

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ БОРА ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ $\text{Mo/p}^+\text{Si}$ НА СВОЙСТВА СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

Ю. П. Снитовский

ОАО «Интеграл», ул. Казинца 121А, 220108 Минск, Беларусь, [yu.snitovsky@tut.by](mailto:yu.snitovsky@tut.by)

Изучено влияние облучения ионами бора сформированных омических контактов  $\text{Mo/p}^+\text{Si}$  к базе ( $p^+$ -области) на свойства кремниевого эпитаксиально-планарного  $n-p-n$  СВЧ-транзистора. Имплантация бора была выполнена дозой  $6.25 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. Для повышения технологичности прибора в ходе облучения контактов варьировалась степень легирования базы. Доза легирования  $p^+$ -области снижалась от  $6.875 \cdot 10^{15}$  до  $2.5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Данные измерения параметров транзисторов после проведения операции облучения контактов показали, что уменьшение дозы легирования  $p^+$ -области вплоть до  $2.5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> не приводит к деградации параметров активных планарных структур. Облучение контактов  $\text{Mo/p}^+\text{Si}$  к базе ( $p^+$ -области) СВЧ-транзисторов ионами бора и термообработка при 500 °С приводит к снижению величины токов утечки  $p-n$ -переходов. Возможно снижение величины дозы легирования базы по сравнению с применяемой в производстве СВЧ-транзисторов ~ в 2 раза, что сократит время проведения операции легирования ~ в 2 раза. Процесс исследован на системе молибден – кремний как одной из самых распространенных при производстве приборов, имеющих мелкозалегающие  $p-n$ -переходы.

**Ключевые слова:** СВЧ-транзистор; кремниевые эпитаксиальные структуры; омические контакты; контакты молибден/кремний; ионная имплантация; параметры транзистора.

## INFLUENCE OF IRRADIATION BY BORON IONS OF $\text{Mo/p}^+\text{Si}$ OHMIC-CONTACTS ON THE PROPERTIES OF MICROWAVE TRANSISTORS

Yu. Snitovsky

JSC "Integral" - managing company "Integral", 121 A Kazinca I. P., 220108, Minsk, Belarus, [yu.snitovsky@tut.by](mailto:yu.snitovsky@tut.by)

In this work, the author has shown that implantation boron through the film of molybdenum and the possibility of its use in the manufacturing of base ( $p^+$  region) of silicon epitaxial-planar  $n-p-n$  microwave transistors in the frequency range  $\geq 1$  GHz can take place. The transistors used epitaxial structures grown on Si (111) that complied with the 7KEEF1.5/380EKES0.01 specification. The implantation boron through the film of molybdenum was carried out a fluence  $6.25 \cdot 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup>. The implantation  $p^+$  region was carried out a fluence ranging between  $6.875 \cdot 10^{15}$  and  $2.5 \cdot 10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup>. Measuring parameters (leakage current of the  $p-n$  junction of collector–base  $I_{\text{CB0}}$ , emitter–base  $I_{\text{EB0}}$  and collector–emitter region  $I_{\text{CE0}}$ , emitter resistance  $R_{\text{E}}$ , gain  $h_{21\text{E}}$  and carrier-storage time constant  $\tau$ ) of transistors after the operation of irradiation of contacts showed that reducing the fluence of doping of the  $p^+$  base area up to  $2.5 \cdot 10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup> does not lead to significant changes in value of parameters of transistors. Only an increase in leakage currents of the  $p-n$  junctions was noted, which in some cases exceed the maximum permissible values ( $1 \cdot 10^{-5}$  A). Irradiation of contacts to the  $p^+$  base with boron ions and heat treatment at 500 °C leads to a decrease in the magnitude of leakage currents of the  $p-n$  junctions, to a certain decrease in the resistance of the emitter and to an increase in the gain of the transistors. It is possible to reduce the amount of the  $p^+$  base doping fluence in comparison with that used in the production of silicon epitaxial-planar  $n-p-n$  microwave transistors by at least 2 times, which reduces the time of the doping operation by the same amount and provides decrease of labor input and improvement of parameters of active structures of microwave transistors.

