Таким образом, захват собственных межузельных атомов A-центрами становится существенным при N_a, соответствующей Φ^*, т. е. при $N_a \geqslant N_a^* \simeq 1.5 \times \times 10^{17}$ см$^{-3}$. При $N_a = N_a^*$ из условия (4) находим

$$1/\tau_i \varkappa_{ai} \leqslant 7.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}. \quad (5)$$

Если для оценок принять, что скорость захвата межузельных атомов I как A-центрами, так и другими стоками лимитируется диффузией, $1/\tau_i = 4\pi D_i r_1 N_F$, а $\varkappa_{ai} = 4\pi D_i r_2$, где r_1 и r_2 — соответствующие радиусы захвата, D_i — коэффициент диффузии I, N_F — концентрация стоков для I, то из (5) получим

$$N_F \leqslant \frac{r_2}{r_1} 7.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Поскольку, по-видимому, $r_1 \simeq r_2$, полученная оценка сверху указывает на то, что возможными стоками, определяющими τ_i, являются атомы углерода, концентрация которых $N_C \simeq 5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$. При этом зависимость $N_a \sim \sqrt{\Phi}$ будет выполняться уже достаточно хорошо, с точностью не хуже 30 %.

Полученные результаты позволяют также провести оценку эффективности введения V и I в анализируемом эксперименте. При $\Phi \geqslant \Phi^*$ имеем $N_a^2 = 2\lambda t/\tau_i \varkappa_{ai}$. Учитывая, что $\lambda = \Sigma N_{Si} J$, где Σ — сечение образования дефектов, N_{Si} — концентрация атомов Si, а J — интенсивность потока электронов, и используя найденное значение $\tau_i \varkappa_{ai}$, нетрудно получить, что скорость введения дефектов при данном виде облучения $\Sigma N_{Si} \geqslant 0.12$ см$^{-1}$. С другой стороны, если атомы углерода действительно являются превалирующими стоками для I, то можно получить, что $\Sigma N_{Si} \leqslant 0.18$ см$^{-1}$. Эти границы для скорости введения первичных дефектов, участвующих в образовании вторичных дефектов, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [6].

Список литературы

[1] Винецкий В. Л., Холодарь Г. А. Радиационная физика полупроводников. Киев, 1979. 332 с.
[2] Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К., Хируненко Л. И., Шпинар Л. И., Ясковец И. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 562—565.
[3] Атабаев И. Г., Саидов М. С., Шаховцов В. И., Хируненко Л. И., Шинкаренко В. К., Шпинар Л. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 570—573.
[4] Смирнов Л. С. // Дефекты структуры в полупроводниках. Новосибирск, 1973. С. 201—207.
[5] Неймаш В. Б., Соснин М. Г., Туровский Б. М., Шаховцов В. И., Шиндич В. Л. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 5. С. 901—903.
[6] Kimerling L. C. // Inst. Phys. Conf. Ser. N 31. 1977. Ch 2. P. 221—230.

Институт физики АН УССР
Киев

Получено 7.06.1988
Принято к печати 24.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕР НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОВОДИМОСТИ И ЕМКОСТИ В КРЕМНИЕВЫХ МДП СТРУКТУРАХ

Галаев А. А., Выговская Е. А., Малинкович М. Д.

Осцилляции продольной проводимости в зависимости от напряжения на затворе наблюдались в ряде работ [1-5]. Было показано, что положение экстремумов не зависит от температуры, магнитного поля, смещения подложки. Амплитуда осцилляций растет с уменьшением длины канала, понижением температуры. Характер осцилляций не остается постоянным при смене номера образца или выборе другой группы контактов к каналу на исследуемом образце. Выска-

зывались предположения, что их причиной является либо образование двумерного вигнеровского кристалла в примесной зоне полупроводника [3, 4], либо прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка в образцах малых размеров [2, 5], либо явление протекания [6].

