

ИОНИЗАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННАЯ ПЕРЕСТРОЙКА  
ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

В.Л. В и н е ц к и й, М.А. М а н о й л о,  
А.С. М а т в и й ч у к, В.И. С т р и х а,  
Г.А. Х о л о д а р ь

Принято считать, что в ковалентных полупроводниках (*Si, Ge*) действие видимого света приводит лишь к перераспределению электронов между энергетическими уровнями разрешенных зон и локальных электронных центров. При этом набор локальных электронных центров не претерпевает никаких изменений. Здесь и далее рассматривается воздействие световых потоков умеренных интенсивностей, не приводящих к заметному разогреву кристалла или мощной ударной волне, и связанных с ними расплавлению, распылению, эрозии поверхности и т.п.

В работе [1] было, однако, показано, что под действием лазерных импульсов неразрушающей мощности происходит увеличение концентрации акцепторных центров, что выражалось в увеличении наклона температурных холловских кривых. Было высказано предположение, что механизм фотостимулированного дефектообразования связан с рекомбинационными процессами. Можно было ожидать, что такие механизмы дефектообразования реализуются и при действии электронов подпороговых энергий.

В настоящей работе показано, что существует сверхлинейный по интенсивности ионизирующего фактора (электроны подпороговых энергий, фотоны) процесс образования или перестройки дефектов в кремнии, включая центры с глубокими локальными электронными уровнями в области р-п-перехода. Эффективность этого процесса оказывается существенно зависящей от содержания исходных примесей и структурных дефектов в образце. Этот факт имеет практичес-

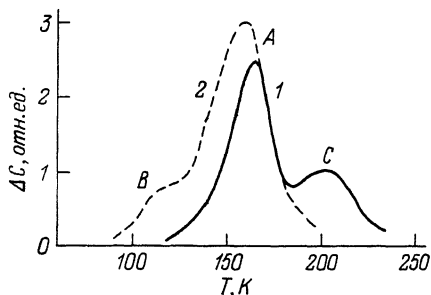


Рис. 1. Спектр НЕСГУ диода типа 1 до (1) и после (2) облучения электронами с энергией 30 кэВ (или излучением импульсного неодимового лазера при интенсивности излучения  $I > 0.05$  МВт/см<sup>2</sup>)

кое значение, поскольку эксплуатационный ресурс кремниевых диодных и более сложных структур зависит от технологии получения кремния и условий эксплуатации в связи с возможной перестройкой спектра легирующих и рекомбинационных центров.

Использовались для исследования  $p^+-n$ -диоды, изготовленные диффузией бора в  $p$ -Si, полученным по методу Чохральского с исходным удельным сопротивлением 40 Ом·см.

Параметры глубоких центров определялись методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) [2]. Измерения спектров НЕСГУ проводились на исходных  $p^+-n$ -диодах, а также после их облучения электронами с энергией 15 КэВ или лазерными импульсами (неодимовый лазер  $h\nu = 1.16$  эВ, длительность импульсов  $\tau = 1.3$  нс, плотность мощности 0.03–30 МВт/см<sup>2</sup>).

Спектры НЕСГУ исходных образцов сильно зависят от технологии получения кремния. Для образцов отечественного производства (далее будем называть их образцами типа 1) характерным является наличие пика А (рис. 1) с энергетическим уровнем  $E_C - 0.3$  эВ и набором сечений захвата, последовательно уменьшающихся с увеличением времени заполнения глубоких уровней электронами. Значения этих сечений несколько различаются от образца к образцу и составляют  $(1-2) \cdot 10^{15}$  см<sup>2</sup> (при временах заполнения порядка 1 мкс),  $10^{-16}$  см<sup>2</sup> (при временах заполнения 10 мкс) и т.д. По мере заполнения центров электронами увеличивается в пределах сотых эВ энергия активации электронной эмиссии из них. Эти факторы достаточно четко свидетельствуют о том; что дефекты, ответственные за пик А в спектре НЕСГУ, представляют собой кластеры с относительно малым расстоянием между составляющими их точечными дефектами. В некоторых из исходных образцов наряду с пиком А наблюдается пик С (рис. 1, в), уровень которого в различных образцах изменяется в пределах  $E_C - 0.45-0.49$  эВ с сечением захвата электронов  $(2-7) \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Анализ литературных данных [3–5] позволяет предположить, что пики А и С связаны с наличием железа в кремнии. Существование целого ряда микроскоплений атомов железа в кремнии установлено методом ЭПР в [6, 7].

