

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Миграция атомов в полупроводниках и изменения числа и структуры дефектов, инициируемые возбуждением электронной подсистемы

В.С. Вавилов

*Возбуждение электронной подсистемы полупроводников в результате фотоионизации и ионизации заряженными частицами, а также инжекция неравновесных носителей заряда стимулируют миграцию атомов, а также приводят к возникновению дефектов структуры и изменению их природы. Указанные явления вызывают изменения основных электрофизических параметров полупроводников, в том числе веществ, представляющих собой основные материалы современной твердотельной электроники. В работе приведены и проанализированы современные данные по этому вопросу.*

PACS numbers: 66.30.Fq; 66.30.Lw, **66.90.+r**, 78.50.Ge

### Содержание

1. Введение (407).
2. Атермические механизмы миграции атомов (408).
3. Электростатическая (кулоновская) нестабильность как одна из причин миграции атомов в полупроводниках (408).
4. Ионизационные эффекты во время ионной имплантации и их проявление в ионно-имплантированных структурах (410).
5. Заключение (412).

Список литературы (412).

### 1. Введение

Твердотельная (полупроводниковая) электроника представляет собой неотъемлемую часть современной цивилизации [1]. Трудно представить себе жизнь людей без радио и телевидения, без простых калькуляторов и сложных компьютеров, без копировальных устройств (ксероксов). Однако длительность жизни полупроводниковых приборов, как правило, значительно меньше продолжительности жизни человека (согласно Библии — 70 лет).

Одна из главных причин деградации и отказов полупроводниковых устройств состоит в постепенном накоплении в них "точечных" или более протяженных дефектов структуры. О природе и энергетическом спектре таких дефектов в ряде полупроводников, в первую очередь, в монокристаллическом кремнии, существуют довольно подробные данные [2, 3]. В настоящее время технология выращивания монокристаллов кремния и эпитаксиальных пленок этого материала

доведена до высокого уровня; концентрации врожденных точечных дефектов и дислокаций малы. Так, концентрация точечных дефектов снижена до  $10^{10}$  см<sup>-3</sup>, концентрация дислокаций — единицы на см<sup>2</sup>. Именно вследствие этого основные параметры кремния сильно зависят от возникновения в нем дополнительных неравновесных дефектов, например, за счет физических процессов, инициируемых воздействием "жестких" излучений ( $\gamma$ -кванты, быстрые электроны, быстрые нейтроны и т.д.) [4, 5].

На первом этапе развития представлений о радиационном повреждении структуры твердых тел считали, что доминирующий процесс генерации дефектов обусловлен ударным смещением атомов или локальным тепловым возбуждением (thermal spikes), приводящим к полному разупорядочению кристалла на короткое время.

Однако возбуждение электронной подсистемы полупроводника, т.е. присутствие неравновесных носителей заряда (ННЗ), также может стимулировать миграцию дефектов и примесей и структурные изменения, такие как возникновение новых дефектов, а также их комплексов (ассоциатов) друг с другом и с примесными атомами.

Предсказание (оценка) срока службы устройств твердотельной электроники представляет собой неизменно актуальную задачу. "Ударные" процессы возникновения радиационных дефектов достаточно надежно описывают, исходя из данных о пороговых энергиях, генерации пар Френкеля (атом в межузлии и вакансия). Как правило, до настоящего времени расчеты числа смещений основаны на экспериментальных данных о пороговых энергиях ударного смещения атомов из узлов. Вычисленное количество смещенных атомов всегда несколько выше истинного по причинам, которые приведены в [6]. Это дает определенный запас прочности, необходимый при решении вопроса о сроках службы приборов, подвергнутых действию жесткой радиации.

В таблице 1 приведены приближенные значения пороговой энергии  $E_d$ , необходимой для ударного смещения атомов из узла, т.е. генерации пар Френкеля [6].

В следующих разделах нашего обзора мы будем рассматривать процессы, инициируемые возбуждением электронной подсистемы полупроводников и приводящие к миграции

**В.С. Вавилов.** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
117924 Москва, Ленинский просп. 53, Россия  
Тел. (095) 135-05-51  
Факс 938-22-51

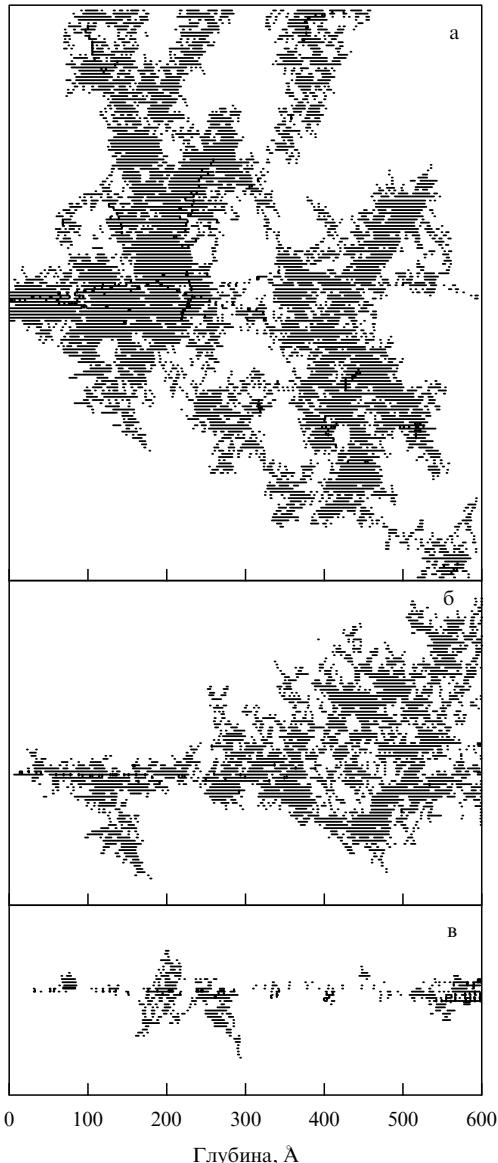
Статья поступила 15 июля 1996 г.