В данной работе исследованы зависимости двумерной дифференциальной проводимости ($G=dJ/dV_g$, dG/dV_g) и емкости (C, dC/dV_g) от напряжения на затворе V_g в инверсионных слоях кремния при 4.2 К. Тестовые МДП транзисторы с различными длиной и шириной канала (L=4, 6, 8, 20, 200, 400 мкм; W=50, 100 мкм), толщиной затворного окисла 60 нм изготовлены в слоях p-кремния [ориентация (100), концентрация акцепторной примеси $\sim 10^{16}$ см$^{-3}$]. Затвор изготовлен из поликристаллического кремния с парой контактов ($K1$, $K2$) у краев канала (S, D) (см. вставку на рис. 1) для создания однородного поля в канале.

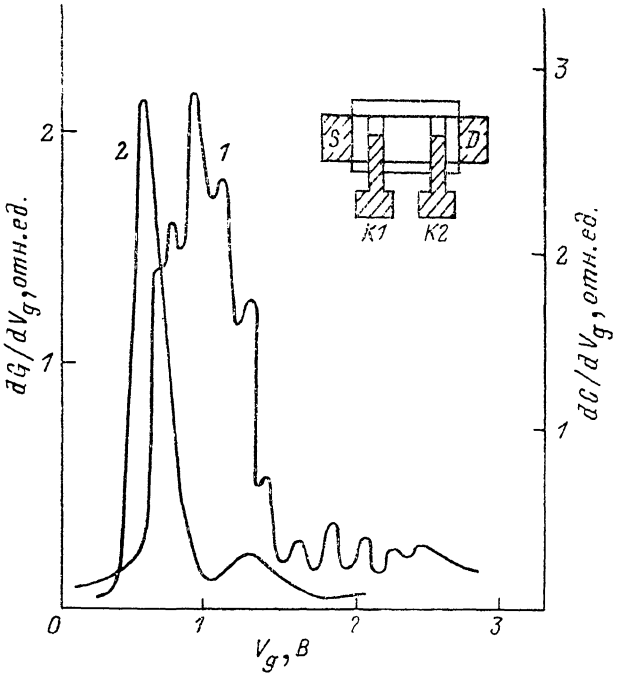

Рис. 1. Зависимости dG/dV_g (1) и dC/dV_g (2) от напряжения на затворе в исходных структурах. На вставке — схема МДП структуры.

Для измерения проводимости и емкости, а также их производных, определяемых по величине сигнала второй гармоники $U_{2\omega}$, напряжение на затворе модулировали сигналом частотой 287 Гц с амплитудой U_0=0.05 В. Были исследованы как исходные, так и структуры, подвергнутые электронному облучению дозами $5\cdot10^{13}$, $5\cdot10^{14}$ и $4\cdot10^{15}$ см$^{-2}$. Операцию радиационной обработки исследуемых структур проводили на ускорителе ЭЛУ-6 (энергия электронов E_e=6 МэВ) интегральными потоками 10^{13}—10^{16} эл/см^2.

При измерении проводимости для создания однородного поля в канале между краями резистивного затвора $K1$ и $K2$ прикладывали смещение $\Delta V_g = V_{K1}-V_{K2}=V_D-V_S$. В процессе измерения между стоком и истоком при помощи системы стабилизации поддерживали постоянное смещение. Измерение емкости проводили при тех же значениях ω, U_0, объединяя попарно контакты ($K1$, $K2$) и (S, D).

Напряжение U_ω, определяемое дифференциальной проводимостью канала, обнаруживало слабые осцилляции при изменении V_g, а сигнал $U_{2\omega}$ имел выраженный осциллирующий характер, положения экстремумов которого совпадали с наибольшей крутизной изменения U_ω.

Осцилляции проводимости наблюдались на всех исследованных образцах (исходных, облученных разными дозами и отожженных после облучения)

(рис. 1, 2). При увеличении напряженности поля между стоком и истоком от 2.5 до 40 В/см амплитуда и количество осцилляций уменьшались как в исходных, так и в облученных образцах. С увеличением размеров канала интенсивность пиков уменьшалась. Смена направления тянущего поля приводила к небольшому смещению отдельных осцилляционных максимумов (на ~0.05 В при среднем периоде 0.2 В), оставляя неизменной картину в целом. Картина осцилляций устойчиво сохранялась при отогреве образцов от 4.2 до 300 К.

