

В. В. КУШНИРЕНКО, к. ф.-м. н. Г. К. НИНИДЗЕ,  
к. ф.-м. н. С. П. ПАВЛЮК, С. М. САВИЦКИЙ,  
д. ф.-м. н. О. В. ТРЕТЯК

Украина, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко  
E-mail: pps@mail.univ.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
26.09 2006 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. В. ТЕТЕРКИН  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ ПРЯМОГО ТОКА НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В $p^+n$ -ДИОДЕ

*Предложен способ регулируемого изменения времени жизни неосновных носителей заряда в базе диодного кристалла полупроводника под действием короткого модифицирующего импульса тока.*

Процессы генерации-рекомбинации являются одними из основных в полупроводниковой электронике, поскольку во многих случаях они определяют работу полупроводниковых приборов. Значительную роль в этих процессах играют генерационно-рекомбинационные центры, связанные с собственными дефектами решетки.

В общем случае, согласно теории Шокли-Рида, влияние указанных центров наиболее существенно, когда соответствующие им уровни расположены вблизи середины запрещенной зоны, т. е. при этом обмен носителями между зоной проводимости и валентной зоной через эти центры самый эффективный. Именно наличие глубоких центров того или иного типа придает полупроводниковой структуре желательные или, наоборот, нежелательные свойства. Поэтому с изучением глубоких центров — их физико-химической природы, энергетической структуры, свойств и методов их контролируемого введения — во многом связано решение основной задачи полупроводникового материаловедения: создание полупроводниковых веществ и — на их основе — приборов с заданными характеристиками.

Наиболее информативным параметром генерационно-рекомбинационных процессов является время жизни неосновных носителей заряда. Именно время жизни является наиболее чувствительным к разного рода дефектам, дислокациям, примесям. Известно, что время жизни неосновных носителей определяет коэффициент усиления по току транзисторов, коэффициент полезного действия солнечных батарей, величину обратных токов диодов и транзисторов. В силовых диодах оно определяет максимальную предельную частоту работы прибора  $f_{\max}$ , при которой выпрямленный ток не снижается. В импульсных диодах оно определяет время восстановления  $\tau_{\text{в}}$  — время, за которое ток через диод после его переключения с прямого направления на обратное выходит на стационарное значение. Существенно, что величины  $f_{\max}$  и  $\tau_{\text{в}}$  задаются в основном временем жизни неоснов-

ных носителей заряда в базе диода  $\tau_p^*$ . Для повышения максимальной частоты и уменьшения времени восстановления уменьшают время жизни, для чего разными способами вводят в полупроводник глубокие рекомбинационные центры. Среди этих способов наиболее часто применяются облучение полупроводника быстрыми частицами или  $\gamma$ -квантами [1], легирование его соответствующими примесями [2].

При исследовании сварки-пайки кристалла силового  $p^+n$ -диода [3] было обнаружено, что происходит растрескивание кристалла на две части в области металлургической границы. Это происходит потому, что при протекании через кристалл импульса прямого тока с плотностью до  $10^4 \text{ А/см}^2$  и удельной мощностью  $\approx 10^6 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-3}$  кристалл существенно и неоднородно разогревается. В месте максимального градиента температуры в нем возникают значительные механические напряжения, вследствие которых появляются структурные дефекты.

Было высказано предположение, что после окончания импульса тока эти дефекты из-за быстрого охлаждения кристалла остаются в нем и играют роль дополнительных центров рекомбинации, уменьшая время жизни носителей заряда. А изменение времени жизни должно привести к существенным изменениям характеристик диода.

Целью этой работы и стало исследование изменений времени жизни при протекании тока, изучение влияния таких изменений на характеристики диодов и определение энергетических параметров введенных центров.

В исследованиях использовались кристаллы диодов КД-105—КД-209 с  $p^+n$ -переходом, изготовленным методом диффузии. Исходным материалом для кристаллов был кремний марки КЕФ-40 с удельным сопротивлением  $40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . С одной стороны он легировался бором ( $p$ -типа), а со второй — фосфором ( $n$ -типа). Кристалл имеет форму цилиндра диаметром 1,9 мм и высотой 0,35 мм.  $P^+n$ -переход расположен приблизительно посередине кристалла.

