

О ВЛИЯНИИ ГЕРМАНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

Кучинский П. В., Ломако В. М., Рутковский И. З., Счастный В. В.,
Тарасевич А. Д., Шахлевич Л. Н.

Методом емкостной спектроскопии установлено, что легирование кремния германием в диапазоне $N_{\text{Ge}} \approx 10^{18} \div 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ не приводит к образованию электрически активных центров. Показано, что введение германия не влияет на энергетический спектр радиационных дефектов, их кинетику накопления, радиационное изменение времени жизни неосновных носителей заряда. На основании этого делается вывод, что на начальных потоках облучения (степень компенсации $K \leq 0.7$) атомы германия практически не влияют на процессы аннигиляции первичных радиационных дефектов в кремнии. Установлено также, что легирование кремния германием не влияет на процессы отжига и перестройки радиационных дефектов.

Показано, что изоэлектронные примеси (например, германий, олово) в кремнии в ряде случаев могут быть эффективными центрами захвата вакансий, генерируемых облучением при низких температурах ($< 100 \text{ K}$) [1, 2]. При этом образуются комплексы (Ge—V), (Sn—V), стабильные до ~ 200 и 500 K соответственно. Эти результаты положили начало интенсивному изучению влияния изоэлектронных примесей на термическую и радиационную стабильность кремния [3-7]. Так, в работах [4-7] на основании исследований спектров ЭПР и ИК поглощения обнаружено, что в образцах кремния (полученного как методом Чохральского, так и методом зонной плавки), содержащих германий ($\sim 10^{20} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$) и облученных при комнатной температуре большими потоками электронов, интенсивность полос, обусловленных A-центрами и дивакансиями, слабее, чем в контрольных образцах, не содержащих германий. Уменьшение эффективности образования указанных дефектов в кристаллах с германием по сравнению с контрольными образцами, по мнению авторов указанных работ, связано с тем, что германий является центром аннигиляции для первичных радиационных дефектов. В то же время в [4] отмечается, что при малых потоках облучения как в ЭПР исследованиях, так и в ИК спектроскопии не обнаружено влияния легирования германием на эффективность образования радиационных дефектов. Таким образом, интерпретация результатов о влиянии германия на процессы аннигиляции радиационных дефектов в широком диапазоне потоков облучения противоречива. К тому же до настоящего времени в литературе нет данных прямых измерений кинетики накопления электрически активных радиационных дефектов в кремнии, легированном германием. Следует отметить, что практический интерес в плане радиационной стабильности материала представляет именно изменение его электрофизических свойств при малых потоках облучения (при $K \leq 0.2$).

В данной работе изучены влияние легирования германием на кинетику накопления радиационных дефектов и изменение времени жизни неосновных носителей заряда в *n*-кремнии при облучении гамма-квантами ^{60}Co ($T_{\text{обл}} = 320 \text{ K}$).

Определение концентрации и параметров электрически активных дефектов проводилось методом емкостной спектроскопии. Время жизни неосновных носителей заряда определялось по переходным характеристикам при переключении *p-n*-перехода. Образцы представляли собой $p^+ - n$ -структуры, изготовлен-

ные эпитаксией p^+ -слоя на подложки n -кремния, выращенного по методу Чохральского, с концентрацией германия 10^{20} см^{-3} ($\rho=4.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и без него, а также на эпитаксиальные пленки n -кремния ($\rho=0.5\div 1.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), легированные германием в диапазоне концентраций $10^{18}\div 2\cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и нелегированные. Концентрация германия в образцах контролировалась методом обратного рассеяния.