Диоды типа II изготовлены из кремния фирмы Ваккер, имеют до облучения три пика в спектре НЕСГУ, соответствующие точечным

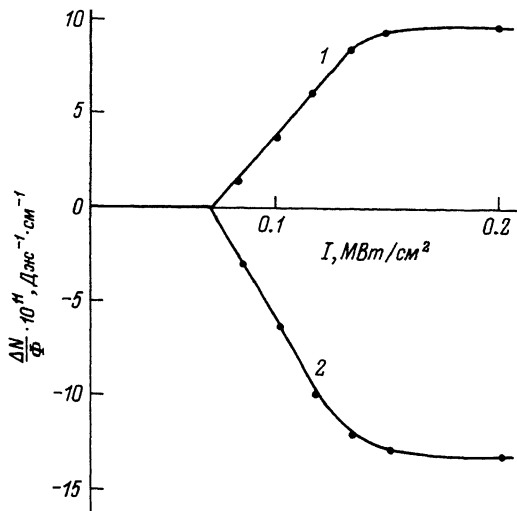


Рис. 2. Зависимость концентрации центров А, отнесенной к одной и той же дозе, от интенсивности лазерного излучения.

дефектам с энергетическим положением  $E_c - 0.22$  эВ,  $E_c - 0.33$  эВ,  $E_c - 0.50$  эВ и сечением захвата для электронов  $1.7 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>,  $2.8 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> и  $1.8 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> соответственно. Облучение образцов этого типа как электронами подпороговых энергий, так и лазерными импульсами в условиях, идентичных используемым при облучении образцов типа 1, не приводило к изменению исходных спектров НЕСГУ.

У образцов типа 1 глубина залегания р-п-перехода от облучаемой поверхности варьировалась и составляла  $l = 5-7$  мкм, 12 мкм и 35 мкм. Глубина проникновения в кремний электронов с начальной энергией 15 КэВ составляет  $d \approx 2$  мкм, при 30 КэВ — 8 мкм. При этом на длине  $d$  при используемых плотностях тока сканирующего электронного пучка<sup>1</sup> поглощается  $4 \cdot 10^{26}$  эл/см<sup>3</sup>.с при энергии электрона  $E = 15$  КэВ и  $1 \cdot 10^{26}$  эл/см<sup>3</sup>.с при  $E = 30$  КэВ; количество рождаемых электронно-дырочных пар получается умножением приведенных значений на величину  $\frac{E}{3E_g}$  ( $E_g$  — ширина запрещенной зоны кремния). С учетом параметров сканирования средняя по поглощающему электронами объему (с толщиной, равной длине ионизирующего трека) скорость образования электронно-дырочных пар составляет  $2.5 \cdot 10^{28}$  e-h /см<sup>3</sup>.с и  $1.28 \cdot 10^{28}$  e-h /см<sup>3</sup>.с при энергиях 15 и 30 КэВ соответственно.

При выполнении условия  $l \gg d$  облучение электронами образцов типа 1 также не приводило к изменению спектра НЕСГУ.

<sup>1</sup>Условия облучения не приводили к заметному контролируемому изменению температуры образца.

Однако уже при значениях  $\lambda$ , превышающих  $d$  в несколько раз, воспроизводимо наблюдались изменения исходного спектра (рис. 1) при интегральной дозе облучения  $\sim 10^{18}$  эл/см<sup>2</sup>. То обстоятельство, что дефекты образуются при  $\lambda > d$ , означает, что наблюдаемая перестройка дефектов обусловлена не первичными электронами а электронно-дырочными парами.

