изменении концентрации дефектов, посредством которых осуществляется диффузия примеси (или самодиффузия), и, в-третьих, в существовании внутреннего электрического поля. Эти особенности проявляются явным образом, когда концентрация примеси заметно превосходит концентрацию собственных носителей.

1. Фактор перераспределения частиц по различным зарядовым состояниям играет важную роль при диффузии в полупроводниках. Степень ионизации может быть неодинаковой как для частиц, находящихся в различных кристаллографических положениях в решетке [4-16], так и для частиц, занимающих одно и то же кристаллографическое положение [17-19]. Каждому положению соответствуют свои параметры перескока, и между состояниями происходит непрерывный обмен — частицы переходят из одного состояния в другое и обратно. Существенно, что обмен между состояниями зависит от концентрации носителей тока, которая в свою очередь в общем случае определяется как другими ионизованными примесями (так называемое межпримесное взаимодействие), так и самой диффундирующей примесью [4-11].

При прочих равных условиях присутствие высокой концентрации, например, акцепторной примеси, уменьшающей концентрацию свободных электронов, приводит к уменьшению доли отрицательно заряженных частиц рассматриваемой диффундирующей примеси и тем самым к ускорению диффузии этой примеси, если отрицательно заряженные частицы менее подвижны, чем нейтральные и положительно заряженные.

Важная роль, которую может играть в диффузии перераспределение частиц между состояниями, различающимися степенью ионизации и коэффициентами диффузии, особенно убедительно проявляется в типичном случае диффузии цинка в арсениде галлия [6,9,10,20,21]. В представлениях межузельно-узловой модели цинк преимущественно располагается в узлах галлиевой подрешетки в виде малоподвижной компоненты Zn_s , а диффундирует по междоузлиям в виде ионов Zn_i . При высоких концентрациях цинка концентрация свободных электронов, необходимых для перехода цинка из состояния Zn_i в состояние Zn_s , т.е. из междоузлия в узел, резко уменьшается, вследствие чего доля подвижного цинка (в междоузлиях) сильно возрастает, что приводит к ускорению диффузии. Напротив, при невысокой концентрации цинка концентрация свободных электронов в кристалле достаточно велика, благодаря чему вероятность перехода цинка из междоузлия в узел, где он малоподвижен, возрастает, а тем самым уменьшается и эффективная скорость диффузии. Феноменологически такая ситуация проявляется как концентрационная зависимость коэффициента диффузии, $D \propto C^2$.

Примером межпримесного взаимодействия является исследованное в Лаборатории влияние легирования цинком на диффузию марганца в арсениде галлия [22]. Мерганец располагается в узлах подрешетки галлия, где он однократно отрицательно заряжен и практически неподвижен, и в междоузлиях, где он нейтрален и перемещается весьма быстро. Между узлами и междоузлиями происходит обмен частицами марганца с изменением их зарядового состояния — для перехода

из междоузлия в узел марганца требуется электрон. Введение высоких концентраций цинка, являющегося акцептором в арсениде галлия, резко снижает концентрацию электронов в кристалле и тем самым резко уменьшает вероятность перехода марганца из междоузлия в узел, т.е. увеличивает долю подвижных атомов марганца, а следовательно, и эффективную скорость диффузии марганца, коэффициент диффузии которого увеличивается на 2 порядка.

2. Следующим фактором, характеризующим взаимодействие диффундирующей примеси с электронно-дырочной подсистемой, является изменение концентрации ионизованных дефектов (вакансий и собственных межузельных атомов), посредством которых осуществляется диффузия примеси и самодиффузия [4-8,23-25].

Исходным моментом является здесь возможность присутствия этих дефектов в полупроводнике в различных состояниях ионизации. Так, вакансии зачастую могут быть как нейтральными, так и отрицательно (или положительно) заряженными [26-34]. Поскольку концентрация нейтральных вакансий при данной температуре в первом приближении не зависит от концентрации примеси, при сильном легировании, например, донорной примесью концентрация отрицательно заряженных вакансий, а тем самым и общая концентрация вакансий могут быть резко (на 1-2 порядка) увеличены [24,34], что скажется на существенном ускорении диффузии примеси, перемещающейся по вакансиям, или самодиффузии при вакансионном механизме диффузии.

