

ОБРАЗОВАНИЕ И ОТЖИГ ВАКАНСИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ОБЛУЧЕННОГО ИОНАМИ СРЕДНЕЙ МАССЫ

Дехтяр Ю. Д., Носков В. А., Савваитова Ю. А., Сагалович Г. Л.

Облучение ионами средней массы, имеющими энергию 50 или 100 кэВ при флюенсе 10^{12} – 10^{15} см⁻², монокристаллического кремния приводит к образованию в его поверхностном слое вакансионных комплексов различных типов. Порядок реакции их отжига равен 1, энергии активации зависит от размера дефекта, если энергия ионов равна 100 кэВ. Причем при этой энергии облучающих частиц образуется по крайней мере два типа комплексов, а при энергии 50 кэВ — только один тип. Предполагается, что такие дефекты, как *VV*-центры, генерируются при энергии ионов 50 кэВ уже при флюенсе $\geq 4 \cdot 10^{10}$ или $\geq 10^{13}$ см⁻² в случае облучения мышьяком и фосфором соответственно. Если энергия ионов составляет 100 кэВ то *VV*-центры образуются при флюенсе, не меньшем $3 \cdot 10^{14}$ см⁻². Исследование процессов образования дефектов и их отжига выполнено с применением экзоэмиссионной спектроскопии.

Выполненные к настоящему моменту эксперименты и теоретические расчеты свидетельствуют о том, что в ряде случаев отсутствует взаимно однозначное соответствие между концентрацией вакансионных комплексов, введенных в монокристаллический кремний при имплантации в него ионов, и их флюенсом (*D*) [¹⁻³]. Так, при облучении кремния ионами аргона, имеющими энергию 800 кэВ и проникающими на глубину 0.9 мкм [⁴], образуются тетравакансии, концентрация которых изменяется немонотонно с ростом *D* [¹] (рис. 1, кривая 1).

В связи с интенсивным развитием субмикронной технологии изготовления кремниевых микросхем представляет интерес изучение закономерностей образования и отжига вакансионных комплексов, введенных при ионном легировании в поверхностный слой толщиной ≤ 1000 Å.

При выполнении данной работы ставились следующие цели: сопоставление накопления вакансионных комплексов в объеме (рис. 1, кривая 1) и поверхностном слое кремния при его облучении ионами средней массы; анализ отжига образующихся вблизи поверхности радиационных дефектов.

Для генерации радиационных структурных нарушений в поверхностном слое использовались ионы фосфора, масса которых близка к массе аргона. Энергия ионов составляла 100 кэВ, что обеспечивало их проецированный пробег, равный ~ 1000 Å [⁴]. Для оценки концентрации дефектов в поверхностном слое и анализа их отжига использовалась экзоэлектронная спектроскопия [⁵].

Образцами являлись механически полированные пластины монокристаллического кислородосодержащего кремния КДБ-0.005, торцевая поверхность которых была сорпентирована по плоскости (111). Плотность ионного тока (*j*) варьировали от 0.08 до 2.6 мкА/см². Экзоэлектронную эмиссию регистрировали по методике, описанной в [⁵], в вакууме при давлении остаточных газов 10^{-5} Тор и при освещении образцов светом ртутной лампы ДРТ-220, пропущенным через светофильтр БС-3 (наибольшая энергия фотонов 4.85 эВ). Одновременно с освещением образцы нагревали от комнатной температуры до 723 К с постоянной скоростью 0.3 град/с. Спектры экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ), представляющие собой зависимость тока *J* электронов с поверхности образца от его температуры *T*, имели один пик (рис. 2). Температура T_{\max} , при которой

наблюдался экзоэмиссионный максимум, зависела от условий облучения (рис. 3) и находилась в пределах от 583 до 673 К. Согласно модели, изложенной в [6], ЭЭЭ обусловлена отжигом дефектных комплексов, содержащих вакансии. Такого рода дефектами, диссоциирующими в указанном температурном интервале изменения T_{\max} , являются А- и К-центры, вакансионные комплексы V_x ($x > 2$) [1, 6-8]. Для более точной идентификации дефектов по методике [9] была [рас-

