

ГЕТТЕРИРОВАНИЕ В КРЕМНИИ В УСЛОВИЯХ ГЕНЕРАЦИИ ВАКАНСИЙ

Амальская Р. М., Баграев Н. Т., Клячкин Л. Е., Суханов В. Л.

Эффективность процесса трехступенчатого геттерирования проанализирована в зависимости от толщины окисла, выращенного как на рабочей, так и на нерабочей поверхностях кремниевой пластины.

Показано, что наиболее интенсивно геттерирование остаточных примесей происходит при наличии тонкого окисла (в условиях генерации неравновесных собственных междуузельных атомов) или толстого окисла (в условиях генерации неравновесных вакансий). Промежуточная область толщин окисла, характеризующаяся интенсивной аннигиляцией вакансий и собственных междуузельных атомов вблизи поверхности пластины, не позволяет реализовать условия эффективного геттерирования.

Трехступенчатое геттерирование остаточных примесей эффективно используется при изготовлении полупроводниковых приборов на основе монокристаллического кремния, полученного как методом Чохральского [1], так и бестигельной зонной плавкой [2-4]. Для монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского, стандартный трехступенчатый цикл геттерирования состоит из: 1) генерации собственных междуузельных атомов окисленной поверхностью и образования их кластеров в объеме кристалла; 2) преципитации кислорода вблизи кластеров собственных междуузельных атомов с последующим формированием микродефектов; 3) геттерирования остаточных примесей из области рабочей поверхности на образовавшиеся микродефекты [2-4]. Первая стадия стандартного цикла геттерирования основана на использовании окисла малой толщины на рабочей поверхности. В этом случае граница раздела Si—SiO₂ является источником собственных междуузельных атомов, преципитация которых в объеме кристалла стимулирует кластеризацию кислорода с последующим геттерированием остаточных примесей. Основным критерием оптимальной технологии геттерирования является отсутствие геттерирующих микродефектов вблизи рабочей поверхности. Поэтому важно иметь условия полной аннигиляции собственных междуузельных атомов и вакансий в этой области, что в основном достигается за счет введения хлора и варьирования состава атмосферы на первой стадии трехступенчатого цикла геттерирования. Это очень сложная, трудновыполнимая задача, невыполнение которой приводит к большой концентрации мелких геттерирующих микродефектов вблизи рабочей поверхности и соответствующему резкому ухудшению характеристик полупроводниковых приборов [3-6]. Кроме того, использование тонкого окисла, выращенного на рабочей поверхности, не позволяет в дальнейшем получать мелкие диффузионные профили фосфора и бора, поскольку эти примеси будут активно диффундировать в объем кристалла за счет интенсивного обменного (kick-out) механизма с собственными междуузельными атомами кремния [7].

Вышеперечисленные недостатки могут быть устранены при использовании в трехступенчатом цикле геттерирования окисла большой толщины, граница раздела которого с монокристаллическим кремнием является источником избыточного потока вакансий [7]. Поэтому вблизи рабочей поверхности происходит активная аннигиляция вакансий с собственными междуузельными атомами, благодаря чему в этой области не наблюдается мелких геттерирующих микродефектов даже при

неоптимальном составе хлорсодержащей атмосферы. Эффективность геттерирования, однако, при этом не снижается, так как равновесные собственные междоузельные атомы устремляются от рабочей поверхности в глубь кристалла, где за счет преципитации формируют геттерирующие микродефекты [7].

В настоящей работе представлены результаты исследований различных вариантов трехступенчатого геттерирования в зависимости от толщины окисла на поверхности пластин монокристаллического кремния, полученных методом Чохральского. Основное внимание уделялось проблеме увеличения времени жизни неравновесных носителей, а также его однородности по площади пластины.

Пластины монокристаллического кремния диаметром 60 мм *n*-типа проводимости (КЭФ-1, $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) ориентации (100) окислялись в сухом кислороде в присутствии паров CCl_4 при температуре 1150°C [8]. Толщина окисла варьировалась в зависимости от времени окисления. Трехступенчатое геттерирование проводилось в атмосфере аргона. На первой стадии температура поддерживалась на уровне 1150°C в течение 12 ч, далее пластины охлаждались со скоростью $0.5^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 850°C . Вторая стадия состояла из отжига при 850°C в течение 15 ч. На третьей стадии трехступенчатого цикла температура увеличивалась до 1000°C в течение 5 мин, после чего пластины отжигались 6 ч. Охлаждение после трехступенчатого цикла геттерирования проводилось по специальной программе с целью подавления формирования точечных дефектов вблизи геттерирующих микродефектов. Время жизни неравновесных носителей измерялось после трехступенчатого цикла геттерирования в зависимости от толщины окисла для трех групп образцов. Первая группа образцов подвергалась трехступенчатому геттерированию после полного стравливания окисла с одной из сторон пластины, вторая — при наличии окисла одинаковой толщины с обеих сторон, третья — после уменьшения толщины окисла на одной из сторон пластины.

