Вклад дефектов и примесей в характеристики мощных МОП транзисторов в кремнии и КНИ: расчеты и эксперимент

Ильницкий М.А.¹, Антонов В.А.¹, Вдовин В.И.¹, Тыщенко И.Е.¹, Попов В.П.¹,
Егоркин А.В.², Зарубанов А.А.², Глухов А.В.²

¹ ИФП им. А.В. Ржевцова СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² АО «НЗПП с ОКБ», 630082, Новосибирск, ул. Дачная, 60

DOI 10.34077/Semicond2019-456

Ионная имплантация является одной из основных технологических операций в формировании современных ИС. Электрическая изоляция двойными p-n переходами для полевых транзисторов (МОПТ) источников питания DC-DC с напряжением свыше 20 V требует энергии ионов В⁺ для объемного кремния более 400 кэВ, тогда как энергия 40 кэВ достаточна на подложке КНИ с толстым слоем кремния ~1.5 мкм. TCAD-моделирование технологических процессов для таких ИС проводилось на кремнии и на КНИ-структурах ИФП СО РАН n-типа, полученных переносом водородом слоя кремния путем имплантации протонов с энергией 200 кэВ ($R_p=1,8$ мкм) на подложку Si n-типа с 0,3 мкм SiO₂. Экспериментальные характеристики выходных МОП-транзисторов ($L=2$ или 3 мкм и $W=40$ мкм) на этих материалах сравнивались с модельными расчетами в TCAD (рис.1).

Экспериментальные сток-затворные характеристики I_{ds} - V_g FET были практически идентичны моделируемым в диапазоне 7 порядков для тока стока I_{ds} за исключением интервала напряжения затвора $V_g = -0,7+0,5$ для объемного и $-1,0+1,5$ для КНИ структур, где измеренный ток I_{ds} больше расчетного на 3-4 порядка для кремния и на 2-3 порядка для КНИ, при этом результаты расчетов в моделях TCAD полностью совпадают. Согласно данным поперечного сечения просвечивающей электронной микроскопии (ХТЕМ), дислокации и дислокационные петли расположены только в тонких (<100 Нм) сильно легированных зонах исток-сток. Дислокационные петли с генерационно-рекомбинационной активностью, должны формироваться при имплантации и отжиге в области пространственного заряда только за имплантируемым слоем ~600 ум. Отсутствие дефектов за этими активными областями подтверждается данными СПЭМ.

Предположение об их доминирующем вкладе в ток I_{ds} на объемном кремнии подтверждается также зависимостью последнего от напряжения стока V_{ds} , рост которого уменьшает разницу I_{ds} между экспериментом и расчетом из-за падения времени жизни носителей заряда. Наблюдаемое снижение соответствует полевой зависимости токов генерации-рекомбинации от напряжения стока V_{ds} , так как плотность тока генерации $J_{gen} = qW_{gen}(V_d)Ni[\exp(qV_d/2kT)^{-1}]/2\tau$ экспоненциально зависит от V_{ds} и только линейно от концентрации дефектов $N_D \sim 1/\tau$ [2]. Слабая зависимость токов утечки от V_{ds} для КНИ МОПТ объясняется локализацией остаточных дефектов только в областях пространственного заряда исток-стока. Таким образом, использование КНИ-структур для силовых транзисторов повышает их энергоэффективность и рабочее напряжение за счет снижения утечек в p-n переходах после имплантационного легирования и отжига (Рис.1).

Рис.1. – Сток-стоковые кривые I_{ds} МОП транзисторов на КНИ.

[1] Y. Taur and T.H. Ning. "Fundamentals of modern VLSI devices." Cambridge 2013, p. 680.

[2] A.O. Adan, and K. Higashi. IEEE Trans. Electron Dev., **48**, 2050 (2001).