

Таким образом, зависимость коэффициентов пьезосопротивления короткоканальных МДП транзисторов от напряжения на стоке и меньшая температурная зависимость могут быть объяснены эффектами разогрева электронного газа в канале.

Список литературы

- [1] Tanigawa H., Ishihara T., Hirata M., Suzuki K. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1985. V. 32. N 7. P. 1191.
- [2] Круглов В. В., Макаров Е. А., Мельниченко В. А. // Приборы и системы управления. 1981. № 1. С. 23.
- [3] Mikoshiba H. // Sol. St. Electron. 1981. V. 24. N 3. P. 221.
- [4] Colman D., Bate R. T., Mize J. P. // Appl. Phys. 1968. V. 39. N 4. P. 1923.
- [5] Dorda G. // Appl. Phys. 1971. V. 42. N 5. P. 2053.
- [6] Zaima S., Yasuda Y., Kawaguchi S. et al. // Appl. Phys. 1986. V. 60. N 11. P. 3959—3966.
- [7] Аядо Т., Фаулер А., Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем. М., 1985. 416 с.
- [8] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2. М., 1984. 456 с.
- [9] Барановский С. Н., Солодков В. Д. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 10. С. 1938.
- [10] Hansch W., Miura-Mattausch M. // Appl. Phys. 1986. V. 60. N 2. P. 650—656.

Новосибирский
электротехнический институт

Получено 20.04.1989
Принято к печати 29.05.1989

ФТП, том 23, вып. 10, 1989

ВЛИЯНИЕ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ, ВВЕДЕННЫХ В $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ И ЭЛЕКТРОНЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ, НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

Кольцов Г. И., Юрчук С. Ю.

При конструировании и создании фоточувствительных структур, работающих в заданном спектральном диапазоне, необходимо учитывать появление в полупроводниковых материалах глубоких центров (ГЦ), изменяющих электрофизические характеристики материала: подвижность и время жизни носителей заряда, а следовательно, и спектральную чувствительность. При работе фотодиода в вольтаическом режиме спектральные характеристики определяются эффективностью собирания носителей заряда, генерированных у поверхности, в области пространственного заряда и в базе диода, поэтому изменение времени жизни в любой из областей приведет к изменению спектральной фоточувствительности.

Для сравнения на рис. 1 представлены спектры фоточувствительности $p^+ - n$ -переходов, изготовленных ионной имплантацией Be^+ в $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ n -типа с исходной концентрацией электронов $1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, выращенном на подложке GaAs n -типа с концентрацией электронов $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [1], диодов Шоттки, полученных вакуумным напылением серебра на тот же исходный $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, и рассчитанная на ЭВМ характеристика спектральной фоточувствительности для той же глубины залегания $p^+ - n$ -перехода (~ 1 мкм), как и у изготовленных $p^+ - n$ -структур. В теоретических расчетах было показано, что определяющими факторами, влияющими на спектральную характеристику фотодиода, являются время жизни носителей заряда в n - и p -областях структуры и глубина залегания перехода, а изменение скорости поверхностной рекомбинации незначительно сдвигает коротковолновую границу фоточувствительности.

Как видно из рис. 1, теоретическая кривая при таких параметрах расчета близка к экспериментальной и обе они значительно отличаются от эксперимен-

тальной характеристики барьера Шоттки (БШ), которая определяется сборанием носителей заряда, генерированных в области пространственного заряда у поверхности полупроводника и в базе. Наблюдаемые различия обусловлены как разницей в глубине залегания перехода, так и временем жизни носителей заряда в исходных и ионно-имплантированных образцах, содержащих остаточные дефекты.

Для проверки этих предположений измеряли спектр глубоких уровней методом РСГУ [2] на исходных пластинах и ионно-имплантированных структурах. Измерения РСГУ на тестовых структурах БШ показали, что в исходных эпитаксиальных структурах $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ присутствуют уровни $E_c - 0.13$ эВ [эффективное сечение захвата $\sigma_i \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$] и $E_c - 0.28$ эВ [$\sigma_i = (3 \div 12) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$] с концентрацией $7 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В то же время в ионно-имплантированных $p^+ - n$ -переходах обнаружен целый набор глубоких центров [3], содержащий и те, которые имеются в БШ. Для выяснения природы этих центров на БШ про-

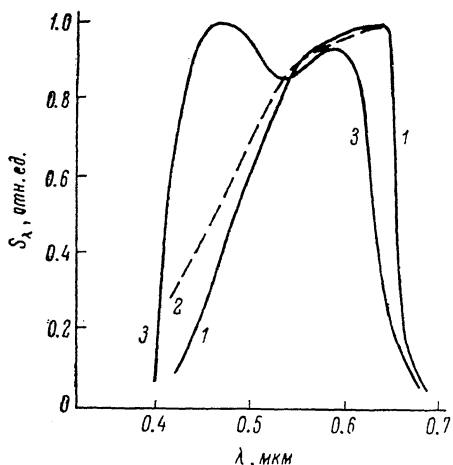


Рис. 1. Спектральные характеристики фоточувствительности структур на $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. 1 — $p^+ - n$ -переход, изготовленный имплантацией Vt^+ ($E = 50$ кэВ); 2 — теоретически рассчитанная характеристика $p - n$ -перехода ($x_j = 1$ мкм, $\tau_p = \tau_n = 10^{-10}$ с, $S = 10^6$ см/с); 3 — барьер Шоттки.

