

Влияние облучения ионами В⁺ и Р⁺ омических контактов на свойства СВЧ-транзисторов

Ю.П. Снитовский*

JSC Integral, Minsk, Belarus

*yu.snitovsky@tut.by

Аннотация. В данной работе изучено влияние ионного облучения омических контактов Mo/n⁺Si (111) и Mo/p⁺Si (111) СВЧ кремниевых эпитаксиально-планарных *n-p-n* транзисторов на их электрические параметры. Были изготовлены экспериментальные образцы транзисторов и на них проведены измерения токов утечки *p-n*-переходов коллектор-база, эмиттер-база и участка коллектор-эмиттер, сопротивление эмиттера, коэффициент усиления, время рассасывания неосновных носителей и измерение постоянного напряжения. Пленки Mo толщиной около 100 нм были осаждены методом магнетронного распыления. Облучение ионами Р⁺ сформированных омических контактов Mo/n⁺Si к эмиттерам (*n*⁺-области) и облучение ионами В⁺ сформированных омических контактов Mo/p⁺Si к базе (*p*⁺-области) осуществляли с планарной стороны кремниевой пластины. Имплантация проводилась дозой в диапазоне от $1.25 \cdot 10^{14}$ до $6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻² для контактов Mo/n⁺Si (111) и дозой $6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻² для контактов Mo/p⁺Si (111). Установлено, что облучение ионами Р⁺ сформированных омических контактов Mo/n⁺Si (111) к мелкозалегающим *p-n*-переходам не вызывает значительных изменений параметров активных полупроводниковых структур. Облучение ионами В⁺ омических контактов Mo/p⁺Si (111) к базе и варьирование ее степени легирования ионами В⁺ показало, что уменьшение дозы легирования базы вплоть до $2.5 \cdot 10^{15}$ см⁻² не приводит к значительным изменениям параметров транзисторов. Облучение контактов к базе транзисторов ионами В⁺ и термообработка при 770 К приводит к снижению величины токов утечки *p-n*-переходов.

Ключевые слова: СВЧ биполярные транзисторы, ионная имплантация, омические контакты, контакты молибден/кремний, пленки молибдена, кремниевые эпитаксиальные структуры, параметры транзистора.

1. Введение

Омические контакты в СВЧ-транзисторах и СБИС очень важны из-за более строгих требований к низкому сопротивлению и надежности контактов из-за уменьшения размеров прибора. Контакты тугоплавкий металл/кремний потенциально могут обеспечить повышенную устойчивость к высоким температурам по сравнению с обычными контактами Al/Si, особенно для скрытых контактов. При изучении термически сформированных контактов Mo/Si было продемонстрировано, что присутствие собственного оксида на границе раздела Mo/Si повышает температуру формирования и влияет на воспроизводимость образования силицида [1, 2]. Кроме того, было показано, что значительной величины напряжения располагаются по периферии таких контактов.

Появились сообщения (см., например, [1, 2]) о смешивании различных структур тугоплавкий металл/кремний путем ионной имплантации некоторых ионов. При использовании этой техники ионного смешивания силициды могут быть сформированы при пониженной температуре реакции. Ионная имплантация в структуру металл/кремний, используя ионы инертных газов, также формирует слой силицида, но также приводит к образованию пузырьков, что негативно сказывается на работе приборов. Если в качестве ионов для имплантации используются элементы III и V группы, такие как В, Р и As, формирование силицида и легирование подложки могут выполняться в одном процессе. Влияние воздействия Р⁺-ионов на омические контакты Mo/Si биполярного транзистора на размер зерна и шероховатость пленок Mo представлено в работе [3]. Изменения морфологии и электрофизических свойств структуры Cr/n-Si (111) в зависимости от быстрой термической обработки рассмотрены в [4].

Что касается свойств СВЧ кремниевых эпитаксиально-планарных $n-p-n$ транзисторов в диапазоне частот ≥ 1 ГГц, сформированные омические контакты $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ к базе (p^+ -области) которых облучали ионами V^+ , а сформированные омические контакты $\text{Mo}/n^+\text{Si}$ к эмиттерам (n^+ -области) которых облучали ионами P^+ , то таких данных в научной литературе обнаружить не удалось. Целью данной работы является исследование влияния облучения ионами V^+ и P^+ сформированных омических контактов на свойства СВЧ-транзисторов. При этом внедряли ионы P^+ через пленку Mo с вариацией дозы для оценки влияния облучения на параметры транзистора. Помимо этого, используя те же транзисторы, проводили облучение контактов к базе (p^+ -области) ионами V^+ также через пленку Mo . При этом манипулировали степенью легирования области базы с целью исследования возможности снижения дозы внедрения ионов V^+ при формировании транзисторов, что способствовало бы сокращению времени обработки и тем самым позволило повысить технологичность приборов.

