

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННО-ОБЛУЧЕННЫХ p — n -ПЕРЕХОДОВ В ОБЛАСТИ ЛАВИННОГО ПРОБОЯ

Ф. П. Коршунов, С. Б. Ластовский, И. Г. Марченко

Институт физики твердого тела и полупроводников Академии наук Беларуси, 220072, Минск, Беларусь

(Получена 5 апреля 1993 г. Принята к печати 30 сентября 1993 г.)

Представлены результаты исследования вольт-амперной характеристики (ВАХ) кремниевых диффузионно-сплавных p — n -переходов и их параметров в режиме лавинного пробоя в диапазоне температур 77—300 К и флюенсов электронного ($E = 4$ МэВ) облучения $1 \cdot 10^{11}$ — $5 \cdot 10^{17}$ см⁻². Обнаружено образование ступенчатой S -образной ВАХ при $T < 150$ К, связанной с перезарядкой уровней дивакансии и E -центра при пробое облученных p — n -переходов. Наблюдалось увеличение интегрального шумового тока в облученном p — n -переходе при температурах появления релаксационной задержки пробоя.

Несмотря на значительное число работ (см., например, [1-5]) по исследованию лавинного пробоя в кремнии, содержащего дефекты с активными центрами, влияние радиационных дефектов (РД) на процессы в сильных электрических полях обратно смещенных p — n -переходов изучено недостаточно, хотя подобная информация может быть полезна как для развития теории, так и практических применений.

В данной работе в широком интервале флюенсов (Φ) электронного облучения ($E = 4$ МэВ) и температур измерений (77—300 К) проведено исследование изменений комплекса электрофизических параметров лавинных p — n -переходов. Образцами служили диффузионно-сплавные p — n -переходы в корпусах ($S \approx 2$ см²) на n -Si (БКЭФ) с $\rho = 0.2$ Ом·см (p -область КДБ — 0.015). Облучение проводилось при $T \leq 300$ К в пассивном режиме $\Phi = 1 \cdot 10^{11}$ — $5 \cdot 10^{17}$ см⁻². Вольт-амперные характеристики (ВАХ) до и после облучения регистрировались в режиме постоянного смещения, а на участке пробоя первых микроплазм (МП) снимались по методике, предложенной в [6]. Для определения вероятности включения МП использовалась импульсная методика [1]. Величина дифференциального сопротивления (R_d) измерялась путем наложения небольшой величины переменного тока (не более 5% от значения постоянного) частоты 50 Гц на постоянную составляющую и измерения падения напряжения от этого тока на p — n -переходе. Напряжение пробоя (U_b) образцов и R_d контролировались при фиксированном токе $I_b = 1 \cdot 10^{-2}$ А. Интегральный шумовой ток рассчитывался как $I_n = U_n/R_t$, где U_n измерялось широкополосным вольтметром ВЗ-48 А, в полосе $\Delta f = 100$ МГц, а R_t — нагрузочное сопротивление (50—200 Ом).

Известно [7, 8], что микроплазменная неустойчивость тока, связанная с вероятностным характером процесса генерации затравочных носителей заряда, приводит к появлению S -образных разрывов на ВАХ МП и высокому уровню шумов, наблюдаемых обычно на начальном участке пробоя. Естественно, что проследить изменение ВАХ МП при введении РД удобнее всего на первых МП. Поэтому для опытов были отобраны образцы, имеющие на ВАХ при 300 К четко выраженные одиночные МП. Из рис. 1, а видно, что у необлученного образца

