

классической теории 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] Perper 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] Perper 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}^{2+}), 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}^{2+} исследовались оптические свойства Si с Ni в ИК области спектра, структурное несовершенство Si, связанное 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, $t=3\div 4$ ч, охлаждение с закалкой со скоростью $\sim 10^4$ или ~ 200 град/ч). Исследовались образцы бездислокационного *n*-Si с $\rho \approx 5\div 100$ Ом·см и различным содержанием оптически активного кислорода (N_O^{2+}) [$N_O \leq 10^{16}$, $N_O \approx (7\div 9) \cdot 10^{17}$ и $N_O \approx 1.4 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$].

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

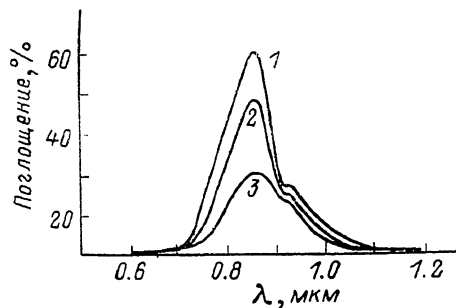
Аналогичный эффект обнаружен и для концентрации оптически активного углерода (N_C^{2+}) вблизи 16 мкм, причем для углерода эффект уменьшения N_C^{2+}

гораздо сильнее, чем для кислорода, и достигает 1—1.5 порядка. Новых полос поглощения в образцах Si<Ni> не обнаружено.

Как и в других работах [2-4], в закаленных образцах методом DLTS наблюдались два акцепторных глубоких уровня (ГУ) $E_c-0.41$ и $E_c-0.20$ эВ. Обнаружено, однако, что концентрация ГУ $E_c-0.41$ эВ находится в сильной зависимости от концентрации кислорода: с увеличением $N_{O^{гт}}$ на 2 порядка концентрация этого уровня уменьшается в 3—4 раза. Вероятно, происходит образование электронейтрального комплекса типа Ni—O, который и обеспечивает уменьшение свободного кислорода ($N_{O^{гт}}$). На поведение другого уровня $E_c-0.20$ эВ в Si <Ni> кислород влияния не оказывает. В образцах без закалки после диффузии никеля глубоких уровней, связанных с никелем, не наблюдалось.

Для подтверждения взаимодействия Ni с кислородом был поставлен дополнительный эксперимент. Перед диффузией Ni в пластинах «бескислородного» Si ($N_O \leq 10^{16}$ см⁻³) толщиной 1 мм создавался слой атомарного кислорода путем диффузии в атмосфере сухого воздуха при $T=1250$ °С, а затем вводился Ni. Спектры DLTS измерялись в глубине пластин за слоем кислорода. В таких образцах наблюдался только один ГУ $E_c-0.2$ эВ, а ГУ $E_c-0.41$ эВ, коррелирующий с изменением $N_{O^{гт}}$, в кристалле не обнаружен.

Геттером для электроактивного никеля являются также частицы, сформиро-



Дифференциальные спектры поглощения для образцов с различным содержанием кислорода после диффузии в стандартном режиме.

1 — контрольный образец ВТО без Ni ВЗП. N_O , см⁻³:
1 — $< 10^{16}$, 2 — $\approx (7+8) \cdot 10^{17}$, 3 — $\approx 1.3 \cdot 10^{19}$.

ванные в Si при 1100 °С в течение 10 ч в атмосфере сухого воздуха. Оба ГУ $E_c-0.41$ и $E_c-0.2$ эВ в таких образцах отсутствуют совершенно в пределах чувствительности метода DLTS ($N_{ГУ} \geq 10^{11}$ см⁻³).

Одним из важных вопросов было выяснение причин нарушения в ИК области прозрачности образцов Si <Ni>, которая сильно падала во всех случаях быстрого охлаждения после диффузии никеля.

Эксперименты с низко- и высокотемпературной обработкой (НТО — 500 °С, 1 ч; ВТО — 1080 °С, 3 ч) показали, что после НТО наблюдается полное исчезновение ГУ, но прозрачность не восстанавливается. Последующие нагрев до 1080 °С и закалка вновь переводят атомы Ni в активное состояние, и прозрачность сохраняется низкой. Если же ВТО сопроводить медленным охлаждением, то ГУ отсутствуют, и прозрачность не нарушается при первичной ВТО или даже восстанавливается при повторной ВТО.