Концентрация однократно отрицательно заряженных вакансий пропорциональна концентрации свободных электронов n , а концентрация двукратно заряженных — квадрату этой величины. В то же время концентрация положительно заряженных вакансий пропорциональна концентрации или, соответственно, квадрату концентрации дырок p : $v^- = v_i^-(n/n_i)$, $v_i^{2-} = v_i^{2-}(n/n_i)^2$; $v^+ = v_i^+(p/n_i)$, $v_i^{2+} = v_i^{2+}(p/n_i)^2$. Индекс i соответствует собственному, т.е. нелегированному полупроводнику. В общем случае для коэффициента диффузии атомов, использующих все — нейтральные и заряженные — вакансии для своего перемещения, справедливо соотношение [6,35-37]

$$D = D^0 + D^- + D^{2-} + D^+ + D^{2+} = \\ = D^0 + D_i^-(n/n_i) + D_i^{2-}(n/n_i)^2 + D_i^+(p/n_i) + D_i^{2+}(p/n_i)^2.$$

При высокой концентрации примеси обычно превалирует один из членов суммы. Так, в известных опытах по самодиффузии в германии, легированном донорной примесью (мышьяком) [34], наблюдалась прямая пропорциональность между коэффициентом самодиффузии и концентрацией электронов: $D = D_i^-(n/n_i)$. Прямая пропорциональность была установлена и при диффузии донорных примесей — фосфора и мышьяка — в кремнии [38-40]. В случае акцепторных примесей в кремнии (галлия [28], бора [41], индия [42]) отмечалась прямая пропорциональность коэффициента диффузии концентрации дырок.

Экспериментальные данные по самодиффузии галлия в арсениде галлия свидетельствуют о том, что галлий перемещается в легированном донорной примесью, а также в собственном материале преимущественно по трехкратно отрицательно заряженным вакансиям в галлиевой подрешетке [43]: $D = D_1^-(n/n_i)^3$.

3. Третьим и последним из отмеченных выше факторов взаимодействия диффундирующей примеси с электронно-дырочной подсистемой является внутреннее электрическое поле, создаваемое неравномерно распределенными примесными ионами и носителями — электронами и дырками [4-6,44-65].

В случае одной примеси, диффундирующей в собственный полупроводник, такое поле ускоряет миграцию. При этом имеет место монотонное увеличение коэффициента диффузии с ростом концентрации примеси. В пределе коэффициент диффузии увеличивается, однако всего в 2 раза по сравнению с его значением при низких концентрациях примеси. Иной характер носит ситуация при наличии двух и притом противоположно заряженных примесей. В простейшем случае диффузии ионизованной примеси в полупроводник, равномерно легированный неподвижной примесью противоположного знака заряда, имеет место существенное, во много раз, ускорение миграции в области, где концентрации примесей близки. Это ускорение, обусловленное действием внутреннего электрического поля, приводит к появлению пологого участка на кривой распределения диффундирующей примеси.

Следует отметить еще одну особенность взаимодействия диффундирующей примеси с электронно-дырочной подсистемой, проявляющуюся и при диффузии в металлах, — эффект увлечения ионов электронами при приложении внешнего электрического поля [66-69]. Этот эффект обусловлен рассеянием носителей на активированных ионах примеси. В полупроводниках такой эффект впервые наблюдался Б.И.Болтаксом и соавторами при исследовании электропереноса золота в кремнии [70].

Взаимодействие атомной и электронно-дырочной подсистем является, однако, лишь одним из аспектов механизма диффузии в полупроводниках. В последние годы важное место при исследовании диффузии в полупроводниках занимает также роль точечных дефектов-вакансий и собственных межузельных атомов, посредством которых осуществляется диффузия [35,71-74]. Преимущественное внимание уделяется при этом кремнию и арсениду галлия благодаря исключительно большому практическому значению этих материалов.

