

О МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В МОП ТРАНЗИСТОРЕ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 4.2 К

Охонин С. А., Французов А. А.

Исследована ионизация примесей в подложке МОП транзистора, приводящая к формированию области пространственного заряда при температуре 4.2 К.

Показано, что при малых напряжениях на стоке существует механизм образования области пространственного заряда, не связанный с ударной ионизацией примесей.

В ряде работ наблюдалась релаксация тока в канале МОП транзистора после подачи импульсного напряжения на затвор или сток при температурах ниже 25 К. Было показано, что постепенное уменьшение тока в канале связано со сравнительно медленным образованием слоя ионизированных доноров или акцепторов в приповерхностной области при таких температурах [1, 2]. При температуре жидкого гелия вероятность термической ионизации очень мала, и для объяснения экспериментальных результатов нужно привлекать другие механизмы. Для объяснения релаксации тока в работе [3] был предложен механизм ударной ионизации примесей в подложке дырками, образовавшимися вследствие генерации электронно-дырочных пар вблизи стока *n*-канального транзистора при работе прибора в режиме отсечки.

В настоящей работе показано, что ионизация примесей в подложке наблюдается даже при малых напряжениях на стоке, когда исключено образование электронно-дырочных пар, и исследована кинетика формирования области пространственного заряда (ОПЗ).

Схема эксперимента показана на рис. 1. Используются *p*-канальные транзисторы, изготовленные на *n*-подложке с концентрацией фосфора 10^{15} см⁻³. Измерения выполнялись на кольцевых транзисторах с длинами канала 4 и 20 и шириной 100 мкм и на линейных транзисторах с длиной канала 10 и шириной 100 мкм. Толщина подзатворного диэлектрика составляла 800 Å. Величина порогового напряжения при 4.2 К для разных партий находилась в интервале 1.2—2 В.

После подачи импульса V_b на подложку наблюдалось уменьшение тока в канале, связанное с образованием ОПЗ под каналом транзистора (рис. 2). Увеличение плотности заряда в ОПЗ приводит к уменьшению заряда в инверсионном слое, что эквивалентно увеличению порогового напряжения транзистора. Таким образом, изменение тока во времени, показанное на рис. 2, отражает кинетику нарастания заряда в подложке. Данная методика определения скорости формирования ОПЗ была описана ранее [4] применительно к ионизации доноров в сильном электрическом поле.

На рис. 3 показана зависимость характерного времени релаксации тока τ , за которое происходит 50% всего изменения тока, от напряжения на стоке V_b , измеренная при температуре 4.2 К. Измерения выполнялись на линейных

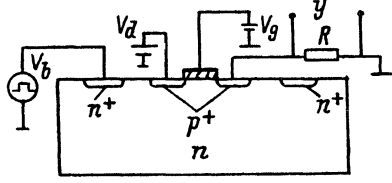


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

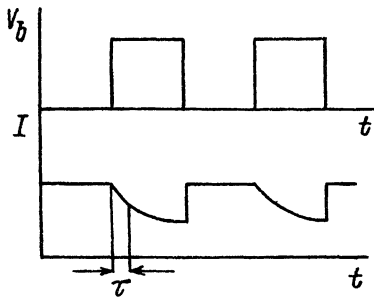


Рис. 2. Релаксация тока канала после подачи импульсного смещения на подложку.

транзисторах. Наиболее интересен участок до 1 В, в котором наблюдается быстрое уменьшение времени релаксации.

Как видно из рис. 3, величины τ при $V_d < 1$ В практически не изменялись при увеличении V_g , приводящем к увеличению тока и рассеиваемой мощности в канале транзистора. Это свидетельствует о том, что возрастание скорости генерации заряда в подложке с ростом V_d не может быть объяснено увеличением температуры кристалла. С другой стороны, в диапазоне $V_d < 1$ В невозможно образование электронно-дырочных пар в канале за счет ударной ионизации, так как дырка не может набрать энергию 1.2 эВ, необходимую для генерации электронно-дырочной пары.

