[7] Струков Б. А., Арутюнова В. М., Уесу И.//ФТТ. 1982. 24, № 10. С. 3061— 3067. [8] Струков Б. А., Арутюнова В. М., Куруленко Е. П.//Кристаллография. 1985. 30, № 4. С. 726—729. [9] Нашапо К., Sakata H., Еша К.//J. Phys. Soc. Japan. 1985. 54, N 8. P. 2021—2031. [10] Unruh H. G.//J. Phys. C. 1983. 16. P. 3245—3255. [11] Нашапо К., Hishinuma T., Еша К.//J. Phys. Soc. Japan. 1981. 50. P. 2666—2671. [12] Zang G., Qiu S. L., Dutta M.//Solid State Comm. 1985. 55. P. 275—277.

Поступила в редакцию 26.06.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 1

УДК 592.315

О «КРАЕВОЙ» ЛАВИННОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КРЕМНИЕВЫХ МДП-СТРУКТУРАХ

С. Н. Козлов, А. Н. Невзоров, А. Ю. Потапов

(кафедра общей физики для химического факультета)

Исследовано влияние неоднородной по площади лавинной инжекции электронов из Si в SiO₂ на пороговое напряжение лавинообразования, генерацию поверхностных, состояний и поверхностную генерацию.

Процессы, связанные с лавинным умножением носителей заряда в приповерхностной области полупроводникового электрода МДП-структуры, играют существенную роль при функционировании ряда МДПприборов и интегральных схем. Однако до сих пор остается не вполне ясным вопрос о вкладе «краевых» эффектов в формирование лавины. В частности, в работе [1] было показано, что при не очень высокой концентрации свободных носителей заряда в кремнии *р*-типа (менее нли порядка 10¹⁶ см⁻³) критическая напряженность поля лавинного пробоя может понижаться из-за концентрирования электрического поля вблизи края металлического электрода. С другой стороны, авторы [2] привели весьма веские аргументы в пользу самостабилизирующегося, однородного по всей площади МДП-структуры лавинного пробоя при указанных концентрациях свободных носителей заряда.

В настоящей работе сообщается о результатах прямых экспериментов, направленных на выяснение роли «краевых» эффектов в лавинообразовании в кремниевых МДП-структурах. С этой целью использовались структуры с алюминиевыми электродами двух типов: «KOMпактными» с площадью 0,92 мм² и периметром 4.34 мм (структуры I типа) и «гребенчатыми» с площадью 0,39 мм² и периметром 49,5 мм (структуры II типа). Структуры обоих типов изготавливались в одном и том же технологическом цикле на базе кремния р-типа с удельным сопротивлением 1 Ом см (концентрация бора 1016 см-3). Пленка SiO2 толщиной $d_i = 1000$ Å создавалась термическим окислением кремния в сухом кислороде с добавкой хлорсодержащей компоненты. Лавинная инжекция электронов осуществлялась по методике, близкой к описанной в работе [3]. Количество электронов, инжектированных из кремния в пленку окисла, регистрировалось прибором В7-30 и варьировалось в широких пределах ($D_e = 10^{13} - 10^{17}$ электрон см⁻²). Плотность поверхностных электронных состояний измерялась с помощью высокочастотной и квазистатической СУ-методик, а также методом поперечной высокочастотной проводимости [4]. Генерационные процессы в кремнии исследовались импульсным C(t)-методом [5]. Все измерения, На рис. 1 представлена зависимость порогового напряжения V_{ga} возникновения сквозного лавинного тока через МДП-структуру от дозы лавинной инжекции D_e для структур типов I и II. Видно, что начальные пороговые напряжения лавинообразования для структур обоих типов существенно ниже, чем устанавливающиеся после протекания

Рис. 1. Зависимость порогового напряжения возникновения лавины от дозы лавинной инжекции электронов в МДПструктурах с «компактным» (I) и «гребенчатым» (II) затворами

Рис. 2. Зависимость плотности поверхностных электронных состояний в средней части запрешенной зоны кремния от дозы лавинной инжекции электронов для МДП-структур с «компактным» (I) и «гребенчатым» (II) затворами



через МДП-структуру $D_e = 10^{16} - 10^{17}$ электрон см⁻². Для структур-II типа изменения V_{ga} в процессе протекания лавинного тока заметно больше, чем для структур I типа. По мере увеличения дозы различие между величинами V_{ga} для образцов обоих типов сглаживалось, однако все же оставалось заметным даже при достаточно больших величинах дозы: $D_e \simeq 10^{16} - 10^{17}$ электрон см⁻².

