

Д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ, С. А. ИСМАЙЛОВА

Азербайджан, г. Баку, Азербайджанское национальное  
аэрокосмическое агентство  
E-mail: jamaljav@yahoo.com

Дата поступления в редакцию  
08.08 2000 г.  
Оппонент к. т. н. Р. М. РАГИМОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ ХОЛЛА РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

*Экспериментально определены минимальные топологические размеры, ниже которых уровень механических напряжений становится недопустимо высок.*

На параметры датчиков Холла значительное влияние оказывают упругие механические напряжения, возникающие в эпитаксиальных структурах вследствие различия температурных коэффициентов объемного расширения входящих в них компонентов [1, 2]. Это особенно актуально для гетероструктур [3] и трехмерных ИС [4, 5].

На распределение механических напряжений в мультислойной полупроводниковой структуре могут оказывать влияние структурные дефекты, возникающие в переходном слое «пленка – подложка» [6] или же на границе монообласти с диэлектриком при изготовлении элементов по технологии с полной диэлектрической изоляцией. Поэтому представляется целесообразным провести исследование механических напряжений в структурах, в которых имеются в наличии оба указанных выше фактора. Таковыми являются структуры с боковой диэлектрической изоляцией, в которых имеются границы раздела как между эпитаксиальной пленкой и подложкой, так и между эпитаксиальной пленкой и диэлектриком. Изучение таких структур в первом приближении может дать представление о распределении механических напряжений в зависимости от геометрических размеров и формы образца в обоих типах двухслойных структур.

Исследование механических напряжений  $\sigma_i$  проводилось методом локального индентирования [7]. Известно, что при использовании локального индентирования экспериментально определяемый коэффициент трещиностойкости должен зависеть от величины механических напряжений. Эффективное напряжение в вершине поверхностной трещины, распространяющейся от индентора в слое с остаточными напряжениями, может быть представлено в виде

$$\sigma_{\text{эф}} = \sigma_{\text{п}} - \sigma_i, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{п}}$  – растягивающее напряжение, непосредственно создаваемое нагруженным точечным индентором в поверхностном слое образца;

$\sigma_i$  – остаточное напряжение, возникающее в слое материала в процессе его изготовления.

Предположив, что нагружение точечным индентором является сосредоточенной силой, напряжение в некоторой точке вблизи поверхности образца можно записать в виде

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{1 - 2\nu}{\pi} \frac{P}{C_{\text{н}}^2}, \quad (2)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$P$  – нагрузка на индентор;

$C_{\text{н}}$  – длина трещины у индентора в напряженном слое материала.

Из (2) следует, что чем меньше расстояние пробегает трещина от точки приложения силы, тем большие напряжения растяжения действуют со стороны индентора в области кристалла, где остановилась трещина. Отсюда, учитывая, что величина эффективно напряжения  $\sigma_{\text{эф}}$ , действующего в области материала вблизи вершины трещины при ее остановке в нарушенном слое, должна быть равна напряжению  $\sigma$ , действующему в структурно неискаженном материале в месте остановки трещины, можно записать выражение, определяющее величину остаточных напряжений в вершине трещины:

$$\sigma_i = \frac{1 - 2\nu}{\pi} \left( \frac{P}{C_{\text{н}}^2} - \frac{P}{C^2} \right), \quad (3)$$

где  $C$  – длина трещины у индентора в неискаженном материале.

Из (3) следует, что чем выше уровень остаточных напряжений, действующих в неискаженном слое материала, тем в большей степени длина радиальных трещин  $\bar{C}_{\text{н}}$ , распространяющихся в этом слое под действием одной и той же нагрузки, будут отличаться от длины трещины  $C$  в совершенном материале.

Образцы для исследования влияния геометрических факторов на распределение остаточных напряжений в двухслойной структуре были сформированы на тестовом кристалле (рис. 1) по технологии с боковой диэлектрической изоляцией пленками поликристаллического кремния (ПК), выращенными в едином эпитаксиальном процессе с пленками монокристаллического кремния (МК), согласно [8]. Исследование трещиностойкости проводилось с помощью прибора, представляющего собой микроскоп, снабженный специальным предметным столиком и механизмом нагружения, в котором закрепляются алмазные наконечники.

## ДАТЧИКИ

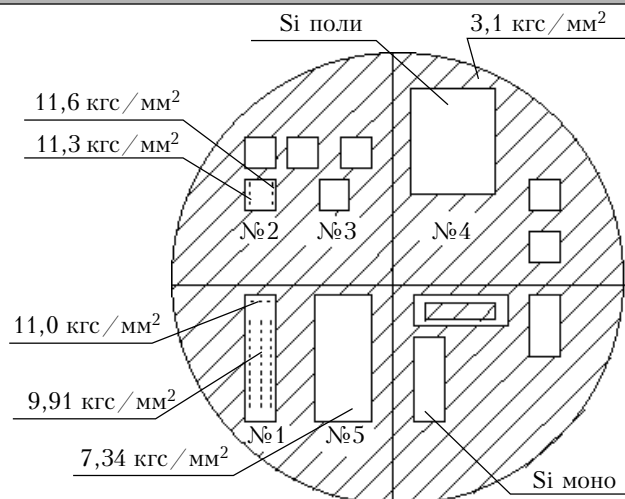


Рис. 1. Топология тестового кристалла, содержащего элементы Холла различной геометрии и размеров, с боковой диэлектрической изоляцией пленками поликристаллического кремния