Измерения тока, текущего в подложку, показали, что заметные величины тока (на уровне 10^{-13} А) появляются только при $V_d > 5$ В и при условии, что транзистор работает в режиме отсечки. Оценки, основанные на модели ударной ионизации примесей в подложке электронами, образующимися в канале, показывают, что токи в подложку на уровне 10^{-13} А недостаточны для объяснения наблюдаемых значений τ . Для сечения расчётное значение τ порядка 100 с, что значительно больше наблюдаемой в эксперименте величины τ . Таким образом, в области $V_d < 1$ В ионизирующим агентом не могут быть электроны. Дырки также не могут производить ионизацию, поскольку для них имеется значительный потенциальный барьер (более 1 эВ) между каналом и подложкой.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ионизирующими агентами являются нейтральные частицы, т. е. либо фотоны, либо фононы. В интересующем нас диапазоне V_d от 0.2 до 1 В поле в канале транзистора достигает величины $0.2-1 \cdot 10^3$ В/см. В таких полях при низких температурах происходит существенный разогрев носителей и они могут испускать как фононы, так и фотоны.

Для того чтобы получить дополнительную информацию о механизме ионизации, был выполнен эксперимент, в котором на одном кристалле на расстоянии 0.4 мм друг от друга располагались два кольцевых транзистора. Один из них, на сток которого подавалось малое напряжение около 0.1 В, использовался для измерения скорости формирования ОПЗ после подачи импульсного смещения на подложку. Второй служил источником ионизирующих частиц. Как показал эксперимент, скорость образования ОПЗ первого транзистора очень мала, пока выключен второй, но быстро возрастает по мере роста V_d второго транзистора.

Поскольку характерное время релаксации τ для первого транзистора было слишком велико, измерялась другая величина — скорость сдвига порогового напряжения dV_T/dt сразу после подачи импульса на подложку. Эта величина для первого транзистора при выключенном втором была менее 10^{-4} В/с. На рис. 4 показаны зависимости этой величины для обоих транзисторов от V_d второго транзистора. Видно, что dV_T/dt для первого транзистора всюду существенно

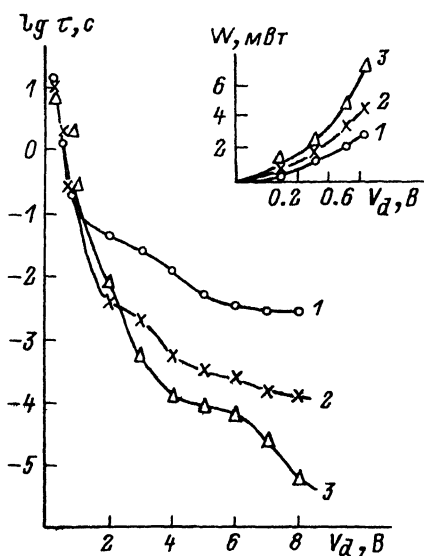


Рис. 3. Зависимость $\lg [\tau (V_d)]$, измеренная на линейных транзисторах с длиной канала $10 \mu\text{м}$ при разных напряжениях на затворе.

V_g , В: 1—3, 2—5, 3—7. Амплитуда импульса смещения подложки 3 В. На вставке показаны зависимости мощности, выделяемой в транзисторе, от V_d при тех же напряжениях на затворе.

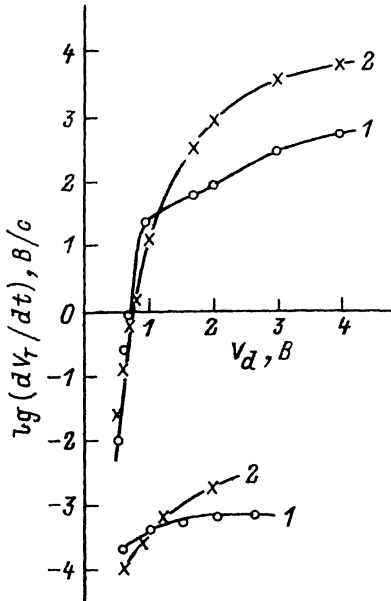


Рис. 4. Зависимости dV_T/dt для двух кольцевых транзисторов, расположенных на одном кристалле, от напряжения на стоке второго транзистора при двух напряжениях на затворе.

