

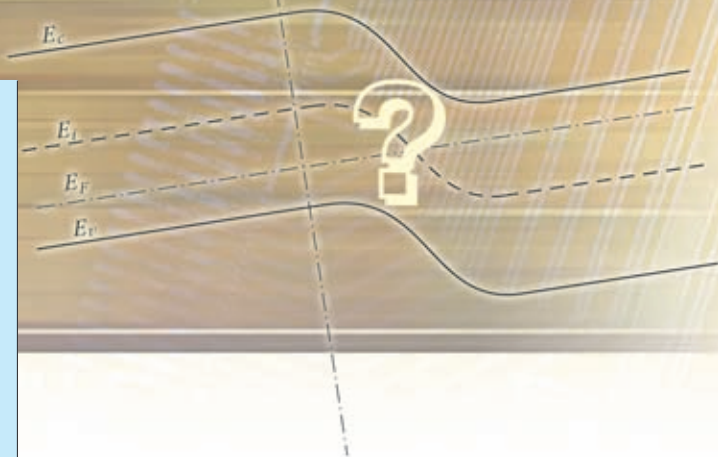
О ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В p-n-ПЕРЕХОДЕ

НОВЫЙ ВЗГЛЯД

Считается, что процессы, происходящие в p-n-переходе, должны быть известны каждому студенту, готовящемуся стать инженером в области электроники и радиотехники. Однако, если проанализировать публикации на эту тему и сопоставить разные трактовки происходящих в p-n переходе процессов (а это попытался сделать автор, опираясь на свой более чем 40-летний практический опыт в области анализа отказов полупроводниковых приборов), то оказывается, что и у практиков, и у теоретиков нет полной ясности в объяснении некоторых парадоксальных эффектов, например, почему p-n-переход охлаждается, а не нагревается при протекании по нему большого тока. Возникают даже дискуссии специалистов, в ходе которых утверждается, что p-n прибор с одним p-n-переходом, все еще не изучен полностью [1].

Видимо суть в том, что известные модели физических процессов, происходящих в p-n-переходе, построены для анализа переноса электрического заряда через переход и не позволяют глубоко анализировать динамику теплопереноса. В дискуссионной по характеру статье А.Клиота излагается новый взгляд на процессы, происходящие в p-n-переходах как при прямом напряжении, так и при превышении обратного напряжения выше порогового, и предлагается новая "физическая модель" процессов, происходящих в p-n-переходе, позволяющая объяснить эти парадоксальные эффекты.

Учитывая полемический характер статьи, мы публикуем также отзыв на нее специалиста ИПТМ РАН В.Мордковича.



А.Клиот
Kliot@mail.ru

ПАРАДОКСАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

Чтобы пояснить, в чем кроются недостатки традиционных (электронно-дырочных) моделей функционирования p-n-перехода [2], рассмотрим простой пример. Представим себе диод, через который в прямом направлении протекает максимально допустимый ток, например 1 А, а падение напряжения на p-n-переходе при этом составляет не более 0,8 В. Мощность, выделенная при этом на p-n-переходе, будет порядка 0,8 Вт.

Толщина p-n-перехода в таком диоде примерно равна $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, а площадь перехода – $25 \cdot 10^{-6}$ м², т.е. можно говорить, что объем собственно p-n-перехода равен $12,5 \cdot 10^{-3}$ мм³. Естественно, что при мощности теплового потока 0,8 Вт в таком объеме p-n-переход должен испариться. Известно, однако, что ничего подобного не происходит! Это значит, что p-n-переход оказывается устойчивым к мощному удельному тепловому воздействию, которое составляет 64 ГВт/м³. Что же помешало разрушению перехода?

В литературе подобные эффекты объясняют взаимодействием носителей зарядов с кристаллической решеткой, вызывающим рассеяние энергии носителей за счет колебаний ре-

Представляем автора статьи

Клиот Александр Евельевич, к.т.н., автор 40 публикаций, окончил электрофизический факультет Всесоюзного заочного политехнического института в Москве. Зам. начальника центра сертификации ФГУП "Гос. НИИ Приборостроения". Дом. тел. 401-4196.