Большинство примесей, диффундирующих в кремнии, можно разделить на две группы. К первой относятся примеси замещения — элементы средних групп Периодической системы (В, Al, Ga, In; P, As, Sb; Ge, Sn; Se, Te и т.д.). Их характеризует весьма низкая скорость диффузии ($D = 10^{-11} - 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$ при 1200°C) и коррелирующая с ней высокая растворимость ($C_s = 10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$) [4-8]. Эти примеси диффундируют по узлам кристаллической решетки. Ко второй группе примесей относится ряд элементов крайних групп Периодической системы. Они обладают существенно более быстрой диффузией ($D = 10^{-6} - 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ при 1200°C) и меньшей растворимостью ($C_s = 10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$) [4-8]. Эти примеси располагаются преимущественно в узлах решетки, но диффундируют по междоузлиям, куда они на короткое время попадают из узлов. Типичный представитель этой группы — золото. Различие между этими двумя группами примесей, как известно, обусловлено структурой электронных оболочек, определяющей характер связи атома в кристаллической решетке.

Приблизительно до середины 70-х годов доминировало представление о том, что элементы средних групп периодической системы диффундируют в кремнии по вакансионному, а элементы крайних групп — по диссоциативному механизму, или механизму Фрэнк-Тернбала [75]. Диссоциативный механизм диффузии состоит в том, что примесь переходит из узла в междоузлие, оставляя за собой свободное место — вакансию, быстро диффундирует по междоузлиям и через некоторое время возвращается в состояние замещения, занимая встретившуюся вакансию.

Экспериментально было обнаружено, что высокотемпературное окисление кремния существенно ускоряет диффузию фосфора и бора [7,8,76–78]. Было также установлено, что высокотемпературное окисление кремния приводит к росту в нем дефектов упаковки типа внедрения [79–85], осуществляемому благодаря избытку собственных межузельных атомов [82–85]. Будучи сопоставлены, оба эти наблюдения позволили сделать исключительно важное заключение о том, что причиной, обуславливающей ускорение диффузии фосфора и бора при окислении, являются собственные межузельные атомы кремния, генерируемые в процессе химической реакции между кислородом и кремнием [82]. Непосредственной причиной появления таких атомов является неполное окисление кремния. Не вступившие в реакцию с кислородом атомы кремния частично попадают в междоузлия кристаллической решетки, по которым они быстро диффундируют, ускоряя диффузию, которая осуществляется по механизму вытеснения. Помимо фосфора и бора, диффузия мышьяка и алюминия также ускоряется при окислении кремния [86,87]. Напротив, сурьма в условиях окисления диффундирует медленнее [88], отсюда был сделан вывод, что эта примесь диффундирует в кремнии посредством вакансий.

В развитие этих представлений было сделано предположение, что и при других химических реакциях в кремнии могут генерироваться точечные дефекты. Действительно, как показали исследования, это имеет место при высокотемпературном азотировании кремния [89–92]. Однако картина в этом случае наблюдается противоположная — диффузия фосфора и бора замедляется, а дефекты упаковки уменьшаются в размерах. Отсюда следует вывод, что азотирование приводит к пересыщению кремния вакансиями и соответствующему недосыщению собственными межузельными атомами. При образовании силицидов в процессе химической реакции между кремнием и металлами, например Та, Тi, также генерируются вакансии. Генерация вакансий имеет место и при хлорировании поверхности кремния, а также при химической реакции разложения нанесенного на поверхность кремния окисла SiO_2 и образования окисла SiO , при этом наблюдается усадка дефектов упаковки, замедляется диффузия фосфора и в то же время ускоряется диффузия сурьмы [74].

Все эти результаты позволяют утверждать, что в общем случае атомная диффузия примеси должна описываться системой уравнений, учитывающей как миграцию самой примеси, так и диффузию точечных дефектов, используемых примесью для своего перемещения, и лишь детальный анализ поведения точечных дефектов может служить надежной основой адекватного описания диффузии примесей в полупровод-

никах [93]. Это обстоятельство представляется особенно важным при изготовлении полупроводниковых структур, когда размеры диффузионной зоны весьма невелики — доли микрона.