**Keywords:** microwave transistor; epitaxial silicon structures; ohmic contacts; molybdenum/silicon contacts; ion implantation; transistor parameters.

### Введение

Интерес к ионной имплантации вызван не радиационными нарушениями, образованными в процессе проникновения быстрых ионов, а тем, что в полупроводниках в результате химического воздействия ионов после их торможения формируются локальные легированные области, в частности, в Si [1, 2]. С точки зрения применения ионного внедрения в производстве полупроводниковых приборов внимание к радиационным нарушениям связано с потребностью свести их к минимуму посредством термообработки.

Как метод обработки полупроводников, ионное легирование открывает новые пути в управлении зарядом и глубиной распределения легирующей примеси. Возможность точного контроля за энергией и количеством внедренных ионов на единицу площади (дозой ионов) – основная первопричина непрерывно расширяющегося применения ионно-лучевой технологии.

Широкое распространение получили методы внедрения ионов и через маску: тонкие пленки диэлектриков и металлов [1, 3-7]. При легировании через маску примесь за счет рассеяния незначительно распространяется в горизонтальном направлении. Возможно образование перехода в полупроводнике через защитную маску и др. 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 которых облучали ионами  $\text{B}^+$ , то таких данных в литературе обнаружить не удалось. В связи с этим в работе изучалось влияние облучения омических контактов к базе (области  $p^+$ ) ионами  $\text{B}^+$  на его свойства. При этом манипулировали ее степенью легирования с целью исследования возможности снижения дозы внедрения ионов  $\text{B}^+$  при формировании транзисторов, что способствовало бы сокращению времени обработки и тем самым позволило повысить технологичность приборов. Особенности ионной бомбардировки заключа-

лись в том, что внедрение ионов осуществлялось через пленку Mo в область границы раздела Mo/Si контактов.

### Материалы и методы исследования

Режимы облучения омических контактов и низкотемпературной обработки, не считая положительного эффекта – снижения величины контактного сопротивления, приводят к изменению структуры, концентрации примеси и дефектов в приповерхностных слоях монокремния, находящихся под пленкой металла, см., например, [3, 4].

Высокочастотные транзисторные *p-n-p* структуры создавали в эпитаксиальном слое кремниевых эпитаксиальных однослойных структур 7КЭФ1.5/380ЭКЭС (111) с использованием ионов В<sup>+</sup> для формирования *p*<sup>+</sup>-пассивной базы (области *p*<sup>+</sup>) дозой  $D_1 = 6.875 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> и базы дозой  $D_1 = 12.5 \cdot 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> соответственно. Ионную имплантацию Р<sup>+</sup> осуществляли в окна в диоксиде кремния дозой  $D_1 = 4.375 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> для формирования эмиттера. Для определения меры влияния ионного облучения ионами бора сформированных омических контактов Mo/*p*<sup>+</sup>Si к области *p*<sup>+</sup> на параметры активных структур были проведены измерения токов утечки *p-n*-переходов коллектор–база  $I_{КБ0}$ , эмиттер–база  $I_{ЭБ0}$ , и участка коллектор–эмиттер  $I_{КЭ0}$ , сопротивления эмиттера  $R_{Э}$ , коэффициента усиления  $h_{21Э}$ , время рассасывания неосновных носителей  $t_{фас}$  транзисторов КТ637А-2. СВЧ-транзисторы, омические контакты к активным областям которых были сформированы осаждением двухслойной молибден–алюминиевой металлизации, являются удобным объектом для проведения эксперимента, потому как наиболее чувствительными к воздействию внедренных ионов через пленку молибдена будут мелкозалегающие *p-n*-переходы, находящиеся наиболее близко от исследуемых омических контактов (глубина залегания эмиттерного *p-n*-перехода КТ637А-2 составляет 160 нм, базового – 240 нм).

