

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МАРГАНЦА И НИКЕЛЯ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ В КРЕМНИИ

Бахадырханов М. К., Миркамилова М. С., Шустров В. А.

Установлена связь коэффициента ионно-электронной эмиссии γ с концентрацией примеси, имплантированной в кремний. Опыты приведены с примесью Mn и Ni в КДБ. Имплантацию с дозами в интервале $5 \cdot 10^{15} - 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ осуществляли с энергией 40 кэВ. Показано, что кривая зависимости коэффициента γ от глубины «работающего на эмиссию» слоя имеет два максимума. Ближний к поверхности максимум авторы связывают с максимумом линдхардтовского распределения примеси, более глубокий максимум связан с максимумом канализированной при имплантации примеси.

Как известно, в кремнии, легированном марганцем или никелем, наблюдается ряд интересных физических явлений, представляющих большой научный и практический интерес [1-3]. Вместе с тем установлено, что чаще всего такие свойства обнаруживает кремний, примесь в который вводится ионной имплантацией. На эти свойства легированного таким образом кремния и, следовательно, на параметры изготавливаемых на его основе приборов в сильной степени влияет распределение имплантированной примеси. Экспериментальные определения профиля концентрации представляют собой непростую задачу, в особенности в том случае, когда примесь вводится ионной имплантацией.

Известны [4] способы, основанные на использовании радиоактивных изотопов или на активационном анализе. В [5] предлагается способ, основанный на зависимости коэффициента оптического отражения от концентрации точечных дефектов. Все эти способы имеют один общий недостаток — необходимость многократного снятия тонких поверхностных слоев контролируемой толщины. Авторы [6, 7] использовали метод ВИМС. Трудность применения этого способа связана с тем, что не все материалы имеют заметный коэффициент распыления в виде положительных или отрицательных ионов. Кроме того, для его реализации требуется громоздкое дорогостоящее оборудование.

Нами была поставлена задача попытаться использовать для определения профиля распределения имплантированной примеси такой дефекточувствительный процесс [8-10], как вторичная ионно-электронная эмиссия. В опытах кремний КДБ-10, Ом·см [грань (110)] с имплантацией Mn или Ni бомбардировали ионами азота. Имплантацию осуществляли при энергии 40 кэВ, дозу изменяли в интервале $\Phi = 5 \cdot 10^{15} - 2.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. При таких дозах легирования поверхность образца была аморфизирована [11]. В процессе имплантации и в наших опытах температура образца оставалась комнатной. Это позволяет считать, что участвующие в эксперименте дефекты являются радиационными, сохранившимися после естественного «старения» мишени, т. е. их распределение определяется имплантацией. Кроме того, исключение тепловой обработки позволяет считать, что марганец или никель в основном находится в электрически нейтральном состоянии.

Опыты проводили в вакуумной установке, откачка которой осуществлялась двумя ступенями. Предварительная откачка осуществлялась диффузионным ртутным насосом ДРН-10 с азотной ловушкой. После достижения давления 10^{-4} мм рт. ст. откачка переключалась на МНДО-0.25-1. Когда давление опустилось до $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., начинался напуск рабочего газа в источник.

В экспериментах остаточное давление $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. считалось достаточным, так как специальную тепловую обработку вакуумной камеры, в том числе мишени, не предусматривали по указанным выше причинам. С другой стороны, при работе источника давление вновь повышалось до $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. по рабочему газу — азоту.

Давление рабочего газа в камере источника при этом было $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. При таком давлении зажигали высокочастотный разряд, из которого вытягивали положительные ионы. Масс-сепарацию пучка ионов не производили. В литературе нет данных о массовом спектре ионов, извлекаемых из ВЧ разряда в азоте. Однако можно предположить, что состав пучка в нашем случае не будет качественно отличаться от масс-спектра пучка из водородной плазмы. Тогда в соответствии с [12] можно считать, что ионы N^+ составляют более 90 %. Неконтролируемый состав ионного пучка может создавать определенные трудности в интерпретации получаемых результатов. Однако для относительных