Рис. 3. Кривые релаксации неравновесной емкости МДП-структур I и II типов. до (1) и после (2) лавинной инжекции электронов (доза лавинной инжекции $D_e = 10^{16}$ электрон см⁻²)

Рис. 4. Зависимость скорости поверхностной генерации от дозы лавинной инжекции электронов для структур типов 1 и II



В процессе протекания потока горячих электронов через границу раздела Si-SiO₂ на поверхности кремния генерируются новые дефекты и возрастает плотность поверхностных электронных состояний в средней части запрешенной зоны N_{ss} [6, 7]. Из рис. 2 следует, величина N_{ss} зависит не только от количества электронов, ЧТО через границу Si-SiO₂, но и прошедших от периметра метал--лического электрода. Для МДП-структур с большим периметром плотность поверхностных электронных состояний оказывается при равных De заметно меньшей, чем для «компактных» МДП-структур.

На рис. З показаны типичные кривые релаксации неравновесной емкости МДП-структур после приложения обедняющего напряжения

к металлическому электроду. Для исходных МДП-структур обоих типов кинетические кривые $\check{C}(t)$ качественно одинаковы; обработка ИХ по методу Цербста [5,6] позволяет заключить, что основным механизмом «поставки» неосновных носителей заряда к поверхности полупроводника является генерация их в квазинейтральном объеме с последующей диффузией к области пространственного заряда. По мере протекания тока лавинной инжекции через структуру вид кривых релаксации неравновесной емкости претерпевает существенные изменения: на зависимостях C(t) появляется начальный участок быстрого роста емкостй МДП-структуры, который можно отождествить с возникновением центров поверхностной генерации электронов [6]. Характерно, что при одинаковых D_e этот участок выражен более ярко для структур II типа (см. рис. 3). Из наклона кинетических кривых C(t) на начальном участке (при t-+0) можно определить скорость поверхностной генерации электронов Sg [6, 8]. Вычисленные на основе экспериментальных кривых C(t) зависимости скорости поверхностной генерации от дозы лавинной инжекции электронов показаны на рис. 4. Видно, что величины S_g для структур с большим периметром в несколько раз больше, чем для обычных МДП-структур. На начальных стадиях лавинной инжекции электронов отношение скоростей поверхностной генерации в структурах I и II типов Sg^{II}/Sg^I~12, что близко к отношению периметров этих структур (11,4).

Всю совокупность приведенных экспериментальных фактов можно объяснить только неоднородным распределением лавинного тока по площади МДП-структуры (особенно на начальной стадии лавинной инжекции). Из-за концентрирования электрического поля вблизи края металлического электрода процесс лавинообразования происходит здесь наиболее интенсивно. Низкие пороговые напряжения возникновения лавины при малых величинах D_e (см. рис. 1) соответствуют протеканию лавинного тока в основном по периметру МДП-структуры. По мере накопления части инжектированных электронов на ловушках окисного слоя напряженность электрического поля в местах нанболее интенсивного лавинообразования (вблизи края затвора) снижается и процесс лавинообразования постепенно распространяется в центральную область МДП-структуры. Это сопровождается возрастанием порогового напряжения развития лавины (см. рис. 1). Поскольку ширина красвой области МДП-структуры, в которой напряженность электрического поля несколько выше средней, порядка толщины окисного слоя (что значительно меньше периода «гребенчатого» затвора), измеряемая величина плотности ПС соответствует главным образом однородной центральной части МДП-структуры. Очевидно, что при одинаковом полном количестве электронов, прошедших через границу раздела Si—SiO₂, на долю центральной части МДП-структур I типа приходится большая доля электронного потока, чем для структур II типа. Поэтому величина N_{ss} для МДП-структур с «компактным» затвором всегда оказывается больше (при одинаковых D_e) — см. рис. 2.