Важная информация, свидетельствующая в пользу участия собственных межузельных атомов кремния в процессе диффузии примесей и самодиффузии, была получена также при исследовании диффузии примесей, располагающихся преимущественно в узлах решетки, но диффундирующих по междоузлиям. В частности, диффузионные профили золота в бездислокационном кремнии в области выше 900°C которые невозможно было интерпретировать в рамках представлений диссоциативной диффузии, т.е. диффузии в условиях обмена между узельным и межузельным состояниями, осуществляемого посредством вакансий, удалось объяснить в предположении о преобладающем участии собственных межузельных атомов кремния в обмене между состояниями [94–97]. Диффузионные профили цинка в кремнии также удалось интерпретировать адекватным образом в представлениях об обмене между узлами и междоузлиями, осуществляемом с участием собственных межузельных атомов кремния [98]. Из экспериментальных диффузионных профилей золота, в предположении, что самодиффузия кремния происходит по механизму вытеснения, удалось извлечь такую важную величину, как коэффициент самодиффузии кремния, значения которого, как оказалось, укладываются на аррениусовскую прямую температурной зависимости вместе со значениями, полученными прямыми методами. Следует обратить внимание на величину коэффициента самодиффузии кремния при 800°C , $D_{\text{Si}} = 2 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2/\text{с}$ [99], найденную упомянутым косвенным методом, — прямыми методами определить столь низкое значение вряд ли представляется возможным. Аналогичные данные были получены из диффузионных исследований для платины в Si [100]. Будучи сопоставлены, все эти результаты дают (в интервале $700\text{--}1385^{\circ}\text{C}$) выражение для температурной зависимости коэффициента самодиффузии кремния $D_{\text{Si}} = 1.4 \cdot 10^3 \exp(-5.01 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}$. Необходимо в то же время отметить, что ниже 800°C диффузионные профили золота удается описать на основе диссоциативной модели. Учет обоих механизмов — диссоциативного и вытеснения — позволил наилучшим образом описать диффузионные профили золота при различных температурах и временах диффузии и найти при этом сравнительный вклад каждого из указанных механизмов самодиффузии кремния при соответствующей температуре.

Важная роль точечных дефектов, в частности, собственных межузельных атомов в процессах диффузии и самодиффузии обусловила интерес к изучению свойств этих дефектов, прежде всего их концентрации, коэффициента диффузии, а также зарядового состояния [101–113]. Собственные межузельные атомы создавались при этом либо путем окисления кремния, либо при имплантации фосфора, либо при формировании преципитатов окисла кремния. Коэффициент диффузии D_I определялся в ряде опытов по времени, которое требовалось этим атомам для преодоления расстояния от места инъекции до примеси, диффузии которой подвергалась исследованию, или до исследуемых дефектов упаковки. Коэффициент диффузии определялся также из данных по геттерированию золота в кремнии: эффективность геттерирования зависела при этом от скорости перехода атомов золота из узлов

решетки в междоузлия, а этот процесс в свою очередь обеспечивается доставкой собственных межузельных атомов кремния. В случае формирования преципитатов окиси кремния коэффициент диффузии D_I вычислялся из профиля распределения концентрации термодоноров, при этом предполагалось, что собственные межузельные атомы кремния заряжены положительно. Использовались и другие способы определения D_I .

В настоящем кратком обзоре авторы попытались отметить два существенных фактора, определяющих характер атомной диффузии в полупроводниках, — взаимодействие примесей и точечных дефектов с электронно-дырочной подсистемой и роль точечных дефектов в процессе диффузии. Адекватное описание процесса диффузии требует, естественно, детального и всестороннего учета также и других факторов, оказывающих воздействие на миграцию атомов. Экспериментальная и теоретическая деятельность в этом направлении несомненно позволят глубже изучить и понять фундаментальные закономерности атомной миграции в полупроводниках.