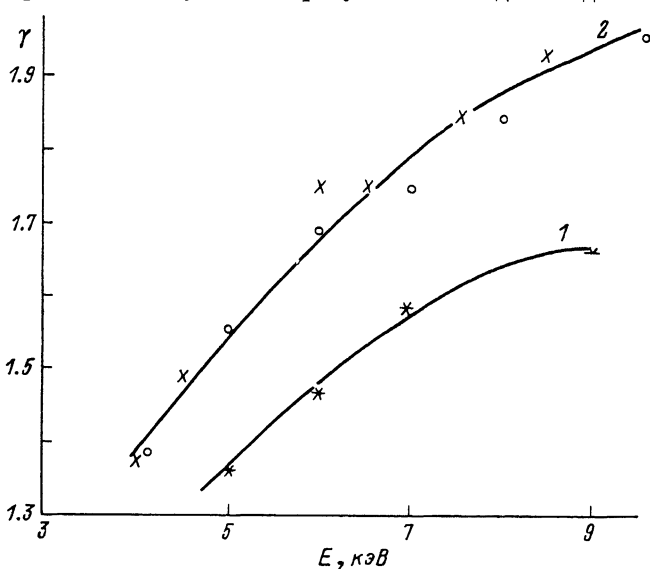


Рис. 1. Энергетические зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии γ при бомбардировке ионами азота с энергией 6 кэВ.

1 — КДБ-10, 2 — КДБ-10 с имплантацией Mn. Точки — доза $5 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$, крестики — доза $5 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$.

измерений вносимую неопределенность можно не учитывать, если не менять условия образования ионного пучка. Для этого источник ионов работал всегда при давлении рабочего газа $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., неизменной ВЧ мощности, подводимой к разряду, при вытягивающем напряжении 3 кВ. Вытянутый пучок ионов формировали одиночной линзой и ускоряли до энергии 6 кэВ.

Мишень — коллекторный узел — представлял собой полусферическую систему: плоскую мишень располагали в диаметриальной плоскости полусферы — коллектора. Через отверстие в коллекторе пучок ионов примерно нормально падал на мишень. Средняя плотность тока ионов была ~ 1 мкА/см 2 . Это соответствует плотности потока ионов N^+ на мишень $\sim 10^{13}$ см $^{-2}$. Измерения коэффициента ионно-электронной эмиссии проводили хорошо известным гальванометрическим способом (см., например, [13]).

На рис. 1 приведены энергетические зависимости коэффициента γ для образцов с различной дозой имплантации Mn. Для того чтобы ослабить влияние поверхностных загрязнений мишени, первое измерение проводили через 5 мин после начала бомбардировки. Каждая точка, приведенная на рис. 1, является средним из 5—6 измерений, выполняемых чаще на различных мишенях. Кривая 1 соответствует КДБ-10 без марганца. Она согласуется с данными, приведенными в [10]. Коэффициент γ после имплантации марганца возрос во всем интервале энергий. Однако корреляции роста γ с дозой имплантированного марганца не наблюдается. Независимость от дозы можно объяснить тем, что

изменение последней от $5 \cdot 10^{15}$ до $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ не вносит каких-либо заметных изменений в концентрацию Mn в приповерхностном слое. Увеличение коэффициента, по-видимому, связано также с аморфизацией приповерхностного слоя кремния.

В следующей серии опытов изучали изменение коэффициента ионно-электронной эмиссии в процессе длительной непрерывной бомбардировки. В этом случае происходит непрерывное распыление поверхностного слоя милени, а полученные значения соответствуют ионно-электронной эмиссии различных приповерхностных слоев. Оценка накопления азота в процессе длительной бомбардировки в кремнии сделана в [14], она составляет $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Глубина залегания максимума концентрации азота в наших условиях $\sim 140 \text{ \AA}$ [15]. Профиль распределения азота с такой концентрацией в процессе бомбарди-