В связи с этим было исследовано влияние импульсного лазерного излучения неразрушающей мощности на изменение спектра НЕСГУ. При интенсивностях излучения  $> 0.05$  МВт/см<sup>2</sup> во всех образцах типа I также было установлено изменение спектров НЕСГУ (рис. 1). Характер изменения спектров при электронном и лазерном облучениях зависит от исходного спектра образцов. Общим является увеличение амплитуды пика А. На рис. 2 приведена зависимость концентрации центров А от интенсивности лазерного излучения ( $J$ ), отнесенная к одной и той же дозе ( $\Phi = 0.25$  Дж/см<sup>2</sup>)  $\Phi = J \cdot t$  ( $t$  – время облучения). Как видно, в интервале интенсивностей до 150 кВт/см<sup>2</sup> величина  $\partial N_A / \partial \Phi$  линейно растет с увеличением интенсивности. Это соответствует квадратичной зависимости концентрации образования дефектов от интенсивности и согласуется с выводом о рекомбинационной природе наблюдаемого преобразования дефектов. Аналогичная ситуация наблюдается для пика С. При более высоких интенсивностях при выбранной дозе концентрация дефектов перестает расти. Это означает, что вызванная рекомбинацией перестройка дефектов происходит на определенном типе исходных дефектов и после полного их превращения перестройка прекращается.

Таким образом, установлено, что в образцах кремния, содержащих скопления точечных дефектов, под действием ионизирующего фактора происходит преобразование дефектов, т.е. изменяются спектры глубоких уровней. Этот процесс квадратичен по интенсивности возбуждающего фактора, механизм его связан с рекомбинацией электронно-дырочных пар, и в исследованных образцах с концентрацией глубоких уровней порядка  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> становится эффективным при скорости образования электронно-дырочных пар  $10^{24}$  пар/см<sup>3</sup>·с. Этот механизм является эффективным в случае облучения кремния фотонами и электронами подпороговой энергии и может быть причиной деградации кремниевых полупроводниковых структур.

## Л и т е р а т у р а

- [1] Х о л о д а р ь Г.А., М а т в и й ч у к А.С., О с т р о ж и н с к и й А.В. В кн.: Труды межд. конф. по радиационной физике полупроводников и родственных материалов. Тбилиси, 1980, с. 549-553.
- [2] L a n g D.V. - J. Appl. Phys., 1974, v. 45, p. 3023-3032.
- [3] B r o t h e r t o n S.D., B r a d l e y P., G i l l A. - J. Appl. Phys., 1985, v. 57, N 6, p. 1941-1943.

- [4] L e m k e A.S. - Phys. Stat. Sol. (a), 1981, v. 64, p. 215-219.
- [5] B a l a s u b r a m a n y a m N., R u m a r V. Phys. Stat. Sol. (a), 1987, v. 100, N 1, p. 293-244.
- [6] W e r e p D.A. A magnetic resonance study of 3d transition metals and thermal donors in silicon. Amsterdam, 1986. 128 p.
- [7] M u l l e r S.H. An EPR study on clustering of iron and oxygen in silicon. Amsterdam, 1969. 96 p.

Поступило в Редакцию  
1 августа 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 22

26 ноября 1988 г.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ  
В КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ  
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ

В.И. П а ш к о в, Т.Ю. Ч и г и р и н с к а я,  
Ю.И. Ч и г и р и н с к и й

Возникновение структурных изменений в кремнии вблизи стороны пластины, противоположной облучаемой ионами средних энергий, в настоящее время является хорошо установленным фактом [1] и уже находит практическое применение [2]. Предложен также и ряд объяснений явления, базирующихся на аномально глубоком диффузионном проникновении точечных дефектов из радиационной зоны, а также генерацией их в объеме кристалла акустическими импульсами от бомбардирующих ионов [3]. Отмечено также [4], что и обработка низкоэнергетической плазмой может привести к увеличению глубины залегания р-п-перехода вблизи обратной стороны пластины. Предлагаемое авторами объяснение аналогично уже отмеченным. В настоящем сообщении обсуждается возможность принципиально иного механизма низкотемпературной миграции примесей в *Si* при радиационной обработке, в том числе низкоэнергетической плазмой.

В [5] нами показано, что в условиях пересыщения диффузионной зоны избытком точечных дефектов, обусловленного термическим окислением и радиационной обработкой *Si* в приповерхностной зоне возможно возникновение пространственно регулярных слоев микродефектных нарушений, период которых зависит от ориентации [9]. Для ориентаций [001], [011] и [111] он равен 0,25, 0,18 и 0,29 мкм соответственно. Внутри указанных интервалов возможно появление менее выраженных слоев, составляющих 1/3 от основного периода [6, 7]. Вследствие геттирирующих свойств регу-