

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 50 Мэв

Г. Н. ЕРИЦЯН, Р. А. МЕЛКОНЯН, А. А. СААКЯН, Н. Е. ГРИГОРЯН,
Э. О. АЯЗЯН

Приводятся результаты исследований радиационных дефектов в монокристаллах кремния и германия после облучения электронами с энергией 45÷50 Мэв. Были измерены температурные зависимости концентраций носителей и времени жизни неосновных носителей до и после облучения. По отжигу образованных радиационных нарушений определялись их температурные устойчивости. Показано, что в результате облучения высокоэнергетичными электронами, как и при нейтронном облучении, образуются дефекты типа скоплений простых дефектов.

В в е д е н и е

Под действием облучения быстрыми частицами в твердых телах происходят процессы, приводящие к существенному изменению их физических свойств. Как известно, основным результатом в этом процессе является смещение атомов из узлов решетки в междоузлие.

Созданные таким образом простые дефекты (дефекты Френкеля) не стабильны и мигрируют в решетке уже при температуре 20°К, затем вакансии или междоузельный атом соединяется с химической примесью или с другим несовершенством и образует стабильное соединение типа примесь + точечный дефект. Такая ассоциация стабильна вплоть до температур 200°С, и именно эти вторичные сложные дефекты определяют физические свойства кристалла: им соответствуют энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника, распределение спектров фотопроводимости и инфракрасного поглощения, изменение времени жизни неосновных носителей тока.

Согласно проявляемым свойствам выбирается методика исследований радиационных дефектов в твердых телах. Наряду с классическими методами измерений эффекта Холла, электропроводности, фотопроводимости, времени жизни неосновных носителей в настоящее время применяются исследования спектров инфракрасного (ИК) поглощения, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), рекомбинационного излучения и т. д., которые не только взаимно подтверждают результаты других методик, но и дают новую информацию о природе радиационных дефектов в твердых телах.

1. Предпосылки образования радиационных дефектов в кремнии и германии

Радиационные дефекты более или менее полно изучены в германии и кремнии, что связано с возможностью получения достаточно совершенных и чистых исходных монокристаллов этих веществ. Бла-

годаря успешному использованию методики ЭПР удалось достоверно установить природу так называемых А- и Е-центров в кремнии *n*-типа, представляющих собой соединение вакансии в первом случае с атомом кислорода, во втором — с атомом донорной примеси [1]. Были идентифицированы также дивакансии [2, 3] и более сложные скопления вакансий — кластеры [4]. Госсик теоретически рассчитал размеры кластеров, изменение подвижности носителей в этих областях разупорядочения после нейтронного облучения [5].

При облучении нейтронами вероятность образования кластеров велика; нейтрон при столкновении с атомом передает ему большую часть своей энергии согласно формуле

$$T_m = \frac{4 M_1 \cdot M_2}{(M_1 + M_2)^2} E, \quad (1)$$

где M_1 , M_2 — соответственно масса нейтрона и облучаемого атома, E — энергия нейтрона. Когда эта энергия превосходит энергию смещения атома из узла в междоузлие — $U_{см}$, то образуется простой дефект. Первично смещенный атом способен сам образовать вторичные, третичные и т. д. смещения соседних атомов, если $T_m \gg U_{см}$.

В результате таких каскадных процессов образуются области разупорядочения (кластеры), могут происходить в кристалле локальные перегревы, клинья смещений и т. д. Облучение протонами приводит к несколько иному, но тоже сложному спектру нарушений. Нейтрон отдает почти всю свою энергию при прямом столкновении с атомом. При бомбардировке же протонами основным механизмом создания дефектов является резерфордовское рассеяние, если энергия протонов не слишком велика. Действие рентгеновских и γ -лучей, а также быстрых электронов сводится к образованию в кристаллах, в основном, простых дефектов.

В этом случае переданная атому энергия есть

$$T_m = \frac{2(E + 2mc^2)}{mc^2} E, \quad (2)$$

где E — энергия электрона, c — скорость света, m — масса электрона.

Формулы (1) и (2) получаются из законов сохранения энергии и импульса до и после облучения; в (2) имелись в виду также релятивистские эффекты. Если пара вакансии — междоузлие пространственно не слишком разделена, существенно сказывается взаимодействие между единичными дефектами.