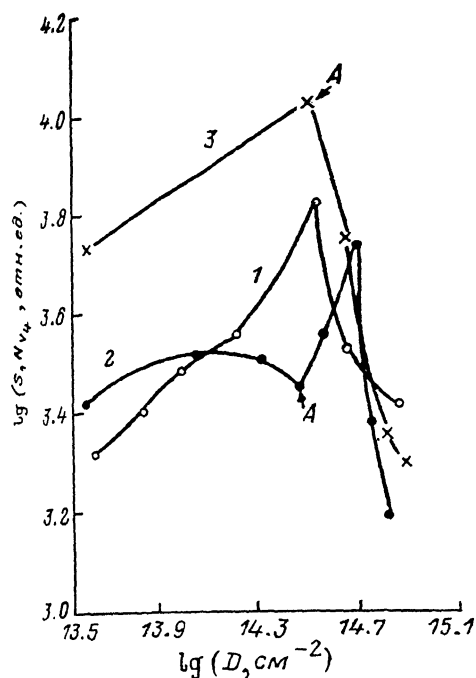


Рис. 1. Зависимости концентрации тетравакансий (1) [1] и S при $j=1.0 \pm 0.1$ мкА/см² (2) и $j=\text{var}$ (3) от флюенса.

Энергия ионов, кэВ: 1 — 800, 2, 3 — 100.

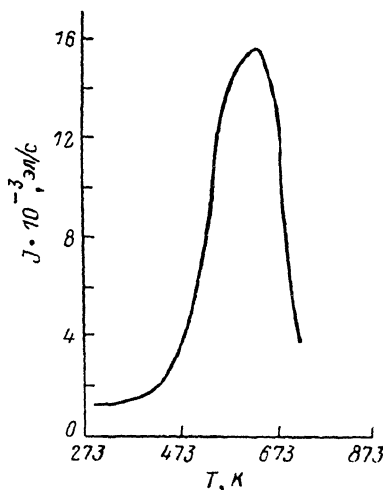


Рис. 2. Характерный спектр экзоэлектронной эмиссии кремния, облученного ионами фосфора, имеющими энергию 100 кэВ.

$j=0.08$ мкА/см², $D=3.63 \cdot 10^{13}$ см⁻².

считана энергия активации (E) пика ЭЭЭ. При этом J связывался с концентрацией (N) дефектных комплексов с помощью уравнения [5, 9]

$$J \sim N(T)^l \exp(-E/kT),$$

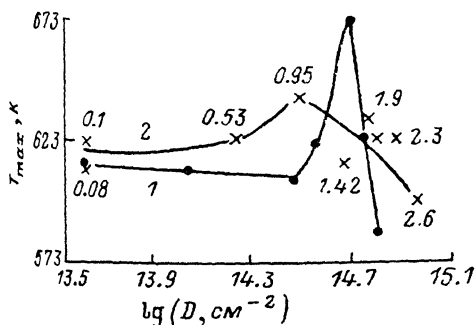


Рис. 3. Зависимость T_{\max} от D (энергия ионов 100 кэВ).

1 — $j=1.0 \pm 0.1$ мкА/см², 2 — $j=\text{var}$ (возле экспериментальных точек указаны величины j в мкА/см²).

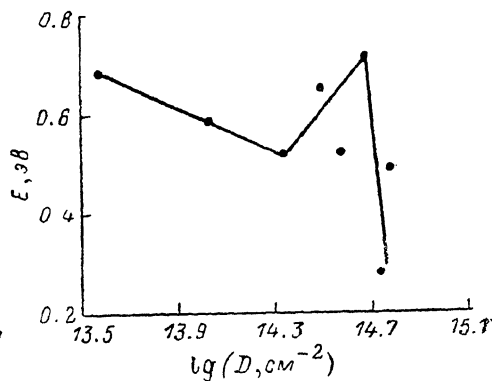


Рис. 4. Зависимость E от D .

Энергии ионов 100 кэВ, $j=1.0 \pm 0.1$ мкА/см².

где l — показатель степени, отражающий порядок реакции, k — постоянная Больцмана.

В результате проведенных расчетов было получено, что $l=1$, а величина E находится в пределах $0.27 \div 0.7$ эВ, причем при $j=1$ мкА/см² E коррелирует

с D (рис. 4). Поскольку энергия активации отжига A -центра составляет 1.3 эВ [7], то можно заключить, что этот дефект не оказывал решающего влияния на ЭЭЭ. Заметим также, что K -центр предположительно представляет собой ассоциацию кислорода с дивакансией [1]. Следовательно, отжиг такого дефекта наиболее вероятно может происходить в две стадии: разрыв связи кислород—дивакансия с последующей ее диссоциацией на вакансии или диссоциацией дивакансии с образованием A -центра и последующим его отжигом. Если бы эти процессы оказывали влияние на ЭЭЭ, то с изменением температуры образца должна была изменяться величина E или показатель степени l . Однако такие явления не отмечались. Из приведенного анализа следует, что с помощью экзoeлектронной спектроскопии регистрировались дефекты типа вакансионных комплексов. Их концентрация (N_{V_x}), как отмечалось выше, должна немонотонно изменяться с ростом D . Величину N_{V_x} в экзoeмиссионно-активном слое оценивали с помощью нормированного эмиттированного заряда (S) ЭЭЭ [5]

$$N_{V_x} \sim S, \quad S = \frac{1}{J_0} \int_{293 \text{ K}}^{723 \text{ K}} J(T) dT,$$

где J_0 — ток ЭЭЭ при 293 К.

