

25. Гидротермальный синтез – перспективный метод получения проницаемых материалов из дисперсного алюминия / Е.Е. Петюшик, В.Е. Романенков., Н.А. Афанасьева, Д.И. Клевченя, С.Ф. Тихов, Ю.Н. Беспалко, Н.А. Пахомов, Е.И. Немыкина, В.А. Садыков // Монография: 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы / ред.

кол.: А.Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск, 2010. – Гл. 15. – С. 328–352.

26. Афанасьева Н.А. Получение гидратационным твердением дисперсного алюминия капиллярно-пористой наноструктурной керамики для тепловых труб // Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Минск, 2013. – 24 с.

УДК 681

СОЗДАНИЕ ГЕТТЕРА В КРЕМНИИ МЕТОДОМ ИМПЛАНТАЦИИ СУРЬМЫ И ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Садовский П.К.¹, Челябинский А.Р.¹, Оджаев В.Б.¹, Турцевич А.С.², Васильев Ю.Б.²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Интеграл», Республика Беларусь

Одной из проблем полупроводникового материаловедения и технологии микроэлектроники является загрязнение кристалла примесями, в особенности переходными металлами (Cu, Fe, Ni и др.), вносящими в запрещенную зону глубокие уровни и ухудшающими электрофизические параметры и снижающими показатели выхода годных изделий микроэлектроники [1, 2]. Поэтому важным является очистка активных областей от примесей в процессе создания приборов. Для этих целей разработан ряд способов создания геттеров для неконтролируемых примесей.

Эффективными геттерами в кремнии являются слои пористого кремния. Они создаются преимущественно на нерабочей стороне пластины путем имплантации ионов H^+ либо He^+ и последующих термообработок, обеспечивающих образование микрополостей [3,4]. Для реализации способа необходимо использовать специальное оборудование для имплантации ионов водорода либо гелия.

Целью работы являлась разработка метода создания геттера в виде слоя пористого кремния путем имплантации стандартной для микроэлектронного производства примеси – Sb. Для формирования геттерного слоя пластины кремния имплантировались ионами Sb^+ с энергией 60 кэВ дозой $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Для электрической активации внедренной примеси проводилась термообработка при температуре 1000°C в течение 30 минут в атмосфере азота. Степень электрической активации в результате отжига при 1000°C составляла 21%. Остальная часть примеси вследствие превышения предела растворимости в кремнии выпадает в виде включений второй фазы (рис. 1, а). Пластины со сформированными включениями второй фазы сурьмы отжигались затем в атмосфере азота при температуре 1220°C в течение 4 час. Для этих образцов характерна мозаичная структура из светлых областей размером около 20–30 нм (рис. 1, б). При повышении

температуры до 1220°C повышается предел растворимости сурьмы. Электрическая активация примеси в этих слоях составляет 100%. Распад преципитатов и диффузия из них атомов сурьмы оставляет на их месте микропустоты, которые создают наблюдаемый в электронно-микроскопических изображениях контраст мозаичной структуры (рис. 1, б). Созданный слой микропустот является геттером для неконтролируемых примесей в кремнии.

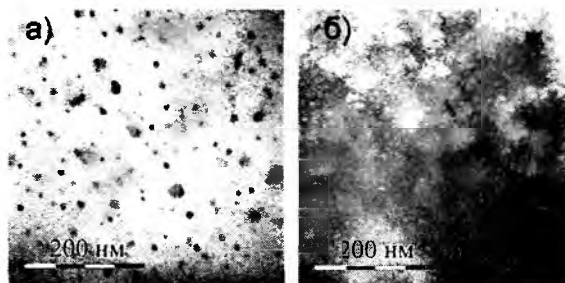


Рисунок 1 – Микрофотографии ПЭМ кремния, имплантированного ионами Sb^+ с энергией 60 кэВ, доза $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$: а – отжиг при температуре 1000°C , 30 минут; б – отжиг при температуре 1000°C в течение 30 минут и 1220°C в атмосфере азота в течение 4 часов

Геттерирующая термообработка проводилась при температуре 1000°C в течение 1 часа. Эффективным средством контроля степени чистоты кристалла является измерение времени жизни неравновесных носителей заряда. Измерения времени жизни проводилось фазовым СВЧ методом с объемным возбуждением носителей заряда [5].