шетки. Очевидно, эти взаимодействия не могут обеспечить рассеяние столь большой тепловой мощности. За счет чего же рассеивается тепло и есть ли модель, способная объяснить этот эффект? Попробуем разобраться.

ЧТО ГОВОРЯТ ПРАКТИКИ И ТЕОРЕТИКИ

Желая внести свою лепту в объяснение физических процессов в р-п-переходе, прежде всего обратим внимание на следующее. Инженеры-практики, занимающиеся изготовлением п/п приборов и обеспокоенные повышением их надежности, опираются при описании процессов в р-п-переходе на эффекты и явления, наблюдаемые ими при проведении экспериментальных работ. Авторы же учебной и научной литературы используют математические модели, описывающие эти явления. Известно, однако, что модели могут быть неадекватными в некоторых случаях или при определенных условиях. Проведем краткий обзор моделей и подходов, используемых в литературе для объяснения интересующих нас процессов, чтобы собрать некоторые "факты", на которых эти подходы и модели основаны.

В работе [2] появление неосновных носителей в области р-п-перехода описывается так: "В некотором малом объеме полупроводника имеют место процессы возникновения дырок за счет внешнего источника, процессы тепловой генерации дырок, рекомбинации электронно-дырочных пар и ухода дырок в область с меньшей концентрацией избыточных дырок". Обратим внимание на слова "процессы тепловой генерации дырок". Известно, что тепловая генерация дырок возможна только в области собственно р-п-перехода, имеющей по сравнению со всем кристаллом полупроводника небольшой размер (обычно соотношение размеров 1:200 и более), что существенно для дальнейшего рассмотрения. Там же при анализе процессов, приводящих к изменению числа дырок, утверждается, что "дырки создаются под влиянием какого-то внешнего фактора". Утверждается также, что "за время dt генерируется $g(dt \cdot dx)$ дырок, где g – число пар, создаваемых в течение 1 с в единице объема кристалла".

В работе [3] описан тот же процесс, что и в работе [2], но без указания действующего фактора: "При прямом смещении перехода превалирует ток рекомбинации, поскольку резко возрастают концентрации дырок и электронов в области перехода". Там же при рассмотрении уровня Ферми вводится понятие химического потенциала, который "характеризует возможность диффузии свободных частиц (независимо от наличия или отсутствия свободных зарядов), подобно тому, как электрический потенциал характеризует возможность дрейфа свободных частиц (если они являются носителями зарядов)". Известно, что свободными частицами в твердом теле являются вакансии (структурные дефекты), которые, не обладая зарядом, служат переносчиками энергии в неравновесном термодинамическом процессе.

В работах [4, 5] и другой учебной литературе процессы, происходящие при включении диода в прямом направлении, объясняются следующим образом: прилегающие к р-п-переходу области заполняются дырками и электронами; суммарный заряд уменьшается, высота потенциального барьера снижается на величину U_n . Это способствует увеличению потока основных носителей заряда, т.е. потока дырок, преодолевающих барьер и переходящих из области р в область п, и потока электронов, переходящих из области п в область р.

В ЧЕМ ЖЕ ЗДЕСЬ ПРОТИВОРЕЧИЕ?

Уже этот мини-обзор пяти работ демонстрирует характерное противоречие. Кто прав: утверждающий, что дырки генерируются в "некотором малом объеме" [2], или тот, кто говорит, что "дырки из р-области преодолевают потенциальный барьер и переходят в п-область, рекомбинируя с электронами"? [4, 5].

Заметим, что работы [1, 2] написаны изготовителями п/п приборов, которые в процессе измерений тепловых явлений в р-п-переходе столкнулись с парадоксальным эффектом и описали его, указав, что при прямом включении р-п-перехода вместо его нагрева наблюдается охлаждение [1]. Этот эффект был объяснен тем, что неосновные носители (дырки) уносят тепло от р-п-перехода, а энергия дырок высвобождается у металлического контакта с п-областью, где и генери-



руется тепло. В работе [2] таким же образом описан основной механизм – тепловая генерация дырок в некоторой области и их уход в область с меньшей концентрацией.

