

Германиевый полевой транзистор с изолированным затвором (Ge-МДПТ)

И.Г. Неизвестный

В работе изложены итоги развития основного активного элемента микро- и нанoeлектроники Si МДПТ методом масштабирования. Показано, что дальнейший путь в этом направлении требует изменения материала подзатворного пространства на полупроводник с более высокой, чем у кремния, подвижностью. Таким материалом может стать германий, который достаточно успешно внедряется с этой целью в технологию кремниевых интегральных схем (ИС). Проводится сравнение характеристик таких приборов с ранее разработанными в ИФП СО РАН.

Ключевые слова: Ge, транзистор, металл-диэлектрик-полупроводник, подвижность.

Одной из основных задач современной полупроводниковой электроники является увеличение быстродействия основных активных приборов ИС. Таким общепринятым прибором с начала 60-х годов прошлого столетия является Si полевой транзистор с изолированным затвором – МДПТ (Металл-Диэлектрик-Полупроводник-Транзистор). Исходя из положения, что граничная частота $f_T \sim \mu/L_k$, на протяжении последних 40 лет основным способом для увеличения быстродействия является *уменьшение длины канала транзистора – L_k* (рис.1).

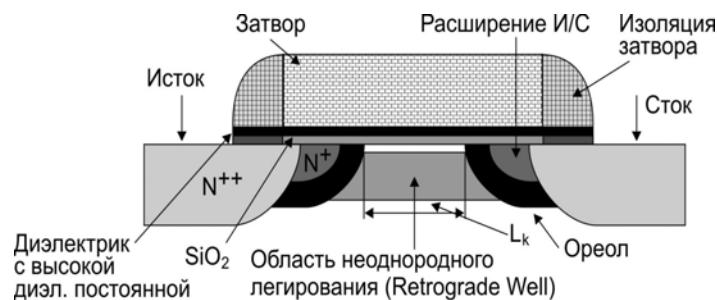


Рис. 1. Для ослабления нежелательных короткоканальных эффектов, применяются изменение профиля легирования при формировании исток/стоковых областей в горизонтальном направлении (расширение И/С, ореол) и изменение профиля легирования области канала

В то же время оказалось, что с каждым шагом в сторону уменьшения размеров канала увеличивается влияние *короткоканальных эффектов*. Основными из них являются:

- уменьшение порогового напряжения;
- растёт туннелирование электронов через затворный окисел;
- растёт инжекция горячих носителей в окисел;
- увеличивается вероятность прокола между истоком и стоком;
- увеличение последовательного сопротивления истока и стока;

– уменьшение подвижности в канале.

Все эти явления приводят к росту паразитных токов, что в свою очередь обуславливают увеличения соотношения между токами канала транзистора в закрытом состоянии – I_{off} к рабочему току – I_{on} (I_{off} / I_{on}).

Отметим, что приемлемым для эксплуатации транзистора этот параметр должен быть на уровне от 0.001 до 0.01.

Для предотвращения возникающей при уменьшении длины канала деградации определённых характеристик МДП и устранения причин этих нежелательных эффектов потребовался целый ряд новых конструктивных и технологических решений, кратко отмеченных на рис.1 и более подробно описанных в [1, 2].

При достижении длины канала 90 – 65 нм становятся всё сложнее и дороже описанные выше технологии, применяемые для борьбы с короткоканальными эффектами. Около 10 лет тому назад исследователи, а затем и технологи стали использовать воздействие механического напряжения на область канала для увеличения подвижности носителей заряда. Применяемые при этом технологии и полученные результаты подробно рассмотрены в обзоре [3].

Все вышеперечисленные способы увеличения быстродействия Si МДПТ были использованы в конструкции 45 нм транзистора, а затем и в КМОП структуре, разработанной фирмой Intel в 2008 году [4].

В то же время разработчики ведущих полупроводниковых фирм стали всё чаще исследовать возможность использовать в качестве материала для канала транзистора полупроводники с более высокой, чем у кремния, подвижностью носителей заряда. Наиболее подходящим для этой цели оказался германий. Дело в том, что в сплаве с кремнием этот материал довольно давно используется в планарной кремниевой технологии. Эпитаксиально выращенный над каналом добавочный тонкий слой GeSi, в сочетании с механическим напряжением, приводит к увеличению эффективной подвижности в канале [5].

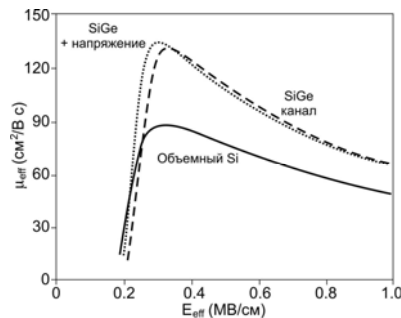


Рис.2. Изменение подвижности в канале для Р-МДПТ при введении слоя GeSi и воздействии механического сжатия на область канала

Как видно из рис.2, указанные изменения в технологии с участием Ge привели к двухкратному увеличению подвижности. Подобные результаты привели к довольно большому количеству публикаций, где исследуются различные аспекты поставленной задачи. Необходимо создать технологию, которая не только приводила бы к улучшению параметров транзисторов, но и сочеталась бы с имеющейся технологией кремниевых ИС.

