

Модель образования термостабильных дефектных центров при облучении арсенида галлия нейтронами

© В.Г. Косушкин, А.К. Горбунов

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, 248600, Россия

Предложена модель трансформации дефектов в термостабильные дефектные центры, обладающие донорными свойствами в арсениде галлия, облученном нейтронами. Природа этих центров определяется взаимодействием искусственных радиационных дефектов с примесями и равновесными дефектами кристалла. Показано, что облучение нейтронами при температуре выше комнатной можно использовать не только для изучения природы и закономерностей дефектообразования, но и как способ направленного изменения свойств кристаллов.

Ключевые слова: *арсенид галлия, облучение тепловыми нейтронами, быстрый термический отжиг.*

Уровень развития мировой электронной техники выдвигает все более жесткие требования к качеству полупроводниковых монокристаллов. По мере уменьшения топологических размеров элементов электронных схем все большую роль играют точечные дефекты полупроводниковых материалов, управление поведением которых особенно актуально при переходе к нанометровым размерам элементов электронных схем.

В производстве и использовании полупроводниковых материалов лидирующее место, по-прежнему, занимает кремний, мировое потребление которого составляет порядка 15 тыс. т в год (диаметр монокристаллов 100 — 300 мм, в перспективе до 400 мм), на втором месте — арсенид галлия, мировое потребление которого составляет около ста тонн в год (диаметр 100...150 мм, в перспективе — до 250 мм). Одним из способов повышения однородности и радиационной стойкости монокристаллов является использование ионизирующих излучений, создающих искусственные радиационные дефекты, которые отличаются высокой подвижностью и относительно легко удаляются из объема слитков термическим отжигом. Искусственно введенные радиационные дефекты взаимодействуют с равновесными дефектами, возникшими в процессах выращивания монокристаллов, и эти комплексные дефекты также могут быть удалены термическим отжигом, что позволяет существенно сократить общее количество дефектов в материале.

Эффективной для этой цели оказалась технология облучения монокристаллов тепловыми нейтронами ядерного реактора, разработанная с целью реализации идеи трансмутационного легирования полупровод-

никовых материалов. В результате радиационного воздействия образуется большое количество радиационных дефектов в материале, которые формируются под воздействием быстрых нейтронов, атомов отдачи и γ -составляющей реакторного излучения. Возникающие радиационные дефекты обычно удаляют высокотемпературной обработкой материалов. Радиационно-физические процессы, включая механизм образования и отжига радиационных дефектов в материале, в процессе ядерного легирования описаны в [1–10].

Известно, что любой материал неизбежно содержит некоторое количество «технологических» примесей, которые могут компенсировать влияние целевых легирующих примесей, например, изменять однородность электрофизических характеристик материала. Для учета этого используют так называемый фактор легирования (f) — отношение концентрации целевой вводимой примеси к концентрации электрически активной примеси в исходном материале, который в случае ядерного легирования, как определено экспериментально, должен быть больше двух.

Основной задачей настоящей работы было исследование влияния параметров быстрого отжига на точечную структуру кристаллов арсенида галлия, подвергнутых облучению тепловыми нейтронами ядерного реактора. Ранее установлено, что в большинстве случаев облучение реакторными нейтронами приводило к увеличению удельного сопротивления широкозонных материалов (кремния, арсенида галлия, фосфида индия, фосфида галлия), к уменьшению сопротивления, а иногда и конверсии типа проводимости в узкозонных (антимониде и арсениде индия), к снижению подвижности носителей заряда, изменению оптических свойств полупроводников за счет образовавшихся при облучении радиационных дефектов. Непосредственно после облучения плотность образовавшихся радиационных дефектов намного превышала концентрацию вводимой при облучении химической примеси, и свойства облученного материала перед отжигом определялись, в основном, свойствами введенных при облучении дефектов. Поэтому сокращение числа радиационных дефектов является одной из важнейших технологических операций.

Целью работы было установление закономерностей поведения точечных дефектов при быстром градиентном отжиге полупроводниковых пластин, облученных полным спектром нейтронов реактора.

Быстрый термический отжиг. Метод быстрого термического отжига с помощью галогенных ламп [6] в последнее время широко применяется в различных технологических операциях: при изготовлении контактов к полупроводникам, отжиге имплантированных слоев, отжиге тонкопленочных материалов и др. Авторами [6–8] установлена возможность повышения однородности полупроводниковых материалов путем импульсного отжига пластин после облучения. Достоинством быстрого

термического отжига является сокращение длительности цикла отжига по сравнению с обычным отжигом в резистивной печи. При проведении исследований быстрый термический отжиг был использован для отжига радиационных дефектов в пластинах полуизолирующего арсенида галлия, облученного полным спектром реакторных нейтронов.