Для измерения величины остаточных напряжений в областях МК на поверхность последних наносились отпечатки алмазной пирамидой при статических нагрузках на индентор 50, 80 и 120 гс. Для оценки распределения уровня остаточных напряжений в монообластях, окруженных пленками ПК, в пределах одного монокристаллического элемента отпечатки наносились в центре его и вблизи границы.

При вычислении  $\sigma$  по формуле (3) в качестве неискаженного материала (эталоны) использовался монокремний со снятым химической полировкой нарушенным слоем, имеющий ту же кристаллографическую ориентацию, что и исследуемый материал.

Полученные результаты представлены на рис. 1.

Анализируя данные рис. 1, можно сделать вывод, что величина остаточных напряжений, возникающих в монообластях, сравнительно невелика — в среднем до 11 кгс/мм<sup>2</sup>. Относительно влияния формы и размеров на величину  $\sigma$  можно, по-видимому, сказать, что значения остаточных напряжений зависят не столько от формы элемента, сколько от его размеров. Чем меньше элемент, тем больше уровень возникших в нем напряжений. Так, для элементов № 1 и № 5, аналогичных по форме, но отличающихся по размеру средней части, напряжения больше в элементе № 1 (9,91 кгс/мм<sup>2</sup>), имеющем минимальный размер 30 мкм, чем в элементе № 5 (7,34 кгс/мм<sup>2</sup>) шириной 50 мкм. Как видно из рисунка, минимальное значение механических напряжений имеет образец № 4 (3,1 кгс/мм<sup>2</sup>) с размерами 330×220 мкм. Эта величина меньше критического значения 4 кгс/мм<sup>2</sup>, достаточного, согласно [2], для возникновения дислокаций в монокристаллических пленках кремния, которые могут перераспределяться при повышении температуры и тем самым приводить к дрейфу остаточных напряжений.

Как отмечалось в [9], в датчиках Холла (ДХ) малых размеров при ширине рабочего тела холловского элемента  $b=20l_D$  ( $l_D$  — длина Дебая) измеряемое напряжение всего на 10% меньше расчетной

эдс Холла, и поправочным коэффициентом можно пренебречь. Для пленок кремния с концентрацией  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> это условие выполняется уже при ширине ДХ порядка 10 мкм. Однако несмотря на стремление к повышению плотности упаковки, проектирование ДХ с такой малой шириной не представляется возможным, поскольку гораздо более важным параметром для интегральных ДХ, используемых совместно с ИС усиления сигналов, является величина остаточного напряжения и ее стабильность, на которые в первую очередь оказывают влияние механические напряжения. Авторы [9] при проведении своих расчетов не принимали во внимание этот фактор. Учет же влияния механических напряжений и необходимость сведения их к минимуму, как показывает эксперимент, требует проектирования ДХ с гораздо большими геометрическими размерами. Критерием в выборе ширины элемента при этом может служить величина механических напряжений порядка 4 кгс/мм<sup>2</sup>, которую можно принять за предельно допустимое значение при проектировании интегральных ДХ.

Исходя из вышеизложенного при разработке топологии ДХ нами были выбраны следующие геометрические размеры холловского элемента: ширина  $b$  — 200 мкм, длина  $a$  — 300 мкм, токовые электроды в форме прямоугольника размерами 260×30 мкм, а холловские контакты — в форме квадратов со стороной 20 мкм, расположенных внутри выступов длиной 60 мкм (рис. 2).

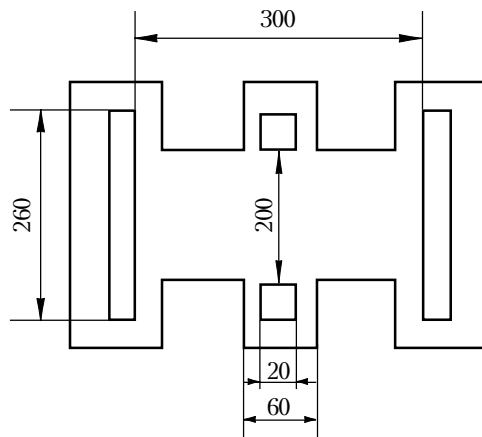


Рис. 2. Топология интегрального датчика Холла

На основе выбранной физической структуры и топологии были рассчитаны электрические параметры ДХ при применении эпитаксиальных пленок 13 КЭФ-5, выращенных на подложках 400 ЭКДБ-10. Входное и выходное сопротивление ДХ, вычисленные по формуле  $R=pa/bd$  ( $p$  — удельное сопротивление;  $d$  — толщина эпитаксиальной пленки), оказались равными 4,4 и 2,5 кОм, соответственно. Постоянная Холла для выбранного удельного сопротивления эпитаксиальной пленки составляет  $6,2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>·К<sup>-1</sup>, а чувствительность равна  $4,9 \cdot 10^{-2}$  мВ/мА·Гс. Это означает, что при токе 1 мА и магнитной индукции 100 Гс на холловских контактах будет возникать напряжение порядка 5 мВ.