Омические контакты Mo/*p*<sup>+</sup>Si к базе формировали по методике, см., например, [3, 4]. В эксперименте облучение сформированных омических контактов к *p*<sup>+</sup>-пассивной базе КТ637А-2, легированной ионами В<sup>+</sup> при дозах  $D_1 = 6.875 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>;  $5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> и  $2.5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> проводили через окна, вскрытые в слое фоторезиста над контактными окнами к области *p*<sup>+</sup>, как и для омических контактов к эмиттеру [8].

Ионы бора внедряли через пленку Mo ~100 нм при энергии  $E_2 = 60-100$  кэВ и дозе  $D_2 = 6.25 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. После снятия фоторезиста напыляли слой алюминия и проводили термообработку в атмосфере аргона при 500 °С. Далее после фотолитографии по металлу, при которой формировали межсоединения, проводили измерение параметров транзисторов в специальных режимах.

В таблице 1 приведены данные измерения параметров транзисторов после проведения операции облучения Mo/*p*<sup>+</sup>Si контактов. При этом варьировали степень легирования *p*<sup>+</sup>-пассивной базы (области *p*<sup>+</sup>) с целью изучения возможности снижения дозы внедрения ионов В<sup>+</sup> при формировании структуры транзисторов, что позволило бы сократить время обработки и тем самым повысить тех-

нологичность приборов. Кроме того, как показали исследования, см., например, [3, 4, 9], для создания низкоомных стабильных контактов достаточно проводить легирование при дозах значительно более низких по сравнению со штатными ( $6.875 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>).

Таблица 1. Параметры КТ637А-2 при облучении ионами бора омических контактов Mo/*p*<sup>+</sup>Si к *p*<sup>+</sup>-пассивной базе (области *p*<sup>+</sup>)

Table 1. Parameters of КТ637А-2 when irradiated with boron ions of ohmic contacts Mo/*p*<sup>+</sup>Si to *p*<sup>+</sup>-passive base (*p*<sup>+</sup> area)

Доза легирования области <i>p</i> <sup>+</sup> $D_1$ , ион/см <sup>2</sup>	Доза облучения контактов $D_2$ , ион/см <sup>2</sup>	$I_{КБ0}$ , мкА	$I_{КЭ0}$ , мкА	$I_{ЭБ0}$ , мкА	$R_{Э}$ , Ом	$h_{21Э}$	$t_{фас}$ мкс
$6.875 \cdot 10^{15}$	–	26	2.6	0.4	0.5	89	23
	$6.25 \cdot 10^{14}$	1.3	1.2	0.3	0.4	94	22
$5.00 \cdot 10^{15}$	–	2.1	3.0	0.9	0.4	88	29
	$6.25 \cdot 10^{14}$	0.5	0.6	0.3	0.4	96	28
$2.5 \cdot 10^{15}$	–	14	20	0.2	0.5	105	29
	$6.25 \cdot 10^{14}$	0.4	0.4	0.2	0.4	110	28

При проведении экспериментов на приборах режимы облучения контактов выбирались, преимущественно, как и при исследовании на тестовых образцах [9].

### Результаты и их обсуждение

Из таблицы видно, что уменьшение дозы легирования области *p*<sup>+</sup> транзистора вплоть до  $2.5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> не приводит к значительному изменению величины параметров транзисторов. Отмечено лишь увеличение значений токов утечки *p-n*-переходов, которые в ряде случаев превышают предельно допустимые значения равные  $1 \cdot 10^{-5}$  А. При этом пробивные напряжения транзистора остаются в пределах нормы. Это свидетельствует о возможности снижения величины дозы легирования области *p*<sup>+</sup> базы по сравнению с применяемой при производстве СВЧ-транзисторов по крайней мере в 2 раза, что во столько же раз сокращает время проведения операции легирования.

Облучение контактов Mo/*p*<sup>+</sup>Si ионами В<sup>+</sup> и последующая термообработка при 500 °С, однако, приводит к снижению величины токов утечки *p-n*-переходов, некоторому уменьшению сопротивления эмиттера  $R_{Э}$  и повышению коэффициента усиления  $h_{21Э}$  транзисторов. В целом можно отметить, что в результате облучения ионами В<sup>+</sup> контактов Mo/*p*<sup>+</sup>Si происходит улучшение параметров активных структур СВЧ-транзисторов.