Экспериментальная установка дает возможность исследовать введенные центры рекомбинации (методом термостимулированной проводимости (ТСП) [4, 5]), время жизни неосновных носителей заряда (методом послеинжекционной ЭДС [6, 7]), снимать вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Установка позволяет также наблюдать переходные процессы

тока в диоде при переключении его с прямого направления на обратное. В этом случае измеряется время восстановления  $\tau_{\text{в}}$  — время, за которое обратный ток уменьшается на 90% от начального значения [8, с. 29—31]. Одновременно можно получить и другую характеристику — максимальную частоту  $f_{\text{max}}$ , при которой выпрямленный ток не снижается ниже определенного уровня (приблизительно на 30%) [8].

При исследованиях спектра ТСП образец находился на медном блоке держателя, в который вмонтирована спираль для подогрева. Держатель с образцом помещался в криостат с жидким азотом. Включение нагревателя изменяло температуру в криостате. Температура образца измерялась с помощью медь-константановой термопары, второй спай которой погружен в жидкий азот. Сигнал термопары подается на X-вход двухкоординатного автоматического самописца. Заполнение глубоких уровней осуществляется с помощью тока инжекции носителей заряда из  $p^+ - n$ -перехода.

Для разогрева диодов использовались специально генерируемые одиночные прямоугольные модифицирующие импульсы прямого тока длительностью 5,4 мс с регулируемой амплитудой. Постоянно происходил контроль времени жизни неосновных носителей заряда.

Вначале, до воздействия разогревающего импульса тока, исследовались те параметры диода, которые обеспечивались экспериментальной установкой. Затем на диодный кристалл подавали модифицирующие одиночные прямоугольные импульсы прямого тока с увеличивающейся амплитудой. Это приводило к возрастанию разогрева кристалла. Наблюдали падение напряжения на кристалле  $U$ , изменение эффективного времени жизни неосновных носителей заряда, изменение других параметров диода. Потом проводились исследования образцов методом ТСП для выявления созданных глубоких центров.

*Метод послειнжекционной ЭДС диода.*

Метод основан на наблюдении изменения падения напряжения на  $p^+ - n$ -переходе с течением времени после приложения к нему кратковременного импульса тока в прямом направлении. Если в момент времени  $t$  прервать импульс, то прекращение тока через диод сопровождается переходным процессом релаксации напряжения на  $p^+ - n$ -переходе.

Известно, что при протекании прямого тока происходит инжекция неосновных носителей заряда, и концентрация дырок в базе диода возле  $p^+ - n$ -перехода превышает равновесное значение, чему и отвечает наличие некоторого падения напряжения на  $p^+ - n$ -переходе [9]. После мгновенного прекращения тока распределение концентрации дырок в первый момент времени остается неизменным и лишь с течением времени спадает, стремясь к постоянному распределению, которое характеризует состояние термодинамического равновесия.

Таким образом, при размыкании цепи  $p^+ - n$ -перехода наблюдается начальное падение напряжения на внутреннем последовательном сопротивлении, потом напряжение на  $p^+ - n$ -переходе уменьшается во времени линейно, и в заключительной части происходит его экспо-

ненциальный спад. По линейному спаду этого напряжения можно определить эффективное время жизни:

$$\tau_p = \frac{kT}{q} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U},$$

- где  $k$  — постоянная Больцмана;
- $T$  — температура;
- $q$  — заряд электрона;
- $\Delta t$  — интервал времени существования линейного спада напряжения;
- $\Delta U$  — величина линейного спада напряжения.

*Метод термостимулированной проводимости*

Для экспериментального определения основных параметров уровней чаще всего используется метод ТСП, который состоит в следующем.

Если освещать кристалл собственным светом или пропускать ток в прямом направлении при низкой температуре достаточно долго, то установится некоторое стационарное для данных условий неравновесное заполнение уровней прилипания. При достаточно низкой температуре и глубоких уровнях такое заполнение будет сохраняться длительное время после снятия возбуждения. Если предварительно освещенный кристалл медленно нагревать без освещения, то в результате тепловых забросов из уровней в зону концентрации свободных носителей будет возрастать. Это проявится в увеличении тока через кристалл. Величина тока при данной температуре превышает ток этого же кристалла без предыдущего фотовозбуждения. Разница указанных токов представляет собой ТСП. По мере возрастания температуры заполнение уровней прилипания уменьшается, и проводимость должна уменьшаться.