Исследовали зависимость подвижности электронов от температуры отжига T_a и времени выдержки при определенной температуре. Эти параметры позволяют определить оптимальный режим термической обработки материала после облучения и условия быстрого термического отжига, приводящие к повышению однородности удельного сопротивления и подвижности электронов. В качестве исходного материала для облучения нейтронами использовали легированные хромом и кислородом монокристаллы арсенида галлия промышленной марки АГП-81 диаметром 76 мм, выращенные методом Чохральского. По исходным электрофизическим данным (удельному сопротивлению и подвижности) образцы были разделены на две группы. I группа: удельное сопротивление ρ — от $2 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^8$ Ом·см, подвижность носителей заряда μ — от 3000 до 3500 см²/В·с; II группа: ρ — от $7 \cdot 10^7$ до $1 \cdot 10^8$ Ом·см, μ — от 3500 до 3800 см²/В·с. Образцы для проведения экспериментов получали из монокристаллов резкой на пластины толщиной 1 мм. Облучение образцов I группы потоком тепловых нейтронов $\Phi_T = 9,4 \cdot 10^{15}$ см⁻³ (плотность потока $\phi_T = 10^{12}$ см⁻²с⁻¹) проводили в вертикальных каналах исследовательского ядерного реактора при температуре ниже 60 °С и соотношении интенсивностей потоков тепловых и быстрых (с энергией E более 0,1 МэВ) нейтронов $\phi_T/\phi_6 = 1$. Облучение образцов II группы потоком тепловых нейтронов $\Phi_T = 6 \cdot 10^{15}$ см⁻² проводили в аналогичных условиях. Электрофизические параметры определяли при комнатной температуре методом ван-дер-Пау.

После облучения из пластин арсенида галлия вырезали образцы размерами 10×10 мм. Кратковременный отжиг образцов проводили в атмосфере азота в цилиндрической кварцевой кювете импульсами излучения галогенных ламп мощностью 1500 Вт, расположенных по обе стороны образца, при температуре от 600 до 1000 °С. Общая длительность импульсов составляла 30...60 с, время выдержки при максимальной температуре — от 30 до 40 с. Время выхода на максимальную температуру и снижения до 300 °С после отключения ламп составляло от 10 до 15 с. Электрофизические параметры материала измеряли после отжига. Установлено, что при всех температурах отжига образцы полуизолирующего арсенида галлия сохраняли высокое удельное сопротивление. После облучения нейтронами наблюдался сильный разброс значений подвижности носителей заряда от образца к образцу. Среднее значение подвижности (μ) было меньше, чем до облучения. Зависимость подвижности электронов от температуры отжига $\mu(T_a)$ при 30 с

для образцов I группы и от длительности выдержки $\mu(t)$ при $T_a = 810^\circ\text{C}$ для образцов II группы представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Полученные результаты позволяют предположить, что при температурах ниже 830°C происходил отжиг радиационных дефектов и электрическая активация доноров (германия и селена), сопровождаемые возрастанием концентрации и подвижности электронов. Снижение подвижности носителей заряда при температуре выше 900°C можно объяснить переходом германия, который получался при трансмутационном переходе захвата галлием нейтрона в подрешетку мышьяка, что влекло за собой увеличение степени компенсации.

Для контроля партии образцов из первой и второй групп были подвергнуты обычному отжигу в печи при 870°C в течение 20 мин. Из измерений после длительного термического отжига были получены следующие значения электрофизических параметров: I группа — удельное сопротивление $\rho = 2 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, подвижность носителей заряда m — $2800 \dots 3500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; II группа — удельное сопротивление $\rho = 1 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, μ — $3000 \dots 3300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Оптимальные режимы отжига для данной марки полуизолирующего арсенида галлия, облученного нейтронами, и полученные при этом значения параметров таковы (рис. 1): I группа — $T_a = 850^\circ\text{C}$, $t = 30 \text{ с}$, $\rho = 2 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, μ — $4000 \dots 4200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; II группа — $T_a = 810^\circ\text{C}$, $t = 30 \text{ с}$, $\rho = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, μ — $4900 \dots 5000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Достигнутые значения подвижности электронов после отжига превышали значения подвижности носителей заряда μ (при том же удельном сопротивлении ρ) после длительного отжига, что, возможно, связано с уменьшением концентрации глубоких центров ($EL3$, $EL6$) при термообработке в исследованных интервалах температур. Допустимые отклонения