В исходных (необлученных) образцах обнаружен электрически активный дефект с энергетическим уровнем в запрещенной зоне $E_c-0.25 \text{ эВ}$ ($\sigma_n=2.8 \times 10^{-16} \text{ см}^2$) и концентрацией $10^{12}\div 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Согласно [8], легирование кремния германием приводит к появлению центров с уровнем $E_c-0.27 \text{ эВ}$. Однако дефект $E_c-0.25 \text{ эВ}$ наблюдался нами в нелегированных (контрольных) и легированных германием эпитаксиальных пленках, а также в структурах на основе монокристаллического кремния. Этот факт, а также отсутствие корреляции между концентрацией указанного дефекта и уровнем легирования образцов германием свидетельствуют о том, что образование указанного комплекса не

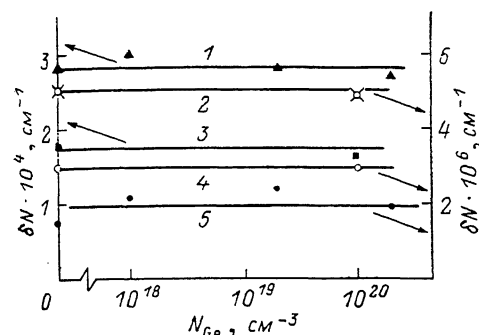


Рис. 1. Зависимость скорости введения центров от уровня легирования германием в кремнии, выращенном эпитаксией (1, 5) и по Чохральскому (2—4).

Энергии уровней, эВ: 1, 3 — $E_c-0.18$, 2, 5 — $E_c-0.43$, 4 — $E_c-0.23$.

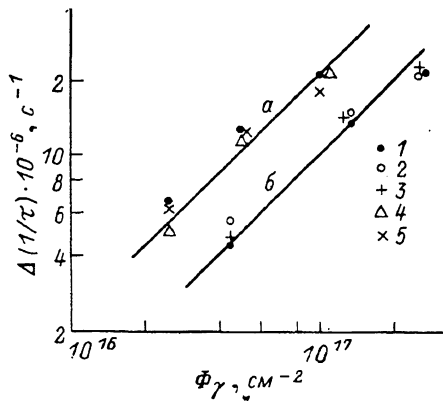


Рис. 2. Зависимость изменения времени жизни неосновных носителей заряда в эпитаксиальных пленках кремния от потока γ -квантов ^{60}Co .

ρ , Ом·см: а — 0.5, б — 1.5. $N_{\text{Ge}} \cdot 10^{-19}$, см^{-3} : 1 — 0, 2 — 0.1, 3 — 2, 4 — 20, 5 — 200.

может быть связано с введением германия. Установлено, что время жизни неосновных носителей заряда в исходных структурах практически не зависит от уровня легирования их германием в диапазоне $10^{18}\div 2\cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и равно времени жизни в не легированных германием образцах. При концентрации германия $\geq 10^{21} \text{ см}^{-3}$ наблюдается уменьшение времени жизни носителей, которое, по-видимому, обусловлено генерацией дислокаций, плотность которых достигает в таких материалах $\sim 10^6 \text{ см}^{-2}$. При концентрации германия $\leq 10^{20} \text{ см}^{-3}$ плотность дислокаций в исследованных образцах составляла $\leq 10^2 \text{ см}^{-2}$.

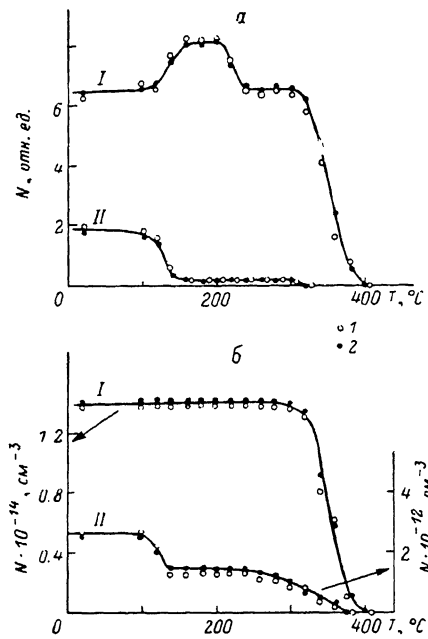
Таким образом, не обнаружено участие германия (в области его концентраций $10^{18}\div 2\cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) в образовании электрически активных центров в кремнии, полученном по Чохральскому и высокотемпературной эпитаксией.