Таким образом, зависимость ТСП от температуры (спектр ТСП) будет немонотонной: при некоторой температуре  $T_m$  наблюдается максимум (пик) проводимости. Очевидно, что максимальная проводимость будет наблюдаться при температуре, при которой происходит наиболее интенсивное опустошение глубокого уровня.

Чем более мелкий уровень, тем при более низкой температуре наблюдается максимум ТСП. При наличии в кристалле нескольких уровней, разнесенных энергетически, температурная зависимость ТСП имеет несколько максимумов.

Осциллограммы падения напряжения на образцах показаны на рис. 1. Форма импульса прямого тока прямоугольная.

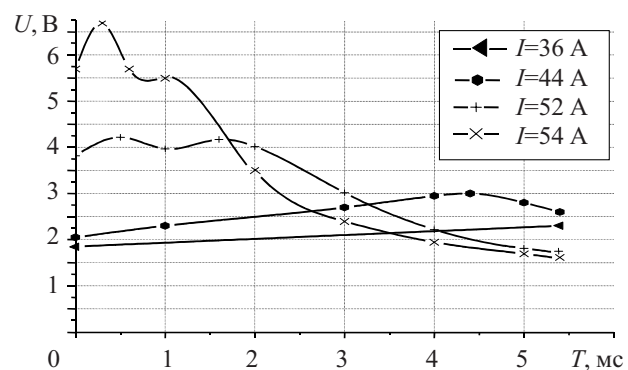


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на диоде при разных амплитудах модифицирующего импульса тока

Как видно из осциллограмм, при небольших амплитудах импульсов тока форма падения напряжения повторяет прямоугольную форму импульсов тока ( $I < 30$  А). При дальнейшем увеличении тока возникает рост напряжения в виде "горба", после которого оно резко падает ( $40 \text{ А} < I < 48$  А). После первого горба появляется второй ( $I < 48$  А), затем структура выходит из строя и разрушается.

Появление горбов на осциллограммах сопровождается началом резкого уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода, что говорит о появлении глубоких центров рекомбинации.

Зависимость времени жизни от амплитуды модифицирующего импульса тока показана на рис. 2. Из анализа полученных результатов следует, что изменение времени жизни  $\tau_p^*$  при увеличении амплитуды модифицирующего импульса тока происходит в два этапа: начальный момент изменений характеризуется увеличением времени жизни, а при дальнейшем увеличении тока происходит уменьшение времени жизни (кривая 1). Наибольшее уменьшение  $\tau_p^*$  (в 14 раз) получено в структуре, которая имела наибольшее начальное значение  $\tau_p^*$  среди всех типов образцов.

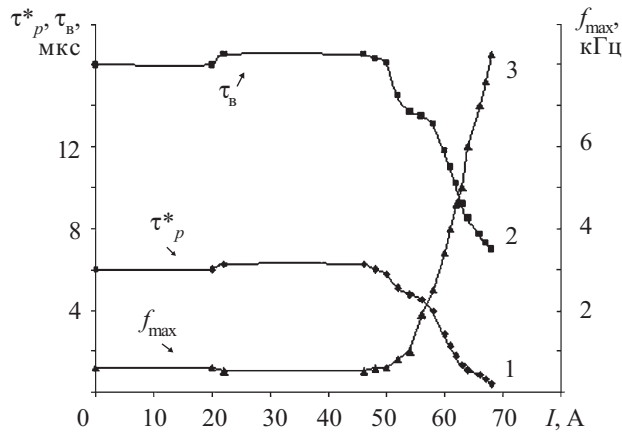


Рис. 2. Зависимость времени жизни (1), времени восстановления (2), максимальной частоты (3) от амплитуды модифицирующего импульса тока  $I$

Кривые 2, 3 на рис. 2 показывают, что при уменьшении  $\tau_p^*$  происходит изменение переключающих и частотных свойств диода. Из полученных графиков видно, что зависимость  $\tau_v$  от амплитуды приложенного импульса тока (кривая 2) имеет такой же характер, как и изменение  $\tau_p^*$ , что хорошо согласуется с теорией, поскольку эти два параметра взаимосвязаны между собой. Однако по сравнению с изменением времени жизни уменьшение  $\tau_v$  менее существенно и составляет лишь 2—2,25 раза (поскольку при исследовании использовались кристаллы силовых выпрямительных диодов, для которых этот параметр не является характерным).