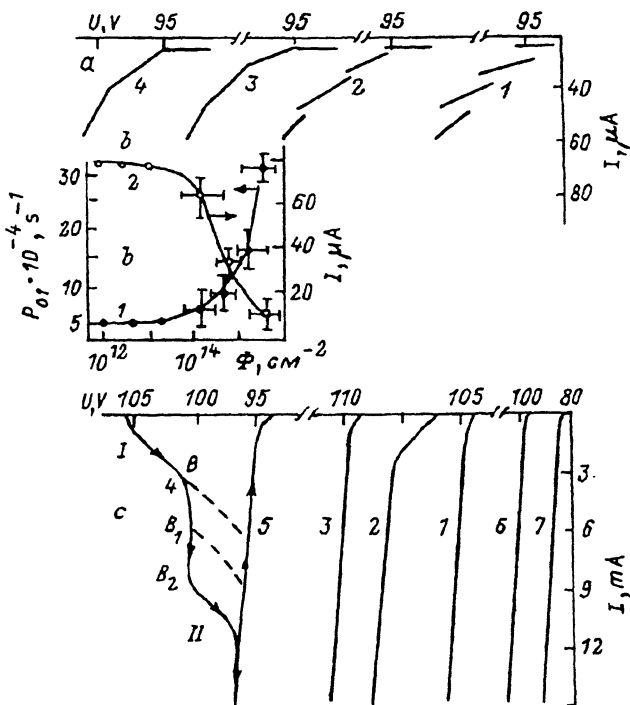


Рис. 1. Изменение параметров лавинных $p-n$ -переходов под действием электронного облучения. a — вид начального участка ВАХ в области пробоя первых МП. $\Phi, \text{см}^{-2}$: 1 — 0, 2 — $4 \cdot 10^{14}$, 3 — $2 \cdot 10^{15}$, 4 — $5 \cdot 10^{15}$. b — дозовые зависимости интегрального шумового тока (2) и вероятности включения первой МП (1). c — ВАХ облученного ($\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) $p-n$ -перехода при T, K : 1 — 273, 2 — 240, 3 — 210, 4, 5 — 120. Необлученный образец при T, K : 6 — 273, 7 — 77.

при напряжениях, соответствующих включению МП на ВАХ, наблюдается разрыв между проводящим и непроводящим состоянием МП. Каждый такой разрыв связан с появлением новой МП [6, 8]. По мере облучения, начиная с $\Phi \leq 3-5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, величина разрывов и глубина S -образности начинают уменьшаться, а после $\Phi \leq 2-3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ на ВАХ наблюдаются изломы и их количество на контролируемом участке характеристики при дальнейшем облучении сокращается. Эти данные свидетельствуют о том, что в результате введения РД стабильность включения МП существенно повышается [9].

Сопоставляя данные, приведенные на рис. 1, a и b , видно, что в том же интервале флюенсов, при которых в облученных $p-n$ -переходах наблюдаются стабильные МП [10], происходит резкое увеличение вероятности включения МП и соответственно снижение интегрального уровня МП шума. Следует заметить, что верхняя граничная частота спектрального распределения шума при этом возрастает, что ранее также было обнаружено для искусственной МП [11].

Анализ показал [12], что основной причиной радиационного изменения вероятности включения является увеличение частоты попадания в канал МП носителей, запускающих лавину. Отсутствие характерного максимума на частотной зависимости спектрального распределения шума в облученных образцах указывает на термогенерацию с уровней РД, как возможный механизм появления первичных носителей [13].

Для определения уровней, преимущественно с которых при $T = 300 \text{ K}$ идет генерация носителей заряда, проводился изохронный и изотермический отжиг

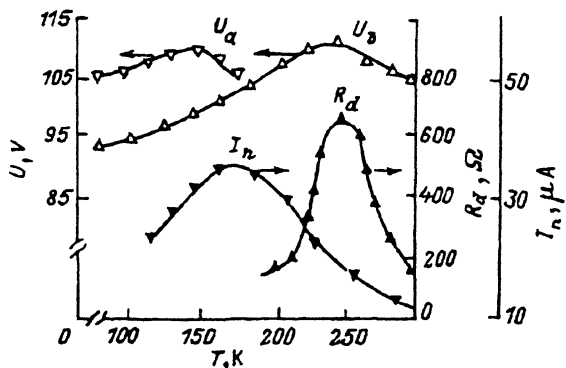


Рис. 2. Температурные зависимости напряжения переключения, пробивного напряжения, дифференциального сопротивления и интегрального шумового тока $p-n$ -перехода, облученных флюенсом $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

облученных образцов. Обнаружено, что основная (80%) стадия восстановления параметров МП наблюдается при $T_{\text{ann}} = 350\text{--}420^\circ\text{C}$. Энергия активации отжига РД для этого интервала оказалась равной ~ 1.3 эВ. Это позволяет считать, что доминирующим генерационным уровнем в облученных $p-n$ -переходах является А-центр.

При исследовании статической ВАХ в области развитого пробоя наибольший интерес представляют ее изменения при $\Phi \geq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и $T < 300 \text{ K}$, заключающиеся в смене знака температурного коэффициента U_b , «смягчении» характеристики при $220 < T < 300 \text{ K}$ и образовании двух участков отрицательного R_d (ОДС) при более низких температурах (рис. 1, с). Первый участок ОДС образуется при достижении на диоде определенного смещения (U_a), превышающего стационарное напряжение пробоя (U_b), а время возникновения второго участка ОДС обнаруживает токовую зависимость, проявляющуюся в том, что при увеличении тока пробоя время нахождения ВАХ в квазистационарном состоянии $B-B_2$ (рис. 1, с, кривая 4) резко снижается [14]. Следует заметить, что все приведенные на рис. 1, с кривые получены при фиксированной скорости нарастания напряжения (40 В/с).

