

УДК 621.382.037.37

Влияние микротрещин на вольтамперные характеристики полупроводниковых диодов

С. И. Матюхин, А. А. Писарев, А. В. Ставцев

Орловский государственный технический университет, Россия

** ЗАО «Протон-Электротекс», Россия*

Методами компьютерного моделирования в пакете программ Sentaurus TCAD фирмы Synopsys исследовано влияние микротрещин на вольтамперные характеристики (ВАХ) кремниевых полупроводниковых диодов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, микротрещины, вольтамперные характеристики, кремниевый диод.

Методами комп'ютерного моделювання в пакеті програмам Sentaurus TCAD фірми Synopsys досліджується вплив мікротріщин на вольтамперні характеристики (ВАХ) кремнієвих напівпровідникових діодів.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, мікротріщини, вольтамперні характеристики, кремнієвий діод.

Influence of micro cracks on the I-V-curves of silicon semiconductor diodes is investigated by the methods of computer simulation with Synopsys software Sentaurus TCAD.

Key words: computer simulation, micro cracks, I-V-curves, silicon diode.

1. Введение

При производстве полупроводниковых приборов в результате проведения ряда технологических операций в полупроводниковой пластине приборов могут возникать различные микродефекты [1, 2], способные оказывать заметное влияние на характеристики готовой продукции. Поэтому к важным задачам современной физики полупроводниковых приборов следует отнести задачу о качественном и количественном влиянии микродефектов на характеристики приборов и разработку методов прогнозирования надежности этих приборов с целью выявления потенциально ненадежных изделий на ранней стадии изготовления.

В настоящей работе методами компьютерного моделирования исследовано влияние таких микродефектов, как микротрещины на вольтамперные характеристики (ВАХ) кремниевых полупроводниковых диодов.

2. Методика проведения компьютерного моделирования

В качестве прототипа для моделирования и прибора, предназначенного для калибровки компьютерной модели, был выбран сварочный диод Д053-7100, выпускаемый ЗАО «Протон-Электротекс» (г. Орёл, Россия). Моделирование структуры и электрофизических характеристик этого диода осуществлялось в пакете программ приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD компании Synopsys (лицензия). При этом время жизни носителей заряда в кремнии считалось подгоночным параметром модели и выбиралось из условия наилучшего совпадения результатов моделирования ВАХ серийных приборов с экспериментальными данными (рис. 1).

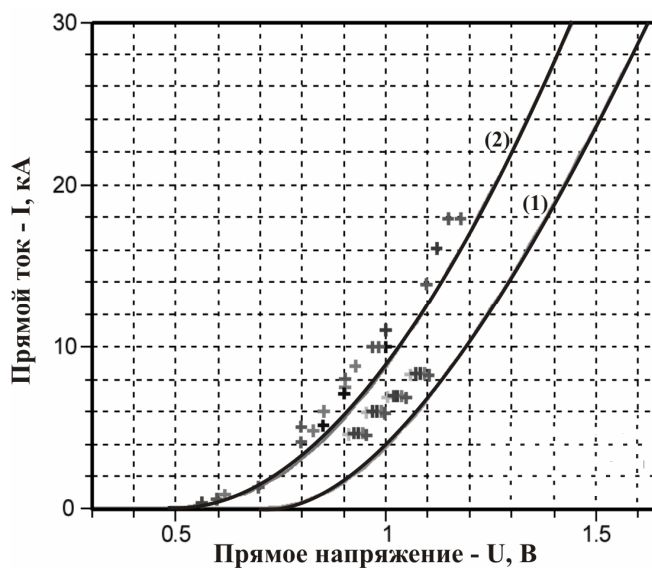


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ сварочного диода Д053-7100, изготовленного по стандартной технологии. Сплошные кривые – моделирование, маркеры – результаты испытаний: 1 – при $T=300$ К; 2 – при $T=440$ К