Оценено изменение максимальной частоты  $f_{max}$ . Оказалось, что эта зависимость также повторяет изменение времени жизни (рис. 2, кривая 3). Это закономерно, поскольку для увеличения  $f_{max}$  стараются уменьшить  $\tau_p^*$ , т. к. именно этим параметром определяют частотные свойства диодов. Наибольшее

значение увеличения максимальной частоты составило 14 раз.

В таблице приведены данные об изменениях параметров образцов, подобранных с одинаковым начальным временем жизни. Все параметры до изменения обозначены индексами «0», а после модификации — индексом «М».

Номер образца	Изменение параметров диодов							
	$\tau_{p0}^*$ , мкс	$\tau_{pM}^*$ , мкс	$U_{п0}$ , В	$U_{пM}$ , В	$f_{max0}$ , кГц	$f_{maxM}$ , кГц	$\tau_{в0}$ , мкс	$\tau_{вM}$ , мкс
1	6	0,43	600	300	0,6	8,5	16	7,2
2	6	0,45	650	350	0,6	7,8	16	7,3
3	6	0,42	650	300	0,58	8,4	15,8	7
4	6	0,42	600	300	0,6	8,6	16	7,2
5	6	0,43	600	300	0,6	8,5	16	7,2

Кроме вышеупомянутого влияния модифицирующего импульса тока на время жизни, важным является также воздействие изменения параметров вольт-амперных характеристик (ВАХ) диода, в особенности пробивного напряжения или величины обратного тока.

Изменение величины пробивного напряжения  $U_{п}$  при заданном обратном токе для экспериментальных образцов показано в таблице. Как видно, напряжение пробоя уменьшается приблизительно в два раза. Это обстоятельство объясняется тем, что за счет примесей, которые осаждаются вдоль дислокаций, появляются локальные области с увеличенным электрическим полем, и это, в свою очередь, приводит к снижению пробивного напряжения.

Полученный методом термостимулированной проводимости спектр токов показан на рис. 3. До воздействия модифицирующего импульса тока график ТСП не имеет максимума (кривая 1). После действия импульса модификации на графике ТСП появляется максимум, который соответствует появлению нового уровня рекомбинации (кривая 2).

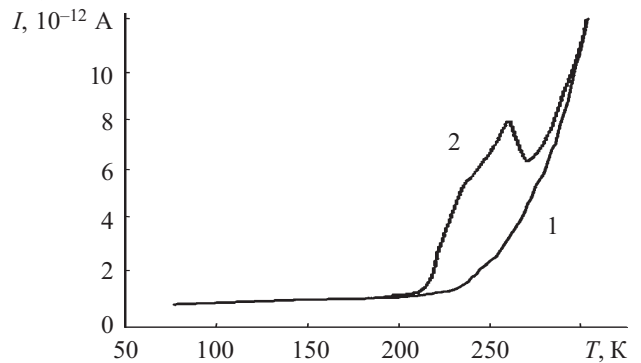


Рис. 3. Спектр токов ТСП:

1 — до модификации; 2 — после модификации

Полученные результаты объяснены следующим образом. Модифицирующий импульс тока приводит к резкому неоднородному разогреву диода. В месте максимального градиента температуры в кремнии, расположенном в зоне границы  $p^+-n$ -перехода, возникают наибольшие механические напряжения, которые приводят к образованию в крис-

талле структурных дефектов. После окончания импульса тока, благодаря быстрому охлаждению кремния, эти дефекты “замораживаются” в нем и, судя по всему, играют роль дополнительных центров рекомбинации, уменьшая  $\tau_p^*$ .

Модификация параметров кремния влияет как на величину  $\tau_p^*$ , так и на параметры диода. Изменяется также ход ВАХ диода. В приборах с наименьшим начальным эффективным временем жизни ( $\tau_p^* \approx 1,5$  мкс) такое влияние меньше, чем в диодах с наибольшим  $\tau_p^*$  (6 мкс). Предполагается, что это связано с большим количеством исходных центров рекомбинации в кремнии в первом случае, чем во втором, и, как следствие, относительно меньшим влиянием модификации на параметры такого кремния.

Во всех диодах, в первую очередь с наименьшим  $\tau_p^*$ , возрастание импульсного разогрева сначала сопровождается довольно заметным увеличением  $\tau_p^*$ , которое можно объяснить возможным отжигом первичных структурных дефектов в кремнии при небольших разогревах и уменьшением количества центров рекомбинации. Дальнейшее увеличение амплитуды импульсов разогрева существенно уменьшает  $\tau_p^*$ , значительно увеличивает обратный ток диодов, уменьшает в несколько раз напряжение их пробоя (см. табл.).