Наиболее отчетливо существенная роль «краевой» лавинной инжекции электронов проявляется в генерационных процессах. Быстрый рост скорости поверхностной генерации S_g на структурах II типа при относительно малых дозах лавинной инжекции свидетельствует о том, что центры поверхностной генерации электронно-дырочных пар возникают в процессе лавинной инжекции горячих носителей заряда прежде всего в периферийных областях МДП-структуры. Соответственно, величины S_g для структур двух типов на начальной стадии протекания лавинного тока относятся приблизительно как периметры затворов этих структур. При увеличении D_e , по мере вытеснения области протекания лавинного тока от периферии в глубь МДП-структуры, начинают возникать генерационно-активные дефекты и под центральной частью затвора. В результате отношение скоростей поверхностной генерации для структур II и I типов S_g^{II}/S_g^{I} постепенно уменьшается, и при $D_e^{\simeq}10^{17}$ электрон см⁻² $S_g^{II}/S_g^{I} \approx 4$ (см. рис. 3, 4).

Таким образом, при рассмотрении лавинного процесса в МДПструктурах, а также при разработке лавинных фотоприемников необходимо учитывать, что использование материала с концентрацией акцепторной примеси менее или порядка 10¹⁶ см⁻³ неизбежно сопряжено с осложнениями, связанными с неравномерным распределением лавинного тока по площади МДП-структуры.

В заключение авторы благодарят В. Ф. Киселева за постоянный интерес к работе и Н. А. Колобова за предоставление образцов для исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Goetzberger A., Nicollian E. N.//J. Appl. Phys. 1967. 38, N 12. Р. 4582—4586. [2] Кравченко А. Б., Плотников А. Ф., Шубин В. Э.//Квант. электроника. 1978. 5, № 9. С. 1918—1923. [3] Dekeersmaeker R. F., DiMaria D. J.//J. Appl. Phys. 1980. 51, N 2. P. 1085—1101. [4] Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984. Т. 1. С. 456. [5] Zerbst M. Z.//Angew. Phys. 1966. 22, N 1. P. 30—33. [6] Козлов С. Н., Невзоров А. Н., Потапов А. Ю. Препринт физ. фак. МГУ № 19/1986. М., 1986. [7] Lai S. К., Young D. R.//Insulating films on semiconductors. Springer, N. Y., 1981. P. 118—121. [8] Schröder D. K., Guldberg J.//Solid State Electron. 1971. 14, N 12. P. 1285—1297.

Поступила в редакцию 06.08.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 1

УДК 539.216:537.622.6

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗАКРЕПЛЕНИЕ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ В ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНКАХ

А. Г. Шишков, Е. Н. Ильичева, Н. Б. Широкова, В. И. Козлов, Ю. Н. Федюнин, Г. А. Бажажин

· (кафедра общей физики для физического факультета)

Вблизи температуры компенсации намагниченности обнаружено изменение «периода» и «амплитуды» магнитного потенциального рельсфа движения доменных стенок, обусловленное изменением магнитостатического взаимодействия доменов с температурой.

Изучение температурной зависимости магнитных характеристик эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок (ЭФГП) позволяет обнаружить их взаимную связь, влияние друг на друга, способствует углублению понимания процессов намагничивания. С другой стороны, при практическом применении ЭФГП в запоминающих устройствах на подвижных цилиндрических магнитных доменах необходимо иметь высокую термостабильность статических и динамических характеристик, обеспечивающих работоспособность запоминающих устройств в широком диапазоне температуры.

В настоящей работе главное внимание уделялось изучению температурной зависимости коэрцитивной силы ЭФГП, выявлению характера

5 ВМУ № 1, физика, астрономня

65.