Поскольку расстояние между вакансией и междоузельным атомом бывает весьма различным в зависимости от энергии падающих частиц и ее распределения, то энергетический спектр радиационных дефектов представляет собой некоторую полосу в запрещенной зоне полупроводника.

2. Постановка задачи и методика исследований

Интерес к облучению полупроводника быстрыми тяжелыми частицами связан с тем, что в этом случае особенно сильно меняются электрические свойства полупроводника. Однако для исследовательских целей проще использовать рентгеновские и γ -лучи, а также быстрые электроны.

В настоящей работе представляются результаты исследований радиационных дефектов в монокристаллах кремния и германия при облучении электронами с энергией 45—50 Мэв и проводится их сравнение с радиационными дефектами, образованными в тех же монокристаллах при облучении γ -квантами и нейтронами.

Исходные монокристаллы были выращены методом Чохральского и имели следующие параметры: кремний n -типа — удельное сопротивление — 100 ом см, время жизни неосновных носителей — 45 мксек, плотность дислокаций — 10^3 см⁻²; германий n -типа — удельное сопротивление — 8 ом см, время жизни неосновных носителей — 23 мксек, плотность дислокаций — 10 см⁻². Образцы монокристаллов для измерений эффекта Холла имели крестообразную форму, толщину 1 мм, зондовое расстояние 2 мм, ширину 3 мм и общую длину 10 мм, а для измерений времени жизни неосновных носителей — форму параллелепипеда с размерами $10 \times 3 \times 1$ мм³. Для инфракрасного поглощения использовались образцы различной толщины 1—5 мм с площадью поверхности 4×14 мм².

Измерения удельного сопротивления эффекта Холла проводились по стандартной методике на постоянном токе на установке ЖК 78.07, переделанной для измерения более высокоомных и сразу двух образцов. Инфракрасное поглощение измерялось на спектрофотометре ИКС-14А с применением специального криостата при низких температурах. Во всех случаях регулирование температуры осуществлялось изменением скорости паров азота.

Для измерений времени жизни неосновных носителей применялась методика, использующая технику СВЧ. Непрерывные электромагнитные колебания сверхвысокой частоты (10^{10} гц) поступают из генератора через согласователь в суженный волновод, на выходе которого регистрируются детектором. Суженный волновод изготовлен так, что концентрируется электрическая составляющая электромагнитного поля, которая обуславливает поглощение мощности СВЧ в проводящей среде. В центре суженного волновода помещается измеряемый образец. Инжектирующие импульсы поступают от генератора n -образных импульсов. Инжектированные неосновные носители рекомбинируют по некоторому закону, зависящему, в частности, от энергетической структуры образца.

По этому же закону изменяется СВЧ мощность, поступающая на детектор. Выделенный детектором сигнал поступает на импульсный усилитель и осциллограф, где визуально определяется постоянная ре-

лаксации τ . В том случае, когда рекомбинация идет по экспоненциальному закону, эта постоянная равна времени жизни неосновных носителей. Для определения энергетического положения уровня рекомбинации из измеренных температурных зависимостей τ берется наклон $\ln \tau$ от $1/T$, учитывая, конечно, аддитивность скоростей рекомбинации неосновных носителей тока через различные центры рекомбинации:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}.$$

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Полученные нами результаты приведены на рис. 1—4. По температурным зависимостям концентраций носителей определены энергетические положения радиационных дефектов в запрещенной зоне кремния и германия (рис. 1 и 2).

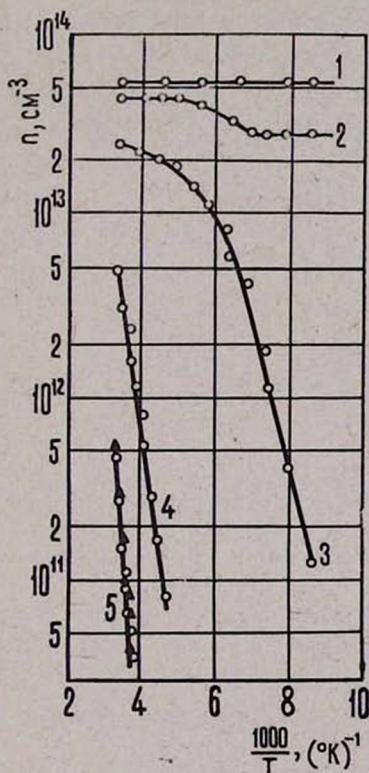


Рис. 1.