Отметим, что для определения меры влияния ионного облучения ионами фосфора сформированных омических контактов Mo/*n*<sup>+</sup>Si к эмиттерам КТ637А-2 на параметры активных структур, сформированных в эпитаксиальном слое, кроме измерения токов утечки *p-n*-переходов коллектор–база  $I_{КБ0}$ , эмиттер–база  $I_{ЭБ0}$  и участка коллектор–эмиттер  $I_{КЭ0}$ , сопротивления эмиттера  $R_{Э}$ , коэффициента усиления  $h_{21Э}$  были проведены и измерения постоянного напряжения эмиттер–база  $U_{ЭБ}$  [9]. Установлено, что величина токов утечек *p-n*-переходов транзисторов после облучения омических контактов Mo/*n*<sup>+</sup>Si к эмиттерам не изменяется. Изменения  $R_{Э}$  и величины падения  $U_{ЭБ}$  не заре-

гестрировано. Происходит, как и для транзисторов КТ916А [6], снижение величины  $h_{21э}$  примерно на 30 %. Это 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 молибдена и точечных дефектов, что эквивалентно включению последовательно сопротивлению эмиттера  $R_э$  дополнительного сопротивления.

Этот эффект может быть полезен для получения равномерного токораспределения в многоэмиттерных транзисторах, в которых для этих целей создают пленочные нихромовые или молибденовые резисторы.

Сравнение результатов измерения параметров КТ637А-2 при облучении омических контактов  $Mo/p^+Si$  ионами  $B^+$  к базе и при облучении контактов  $Mo/n^+Si$  к эмиттерам ионами  $P^+$  демонстрирует, что в целом облучение ионами омических контактов к мелкозалегающим  $p-n$ -переходам не вызывает значительных изменений параметров активных полупроводниковых структур.

### Заключение

Выполнена работа по созданию и облучению с помощью пучков ускоренных частиц определенной энергии в область границы раздела сформированных омических контактов  $Mo/p^+Si$  к базе КТ637А-2 на его свойства. Для определения степени влияния облучения ионами контактов на параметры активных структур, сформированных в эпитаксиальном слое монокремния, были произведены измерения параметров токов утечки  $p-n$ -переходов, сопротивление эмиттера, время рассасывания неосновных носителей и коэффициент усиления транзистора.

Установлено, что облучение контактов ионами бора не приводит к деградации параметров активных планарных структур СВЧ-транзисторов. Наблюдается, однако, снижение токов утечки  $p-n$ -переходов. Это дает возможность целенаправленно управлять свойствами имплантированного кремния и улучшать параметры дискретных приборов и ИС с глубиной залегания  $p-n$ -переходов менее 100 нм.

### Библиографические ссылки

1. Le D.H., Mayer J.W. Ion-Implanted Semiconductor Devices. *Proceedings of the IEEE* 1974; 62(9): 1241-1255.
2. Челябинский А.Р., Комаров Ф.Ф. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии. *Успехи физических наук* 2003; 173 (8): 813-846.
3. Солодуха В.А., Снитовский Ю.П., Соловьев Я.А. Управляемая трансформация параметров кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов ионными пучками. В кн.: Сиберт С.Д., отв. за выпуск. Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ – 2018)». (17 – 18 апреля 2018 года), г. Омск. Омск: Издательство ОмГТУ; 2018. С. 253-288.
4. Снитовский Ю.П. Изменение электрических свойств границы раздела металл–полупроводник под действием

ионного облучения. *Вестник Югорского государственного университета* 2018; (4): 7-22.