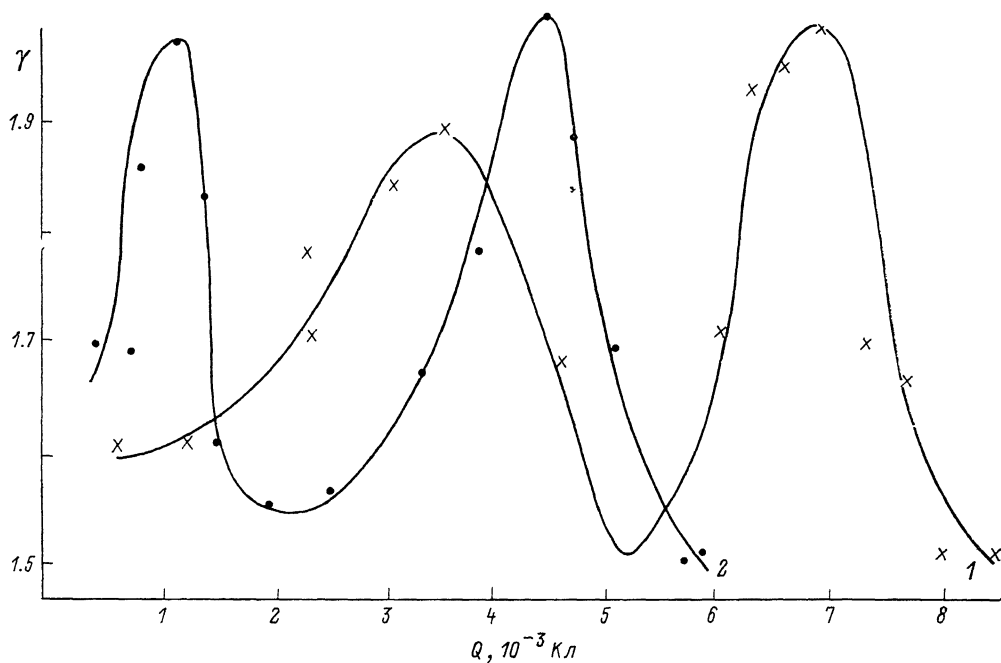


Рис. 2. Зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии γ для КДБ-10, облученного ионами Mn дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, от величины заряда, принесенного ионами азота или аргона.

Точки — бомбардировка ионами аргона, крестики — бомбардировка ионами азота.

ровки непрерывно перемещается в объем полупроводника, проходя через всю область, имплантированную марганцем, для которого величина среднего проективного пробега составляет 350 \AA [15]. Легко видеть, что концентрация азота в максимуме его распределения на порядок и более меньше концентрации марганца. Учитывая результаты опытов, приведенные на рис. 1, можно предположить, что возникновение равновесного распределения примеси азота создает небольшой по величине примерно постоянный фон при измерениях ионно-электронной эмиссии, обусловленной внедрением марганца.

Результаты опытов с кремнием КДБ-10 грань [(110)], имплантированным марганцем дозой $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, приведены на рис. 2 (кривая 1). Экспериментально получены зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии γ от времени бомбардировки. Для возможности корректного сопоставления результатов различных опытов полученные данные были пересчитаны на зависимости γ от величины заряда, принесенного бомбардирующими ионами азота. В работе [5] для зависимости коэффициента оптического отражения от глубины залегания работающего слоя кремния с имплантированным фосфором также получена кривая с двумя максимумами. В ней авторы связывают с дефектами внедрения максимум, соответствующий более глубоким слоям материала мишени. Второй максимум авторы [5] соотносят с максимумом распределения

дефектов смещения, возникающих при имплантации фосфора. Чтобы убедиться в справедливости такого утверждения, были получены оже-спектры мишени при послыонном ионном травлении поверхности. Результаты показывают два максимума концентрации марганца. По-видимому, глубоко лежащий максимум можно связывать с каналированными атомами примеси. Хотя при ионной имплантации не создавали специальных условий для каналирования, процесс этот мог иметь место. Ближний к поверхности максимум соответствует линдхардовскому внедрению, которое становится все более преобладающим со временем имплантации. Таким образом, можно считать, что максимумы кривой $\gamma(Q)$ соответствуют двум максимумам концентрации имплантированного марганца. Вклад в величину γ дефектов смещения при дозах имплантации 10^{15} см^{-2} , когда уже произошла аморфизация приповерхностного слоя, участвующего в ионно-электронной эмиссии, не должен сказываться на форме кривой.