Полученное выходное напряжение вполне достаточно для стыковки ДХ с интегральными операционными усилителями и создания преобразователя магнитного поля полностью в интегральном исполнении.

\*\*\*

Таким образом, исследование распределения механических напряжений в элементах эпитаксиальных структур в зависимости от их размеров и конфигурации показало, что существуют минимальные размеры эпитаксиальных датчиков Холла (330×220 мкм), при уменьшении которых возникают дислокации, вызывающие временные и температурные дрейфы их параметров.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Соколов В. И., Федорович Н. А. Релаксация механических напряжений в окисных пленках на кремнии // Физика твердого тела. — 1982. — Т. 24, № 5. — С. 1440—1441.
2. Романов А. С., Щеглова В. В. Механические напряжения в тонких пленках // Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы. — 1981. — Вып. 6.
3. Гусейнов Я. Ю., Касимов Ф. Д. Датчики Холла на основе гетероструктур  $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x-i-\text{GaAs}$  // "Fizika",

Ин-т физики АН Азербайджана. — 1999. — Т. 5, №4. — С. 41—43.

4. Королев М. А., Шумский И. А. Интеллектуальные измерительные микросистемы на основе структур кремний-на-изоляторе // Изв. вузов. Электроника. — 1998. — № 5. — С. 34—38.

5. Kasimov F. D., Guseinov Ya. Yu. Three-dimensional intellectual sensors of magnetic field on the base of Hall effect // Proceeding 5th Pan Pacific International Microelectronics Conference. — USA, Hawaii, January 25—27, 2000. — P. 299—301.

6. Михайлов И. Ф., Федоров А. Г. Определение критической толщины слоя и границ области накопления дислокаций в диффузионно-легированных монокристаллах // Микроэлектроника. — 1989. — Т. 18, вып. 1. — С. 56—60.

7. Алехин В. П., Булычев С. И., Шошоров М. Х. Определение поверхностной энергии методом микровдавливания индентора // Проблемы прочности. — 1979. — № 1. — С. 19—23.

8. Abdullajev A. G., Kasimov F. D. The simultaneous growth of mono- and polycrystalline silicon films // Thin Solid Films. — 1984. — Vol. 115, N 3. — P. 237—243.

9. Васильев В. И., Лонгинов В. В., Соловьев А. К. О датчиках Холла малых размеров // Радиотехника и электроника. — 1978. — № 2. — С. 375—384.

К. т. н. Е. Б. ПЛАВИНСКИЙ, к. т. н. Н. Б. КОПЫТЧУК

Украина, г. Одесса, Гос. политехнический ун-т

По материалам доклада на МНПК «Современные информационные и электронные технологии» («СИЭТ-2000»). — 23—26 мая 2000 г., Одесса

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР

*Разработанный прибор позволяет контролировать содержание кислорода в воздушных смесях в диапазоне 0—25% с погрешностью анализа не более 1%.*

В различных отраслях народного хозяйства возникают задачи контроля содержания кислорода в воздухе и в воздушных смесях внутри аппаратов и агрегатов для обеспечения жизнедеятельности персонала или при проведении ремонтных работ.

Существующие кислородные газоанализаторы, основанные на магнитном методе анализа, малоприменимы из-за больших габаритов и инерционности. Кроме того, их сложно применять во взрыво- и пожароопасных условиях.

Одним из перспективных методов анализа содержания кислорода и кислородосодержащих соединений является люминесцентный метод, позволяющий создать малогабаритные приборы и волоконно-оптические системы газового контроля.

Известно, что кинетика тушения кислородом электронно-возбужденных состояний молекул органических красителей и металлоорганических комплексов

группы платины описывается законом Штерна—Фольмера:

$$I_0/I=1+K_q t[\text{O}_2] \quad (1)$$

где  $I_0$  и  $I$  — соответственно интенсивность люминесценции в отсутствии и при наличии кислорода;

$K_q$  — константа скорости тушения;

$t$  — время жизни возбужденных молекул в отсутствие кислорода;

$[\text{O}_2]$  — концентрация кислорода.

У большинства металлоорганических комплексов полосы поглощения и излучения люминесценции лежат в видимой области оптического спектра, например, возбуждение рутениевого комплекса происходит в синей (470 нм), а люминесценция — в оранжевой (620 нм) областях.

Развитие оптоэлектроники и технологий органической химии позволяет применить в газоанализаторе твердотельные источники и приемники излучения, а чувствительный элемент выполнить в виде полимерной матрицы с внедренным в нее люминесцентным веществом.

Основой чувствительного элемента могут служить комплексы производных фенантролина с руте-