Зависимости S от D приведены на рис. 1 (кривые 2, 3). Изменение S с ростом D является немонотонным, так же как и в случае образования вакансионных комплексов в объеме кристалла (рис. 1, кривая 1). Причем в обоих случаях наибольшие значения S и N_{V_x} имеют место при $D \geq 3.15 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Однако при $j = \text{const}$ (рис. 1, кривая 2) имеется два максимума на зависимости S от D . Согласно [1-3], это свидетельствует о том, что происходит образование двух типов дефектов. Причем максимум S , соответствующий большим значениям D , и характеризует генерацию вакансионных комплексов с более высоким x . В [2, 3] это объясняется следующим. В каждый момент времени при облучении образуются новые дефекты, а ранее созданные коагулируют. Наряду с этим первичные высокоподвижные вакансии стекают к стокам, которые с ростом D могут насыщаться, что способствует удержанию вакансий в области их генерации и, следовательно, еще более эффективной коагуляции (росту x) ранее образовавшихся дефектов.

Подтверждением того, что имеет место генерация двух типов вакансионных комплексов, служит значительное возрастание начиная с $D \geq 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ величин T_{max} и E (рис. 3, 4). Увеличение T_{max} , а следовательно, температуры отжига комплексов и связанной с ней энергии активации E , согласно [6], указывает на то, что размер дефектного кластера возрастает. Начиная с $D \geq 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ наблюдаются снижение S (рис. 1, кривые 2, 3), а следовательно, и уменьшение концентрации вакансионных комплексов. Это при росте D может иметь место, если происходит значительная коагуляция дефектов. Причем данный процесс сопровождается снижением величины E (рис. 4).

Таким образом, можно полагать, что рост E происходит лишь до определенной величины x , после которой энергия активации снижается. Заметим, что вакансионными комплексами, образующимися при облучении кремния ионами средних масс при $D > 10^{14} \text{ см}^{-2}$, являются VV -центры [1]. Следовательно, они и были зарегистрированы с помощью ЭЭЭ при $D > 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

В [3] показано, что с уменьшением расстояния от стоков вакансий до области их генерации облучением увеличивается концентрация вакансионных комплексов. Поскольку эффективным стоком вакансий является поверхность кристалла, с уменьшением глубины проникновения облучающих его ионов концентрация VV -центров должна возрастать. Это проявится в смещении в область меньших D (рис. 1, точки А).

Для проверки этого предположения был проведен эксперимент. Механически полированные пластины монокристаллического кремния КДБ-10, торцевая поверхность которых была сориентирована по плоскости (111), облучали ионами фосфора, имеющими энергию 50 кэВ. Плотность их тока составляла $1.0_{-0.3}^{+0.3} \text{ мкА/см}^2$. При такой энергии ионов глубина их проникновения в кристалл была примерно равна 600 \AA [4]. ЭЭЭ регистрировали по описанной выше

методике. Зависимость S от D , приведенная на рис. 5 (кривая 1), отличается от аналогичной зависимости на рис. 1 (кривые 2, 3). Из сопоставления этих рисунков можно заключить, что при снижении энергии ионов фосфора до 50 кэВ характерная точка A не наблюдается. Это свидетельствует в пользу того, что в данном случае имеет место образование одного типа вакансионных комплексов. Кроме того, наблюдается только восходящая ветвь закономерности $S = f(D)$, расположенная вправо от точки A . Следовательно, в рассмотренном диапазоне D происходит накопление вакансионных комплексов без их коагуляции. Анализ экзоэмиссионных спектров показал, что максимумы ЭЭЭ наблюдались при 573 К, реакция отжига выявленных дефектов характеризовалась величиной $l=1$ и энергией активации $E=1.3$ эВ, не зависящими от D . Учитывая изложенные соображения и принимая во внимание тот факт, что энергия активации ЭЭЭ совпадает с энергией активации отжига A -центров, можно считать, что в данном случае экзоэлектронная эмиссия обусловлена диссоциацией A -центров и вакансионных комплексов. Однако, как отмечалось, при $D > 10^{14}$ см $^{-2}$ в кремнии образуются VV -центры. При таком флюенсе степень разупорядоченности кристаллической решетки не менее 30% [4], что обусловлено образованием в поверхностном слое большого количества точечных дефектов,