2. Материалы и методы

2.1. Формирование планарной структуры транзистора

Режимы облучения омических контактов и низкотемпературной обработки, используемые в данной работе, помимо положительного эффекта – снижения величины контактного сопротивления приводят к изменению структуры переходного слоя, концентрации примеси и дефектов в приповерхностных слоях кремния, находящихся под пленкой молибдена [1, 2].

Для того, чтобы определить степень влияния облучения ионами омических контактов на электрические параметры активных структур, сформированных в кремнии, были проведены измерения токов утечки $p-n$ -переходов коллектор–база $I_{\text{КБ0}}$, эмиттер–база $I_{\text{ЭБ0}}$ и участка коллектор–эмиттер $I_{\text{КЭ0}}$, сопротивление эмиттера $R_{\text{Э}}$, коэффициента усиления $h_{21\text{Э}}$, измерения постоянного напряжения $U_{\text{ЭБ}}$ и времени рассасывания неосновных носителей $t_{\text{рас}}$ транзистора КТ637А-2 в специальных режимах измерения [5].

СВЧ-транзисторы являются удобным объектом для проведения экспериментов поскольку наиболее чувствительными к воздействию внедрения ионов через пленку металла будут мелкозалегающие $p-n$ -переходы, которые находятся близко от исследуемых омических контактов (глубина залегания эмиттерного $p-n$ -перехода КТ637А-2 составляет ~ 160 нм, базового – ~ 240 нм).

В транзисторах использовались эпитаксиальные структуры, выращенные на Si (111), которые соответствовали спецификации 7КЭФ1,5/380ЭКЭС (кремниевые подложки, выращенные по Чохральскому, ориентированные по (111), n^+ -типа (0.01 Ом·см) с выращенными эпитаксиальными слоями n -типа 7 мкм (1.5 Ом·см). Формирование планарной $n-p-n$ транзисторной структуры транзистора, полученного последовательной имплантацией ионов V^+ и P^+ схематически показано, например, в [6]).

Облучение сформированных омических контактов к эмиттерам КТ637-А-2, легированных P^+ -ионами с энергией 30 кэВ и дозой $4.375 \cdot 10^{15}$ см⁻², проводили через окна, вскрытые в слое фоторезиста над контактными окнами. P^+ -ионы внедряли через пленку Mo с энергией 100 кэВ и дозой в диапазоне от $1.25 \cdot 10^{14}$ до $6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻². Перед осаждением Mo кремниевые пластины химически очищали и протравливали. Пленки Mo толщиной около 100 нм распыляли на кремниевые пластины при температуре 520 К с помощью магнетронного источника постоянного тока. После снятия фоторезиста напыляли слой Al и проводили термообработку в атмосфере Ar при 720–770 К. Затем после фотолитографии, при которой формировали межсоединения, проводили измерение параметров транзисторов (Таблица 1).

Используя те же транзисторы, по описанной выше методике проводили облучение омических контактов к базе (p^+ -области) ионами бора. Энергия облучения – 60–100 кэВ, доза – $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. При этом варьировали степень легирования базы (образцы имплантировали дозой $6.875 \cdot 10^{15}$, $5.0 \cdot 10^{15}$ и $2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) с целью изучения возможности снижения дозы внедрения ионов B^+ при формировании транзисторов, что позволило бы сократить время обработки и тем самым повысить технологичность приборов. Кроме этого, как показали исследования, для создания низкоомных стабильных контактов достаточно проводить легирование при дозах значительно более низких по сравнению со штатными ($6.875 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) [7]. В Таблице 2 приведены данные измерения параметров транзисторов после проведения операции облучения контактов ионами бора.

2.2. Параметры КТ637А-2 после облучения омических контактов к эмиттерам ионами P^+

Полученные данные, приведенные в Таблице 1, свидетельствуют, что величина токов утечек p – n -переходов транзистора после облучения омических контактов к эмиттерам не изменяется.