Для измерения эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда использовался метод оптической модуляции ИК поглощения, сущность которого заключается в измерении величины дополнительного поглощения ИК излучения за счет носителей, генерированных в образце вследствие его оптического возбуждения. Измеряемая величина оптической модуляции $\Delta I/I$ интенсивности прошедшего через образец зондирующего ИК излучения определяется значением установившейся концентрации фотогенерированных носителей, зависящим от их времени жизни τ , коэффициента амбиполярной диффузии D и скорости поверхностной рекомбинации S , и позволяет определить эффективное время жизни носителей τ в соответствии с выражением

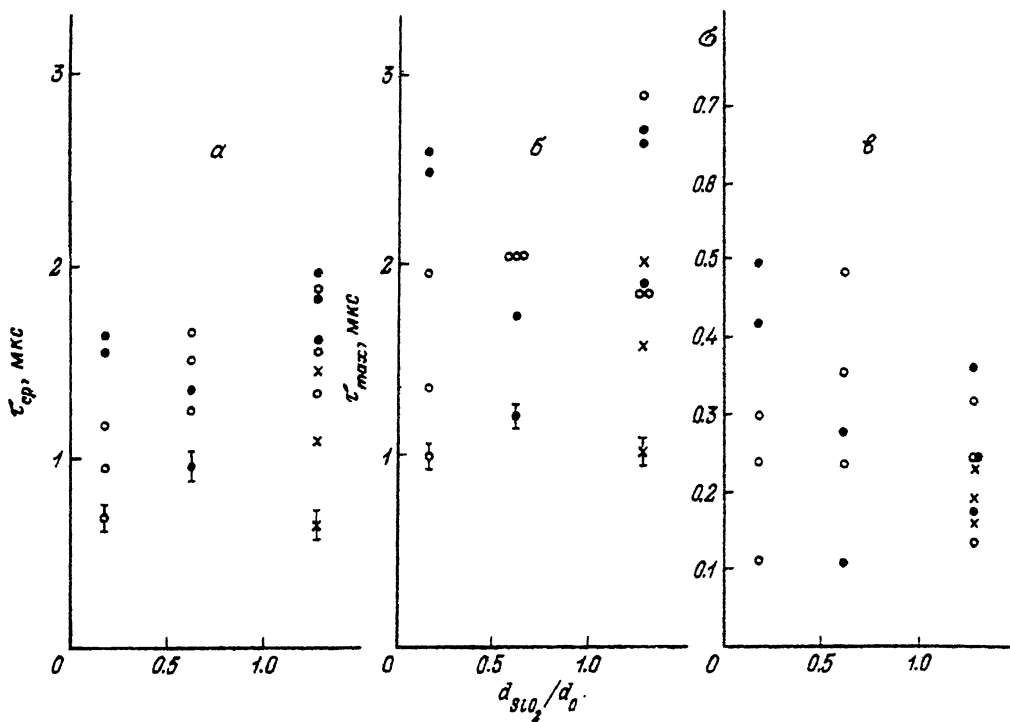
$$\tau = \frac{\Delta I}{I} \frac{1}{(1-R)\sigma\Phi\gamma}, \quad (1)$$

где R — коэффициент однократного отражения возбуждающего излучения, σ — сечение поглощения ИК излучения свободными носителями, Φ — интенсивность возбуждения, $\text{фот}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$, γ — квантовый выход.

В теоретической модели метода [9, 10] связь между эффективным временем жизни и электрофизическими характеристиками измеряемого образца τ_0 , s , L получена из решения одномерного стационарного уравнения непрерывности и имеет вид

$$\tau = \tau_0 \frac{1 + \frac{1}{\alpha L} \frac{s}{V}}{1 + \frac{s}{V}}, \quad (2)$$

где α — коэффициент поглощения возбуждающего излучения, $V = L/\tau_0$ — скорость диффузии.



Зависимость времени жизни τ неравновесных носителей (α — средние, β — максимальные) и его среднеквадратичного отклонения σ (ν) от толщины окисла на рабочей поверхности кремниевой пластины.

1 — окисел с обратной стороны пластины отсутствует (светлые кружки), 2 — толщина окисла с обратной стороны пластины такая же, как и с лицевой (темные кружки), 3 — толщина окисла с обратной стороны $0.17 d_0$ (d_0 — критическая толщина окисла, при которой происходит смена типа собственных дефектов, генерируемых окисленной поверхностью (крестики); при $d_{SiO_2} < d_0$ окисленная поверхность кремния генерирует избыточный поток междоузельных атомов, при $d_{SiO_2} > d_0$ — избыточный поток вакансий). Значение d_0 определяется совокупностью условий состояния поверхности (составом атмосферы, предварительной обработкой).