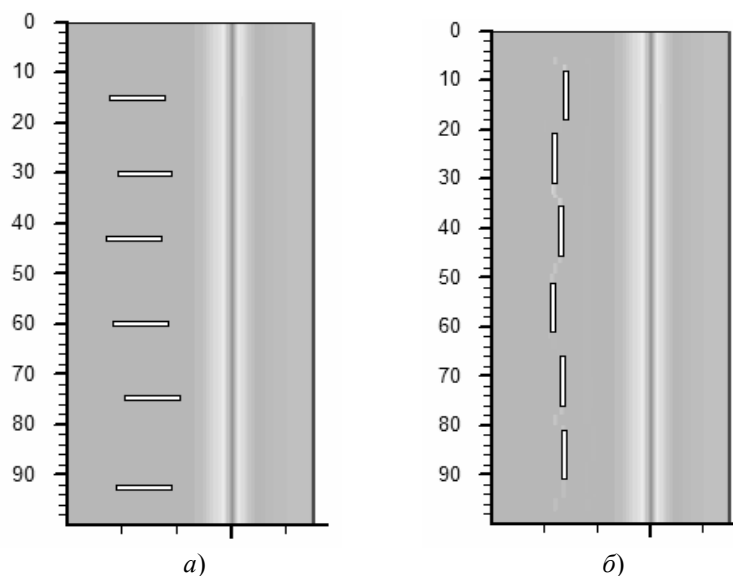


Рис. 2. Перпендикулярные (а) и параллельные (б) р-п-переходу микротрещины, расположенные в полупроводниковой структуре диода вблизи плоскости перехода, отмеченной жирной риской

В пакете программ Sentaurus TCAD изначально заложен микроскопический подход к моделированию характеристик полупроводниковых приборов [3]. Этот

подход основан на численном решении фундаментальных уравнений (Пуассона, непрерывности, теплопроводности и т.д.), описывающих протекающие процессы и поведение носителей заряда в различных (локальных) областях прибора. Суммирование токов, связанных с движением этих зарядов, и дает в результате ВАХ прибора. Моделирование влияния микротрещин на прямую и обратную ветви ВАХ диода Д053-7100 проводилось для двух типов трещин – перпендикулярных и параллельных p - n -переходу (рис. 2), при двух значениях температуры полупроводниковой структуры – $T = 300$ К и $T = 400$ К.

3. Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты моделирования влияния микротрещин на прямую и обратную ветви ВАХ диода Д053-7100 представлены на рисунках 3 и 4. Как показывают эти рисунки, микротрещины могут оказывать существенное влияние как на прямые, так и на обратные ветви ВАХ кремниевых диодов. Причем, степень этого влияния слабо зависит от температуры и сильно – от координат микротрещин в кремниевой пластине: микротрещины, которые пересекают p - n -переход, прилегают к нему и находятся в глубине пластины вдали от перехода, оказывают разное воздействие на ВАХ диодов.

Перпендикулярные p - n -переходу микротрещины сильнее всего влияют на прямую ВАХ диодов, если они прилегают к p - n -переходу, а параллельные – если пересекают p - n -переход (рис. 3 и 4, а). При этом параллельные p - n -переходу трещины приводят к большему изменению ВАХ диодов, чем перпендикулярные трещины того же размера, которые расположены в той же области полупроводниковой пластины, что и параллельные.

Это связано с тем, что перпендикулярные p - n -переходу трещины рассекают полупроводниковую пластину прибора таким образом, что этот прибор можно представить как совокупность параллельно включенных диодов, практически эквивалентную исходному диоду без трещин. Небольшие изменения ВАХ такой совокупности будут связаны, главным образом, с изменением напряженности электрического поля \vec{E} и, как следствие, скорости движения носителей заряда \vec{v} в пространстве между трещинами:

$$\vec{v} = \mu \vec{E}, \quad (1)$$

где μ – подвижность носителей заряда.

Благодаря концентрации силовых линий поля на краях трещин, напряженность электрического поля в пространстве между трещинами несколько уменьшается. Вследствие этого при заданных значениях рабочего напряжения составляющая прямого тока, обусловленная дрейфом носителей заряда (1), тоже уменьшается.

Воздействие на прямую ВАХ трещин, параллельных p - n -переходу, оказывается более сложным. Помимо существенного перераспределения электрического поля в полупроводниковой структуре прибора они приводят еще и к «затенению» некоторых областей структуры, препятствуя прохождению тока через эти области. Это приводит к большему снижению прямого тока при заданных напряжениях на приборе, чем в случае перпендикулярных трещин.