С ростом дозы облучения амплитуда осцилляций (dG/dV_g) уменьшалась, но их количество возрастало при неизменной напряженности тянущего поля. Отжиг облученных структур (180 °С, 2 ч) возвращал их в исходное состояние. Для исходных образцов и образцов, подвергнутых малым дозам облучения ($5\cdot10^{13}$ см$^{-2}$), зависимости C (V_g) и dC/dV_g (V_g) имели монотонный характер (рис. 1). При облучении большими дозами зависимости C (V_g) обнаруживали слабые осцилляции, а dC/dV_g (V_g) имели выраженный осциллирующий характер (рис. 2). При последующем отжиге облученных образцов осцилляции емкости пропадали. Облучение структур при максимальной дозе приводило к увеличению порогового напряжения V_T на ~3 В, а после отжига порог принимал исходное значение. Известно, что на изменение V_T могут оказывать воздействие три конкурирующих механизма изменения зарядового состояния: Q_D — заряд в окисле, $Q_{опз}$ — заряд в области пространственного заряда, $Q_{пс}$ — заряд на поверхностных состояниях. При облучении в окисле образуется положительный заряд [7], что должно приводить для n-канала к уменьшению V_T. Увеличение в нашем случае порогового напряжения V_T при облучении указывает на преобладание механизма роста отрицательного заряда на поверхностных состояниях $Q_{пс}$. На вольтамперных характеристиках и C—V-кривых наблюдалось также изменение крутизны. При потоках 10^{13} см$^{-2}$ крутизна менялась незначительно, а после облучения 10^{14}—10^{15} см$^{-3}$ она уменьшалась, что обусловлено эффективным ростом плотности поверхностных состояний, которые из-за наличия неконтролируемых примесей, механических напряжений и скрытых дефектов в структурах имеют неоднородное энергетическое и пространственное распределение [8, 9].

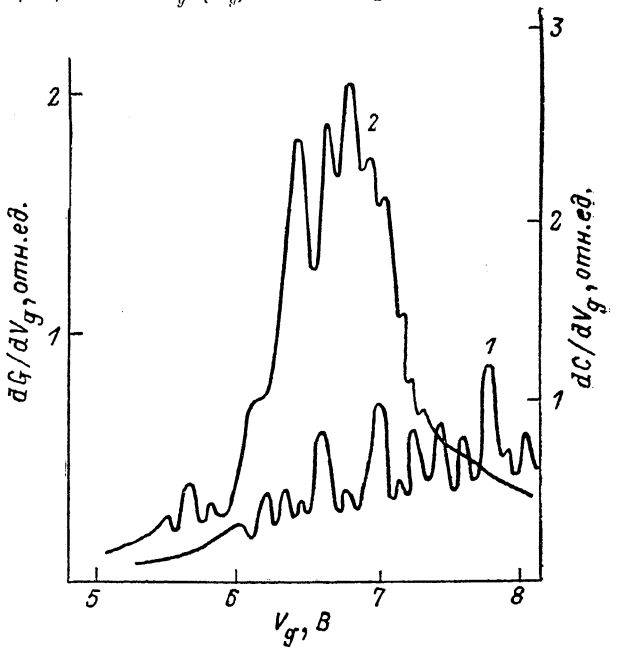

Рис. 2. Зависимости dG/dV_g (1) и dC/dV_g (2) от напряжения на затворе в структурах, облученных электронами дозой $4\cdot10^{15}$ см$^{-2}$.

Известно, что на границе Si—SiO_2 существуют крупномасштабные неровности [10]. Поэтому осцилляции проводимости, по-видимому, можно объяснить

классической теорией протекания. Облучение структур приводит к тому, что на границе раздела начинают преобладать мелкомасштабные флуктуации потенциала, с чем, вероятно, связаны уменьшение амплитуды осцилляций и увеличение их количества. Однако появление осцилляций емкости при облучении нельзя связать с наличием мелкомасштабных флуктуаций потенциала. Их можно, по всей видимости, объяснить опустошением дискретных уровней поверхностных состояний по мере загиба зон с ростом напряжения на затворе.