Для теоретических расчетов был использован метод TRIM [36]. В этом распространенном в последнее время типе программ, как и в первоначальных моделях Зейтца, а также в известной книге Динса и Виньярда [4], считается, что передача атому энергии, превышающей пороговую  $E_d$ , приводит к возникновению пары Френкеля. Согласно программам TRIM, учитывается также возможность спонтанной рекомбинации в случае, когда смещенный атом останавливается от вакансии на расстоянии менее некого предельного "рекомбинационного радиуса", ограничивающего сферу неустойчивости пары Френкеля. Столкновения с замещением (replacement collisions), а также генерация вторичных и т.п. пар Френкеля учитываются в указанной модели; точность получаемых результатов, судя по некоторым оценкам, составляет  $\pm 30\%$  (см., например, [30]). Результаты расчетов авторов работы [34] приведены на рис. 5. Качественно они совпадают с представлениями, развитыми значительно раньше, до возникновения современной вычислительной техники. Они дают наглядное представление о



**Рис. 5.** Каскады столкновений, приводящих к возникновению пар Френкеля, вычисленных по методу TRIM для кристаллов Ge, облученных ионами  $\text{Ar}^+$  с энергиями 50 кэВ (а), 500 кэВ (б) и 5 МэВ (в) [34].

характере развития скоплений первичных пар Френкеля вокруг траектории внедряемого иона (черные точки). Процессы образования радиационных дефектов в полупроводниках изучали экспериментально многие авторы; в большинстве случаев наблюдалась пропорциональность между потерями энергии на ядерных столкновениях и числом возникших дефектов.

Отклонение от линейной зависимости объясняют обычно столкновениями с замещением и увеличением доли рекомбинирующих вакансий и межузельных атомов при больших удельных потерях энергии. Оба эти явления выражаются в сублинейной зависимости числа дефектов от удельных потерь энергии. Дополнительное снижение числа дефектов обусловлено взаимодействием с электронами, удаляющим часть кинетической энергии из той ее доли, которая в ином случае была бы затрачена на возникновение каскада смещенных атомов. Однако, согласно данным [37], наблюдаются случаи, когда число возникающих дефектов значительно превышает ожидаемое из вычислений по методу TRIM. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 5, позволяют считать, что ионизационные процессы играют первостепенную роль в возрастании числа возникающих дефектов. Имеет место выраженная корреляция между числом дефектов и удельным ионизационными потерями  $S_e$ . Число возникающих дефектов зависит не только от значения  $S_e$ , но и от вида (массы) внедренных ионов. Возможно, что имеют место различия в вероятности рекомбинации компонент пар Френкеля, так как каскады смещений становятся более плотными по мере возрастания массы ионов. К сожалению, пока недостаточно изучены зависимости числа дефектов от наличия примесей в кристаллах, изученных авторами [34]. В связи с этим преждевременно обсуждать возможности влияния на процессы возникновения дефектов примесно-ионизационных механизмов [25] и других процессов, которые обсуждались выше, а также в [16].

Согласно интерпретации авторами работы [34] их экспериментальных результатов, важную роль играет влияние потери атомами имплантируемого материала валентных электронов во время развития каскада столкновений. Число образующихся дефектов увеличивается в определенных условиях почти в 1,6 раза. По мнению авторов, это явление представляет собой следствие снижения значений энергий смещения для ионизованных атомов. Эксперименты, проведенные с кристаллами GaP, другими материалами семейства  $A_3B_5$  и ZnSe (группа  $A_2B_6$ ), свидетельствуют о наличии эффекта, в то время как в элементарных полупроводниках (Ge, Si) авторами [35] он не был обнаружен.

Как было указано выше, для того чтобы исключить влияние интенсивной рекомбинации (аннигиляции) дефектов в ходе и после окончания развития каскадов смещений были проведены исследования эффектов распыления с поверхности бомбардируемым ионами мишней. Авторы полагают, что данные о распылении предоставляют наиболее прямую информацию о первоначальной "столкновительной" части развития каскада смещенных атомов до начала влияния тепловых (скорее, квазитечевых) эффектов. Подробные сведения о процессах распыления, активируемых ионными пучками, содержатся в книге [38], а также в [39]. Схема процессов взаимодействия ускоренных ионов с твердым телом приведена на рис. 6. В опытах Ашерона и др. [34] потери энергии на возбуждение электронной подсистемы изменены путем вариации энергии бомбардирующих мишень (моноокристалл Ge) ионов. Полный выход распыленных атомов Ge определяли, интегрируя данные об их угловом распределении. Сопоставление теории с экспериментальными данными показывает, что процессы ядерных столкновений описывают фактические результаты лишь при энергиях ионов ниже примерно 10 кэВ. При более высоких энергиях, когда ионизационные потери энергии иона становятся существенными, экспериментально определенные значения выхода распыленного вещества превышают предска-