Связанное с трещинами изменение прямой ветви ВАХ диодов выражается, главным образом, в увеличении напряжения отсечки U_0 диодов и приводит к росту рассеиваемой при работе приборов мощности P :

$$P = U_0 I_{av} + kr I_{av}^2, \quad (2)$$

где I_{av} – среднее значение прямого тока, r – дифференциальное сопротивление диода, k – коэффициент, зависящий от формы протекающего тока [4].

Как показывают результаты моделирования, эта мощность будет увеличиваться с ростом концентрации микротрещин в полупроводниковой пластине приборов.

Вследствие увеличения рассеиваемой мощности происходит увеличение энергии потерь, которая выделяется в диодах в виде тепла и приводит к разогреву

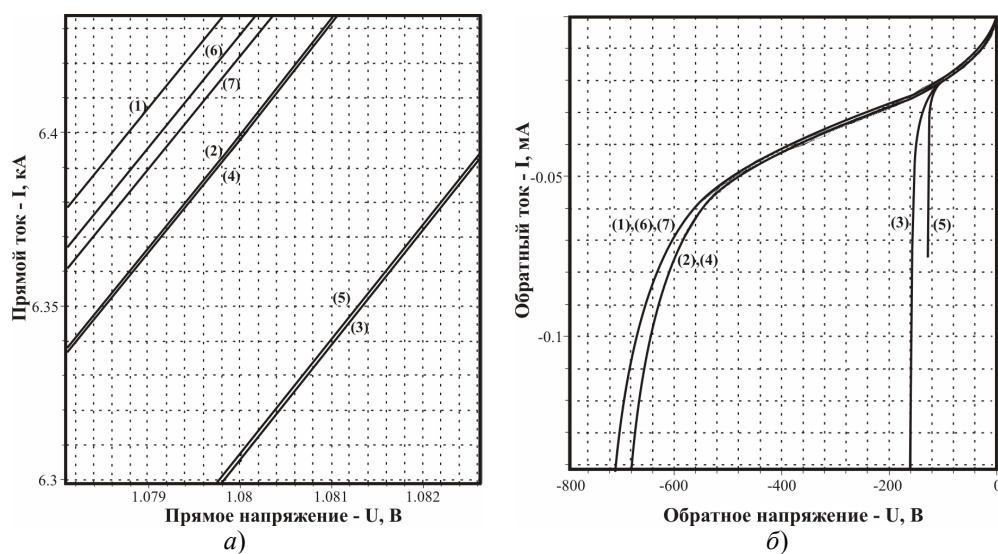


Рис. 3. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ диода Д053-7100 при $T=300$ К: 1 – в отсутствие микротрещин; 2 – при наличии перпендикулярных трещин, пересекающих р-п-переход; 3 – при наличии параллельных трещин, пересекающих р-п-переход; 4 – при наличии перпендикулярных трещин, примыкающих к р-п-переходу; 5 – при наличии параллельных трещин, примыкающих к р-п-переходу; 6 – при наличии перпендикулярных трещин вдали от р-п-перехода; 7 – при наличии параллельных трещин вдали от р-п-перехода