Установлено, что спектр радиационных дефектов, вводимых в образцы с различным уровнем легирования германием и без него, одинаков и определяется центрами с энергетическими уровнями $E_c-0.18$, $E_c-0.23$ ($E_c-0.39$), $E_c-0.43$ и $E_v+0.34 \text{ эВ}$. С учетом того, что атомы германия могут быть эффективными центрами захвата первичных дефектов или их аннигиляции, ожидалось, что скорость введения наблюдаемых комплексов в образцах, легированных германием, будет ниже, чем в нелегированных. Однако, как видно из рис. 1, эффективность образования центров с уровнями $E_c-0.18$, $E_c-0.23$, $E_c-0.43 \text{ эВ}$ не зависит от концентрации германия в диапазоне $10^{18}\div 2\cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и равна эффективности их введения в контрольных образцах, причем такая закономерность, как видно из рис. 1, наблюдается независимо от метода получения исходного материала.

Эффективность радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда также не зависит от содержания германия в диапазоне $10^{18} \div 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2), что находится в полном соответствии с данными по эффективности введения дефектов.

Полученные результаты позволяют заключить, что на начальных потоках облучения ($K \leq 0.7$) атомы германия практически не влияют на процессы аннигиляции первичных радиационных дефектов в кремнии.

Как установлено ранее, в кремнии с уровнем легирования $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$, не содержащем германий, аннигилирует $\geq 95\%$ первичных радиационных дефектов [9]. При этом показано, что преобладающим является не прямой механизм аннигиляции [10, 11]. Таким образом, в кремнии, не легированном германием, имеются эффективные центры аннигиляции, природа которых на сегодняшний день окончательно не установлена (возможно, такими центрами являются атомы неконтролируемых примесей O, C и др. [11, 12]). Следовательно, на начальных потоках облучения в квазистационарном приближении концентрация вакансий приблизительно может быть определена как $N_V \approx \lambda (N_X \sigma_{XV} + N_{Ge} \sigma_{GeV})^{-1}$, где λ — скорость генерации первичных смещений, N_X , N_{Ge} — концентрации центров аннигиляции и германия соответственно, σ_{XV} , σ_{GeV} — вероятности захвата вакансий на центры аннигиляции и атомы германия соответственно (предполагается, что аннигиляция ограничивается захватом вакан-



сегодняшний день окончательно не установлена (возможно, такими центрами являются атомы неконтролируемых примесей O, C и др. [11, 12]). Следовательно, на начальных потоках облучения в квазистационарном приближении концентрация вакансий приблизительно может быть определена как $N_V \approx \lambda (N_X \sigma_{XV} + N_{Ge} \sigma_{GeV})^{-1}$, где λ — скорость генерации первичных смещений, N_X , N_{Ge} — концентрации центров аннигиляции и германия соответственно, σ_{XV} , σ_{GeV} — вероятности захвата вакансий на центры аннигиляции и атомы германия соответственно (предполагается, что аннигиляция ограничивается захватом вакан-

Рис. 3. Изменение концентраций дефектов в структурах на основе кремния, выращенного эпитаксией (а) и по Чохральскому (б), в процессе изохронного отжига.

I — $E_c - 0.18$ эВ; II — E-центр + дивакансия. $N_{Ge} \cdot 10^{-19}, \text{ см}^{-3}$: а) 1 — 0, 2 — 2; б) 1 — 0, 2 — 10.

сий). Поскольку нет различия в эффективности введения дефектов в образцах, легированных и не легированных германием, можно заключить, что $N_{Ge} \sigma_{GeV} \ll \ll N_X \sigma_{XV}$. Последнее позволяет оценить отношение вероятностей захвата вакансий атомами германия и кислорода составляет $\sigma_{GeV} / \sigma_{OV} = 10^{-2}$ [5]. Таким образом, можно предположить, что при переходе от малых потоков к большим потокам облучения изменяется соотношение вероятностей захвата первичных дефектов на примесные атомы. Такое изменение может быть обусловлено следующей причиной. По мере возрастания степени компенсации материала происходит изменение зарядовых состояний первичных радиационных дефектов, которое оказывает существенное влияние на вероятность их взаимодействия с примесными центрами [13]. При больших потоках облучения может произойти насыщение стоков. Для установления конкретного механизма влияния степени компенсации материала на поведение германия в процессах радиационного дефектообразования необходимы дальнейшие исследования.