Список литературы

- [1] Я.И. Френкель. *Введение в теорию металлов* (Огиз, Гиттл, Л.; М.; 1948).
- [2] J.R. Manning. *Diffusion Kinetics for Atoms in Crystals* (D. van Nostrand Co., Inc., Princeton, Toronto, 1968). [Пер.: Дж. Маннинг. *Кинетика диффузии атомов в кристаллах* (М., Мир, 1971)].
- [3] P.G. Shewmon. *Diffusion in Solids* (N. Y. a.o. McGraw-Hill, 1963). [Пер.: П. Шьюмон. *Диффузия в твердых телах* (М., Металлургия, 1966)].
- [4] Б.И. Болтакс. *Диффузия в полупроводниках* (Физматгиз, М., 1961).
- [5] Б.И. Болтакс. *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках* (Л., Наука, 1972).
- [6] *Atomic Diffusion in Semiconductors*, ed. by D Shaw (Plenum Press, London-N. Y., 1973). [Пер.: *Атомная диффузия в полупроводниках*, под. ред. Д. Шоу (М., Мир, 1975)].
- [7] W. Frank, U. Gösele, H. Mehrer, A. Seeger. *Diffusion in Silicon and Germanium*. In: *Diffusion in crystalline solids*, ed. by G.E. Murch, A.S. Nowik (Orlando a.o. Acad. Press, 1984).
- [8] J.C. Tsai. In: *VLSI Technology*, ed. by S.M. Sze (McGraw-Hill Book Co., N.Y. a.o., 1983). [Пер.: Дж. Цай. *Диффузия*. В сб.: *Технология СВИС* (М., 1968)].
- [9] L.R. Weisberg, J. Blanc. *Phys. Rev.*, **131**, 1548 (1963).
- [10] H.C. Casey, Jr., M.B. Panish, L.L. Chang. *Phys. Rev.*, **162**, 660 (1967).
- [11] O. Hildebrand. *Phys. St. Sol. (a)*, **72**, 575 (1982).
- [12] C.J. Gallagher. *J. Phys. Chem. Sol.*, **3**, 82 (1957).
- [13] Б.И. Болтакс, С.И. Рембеза, Б.Л. Шарма. *ФТП*, **1**, 247 (1967).
- [14] V. Swaminathan, S.M. Copley. *J. Appl. Phys.*, **47**, 4405 (1976).
- [15] Y. Yamamoto, H. Kanbe. *Japan. J. Appl. Phys.*, **19**, 121 (1980).
- [16] M.E. Greiner, J.F. Gibbons. *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 750 (1984); *J. Appl. Phys.*, **57**, 5181 (1985).
- [17] Ю.Н. Шутов, В.А. Усков. *ФТТ*, **12**, 3007 (1970).
- [18] K. Kazmierski, B. de Cremoux. *Japan J. Appl. Phys.*, **24**, 239 (1985).
- [19] S. Reynolds, D.W. Vook, J.F. Gibbons. *J. Appl. Phys.*, **63**, 1052 (1988).
- [20] R.L. Longini. *Sol. St. Electron.*, **5**, 127 (1962).
- [21] H. Zimmermann, U. Gosele, T.Y. Tan. *J. Appl. Phys.*, **73**, 150 (1993).
- [22] Е.А. Скорягина. *ФТП*, **20**, 1877 (1986).
- [23] R.L. Longini. *Phys. Rev.*, **99**, 636(A) (1955).
- [24] R.L. Longini, R.F. Greene. *Phys. Rev.*, **106**, 992 (1956).
- [25] R.A. Swalin. *J. Appl. Phys.*, **29**, 670 (1958).
- [26] W. Shockley, J.T. Last. *Phys. Rev.*, **107**, 392 (1957).

