

## Влияние облучения ионами В<sup>+</sup> и Р<sup>+</sup> 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 Мо/n<sup>+</sup>Si (111) и Мо/p<sup>+</sup>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 Мо толщиной около 100 нм были осаждены методом магнетронного распыления. Облучение ионами Р<sup>+</sup> сформированных омических контактов Мо/n<sup>+</sup>Si к эмиттерам (*n*<sup>+</sup>-области) и облучение ионами В<sup>+</sup> сформированных омических контактов Мо/p<sup>+</sup>Si к базе (*p*<sup>+</sup>-области) осуществляли с планарной стороны кремниевой пластины. Имплантация проводилась дозой в диапазоне от 1.25·10<sup>14</sup> до 6.25·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> для контактов Мо/n<sup>+</sup>Si (111) и дозой 6.25·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> для контактов Мо/p<sup>+</sup>Si (111). Установлено, что облучение ионами Р<sup>+</sup> сформированных омических контактов Мо/n<sup>+</sup>Si (111) к мелкозалегающим *p-n*-переходам не вызывает значительных изменений параметров активных полупроводниковых структур. Облучение ионами В<sup>+</sup> омических контактов Мо/p<sup>+</sup>Si (111) к базе и варьирование ее степени легирования ионами В<sup>+</sup> показало, что уменьшение дозы легирования базы вплоть до 2.5·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> не приводит к значительным изменениям параметров транзисторов. Облучение контактов к базе транзисторов ионами В<sup>+</sup> 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 Мо/Si было продемонстрировано, что присутствие собственного оксида на границе раздела Мо/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<sup>+</sup>-ионов на омические контакты Мо/Si биполярного транзистора на размер зерна и шероховатость пленок Мо 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  $\geq 1$  ГГц, сформированные омические контакты  $\text{Mo}/p^+\text{Si}$  к базе ( $p^+$ -области) которых облучали ионами  $\text{V}^+$ , а сформированные омические контакты  $\text{Mo}/n^+\text{Si}$  к эмиттерам ( $n^+$ -области) которых облучали ионами  $\text{P}^+$ , то таких данных в научной литературе обнаружить не удалось. Целью данной работы является исследование влияния облучения ионами  $\text{V}^+$  и  $\text{P}^+$  сформированных омических контактов на свойства СВЧ-транзисторов. При этом внедряли ионы  $\text{P}^+$  через пленку  $\text{Mo}$  с вариацией дозы для оценки влияния облучения на параметры транзистора. Помимо этого, используя те же транзисторы, проводили облучение контактов к базе ( $p^+$ -области) ионами  $\text{V}^+$  также через пленку  $\text{Mo}$ . При этом манипулировали степенью легирования области базы с целью исследования возможности снижения дозы внедрения ионов  $\text{V}^+$  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  $I_{КБ0}$ , эмиттер–база  $I_{ЭБ0}$  и участка коллектор–эмиттер  $I_{КЭ0}$ , сопротивление эмиттера  $R_{Э}$ , коэффициента усиления  $h_{21Э}$ , измерения постоянного напряжения  $U_{ЭБ}$  и времени рассасывания неосновных носителей  $t_{рас}$  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  $\sim 160$  нм, базового –  $\sim 240$  нм).

В транзисторах использовались эпитаксиальные структуры, выращенные на  $\text{Si}$  (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  $\text{V}^+$  и  $\text{P}^+$  схематически показано, например, в [6]).

Облучение сформированных омических контактов к эмиттерам КТ637-А-2, легированных  $\text{P}^+$ -ионами с энергией 30 кэВ и дозой  $4.375 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, проводили через окна, вскрытые в слое фоторезиста над контактными окнами.  $\text{P}^+$ -ионы внедряли через пленку  $\text{Mo}$  с энергией 100 кэВ и дозой в диапазоне от  $1.25 \cdot 10^{14}$  до  $6.25 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Перед осаждением  $\text{Mo}$  кремниевые пластины химически очищали и протравливали. Пленки  $\text{Mo}$  толщиной около 100 нм распыляли на кремниевые пластины при температуре 520 К с помощью магнетронного источника постоянного тока. После снятия фоторезиста напыляли слой  $\text{Al}$  и проводили термообработку в атмосфере  $\text{Ar}$  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	$I_{кЭ0}$ , ( $10^{-6} \text{ А}$ )	$I_{ЭБ0}$ , ( $10^{-6} \text{ А}$ )	$I_{кБ0}$ , ( $10^{-6} \text{ А}$ )	$R_{Э}$ , (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<sup>+</sup>

Данные измерения параметров транзисторов свидетельствуют (см. Таблицу 2), что после проведения операции облучения контактов, уменьшение дозы легирования базы (р<sup>+</sup>-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<sup>+</sup> с энергией 60–100 кэВ и дозой  $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  омических контактов Мо/р<sup>+</sup>Si к базе (р<sup>+</sup>-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, $10^{15} \text{ см}^{-2}$	Доза облучения контактов, $10^{14} \text{ см}^{-2}$	$I_{КБ0}$ , ( $10^{-6} \text{ А}$ )	$I_{КЭ0}$ , ( $10^{-6} \text{ А}$ )	$I_{ЭБ0}$ , ( $10^{-6} \text{ А}$ )	$R_{Э}$ , (Ом)	$h_{21Э}$	$t_{рас}$ , ( $10^{-6} \text{ с}$ )
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<sup>+</sup> 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<sup>+</sup> 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<sup>+</sup> и В<sup>+</sup> омических контактов Мо/п<sup>+</sup>Si (111) и Мо/р<sup>+</sup>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<sup>+</sup>Si (111) ионами Р<sup>+</sup> 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<sup>+</sup>Si (111) ионами В<sup>+</sup> дозой 6.25·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> и варьировании степени легирования области базы (образцы имплантировали дозой 6.875·10<sup>15</sup>, 5.0·10<sup>15</sup> и 2.5·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>) установлено, что снижение дозы легирования р<sup>+</sup>-области вплоть до 2.5·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> 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<sup>-5</sup> 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<sup>+</sup> и В<sup>+</sup> 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<sup>+</sup>-ion exposure of ohmic contacts Mo/Si of bipolar transistor on the grain size of Mo films, *Proceeding of the 14<sup>th</sup> 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 CrSi<sub>2</sub> 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.