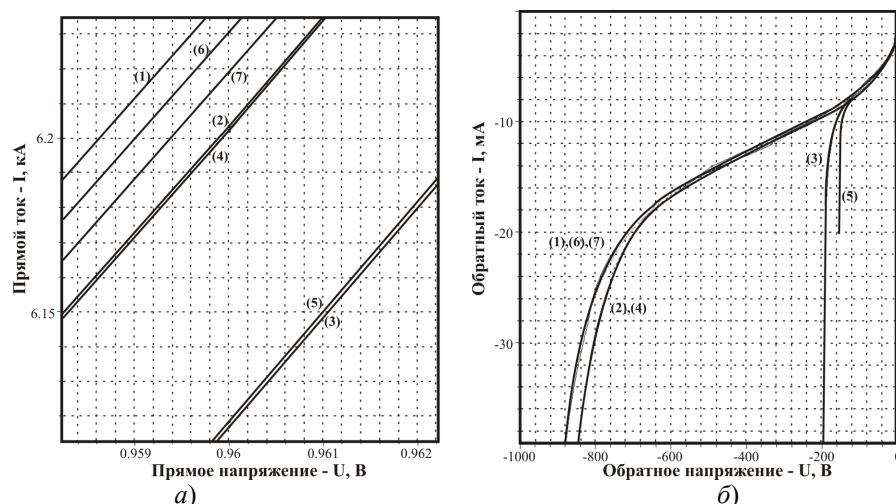


Рис. 4. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ диода Д053-7100 при $T=400$ К: 1 – в отсутствие микротрещин; 2 – при наличии перпендикулярных трещин, пересекающих p - n -переход; 3 – при наличии параллельных трещин, пересекающих p - n -переход; 4 – при наличии перпендикулярных трещин, примыкающих к p - n -переходу; 5 – при наличии параллельных трещин, примыкающих к p - n -переходу; 6 – при наличии перпендикулярных трещин вдали от p - n -перехода; 7 – при наличии параллельных трещин вдали от p - n -перехода

полупроводниковой структуры приборов. Однако температура таких структур всегда имеет некоторое ограничение, и превышение предельно допустимой температуры может вывести прибор из строя [4, 5]. Поэтому наличие в полупроводниковой пластине микротрещин приводит к снижению нагрузочной способности приборов. Воздействие микротрещин на обратную ВАХ кремниевых диодов проявляется, в основном, в снижении значений напряжения пробоя диодов. При этом микротрещины, параллельные p - n -переходу, снова оказывают большее влияние на обратную ВАХ диодов, чем перпендикулярные (рис.3 и 4,б).

Возможным механизмом понижения пробойных напряжений в структурах с трещинами является дополнительная генерация носителей заряда через глубокие уровни.

Как известно [6], обратный ток кремниевых диодов имеет генерационную природу и связан с генерацией носителей заряда через глубокие энергетические уровни, расположенные в середине запрещенной зоны кремния. Как правило, такие уровни создаются атомами некоторых металлов (золото, кобальт, медь, железо, платина и т.д.), а также различного рода дефектами полупроводника [7], включая микротрещины.

Согласно теории Саа-Нойса-Шокли [8] плотность генерационного тока j_g пропорциональна скорости генерации электронов и дырок и толщине слоя объемного заряда W :

$$j_g \approx \frac{en_i W}{2\sqrt{\tau_p \tau_n}}, \quad (3)$$

где n_i – концентрация собственных носителей заряда полупроводника, τ_p – время жизни дырок, τ_n – время жизни электронов.

Таким образом, на величину генерационного тока наибольшее воздействие будут оказывать микротрещины, расположенные в области пространственного заряда W (вблизи p - n -перехода), причем, так как время жизни носителей заряда обратно пропорционально концентрации источников глубоких уровней, генерационный ток должен расти с увеличением концентрации трещин.

Увеличение генерационного тока и будет приводить к развитию лавинного пробоя при меньших значениях обратного напряжения на диоде (рис. 3 и 4, б).

4. Заключение

Как показывают результаты моделирования, появление микротрещин в полупроводниковой структуре диодов приводит к увеличению напряжения отсечки приборов в прямом направлении и к снижению значений напряжения пробоя при обратном смещении диодов. Вследствие этого снижается нагрузочная способность диодов, и ухудшаются их запирающие характеристики. При этом наибольшее воздействие на ВАХ диодов оказывают параллельные p - n -переходу микротрещины, расположенные в непосредственной близости от перехода.

Очевидно, что микротрещины будут оказывать влияние не только на статические, но и на динамические характеристики полупроводниковых приборов. Поэтому дальнейшее развитие проведенных исследований может быть связано с изучением воздействия микротрещин на коммутационные характеристики кремниевых диодов.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № П2514).

ЛИТЕРАТУРА

1. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов, - М.: Высшая школа, 1974. – 400 с.
2. Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности, - М.: Наука, 1990. – 216 с.
3. Sentaurus TCAD User Guide, - Synopsys, 2005.
(<http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx>).
4. Рабинерсон А.А., Ашкинази Г.А. Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов, - М.: Энергия, 1976. – 296 с.
5. Евсеев Ю.А., Дерменжи П.Г. Силовые полупроводниковые приборы, - М.: Энергоиздат, 1981. – 472 с.
6. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов, - М.: Физматлит, 2008. – 488 с.
7. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников, - М.: Высшая школа, 1984. – 352 с.
8. Sah C.T., Noyce R.N., Shockley W. Carrier generation and recombination in p - n -junctions and p - n -junction characteristics // Proc. IRE. 1957. V.45. P.1228-1243.