Тот же эффект описан и в работе [6], посвященной проблемам надежности п/п приборов. Ее автор утверждает, что в диодной структуре имеет место охлаждение области перехода и выделение поглощенной в ней энергии в объеме кристалла или на контакте металл-полупроводник, где происходит рекомбинация инжектированных носителей заряда.

КАК ЭТО ПРОТИВОРЕЧИЕ УСТРАНИТЬ?

Указанное расхождение, возникающее при описании процессов, происходящих в р-п-переходе, в среде практиков, изготавливающих п/п приборы [1, 2, 5], и теоретиков, выдвигающих обоснование тех же процессов, описываемых в р-п-переходе [3, 4, 6], может быть устранено. Для этого необходимо внимательно проанализировать процессы выделения тепла на р-п-переходе при приложении к нему прямого напряжения и вызванного этим тока через переход.

При приложении прямого напряжения $>0,3$ В для Ge и $>0,6$ В для Si диод имеет небольшое дифференциальное сопротивление, и по нему может протекать ток, изменяющийся в значительных пределах. Рассмотрим процессы, которые позволяют р-п-переходу остаться целым при большом удельном тепловом воздействии.

Во-первых, как только область р-п-перехода толщиной $0,5 \cdot 10^{-6}$ м начинает нагреваться, число вакансий в нем должно резко возрасти. Оно определяется по формуле:

$$N_V = N_A \cdot \exp(-E_a/kT),$$

где N_A – число Авогадро, E_a – энергия активации вакансий, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Охарактеризуем вакансии, прежде чем рассматривать их взаимодействие с потоком электронов. Вакансии имеют объем [7], но не имеют установленной массы (по крайней мере, она не известна).

Мгновенная скорость вакансий определяется по формуле:

$$V_B = V_3 \cdot \exp(-E_a/kT),$$

где V_3 – скорость звука в материале, E_a – энергия активации вакансий.

Согласно данным работы [8], появление вакансий в структуре – это акт плавления. То есть появившаяся вакансия об-

ладает энергией E_a и некоторой упругостью. При взаимодействии с потоком электронов вакансии движутся им навстречу.

НОВАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Используя эти краткие сведения о вакансиях, можно предложить гипотетическую модель процессов в р-п-переходе, которая отвечает на поставленный вопрос: почему охлаждается, а не нагревается р-п-переход в процессе протекания по нему прямого тока?

При приложении к р-п-переходу толщиной $0,5 \cdot 10^{-6}$ м напряжения 0,8 В собственная напряженность поля в переходе составит $E = U/h$, где U – приложенное напряжение, а h – толщина р-п-перехода (в нашем случае $E = 1,3 \cdot 10^6$ В/м).

Сила давления потока электронов, действующего на кристаллическую решетку, определяется по формуле $F = E \cdot I \cdot \tau$, где E – напряженность поля, В/м; I – сила тока, А; τ – время релаксации структуры, с. Давление, испытываемое возникшей вакансией, можно определить как разность между давлением движущегося потока электронов и реакцией кристаллической решетки, используя схему кинетического взаимодействия, приведенную на рисунке, где A – решетка структуры, B – вакансия, а S – путь движения электрона.

В точке б движущийся свободный электрон, взаимодействуя с вакансией, проходит через нее, а в точке а его взаимодействие с решеткой А создает импульс, под действием которого вакансия сдвигается вправо. Она при этом уходит из зоны р-п-перехода и уносит энергию, равную энергии активации одной вакансии, а уход из р-п-перехода всех возникших вакансий приводит к его охлаждению, что и позволяет ему оставаться целым и невредимым.

Переместившаяся вакансия в п-структуре взаимодействует с кристаллической решеткой и создает термомеханическое напряжение в структуре кристалла, которое, в свою очередь, воздействует на уровень Ферми и переводит электроны из валентной зоны в зону проводимости. В работах [3, 4, 5] этот процесс трактуется как инжекция дырок из зоны р через переход в зону п полупроводника и рекомбинация пар электрон-дырка, обуславливающих "дырочный ток" в п-структуре.

Предложенная физическая модель позволяет по-новому осветить процессы, происходящие в р-п-переходе при возникновении термомеханических напряжений, обусловленных взаимодействием вакансий при прямом смещении р-п-перехода.

ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБРАТНОМ СМЕЩЕНИИ

Рассмотренная модель дает объяснение и процессам пробоя при обратном смещении р-п-перехода. При приложении к переходу обратного напряжения в зонах инверсного слоя (с обратной проводимостью), которые есть всегда, появля-

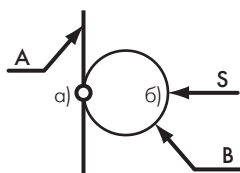


Схема кинетического взаимодействия



ются каналы проводимости. В работе [4] этот процесс описывается так: "При запирающем напряжении 75–100 мВ поток основных носителей прекращается ... При этом через переход протекает тепловой ток, образуемый потоком неосновных носителей ... Происходит экстракция носителей заряда. Небольшой величины тепловой ток является своеобразным током утечки обратносмещенного р-п-перехода". Действительно, уже в момент приложения небольшого потенциала (75–100 мВ), в локальной точке р-п-перехода протекает ток утечки, что обусловлено проводимостью инверсионного слоя.

При дальнейшем повышении обратного потенциала ток утечки растет незначительно. В рассматриваемой локальной точке обратносмещенного р-п-перехода возникает зона с температурным градиентом, обуславливающая появление вакансий. Они, как было рассмотрено ранее, уносят тепло, а учитывая ограниченность геометрических размеров инверсионного слоя и наличие зоны с температурным градиентом, этот слой генерирует вакансии (пропорционально его геометрическим размерам) при возрастании электрического потенциала. Ток утечки при этом остается незначительным при охлаждении зоны уходящими вакансиями.

Фактически это зона микроплазменного пробоя, в которой до определенного момента растет дифференциальное сопротивление. Для возникновения пробоя при достижении некоторой величины $U_{об}$ необходимо выполнение двух условий: рост площади разогрева в локальной зоне инверсионного слоя (по мере увеличения приложенного обратного потенциала) и конечная вероятность появления носителей заряда в области, прилегающей к локальной зоне инверсионного слоя. Напряжение пробоя обратносмещенного р-п-перехода зависит от степени концентрации донорных примесей и толщины п-области [9].

Излучательная рекомбинация электронов и дырок, возникающая при микроплазменном пробое, есть, скорее всего, результат взаимодействия потока электронов с дрейфующими вакансиями.

Условие для "генерации вакансий", подробно описанное в работе [10], возникает только тогда, когда выделенная мощность (в локальной точке р-п-перехода) во много раз превзойдет удельную тепловую мощность, возникающую при прямом включении.

Генерация вакансий и их взаимодействие с потоком электронов, как уже отмечалось, обуславливают появление термомеханических напряжений в р-п-переходе. Как и в п-структуре, вакансии, взаимодействуя с кристаллической решеткой, приводят к появлению дополнительных электронов проводимости. Если количество вакансий таково, что термомеханические напряжения достигают величины $\sigma_{сжатия}$ кремния [10], то в этом состоянии в области р-п-перехода происходит фазовый переход – электроны под действием

механического напряжения переходят из валентной зоны в зону проводимости по всему объему сжатия, что приводит к появлению канала металличности. При достаточной мощности источника приложенного обратного напряжения этот канал выгорает и, как следствие, происходит разрушение п/п структуры. В работах [3, 4, 5] этот пробой описывают как ионизацию или лавинное размножение носителей тока. Действительно, только при достижении $\sigma_{сжатия}$ должно быть лавинное увеличение числа носителей тока.

НУЖНА НОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для создания математической модели, подтверждающей достоверность выводов предложенной физической модели, необходимо более детальное описание свойств вакансий, их характеристик, условий переноса под воздействием приложенного электрического потенциала, а главное, нужно пересмотреть роль химического потенциала вакансий при их появлении в п- и р-структурах.

В свете рассмотренной физической модели процессов, происходящих в р-п-переходе, необходимо:

- рассмотреть свойства вакансий с квантово-механических позиций;
- дополнить (с позиций "Переноса явления" [11]) существующие модели, описывающие процессы в р-п-переходе, параметрами, отражающими роль вакансий, возникающих

под действием внешнего электрического поля и приводящих к появлению дополнительных свободных носителей заряда в *n*-структуре (так называемого дырочного тока).