Список литературы

[1] Pepper M. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1979. V. 12. P. L617—L619.
[2] Орлов А. С., Савченко А. К., Ченский Е. В., Ильичев Э. А., Полторацкий Э. А. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 43. В. 9. С. 421—423.
[3] Pepper M., Uren M. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1982. V. 15. P. L617—L618.
[4] Ченский Е. В., Ткач Ю. Я. // Письма ЖЭТФ. 1983. Т. 38. В. 5. С. 235—238.
[5] Нгуен В. Л. и др. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 43. В. 1. С. 35—39.
[6] Arnold E. // Surf. Sci. 1976. V. 58. P. 60—70.
[7] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М., 1984. 455 с.
[8] Горюнов Н. Н., Ладыгин Е. А., Паничкин А. В. // Электрон. техн. Сер. 8. 1985. № 6. С. 39—41.
[9] Горюнов Н. Н., Ладыгин Е. А., Малинин В. Г., Паничкин А. В. // Электрон. техн. Сер. 8. 1986. № 4. С. 18—19.
[10] Хайкин М. С., Трояновский А. М., Эдельман В. С., Пудалов В. М., Семенчинский С. Г. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 44. В. 4. С. 193—197.

Московский институт стали и сплавов

Получено 5.08.1988
Принято к печати 24.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА НА ОБРАЗОВАНИЕ АКЦЕПТОРНЫХ УРОВНЕЙ НИКЕЛЯ В *n*-Si

Витман Р. Ф., Гусева Н. Б., Лебедев А. А., Таптыгов Э. С.

Известно, что полная концентрация никеля, введенного в кремний, определяемая методами активационного анализа или меченых атомов, на 3—4 порядка больше его электрически активной доли ($N_{Ni}^{эа}$), оцененной из спектров DLTS [1]. Этот факт свидетельствует о нахождении большей части атомов Ni на каких-либо неактивных стоках (скоплениях примесей, дефектах) или в неактивном состоянии в междоузлиях. В данной работе параллельно с оценкой $N_{Ni}^{эа}$ исследовались оптические свойства Si с Ni в ИК области спектра, структурное несовершенство Si, вызванное диффузией Ni, и изменение этих свойств в зависимости от концентрации «свободного» и «связанного» кислорода. Использовались методы DLTS, ИК поглощение при ~1, 9.1 и ~16 мкм, рентгеновская топография, по Лангу, и ИК микроскопия.

Никель вводился методом диффузии из напыленного в вакууме слоя металлического Ni ($T=1080$ °C, $t=3\div4$ ч, охлаждение с закалкой со скоростью $\sim10^4$ или ~200 град/ч). Исследовались образцы бездислокационного *n*-Si с $\rho\simeq5\div100$ Ом·см и различным содержанием оптически активного кислорода ($N_O^{опт}$) [$N_O\leqslant10^{16}$, $N_O\cong(7\div9)\cdot10^{17}$ и $N_O\cong1.4\cdot10^{18}$ см$^{-3}$].

Исследования показали, что в спектрах ИК поглощения в Si с $N_O^{опт}>10^{17}$ см$^{-3}$ после введения никеля наблюдалось уменьшение амплитуды полосы поглощения кислорода при 9.1 мкм на 7—18 % при увеличении $N_{Ni}^{эа}$ от $4\cdot10^{13}$ до $2\cdot10^{14}$ см$^{-3}$. Сильное ухудшение прозрачности образцов с Ni в исследуемом диапазоне длин волн (2.5÷25 мкм) несколько затрудняет оценку величины $N_O^{опт}$.

Аналогичный эффект обнаружен и для концентрации оптически активного углерода ($N_C^{опт}$) вблизи 16 мкм, причем для углерода эффект уменьшения $N_C^{опт}$