При больших потоках облучения, как следует из [4], легирование германием может оказывать влияние на эффективность образования радиационных дефектов. При этом оценки показывают, что отношение вероятностей захвата вакансии атомами германия и кислорода составляет $\sigma_{GeV} / \sigma_{OV} = 10^{-2}$ [5]. Таким образом, можно предположить, что при переходе от малых потоков к большим потокам облучения изменяется соотношение вероятностей захвата первичных дефектов на примесные атомы. Такое изменение может быть обусловлено следующей причиной. По мере возрастания степени компенсации материала происходит изменение зарядовых состояний первичных радиационных дефектов, которое оказывает существенное влияние на вероятность их взаимодействия с примесными центрами [13]. При больших потоках облучения может произойти насыщение стоков. Для установления конкретного механизма влияния степени компенсации материала на поведение германия в процессах радиационного дефектообразования необходимы дальнейшие исследования.

В работе проведено исследование влияния германия на процессы отжига и перестройки радиационных дефектов в базовой области p-n-структур. Как видно из рис. 3, характер отжига основных радиационных дефектов как в образцах на основе эпитаксиального кремния, так и в образцах кремния, по-

лученного по Чохральскому, не зависит от наличия германия. Процессы отжига дефектов, как видно из рисунка, определяются методом получения исходного кристалла, а следовательно, концентрацией остаточных примесей.

Таким образом, легирование кремния германием не оказывает влияния на процессы аннигиляции первичных радиационных дефектов, а следовательно, на изменение его электрофизических свойств при облучении по крайней мере до степени компенсации $K \leq 0.7$.

Л и т е р а т у р а

- [1] Watkins G. D. — Latt. Def. Semicond., Conf. Ser. 23. London—Bristol, 1975, p. 1—22.
- [2] Watkins G. D. — Phys. Rev. B, 1975, v. 12, N 10, p. 4383—4390.
- [3] Бабицкий Ю. М., Горбачева Н. И., Гринштейн П. М., Ильин М. А., Мильвидский М. Г., Туровский Б. М. — ФТП, 1984, т. 18, в. 7, с. 1309—1311.
- [4] Бугай А. А., Максименко В. М., Туровский Б. М., Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К., Горбачева Н. И. — ФТП, 1984, т. 18, в. 11, с. 2020—2023.
- [5] Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шпинар Л. И., Ясковец И. И. — В кн.: Моделирование на ЭВМ структурно-чувствительных свойств кристаллических материалов. Л., 1986, с. 29—30.
- [6] Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К., Шпинар Л. И., Ясковец И. И. — ФТП, 1987, т. 21, в. 3, с. 562—565.
- [7] Атабаев Н. Г., Саидов Н. С., Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К., Шпинар Л. И., Юсупов А. — ФТП, 1987, т. 21, в. 3, с. 570—573.
- [8] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977. 562 с.
- [9] Gubskaya V. I., Kuchinskii P. V., Lomako V. M. — Rad. Eff., 1981, v. 55, N 1-2, p. 35—38.
- [10] Kuchinskii P. V., Lomako V. M. — Phys. St. Sol., 1987, v. 102, N 1, p. 653—658.
- [11] Холодарь Г. А., Данковский Ю. В., Конопляный В. В., Винецкий В. Л. — ФТП, 1976, т. 10, в. 9, с. 1712—1718.
- [12] Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1977. 255 с.
- [13] Gubskaya V. I., Kuchinskii P. V., Lomako V. M. — Phys. St. Sol. (a), 1984, v. 85, N 2, p. 585—590.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко при БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получена 15.07.1987
Принята к печати 25.08.1987