Результаты измерений времени жизни неравновесных носителей заряда τ в пластинах кремния до и после процесса геттерирования представлены в таблице. Время жизни неравновесных носителей заряда в пластинах p- и r-

типа проводимости с геттерным слоем увеличивается по сравнению с исходным в 3–4 раза (таблица). Это свидетельствует об уменьшении в объеме кремния концентрации центров рекомбинации.

Таблица. Результаты измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии, прошедшем геттерирующую обработку.

Тип проводимости	Удельное сопротивление, $\Omega \cdot \text{см}$	τ исход, μs	τ конеч. μs
n	4.5	6.3	20
n	4.5	6.5	21
p	10	3.5	15
p	10	3.4	12

В отличие от имплантированных примесей He^+ и H^+ , которые при отжиге уходят из слоя на поверхность, примесь сурьмы после термообработки остается в слое кремния с геттером. Поэтому представлялось целесообразным изучить возможное взаимодействие примеси сурьмы с микропорами геттерного слоя во время термообработки при различных температурах. С этой целью пластины кремния со сформированным геттерным слоем подвергались отжигу в течение 30 минут в атмосфере азота при температурах 700, 800, 900 и 1000 °С.

При повышении температуры геттерирующего отжига возрастает доля электрически неактивной примеси сурьмы. Объемная концентрация сурьмы до проведения геттерирующих отжигов находилась на уровне предела растворимости в кремнии при 900 °С и ниже предела растворимости при 1000 °С. Это означает, что деактивация сурьмы протекает в основном не через образование второй фазы (образование преципитатов металлической сурьмы). Следует отметить, что при температуре отжига 700 °С электрическая активация сурьмы не снижается (99%), несмотря на то, что исходная концентрация примеси в слое превышала предел растворимости при этой температуре. Практически полное отсутствие деактивации сурьмы при отжиге 700 °С связывается с низким коэффициентом диффузии при этой температуре. Зависимость концентрации носителей заряда в слое от температуры отжига имеет экспоненциальный вид, что свидетельствует об активационном характере процесса деактивации сурьмы во время геттерирующего отжига.

На рис. 2 представлена зависимость натурального логарифма слоевой концентрации электрически неактивной примеси Sb от $1/kT$, линейный вид которой позволяет определить энергию активации данного процесса.

Деактивация примеси сурьмы при отжиге, когда ее концентрация ниже предела растворимости,

объясняется миграцией и захватом атомов Sb на оборванные связи микропустот. Значение энергии активации процесса захвата примеси сурьмы во время геттерирующего отжига, определенное из зависимости рис. 2, составило 0,9 эВ. Полученное значение меньше энергии активации диффузии сурьмы в кремнии $E_{\text{диф}} = 3,65$ эВ. Этот эффект может быть связан с воздействием на атомы примеси полей упругих деформаций решетки кремния, возникающих вокруг микропор.

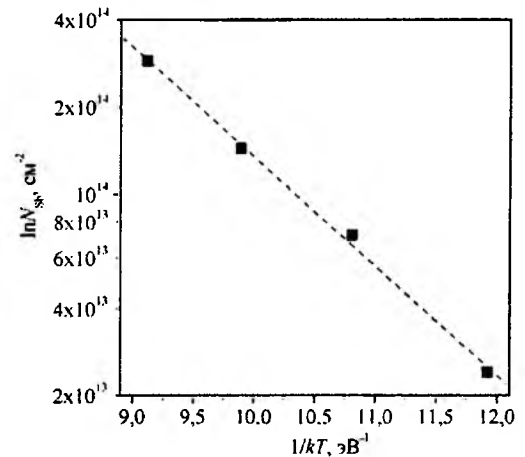


Рисунок 2 – Зависимость слоевой концентрации электрически неактивной доли примеси Sb от $1/kT$ (точки – экспериментальные значения, пунктирная прямая – линейная аппроксимация)

Эффект геттерирования был апробирован на приборных структурах. Исследовались серийные ИМС на биполярных транзисторах. Геттерный слой создавался путем имплантации ионов Sb^+ с обратной стороны пластины. Формирование включений второй фазы проводилось путем термообработки имплантированных пластин при 1000 °С и затем при 1220 °С для создания слоя пористого кремния. Для транзисторов, сформированных на пластинах с созданным геттером, коэффициенты усиления на 20% выше, чем в пластинах без геттерного слоя. Выход годных приборов на пластинах с геттером на 17% выше, чем созданных по базовой технологии.