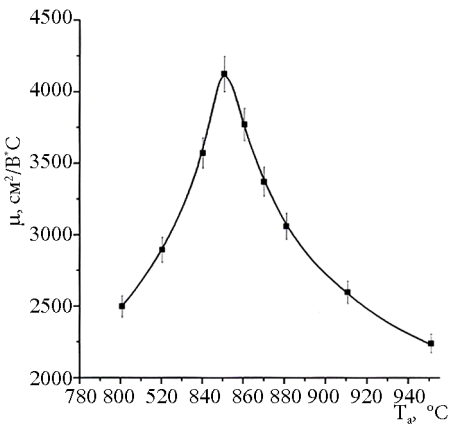


Рис. 1. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры импульсного отжига образцов

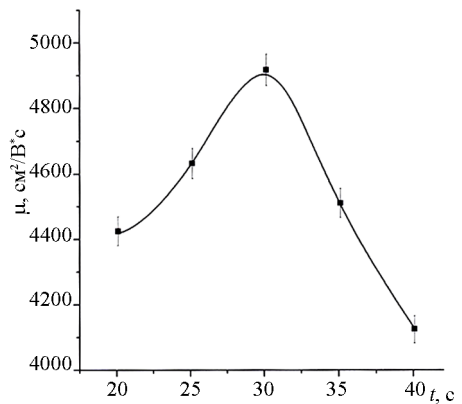


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей заряда от времени импульсного отжига образцов

оптимальных величин температуры и времени выдержки сравнительно малы ($\Delta T_a = \pm 10$ °С, $\Delta t = \pm 5$ с). Это значит, что оптимальные режимы при быстром термическом отжиге полуизолирующего арсенида галлия более чувствительны к параметрам исходного материала и дозе облучения, чем при длительном отжиге. Результаты свидетельствуют о том, что при низких уровнях облучения арсенида галлия быстрый термический отжиг приводит к повышению его электрофизических параметров.

Выводы. Определено, что при температуре отжига арсенида галлия более 900 °С происходит трансформация дефектов в термостабильные дефектные центры, обладающие донорными свойствами. Природа этих центров определяется, по-видимому, взаимодействием искусственных радиационных дефектов с примесями и равновесными дефектами кристалла. Показано, что облучение нейтронами при температуре выше комнатной можно использовать не только для изучения природы и закономерностей дефектообразования, но и как способ направленного изменения свойств кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Болтакс Б.И., ред. *Точечные дефекты в твердых телах. Новости физики твердого тела*. Москва, Мир, 1979, вып. 9, 379 с.
- [2] Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М. *Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия*. Минск, Изд-во «Университетское», 1992, 218 с.
- [3] Глориозова Р.М., Колесник Л.И., Колин Н.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в арсениде индия. *ФТП*, 1988, т. 22, вып. 3, с. 507–509.
- [4] Колин Н.Г., Куликова Л.В., Освенский В.Б. Дефекты в полупроводниковом арсениде галлия. *ФТП*, 1988, т. 26, вып. 6, с. 1025–1030.
- [5] Брудный В.Н., Будницкий Д.Л., Малисова Е.В. Радиационно-модифицированный арсенид галлия. *Изв. вузов, сер. Физика*, 1992, № 10, с. 61–66.
- [6] Зайцева Т.Н., Колин Н.Г., Кухто О.Л., Нарочный К.Н., Нойфех А.И. Дефектообразование при отжиге монокристаллов арсенида галлия. *ФТП*, 1994, т. 28, вып. 11, с. 2041–2044.
- [7] Брудный В.Н., Колин Н.Г., Меркурисов Д.И., Новиков В.А. Образование дефектов в эпитаксиальных слоях. *ФТП*, 2001, т. 35, вып. 6, с. 739–744.
- [8] Брудный В.Н., Колин Н.Г., Потапов А.И. Радиационное модифицирование арсенида галлия. *ФТП*, 2003, т. 37, вып. 4, с. 408–413.
- [9] Айзенштат Г.В., Ардышев В.М., Колин Н.Г. Меркурисов Д.И. Ядерное легирование полупроводников. *«Электронная промышленность»*. Наука, Технология, 2002, вып. 2/3, с. 69–72.
- [10] Boyko V.M., Bublik V.T., Dabiran A. et al. Neutron irradiation Effect in p-GaN. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2006, B24(5), pp. 2256–2261.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Косушкин В.Г., Горбунов А.К. Модель образования термостабильных дефектных центров при облучении арсенида галлия нейтронами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/806.html>

Косушкин Виктор Григорьевич окончил Ленинградский Технологический институт им. Ленсовета в 1972 г. Д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: рост монокристаллов полупроводников, организация инновационной деятельности в вузе. e-mail: kosushkin@gmail.com

Горбунов Александр Константинович окончил МФТИ в 1971 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: исследование процессов переноса в полупроводниках. e-mail: kf.mgtu_fiz@mail.ru