Рис. 1. Температурная зависимость концентрации основных носителей в кремнии до облучения (1) и после облучения электронами с энергией 50 Мэв дозами: 10^{14} эл/см² (2), $2 \cdot 10^{14}$ эл/см² (3), $4 \cdot 10^{14}$ эл/см² (4), $6 \cdot 10^{14}$ эл/см² (5), 10^{15} эл/см² (6).

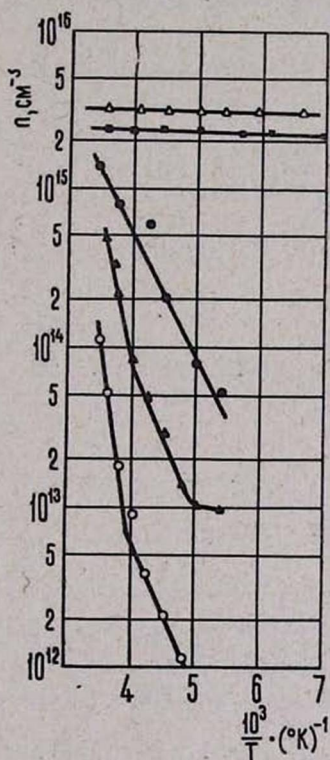


Рис. 2.

Рис. 2. Температурная зависимость концентрации основных носителей в германии до облучения (1) и после облучения электронами с энергией 50 Мэв дозами: 10^{14} эл/см² (2), $2 \cdot 10^{14}$ эл/см² (3), $4 \cdot 10^{14}$ эл/см² (4), 10^{15} эл/см² (5).

В кремнии получены энергетические уровни: $E_c - 0,16$ эв, $E_c - 0,29$ эв, первый из которых представляет А-центр, а второй — кластерное образование. По нашему предположению, в результате облучения электронами с энергией 50 Мэв в кремнии образуются два типа дефектов, однако в начале облучения при малых дозах преобладают точечные дефекты, а затем возрастает концентрация кластеров. Об этом свидетельствует уменьшение подвижности носителей тока при больших дозах, а также увеличение интенсивности линии поглощения в области 12 мкм с увеличением дозы облучения. Для детального изучения этого явления были проведены дополнительные исследования отжига облученных монокристаллов и диодов, изготовленных из исходных кремниевых кристаллов *n*-типа с различными удельными сопротивлениями от 20 до 100 ом см.

Эксперименты показали, что на прямой ветви изменения вольт-амперной характеристики наблюдается промежуточная область насыщения. Это особенно заметно на графике зависимости относительного изменения прямого напряжения от дозы облучения (рис. 3). При малых дозах увеличение этой зависимости происходит благодаря увеличению концентрации А-центров, пока концентрация кластеров не

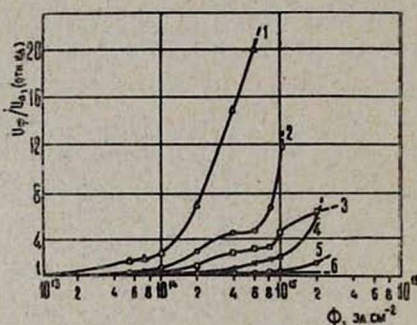


Рис. 3.

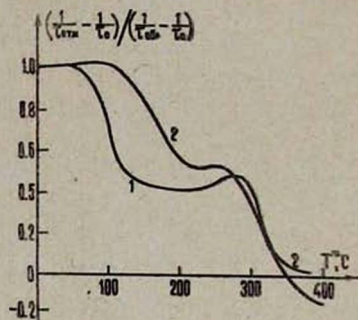


Рис. 4.

Рис. 3. Зависимость относительного изменения прямого напряжения кремниевых диодов от дозы облучения электронами с энергией 50 Мэв с различными удельными сопротивлениями базового материала: 1) 35 ом см, 2) 15 ом см, 3) 10 ом см, 4) 5 ом см, 5) 2 ом см, 6) 0,4 ом см.

Рис. 4. Зависимость неотожженной части обратной величины времени жизни неосновных носителей тока от температуры отжига в кремнии после облучения электронами с энергией 50 Мэв (1) и быстрыми нейтронами (2).