5. Snitovsky Yu.P. The formation of ohmic contacts of molybdenum/silicon at ion implantation into the interface region. In book: Edited by: Nikolay Ratakhin, Nikolai Koval. Alexey Yakovlev, Alexey Markov. Abstracts 6<sup>th</sup> International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018). (September 16 – 22, 2018), Tomsk Russia. Tomsk: TPU Publishing House, 2018. P. 372.
6. Снитовский Ю.П. Влияние облучения ионами фосфора омических контактов на параметры транзисторов. *Электронная промышленность* 1992; (1): 59-60.
7. Снитовский Ю.П. Новая технология изготовления мощных СВЧ-транзисторов. В кн.: Братчиков А.Н., редактор. Материалы 14-й Международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». (13-17 сентября 2004 года), г. Севастополь. Крым. Украина. (КрыМиКо' 2004). Севастополь: Севастопольский нац. техн. ун-т, 2004. С. 568-569.
8. Снитовский Ю.П., Нелаев В.В., Ефремов В.А. Способ изготовления транзистора. Патент BY 15265. Оpubl. 30.12.2011.
9. Снитовский Ю.П. Формирование омических контактов молибден/кремний при ионной имплантации в область границы раздела. *Известия высших учебных заведений. Физика* 2018; 61 (8/2): 155-159.

### References

1. Le D.H., Mayer J.W. Ion-Implanted Semiconductor Devices. *Proceedings of the IEEE* 1974; 62(9): 1241-1255.
2. Cheljadinskij A.R., Komarov F.F. Defektno-primesnaja inzhenerija v implantirovannom kremnii. [Defectno-impurity engineering in implanted silicon]. *Uspehi fizicheskikh nauk* 2003; 173(8): 813-846. (in Russian).
3. Soloduha V.A., Snitovskij Ju.P., Solov'ev Ja.A. Upravljajemaja transformacija parametrov kremnievyh bypolyarnyh SVCh-tranzistorov ionnymi puchkami. V kn.: Sibert S. D., отв. Za vypusk. Materialy 7-j Vserossijskoj nauchno-technicheskoy konferencii «Obmen opytom v oblasti sozdanija sverhshirokopolosnyh radiojelectronnyh system (SVCh – 2018)». (17 – 18 aprelya 2018 goda), g. Omsk. Omsk: Izdatel'stvo OmGTU; S. 253-288.
4. Snitovskij Ju.P. Izmeneniya jelektricheskikh svojstv granicy razdela metall-poluprovodnik pod dejstviem ionnogo obluchenija. *Vestnik Jugorskogo universiteta* 2018; (4): 7-22.
5. Snitovsky Yu.P. The formation of ohmic contacts of molybdenum/silicon at ion implantation into the interface region. In book: Edited by: Nikolay Ratakhin, Nikolai Koval. Alexey Yakovlev, Alexey Markov. Abstracts 6<sup>th</sup> International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018). (September 16 – 22, 2018), Tomsk Russia. Tomsk: TPU Publishing House, 2018. P. 372.
6. Snitovskij Ju.P. Vlijanie obluchenija ionami fosfora omicheskikh kontaktov na parametry tranzistorov. *Jelektronnaja promyshlennost'* 1992; (1): 59-60.
7. Snitovskij Ju.P. Novaja tehnologija izgotovlenija moshnyh SVCh-tranzistorov. V kn.: Bratnikov A.N., redactor. Materialy 14-j Mezhdunarodnoj krymskoj konferencii «SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii». (13 – 17 sentjabra, 2004 goda), g. Sevastopol'. Krym. Ukraina. (KryMiKo' 2004). Sevastopol': Sevastopol'skij nac. tehn. un-t, 2004. S. 568-569.
8. Snitovskij Ju.P., Nelaev V.V., Efremov V.A. Sposob izgotovlenija tranzistora. Patent BY 15265. Opubl. 30.12.2011.
9. Snitovskij Ju.P. Formirovanie omicheskikh kontaktov molibden/kremnij pri ionnoj implantacii v oblast' granicy razdela [The formation of ohmic contacts of molybdenum/silicon at ion implantation into the interface region]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika* 2018; 61(8/2); 155-159. (in Russian).