Таблица 1. Параметры КТ637А-2 при облучении ионами P^+ с энергией 100 кэВ и дозой в диапазоне $1.25 \cdot 10^{14}$ – $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ омических контактов Mo/n^+Si к эмиттеру (n^+ -области). $I_{кЭ0}$, $I_{ЭБ0}$, $I_{кБ0}$ – токи утечки участка p – n -перехода коллектор–эмиттер, p – n -перехода эмиттер–база, p – n -перехода коллектор–база, $R_{Э}$ – сопротивление эмиттера, $U_{ЭБ}$ – напряжение при прямом смещении перехода эмиттер–база, $h_{21Э}$ – коэффициент усиления по току.

Контакты	№ опытов	$I_{кЭ0}$, (10^{-6} А)	$I_{ЭБ0}$, (10^{-6} А)	$I_{кБ0}$, (10^{-6} А)	$R_{Э}$, (Ом)	$U_{ЭБ}$, (В)	$h_{21Э}$
необлученные	1	2.6	0.47	2.2	0.35	1.1	80
	2	2.4	0.43	2.0	0.35	1.1	110
	3	2.4	1.30	1.9	0.35	1.1	70
	4	2.5	0.37	1.4	0.35	1.1	74
	5	2.4	0.40	3.0	0.35	1.1	92
облученные	1	2.3	0.48	2.5	0.35	1.1	45
	2	2.4	1.25	2.3	0.35	1.1	57
	3	2.2	0.36	2.7	0.35	1.1	70
	4	2.0	0.42	2.2	0.35	1.1	54
	5	2.1	0.39	2.0	0.35	1.1	63

Не отмечено изменения сопротивления $R_{Э}$ и величины падения напряжения при прямом смещении перехода эмиттер–база $U_{ЭБ}$. Происходит снижение величины коэффициента усиления $h_{21Э}$ примерно на 30 %, что может быть объяснено увеличением скорости рекомбинации носителей заряда вблизи границы раздела металл–полупроводник за счет образования в результате облучения контактов ионами P^+ слоя, имеющего высокую концентрацию атомов отдачи Mo и точечных дефектов [1, 2], что эквивалентно включению последовательно сопротивлению $R_{Э}$ дополнительного сопротивления.

Этот эффект может быть полезен для получения равномерного токораспределения в многоэмиттерных транзисторах, в которых для этой цели создают пленочные нихромовые и молибденовые резисторы. В целом видно, что облучение омических контактов ионами P^+ не вызывает значительных изменений параметров активных полупроводниковых структур.

2.3. Параметры КТ637А-2 после облучения омических контактов к базе ионами В⁺

Данные измерения параметров транзисторов свидетельствуют (см. Таблицу 2), что после проведения операции облучения контактов, уменьшение дозы легирования базы (р⁺-области) вплоть до $2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ не приводит к значительным изменениям параметров транзистора.

Таблица 2. Параметры КТ637А-2 при облучении ионами В⁺ с энергией 60–100 кэВ и дозой $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ омических контактов Мо/р⁺Si к базе (р⁺-области). $I_{КБ0}$, $I_{КЭ0}$, $I_{ЭБ0}$, – токи утечки р–п-перехода коллектор–база, участка р–п-перехода коллектор–эмиттер, р–п-перехода эмиттер–база, $R_{Э}$ – сопротивление эмиттера, $h_{21Э}$ – коэффициент усиления по току, $t_{рас}$ – время рассасывания неосновных носителей.

Доза легирования базы, 10^{15} см^{-2}	Доза облучения контактов, 10^{14} см^{-2}	$I_{КБ0}$, (10^{-6} А)	$I_{КЭ0}$, (10^{-6} А)	$I_{ЭБ0}$, (10^{-6} А)	$R_{Э}$, (Ом)	$h_{21Э}$	$t_{рас}$, (10^{-6} с)
6.875	-	26	2.6	0.4	0.5	89	23
	6.25	1.3	1.2	0.3	0.4	94	22
5.0	-	2.1	3.0	0.9	0.4	88	29
	6.25	0.5	0.6	0.3	0.4	96	28
2.5	-	14	20	0.2	0.5	105	29
	6.25	0.4	0.4	0.2	0.4	110	28

Отмечено лишь увеличение токов утечек р–п-переходов, которые в ряде случаев превышают предельные допустимые значения равные $1 \cdot 10^{-5} \text{ А}$. Пробивные напряжения при этом остаются в пределах нормы. Это говорит о возможности снижения величины дозы легирования базы по сравнению с применяемой при производстве СВЧ-транзисторов по крайней мере в два раза, что во столько же раз сокращает время проведения операции легирования.