Наблюдаемая S-образность ВАХ облученных диодов связана с перезарядкой уровней РД в области объемного заряда $p-n$ -перехода, а ее ступенчатость свидетельствует, по-видимому, о том, что этот процесс идет в два этапа. На первом — в момент включения лавины (наряду с полевой эмиссией электронов) наиболее вероятна ударная ионизация уровней РД, попавших в область сильного электрического поля $p-n$ -перехода (I участок ОДС) [1, 4]. В остальной части перехода из-за резкого снижения напряженности поля ударная ионизация уровней практически не имеет места. Скачкообразное уменьшение напряжения на II участке ОДС можно, по-видимому, объяснить их лавинообразным опустошением, стимулированным саморазогревом микроплазм [15]. Установлено, что основной вклад в формировании S-образности ВАХ вносят E-центр и дивакансия ($E_c - 0.4$ эВ) [14].

Рис. 2 иллюстрирует возможные изменения параметров пробоя, связанные с различным зарядовым состоянием РД. Видно, что для данного флюенса облучения по мере снижения T от 300 К и соответственно увеличения степеней заполнения ловушек с $E_c - 0.4$ эВ в базе диода U_b возрастает. Примечательно, что при несколько меньшем значении Φ ($9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) температурный коэффициент U_b в диапазоне 220—300 К близок к нулю. Вне интервала перезарядки ловушек характер изменения U_b от T до $\Phi \leq 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ такой же, как и в необлученном образце. Зависимость $R_d(T)$ (кривая 3), описанная

нами в [16], имеющая (при $I_b \leq 15$ мА) резкий максимум, качественно хорошо отражает эволюцию ВАХ в интервале 300—200 К. Анализ $R_d(T)$ диодов с глубокими уровнями проведен в работе [3]. Шумовой ток по мере снижения интенсивности тепловой генерации носителей с уровней ловушек ($T < 300$ К) возрастает (кривая 4), достигая своего максимума при температурах появления релаксационной задержки пробоя ($U_a > U_b$). Это свидетельствует о нарушении при пониженных температурах стабильного характера процесса ударной ионизации в МП, наблюдаемого в облученных диодах при комнатных температурах. Соответственно вероятность включения МП в этих условиях падает, а на ВАХ МП появляются разрывы, характерные для нестабильных МП в необлученных образцах (рис. 1).

Таким образом, в зависимости от флюенса облучения и температуры, характеристики лавинного пробоя в кремнии могут изменяться в широких пределах. Это открывает возможность использования описанных эффектов в реальных приборных структурах. В частности, для получения малошумящего $p-n$ -перехода с малым температурным коэффициентом U_b и диода, имеющего ВАХ с участками ОДС.

В заключение авторы выражают благодарность А. Тамашевичусу за помощь в измерениях шумовых параметров $p-n$ -переходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] И. В. Грехов, Ю. Н. Серезкин. Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках. Л. (1980).
- [2] Ю. В. Выжигин, Б. Н. Грессеров, Н. А. Соболев. ФТП, 22, 536 (1988).
- [3] А. С. Кюрегян. ФТП, 21, 941 (1987).
- [4] П. В. Акимов, И. В. Грехов, Ю. Н. Серезкин. ФТП, 9, 764 (1975).
- [5] Е. В. Астрова, В. М. Волле, В. Б. Воронков, В. А. Козлов, А. А. Лебедев. ФТП, 20, 2122 (1986).
- [6] A. G. Chynoweth, K. G. McKay. J. Appl. Phys., 30, 1811 (1959).
- [7] А. М. Намаюнас, Ю. К. Пожела, А. В. Тамашевичус. ФТП, 21, 760 (1987).
- [8] Т. Я. Пуритис, И. Э. Озалина, Р. Я. Крике, Я. П. Муранс, Я. К. Балодис. Физика $p-n$ -переходов. Рига (1966).
- [9] Ф. П. Коршунов, И. Г. Марченко. Изв АН БССР. Сер. физ.-мат. наук, № 2, 69 (1983).
- [10] Б. С. Верман, В. В. Евстропов, Б. В. Царенков. ФТП, 5, 134 (1971).
- [11] Ю. К. Пожела, З. Н. Тамашевичене, Д. А. Гярулайтис. Тез. докл. VII Всес. симп. «Плазма и неустойчивости в полупроводниках», 67. Паланга (1989).
- [12] Ф. П. Коршунов, С. Б. Ластовский, И. Г. Марченко. ДАН БССР, 33, 218 (1989).
- [13] А. М. Намаюнас, Ю. К. Пожела, А. В. Тамашевичус. ФТП, 23, 1606 (1989).
- [14] Ф. П. Коршунов, И. Г. Марченко, С. Б. Ластовский. ДАН БССР, 34, 112 (1990).
- [15] К. Л. Исмаилов, Р. В. Конакова, В. И. Файнберг, А. И. Шкретий. Электрон. техн., сер. 2, 194, 85 (1988).
- [16] Ф. П. Коршунов, И. Г. Марченко. ФТП, 17, 2201 (1983).

Редактор В. В. Чалдышев