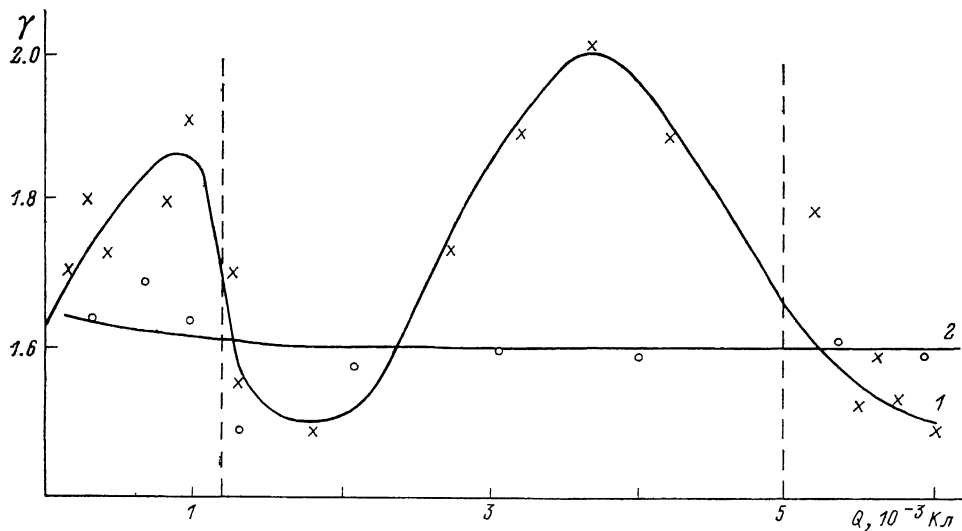


Рис. 3. Зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии γ от величины заряда, принесенного ионами азота.

1 — КДБ-40 с имплантацией Ni дозой $2.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, 2 — КДБ-40 без имплантации Ni.

На рис. 2 (кривая 2) показаны результаты опытов с ионами Ag^+ . Как видно, характер кривой $\gamma(Q)$ остается тем же, что и при бомбардировке азотом. Вся кривая сжата в области меньших Q . Это объясняется тем, что скорость распыления ионами Ag^+ больше, чем при бомбардировке ионами N^+ . Неизменность формы кривой может служить еще одним подтверждением того, что практически отсутствует влияние накопления в мишени азота.

Результаты аналогичных опытов для кремния КДБ-40 с имплантацией примеси никеля приведены на рис. 3 (кривая 1). На этом рисунке пунктирными вертикальными прямыми отделены участки, где бомбардировка проводилась непрерывно. Между ними бомбардировка прекращалась и образец находился 8—10 ч в форвакууме. Как видно, перерывы в бомбардировке не проявляются в ходе кривой. На этом же рисунке кривой 2 показана зависимость $\gamma(Q)$ для КДБ-10 без никеля. Сопоставляя кривые 1 и 2, можно сделать вывод, что процессы, связанные только с накоплением азота в мишени, не приводят к характерному «двугорбому» виду кривой $\gamma(Q)$.

Погрешности измерений оценивали по воспроизводимости величины γ в максимуме. Например, для дозы легирования $\Phi = 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в области близкого к поверхности максимума $\gamma = 1.84$ со средней квадратичной погрешностью 0.2.

Методика дает возможность надежных измерений при дозах легирования $\Phi \geq 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При меньших концентрациях легирующей примеси $\Delta\gamma$ становится соизмеримой с погрешностью измерений. Для получения количественных сведений способ требует градуировки.

- [1] Бахадырханов М. К., Зикриллаев Н. Ф. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 12. С. 2220—2222.
- [2] Бахадырханов М. К., Хамидов А. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 5. С. 1036—1038.
- [3] Бахадырханов М. К., Турсунов А. А., Азизов К. А., Нигманходжаев С. С. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 11. С. 2247—2249.
- [4] Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводнике. М., 1961. 462 с.
- [5] Мардежов А. С., Серянин В. Г., Швец В. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 7. С. 1306.
- [6] Нефедов В. И., Черенин В. Т. // Физические методы исследования поверхности твердых тел. М., 1983. С. 230—235.
- [7] Абдугаббаров М. С., Тураев Н. Ю. // Поверхность. 1984. № 1. С. 72—74.
- [8] Аброян И. А., Лавров В. П., Титов А. И. // ФТТ. 1965. Т. 7. В. 11. С. 3129.
- [9] Бахадырханов М. К., Миркамилова М. С., Шустров В. А. // Тр. IX Всес. конф. «Взаимодействие атомных частиц с твердым телом». М., 1989. Т. 1. Ч. 1. С. 306—307.
- [10] Бахадырханов М. К., Миркамилова М. С., Шустров В. А. // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. 1989. № 5. С. 58—60.
- [11] Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии. М., 1984. 162 с.
- [12] Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М., 1972. 52 с.
- [13] Арифов У. А. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела. М., 1968. 113 с.
- [14] Величко В. В., Дорожкин А. А., Коварский А. П. // Тр. IX Всес. конф. «Взаимодействие атомных частиц с твердым телом». М., 1989. Т. 2. В. 2. С. 76—78.
- [15] Буренко А. Ф. и др. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. Минск, 1980. 352 с.

Ташкентский политехнический
институт им. Беруни

Получена 14.12.1990
Принята к печати 19.06.1991