С точки зрения разработчиков кремниевой планарной технологии, введение Ge должно «вписываться» в имеющуюся Si планарную КМОП схему с минимальными нововведениями. Этого требует прежде всего экономическая сторона вопроса. Главной же задачей в большинстве работ ставится формирование совершенной границы раздела германий – подзатворный диэлектрик, которая и определяет параметры МДПТ. В качестве примера можно привести работу [6], где рассматривается механизм формирования указанной границы при нанесении слоя GeSi с большим содержанием Ge на SiO₂, которая и участвует в создании слоя окисла Ge. Этой же проблеме посвящена и работа [7], где указанные проблемы решаются термической оксидацией германия. В работе [8] используется

нанесение оксинитрида (GeO_xN_y) в качестве пассиватора в структуре Ge-на-изоляторе. Авторы [9], пожалуй, наиболее близко подошли к решению введения германия в кремниевую планарную технологию, введя в рассмотрение кроме вышеперечисленных способов ещё и использование диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной (HfO_2). Их результаты по увеличению подвижности, приведённые на рис.3, по-видимому, лучшие в этой серии работ.

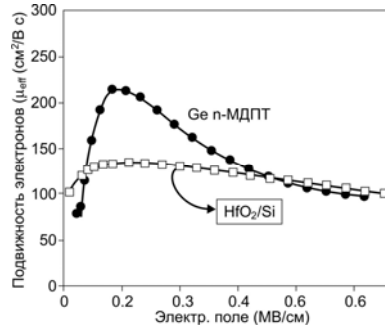


Рис.3. Подвижность электронов в Ge n-МДПТ [9].

Для сравнения приведены данные для транзистора с той же геометрией с использованием границы Si – HfO_2

Необходимо отметить, что германий был до начала 60-х годов основным материалом полупроводниковой электроники. Основными изделиями были диоды и биполярные транзисторы. Исследования электронных явлений на поверхности Ge проводились преимущественно для обеспечения стабильности работы этих приборов при изменении напряжения на их электродах и условий окружающей среды [10]. Затем было показано, что граница раздела GeO_2/Ge , полученная в результате травления германия, обладая низкой плотностью поверхностных состояний, позволяла в широком диапазоне модулировать поверхностную проводимость поперечным электрическим полем [11]. Это означало, что такая граница раздела уже годится для попытки создать МДП-транзистор, который из-за проблемы поверхностных состояний не удавалось осуществить с начала 30-х годов, когда были выданы патенты на этот прибор [12]. К сожалению, окисел германия, который и определял эти превосходные параметры границы раздела, растворим в воде и поэтому не мог быть использован в планарной технологии.

В середине 60-х годов после появления работ по созданию структуры Si – SiO_2 [13] началось стремительное развитие кремниевой МДП микроэлектроники. В создании промышленной технологии ИС на Si были вложены огромные средства мировой экономики. И успехи в этом процессе, определившие основные параметры новой технической революции и внедрение этих результатов во все области повседневной жизни, отодвинули на далёкую перспективу широкое использование других полупроводников, обладающих более высокой подвижностью носителей заряда.

Несмотря на это в 70-х годах прошлого столетия в Институте физики полупроводников была проведена разработка «замкнутой» технологии германиевого МДП-транзистора [14, 15]. Прежде всего был проведён широкий поиск диэлектриков с минимальной генерацией поверхностных состояний на поверхности германия (рис.4).

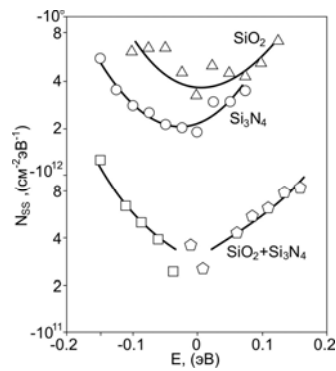


Рис.4 . Зависимость плотности поверхностных состояний от энергетического положения в запрещённой зоне германия, полученные для различных диэлектриков [14]

Необходимо напомнить, что практически всегда подслоем для всех диэлектриков служил тонкий слой GeO_2 . Из рис. 4 хорошо видно преимущество пары $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$, нанесение которых определяло плотность поверхностных состояний в середине запрещённой зоны на поверхности Ge на уровне несколько единиц $10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$.