Облучение контактов к базе ионами В⁺ и термообработка при 770 К привели к снижению величины токов утечки р–п-переходов, некоторому уменьшению сопротивления эмиттера и повышению коэффициента усиления транзисторов. В целом можно отметить, что в результате облучения ионами В⁺ происходит улучшение параметров активных структур СВЧ-транзисторов.

3. Выводы

С помощью измерения токов утечки р–п-переходов коллектор–база $I_{КБ0}$, эмиттер–база $I_{ЭБ0}$ и участка коллектор–эмиттер $I_{КЭ0}$, сопротивления эмиттера $R_{Э}$, коэффициента усиления $h_{21Э}$, измерения постоянного напряжения $U_{ЭБ}$ и времени рассасывания неосновных носителей $t_{рас}$ транзистора КТ637А-2 изучена степень влияния облучения ионами Р⁺ и В⁺ омических контактов Мо/п⁺Si (111) и Мо/р⁺Si (111) с планарной стороны кремниевой пластины на электрические параметры активных структур, сформированных в эпитаксиальном слое кремния.

Установлено, что при облучении омических контактов Мо/п⁺Si (111) ионами Р⁺ дозой в диапазоне от $1.25 \cdot 10^{14}$ до $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит только снижение величины коэффициента усиления $h_{21Э}$ примерно на 30 %, что вероятно обусловлено увеличением скорости рекомбинации носителей заряда вблизи границы раздела металл–полупроводник за счет образования в результате облучения контактов ионами, слоя имеющего высокую концентрацию атомов отдачи Мо и точечных дефектов, что эквивалентно включению последовательно сопротивлению эмиттера дополнительного сопротивления. Этот эффект может быть полезен для получения равномерного токораспределения в многоэмиттерных транзисторах, в которых для этих целей создают нихромовые и молибденовые резисторы.

При облучении омических контактов Mo/p⁺Si (111) ионами В⁺ дозой 6.25·10¹⁴ см⁻² и варьировании степени легирования области базы (образцы имплантировали дозой 6.875·10¹⁵, 5.0·10¹⁵ и 2.5·10¹⁵ см⁻²) установлено, что снижение дозы легирования р⁺-области вплоть до 2.5·10¹⁵ см⁻² не приводит к значительным изменениям параметров транзисторов. Отмечено лишь увеличение токов утечек р–п-переходов, которые в некоторых случаях превышают предельно допустимые значения равные 1·10⁻⁵ А. Пробивные напряжения при этом остаются в пределах нормы. Это свидетельствует о возможности снижения величины дозы легирования по сравнению с применяемой при производстве СВЧ-транзисторов по крайней мере в два раза, что во столько же раз сократит время проведения операции легирования базы. Облучение контактов Mo/Si (111) ионами Р⁺ и В⁺ не приводит к деградации электрических параметров активных планарных структур.

4. Список литературы

- [1] Ю.П. Снитовский, Изменение электрических свойств границы раздела «металл–полупроводник» под воздействием ионного облучения, *Вестник ЮГУ*, **4(51)**, 7, 2018, doi: 10.17816/byusu2018047-22
- [2] В.А. Солодуха, Ю.П. Снитовский, Я.А. Соловьев, Управляемые процессы трансформации параметров кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов ионными пучками, *Вестник ЮГУ*, № 4 (51), 23, 2018, doi: 10.17816/byusu20180423-37
- [3] Yu. Snitovsky, Ya. Solovjov, The effect of P⁺-ion exposure of ohmic contacts Mo/Si of bipolar transistor on the grain size of Mo films, *Proceeding of the 14th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators*, Washington, USA, 133, 2021, doi: 10.13182/T125-37172
- [4] T. Kuznetsova, V. Lapitskaya, J. Solovjov, S. Chizhik, V. Pilipenko, S. Aizikovich, Properties of CrSi₂ Layers Obtained by Rapid Heat Treatment of Cr Film on Silicon, *Nanomaterials*, **11**, 1734, 2021, doi: 10.3390/nano11071734
- [5] А.А. Зайцев, Ю.Н. Савельев, *Генераторные СВЧ транзисторы*. Москва: Радио и связь, 1985.
- [6] Ю.П. Снитовский, В.В. Нелаев, В.А. Ефремов, *Патент ВУ*, 15265.
- [7] Ю.Л. Бобченко, *Формирование омических контактов «тугоплавкий металл – кремний» при ионной имплантации в область границы раздела*, автореф. дис. канд. техн. Наук, Ин-т электроники АН БССР. Минск, 1987.