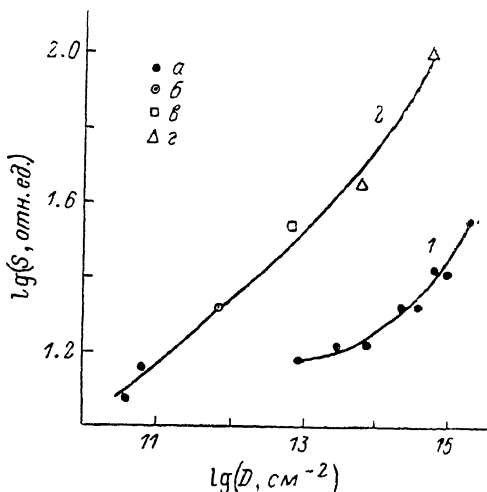


Рис. 5. Зависимость S от D при энергии ионов фосфора (1) и мышьяка (2) 50 кэВ. J , мкА/см 2 : a — 0.02, b — 0.05, v — 0.1, z — 3.5.

главным образом VV -центров [1, 6]. Поэтому можно полагать, что влияние A -центров при $D > 10^{14}$ см $^{-2}$ на ЭЭЭ существенно меньше, чем VV -центров. Кроме того, на кривой 1 (рис. 5) как при $D > 10^{14}$, так и при $D < 10^{14}$ см $^{-2}$ отсутствуют особенности, имеющие место на кривых 2, 3 (рис. 1), указывающие на то, что с изменением D происходит смена видов образующихся дефектов. Поэтому можно полагать, что при энергии ионов фосфора 50 кэВ во всем рассмотренном диапазоне D генерируются преимущественно VV -центры.

Представляло интерес рассмотреть влияние массы иона на кинетику накопления вакансионных комплексов. С этой целью образцы, аналогичные тем, что использовались в предыдущем эксперименте, но подвергнутые дополнительной химической полировке, бомбардировали ионами мышьяка, имеющими энергию 50 кэВ. Плотность тока ионов варьировали в пределах от 0.02 до 3.5 мкА/см 2 . Глубина проникновения мышьяка в кристалл составляла ~ 300 Å [4]. ЭЭЭ регистрировали по описанной выше методике, однако свет пропускали через светофильтр БС-12 (наибольшая энергия фотонов 4.95 эВ).

Зависимость S от D , представленная кривой 2 на рис. 5, аналогична кривой 1 этого же рисунка. Анализ кинетики ЭЭЭ показал, что реакция отжига дефектов имеет порядок $l=1$, а энергия активации $E=1.3 \div 1.5$ эВ и не зависит от D . Кроме того, на спектрах ЭЭЭ отсутствовали особенности (перегибы или пики) при температурах отжига ($T_{отж}$) радиационных дефектов, которые могут образовываться при облучении и содержать примесные атомы, имеющиеся в кремнии: A - и K -центры, комплексы вакансии—мышьяк ($T_{отж}=400$ К [6]) и вакансии—бор ($T_{отж}=300 \div 423$ К [6, 10]). Таким образом, можно полагать, что основными дефектами, образовавшимися при бомбардировке ионами мышьяка, являются вакансионные комплексы. Из сопоставления этих данных с приведенными выше следует, что в этом случае накопление вакансионных комплексов происходит по тем же закономерностям, что и в случае облучения ионами фосфора такой же энергии.

Список литературы

- [1] Физические процессы в облученных полупроводниках. Новосибирск, 1977. 256 с.
- [2] Баранов А. И. // Радиационные эффекты в полупроводниках. Новосибирск, 1979. С. 23-60.
- [3] Баранов А. И., Дагман Э. Е., Рахимова Г. Р. // Ст. деп. в ВИНТИ АН СССР. М., 1983 № 588-83.
- [4] Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников. М., 1973 296 с.
- [5] Сагалович Г. Л., Дехтяр Ю. Д. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1985. №5 С. 65—72.
- [6] Вопросы радиационной технологии полупроводников. Новосибирск, 1980. 296 с.
- [7] Корбет Дж., Бургуэн Ж. // Точечные дефекты в твердых телах. М., 1979. С. 9—162.
- [8] Двуреченский А. В., Кашников Б. П., Смирнов Л. С. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 9. С. 1937-1939.
- [9] Крюк В. И., Розенман Г. И., Першин В. К. // Техника и методика измерения экзопланетной и акустической эмиссии. Свердловск, 1973. С. 115—119.
- [10] Конозенко И. Д., Семенюк А. К., Хиврич В. И., Доброхотов Г. А. // ФТП. 1969. Т.3 В. 1. С. 155—156.

Рижский политехнический институт

Получена 17.07.1989
 Принята к печати 4.11.1989