Отметим также, что нанесение указанных диэлектриков проводилось при пониженных по сравнению с кремниевой технологией температурах. Наличие нитрида кремния определило и высокую стабильность параметров полученных на основе этой МДП системы транзисторов с изолированным затвором [15] рис. 5.

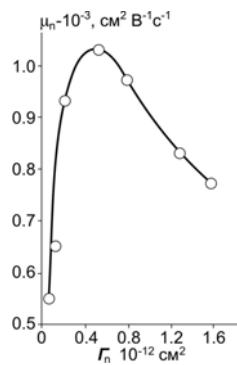


Рис. 5. Зависимость дрейфовой подвижности электронов от их концентрации в канале [15]

Заключение

В настоящее время применение методов масштабирования (уменьшения длины канала), использование методов увеличения подвижности носителей заряда при приложении механического напряжения к каналу и т.д. близки к своему теоретически достижимому результату. Усилия разработчиков сосредотачиваются на использовании для повышения быстродействия германия, обладающего более высокой, чем у кремния, подвижностью. В работе приводятся данные разработки ИФП СО РАН в Ge-МДП-транзисторов (70-х годах XX столетия), обладавших значительно более высокими параметрами, чем для разработок, приведённых в современной литературе.

Литература

1. Г.Я. Красников. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. - М.: Техносфера. Ч.1 - 2002 г., Ч.2 - 2004 г.
2. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный. Наноструктуры: физика, технология, применение. - Новосибирск, НГТУ, 2008 г.
3. И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. Использование напряжённого кремния в МДП-транзисторах и КМОП-структурах. - Микроэлектроника. Т.38, № 2, стр. 83 – 98, 2009.
4. Dick James. "Intel's evolution: Strained silicon to high- k and metal gate" Sol. St. Tech. November 2007.
5. Wen-Shiang Liao et al. "PMOS hole mobility enhancement through SiGe conductive channel and highly compressive ILD-SiN_x stressing layer" IEEE Electr. Dev. Lett. v.29. № 1, January 2008. p. 86 – 88.
6. S.Balakumar et al. "SiGeO layer formation mechanism at the SiGe/oxide interface during Ge condensation". Appl. Phys. Lett. v.90, p.032111(2007).
7. Hiroshi Matsubara et al. "Evidence of low interface trap density in GeO₂/Ge metal-oxide-semiconductor structures fabricated by thermal oxidation". Appl. Phys. Lett. v.90, p.032104 (2008).
8. T. Signamarcheix et al. "Germanium oxynitrid (GeO_xN_y) as a back interface passivation layer for germanium-on-insulator substrate" Appl. Phys. Lett. v.93, p.022109(2008).
9. Nan Wu et al. " Gate-First germanium nMOSFET with CVD HfO₂ gate dielectric and silicon surface passivation" IEEE Elect. Dev. Lett. vol.27. № 6, June 2006, p. 479 – 491.
10. А.В. Ржанов, И.Г. Неизвестный, В.В. Росляков. Исследование поверхностной проводимости и поверхностной рекомбинации на образцах германия. ЖТФ, т. 26, 2142 (1956).
11. А.В. Ржанов, Ю.Ф. Новотоцкий-Власов, И.Г. Неизвестный. Исследование эффекта поля и поверхностной рекомбинации в образцах германия. ЖТФ т. 27, вып.11, 1957. стр. 2441 – 2450.
12. Patent 1 745 175 U.S. "Method and apparatus for controlling electric current" Lilienfeld.-Appl. Field 8 oct.1929, granted 18 Jan.1930.
13. D.Kang, M.M.Attala. "Silicon-silicon dioxide field iduced surface devices". Presented at the IRE-AIEE Solid State Device Res. Conf. Pittsburg PA, 1960.
14. A.V.Rzhanov, I.G.Neizvestny. "Germanium MIS structure" Thin Sol. Films. V.58, (1979), p. 37 – 42.
15. Квон Зе Дон, И.Г. Неизвестный, В.Н. Овсяк, А.В. Ржанов. Германиевый МДП-транзистор. - Микроэлектроника, т. 5, вып. 4, 1976, стр. 363 – 366.

Статья поступила в редакцию 08.06.2009

Неизвестный Игорь Георгиевич

д.ф-м.н., чл. корр. РАН, советник РАН, ИФП СО РАН (Новосибирск 90, пр-кт Лаврентьева, 13)

тел. (383) 3-332-367, e-mail: neizv@isp.nsc.ru

Germanium field-effect-transistor (Ge MOSFET)

I.G. Neizvestny

The short summary of high frequency Si-MOSFET developed with help the scaling is described. For next step speed-performance enhancment is needed using semiconductor which has mobility more than Si. The most suitable material for this aims is Ge. The comparison recent date with result has published in papers Institute of Semiconductor Physics SBRAS many years ago.

Keywords: Ge, transistor, metal-oxide-semiconductor, mobility.