Предложенная физическая модель дает возможность предположить, что в *p-n*-переходе при прямом и обратном смещении происходят (наряду с известными) и другие физические процессы (вызванные появлением термомеханических напряжений, обусловленных вакансиями), которые позволяют объяснить возникающие эффекты. Сама модель может быть проверена путем практических измерений как концентрации вакансий, так и напряженного состояния в полупроводнике.

Считаем, что предложенная физическая модель, не умаляя достоинства признанных математических моделей, позволит разработчикам *p/p* техники и радиоэлектронной аппаратуры скорректировать свои взгляды на явления, протекающие в *p-n*-переходе и учесть их при разработке новых *p/p* приборов. Она позволит также унифицировать (в хорошем смысле этого слова) знания преподавателей и студентов соответствующих специальностей.

Ссылки на старые (по году издания) работы, приведенные в списке литературы, вовсе не означают, что не отслеживаются новые публикации, что наши сведения устарели. Это означает просто, что новых интересных или фундаментальных работ на эту тему практически нет. Можно только надеяться, что они появятся у исследователей, привлеченных этой статьей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блихер А. Физика тиристоров. – Ленинград: Энергоиздат, Ленинградское отд., 1981.
2. Челноков В.Е., Евсеев Ю.А. Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973.
3. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – М.: Энергия, 1967.
4. Агаханян Т.М. Основы транзисторной электроники. – М.: Энергия, 1974.
5. Пасынков В.В., Чирков Л.К. Полупроводниковые приборы. – С.-Пб., М, Краснодар, 2003.
6. Пряников В.С. Прогнозирование отказов в полупроводниковых приборах. – М.: Энергия, 1978.
7. Гегузин Я.Е. Почему и как исчезает пустота. – М.: Наука, 1983.
8. Бохштейн Б.С. и др. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. – М.: Металлургия, 1974.
9. Кузьмин В.А. Расчет силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1980.
10. Клиот А.Е. Механизм износа и разрушения электро-/радиоэлементов под воздействием приложенного напряжения. – Качество и надежность изделий, 1991, № 4.
11. Большая Советская Энциклопедия, том 19. – М.: Советская энциклопедия, 1975.

По поводу статьи А.Клиота "О физических процессах в *p-n*-переходе"

В.Мордкович
mord@mail1.lebedev.ru

В своей статье А.Клиот обращает внимание на то, что выделение тепла в области *p-n*-перехода при протекании больших токов должно сопровождаться генерацией вакансий. Действительно, если в какой-нибудь локальной области полупроводника температура по какой-то причине заметно возрастает, то и концентрация термогенерированных неравновесных вакансий в этой области должна быть выше. Анализируя такую ситуацию, необходимо иметь в виду следующее.

1. Появление локального источника вакансий должно сопровождаться их диффузией в окружающие области прибора. Поскольку в таком полупроводнике, как Si, вакансии как устойчивый дефект структуры в интервале рабочих температур прибора существовать не может [1], появление термогенерированных вакансий будет сопровождаться образованием устойчивых комплексов типа вакансии-атом примеси, или дивакансия. Такие комплексы электрически активны и создают глубокие уровни в запрещенной зоне Si. Они неизбежно влияют на электрические характеристики Si (концентрацию и время жизни носителей тока).

2. Из работ по радиационной физике полупроводников известно, что время жизни свободной вакансии в Si может составлять миллисекунды при комнатной температуре и десятки секунд при температурах выше 200°C. С учетом известных данных о коэффициентах диффузии вакансий в Si это означает, что упомянутые устойчивые комплексы возникнут по всему объему Si-прибора даже при малом времени эксплуатации.
3. Современные методы измерения электрических характеристик полупроводников и *p/p* приборов позволяют обнаружить присутствие электрически активных дефектов структуры в очень малых концентрациях. Например, с помощью метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней можно измерять такие малые концентрации дефектов, как 10^{11} см^{-3} .

Таким образом, если автор статьи прав в своих предположениях относительно влияния термогенерированных вакансий на работу приборов, это можно экспериментально проверить путем исследования изменений концентрации и энергетического спектра дефектов структуры в материале прибора под влиянием электрических нагрузок.