Возможной причиной нарушения прозрачности кремниевых образцов после диффузии Ni могут быть значительные изменения в решетке вследствие образования структурных дефектов. Интересен результат, полученный из анализа рентгеновских топограмм: в любом случае (быстрого и медленного охлаждения), т. е. при наличии и отсутствии ГУ никеля, на топограммах выявляются деформационные центры, свидетельствующие о присутствии частиц второй фазы. Концентрация дефектов высокая ($N_d \approx 10^8$ см⁻³), размер деформационного изображения меньше 5 мкм.

Медленное охлаждение, при котором не нарушается прозрачность, также приводит к образованию выделенной второй фазы. Однако размер и плотность деформационных центров сильно отличаются от случая быстрого охлаждения: размер круглее (до 100 мкм), плотность меньше, т. е. коагуляция дефектов во время медленного охлаждения может обеспечивать прозрачность.

Известно [5], что если частицы второй фазы имеют показатель преломления, отличный от основного вещества, то проходящий через образец свет будет рассеиваться на этих частицах. Наличие дополнительных центров рассеяния приводит к изменению формы кривых пропускания вблизи края фундаменталь-

ного поглощения. Дифференциальная методика записи спектров образцов Si <Ni> в области ~ 1 мкм показывает, что наибольшее отклонение от нормального рассеяния (контрольный образец без Ni), вызванное наличием частиц второй фазы в Si, наблюдается в бескислородном Si БЗП, где обнаружена самая высокая концентрация ГУ $E_c - 0.41$ эВ и плотность дефектов выше, чем в кислородном Si. Спектры сравнения изображены на рисунке.

Более подробно эти дефекты исследовались по снимкам ИК микроскопии (МИК-4, увеличение в 500 раз). Оказалось, что при медленном охлаждении от 1080 °C образец остается прозрачным, никакие дефекты не наблюдаются. Напротив, быстрое охлаждение сильно нарушает прозрачность и приводит к образованию дефектов различной формы, размеров и плотности в зависимости от N_O в Si. В Si с $N_O \approx 10^{18}$ см⁻³ это — дефекты вытянутой формы с размытыми очертаниями размером 4×8 мкм и плотностью 10^4 см⁻². В Si БЗП, где наблюдалось более сильное рассеяние света в области ~ 1 мкм, дефекты представляют собой точки размером $2 \div 3$ мкм с плотностью $\approx 2 \cdot 10^5$ см⁻². Таким образом, от концентрации кислорода, а также от формы и плотности дефектов прозрачность не зависит.

В заключение сделаем следующие выводы.

1. С увеличением концентрации кислорода в *n*-Si уменьшается концентрация электрически активного Ni, имеющего ГУ $E_c - 0.41$ эВ. Концентрация ГУ $E_c - 0.2$ эВ, вызванного, вероятно, структурными дефектами, образующимися в процессе диффузии Ni, не зависит от концентрации кислорода в образце.

2. Слой атомарного (свободного) кислорода, или частицы SiO₂, служит сильным геттером для атомов Ni, и ГУ не наблюдаются.

3. Ухудшение прозрачности в Si <Ni> не коррелирует с изменением концентрации кислорода. Прямой связи между наличием частиц второй фазы, ухудшением прозрачности и наличием ГУ также не установлено. Полученные экспериментальные результаты позволяют предположить, что ухудшение прозрачности, по-видимому, наступает или из-за междоузельных атомов Ni, собираемых в скопления во время быстрого охлаждения, или ввиду вероятного образования комплексов типа Ni—C (если исходить из сильного эффекта уменьшения концентрации оптически активного углерода при введении Ni).

Список литературы

- [1] Болтакс Б. И., Бахадурханов М. К., Куликов Г. С., Малкович Р. Ш. Компенсированный кремний. Л., 1974. 462 с.
- [2] Лебедев А. А., Таптыгов Э. С., Джафаров Э. А. // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1987. № 1172.
- [3] Pearton S. J., Tovendal J. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 3. P. 1375—1379.
- [4] Витман Р. Ф., Гусева Н. Б., Лебедев А. А., Таптыгов Э. С. // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1988. № 1221.
- [5] Батавин В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. М., 1976. 101 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 19.12.1988
Принято к печати 24.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НА СВОЙСТВА ФОСФИДА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО 3d-ЭЛЕМЕНТАМИ

Саморуков Б. Е., Слободчиков С. В.

Исследования кристаллов фосфида индия после облучения электронами показали, что уровень Ферми в них закрепляется вблизи $\sim E_c - 0.35$ эВ [1^{-3}]. При этом скорость удаления носителей заряда в *p*-InP гораздо больше, чем