- [27] W.Shockley, J.L. Moll. *Phys. Rev.*, **119**, 1480 (1960).
- [28] J.S. Macris, B.J. Masters. *J. Appl. Phys.*, **42**, 3750 (1971).
- [29] С.Н. Ершов, В.А. Пантелеев, С.Н. Нагорных, В.В. Черняховский. *ФТТ*, **19**, 322 (1977).
- [30] R.B. Fair, J.C. Tsai. *J. Electrochem. Soc.*, **124** 1107 (1977).
- [31] R. Shrivastava, A.H. Marshak. *J. Appl. Phys.*, **51**, 3222 (1980).
- [32] K. Kazmierski, F. Launay, B. de Cremoux. *Japan. J. Appl. Phys.*, **26**, 1630 (1987).
- [33] K.B. Kahen. *Appl. Phys. Lett.*, **55** 2117 (1989).
- [34] M.W. Valenta, C. Ramasastry. *Phys. Rev.*, **106**, 73 (1957).
- [35] A. Seeger and K.P. Chik. *Phys. St. Sol.*, **29**, 455 (1968).
- [36] D. Shaw. *Phys. St. Sol.*, (b), **72**, 11 (1975).
- [37] R.B. Fair. In: *Impurity Doping Processes in Silicon*, ed. by F.F.Y. Wang (North-Holland, N.Y., 1981).
- [38] B.J. Masters, J.M. Fairfield. *J. Appl. Phys.*, **40**, 2390 (1969).
- [39] D.P. Kennedy, P.C. Murley. *Proc. IEEE*, **59**, 335 (1971).
- [40] J.S. Macris, B.J. Masters. *J. Electrochem. Soc.*, **120**, 1252 (1973).
- [41] R.B. Fair. *J. Electrochem. Soc.*, **122**, 800 (1975).
- [42] M.F. Millea. *J. Phys. Chem. Sol.*, **27**, 315 (1966).
- [43] R.M. Cohen. *J. Appl. Phys.*, **67**, 7268 (1990).
- [44] S.Zaromb. *IBM J. Res. Dev.*, **1**, 57 (1957).
- [45] F.M. Smits. *Proc. IRE*, **46**, 1049 (1958).
- [46] W.Shockley. *J. Appl. Phys.*, **32**, 1402 (1961).
- [47] K. Lehovec, A. Slobodskoy. *Sol. St. Electron.*, **3**, 45 (1961).
- [48] В.В. Васькин, В.С. Метрикин, В.А. Усков, М.Я. Ширококов. *ФТТ*, **7**, 3356 (1965).
- [49] D. Shaw, A.L.J. Wells. *Brit. J. Appl. Phys.*, **17**, 999 (1966).
- [50] T. Klein, J.R.A. Beale. *Sol. St. Electron.*, **9**, 59 (1966).
- [51] Н.М. Бордина, А.М. Васильев, Д.А. Попов. *ФТТ*, **8**, 2248 (1966).
- [52] В.В. Васькин, В.С. Метрикин, В.А. Усков, М.Я. Ширококов. *ФТТ*, **8**, 3467 (1966).
- [53] A.V. Shelley, R.H. Tredgold. *Sol. St. Electron.*, **13**, 1219 (1970).
- [54] R.Q. Perritt, A.H. Marshak. *Sol. St. Electron.*, **17**, 257 (1974).
- [55] Р.Ш. Малкович, В.А. Покоева. *Phys., St. Sol.*, **48**, 241 (1978).
- [56] Р.Ш. Малкович, В.А. Покоева. *ФТП*, **12**, 1541 (1978).
- [57] Р.Ш. Малкович, В.А. Покоева. *ЖТФ*, **49**, 47 (1979).
- [58] R. Shrivastava and A.H. Marshak. *Sol. St. Electron.*, **23**, 73 (1980).
- [59] R.K. Jain. *J. Appl. Phys.*, **49**, 946 (1978).
- [60] Р.Ш. Малкович. *ФТП*, **15**, 773 (1981).
- [61] М.П. Галанин, Р.Ш. Малкович. *ФТП*, **20**, 1451 (1986).
- [62] Е.Д. Горнушкина, Р.Ш. Малкович. *ФТП*, **21**, 244 (1987).
- [63] И.Б. Снапиро, Н.Н. Ткаченко. *Письма ЖЭТФ*, **50**, 111 (1988).
- [64] Л.С. Монастырский, Б.С. Соколовский. *ФТП*, **26** 2143 (1992).
- [65] S.M. Hu and V.J. Schmidt. *J. Appl. Phys.*, **39**, 4272 (1968).
- [66] В.Б. Фикс. *ФТТ*, **1**, 16 (1959).
- [67] В.Б. Фикс. *ФТТ*, **1**, 1321 (1959).
- [68] В.Б. Фикс. *ФТТ*, **6**, 1589 (1964).
- [69] В.И. Фикс: *Ионная проводимость в металлах и полупроводниках* (М., 1964).
- [70] Б.И. Волтакс, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. *ФТТ*, **2**, 2395 (1960).
- [71] R.B. Fair. *Mater. Sci. Forum*, **1**, 109 (1984).
- [72] R.B. Fair. *J. Appl. Phys.*, **51**, 5828 (1980).
- [73] T.Y. Tan, U. Gösele. *Appl. Phys. A.*, **37**, 1 (1985).
- [74] P.M. Fahey, P.V. Griffin, J.D. Plummer. *Rev. Mod. Phys.*, **61**, 289 (1989).
- [75] F.C. Frank, D. Turnbull. *Phys. Rev.*, **104**, 617 (1956).
- [76] K.H. Nicholas. *Sol. St. Electron.*, **9**, 35 (1966).
- [77] G.N. Wills. *Sol. St. Electron.*, **12**, 133 (1969).
- [78] K.E. Bean, P.S. Glime. *Proc. IEEE*, **57**, 1469 (1969).
- [79] H.J. Queisser, P.G.G. Van Loon. *J. Appl. Phys.*, **35**, 3066 (1964).
- [80] R.J. Jaccodine, C.M. Drum. *Appl. Phys. Lett.*, **8**, 29 (1966).