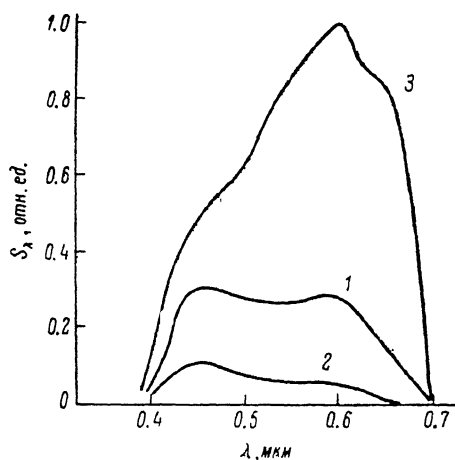


Рис. 2. Влияние изменения концентрации ГЦ на спектральные характеристики фоточувствительности барьеров Шоттки на $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. 1 — исходная, 2 — после облучения электронами, 3 — после термообработки под AlN.

диди моделирование технологических процессов изготовления $p^+ - n$ -переходов, включая операции нанесения диэлектрических покрытий и проведения высокотемпературного отжига.

Глубокий центр $E_c - 0.7$ эВ, обнаруженный в имплантированных $p^+ - n$ -переходах, удалось наблюдать на БШ только после облучения их электронами с энергией 6 МэВ и дозами $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Интересно отметить, что при облучении растет и концентрация исходного центра $E_c - 0.28$ эВ, причем при начальных дозах (менее $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) его концентрация меняется незначительно, а затем скорость введения его достигает 0.6 см^{-1} при дозе облучения $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Такой характер изменения скорости введения ГЦ свидетельствует о том, что этот дефект представляет собой сложный комплекс, например $V_V - \text{Te}_i$ [4]. При малых дозах облучения концентрация этого центра ограничена концентрацией межузельного теллура, а при больших дозах она растет за счет выбивания теллура из узлов.

Концентрация исходного центра $E_c - 0.13$ эВ практически не меняется при облучении.

Глубокий центр $E_c - 0.7$ эВ появляется в спектре РСГУ БШ после облучения дозой 10^{15} см^{-2} и (по аналогии с GaAs) относится, очевидно, к $EL2$ -центру [5]. Концентрация этого центра с увеличением дозы меняется по степенному закону $N_i = A\Phi^n$, где Φ — доза облучения, а $n = 1.46$, и достигает значения $N_i = (1 \div 2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при дозе $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Из-за сильной компенсации материала

провести измерения при больших дозах (более $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) не удалось. Степенной закон изменения концентрации ГЦ с $E_c = 0.7 \text{ эВ}$ и $n > 1$ показывает, что происходит взаимодействие простых точечных дефектов и, вполне вероятно, идет процесс образования антиструктурных дефектов As_{Ga} и P_{Ga} [6].

Присутствие ГЦ с энергией ионизации 0.7 эВ и в ионно-имплантированных $p^+ - n$ -переходах, и в БШ после облучения электронами свидетельствует о том, что механизмы образования дефектов при ионной имплантации легкого иона Be^+ и электронном облучении аналогичны, а применяемый режим термического отжига не обеспечивает полного восстановления кристаллической решетки полупроводника. Из-за введения глубоких центров при электронном облучении меняется и спектральная характеристика фоточувствительности. Как видно из рис. 2, фоточувствительность барьеров Шоттки снижается сильнее в длинноволновой части спектра при облучении, где влияние изменения времени жизни носителей заряда наиболее заметно. Термообработка исходного материала под пленкой нитрида алюминия перед изготовлением БШ приводит к увеличению фоточувствительности как в длинноволновой, так и в коротковолновой частях спектра. Измерение спектра ГЦ показало, что в этих образцах снижается концентрация исходных центров $E_c = 0.13 \text{ эВ}$ до $2 \cdot 10^{13}$ и $E_c = 0.28 \text{ эВ}$ до $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

В отличие от БШ спектральная характеристика фоточувствительности $p^+ - n$ -перехода при облучении уменьшается во всем диапазоне измерений, но в меньшей степени — в длинноволновой части, что обусловлено значительно большей глубиной залегания потенциального барьера и, следовательно, меньшим влиянием изменения времени жизни в базе диода.

Таким образом, одновременное измерение спектральных характеристик фоточувствительности БШ, $p^+ - n$ -переходов и параметров ГЦ показало, что определяющим фактором изменения спектральной характеристики является изменение параметров ГЦ в процессе изготовления прибора и при радиационном воздействии.

Список литературы

- [1] Кольцов Г. И., Ладыгин Е. А., Юрчук С. Ю., Заитов Ф. А. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 10. С. 1901—1904.
- [2] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3032.
- [3] Кольцов Г. И., Ладыгин Е. А., Юрчук С. Ю. // Деп. в ЦНИИ «Электроника». М., 1988. № Р-4900.
- [4] Calleja E., Munoz E., Jimenez B., Gomes A., Garsia F., Kellert F. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 12. P. 5295—5301.
- [5] Munoz E., Garsia F., Jimenez B., Calleja E., Gomes A. // J. Appl. Phys. 1985. V. 48. N 8. P. 798—800.
- [6] Георгобиани А. Н., Тигиняну И. М. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 3—14.

Московский
институт стали и сплавов

Получено 29.03.1989
Принято к печати 5.06.1989

ФТП, том 23, вып. 10, 1989

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАХ

Жукова Н. М., Кашия А. П., Максимов М. З., Марченко О. В.

Как известно, основным критерием качества полупроводниковых материалов для термоэлектрических преобразователей является добротность:

$$Z = \alpha^2 \sigma / \kappa,$$

где α — коэффициент термоэдс, σ — проводимость, κ — коэффициент теплопроводности. Максимальное значение Z для полупроводников p - и n -типа проводимости достигается при некоторых оптимальных значениях концентрации