Таким образом, установлено, что имплантация электрически активной примеси сурьмы может использоваться для создания геттера неконтролируемых примесей в кремнии. В качестве геттера выступают микропустоты, формирующиеся на месте преципитатов сурьмы во время высокотемпературного отжига. Времена жизни неравновесных носителей заряда в пластинах кремния *n*- и *p*-типа проводимости с геттерным слоем в 3–4 раза выше, чем без геттера. Коэффициент усиления биполярных транзисторов на 20% и выход годных изделий на 17% выше при наличии геттерного слоя кремния по сравнению с контрольными образцами.

1. Sachdeva R., Istratov A.A., Weber E.R. Recombination activity of copper in silicon // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 2937–2939.
2. The use of cavities for gettering in silicon microelectronic devices / Donnelly S.E. [et al.] // Mat. Sci. Eng. B. 2003. V. 206. P. 422–426.
3. Gettering of copper to hydrogen-induced cavities in silicon / Wong-Leung J. [et al.] // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 10. P. 1231–1233.
4. Wen C. Y., Spaeren F. Filling the voids in silicon single crystals by precipitation of Cu_3Si // Phil. Mag. 2007. V. 87. № 35. P. 5565–5579.
5. Бураков А. В., Якубеня С. Н., Янченко А. М. Прибор для бесконтактного измерения времени жизни неравновесных носителей заряда // ПТЭ. 1986. №4. С. 226–230.

УДК: 621.373:535

СТОХАСТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРАХ С АНИЗОТРОПНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Свирина Л.П.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Изучение сложных (хаотических и стохастических) режимов генерации актуально как для целей точного приборостроения, так и в связи с использованием таких режимов для кодирования и защиты информации, для объяснения закономерностей формирования динамических структур в многомерных нелинейных системах различного физического происхождения, а также для решения задач, связанных с возникновением порядка из хаоса.

Возможность возникновения стохастических режимов генерации, обусловленных влиянием случайных флуктуаций, исследовалась в лазерах с различными активными средами. В одномодовом линейном газовом лазере с анизотропным резонатором [1] при гармонической модуляции тока накачки наблюдались индуцированные шумом спонтанной эмиссии эффекты динамического восстановления поляризационной дестабилизации и стохастического блуждания траекторий в фазовом пространстве. В полупроводниковом лазере с инжекцией [2] показано, что периодические режимы генерации могут быть более чувствительными к воздействию шума спонтанной эмиссии, чем хаотические. В [3] изучалось влияние шума на долгопериодические режимы генерации, возникающие в результате каскада бифуркаций удвоения периода.

Целью настоящей работы является описание стохастических режимов генерации, возникающие под действием случайных флуктуаций, обнаруженных в анизотропных лазерах с линейной связью генерируемых волн: в четырехчастотном кольцевом He-Ne лазере (ЧКГЛ) и в двухчастотном твердотельном Nd:Yag лазере (ТТЛ) с диодной накачкой.

В ЧКГЛ с эллиптической поляризацией генерируемых волн чувствительные к воздействию случайных возмущений режимы генерации возникают при малых значениях коэффициента обратного рассеяния r [4].

Вблизи границы со стационарным режимом генерации бегущих волн при отстройке $x = -45.84$ МГц фиксируется асимметричный предельный цикл второго рода с вращением разности фаз. При этом интенсивность одной из волн I_2^- колеблется вблизи нуля, что делает систему чувствительной к воздействию случайных флуктуаций, природа которых может быть различной.

На рис. 1 показано влияние слабого возмущения на фазовые проекции и спектры мощности колеблющейся вблизи порога интенсивности I_2^- (левая колонка) и разности фаз Ψ_2 (правая колонка) при $r = 0.00001$, $x = 45.84$ МГц в отсутствие (а, в) и при наличии (б, г) белого шума.

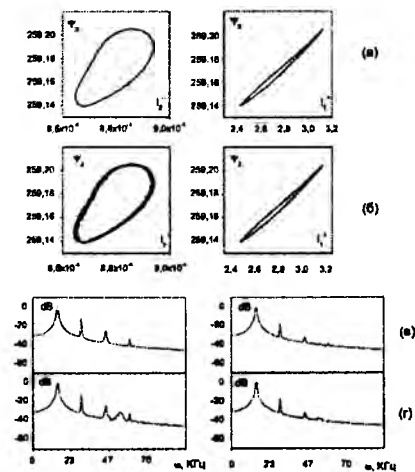


Рисунок 1

Проследим эволюцию данного предельного цикла II рода при увеличении отстройки частоты генерации от центра линии в присутствии δ -коррелированного белого шума с амплитудой $D = 10^{-7}$. Последовательность временных