- [81] G.R. Booker, W.J. Tunstall. *Phil. Mag.*, **13**, 71 (1966).
- [82] S.M. Hu. *J. Appl. Phys.*, **35**, 3066 (1964).
- [83] B. Leroy. *J. Appl. Phys.*, **50**, 7996 (1979).
- [84] S.M. Hu. In: *Defects in Semiconductors*, ed. by J. Naryan, T.Y. Tan (1981).
- [85] R.B. Fair. *J. Electrochem. Soc.*, **128**, 1360 (1981).
- [86] D.A. Antoniadis, A.M. Lin, R.W. Dutton. *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 1030 (1978).
- [87] S. Mizuo, H. Higuchi. *Japan. J. Appl. Phys.*, **21**, 56 (1982).
- [88] S. Mizuo, H. Higuchi. *Japan. J. Appl. Phys.*, **20**, 739 (1981).
- [89] S. Mizuo, T. Kusaka, A. Shintani, M. Nauba, H. Higuchi. *J. Appl. Phys.*, **54**, 3860 (1983).
- [90] P.M. Fahey, R.W. Dutton, M. Moslehi. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 683 (1983).
- [91] P.M. Fahey, G. Barbuscia, M. Moslehi, R.W. Dutton. *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 784 (1985).
- [92] B.P.R. Marioton, U. Gösele. *Japan. J. Appl. Phys.*, **28**, pt. 1, 1274 (1989).
- [93] M. Orlowski. *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 1323 (1988).
- [94] A. Seeger. *Phys. St. Sol.*, **61**, 521 (1980).
- [95] U. Gösele, W. Frank, A. Seeger. *Appl. Phys.*, **23**, 361 (1980).
- [96] U. Gösele, F. Morehead, W. Frank, A. Seeger. *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 157 (1981).
- [97] M. Hill, M. Lietz, R. Sittig. *J. Electrochem. Soc.*, **129**, 1579 (1982).
- [98] M. Perret, N.A. Stolwijk, L. Cohausz. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **1**, 6347 (1989).
- [99] N.A. Stolwijk, B. Schuster, J. Holzl, H. Mehrer, W. Frank. *Physica*, **116 B**, 335 (1983).
- [100] S. Mantovani, F. Nava, C. Nobili, G. Ottaviani. *Phys. Rev. B*, **33**, 5536 (1986).
- [101] R. Car, P.J. Kelly, A. Oshiyama, S.T. Pantelides. *Phys. Rev. Lett.*, **52**, 1814 (1984).
- [102] K. Taniguchi, D.A. Antoniadis, Y. Matsushita. *Appl. Phys. Lett.* **42**, 961 (1983).
- [103] P.B. Griffin, P.M. Fahey, J.D. Plummer, R.W. Dutton. *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 319 (1985).
- [104] G.B. Bronner et al. In: *Impurity Diffusion und Gettering in Silicon*, ed. by R.B. Fair et al. [*Mater. Res. Soc.*, **36**, 49 (1985)].
- [105] P.B. Griffin, S.T. Ahn, W.A. Tiller, J.D. Plummer. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 115 (1987).
- [106] D. Mathiot. In: *Defects in Electronic Materials*, ed. by M. Stavola et al. [*Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Pittsburgh, **104**, 189 (1988)].
- [107] F.F. Marehead. In: *Defects in Electronic Materials*, ed. by M. Stavola et al. [*Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Pittsburgh, **104** 99 (1988)].
- [108] W. Wijaranakula. *J. Appl. Phys.*, **67**, 7624 (1990).
- [109] Y. Okada. *Phys. Rev. B*, **41**, 10741 (1990).
- [110] G.B. Bronner, J.D. Plummer. *J. Appl. Phys.*, **61**, 5286 (1987).
- [111] A.M. Agarwal, S.T. Dunham. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 800 (1993).
- [112] D. Maroudas, R.A. Brown. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 172 (1993).
- [113] D. Tsoukalas, C. Tsamis, J. Stoemenos. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 3167 (1993).

Редактор В.В. Чалдышев