На рисунке представлены зависимости, характеризующие поведение времени жизни неравновесных носителей от толщины окисла, для трех групп образцов после трехступенчатого цикла геттерирования. Видно, что максимальная эффективность геттерирования была достигнута при наличии окисла на одной из сторон пластины. При этом максимальные значения времени жизни реализуются при тонком окисле ($d_{SiO_2} \ll d_0$, геттерирование в условиях генерации собственных междоузельных атомов), а также, в случае толстого окисла ($d_{SiO_2} \gg d_0$, геттерирование в условиях генерации вакансий) на рабочей поверхности пластины (см. рисунок, α , β). Полная аннигиляция собственных междоузельных атомов и вакансий вблизи рабочей поверхности ($d_{SiO_2} \sim d_0$) приводит к значительному снижению эффективности геттерирования (см. рисунок, α , β), поскольку в этих условиях не образуется неравновесных потоков собственных междоузельных атомов, ответственных за формирование геттерирующих микродефектов.

При наличии тонкого окисла с обеих сторон пластины эффективность геттерирования резко снижается (см. рисунок, α , β), поскольку в этих условиях отсутствует выделенное направление потока неравновесных междоузельных атомов кремния, вследствие чего геттерирующие микродефекты формируются однородно по всему объему кристалла. Увеличение толщины окисла, выращенного на обеих сторонах пластины, практически не снижает эффективность гет-

терирования по сравнению с результатами исследований пластин первой группы (окисел с одной стороны пластины). Кроме того, в этом случае усиливается процесс геттерирования при $d_{\text{SiO}_2} \sim d_0$, так как аннигиляция вблизи обеих сторон пластины стимулирует образование геттерирующих микродефектов в ее объеме.

Результаты исследований третьей группы образцов демонстрируют снижение времени жизни неравновесных носителей. Наблюдаемый эффект можно объяснить с позиций механизма геттерирования при наличии как тонкого, так и толстого окислов на рабочей поверхности. В первом случае толстый окисел с обратной стороны генерирует избыточный поток вакансий, препятствующий образованию геттерирующих микродефектов, а во втором — дополнительный поток междоузельных атомов из-за наличия тонкого окисла на обратной стороне стимулирует процессы аннигиляции, также снижающие эффективность геттерирования.

Существенно, что разброс времени жизни неравновесных носителей по площади пластины увеличивается с ростом эффективности геттерирования (см. рисунок, *в*), поскольку геттерирующие микродефекты имеют конечные размеры и неоднородно распределены вблизи нерабочей поверхности. В этих условиях в процессе геттерирования остаточных примесей с поверхности образуются каналы для их диффузии к нерабочей поверхности, распределение которых по площади пластины задает разброс времени жизни неравновесных носителей.

Таким образом, эффективность процесса трехступенчатого геттерирования проанализирована в зависимости от толщины окисла, выращенного как на рабочей, так и на нерабочей поверхностях кремниевой пластины. Показано, что наиболее интенсивно геттерирование остаточных примесей происходит при наличии тонкого окисла (в условиях генерации неравновесных собственных междоузельных атомов) или толстого окисла (в условиях генерации неравновесных вакансий). Промежуточная область толщин окисла, характеризующаяся интенсивной аннигиляцией вакансий и собственных междоузельных атомов вблизи поверхности пластины, не позволяет реализовать условия эффективного геттерирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Gordon B. J. // Sol. St. Techn. 1978. V. 21. N 7. P. 43—47.
- [2] Tice W. K., Tan T. Y. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. N 9. P. 564—565.
- [3] Nauka K., Lagowski J., Gatos H. C., Ueda O. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 2. P. 615—621.
- [4] Ueda O., Nauka K., Lagowski J., Gatos H. C. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 2. P. 622—628.
- [5] Nauka K., Lagowski J., Gatos H. C., Li C.-J. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 46. N 7. P. 673—675.
- [6] Баграев Н. Т., Клячкин Л. Е., Маляренко А. М., Половцев И. С., Суханов В. Л. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 9. С. 1557—1562.
- [7] Frank W., Gösele U., Mehrer H., Seeger A. // Diffusion in Crystalline Solids. N. Y., 1984. P. 63—142.
- [8] Singh B. R., Balk P. // J. Electrochem. Soc. 1978. V. 125. N 3. P. 453—461.
- [9] Polla D. L. // IEEE Electron. Dev. Lett. 1983. V. EDL-4. N 6. P. 185—188.
- [10] Mroszkowski J. A., Fanley J. F., Reine M. B., Lovecchio P., Polla D. L. // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38. N 4. P. 261—268.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Получена 12.11.1991
Принята к печати 26.11.1991