Изменение  $\tau_p^*$ , ВАХ, спектра ТСП диодов после модификации параметров кремния свидетельствует о появлении в его запрещенной зоне новых глубоких рекомбинационных центров. Послойное селективное травление поверхности кремния параллельно плоскости  $p^+-n$ -перехода обнаружило наличие большого количества линейных дислокаций. Этот результат позволяет считать справедливым наше предположение о связи рекомбинационных центров и структурных дефектов в кремнии после модификации.

В зависимости ТСП, снятой после модификации, появляется пик, который связан с появлением глубокого уровня в образце. Глубина залегания этого уровня была оценена с помощью формулы  $E=23kT_m$  [4, 5] и составляет  $E=0,56$  эВ. Как видно, величина глубины залегания уровня достаточно большая.

Расчеты в соответствии с [4, 5] позволили оценить также концентрацию введенных центров рекомбинации. Оценки показывают, что эта концентрация колебалась в зависимости от мощности модифицирующего импульса тока в границах  $10^{12}$ — $10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

### Выводы

1. Модификация параметров кремния импульсом тока влияет как на величину времени жизни  $\tau_p^*$ , так и на ход ВАХ диода. В приборах с наименьшим  $\tau_p^*$  такое влияние меньше, чем в диодах с наибольшим  $\tau_p^*$ .

2. Начальное увеличение  $\tau_p^*$  можно объяснить отжигом начальных структурных дефектов в кремнии и уменьшением количества центров рекомбинации. Дальнейшее увеличение амплитуды импульсов тока существенно (до 14 раз) уменьшает  $\tau_p^*$ , значительно увеличивает обратный ток диодов, уменьшает в несколько раз напряжение их пробоя и даже влияет на его характер.

3. Изменение  $\tau_p^*$ , ВАХ и спектров тока диодов после модификации параметров кремния свидетельствует о появлении в его запрещенной зоне новых рекомбинационных центров.

4. Послойное селективное травление поверхности кремния, параллельной плоскости  $p^+-n$ -перехода, обнаружило наличие большого количества линейных дислокаций. Это подтверждает связь между появлением рекомбинационных центров и структурных дефектов в кремнии после модификации его параметров.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вавилов В. С. Действие излучений на полупроводники.— Г.: Физматгиз, 1963.
2. Bakanowski A. E., Forster J. H. Electrical properties of goal-doped diffused silicon computer diodes // Bell Syst. Techn. Journ.— 1960.— Vol. 39.— P. 87—94.
3. Павлюк С. П., Кислицын В. М., Мусин А. Г. Влияние формы кремниевого кристалла диода на его разогрев при пайке электро-сопротивлением // Автоматическая сварка.— 1989.— № 5.— С. 72—73.
4. Кульсрешта А. П., Горюнов В. А. О расчете термостимулированных токов // ФТТ.— 1966.— Т. 8, № 6.— С. 1944—1946.
5. Мирджалилова М. А., Парицкий Л. Г. Термостимулированная э.д.с. на электронно-дырочном переходе // ФТТ.— 1966.— Т. 8, № 10.— С. 3090—3092.
6. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Радио и связь, 1990.
7. Wertheim G. K. Transient recombination of excess carriers in semiconductors // Phys. Rev.— 1958.— Vol. 109.— P. 1086—1091.
8. Полупроводниковые диоды. Параметры, методы измерений / Под ред. Н. Н. Горюнова, Ю. Р. Носова.— М.: Сов. радио, 1968.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Мир, 1984.

### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

#### **Р. Джексон. Новейшие датчики.— М.: Техносфера, 2007.— 384 с.**

Стремительный рост числа разработок и применений датчиков на основе ранее не использовавшихся физических принципов и внедрения новых технологий для реализации известных эффектов стимулирует появление современных руководств.

В учебнике-монографии изложены многие недавно сформировавшиеся или обновившиеся направления сенсорики, включая измерительную микромеханику, датчики на ПАВах, оптические, ионизационные и магнитные, химические микросенсоры, оптиковолоконные и интеллектуальные измерительные системы, расходомерию для нестационарных потоков и ряд других.