V_g , В: 1—3, 2—5. Первый транзистор все время находится в режиме $V_g=3$ В, $V_d=0.1$ В. Две верхние кривые относятся к транзистору 2, а две нижние — к транзистору 1. Амплитуда импульса смещения подложки 3 В.

меньше, чем для второго. Отсюда также следует, что рост скорости образования ОПЗ с ростом V_d нельзя объяснить нагревом всего кристалла, так как в этом случае мы имели бы одинаковые скорости dV_T/dt на обоих транзисторах. В нашем случае, кроме равновесных фононов, спектр которых соответствует температуре кристалла, имеется поток неравновесных фононов, излучаемых вторым транзистором. Поскольку неравновесные фононы могут пробежать от излучающего их транзистора до границы кристалла [6], ясно, что ни в какой точке мы не имеем равновесного спектра фононов, соответствующего определенной температуре.

Обращает на себя внимание значительно более быстрое возрастание величины dV_T/dt для второго транзистора, чем для первого, при увеличении V_d . При $V_d=0.6$ В отношение этих величин для первого и второго транзисторов составляет 10^{-3} и уменьшается до $3 \cdot 10^{-5}$ при $V_d=1$ В. Такое поведение плохо согласуется с предположением об ионизации доноров потоком фотонов. Излучение фотонов при малых V_d в режиме плавного канала наблюдалось ранее только в далекой ИК области [7] за счет переходов между квантовыми подзонами. В объемных образцах имеет место излучение в диапазоне энергий фотонов $60-140$ мэВ при разогреве дырок в сильных электрических полях за счет переходов между зоной легких и тяжелых дырок [8]. Если бы фотоны играли основную роль в ионизации доноров, можно было бы ожидать, что отношение величин dV_T/dt для первого и второго транзисторов не будет изменяться при росте V_d , поскольку в ИК диапазоне поглощение фотонов в кремнии мало и вся разница в плотности потоков фотонов вблизи первого и второго транзисторов связана с геометрическим ослаблением.

Более вероятным представляется поэтому предположение о том, что энергию, необходимую для ионизации доноров, переносят фононы. Высокоэнергетичные оптические фононы с энергией около 50 мэВ, достаточной для ионизации, имеют малое время жизни 10^{-11} с и малую длину пробега до распада на акустические фононы (около 0.1 мкм) [9] и не достигают той области, где происходит ионизация. Акустические фононы с энергией 5 мэВ имеют уже большую длину пробега (порядка миллиметра) [6]. При этом для ионизации необходимо участие нескольких фононов. Изменение соотношения величин dV_T/dt для первого и второго транзисторов можно объяснить тем, что с ростом V_d возрастает средняя энергия излучаемых фононов и увеличивается сечение для ионизации ими доноров во втором транзисторе. После прохождения расстояния 0.4 мм между транзисторами значительная часть фононов распадается на менее энергетичные и возрастание скорости ионизации в первом транзисторе получается существенно меньшим, чем во втором. Таким образом, в данной работе показано, что существует механизм ионизации примесей при низких температурах, не связанный с ударной ионизацией и, по-видимому, обусловленный взаимодействием неравновесных высокоэнергетичных фононов с примесями.

Авторы благодарны С. К. Саввиных за обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Saks N. S., Nordbryht A. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 11. P. 6962—6968.
- [2] Tewksbury S. K. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 5. P. 3865—3872.
- [3] Dierieckx B., Warmerdam L., Simoen E., Vermeiren J., Glaeys C. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1988. V. 35. N 7. P. 1120—1125.
- [4] Охонин С. А., Французов А. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 8. С. 1362—1366.
- [5] Даргис А., Жураускас С. // Лит. физ. сб. 1984. Т. 24. № 6. С. 64—74.
- [6] Ulbrich C. G., Narayanamurti, Chin M. A. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. N 17. P. 1432—1438.
- [7] Gornik E., Tsui D. C. // Sol. St. Electron. 1978. V. 21. P. 139—142.
- [8] Bauer G. // Sol. St. Electron. 1978. V. 21. N 1. P. 17—27.
- [9] Баев В. С. и др. // ЖЭТФ. 1979. Т. 77. В. 5. С. 2117—2124.

Институт физики полупроводников
СО РАН
Новосибирск

Получена 19.06.1991
Принята к печати 23.10.1991