преобладает (область насыщения), далее решающую роль играют кластеры (более резкое увеличение зависимости $\frac{U_F}{U_0}$ от Φ). Полученная нами область насыщения коррелирует с концентрацией носителей в исходном материале, т. е. с ее увеличением область насыщения сдвигается в сторону больших доз. Это согласуется с ранее известными данными о том, что для компенсации проводимости кремния с высокой концентрацией носителей необходима большая доза облучения.

Был проведен отжиг полученных дефектов (рис. 4). Поскольку изменение концентраций радиационных дефектов чувствительно к изменениям τ , то мы проследили за поведением τ в результате отжига. Сравнение с данными других авторов [6] показывает, что полученные после облучения электронами с энергией 50 Мэв дефекты в кремнии имеют одинаковую природу с дефектами, полученными после облучения быстрыми нейтронами. Почти идентичный ход течения отжига в обоих случаях свидетельствует, что по аналогии с нейтронным облучением в данном случае мы имеем дефект кластерного типа.

Сложная картина дефектообразования наблюдается после облучения монокристаллов германия. В результате облучения были получены следующие энергетические уровни: $E_c - 0,16$ эв, $E_c - 0,09$ эв, $E_c - 0,4$ эв. Идентификация этих уровней [только по температурной зависимости концентраций носителей представляет трудную задачу, поскольку в результате облучения в германии образуются островки p - и n -типов, которые искажают результаты. Во избежание этого нами проводились дополнительные измерения зависимостей концентраций носителей от магнитного поля при различных удельных сопротивлениях образцов для определения холловских подвижностей в n - и p -типах проводимости. В случае германия идентификация и однозначная интерпретация природы дефектов затруднительна и предстоит дальнейшее более детальное изучение явления с привлечением других методик, особенно ЭПР.

Поступила 21.III.1972

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. G. D. Watkins, J. W. Corbett, Phys. Rev., 121, 1015 (1961).
2. G. D. Watkins, J. W. Corbett, Phys. Rev., 138, A543 (1965).
3. G. D. Watkins, J. W. Corbett, 138, A555 (1965).
4. С. Х. Кушнир, А. Г. Николаева, ФТТ, 8, 982 (1966).
5. B. Gossik, J. Appl. Phys., 20, 8, 1215 (1959).
6. В. И. Хисрич, ФТП (в печати).

ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ԵՎ ԳԵՐՄԱՆԻՈՒՄԻ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ 50 ՄԷՎ
ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐՈՎ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՏԱԿ ԱՌԱՋԱՑՈՂ
ՌԱԴԻԱՑԻՈՆ ԴԵՖԵԿՏՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՄԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Հ. Ն. ԵՐԻՑՅԱՆ, Ռ. Ա. ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ, Ա. Ա. ՍԱՀԱԿՅԱՆ ԵՎ Ն. Ե. ԿՐԻՊՈՐՅԱՆ

Հոդվածում բերվում են սիլիցիումի և գերմանիումի միաբյուրեղներում ռադիացիոն դեֆեկտների ուսումնասիրության արդյունքները 45—50 ՄԷՎ էլեկտրոններով ճառագայթելուց հետո: Չափվել են հիմնական հոսանքակիրների կոնցենտրացիայի և ոչ հիմնական հոսանքակիրների կյանքի տևողության ջերմաստիճանային կախումները: Զերմամշակման միջոցով որոշվել են ճառագայթման հետևանքով առաջացած ռադիացիոն դեֆեկտների ջերմային կայունությունները:

Ցույց է տրված, որ արագ էլեկտրոններով ճառագայթման հետևանքով առաջացած բյուրեղի խանգարումները կրում են պարզագույն դեֆեկտների միացության բնույթ, որը նման է նեյտրոններով ճառագայթման դեպքին:

STUDY OF RADIATION DEFECTS IN SILICON AND GERMANIUM SINGLE-CRYSTALS AFTER IRRADIATION BY 45—50 MeV ELECTRONS

G. N. YERITSYAN, R. A. MELKONIAN, A. A. SAHAKIAN, N. E. GRIGORIAN
E. O. AYAZIAN

Radiation defects induced in germanium and silicon single-crystals was studied after bombardment with 45—50 MeV electrons. The temperature dependence of concentration of carriers and minority carrier lifetime measurements were used before and after irradiation.

The thermal stability of produced radiation damage has been determined by its behaviour of annealing.

The crystal damage caused by electron irradiation is shown to be of cluster type as in the case of neutron irradiation.